

AUF DEN SPUREN DES LEBENS

Bericht zur Expedition
in das Eis von Spitzbergen
vom 17. Mai 1999 bis 14. September 2000

10. Januar 2001

Technische Universität Hamburg-Harburg

Prof. Dr. Hauke Trinks

AUF DEN SPUREN DES LEBENS

(Origin of life in sea ice)

Hauke Trinks

Technical University of Hamburg-Harburg
D - 21079 Hamburg
Tel.:+49 40 42878 3476 priv. +49 4189 691
Fax:+49 40 42878 2382
Email: trinks@tu-harburg.de

Abstract

A hypothesis is set up, that sea ice on the primitive Earth 4 billions years ago could have been suitable to support the generation of life. An expedition into the ice of Spitzbergen was performed with a boat equipped with scientific instruments. The results show, that sea ice has special properties which may contribute to the development of organic macromolecules supposed to be precursors of life. Sea ice consists of small regions of nearly pure frozen H₂O and of liquid brine with high salinity. The microstructure of sea ice includes flexible thin surface layers composed by hydrogen bindings, processes with energy exchange, catalytic reactions, demixing phenomena and last not least the presence of numerous vital microorganisms. The bacteria of today live successful in sea ice exactly as their ancestors at the beginning of life may have done originated out of macromolecular precursors built in the sea ice reactor.

(down load: www.tu-harburg.de/et1/trinks)

Zusammenfassung

Es wird die Hypothese aufgestellt, daß das erste Leben vor 4 Mrd. Jahren im Meereis auf der Urerde entstanden sein könnte. Zur Bekräftigung dieser Hypothese wurde eine ganzjährige Expedition in das Eis von Spitzbergen auf 80° nördlicher Breite durchgeführt. Dabei wurden viele experimentelle Ergebnisse über die Mikrostruktur und das dynamische Verhalten von Meereis sowie über die darin lebenden Mikroorganismen gewonnen. Meereis ist ein Gebilde, das einem lebenden Organismus sehr ähnlich ist. Es entsteht innerhalb eines Jahres aus kleinen Anfangsaggregaten, wächst zu einem komplexen System heran, altert und vergeht schließlich wieder. Meereis stellt offensichtlich ein ideales Lebensumfeld für kälteliebenden Bakterien dar. Diese sog. Psychrophilen sind für die potentielle Nutzung in der Nahrungsmittel-, Reinigungs- und Umweltschutzindustrie wegen der auch bei Kälte wirksamen Enzyme interessant. Zahlreiche Proben mit Psychrophilen wurden während der Expedition im Meereis gewonnen und zur weiteren Untersuchung an die TUHH gesandt (Prof. Antranikian).

Ausgehend von den Expeditionsergebnissen und von den bereits publizierten Erkenntnissen anderer Wissenschaftler wird die Entwicklung skizziert, wie das erste Leben von der Ursuppe ausgehend im Meereis entstanden sein könnte. Im Meereis werden einfache Bausteine des Lebens, wie z.B. Aminosäuren sowie mineralische Staubpartikel während des Gefriervorgangs aufkonzentriert. Rein thermodynamische Überlegungen zu Erstarrungs- bzw. Auftauvorgängen und ebenso zu der beobachtbaren Salzkristallisation ergeben das Bild eines permanenten, hohen Energietransfers. Im mikroskopischen Bereich könnten, insbesondere unter dem Aspekt der geringen Wärmeleitfähigkeit der Matrix, Energie-Inhomogenitäten mit stark exothermen Charakter postuliert werden. Diese wären in der Lage endotherme chemische Reaktionen wie z.B. die Kondensationsreaktion, Bestandteil der Peptidbildung, zu fördern. Im Eisgefüge, geprägt durch vielfältige Grenzschichten, festen und flüssigen Phasen, hochkonzentrierte Meersalzlösung sowie mineralischen Staubpartikeln sind günstige Bedingungen für katalytische Vorgänge gegeben. Durch Auskristallisation der salzarmen Eisphase werden Sortier- und Trennvorgänge induziert. Eine hochkonzentrierte Salzlake entsteht, in der gebildete Makromoleküle ebenfalls angereichert sind. Der beim Gefriervorgang vorwärts wandernden Eisfront könnte dabei ein chromatographierender Einfluß zugeschrieben werden, der eine zusätzliche Stoff-Fraktionierung bewirken sollte. Die Rückreaktion (Zersetzung) der gebildeten Makromoleküle ist aufgrund der vorwiegend herrschenden niedrigen Temperatur eher unwahrscheinlich. Die an Eiskristallen zu beobachtende starke Polarisierung und das Phänomen der optischen Doppelbrechung weisen auf einen hohen Ausrichtungsgrad der Kristallstrukturen mit charakteristischer periodischer Wiederholung hin. Es wird diskutiert, ob sich an diesen Kristallstrukturen spezifische Makromoleküle bilden könnten, ähnlich wie mittels einer Matrize durch

Anlagerung der im Meer auftretenden Grundbausteine. Beim teilweisen Schmelzen bzw. Auflösen des Kristalls würden sich die so entstandenen Makromoleküle von der Oberfläche ablösen. Dieser Vorgang wäre möglicherweise den Abläufen bei der Replikation von DNA und RNA ähnlich. Die im Eisgefüge vorhandenen Eiszellen, Kaviolen, Kanäle und Kristalle scheinen von flexiblen, hauchdünnen Grenzschichten umhüllt zu sein. Da sie durch Wasserstoffbrückenbindungen geprägt sind, lassen sich semipermeable Eigenschaften und ihre Fähigkeit, Separationsvorgänge zu unterstützen, vermuten. Sie könnten als Vorläufer von Biomembranen gedient haben. Dieser zelluläre Aufbau von Meereis, wobei die einzelnen Zellen über ein Netzwerk von mit Salzlösung gefüllten Kanälen miteinander kommunizieren, könnte die Ausbildung von autokatalytischen Selbstorganisationsprozessen, wie sie von Manfred Eigen beschrieben wurden, gefördert haben.

Meereis könnte als eine Vorstufe zum Leben angesehen werden, wobei die für das Leben charakteristischen Eigenschaften wie Metabolismus, Selbstreplikation und Mutagenität, bereits im Ansatz erkennbar zu sein scheinen. Die vorgestellte Hypothese wird mit Hilfe einiger typischer Kriterien für derartige Reaktionsabläufe geprüft und gestützt. Demnach scheint die Hypothese robust gegenüber unsicheren Annahmen zu sein, sie erlaubt möglicherweise die prinzipielle Beantwortung vieler noch offener Fragen bei der Entstehung des Lebens, sie zeigt zahlreiche Übereinstimmungen zwischen den im Meereis ablaufenden Vorgängen und den Erscheinungen heutiger biologischer Abläufe auf, und schließlich sind die Aussagen der Hypothese experimentell überprüft bzw. in weiteren Experimenten überprüfbar. Es werden Vorschläge für eine Reihe von entsprechenden Experimenten gemacht.

INHALT

| | |
|--|-----|
| 1. Einführung | 1 |
| 2. Expedition in das Eis von Spitzbergen | 7 |
| 3. Experimentelle Ergebnisse zum Meereis | 11 |
| 3.1 Mikrostruktur | 12 |
| 3.2 Kräfte und Energieformen..... | 14 |
| 3.3 Dynamische Vorgänge | 18 |
| 3.4 Zusammenfassende Beurteilung | 21 |
| 4. Mikroorganismen im Meereis | 23 |
| 4.1 Beobachtete Organismen | 24 |
| 4.2 Verhalten und Häufigkeit..... | 25 |
| 4.3 Nahrungskette von Spitzbergen | 29 |
| 4.4 Zusammenfassende Bewertung | 30 |
| 5. Entstehung des Lebens im Meereis | 33 |
| 5.1 Meereis als Vorstufe des Lebens | 33 |
| 5.2 Entwicklungsschritte zum Leben | 35 |
| 5.3 Zeitablauf | 39 |
| 6. Schlußfolgerungen..... | 41 |
| 7. Literaturverzeichnis..... | 45 |
| Tabellen..... | 49 |
| Abbildungen | 63 |
| Dank..... | 111 |

1. Einführung

Spitzbergen ist - insbesondere für einen einzelnen Menschen, welcher dort ein ganzes Jahr in Einsamkeit zubringt - erschreckend in seiner Wildheit und Brutalität und faszinierend zugleich. Es ist in jedem Fall ein besonderer Ort, geprägt durch Phasen monatelanger Finsternis und Helligkeit, durch über den ganzen Himmel flackernde Nordlichter, durch eisige Stürme mit Temperaturen um -40°C , durch einen nur für 1-2 Monate unterbrochenen immerwährenden Winter mit Unmengen von Schnee und Eis und nicht zuletzt durch zahlreiche gelegentlich aggressive Eisbären.

Und was treibt einen Menschen, dort allein mit zwei Hunden in einem kleinen Segelboot eingefroren in meterdickem Eis auszuharren ?

Eine Idee, die fasziniert und zum Grübeln anregt. Die Idee nämlich, daß an einem so unwirtlichen Ort wie Spitzbergen die Wiege des Lebens gestanden haben mag.

Wie eine solche Idee entstehen konnte und welche Versuche und Überlegungen angestellt wurden, um sie weiterzuverfolgen - darüber wird hier berichtet.

Die Entstehung des ersten Lebens auf der Erde erweckt Fragen, an deren Lösung seit vielen Jahrzehnten gearbeitet wird. Dabei sind insbesondere zwei Fragestellungen wichtig, nämlich einerseits, wo bzw. unter welchen Bedingungen könnte das Leben auf der Uerde entstanden sein und andererseits, wie mögen dabei die verschiedenen Entwicklungsschritte abgelaufen sein.

Es besteht weitgehend Einigkeit darüber, daß die Entwicklung zum Leben vor ca. 4 Mrd. Jahren auf der Uerde begann. Der damals herrschende Zustand der Erde ist nicht exakt bekannt. Es wird angenommen, daß Wasser die Urmeere füllte und Kontinente vorhanden waren. Starke Vulkantätigkeiten erschütterte die Erde. Die Sonne strahlte mit einer gegenüber heute um ca. 25% reduzierten Intensität auf die Erdoberfläche [de Duve 1995]. Die Erde umkreiste die Sonne mit einer ähnlich wie heute geneigten Erdachse. Die Rotationsgeschwindigkeit der Erde war damals deutlich höher, so daß die Tage und Nächte entsprechend kürzer waren [de Duve 1991]. An den geographischen Erdpolen allerdings herrschten, genauso wie heute, die jeweils halbjährigen Polarnächte und -tage. Die Erdatmosphäre bestand vermutlich im wesentlichen aus Kohlendioxid (CO_2), Stickstoff (N_2) sowie Wasserdampf (H_2O). Die Zusammensetzung der Urmeere bezüglich der darin gelösten Mineralien war vermutlich ähnlich wie heute.

Über die auf der Uerde vorherrschende Temperatur gibt es verschiedene Meinungen [de Duve 1995]. Die Schätzungen reichen von relativ hohen

Temperaturen, bei denen das meiste vorhandene Wasser warm gewesen sein soll, bis zu Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt. Es ist wohl vernünftig, anzunehmen, daß - ähnlich wie heute - auch damals auf der Erde Zonen mit unterschiedlichen hohen Temperaturen existiert haben. Denn auch damals gab es hohe Gebirgsformationen, atmosphärische Stürme und Meeresströmungen sowie von der Sonne unterschiedlich intensiv bestrahlte Zonen auf dem Erdglobus. Insbesondere werden die geographischen Erdpole wie heute und ähnlich wie auch die Polkappen auf dem Mars relativ kalt gewesen sein. Demnach muß es als sehr wahrscheinlich angesehen werden, daß irgendwo auf der Urerde - möglicherweise auch nur vorübergehend - gefrorenes Meerwasser als Eis vorgelegen hat.

In zahlreichen Publikationen werden verschiedene Szenarien diskutiert, wo und wie das erste Leben auf der Erde begonnen haben könnte. Dabei sind unterschiedliche Ansätze erkennbar, insbesondere:

1. In warmen, flachen Tümpeln am Rande der Urmeere mag sich die sog. Ursuppe mit einer Vielzahl organischer Moleküle gebildet haben, deren weitere Reaktionen miteinander schließlich zum Aufbau komplexer organischer Systeme geführt haben sollen. Die notwendige Energie könnte dabei durch elektrische Entladungen, energiereiche Sonneneinstrahlung (UV), mechanische Stoßwellen oder auch chemische Reaktionen geliefert worden sein. Zu dieser Kategorie gehört u. a. das klassische Experiment von Miller [Miller, Orgel 1974]. Eine chemische Energiequelle postuliert Wächtershäuser [Wächtershäuser 1988]. Dabei wird eine Reaktion zwischen Sulfidionen und zweiwertigem Eisen zu Eisendisulfid (Pyrit) angenommen, womit tatsächlich ein katalytisch ablaufender Protostoffwechsel erreicht werden kann.
2. In den Meerestiefen gelegene heiße Quellen oder Vulkanschlote mit außergewöhnlichen chemischen Verhältnissen setzen auch heute noch u. a. Kohlendioxid, Stickstoff und Wasserstoff frei. Aus Reaktionen zwischen insbesondere Wasserstoff und Kohlendioxid bildet sich u. a. Methan, womit für die Entstehung des ersten Lebens eine Energiequelle in heißem wässrigen Medium zur Verfügung gestanden hätte [Holm 1992]. Lebensentstehung durch Reaktion von Meerwasserinhaltsstoffen an den heißen Oberflächen der ursprünglichen Erde in einem feucht-trockenen Zyklus werden ebenfalls diskutiert [Müller 1995].
3. Die ersten Keime des Lebens mögen aus dem Weltraum z.B. mit Hilfe von Meteoriten auf die Erde gelangt sein [Bühler 1988]. Diese Theorie wird als „Panspermie“ bezeichnet und wird u. a. von Crick [Crick 1981] vertreten. Mit diesem Ansatz wird die Erklärung, wie das erste Leben entstanden sein könnte, in ihren ersten Schritten allerdings auf eine un-

erreichbar weit entfernte Ebene verlagert und damit einer weiterführenden Untersuchung entzogen.

Abgesehen von dem letztgenannten Ansatz gehen alle Überlegungen zur Entstehung des Lebens davon aus, daß sich im Rahmen der sog. präbiotischen Chemie Bausteine des Lebens - z.B. Aminosäuren und Nukleotide - unter sehr unterschiedlichen Bedingungen aus einfachen Grundstoffen auf der Urerde gebildet haben mögen. Zu diesem Reaktionsablauf gibt es zahlreiche experimentelle Nachweise. Einige solcher einfachen organischen Verbindungen wurden auch in Meteoriten gefunden [Wasson 1974].

Möglicherweise haben während der Entstehung des Lebens einzelne oder sogar alle der hier genannten hypothetisch angenommen Szenarien zusammengewirkt. Bei einer angenommenen Dauer der Lebenswerdung von etlichen Millionen Jahren konnten durchaus auch im Rahmen von langsam ablaufenden Transportvorgängen einzelnen besonders wichtige Bausteine des Lebens von verschiedenen Entstehungsorten der Erde in den Urmeeren weitläufig verteilt werden und schließlich zur Bildung weiterentwickelter Zwischenprodukte beitragen.

Ein Problem besteht darin, zu verstehen, wie aus diesen unbelebten Systemen von relativ einfachen Bausteinen spezifische autoreproduktive Makromoleküle entstehen konnten. Cairns-Smith [Cairns-Smith 1982] postuliert, daß bestimmte Tonminerale sogar zu eigenen, quasi evolutionären Entwicklungsschritten fähig sein könnten, welche über die Entstehung von „Tongenen“ schließlich zu im heutigen Sinne lebenden Systemen geführt haben mögen. Experimentelle Nachweise für die Richtigkeit derartiger Hypothesen fehlen allerdings.

Ein zufällige Entstehung von Leben gilt als unmöglich aufgrund der Tatsache, daß die dafür berechenbare Wahrscheinlichkeit praktisch Null ist - siehe dazu z.B. Eigen [Eigen, Schuster 1979; Eigen, Schuster 1982]. Die Entwicklung zum Leben erforderte viele Teilschritte, von denen einige bereits verstanden wurden - vgl. Abb. 1.1. So hat z.B. Fox [Fox, Dose 1972] gezeigt, daß unter präbiotischen Bedingungen Aminosäuren zu proteinähnlichen Substanzen kondensieren können. Spekulativ bleibt dabei allerdings, wie solche Kondensationsreaktionen in der Natur tatsächlich abgelaufen sein mögen. Von de Duve [de Duve 1991] wird vorgeschlagen, wie sich aus Thiolen und Aminosäuren Thioester im Rahmen von energieverbrauchenden Kondensationsreaktionen bilden könnten. Die Thioester sind deshalb so interessant, weil sie energetisch dem bei allem Leben so wichtigen Adenosintriphosphat (ATP) äquivalent sind. Im Verlaufe einer Reihe von noch nicht aufgeklärten Zwischenschritten hat sich schließlich Ribonukleinsäure (RNA) sowie Desoxyribonucleinsäure (DNA) gebildet. Einen Durchbruch bei dem Verständnis über die dreidimensionale räumliche Struktur der Nucleinsäuren stellte die Entdeckung der sog. Doppelhelix durch Watson und Crick [Watson, Crick 1953] dar.

Weiterhin hat Crick [Crick 1958] ausgeführt, wie sich aus DNA über RNA im Rahmen der sog. Translation Proteine aufbauen.

Zum Aufbau so komplizierter Moleküle wie DNA werden Katalysatoren benötigt, deren Existenz und Wirkung auf der Urerde allerdings unklar sind. Bernal [Bernal 1967] und Cairns-Smith [Cairns-Smith 1982] postulieren in diesem Zusammenhang den Einfluß von Tonpartikel der Urerde auf diesen Prozeß, welche die gewünschte katalytische Wirkung bzw. Matrixfunktionen haben sollen.

Eine große, noch ungelöste Schwierigkeit entsteht daraus, daß bei allen Synthesen der notwendigen Bausteine Gemische entstehen, welche auch die sog. Kettenabbruchsubstanzen enthalten. Wie kann erklärt werden, daß diese „schädlichen“ Substanzen beim Aufbau komplexer Makromoleküle aussortiert wurden? Eine ähnlich wichtige Frage ergibt sich aus der Tatsache, daß z.B. alle Proteine ausschließlich die sog. L-Aminosäuren enthalten. Die Replikation von RNA und DNA hängt entscheidend von der chiralen Natur der Bausteine und des Matrizenstranges ab - vergl. dazu auch Orgel [Joyce et al. 1984]. Wie wurden die „richtigen“ Konformere aus einem Gemisch von vorhandenen L- und D-Formen der Bausteine ausgewählt? Wie konnte sich ein so komplizierter Vorgang wie die Replikation von Makromolekülen mittels Matrizen entwickeln? Und schließlich, wie wurde der spontane thermische Zerfall der bereits gebildeten Makromoleküle während eines möglicherweise langwierigen Entwicklungsverlaufs verhindert? Jedenfalls erscheint dabei eine warme Umgebung mit einer entsprechend hohen thermisch bedingten Zerfallswahrscheinlichkeit wenig geeignet zu sein. Deshalb vertritt z.B. Miller in [Miller 1992] und [Levy, Miller 1998] die Ansicht, daß die Entstehung des Lebens bei niedrigen Temperaturen stattgefunden haben müsse.

Bei der Vielfalt komplizierter Teilschritte auf dem Weg zum Leben stellt sich die Frage, wie das Ziel unter den Bedingungen auf der Urerde überhaupt erreicht werden konnte.

Schrödinger [Schrödinger 1944] bezeichnet Leben als Materie, die ihre Struktur wie ein seltsamer „aperiodischer“ Kristall während ihres Wachstums ständig wiederholt.

Monod [Monod 1970] postuliert einen auf funktionelle Zweckmäßigkeit ausgerichteten molekulen Aufbau der zum Leben führenden Strukturen. Er verneint die Möglichkeit, daß Leben zufällig entstanden sein könnte.

Eigen [Eigen, Schuster 1979 und 1982] entwickelte eine Theorie über die Selbstorganisation biologischer Makromoleküle. Nach dieser Theorie des sog. Hyperzyklus, werden mehrere Enzyme zu katalytischen Zyklen zusammengeschlossen. Damit könnte die Evolution vom einzelnen Makromolekül bis hin zur integrierten Zellstruktur im Prinzip erklärt werden. Die dabei postulierten Selbstorganisationsreaktionen bestehen aus vielen zu Netzwerken verknüpften Einzelreaktionen, welche autonome Zyklen enthalten und zur

Autokatalyse führen. Wie allerdings in der Natur ein derartiger Mechanismus konkret realisiert werden könnte, ist noch unklar.

Für die fortschreitende Selbstorganisation ist eine zunehmende räumliche Kompartimentierung notwendig, welche schließlich auch zur Zellbildung führt. Wie und wann konnten sich die ersten Zellstrukturen sowie die dazugehörigen Biomembranen entwickelt haben? Oparin [Oparin 1938] und Morowitz [Morowitz 1992] z.B. postulieren die Existenz von Zellen und Membranen als notwendige Voraussetzung für den Ablauf weiterführender Schritte zur Entstehung des Lebens. De Duve [de Duve 1995] dagegen sieht die Notwendigkeit von biologischen Zellen erst in einem relativ späten Entwicklungszustand des Lebens. Die unterschiedlichen Annahmen über den Zeitpunkt der Entwicklung der ersten Zelle lassen Fragen entstehen. Wie kann eine Zelle mit funktionierenden Biomembranen entstanden sein ohne die Existenz komplexer Proteinstrukturen? Aber genauso ungelöst ist die Frage, wie sich DNA und Proteine ohne die notwendige Kompartimentierung von Zellstrukturen entwickelt haben mögen.

In einer frühen Entwicklungsphase des Lebens haben sich insbesondere aus Biomembranen z. T. sehr kompliziert aufgebaute und funktionsspezifische Untereinheiten wie z.B. die Mitochondrien und der sog. Golgi-Apparat ausgebildet. Mitochondrien sind die Kraftwerke der Zellen. Sie bestehen aus einem komplizierten System von Doppelmembranen, zwischen denen unter der Mitwirkung von Enzymsystemen Energiegewinnung stattfindet. Der Golgi-Apparat ist für den Stoffwechsel von Zellen von Bedeutung. Er ist aufgebaut aus gefalteten Zellmembranen und eingeschlossenen Vesikeln. Die Aufgaben des Golgi-Apparates sind u. a. das Ansammeln von Sekretstoffen und deren Transport in kleinen mit Biomembranen umhüllten Bläschen zur Zellmembran. Dort vereinigt sich die Membran des Bläschens mit der Zellmembran und entleert dabei die Sekretstoffe nach außen. Wie sich so komplizierte Gebilde unter Ausnutzung von mehrfach gefalteten Biomembranen entwickelt haben könnten, ist noch völlig rätselhaft.

Ein wichtiger Aspekt bei der Entwicklung des Lebens wird durch Woese [Woese 1981] aufgezeigt, der durch die Entdeckung der sog. Archaeobakterien die Auffassung korrigierte, daß die Eukaryoten erst in einem relativ späten Entwicklungsstadium aus den Prokaryoten hervorgegangen seien. Nach den Untersuchungsergebnissen von Woese haben sich gleich zu Beginn die Eukaryoten und die Prokaryoten entwicklungsgeschichtlich getrennt. Daraus kann gefolgert werden, daß sowohl Archaeobakterien und Prokaryoten als auch Eukaryoten nahezu zeitgleich in einem für alle gemeinsamen Szenario entstanden sein müßten.

Die vorangegangenen Bemerkungen mögen verdeutlicht haben, daß es im Zusammenhang mit der Entstehung des Lebens viele z.T. bereits verstandene Teilschritte, aber auch noch etliche offene Fragen gibt. Einige dieser Fragen sind in Tab. 1.1 zusammengestellt. Ist es möglich, mit einer neuen Hypothese zur Entstehung des Lebens Lösungsansätze zur Beantwortung einiger dieser Fragen aufzuzeigen?

Diese Hypothese soll an den folgenden Beurteilungskriterien gemessen werden:

1. Robustheit bzw. Unempfindlichkeit gegenüber unsicheren Annahmen, insbesondere hinsichtlich des Zustandes auf der Urerde.
2. Ganzheitlicher Lösungsansatz für alle noch offenen Fragen bei der Entstehung des Lebens.
3. Übereinstimmung zwischen den bei der Entstehung des Lebens hypothetisch angenommenen Prozessen mit Erscheinungen in heutigen Lebensvorgängen.
4. Experimentelle Überprüfbarkeit wesentlicher Aussagen der Hypothese.

Es wurde die Hypothese vorgeschlagen [Trinks 1998]:

„Die Entstehung des Lebens vor 4 Mrd. Jahren wurde durch die physikalisch bedingten Vorgänge in den Mikrostrukturen von gefrorenem Meerwasser auf der Urerde wesentlich gefördert, wenn nicht sogar dadurch erst ermöglicht“.

In den folgenden Kapiteln wird zunächst über eine Expedition in das Eis von Spitzbergen zur Bekräftigung dieser Hypothese berichtet. Danach werden die experimentellen Ergebnisse über das Meereis von Spitzbergen sowie über die im Eis gefundenen Mikroorganismen dargestellt und bewertet. Anhand der während der Expedition gewonnenen Ergebnisse und der zahlreichen bereits publizierten Erkenntnisse anderer Wissenschaftler folgt eine Skizzierung des Weges, wie das erste Leben im Meereis entstanden sein könnte. Abschließend wird die aufgestellte Hypothese den o. g. Beurteilungskriterien unterzogen.

2. Expedition in das Eis von Spitzbergen

Ausgehend von der Hypothese, daß das erste Leben vor 4 Mrd. Jahren unter der Mitwirkung von Meereis entstanden sein könnte, wurde eine Expedition in das Eis möglichst nahe dem Nordpol geplant. Ziel dieser Expedition war eine ganzjährige detaillierte experimentelle Untersuchung über die Mikrostruktur und das dynamische Verhalten von Meereis sowie über die im Eis heute lebenden Mikroorganismen.

Der Aufbau von Meereis wird bestimmt durch physikalische Gesetzmäßigkeiten, welche in gleicher Weise vor 4 Mrd. Jahren gültig waren. Die Zusammensetzung des Wassers in den Urmeeren sowie der damals existierenden gasförmigen Atmosphäre sind zwar nicht genau bekannt, aber diese Parameter spielen bei der Bildung und dem Verhalten von Eis keine wesentliche Rolle. Deshalb wird es als vernünftig angesehen, durch die experimentelle Untersuchung des heute existierenden Eises eine realistische Vorstellung über das Eis auf der Erde vor 4 Mrd. Jahren herzuleiten. Die Untersuchung der heute im Eis lebenden Mikroorganismen ist sicherlich nicht geeignet, um daraus die Entstehung des ersten Lebens direkt ableiten zu wollen. Allerdings können aus den Beobachtungen Hinweise gewonnen werden, ob und in welchem Maße Eis überhaupt ein geeignetes Umfeld zur Beherrschung von lebenden Organismen darstellt. Ausgehend davon läßt sich die Hypothese, daß sich das erste Leben im Eis entwickelt haben könnte, besser beurteilen.

Darüber hinaus ist eine Untersuchung von heute im Eis lebenden Mikroorganismen wichtig, um Vorkommen und Lebensgewohnheiten der die Kälte liebenden Bakterien, der sog. Psychrophilen [Bowman et al. 1997], besser zu verstehen. Denn die Psychrophilen erzeugen in ihrem kalten Lebensumfeld Enzyme, welche für potentielle Nutzer aus der Lebensmittel-, Reinigungs- und Umweltschutzindustrie von Bedeutung sein können.

Der Expeditionsort am Nordrand von Spitzbergen in der kleinen Meeresbucht „Mushamna“ am Woodfjord mit den Koordinaten 79° 40´ Nord und 14° 16´ Ost wurde nach einer sorgfältigen Suche ausgewählt - vergl. Abb. 2.1. Mushamna bietet einem dort im Eis eingefrorenen Schiff einen gewissen Schutz gegenüber den aus dem sog. Nordbassin andrängenden Eismassen. Außerdem steht dort für die durchgeführten Untersuchungen das ganze Jahr über Eis in nahezu allen denkbaren Variationen zur Verfügung. Felder von einjährigem Meereis und große Brocken von mehrjährigem Eis aus der Nordpolregion, außerdem Süßwassereis auf kleinen Seen sowie Eis von den dort zahlreich vorhandenen Gletschern ermöglichte eine vergleichende Analyse zwischen den Untersuchungsergebnissen gewonnen in verschiedenen Sorten von Eis. Aufgrund der Nähe zum Nordpol herrschten am Expeditionsort monatelange Dunkelheit bzw. Helligkeit. Dieser Umstand wurde für die ganzjährige Unter-

suchung des Eises sowie der darin lebenden Mikroorganismen als wichtig angesehen.

Die Expedition wurde mit dem robusten Segelschiff „MESUF“ durchgeführt - vergl. Abb. 2.2. Das Schiff ist 15 Jahre alt, 12 m lang und für den Einsatz im Eis aus Stahl extra stark gebaut. Sowohl die Fahrt von Hamburg nach Spitzbergen als auch der einjährige Aufenthalt an Bord des Schiffs während der Expedition wurde von einer Person (H. Trinks) durchgeführt. Vor der Expedition wurde das Schiff mit Lebensmittelvorräten für ein Jahr, Ausrüstung für das Überleben unter den zu erwartenden rauen Bedingungen sowie den zahlreichen wissenschaftlichen Geräten ausgestattet. Dazu gehörten u. a. hochwertige Mikroskope, Geräte zur Messung von Temperaturen, Energieströmen, elektrischen Feldern und Druckverteilungen im Eis sowie für die Analyse von Eis und Wasser bezüglich pH-Wert, Salz- und Sauerstoffgehalt. Darüber hinaus zählten UV-Lichtquellen, Laser, Oszillographen, optische Polarisatoren, Foto- und Filmgeräte sowie Farbmarkierungsmittel zur Ausrüstung. Zur Untersuchung der Mikroorganismen im Eis waren u. a. diverse Probenahmevorrichtungen, ein Sterilisator, Nährlösungen zur Züchtung von Bakterienkulturen, Schnelltestverfahren zum Nachweis von Bakterien sowie eine thermostatisierte Brutkammer vorhanden. Um das Eis auch von der Unterseite aus beobachten zu können, wurde eine Taucherausrüstung mitgenommen. Die zum Betreiben der Geräte notwendige elektrische Energie wurde mittels Solarzellen sowie einem Windgenerator erzeugt.

Die gesamte Expedition mußte für ein ganzes Jahr autark arbeiten können, weil eine regelmäßige logistische Unterstützung von außen an dem von jeder Zivilisation weit entfernten Expeditionsort nicht möglich war. Mushamna ist nur bei günstigem Wetter - z.B. im Falle eines Notfalls - mit einem Helikopter von Longyearbyen aus erreichbar. Die Kommunikation zur Außenwelt wurde während der Expedition mittels eines Amateurfunkgerätes aufrechterhalten. Insbesondere war damit auch ein Gedanken- und Informationsaustausch mit Wissenschaftlern der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH) möglich.

Das Expeditionsschiff MESUF verließ am 17. Mai 1999 Hamburg und erreichte den Zielort Mushamna am 17. Juli 1999 - siehe Abb. 2.2. In Longyearbyen auf Spitzbergen wurden zuvor noch zwei Schlittenhunde an Bord genommen. Am 27. August 1999 bildete sich bereits das erste neue Eis an dem ankernden Schiff, welche im Laufe der folgenden Monate eine Stärke von 1,50 m erreichte. Der Schiffskörper wurde während der Zunahme der Eisstärke um insgesamt 20 cm nach oben gepreßt und konnte so dem gefährlichen Eisdruck ausweichen.

Die Polarnacht mit ständiger Dunkelheit begann Ende Oktober 1999. Das erste noch sehr schwache wiederkehrende Licht war Anfang Februar 2000 erkennbar. Am 17. April 2000 begann die Zeit der Mitternachtssonne, welche am Expeditionsort bis zum 23. August anhält. Das ganze Jahr über traten heftige Stürme auf, welche besonders im Herbst für das noch nicht ausreichend fest eingefrorene Schiff gefährlich schienen. Schwierig waren Situationen, bei denen das Schiff festgefroren in einer großen Eisscholle in der Dunkelheit unkontrollierbar herumdriftete. Fast das ganze Jahr über lag Schnee, dessen Höhe Mitte Juni 2000 noch ca. 1m betrug. Die Lufttemperaturen bewegten sich im Jahresablauf zwischen -40°C und $+5^{\circ}\text{C}$. Die niedrigsten Temperaturen wurden im März 2000 registriert. Die Expedition erhielt Besuch von insgesamt 60 Eisbären. Die Bären schienen zumeist nur neugierig zu sein. In einigen Fällen allerdings versuchten sie, das Expeditionslager und die Hunde anzugreifen und mußten mit Warnschüssen vertrieben werden. Auf dem Eis in der Nähe des Schiffs hielten sich gelegentlich Robbenherden auf. Der Proviant für die Expedition wurde mittels Fischfang und Jagd auf Robben und Wildgänse ergänzt.

Zur Durchführung der Experimente und zur Entnahme von Eis- und Bakterienproben wurden die Meßgeräte mit dem Hundegespann zu den ausgewählten Meßorten auf dem Eis transportiert. Dort wurden direkt vor Ort das Wasser untersucht sowie mit dem Mikroskop die Eisstrukturen analysiert und mittels Foto- und Filmaufnahmen dokumentiert - siehe Abb. 2.3 und 2.4. Mit bis zu 1000facher Vergrößerung wurden dabei durch das Mikroskop insgesamt 500 Einzelfotos sowie 6 Stunden Filmaufnahmen angefertigt. Insgesamt wurden 350 Eis- und Bakterienproben verteilt über das ganze Jahr untersucht. Von den Bakterienproben wurden 50 besonders erfolgversprechende ausgewählt und in Thermosbehältern gekühlt für genauere Analysen an das Biotechnologische Institut der TUHH gesendet. Dies war möglich, weil der Expeditionsort im Verlaufe des Jahres zu Übungszwecken einige Male von einem Helikopter angeflogen wurde. Während der Expedition wurden 2 Tauchgänge im offenen Wasser des Woodfjords sowie 5 Tauchgänge unter dem Eis vorgenommen. Dabei wurden Proben genommen und die Eisstrukturen untersucht.

Am 19. Juli 2000 war das Eis in Mushamna soweit geschmolzen, daß sich das Expeditionsschiff daraus freiarbeiten konnte. Am 14. September 2000 kehrte die Expedition wohlbehalten zurück nach Hamburg.

3. Experimentelle Ergebnisse zum Meereis

Am Expeditionsort in Spitzbergen (79° 40' N, 14° 16' E) wurde das ganzjährig vorhandene Eis systematisch untersucht. Das Hauptinteresse lag dabei auf den Erscheinungsformen von Meereis, da sich sehr rasch herausstellte, daß gefrorenes Süßwasser in Gletschern oder auf den kleinen Seen eine vergleichsweise homogene Feinstruktur aufweist und nur wenig mikroorganisches Leben beherbergt. Meereis dagegen zeigt eine sehr komplexe Mikrostruktur [Lock 1990], worin ständig dynamische Vorgänge ablaufen und sich zahlreiche Mikroorganismen aufhalten [Delille, Rosiers 1995]. Die Zusammensetzung des Meerwassers in der Nähe des Expeditionsortes ist in Tab. 3.1 nach [Sakshaug 1994] gegeben.

Bereits seit vielen Jahren werden Forschungsarbeiten zur Charakterisierung von Meereis und zur Förderung des Verständnisses der Physik und der Mechanik von Meereis von verschiedenen Forschungsinstitutionen in aller Welt durchgeführt. Besonders erwähnt seien hier, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, die zahlreichen Arbeiten zur Untersuchung der Festigkeit von Meereis z.B. zur optimalen Auslegung von Eisbrechern und zur richtigen Dimensionierung von Bauwerken im Eis - vergl. u. a. [Duval 1978, Lange 1988, Zhan et al. 1996]. Einen umfassenden Überblick über viele Eigenheiten von Eis ist gegeben in [Untersteiner 1986]. Weiterhin werden u. a. von dem Alfred-Wegener-Institut in Zusammenarbeit mit Forschergruppen im Institut für Polarökologie (Kiel), Geomar (Kiel), Scott Polar Research Institute (Cambridge), Institut für Geophysik (Bergen) und in der Schiffbau Versuchsanstalt (Hamburg) vielfältige Untersuchungen zur Mikrostruktur und zu den physikalischen Eigenschaften von Meereis unternommen - vergl. u. a. [Grossmann, Diekmann 1994, Arrigo et al. 1995, Gulliksen, Lönne 1991]. Auch innerhalb des norwegischen Forschungsprogrammes Pro Mare (1984 - 1989) auf Spitzbergen wurden Untersuchungen über das Meereis durchgeführt - vergl. [Sakshaug 1994].

In Abgrenzung zu diesen Forschungsarbeiten stand während der durchgeführten Expedition die Frage im Mittelpunkt, ob im polaren Meereis Bedingungen gegeben sind, welche die Entstehung des ersten Lebens erleichtert haben könnten, und wie die heute im Lebensraum „Meereis“ beobachtbaren Mikroorganismen leben, an welchen Orten im Eis sie bevorzugt auftreten und wie sie die Polarnacht überstehen.

Im folgenden werden zunächst die Ergebnisse bezüglich der Mikrostruktur von Meereis dargestellt. Danach erfolgt eine Diskussion der beobachteten dynamischen Vorgänge, welche auf die Umwandlung der im Meereis auftretenden unterschiedlichen Energieformen zurückgeführt werden können. Eine zusammenfassende Bewertung über das Meereis mit seinen zur Entstehung

sowie zur Beherbergung von Leben wichtigen Eigenschaften beschließt dieses Kapitel. (Viele der während der Expedition im Eis beobachteten Phänomene und Zustände sind bereits bekannt und publiziert. Allerdings scheint es sinnvoll zu sein, eine Zusammenfassung dieser Phänomene darzustellen, um die aufgestellte Hypothese verständlich zu machen).

3.1 Mikrostruktur

Meereis entsteht während des Gefrierens von Meerwasser. Die Zusammensetzung von Meerwasser in der Barentssee am Expeditionsort ist gemäß [Sakshaug 1994] in Tab. 3.1 zusammengestellt. Die Bildung von Meereis wird im wesentlichen durch die in Abb. 3.1 zusammengestellten Parameter für Salzwasser sowie durch die Besonderheiten beim Gefrieren von Salzlösungen bestimmt - vergl. [Untersteiner 1986]. Damit sind die wichtigsten Rahmenbedingungen für die Entstehung von Meereis festgelegt, unter denen sich die beobachtete komplizierte Mikrostruktur entwickelt.

Während der ersten Bildung von Eis auf der obersten Wasserschicht werden zunächst regelmäßig geformte Eiskristalle beobachtet - vergl. Abb. 3.2 und 3.3. Diese Kristalle besitzen Kanten, Ecken sowie Symmetrieachsen und breiten sich auf der Wasseroberfläche rasch aus. Wenn die entstandenen Netzwerke von Eiskristallen aneinanderstoßen und zusammenwachsen, bildet sich eine zelluäre Struktur. Feste Eiselemente, kleine mit konzentrierter Salzlösung gefüllte Kaviolen, winzige miteinander kommunizierende Kanalsysteme sowie dazwischen eingelagerte Gasbläschen formen für frisch gebildetes, noch junges Eis charakteristische dreidimensionale Strukturen - siehe Abb. 3.4. Die angewendete Beobachtungsmethode mit dem Mikroskop ermöglichte durch Variation der Einstellung der optischen Schärfe ein dreidimensionales Abtasten der Eisproben. In einigen Fällen wurde die Struktur mit dem direkt auf der Eisfläche befindlichen Mikroskop beobachtet, um die durch eine Probenahme verursachten Störungen zu vermeiden - siehe Abb. 3.5. Entsprechend den zahlreichen gewonnenen Fotos besitzen die Zellen in der Eisstruktur Abmessungen zwischen 5 und 50 μm . Es wurde abgeschätzt, daß innerhalb eines Kubikmeters frischen Eises ca. 10^{15} zelluäre Strukturen vorhanden sind.

In einige Fällen konnte im Eis die Entstehung von Salzkristallen beobachtet werden - vergl. Abb. 3.6. Vermutlich handelt es sich dabei um $\text{Ca CO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ und $\text{Na}_2 \text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, welches gemäß [Untersteiner 1986] bei Temperaturen von $-2,2^\circ\text{C}$ und $-3,6^\circ\text{C}$ aus der Salzlösung herauszukristallisieren beginnt. Bei sehr niedrigen Temperaturen von bis herab zu -40°C sowie bei Meereis, welches an der Luft z. T. sublimiert, wurden weitere vielfältige Kristallformen gefunden. Auffällig ist dabei die Ausbildung von charakteri-

stischen Netzstrukturen auf einigen der Kristalloberflächen - vergl. Abb. 3.7. Vermutlich werden diese Salzformationen gemäß [Untersteiner 1986] gebildet von $\text{Mg Cl}_2 \cdot 8 \text{ H}_2\text{O}$ (ab -18°C), $\text{Na Cl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (ab $-22,9^\circ\text{C}$) und K Cl (ab $-36,8^\circ\text{C}$).

Sofern sich die Eisproben im Temperaturbereich zwischen -2°C und ca. -10°C befanden, wurde beobachtet, daß alle Substrukturen im Eisgefüge durch weiche, abgerundete Formen charakterisiert waren. Die festen Eiselemente sowie die mit Flüssigkeit gefüllten Kaviolen und die erkennbaren Salzkristalle schienen jeweils von Grenzsichten wie von einer dünnen Haut eingehüllt zu sein - vergl. Abb. 3.8. Sofern Temperaturgradienten im Eis vorhanden waren, wurden Bewegungsvorgänge zwischen den Grenzsichten beobachtet. Darauf wird noch weiter unten eingegangen.

Die festen Eiselemente bestehen aus nahezu reinem gefrorenen Süßwasser, während die Flüssigkeit in den Kaviolen und Kanälen von einer mit abnehmender Temperatur zunehmend konzentrierten Salzlösung gebildet wird mit einem pH-Wert zwischen 6.8 und 7.0. Die gemessene Salzkonzentration lag bis zu acht mal über der von normalem Meerwasser. So wurde z.B. in Eisproben bei einer Temperatur von -10°C ca. 75% festes Süßwassereis mit sehr geringen Anteilen von eingelagerten Salzkristallen und ca. 25% Salzlösung mit einem fünffach überhöhten Salzgehalt festgestellt. Selbst bei -30°C wurden im Meereis immer noch kleine Zonen und Kanäle gefüllt mit hochkonzentrierter Salzlösung beobachtet.

Ähnlich wie die im Meerwasser gelösten Stoffe werden auch feste Partikel - z.B. Staubteilchen aus der Luft und im Meerwasser enthaltene Schwebteilchen und Mikroorganismen - im Eisgefüge eingelagert und aufkonzentriert. Es wurden im Eis ein 10 - 100fach erhöhter Anteil von eingelagerten Teilchen mit einer Größe von 1 - 20 μm gemessen im Vergleich zu den im umgebenden Meerwasser beobachteten Partikeln. Meereis scheint wie ein Schwamm und Filter zu wirken, welches die vorbeiströmenden bzw. hindurchsickernden Teilchen in seinem Gefüge anlagert und damit anreichert - vergl. dazu Abb. 3.9.

Die im Eisgefüge gegebenen Kaviolen, Kanäle und Bläschen bilden ein miteinander kommunizierendes System von fein verästelten Netzwerken. Dadurch kann die konzentrierte Salzlösung mit den darin enthaltenen Schwebteilchen den im Eiskörper herrschenden Kräften, Druckgradienten und Konzentrationsgefällen folgen und sich im Eis beliebig verteilen und ausbreiten. Dies konnte direkt unter dem Mikroskop beobachtet werden. Makroskopisch macht sich dieser Effekt u. a. dadurch bemerkbar, daß sich blinde Bohrlöcher im Eis innerhalb weniger Minuten mit Salzlösung auffüllten, welche aus den angrenzenden Eisbereichen selbst bei -20°C hineinsickerte. Das Ausbrei-

tungsverhalten im Eisgefüge wurde mit farblich gekennzeichnete Salzlösung untersucht. Die Ergebnisse deuten darauf hin, daß im Eis Sortier- und Trennvorgänge auftreten, sowohl hinsichtlich der von der Flüssigkeit mitgeführten kleinen Partikeln, als auch hinsichtlich der im Wasser gelösten Stoffe - siehe Abb. 3.10 und 3.11. Dieser Effekt hängt möglicherweise auch mit der Eigenschaft von Eis zusammen, bestimmte Fremdionen wie z.B. K^+ , HCO_3^- und SO_4^{2-} mit einer wesentlich größeren Bereitschaft in dem Kristallgitter von H_2O aufzunehmen, als andere Ionen wie z.B. Na^+ und Cl^- - vergl. dazu auch [Untersteiner 1986].

Einzelne Proben von Meereis wurden 60 Minuten lang mit intensivem UV-Licht bestrahlt. Danach scheinen sich in einigen Fällen auf der Oberfläche einiger „Eiszellen“ strukturierte Ablagerungen gebildet zu haben - vergl. Abb. 3.12. Versuchsweise wurde dem Meerwasser vor dem Gefrieren unterschiedliche Fremdstoffe, u. a. Zucker, Glycerin, Seife, Öl, Kaliumpermanganat und Kupfersulfat zugesetzt. Die entstehenden Eisstrukturen zeigen charakteristische Veränderungen bezüglich ihres Aussehens.

Die für Meereseis beschriebene starke Polarisierung und Doppelbrechung von weißem Licht [Mobley et al. 1998, Naats et al. 1999], wurde mittels zweier Polarisationsfilter und der Farbabfolge beim Drehen eines Polarisators bestätigt. Zusätzlich chirale Eigenschaften des Meereseises würden sehr gut zur Induktion der Entstehungsprozesse ebenfalls chiraler belebter Materie passen, konnten jedoch bislang weder ausgeschlossen noch bewiesen werden. Einige der Untersuchungsergebnisse sind in Abb. 3.13 und 3.14 gezeigt.

In Tab. 3.2 sind die Untersuchungsergebnisse über die Eigenschaften von Meereis zusammengestellt.

3.2 Kräfte und Energieformen

Der Aufbau und das dynamische Verhalten von Meereis wird beeinflusst durch die im Eisgefüge wirkenden Kräfte und die im Eis gebundene oder auch freigesetzte Energie.

Beim Gefrieren von Meerwasser spielt die Schwerkraft zunächst eine wichtige Rolle. Die spezifische Dichte von Meerwasser ist temperaturabhängig - siehe Abb. 3.1. Aufgrund dieser Gesetzmäßigkeit sinkt das an der Oberfläche bis dicht an den Gefrierpunkt von ca. $-1,8^\circ C$ abgekühlte Wasser zunächst in tiefere Schichten ab, und die Eisbildung verzögert sich. Der Wärme- bzw. Kälteausaustausch hält solange an, bis sich eine Wasserschicht von einigen Metern Mächtigkeit mit einer Temperatur zwischen $-1,5^\circ C$ und $-1,8^\circ C$ unter der Oberfläche gebildet hat. Darauf ist es zurückzuführen, daß Meerwasser

sehr viel zögerlicher gefriert als Süßwasser. Zahlreiche Messungen in den Meeresbuchten haben diese Vorgänge bestätigt.

Im Eisgefüge existieren die bereits diskutierten kleinen Kanäle. Auch wegen der Schwerkraft bzw. der hohen spezifischen Dichte von hochkonzentrierter Salzlösung kommt es langfristig zur Entsalzung von Eisformationen. Insbesondere beim Schmelzen des Eisgefüges konnte beobachtet werden, wie Flüssigkeitsstrahlen von hochkonzentrierter Salzlösung aus dem kalten, gefrorenem Eiskörper in das darunterliegende Meerwasser strömten. Aufgrund der niedrigen Temperaturen dieser Strahlen gefriert das umgebende Meerwasser. An der Eisunterseite kommt es zur Ausbildung der sog. Eis-Stalaktiten. Während des Tauchens bzw. bei Niedrigwasser konnten diese beobachtet werden - vergl. Abb. 3.15. Im weit fortgeschrittenen Zustand während des Schmelzens besitzt altes Eis aufgrund dieser Vorgänge eine Vielzahl großer senkrecht nach unten gerichteter Kanäle. Der Eiskörper wirkt durchlöchert wie ein „Schweizer Käse“. Die Festigkeit nimmt dabei drastisch ab, das ganze Gefüge wird morsch und zerfällt schließlich wie ein verwittertes Stück Holz oder ein alter Knochen - vergl. Abb. 3.16. Dieser Vorgang des Alterns von Eis ist ein irreversibler Vorgang.

Im Eis treten aufgrund der Gezeitenströmungen hydrostatische Druckdifferenzen auf. Es wurden Werte von bis zu $\Delta p = 20$ mb gemessen. Gelegentlich wird die Eisfläche durch in kurzen Zeiten aufgebraachte Schneelasten nach unten gedrückt. Dabei dringt Salzlösung durch das Kanalsystem im Eiskörper nach oben und gelangt auf die Eisoberfläche. Hier bildet sich dann in Verbindung mit dem frisch aufgebraachten Schnee auch bei strengem Frost eine bis zu 30 cm mächtige Schicht von sehr salzigem Schneematsch. Wie die später dargestellten Untersuchungen zeigten, herrschten in dieser Zone besonders lebhafte Aktivitäten von Mikroorganismen.

Aufgrund der temperaturabhängigen Ausdehnungskoeffizienten von Eis wurden vorzugsweise bei Temperaturänderungen starke Spannungen, Pressungen und schließlich sogar Reißbildung in Eisformationen beobachtet. Diese Vorgänge waren begleitet von knirschenden, knackenden und gelegentlich auch laut knallenden Geräuschen. Gemessen wurden im Eis Drücke bis zu $p = 5 \cdot 10^6$ N/m². Diese hohen Druckwerte können einige Minuten lang andauern. In der Mikrostruktur des Eises finden dabei z. T. dramatische Veränderungsprozesse statt, welche weiter unten diskutiert werden.

Kapillarkräfte scheinen im Eis ebenfalls eine wichtige Rolle zu spielen. In dem System von Eiszellen, Kaviolen und kleinen Bläschen wirken unterschiedliche Oberflächenspannungen, welche zudem stark abhängig sind von den in der Flüssigkeit gelösten Stoffen sowie von der Temperatur. Unter dem Mikroskop konnte beobachtet werden, wie sich die entsprechenden Grenzflächen

spontan veränderten und wie sich insbesondere die im Eis befindlichen Schwebeteilchen auf den Oberflächen kleiner Bläschen ablagerten - vergl. Abb. 3.17.

Die festen Eiselemente und auch die gebildeten Salzkristalle machen unter dem Mikroskop einen weichen, manchmal sogar flexiblen Eindruck. Sie scheinen von einer hauchdünnen Membrane eingehüllt zu sein. Membranähnlich Strukturen wurden mit einer Dicke von einigen hundert μm beschrieben [Halter 1987] und scheinen typisch für Wasserstrukturen in der Nähe von Eis bzw. Kristalloberflächen zu sein. Zusammengehalten werden die einzelnen Bereiche von den sog. Wasserstoffbrücken. Die damit verbundenen relativ schwachen Kräfte reichen aus, um geordnete Strukturen zu bilden. Wasserstoffbrücken spielen auch bei biologisch so grundlegenden Strukturen wie Proteinmolekülen und Nukleinsäuren (DNA-Doppelhelix) eine wichtige Rolle. Unter der Wirkung veränderlicher Temperaturen und der dadurch hervorgerufenen Konzentrationsgradienten wurden Veränderungen der Membranformen im Eisgefüge beobachtet - vergl. Abb. 3.18. Die räumliche Temperaturverteilung im Eiskörper sowie die praktisch fortwährend beobachteten zeitlichen Temperaturgradienten bewirken die energetisch gesteuerten Veränderungen der Mikrostruktur von Eis. In Abb. 3.19 sind einige typische gemessene Temperaturverteilungen im Eiskörper gezeigt. Derartige Temperaturverteilungen lassen sich auch theoretisch berechnen wenn dabei die entsprechenden Temperaturverläufe in der Luft über dem Eis, die Wärmeleitfähigkeit in der Eisstruktur sowie die Mächtigkeit der Eisdecke berücksichtigt werden.

Für den Fall, daß mit abnehmender Temperatur weitere Wasseranteile zu Eis kristallisieren, werden erhebliche Energiebeträge freigesetzt. Beim Gefrieren von Wassermolekülen an einer Eisoberfläche wird die Erstarrungsenergie frei. Außerdem steigt die Salzkonzentration in der umgebenden Lösung. Darin entstehen und wachsen möglicherweise bereits vorhandene Salzkristalle - z.B. CaCO_3 . Die dabei frei werdende Kristallisationsenergie ist relativ groß. Sie liegt in der Größenordnung von einigen eV für jedes Molekül im Kristall.

Eine Zusammenstellung von einigen im Eis beteiligten Energieformen ist in Tab. 3.3 gegeben.

Von allen genannten Energieformen scheint die Erstarrungsenergie von Wasser quantitativ am wichtigsten zu sein. Es wurde z.B. beobachtet, daß bei einer Lufttemperatur von -20°C die Schicht von Meereis zu Anfang mit einer Geschwindigkeit von 1 cm/h wuchs. Während die Eisdecke auf der Fläche A um ein Stück dx dicker wird, wird die Erstarrungsenergie dw frei und an die Luft abgeführt:

$$dw = r \cdot A \cdot dx \cdot g .$$

Die spezifische Erstarrungsenergie für Wasser beträgt: $g = 3,3 \cdot 10^5 \text{ J / kg}$. Mit der beobachteten Geschwindigkeit der Eisbildung von $\frac{dx}{dt} = 1 \text{ cm / h}$ und der Dichte $r = 900 \text{ kg / m}^3$ ergibt sich somit eine Wärmeleistung von

$$\frac{dw}{dt} = 830 \text{ W / m}^2 .$$

In einem späteren Stadium der Eisbildung wuchs die beobachtete Eisstärke nur noch mit der Geschwindigkeit von $\frac{dx}{dt} = 1 \text{ cm / Tag}$. Dieses Eiswachstum entspricht einer abgegebenen Wärmeleistung von $\frac{dw}{dt} = 34 \text{ W / m}^2$. Die maximal abgegebene Sonnenleistung auf die Oberfläche der Barentssee beträgt ca. 900 W / m^2 , während die durchschnittliche Leistung nur ca. 50 W / m^2 ausmacht. Ein Vergleich dieser Werte zeigt, daß die beim Gefrieren von Meerwasser im Eiskörper freigesetzte Energie ähnlich groß sein kann wie die eingestrahlte Sonnenenergie.

Wasser, insbesondere Eis sind rel. schlechte Wärmeleiter. Makroskopisch werden Tau- bzw. Gefrierprozesse geprägt durch Wärmeaustauschvorgänge mit der Umgebung. Wie bei der Kavitation durch Ultraschalleinwirkung auf Wasser bekannt, können starke lokale Überhitzungen in kleinen Kompartimenten auftreten (z.B. punktuell 5000°C in kollabierenden Dampfblasen [Cheung et al. 1991]). Im Eis/Wassersystem treten Energieaustauschvorgänge durch starke Konvektion in Erscheinung [Kahraman et al. 1998]. Auswirkungen dieses Energieflusses in molekularen Dimensionen sind nicht beschrieben. Deren Betrag sollte sich allerdings in Größenordnungen bewegen, die Bindungsknüpfung bzw. -spaltung organischer Moleküle zulassen.

Die beim Wachstum von Eis im Eisgefüge auftretenden Wärmeströme konnten direkt mittels kleiner empfindlicher Wärmestromsensoren gemessen werden. Dabei wurden gleichzeitig mittels Mikroskop die dabei stattfindenden Phänomene - nämlich die Bildung der Eiskristalle und die strukturellen Veränderungen der Mikrostruktur - beobachtet. Einige der qualitativen Ergebnisse sind in Abb. 3.20 gezeigt. Die sprunghaft auftretenden Energiespitzen im Falle des gefrierenden Meerwassers spiegeln die zeitlich nacheinander ablaufenden Ereignisse wieder. Gefrierendes Süßwasser dagegen zeigt einen vergleichsweise schlichten Energieverlauf geprägt durch den herausragenden Moment beim plötzlichen Erstarren der unterkühlten Wasserprobe.

Mittels einer hochempfindlichen IR-Wärmebildkamera (3 - 5 μm) wurden die in Abb. 3.21 gezeigten Bilder von diversen Eisproben aufgenommen. Es werden im Eisgefüge Temperaturinhomogenitäten sichtbar. Die erkennbaren Temperaturdifferenzen betragen bis zu $\pm 1^\circ \text{C}$. Allerdings beträgt die räumliche Auflösung der IR-Bilder nur $0,1 \times 0,1 \text{ mm}^2$. Diese Auflösung reicht für die korrekte Wiedergabe der Feinstruktur im Meereis nicht aus.

Die vorgestellten Ergebnisse verdeutlichen, daß im Meereis verschiedenartige Energieformen gebunden sind, welche je nach den herrschenden Randbedingungen ineinander umgewandelt werden. Insbesondere nutzt der „Organismus Eis“ die bei der Phasenwandlung von Wasser zu Eis freiwerdende große Energie aus, um die Einstellung des endgültigen thermodynamischen Gleichgewichts hinauszuzögern und einen Zustand höherer Ordnung herzustellen. Die dabei beobachteten dynamischen Vorgänge werden im folgenden behandelt.

3.3 Dynamische Vorgänge

Zu jeder der in Abb. 3.19 gezeigten Temperaturverteilung gehört eine spezifische Verteilung der im Eisgefüge gebundenen Energie. Allerdings sind die Temperaturverteilungen in der Realität zeitlich niemals stabil, sondern ständig kleinen Veränderungen unterworfen. Außerdem zeigt Eis sog. thermische Hystereseeffekte, d. h. die jeweils eingenommenen Zustände sind wesentlich von der Vorgeschichte abhängig. Das liegt u. a. an der Tatsache, daß die erste Bildung von Eiskristallen nur bei einer Unterkühlung der Salzlösung von einigen Zehntel Graden unter dem Gefrierpunkt einsetzt.

Ausgehend von diesen Effekten wird deutlich, daß bei jeder Temperaturveränderung im Eis komplizierte exakt kaum vorhersagbare Veränderungen in der Mikrostruktur auftreten mit gleichzeitig stattfindender Umwandlung einzelner Energieformen. Der „Motor“ für diese Vorgänge sowie für das Wachsen, den Erhalt und das Schmelzen von Eis überhaupt wird durch die Temperaturdifferenz zwischen der Atmosphäre über dem Eis und dem Meerwasser unter dem Eis angetrieben. Meereis stellt somit ein System dar, welcher durch Ausnutzung von Wärmeenergie aus der gegebenen Temperaturdifferenz seine spezifische Mikrostruktur mit allen darin beobachteten Phänomenen aufbaut und erhält. Diese Eigentümlichkeit des „Organismus Meereis“ ist in gewisser Weise vergleichbar mit dem von lebenden Organismen betriebenen Energieumsatz.

Im folgenden werden einige der beobachteten dynamischen Vorgänge im Meereis zusammengestellt. Das Wachstum der Eisschicht sowohl auf dem

weit offenen Woodfjords als auch auf der kleinen Meereslagune Mushamna wurde regelmäßig gemessen - vergl. Abb. 3.22. Während der ersten Bildung von Eiskristallen breiten diese sich relativ rasch auf der Oberfläche der unterkühlten Meeresoberfläche aus. Dabei wurden in der ersten Wachstumsphase von 1 - 2 Minuten Geschwindigkeiten von bis zu 1 mm/s gemessen, mit denen sich die Grenzschichten der Eiskristalle nach vorn bewegten. Nachdem sich die übliche Mikrostruktur im jungen Eis mit festen Eiselementen, Kaviolen und Kanälen ausgebildet hatte, wurde bei starken Temperaturgradienten z. T. dramatisch ablaufende Vorgänge beobachtet.

Bei einem Temperaturgradient von $0,1^{\circ}$ C/mm wurden z.B. Strömungsgeschwindigkeiten in den Kanälen von bis zu 0,5 mm/s gemessen. Unter dem Mikroskop wurde beobachtet, wie kleine Bläschen und Eiskonfigurationen zerplatzten unter Erzeugung schwacher Stoßwellen. In einigen Fällen traten in eruptiver Weise sehr kleine Gasbläschen mit einem Durchmesser von 1 - 10 μ m aus dem Eisgefüge aus.

Bei Temperaturgradienten von ca. $0,01$ bis $0,05^{\circ}$ C/mm wurden amöbenhafte Bewegungen der von Grenzschichten umhüllten Kaviolen und Bläschen beobachtet. In einigen Fällen falteten sich die Grenzschichten ähnlich wie Doppelmembrane. Sie bildeten Einstülpungen, vereinigten sich miteinander oder lösten sich auf. Kleine Gasbläschen bildeten sich gelegentlich in mit Flüssigkeit gefüllten Vakuolen. Unter dem Einfluß konvektiver Kräfte begannen sie gelegentlich, zu kreisen oder auch zu rotieren. Die beobachteten Kreisfrequenzen lagen im Bereich von $0,1$ bis 1s^{-1} . Manchmal trennten sich zuvor verbundene Eiszellen voneinander - vergl. Abb. 3.23.

Die durch Grenzschichten geprägte Zellstruktur von Meereis mit eingebetteten kleinen Kanälen und Kaviolen konnte durch eine Untersuchung mittels Kernspintomographie (NMR) am Berufsgenossenschaftlichen Unfallkrankenhaus Hamburg unter Leitung von Prof. Wolter sichtbar gemacht werden - vergl. Abb. 3.24. Dazu wurde Meerwasser durch definiertes Gefrieren in einen Eiszustand versetzt, welcher nach den auf Spitzbergen gemachten Erfahrungen originale Meereis sehr nahe kommt. Die zylindrischen Eisblöcke wurden in unterschiedlicher Weise kernspintomographisch untersucht. Interessant ist, daß bei den gleichzeitig durchgeführten Messungen an gefrorenem Süßwasser keinerlei Strukturen im Eis sichtbar wurden. Vermutlich spielen die nur im gefrorenem Meerwasser vorhandenen zahlreichen Zellkompartimentierungen mit den Grenzschichten dazwischen und den damit gegebenen physikalischen Barrieren für die Diffusionsvorgänge der angeregten Moleküle eine wesentliche Rolle [Rinck et al. 1986]. Diese Untersuchungsmethoden scheinen für weiterführende Messungen am Meereis eine herausragende Rolle spielen zu können [Menzel et al. 2000].

Ein interessantes Phänomen stellt die langsame Wanderung von winzigen mit Salzlösung gefüllten Kaviolen im Eisgefüge dar. So läßt sich z.B. nach [Untersteiner 1986] bei Temperaturgradienten von $0,01^\circ \text{C/mm}$ beobachten und auch theoretisch berechnen, wie sich derartige Kaviolen mit einem Durchmesser von ca. $20 \mu\text{m}$ mit Geschwindigkeiten von ca. $1 \mu\text{m/h}$ gegen die Richtung des Temperaturgradienten bewegen. Diese Wanderung der Kaviolen kann nach [Untersteiner 1986] darauf zurückgeführt werden, daß aufgrund des in der Kaviole herrschenden geringen Temperaturgradienten an der kalten Innenseite ständig weitere H_2O -Moleküle ausfrieren. Dadurch erhöht sich lokal die Salzkonzentration in der Lösung. Die Bewegung der Salzionen folgt dem Konzentrationsgefälle und führt schließlich an der warmen Seite der Kaviole zum Abschmelzen von H_2O -Molekülen. Beim sog. Zonenschmelzverfahren wird zur Herstellung sehr reiner Kristalle in der Halbleitertechnologie ein ähnliches Prinzip technisch ausgenutzt.

Ein möglicherweise für den Start zum Makromolekülaufbau oder Veränderung von Kettenstrukturen wichtiger energetischer Anstoß könnte der durch Gefriervorgänge im Meereseis auftretende Aufbau elektrischer Potentiale sein. Bedingt durch die dynamischen Prozesse bei der Ionenanreicherung beim Gefrieren, bauen sich Potentiale bis zu einigen Volts auf (bekannt als Workman-Reynolds Effekt [Hanley, Weber 1973]).

In Abb. 3.25 sind Meßergebnisse zusammengestellt, welche die genannten Potentialdifferenzen sowie die sich sprunghaft verändernden Werte der elektrischen Leitfähigkeit an den Grenzschichten zwischen den zellulären Strukturen im Meereis verdeutlichen. Diese Signale wurden mit in der Medizin gebräuchlichen Mikrosonden gewonnen, welche durch die Zellstruktur des Eises geführt wurden. Die Stärke der Sonden betrug dabei $0,4 \text{ mm}$.

Neben rein elektromagnetischen Effekten tritt lokal eine starke Veränderung des pH-Wertes auf [Bronshiteyn, Chernov 1991] und Auswirkungen in Form von Zellmembranen-Zerstörungen in der Eisgrenzschicht adsorbierter Lebewesen sind ebenfalls beschrieben [Steponkus et al. 1984].

An den dargestellten Ergebnissen und Überlegungen mag deutlich geworden sein, welche komplizierten und quantitativ kaum vorhersagbaren dynamischen Prozesse im Eisgefüge ständig ablaufen. Das Eis erweckt den Eindruck eines quasi lebenden Organismus, welcher entsteht, wächst, altert und schließlich beim Schmelzen vergeht. Diese Vorgänge scheinen aufgrund der o. g. thermischen Hysterese irreversibel zu sein.

3.4 Zusammenfassende Beurteilung

Die besonderen Eigenschaften von Meereis machen dieses einerseits zu einem optimalen Aufenthaltsort für die heutzutage im Eis lebenden Mikroorganismen. Andererseits kann Meereis aber auch bereits vor 4 Mrd. Jahren gewissermaßen als Wiege des ersten Lebens auf der Urerde gedient haben. Diese Möglichkeit wird in Kapitel 5 diskutiert.

In Tab. 3.4 sind die in diesem Zusammenhang wesentlichen spezifischen Eigenschaften von Meereis zusammengestellt.

Im Inneren von Meereis herrscht ein sehr ausgeglichenes und zeitlich weitgehend stationäres Mikroklima. Die Temperaturen in jungem Meereis bewegen sich in dem engen Bereich von -2°C bis -8°C . Die langen Polar-Tage und -Nächte sorgen für gleichmäßige Licht- und Energieeinstrahlung. Alle für einfache Lebewesen notwendigen Nährsalze sind in hoher Konzentration vorhanden.

Die zellulären Strukturen bilden vielfältige Schlupfwinkel und „ökologisch Nischen“ in einem wäßrigen System mit festen Stützstrukturen. Die Nährsalze und anderen gelösten Stoffe werden lokal aufkonzentriert und gelegentlich auch räumlich aufgetrennt und sortiert. Darüber hinaus könnte die im Eis möglicherweise vorhandene optische Aktivität gegebenenfalls zu einer Selektion von Konformeren bzw. einer selektiven Entstehung beitragen.

Im Verlauf der vielfältigen dynamischen Prozesse werden lokal erhebliche Energiemengen freigesetzt, wodurch Kondensationsreaktionen und andere endotherm verlaufende Reaktionen unterstützt werden können.

An den vielfältigen Grenzflächen und Kristalloberflächen sind unter Mitwirkung des hochkonzentrierten Meerwassers katalytische Wirkungen zu erwarten, welche den Aufbau von Makromolekülen erleichtern. Einmal entstandene Makromoleküle sind zeitlich sehr beständig, da aufgrund der niedrigen Temperaturen im Eis deren thermischer Zerfall nicht wahrscheinlich ist.

Die im Eis gegebenen miteinander kommunizierenden Netzwerke von kleinen Kanälen ermöglicht den Austausch zufällig entstandener, zu einer weiteren Entwicklung führender Moleküle. Die Bildung von schnell wachsenden Kolonien z.B. von Mikroorganismen wird möglich, da sich Keime ausbreiten können und frische Nährlösung herangeführt wird. Die Kristalloberflächen im Eis besitzen charakteristische Netzstrukturen. Daran ist möglicherweise wie an Matrizen die primitive Replikation von Molekülen möglich.

Die Mikrostruktur von Meereis ist geprägt durch vielfältige Grenzschichten, welche wie dünne flexible Membranen die Strukturen scheinbar mit einer dünnen Haut einhüllen. Die Grenzschichten formen sich gelegentlich zu

„Doppelmembranen“ und bilden Einstülpungen. Alle wichtigen Vorgänge im Eisgefüge wie z.B. Kristallisation, Energieaustausch, Formung von Bläschen aufgrund der Oberflächenspannung, Stoffaustausch durch osmotische Vorgänge sowie die Aufkonzentrationen von gelösten Stoffen oder Schwebeteilchen finden an Grenzflächen statt, welche durch o. g. Membranen mit Wasserstoffbrücken geprägt sind.

Die beobachteten Grenzschichten im Eis könnten möglicherweise als noch unbelebte Vorstufen zu den Biomembranen in lebenden Systemen angesehen werden. Die Mikrogrenzschichten spielen vermutlich eine entscheidende Rolle bei dem Verständnis über die Vorgänge im Meereis überhaupt. In Tab. 3.5 sind die wesentlichen Eigenschaften der Grenzschichten sowie die entsprechenden durch experimentelle und theoretische Arbeiten unternommenen Untersuchungen zusammengestellt.

4. Mikroorganismen im Meereis

Nach den im vorangegangenen Kapitel dargestellten Eigenschaften von Meereis stellt sich die Frage, ob und unter welchen Umständen einfache Lebensformen im Eis entstehen konnten. Im Unterschied zu den zeitlos gültigen experimentellen Ergebnissen, gewonnen in den Eisstrukturen, ist es nicht möglich, den ersten Anfängen des Lebens auf der Urerde im heute existierenden Eis nachspüren zu wollen. Heute leben inzwischen im Eis viele vitale und aggressive Mikroorganismen, welche jedes entstehende Makromolekül oder primitive Vorstufen zum Leben sofort für den eigenen Stoffwechsel verwenden und damit vernichten würden. Insbesondere deshalb können weder im Eis noch anderswo auf der heutigen Erde organische Vorstufen auf dem Wege zur Entstehung des Lebens gefunden werden.

Trotzdem ist es sinnvoll, im heute existierenden Eis nach dort lebenden Mikroorganismen zu suchen und deren Verhalten zu beobachten, und zwar u. a. aus den zwei folgenden Gründen:

1. Kenntnisse über die heute im Eis lebenden Mikroorganismen helfen zu verstehen, ob und wie primitive Lebensformen in der durch Eis bestimmten Umwelt überhaupt entstehen und sich dort weiterentwickeln konnten. Lange Zeit herrschte die Meinung vor, daß z.B. bakteriologisches Leben in der Kälte prinzipiell nicht möglich sei. Denn viele der für das Leben wichtigen Enzyme verlieren ihre Wirksamkeit bei Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt von Wasser.
2. Nachdem an verschiedenen Orten auf der Erde in der Kälte lebende Bakterien entdeckt wurden und damit die Existenz von entsprechenden Enzymen deutlich wurde, entwickelt sich ein Interesse an einer möglichen industriellen Nutzung dieser Enzyme. Deshalb besteht ein wachsendes Bedürfnis, mehr über die Psychrophilen zu erfahren und weitere Arten zu finden - vergl. [Kristianson, Hreggvidsson 1995, Pennisi 1997, Bowman et al. 1997] Über die Psychrophilen gibt es zahlreiche weitere Veröffentlichungen.

Im folgenden werden zunächst die im Meereis von Spitzbergen gefundenen Organismen zusammengestellt. Danach folgen einige Beobachtungen über deren Eigenschaften und Verhalten sowie über die im Laufe des Jahres veränderliche Häufigkeit ihres Auftretens. Die Bedeutung der Mikroorganismen in der Nahrungskette von Spitzbergen wird skizziert. Zum Abschluß wird eine zusammenfassende Bewertung über die im Eis beobachteten Mikroorganismen gegeben hinsichtlich der Fragen nach der Entstehung des ersten Lebens sowie nach der technischen Nutzungsmöglichkeit der gefundenen Psychrophilen.

4.1 Beobachtete Organismen

Im Verlaufe eines gesamten Jahres wurden an unterschiedlichen Stellen in der Nähe des Expeditionsortes regelmäßig Proben zur Untersuchung der darin enthaltenen Organismen genommen. Die Vielzahl der unterschiedlichen Fundorte der Proben ist in Tab. 4.1 zusammengestellt. Der Schwerpunkt bei den Probennahmen lag dabei beim Meereis, weil darin ganzjährig die größte Anzahl aktiver Mikroorganismen angetroffen wurde. Aber auch unter anderen sehr unterschiedlichen Bedingungen wurden Proben mit Mikroorganismen gesammelt - vergl. Abb. 4.1 und 4.2.

An jedem Entnahmeort der Proben wurden i. a. die herrschenden Umweltbedingungen registriert. Insbesondere handelte es sich dabei um Temperaturen, PH-Wert, Salzgehalt und Anteil des im Wasser gelösten Sauerstoffs. Die Proben wurden nach der Entnahme in sterile Probenbehälter gefüllt und bis zur Untersuchung bei einer Temperatur von ca +1° C aufbewahrt.

Zur vorläufigen Bewertung der Proben wurden diese auf sterilen Nährbodenplatten ausgebracht, um die Existenz von Bakterien zu erkennen. In einigen Fällen wurden Bakterienkulturen unter Verwendung verschiedener Nährlösungen angesetzt. Diese waren vor dem Aufbruch der Expedition im Labor für Biotechnologie der TUHH hergestellt worden - vergl. Tab. 4.2. Alle Kulturen wurden bei einer Temperatur von ca. +1° C jeweils während einer Zeitdauer von bis zu 20 Tagen beobachtet. Das Bakterienwachstum wurde anhand der in den Nährlösungen eintretenden Trübung qualitativ bewertet.

In allen Kulturen schien ein gewisses Bakterienwachstum beobachtbar zu sein. Besonders deutlich allerdings trat die Vermehrung von Bakterien in den Nährlösungen Nr. 1 und Nr. 2 in Erscheinung - vergl. Tab. 4.2. Offensichtlich ist der in diesen Lösungen gegebene Zuckeranteil günstig. Bemerkenswert ist die Tatsache, daß die der Nährlösung Nr. 2 zugesetzten Antibiotica das Bakterienwachstum anscheinend nicht erkennbar hemmten. Ob daraus auf einen hohen Anteil von Archaeobakterien in den Proben geschlossen werden kann, ist noch unklar. Die entsprechenden Untersuchungen werden in der TUHH durchgeführt - vergl. dazu [Antranikian et al. 2000]

Auf dem Expeditionsschiff wurden alle gefundenen Proben unter dem Labormikroskop gesichtet und in vielen Fällen mittels Foto- und Filmaufnahmen dokumentiert. Sofern es möglich war, wurden die Mikroorganismen identifiziert und bezüglich der Häufigkeit ihres Auftretens bewertet. Bei einer 1000fachen Vergrößerung unter dem Lichtmikroskop wurden verschiedene Bakterien in Form kleiner Kugeln, Stäbchen und Zylinder beobachtet. Einige der Bakterien bewegten sich auch mit Geißeln vorwärts. Eine Zusammenfassung der in den Proben gefundenen Organismen ist in Tab. 4.3 gegeben.

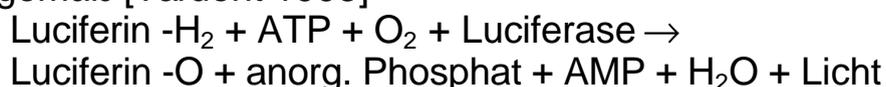
Eine weitergehende Analyse der Proben und Identifikation bzw. Bewertung der gefundenen Bakterien war unter den gegebenen Randbedingungen direkt während der Expedition nicht möglich. Deshalb wurden die als besonders erfolgversprechend beurteilten Proben steril und gekühlt aufbewahrt, bis sich eine Gelegenheit für deren Transport an die TUHH ergab. Während der Expedition war es innerhalb des gesamten Jahres viermal möglich, per Helikopter insgesamt 60 Proben vom Expeditionsort abzusenden. Über die mittels dieser Proben gewonnenen Ergebnisse wird an anderer Stelle berichtet - vergl. [Antranikian et al. 2000].

4.2 Verhalten und Häufigkeit

In allen Proben wurden Mikroorganismen und insbesondere auch Bakterien gefunden, z. T. in einer beeindruckenden Menge. Es scheint auf Spitzbergen ähnlich zu sein wie auch in Zonen mit einem wärmeren Klima. In jeder Probe, ob Wasser oder Erdreich, im Eis oder im Schlamm, überall wimmelt es von Mikroorganismen. Anscheinend ist die fast ständig herrschende niedrige Temperatur im Umfeld von Spitzbergen kein wesentliches Hindernis für das Auftreten und die Vermehrung von insbesondere auch Bakterien. Allerdings scheint die Reproduktionsrate bei den tiefen Temperaturen wesentlich niedriger zu liegen als in einer warmen Umgebung. Nach den mit Hilfe der Bakterienkulturen in den Nährlösungen gewonnenen Ergebnissen betrug die Zeit zur Verdoppelung der Bakteriendichte 3 - 10 Tage bei Temperaturen um +1° C.

Im folgenden werden einige Beobachtungen zusammengestellt, welche die Vitalität der Mikroorganismen und der sonstigen beobachteten Lebewesen bei den ständig gegebenen niedrigen Temperaturen verdeutlichen mögen. In den regelmäßig untersuchten Eisproben wurden in jedem Monat Bakterien gefunden. Aber davon abgesehen gab es weitere Beobachtungen.

Im Januar während der immerwährenden Dunkelheit wurden im salzigen Schneematsch auf der Eisoberfläche bei Temperaturen zwischen -10° C und -15° C gelegentlich grün-blau leuchtende Organismen entdeckt. Möglicherweise handelt es sich dabei um die am Expeditionsort das ganze Jahr über im Meerwasser beobachteten kleinen Rippenquallen (Ctenophora). Es ist bemerkenswert, daß die lichtgebende biochemische Reaktion noch bei derartig tiefen Temperaturen stattfindet. Vermutlich handelt es sich dabei um eine Reaktion von Luciferin, das in Anwesenheit von Wasser und Sauerstoff unter Mitwirkung von ATP durch Vermittlung des Enzyms Luciferase oxidiert wird gemäß [Tardent 1993]



Im Februar wurde beim Auftreten des ersten noch sehr schwachen Tageslichtes die Entstehung und rasche Ausbreitung von Planktonkolonien in Eisblöcken beobachtet. Die durch die bräunlich-rötliche Färbung erkennbaren Kolonien erreichten bei Temperaturen um -20°C innerhalb von ca. 10 Tagen räumliche Ausdehnungen von 20 - 30 cm. Diese Beobachtung zeigt nicht nur, welche vitalen Wachstumsprozesse auch bei sehr tiefen Temperaturen ablaufen, sondern darüber hinaus, wie sich im Eisgefüge aufgrund des Netzwerkes von kommunizierenden Hohlräumen und kleinen Kanälen Mikroorganismen räumlich sehr rasch ausbreiten können. So ähnlich könnte sich auch bei der ersten Entstehung des Lebens im Eis primitive Vorstufen zum Leben von einer besonders günstigen Zone ausgehend über weitere Bereiche verteilt haben.

Anfang März entwickelten sich beim Auftreten der ersten Sonnenstrahlen innerhalb weniger Tage bei Temperaturen zwischen 0°C und -10°C organische Aktivitäten von vermutlich Plankton und Algen im Grenzbereich zwischen Eis und Meerwasser. Dabei traten kleine Schaumbläschen in Erscheinung - vergl. Abb. 4.3. Mit fallenden Temperaturen erloschen diese Aktivitäten bei ca. -10°C , um im Falle der Erwärmung innerhalb weniger Stunden wieder aufzublühen. In den davorliegenden dunklen Monaten ohne Sonnenlicht und ohne pflanzliche Aktivitäten wurden Nährsalze - insbesondere Ntrate und Phosphate - aus tieferen Meeresschichten an die Meeresoberfläche transportiert. Dort wurden sie im Eisgefüge aufkonzentriert, wo Plankton und Algen beim ersten Licht ideale Lebensbedingungen vorfinden.

Ende März wurden während der Tauchgängen an der Eisunterseite sowie in den Spalten und Rissen des Eisgefüges weitverbreitete Eisalgen gesichtet. In den Spalten bewegten sich sehr lebhaft kleine Krebse (*Gammarus wilkitzkii*) und schienen dort Plankton und Mikroorganismen aufzunehmen - vergl. Abb. 4.4. Die Temperatur im Wasser zwischen den Eisformationen betrug -2°C . In einigen kleinen Spalten und Kaviolen wurden Temperaturen bis herab zu -4°C gemessen. In den Eisspalten wurden auch kleine Fische (Polarorsch) beobachtet. Außerdem bewegten sich im kalten Meerwasser unter dem Eis zahlreiche Medusen (*Aglantha Digitale*) und Rippenquallen (*Ctenophora*) sowie Meeresschnecken. Bei den niedrigen Temperaturen verwenden die beobachteten Lebewesen offensichtlich "Frostschutzmittel" in ihrer Körperflüssigkeit, um nicht zu erstarren. Die häufig auftretenden Krebse (*Gammarus wilkitzkii*) wurden bezüglich ihres Verhaltens in der Kälte während der Expedition sorgfältig untersucht. Dabei wurde deutlich, daß diese Krebse auch noch bei -4°C lebhaft reagieren und sich schnell bewegen können. Diese Lebewesen besitzen eine Körperflüssigkeit, welche sich bezüglich ihres Salzgehaltes (insbesondere von Na^+ und Cl^-) ständig dem umgebenden Meerwasser angleicht - vergl. [Aarset, Aunaas 1987]. Dadurch wird erreicht, daß die Körperflüssigkeit ebenso wenig wie die hochkonzentrierte

Salzlösung im Eis bei tiefen Temperaturen erstarbt. Bei -4°C liegt der Salzgehalt doppelt so hoch wie in normalem Meerwasser. Möglicherweise ist diese erstaunliche Fähigkeit ein Relikt aus der Urzeit, als sich das erste Leben gemäß der Hypothese in den Kaviolen innerhalb der Eisstrukturen entwickelte, wo ebenfalls hohe Salzkonzentrationen und niedrige Temperaturen herrschen.

Die im kalten Meerwasser und in den Eisspalten bei Temperaturen von bis herab zu -2°C beobachteten kleinen Polardorsche verwenden vermutlich zusätzlich zu der o. g. Methode einen weiteren Effekt, um sich vor dem Erstarren zu schützen. Im Blut dieser Fische sind gewissermaßen als Frostschutzmittel Glykopeptide gelöst [Eastman, De Vries 1991] Das Grundelement dieser Glykopeptide besteht aus drei Aminosäuren sowie zwei Zuckern. Möglicherweise ist auch diese Methode zur Verhinderung von Gefrieren von Vorgängen übernommen, welche ursprünglich in den Kaviolen im Eis bei der Entstehung von Makromolekülen sowie deren Trennung und Sortierung abgelaufen sein könnten.

Im April wurden gelegentlich während der heftigen Schneestürme kleine rote Zusammenklumpungen von Schnee und Mikroorganismen wie Blutstropfen über die eisigen Schneefelder gewirbelt. Unter dem Mikroskop wurde deutlich, daß es sich dabei um Blutschneعالgen (*Chlamydomonas nivalis*) in Verbindung mit einem Geflecht von Pilzfäden handelte - siehe Abb. 4.5. Möglicherweise sorgen auf diese Weise die an Schneehängen erkennbaren ausgedehnten Kolonien von Blutschneعالgen für ihre weiträumige Verbreitung. Interessant dabei ist es, daß die Blutschneعالgen zusammen mit den Pilzfäden und den Schneekristallen in ihren kleinen Klümpchen ein Umfeld mit einer Konsistenz ähnlich wie Meereis aufbauen. Es sind unter dem Mikroskop feste Stützstrukturen von den Pilzfäden sowie flüssige Phasen von halb geschmolzenen Schneekristallen erkennbar. Das mikroskopisch dichte Nebeneinander von festen bzw. halbfesten Elementen und einer flüssigen Nährsalzlösung mit entsprechenden Nischen und kleinen Kanälen scheint für jedes primitive Leben und auch für jeden Lebensanfang höher entwickelter Lebensformen unverzichtbar zu sein.

Im Mai wurden Eisschichten aus der nahezu 1 m starken Eisdecke herausgebrochen und untersucht. Auf der Eisunterseite waren ausgedehnte verschieden gefärbte Algenkolonien erkennbar. Anscheinend spielten sich auch ein Verdrängungswettbewerb zwischen verschiedenen Algenarten ab. Die Kolonien hatten sich von der Eisunterseite aus bis zu 40 cm in den Eiskörper nach oben ausgebreitet. Insbesondere Kieselalgen (*Nitzschia Frigida* und *Melosia Arctica*) wurden identifiziert - vergl. Abb. 4.6. Die Ausbreitung der verschiedenen Kolonien sowie deren Wachstumsgeschwindigkeiten hängen vermutlich mit den in der Eisstruktur gegebenen lokal mehr oder weniger

günstigen Bedingungen bezüglich vorhandener Nährsalze, räumlicher Struktur und Lichtzone miteinander konkurrierender Organismen zusammen.

Im Juni war das gesamte Meereis geradezu durchseucht von darin lebenden Mikroorganismen. In jeder Eisprobe konnten unzählige Bakterien, Flagellaten, Blutschneealgen, Ciliaten und Kieselalgen beobachtet werden - vergl. auch Abb. 4.7.

Im Juli bildeten sich in einigen eisfreien Zonen auf der Oberfläche des Meerwassers eine Haut von organischen Ablagerungen, welche sich unter der Wirkung von Wind und Wellen zu schaumigen Klumpen formierte. Diese organischen Stoffe wurden vorzugsweise an den Eiskanten wie von einem Sieb aufgefangen und dort abgelagert - vergl. Abb. 4.8.

Im August schienen die im Meerwasser befindlichen pflanzlichen Organismen relativ schnell abzusterben. Es bildete sich dabei vielfach eine braune schleimige Substanz, welche in kleinen Flocken im und auf dem Wasser herumtrieb. Von dem sich bereits wieder neu bildenden dünnen Eis wurden diese Flocken gesammelt und im Eisgefüge eingelagert. Unter dem Mikroskop zeigten sich an den abgestorbenen Algenresten unzählige Bakterien, welche darin wohl günstige Lebensbedingungen vorfanden - vergl. Abb. 4.9.

In den danach einsetzenden dunklen Monaten wurden in den Eisproben im wesentlichen Bakterien und organische Zersetzungsprodukte beobachtet.

Ausgehend von derartigen Beobachtungen läßt sich qualitativ eine jahreszeitliche Variation der Häufigkeit der beobachteten Organismen im Vergleich zu dem zeitlich variablen Licht und dem Angebot von Nährsalzen ermitteln - vergl. Abb. 4.10. Im Jahresablauf sind verschiedene gegeneinander phasenverschobene Häufigkeitsverteilungen erkennbar. Der den zeitlichen Ablauf steuernde Parameter scheint im wesentlichen der jahreszeitliche Verlauf des Lichtes zu sein. Die Temperatur ist nach den Beobachtungen kein so wesentlicher Parameter, was aufgrund der fast immer gleichbleibenden Innentemperatur des Meereises nicht überrascht.

Das Meereis spielt bei dem jahreszeitlichen Wechsel von Entstehen, Wachsen und Absterben der Organismen eine ganz wichtige Rolle. Es dient mit seinem zellulären Aufbau nicht nur als Lebensraum für die Mikroorganismen, sondern insbesondere auch als Speicher, welcher Nährsalze und andere Nährstoffe periodisch sammelt und anreichert. In den dunklen Monaten ohne Licht und Photosynthese werden die im Sommer verbrauchten Nährsalze - Nitrat, Phosphat sowie Silikat - an die Meeresoberfläche transportiert und dort im Eisgefüge aufkonzentriert -siehe auch [Sakshaug 1994] Beim ersten einsetzenden Licht werden diese „Vorratskammern“ im Meereis relativ rasch

von den explosionsartig anwachsenden Algen- und Plankton-Beständen geplündert. Nach dem Verbrauch der gespeicherten Nährsalze geht das Algenwachstum deshalb bereits im frühen Sommer trotz reichlich vorhandenen Lichtes stark zurück. Die organischen, abgestorbenen Reste der Algen verbleiben im Eisgefüge und werden darüber hinaus aus dem umgebenden Wasser herausgefiltert und im Meereis angereichert. In diesem Umfeld finden die nicht von der Photosynthese abhängigen Mikroorganismen und insbesondere die Bakterien auch in den dunklen Monaten ein reiches Nahrungsangebot.

Diese hier skizzierten innerhalb eines Jahres periodisch ablaufenden Prozesse im Meereis zeigen eine gewisse Ähnlichkeit zu den während der Entstehung des Lebens vermuteten Abläufen. Dazu gehören die Anreicherung der „Ursuppe“ mit einfachen Bausteinen (Aminosäuren), die Bildung von Makromolekülen, die Entstehung von Konkurrenzsituationen sowie der Untergang von Zwischenstufen in Verbindung mit der Ausbreitung „erfolgreicher“ Nachfolger. Es scheint, daß die im Meereis gegebenen Bedingungen besonders geeignet sind, um solche Abläufe zu ermöglichen und zu fördern.

4.3 Nahrungskette von Spitzbergen

Der Artenreichtum ist bei niedrigen Temperaturen im Lebensumfeld vergleichsweise gering. Deshalb ist die auf Spitzbergen gegebene Nahrungskette von den Mikroorganismen bis hin zum Eisbären relativ übersichtlich [Gulliksen 1992] - vergl. Abb. 4.11. Für den Aufbau und den Erhalt dieser Nahrungskette spielen die Mikroorganismen eine entscheidende Rolle. Das wird auch an den meßbaren entsprechenden Dichten von organischem Material deutlich [Sakshaug 1994] - vergl. Tab. 4.3. Interessant ist an diesen Werten auch, daß das Meereis für den gesamten Bestand der Mikroorganismen von ausschlaggebender Bedeutung zu sein scheint. So ist z.B. in altem Eis pro km² eine Menge von Organismen enthalten, welche gleich groß ist wie die Menge von Bakterien im gesamten Meerwasser unter einer Oberfläche von 1 km².

Die im Meereis mit dem Mikroskop beobachteten Mikroorganismen halten sich grundsätzlich an den Grenzflächen zwischen den festen Eiselementen und der flüssigen Nährsalzlösung auf. Das ist verständlich, weil dort ein mechanischer Halt und Schutz gegeben ist und außerdem aufkonzentrierte Nahrungsstoffe vorliegen oder vorbeiströmen - vergl. Abb. 4.12. Das Prinzip, daß für das Leben alle wichtigen Prozesse, wie z.B. auch die Entstehung komplexer Moleküle, bevorzugt an Grenzflächen zwischen festen und flüssigen Phasen ablaufen, spiegelt sich auch in der makroskopisch beobachteten Welt des Lebens wieder:

- Die kleinen Krebse suchen und finden ihre Nahrung unter dem Wasser in den Eisspalten und an den Eisgrenzflächen.
- Die Meeresvögel - insbesondere die Teiste - tauchen grundsätzlich an den Rändern der Eisfelder nach Nahrung, weil hier das Angebot am reichhaltigsten ist. Sie suchen beim Tauchen systematisch die Eisunterseite ab.
- Die Robben suchen ihre Nahrung in Form von Krebsen und Fischen ebenfalls - sofern möglich - grundsätzlich an Eiskanten. Zum Ruhen begeben sie sich am Rande der Eisfläche auf das Eis.
- Die Eisbären schließlich lauern und jagen ihre Hauptbeute - die Robben - immer an den Rändern von Eisfeldern bzw. an den Atemlöchern im Eis.

Neben den für die Nahrungskette wichtigen Bakterien, welche im Wasser und im Eis leben, gibt es viele weitere Bakterien, welche im Innern von z.B. Krebsen und Fischen vorkommen. Diese wechselwarmen Tiere leben im kalten Wasser mit Temperaturen dicht am Gefrierpunkt. Sie besitzen Verdauungssysteme, worin das Vorkommen von Bakterien vermutet wurde. Deshalb wurden die Inhalte von Mägen und Därmen der im kalten Wasser gefangenen Fische mittels Mikroskop untersucht. Die Sichtung ergab dabei eine große Zahl verschiedenartiger Bakterien, welche vermutlich zu den Psychrophilen gehören. Entsprechende Proben wurden zur weiteren Bearbeitung an die TUHH gesendet. Möglicherweise können darin für die industrielle Anwendung besonders interessante neue Bakterienarten gefunden werden. Schließlich stellt das Verdauungssystem z.B. eines Fisches in gewisser Weise einen Bioreaktor dar, der mit Hilfe seiner in der Kälte aktiven Bakterien funktioniert. Über die entsprechenden Ergebnisse wird an anderer Stelle berichtet [Antranikian 2000].

4.4 Zusammenfassende Bewertung

Die während eines gesamten Jahres im Eis von Spitzbergen beobachteten Mikroorganismen haben zu den im folgenden zusammengefaßten Ergebnissen geführt:

1. Im Eis - insbesondere im Meereis - leben ganzjährig zahlreiche Mikroorganismen. Die Bakterien überleben nicht nur in der ständig herrschenden Kälte, sondern sie vermehren sich und erwecken einen vitalen Eindruck. Dabei sind allerdings die Wachstumsgeschwindigkeiten deutlich geringer als bei Bakterienkulturen in warmer Umgebung. Die Bakterien wurden nicht nur an einigen speziellen Fundorten in der Kälte

beobachtet, sondern sie traten in praktisch allen untersuchten Proben auf. Das Meereis ist das ganze Jahr über besiedelt von Bakterien. Es wird bezweifelt, daß sich diese Bakterien den „Lebensraum Meereis“ durch Anpassung an die angeblich extremen Lebensbedingungen erobert haben sollen. Vielmehr wird vermutet, daß die beobachteten Mikroorganismen im Meereis ideale Lebensbedingungen vorfinden und dort von Beginn an lebten. Möglicherweise ist nach diesen Beobachtungen sogar das erste primitive Leben überhaupt im Meereis entstanden. Kalte Temperaturen verhindern die Entstehung und die Existenz von bakteriellern Leben nicht.

2. Viele der gefundenen Bakterien gehören naturgemäß zu den für industrielle Nutzungen interessanten Psychrophilen. Zahlreiche erfolgversprechende Bakterienproben wurden während der Expeditionsdurchführung zur näheren Untersuchung, Bewertung und industriellen Nutzung an die TUHH gesendet. Die bereits vorliegenden noch vorläufigen Befunden weisen auf das Vorkommen von neuartigen Psychrophilen in den Proben hin.
3. Die Beobachtungen an den Mikroorganismen zeigen, daß Meereis für diese ein sehr günstiges Lebensumfeld darstellt. Die Gründe dafür liegen im wesentlichen in dem ausgeglichenen Mikroklima, der zellulären Struktur sowie dem aufkonzentrierten Angebot von Nährsalzen und Nährstoffen. Daraus könnte gefolgert werden, daß primitive Vorstufen zum Leben ebenfalls im Meereis entstanden sind und sich dort weiterentwickelt haben. Aus den im Meereis gemachten Beobachtungen können Schlußfolgerungen gezogen werden, wie die Züchtung industriell interessanter Psychrophilen im Labor optimiert werden kann.
4. Einige der Beobachtungen über die Lebensabläufe an den Mikroorganismen im Meereis lassen Rückschlüsse auf Vorgänge bei der Entstehung von Leben im Meereis zu. Dazu gehören:
 - Mikroorganismen bevorzugen zum Leben und Wachsen Mehrphasensysteme mit zellulären Strukturen. Es ist zu vermuten, daß die Entstehung und die Entwicklung der ersten Makromoleküle unter derartigen Bedingungen ebenfalls gefördert wird.
 - Mikroorganismen profitieren im Eis von der periodisch ablaufenden Aufkonzentration von Nährsalzen. Der Effekt der Aufkonzentration wirkt sich vermutlich ähnlich günstig bei der Entstehung von organischen Molekülen in der Ursuppe in Verbindung mit Eis aus.
 - Mikroorganismen halten sich bevorzugt in den Grenzbereichen zwischen den festen Eiselementen und der flüssigen Phase auf. Sie nutzen das gegebene Netzwerk von Kanälen zur Bildung von Kolonien. Das Zusammenwirken von Grenzflächen und Strömungsvorgängen in Verbindung mit Temperatur- und Strukturänderungen im

Eisgefüge fördert Sortier- und Trennvorgänge, was sich bei der Entstehung des Lebens günstig ausgewirkt haben kann.

- Einige der an den Organismen im Eis beobachteten besonderen Fähigkeiten sind vermutlich praktisch unverändert aus der Zeit der Entstehung des Lebens übernommen worden. Dazu gehören u. a. die Anpassung der Körperflüssigkeit an die Zusammensetzung des Meerwassers sowie die Verwendung spezieller Makromoleküle als „Frostschutzmittel“.

5. Entstehung des Lebens im Meereis

Wie könnte vor dem Hintergrund der dargestellten Ergebnisse und der bereits publizierten Erkenntnisse über das Meereis und der darin lebenden Mikroorganismen die Entstehung des Lebens vor 4 Mrd. Jahren auf der Uerde im Prinzip abgelaufen sein?

Wie konnte sich aus der strukturlosen Ursuppe aus relativ einfachen chemischen Bestandteilen die komplex aufgebauten ersten Lebensformen entwickeln?

Im folgenden wird zunächst erläutert, daß Meereis eine ideale Vorstufe zum Leben darstellen könnte. Danach wird dargelegt, wie sich die ersten Lebensformen im Meereis entwickelt haben könnten. Eine kurze Betrachtung über den zeitlichen Ablauf der Entstehung des Lebens beschließt dieses Kapitel.

5.1 Meereis als Vorstufe des Lebens

„Leben“ kann als ein Zustand definiert werden, welcher die folgenden drei Kriterien erfüllt:

1. Metabolismus, d. h. zum Leben gehört Energieaustausch und Stoffwechsel.
2. Selbstreproduktion, d. h. lebende Systeme sind zum Wachstum und zur eigenen Vermehrung befähigt.
3. Mutagenität, d. h. Formen des Lebens entwickeln sich im Laufe der Zeit weiter und passen sich den äußeren Bedingungen an.

Die rein zufällige Entstehung von Leben gilt als extrem unwahrscheinlich bzw. sogar als ausgeschlossen. So führt z.B. Eigen [Eigen, Schuster 1979] aus, daß die zufällige Entstehung lediglich eines Gens mit tausend Symbolen eine Wahrscheinlichkeit von $1:10^{602}$ (eine eins mit 602 Nullen!) besitzt.

Aus der Physik ist ein Prinzip bekannt, wonach extrem unwahrscheinliche Zustände mit Hilfe eines geeigneten Zwischenzustandes in der Realität doch erreicht werden können. Ein Beispiel dafür ist die Funktion des Lasers. Dabei wird nämlich ein labiler Zwischenzustand auf hohem Energieniveau eingestellt, um dann einen kurzzeitigen Laserimpuls auszusenden. Der unterkühlte Zustand einer übersättigten Lösung, aus der plötzlich sehr rasch Kristalle wachsen, ist ebenfalls ein energetisch angeregter, aber labiler Zwischenzustand, von dem aus sich ein Zustand höherer Ordnung entwickelt. Das Prinzip wird u. a. auch beim extremen Bergsteigen ausgenutzt. So hat ein einzelner Bergsteiger keine realistische Chance im Alleingang vom Meeresniveau aus in einer Tour den Gipfel z.B. eines Achtausenders zu erreichen. Aller-

dings ist die Erfolgsaussicht sehr viel besser, wenn gewissermaßen als Zwischenzustand zuvor ein Basislager mit allen Versorgungsmöglichkeiten möglichst dicht unterhalb des Berggipfels eingerichtet wurde.

Es wird vermutet, daß Meereis einen solchen Zwischenzustand auf dem Weg zum Leben darstellen könnte. Meereis kann sogar in gewisser Weise als Vorstufe zu einem lebenden Organismus aufgefaßt werden - vergl. Abb. 5.1. Wie die in Kap. 3 und Kap. 4 dargestellten Untersuchungsergebnisse zeigen, erfüllt Meereis die drei o. g. Kriterien zum Leben, nämlich Metabolismus, Selbstreproduktion und Mutagenität, nicht vollständig, aber es sind deutliche Tendenzen zu deren Erfüllung erkennbar - vergl. Abb. 5.2:

1. Meereis ist ein Organismus, der durch die Aufnahme und Abgabe von Wärmeenergie sowie durch die Umwandlung verschiedener Energieformen wie z.B. beim Gefrieren von Wasser und bei der Kristallisation von Salzen einen Zustand höherer Ordnung aufrechterhält. Damit wird das Erreichen des endgültigen thermodynamischen Gleichgewichtes, wie es auch ein lebender Organismus tut, hinausgeschoben. Die dabei im Meereis umgewandelten Energieformen beziehen noch nicht die Energie chemischer Reaktionen ein, wie das wesentlich bei allen lebenden Organismen ist. Aber die in den Eiszellen gegebenen und energetisch gesteuerten dynamischen Vorgänge können den Ablauf chemischer Reaktionen fördern und damit die Entstehung eines „Metabolismus“ vorbereiten.
2. Meereis entsteht, wächst, altert und vergeht schließlich. Meereis wehrt sich gegen seinen Untergang beim Schmelzen und reagiert aktiv, um sich zu erhalten. Der ganze Vorgang ist ein irreversibler Prozeß. Insofern erfüllt Meereis das Kriterium „Selbstreproduktion“ relativ weitgehend.
3. Meereis stellt einen außerordentlich kompliziert aufgebauten, sich dynamisch verhaltenden Organismus dar, dessen Bauplan und „Lebensprinzipien“ durch eine Vielzahl von physikalischen Gesetzmäßigkeiten bestimmt ist. Die zur Realisierung von Meereis mit seinen ganzen Erscheinungsformen notwendigen Informationen sind in den physikalischen Gesetzmäßigkeiten gewissermaßen in analoger Form gespeichert. Ein ganz wesentlicher Schritt auf dem Weg zum Leben besteht in der Entstehung von DNA, RNA und schließlich Genen. Dabei werden die zum Aufbau von Leben notwendigen Informationen gewissermaßen digitalisiert, wodurch die als Kriterium für Leben genannte „Mutagenität“ möglich wird. Meereis ist für die Entwicklung eines digitalen Speichers für Informationen geeignet, wie u. a. im folgenden Kapitel ausgeführt wird.

Meereis ist ein Aggregatzustand, welcher mit Hilfe von Gesetzmäßigkeiten aus der Strömungsphysik, Festkörperphysik, Wärmephysik, Oberflächenphysik und vielen weiteren Fachgebieten beschrieben werden kann. Die Berechnung der Wahrscheinlichkeit für die zufällige Entstehung des komplizierten „Organismus Meereis“ würde vermutlich zu ähnlich entmutigenden Ergebnissen wie bei der Wahrscheinlichkeitsbetrachtung über die zufällige Entstehung von Leben führen. Dieser Umstand hat hier allerdings keine Bedeutung, Meereis in seiner ganzen Komplexität existiert ja schließlich und scheint einen idealen Zwischenzustand auf dem Wege zum Leben darzustellen - vergl. Tab. 3.4 und Kap 4.

5.2 Entwicklungsschritte zum Leben

Im folgenden wird skizziert, wie sich das erste Leben auf der Urerde unter Ausnutzung des o. g. Zwischenzustandes im Meereis entwickelt haben könnte. Dabei wird jeweils auf die in Kap. 1 erläuterten noch offenen Fragen zur Entstehung des Lebens Bezug genommen - vergl. Tab. 1.1. Auf diese Fragen werden unter Ausnutzung der in Kap. 3 und Kap. 4 dargestellten Untersuchungsergebnisse Ideen für Antworten skizziert.

Wie in Kap. 1 erwähnt wurde, kann davon ausgegangen werden, daß irgendwann und irgendwo auf der Urerde Eis existiert hat. Ein Kubikmeter Meereis enthält ca. 10^{15} Zellstrukturen. Ausgehend von dieser großen Zahl ist die Frage, wieviel Meereis auf der Urerde vorhanden gewesen sein mag, nicht wesentlich. Es ist vermutlich anzunehmen, daß gelegentlich Eis an den Erdpolen mit den auch damals langen Polarnächten aufgetreten ist.

Aufgrund der zeitlos gültigen physikalischen Gesetzmäßigkeiten wird davon ausgegangen, daß sich das damals vorliegende Eis so ähnlich verhalten hat, wie das die durchgeführten Untersuchungen im Meereis von Spitzbergen gezeigt haben. Somit wurden für die folgenden Überlegungen insbesondere die in Tab. 3.4 zusammengestellten Eigenschaften von realem Meereis zugrundegelegt.

Im Eis auf der Urerde werden sich die in der Ursuppe vorhandenen Salze und einfachen Bausteine des Lebens wie z.B. Aminosäuren angereichert haben. Es wird dabei eine Aufkonzentration der gelösten Stoffe sowie eine Speicherung von kleinen Staubpartikeln aufgetreten sein, genauso, wie die Nährsalze der Meere heute im Eis aufkonzentriert werden. Dabei ist es denkbar, daß sich diese einfachen Bausteine des Lebens durchaus nicht nur im Meereis, sondern auch an ganz anderen Orten auf der Urerde, wie z.B. in den gemäß Kap. 1 hypothetisch angenommenen warmen Tümpeln oder in den unterseeischen vulkanischen Rauchern entstanden sein könnten. Von dort könnten derartige Bausteine im Laufe von Jahren durch Meeresströmungen auch

in die vereisten Regionen gelangt sein, wo eine Aufkonzentration im Eis stattgefunden haben könnte. In den kalten Regionen würde der thermische Zerfall der Bausteine praktisch unterbrochen werden.

Im Eis konnten aufgrund der zur Verfügung stehenden verschiedenen Energieformen - wie z.B. der Erstarrungsenergie von Wasser sowie der Kristallisationsenergie von Salzen - endotherm ablaufende Reaktionen stattfinden - vergl. Tab. 3.3. Außerdem konnte dazu auch die in die obersten Eisschichten eindringende UV-Strahlung ausgenutzt werden. Insbesondere wurden während der im Eis ablaufenden Gefriervorgänge energieverzehrende Kondensationsreaktionen gefördert. Auf diese Weise ist auch die Entstehung von z.B. Thioestern im Eisgefüge unter Wasserabspaltung aus einem Thiol und den Amino- und anderen Säuren denkbar

Im Meereis sind Strömungen von hochkonzentrierter Meerwasserlösung in den kleinen Kanälen vorbei an den Grenzflächen von diversen kristallinen, festen Strukturen gegeben. Dabei ist es bemerkenswert, daß in jedem Kubikmeter Meereis die gewaltige Gesamtfläche von 10^4 bis 10^5 m² „Grenzflächen“ innerhalb des Eisgefüges zusammengefaltet ist. Es treten während des Wachstums von Eiselementen und den anschließenden Schmelzvorgängen periodisch wechselnde feste und wäßrige Phasen auf. Außerdem sind im Eisgefüge diverse mineralische Staubpartikel eingelagert. Das alles sind geradezu ideale Bedingungen für unterschiedliche katalytische Wirkungen, mit deren Hilfe sich komplexe Moleküle aufbauen konnten.

Nachdem sich die Makromoleküle gebildet hatten, wurden sie nicht durch einen spontanen thermischen Zerfall zerstört. Die niedrigen Temperaturen im Eis verhindern dies [Levy, Miller 1998]. Darüber hinaus fördern sie sogar die Bildung weiterer Verkettungen. So findet z.B. die Nukleotidanlagerung an die wachsende Doppelhelix der Nukleinsäure am besten bei niedrigen Temperaturen statt [de Duve 1991]. Eine Publikation von Schuster [Schuster et al. 1993] beschreibt sogar eine Beschleunigung laborüblicher Peptidsynthesen durch Einfrieren des Ansatzes. Die Reaktantaufkonzentration in den Eiskaviolen, die als Ursache angesehen wird, legt dabei direkte Analogschlüsse zu Vorgängen im Meereseis nahe. Die entstandenen Makromoleküle bewegen sich in der flüssigen Phase zwischen den Eisgrenzflächen und Kristallstrukturen. Aufgrund des kommunizierenden Netzwerkes von Kanälen und Kaviolen im Eis sowie aufgrund der praktisch immer gegebenen räumlichen und zeitlichen Temperaturgradienten können sich die Makromoleküle über große Bereiche im Eisgefüge ausbreiten. Die unterschiedlichen Arten von Makromolekülen besitzen verschiedene Eigenschaften u. a. hinsichtlich ihrer Haftwahrscheinlichkeit an den diversen Grenzflächen, ihrer temperaturabhängigen Beweglichkeit in der Lösung sowie ihrer Fähigkeit, den Gefrierpunkt der Lösung zu verändern. Diese Eigenschaften der Makromoleküle im Umfeld

des gegebenen Eisgefüges stellen geradezu ideale Voraussetzungen zur Realisierung von Trenn- und Sortiervorgänge unter den verschiedenen Makromolekülararten dar. Zum Nachweis bzw. zur Auftrennung von Aminosäuren und Proteinen werden in der Biochemie u. a. Methoden der Verteilungschromatographie, der Elektrophorese sowie Verfahren unter Ausnutzung der Adsorptivität verwendet. Ein großer Teil der für diese verschiedenen Verfahren ausgenutzten Vorgänge und dafür notwendigen apparativen Randbedingungen sind im realen Meereis gegeben. Meereis kann im Prinzip als eine Art Flüssigkeitschromatograph aufgefaßt werden. Es ist somit wahrscheinlich, daß sich im Eis unterschiedliche Zonen mit der spezifischen Anreicherung verschiedener Arten von Makromolekülen ausbilden. Auf diese Weise könnten die schädlichen sog. Kettenabbruchsubstanzen aussortiert werden.

Ob Meereis optische Aktivität besitzt, ist nach den vorliegenden experimentellen Befunden noch nicht klar. Wenn sich allerdings die entsprechenden vermuteten Effekte zweifelsfrei nachweisen lassen, könnte damit die Chiralität der natürlich gebildeten Proteine erklärt werden. Denn es ist zu vermuten, daß die Proteine an den durch Wasserstoffbrücken geprägten Grenzschichten zwischen den festen Eiselementen und der umgebenden wäßrigen Lösung mit Hilfe der gegebenen Aminosäuren gebildet werden. In diesen Zonen wirken möglicherweise besondere asymmetrische Eigenschaften der Eiskristalle, welche zu optischer Aktivität führen könnten. Dieser Gedankengang könnte möglicherweise die Auswahl der „richtigen“ Konformere beim Aufbau der Proteine erklären.

Zur Replikation von RNA und DNA werden Matrizen benötigt. Diese sind im Eisgefüge - wenn auch in einer sehr viel einfacheren Form - bereits realisiert. Kristalle wachsen aus der sie umgebenden Lösung, indem geeignete Moleküle an den „richtigen“ Stellen auf der Oberfläche des Kristallgefüges anknüpfen. Beim Kristallwachstum entstehen komplizierte Muster von Netzelementen sowie auf der Oberfläche abgelagerte Atomketten mit sog. Halbkristall-Lagen. Fehler während des Kristallwachstums z.B. durch Einlagerung fremder Moleküle führen zu charakteristischen Stufen oder auch Schraubversetzungen im Kristallgitter - vergl. Abb. 5.3. Der Übergang zwischen unterschiedlichen Gitterparametern wird gelegentlich sogar durch ein ganzes Netz von Versetzungen ermöglicht. An diesen Bemerkungen wird deutlich, daß jede Kristalloberfläche eine komplizierte und in gewisser Weise wohl definierte und reproduzierbare Struktur aufweist, gekennzeichnet durch Ecken, Kanten, Stufen, elektrische Feldverteilungen und in wäßriger Lösung zusätzlich auch noch Wasserstoffbrücken.

Ausgehend von dieser im Eis gegebenen Situation wird der folgende Weg zur gesteuerten Entwicklung von organischen Makromolekülen vorgeschlagen. Die Bausteine für die Makromoleküle mögen sich in der die strukturierte Kri-

stalloberfläche umgebenden Lösung befinden. Sie koppeln z. T. über Wasserstoffbrücken oder auch gesteuert von elektrostatischen Kräften an geeigneten Stellen auf der Oberfläche der Kristallstruktur relativ lose an. Dort verbinden sie sich mit den ebenfalls angekoppelten Nachbarelementen und formen schließlich spezifische Makromoleküle. Die dazu notwendige Energie wird möglicherweise durch die beim Kristallwachstum lokal freiwerdenden Impulse aus Kristallisationsenergie geliefert. Die Replikation des charakteristischen Aufbaus dieser Makromoleküle wird bestimmt durch die spezifische räumliche Struktur der Kristalloberfläche, ähnlich wie bei der Wirkung einer Matrize. Für den Fall, daß sich nun aufgrund einer eintretenden Temperatur- oder Konzentrationsänderung einige Schichten des Kristallgitters vom Kristallkörper ablösen, wird das komplette Makromolekül freigesetzt, indem z.B. die Wasserstoffbrücken zum Kristallgitter aufbrechen. Dieser Vorgang kann beliebig oft wiederholt werden und führt zur Anreicherung gleichartiger Makromoleküle in der das Kristallgefüge umgebenden Lösung. Es ist bemerkenswert, daß der hier geschilderte Vorgang eine gewisse Ähnlichkeit zum tatsächlichen Ablauf der Replikation von z.B. DNA aufweist.

Eigen [Eigen, Schuster 1979] hat in seiner Theorie der Hyperzyklen einen hypothetischen Weg der Evolution vom einzelnen Makromolekül bis zur integrierten Zellstruktur beschrieben. Die Hyperzyklen benötigen im Laufe der Entwicklung eine zunehmende räumliche Kompartimentierung und die Entstehung von Zell- bzw. Biomembranen zur Aufrechterhaltung des Stoffwechsels. Meereis scheint ein ideales Umfeld für die hypothetischen Hyperzyklen darzustellen. Die in Hyperzyklen ablaufenden katalytischen Zyklen sowie die Evolution der hyperzyklischen Organisation könnten im Eisgefüge mit den vielen Grenzflächen, Kanälen, Strömungen und Kaviolen für denkbar gehalten werden.

Die Fragen, wann und wie die notwendige Kompartimentierung mit der Ausbildung von Membranen eingesetzt haben könne, wird gegenstandslos. Die geforderte Kompartimentierung ist im Meereis von Anfang an gegeben. Dabei stellen die Zellen im Eis keine nach außen abgeschlossenen Zonen dar, was für die Ausbildung von Hyperzyklen sehr hinderlich wäre. Die im Eis natürlich gegebene Kompartimentierung bildet vielmehr ein Netzwerk von miteinander kommunizierenden Zonen verbunden mit Energie- und Stoffaustausch.

Wie in Kap. 3 ausgeführt, besitzen die im Eisgefüge beobachteten Grenzflächen bereits einen Teil der für die Biomembranen charakteristischen Eigenschaften. Eine schrittweise Weiterentwicklung der im Eis gegebenen Grenzflächen hin zu Biomembranen könnte durch die Anlagerung geeigneter Makromoleküle an den Membran-Grenzschichten geschehen sein.

So komplizierte aufgebaute Gebilde wie z.B. Mitochondrien oder auch der Golgi-Apparat in lebenden Zellen scheinen sich zumindest nach ihrem äuße-

ren Erscheinungsbild bereits in den vielfältigen durch Grenzflächen geprägten Strukturen im Eisgefüge abzuzeichnen - vergl. Abb. 5.4.

Die Frage, wie die gemeinsame Wurzel - gewissermaßen der Urahn - allen Lebens in Form der Archaeobakterien, Prokaryoten und Eukaryoten ausgesehen haben mag, läßt sich mit den Kenntnissen über das Meereis diskutieren. Der gesuchte Urahn könnte im „Organismus Meereis“ liegen, deren unbelebte Kompartimente und Grenzschichten sich schrittweise zu mehr oder weniger lebendigen Zellen und Biomembranen mit den entsprechenden Eigenschaften entwickelten. Von diesem ursprünglichen Szenario ausgehend haben sich dann die drei o. g. Formen des Lebens - möglicherweise sogar gleichzeitig - weiterentwickelt.

Die genannten möglichen Abläufe unter Mitwirkung von Meereis könnten durchaus in Wechselwirkung mit anderen, warmen Zonen auf der Urerde stattgefunden haben. Meereis würde dabei die Rolle einer „Werkstatt des Lebens“ bzw. eines primitiven Bioreaktors zugefallen sein mit besonders günstigen Arbeitsbedingungen und der Belieferung mit einfachen Bausteinen. Diese könnten nach ihrer Weiterentwicklung im Eis möglicherweise als Zwischenprodukte wieder abgegeben werden. In einer späteren Zeitphase könnte das Eis weitere wichtige Schritte bei der endgültigen Entstehung lebender Systeme übernommen haben.

Der hier erläuterte Weg zur Entstehung von Leben ausgehend von dem Zwischenzustand Meereis kann bisher nur grob skizziert werden. Zu viele Einzelheiten sind noch ungeklärt und konnten noch nicht experimentell und theoretisch sorgfältig untersucht werden. Es zeichnet sich allerdings bereits jetzt ab, daß sich mit der vorgestellten Hypothese für viele der noch offenen Fragen bei der Entstehung des Lebens in sich widerspruchsfreie Lösungsansätze abzeichnen.

5.3 Zeitablauf

Möglicherweise lief die Entwicklung zu ersten primitiven Lebensformen im Eis relativ rasch ab. So ist es denkbar, daß sich im Eis immer wieder an verschiedenen Stellen „Funken des Lebens“ entwickelten, welche zumeist erfolglos erloschen, bis sich schließlich unter besonders günstigen Bedingungen ein „Flächenbrand“ ausbreiten konnte. Dieser Vorgang lief möglicherweise ähnlich ab, wie bei der im Eiskörper beobachteten Ausbreitung von Kolonien von Mikroorganismen.

Aufgrund der sehr großen Zahl von ca. 10^{15} Zellstrukturen in Verbindung mit 10^4 bis 10^5 m² Grenzflächen bzw. potentiellen Reaktionszonen in jedem Ku-

bikmeter Meereis konnten ständig unzählige Parallelentwicklungen ablaufen. In den Polarregionen herrschte wie heutzutage eine über mehrere Monate zeitlich stabile Einwirkung von UV-Licht bzw. Wärme-Energie. Dadurch konnten sich z.B. langfristige Diffusionsprozesse im Eiskörper von Reaktionsprodukten, welche unter der Wirkung von UV-Licht entstanden, stabilisieren und Gleichgewichte ausbilden. Die Anreicherung solcher Reaktionsprodukte oder auch von energetisch angeregten Molekülen konnte als Folge dieser Prozesse in tiefer gelegenen Eisschichten stattfinden, wohl geschützt vor der zerstörerischen Wirkung der UV-Strahlung.

In der langen Polarnacht herrschte Dunkelheit ohne jede UV-Strahlung. Dabei konnten sich in aller Ruhe räumliche Verteilungen von produzierten Makromolekülen im Eiskörper ausbilden, um die notwendigen Sortier- und Trennvorgänge vorzubereiten.

Möglicherweise wurde die „Nährlösung“ in den Eiskaviolen auch über einige Jahre zunächst mit geeigneten Bausteinen des Lebens angereichert - ein thermischer spontaner Zerfall einmal gebildeter Makromoleküle war ja nicht zu erwarten. Ausgehend davon konnten dann relativ plötzlich von dieser günstigen Situation die o. g. katalytischen Hyperzyklen anspringen und zu schnellen Erfolgen führen.

Nach den experimentellen Befunden im Meereis scheint relativ junges Eis mit einem Alter von bis zu 2 Jahren, welches noch einen engen Kontakt zum flüssigen Meerwasser besitzt, als Ausgangsbasis für die Entstehung von Leben besonders geeignet zu sein. Auch aus diesem Grund wird vermutet, daß der Ablauf wesentlicher Schritte auf dem Weg zum Leben im Meereis möglicherweise innerhalb kurzer Zeiten erfolgte.

6. Schlußfolgerungen

Viele Teilschritte auf dem Weg zum ersten Leben vor 4 Mrd. Jahren sind bereits erforscht und bekannt. Die vorgestellte Hypothese versucht, diese Teilschritte zu einem Gesamtbild zusammenzufügen. Mit den während der Expedition in das Eis von Spitzbergen gewonnenen experimentellen Ergebnissen in Ergänzung zu den bereits bekannten vielfältigen Erkenntnissen anderer Wissenschaftler wurde es möglich, einen konkreten Weg zu skizzieren, wie sich das Leben im Meereis entwickelt haben könnte.

Wie in Kap. 1 ausgeführt, soll die Hypothese im folgenden mit Hilfe der vier Kriterien beurteilt werden:

1. Robustheit gegenüber unsicheren Anfangsbedingungen.
2. Ganzheitlicher Lösungsansatz für alle offenen Fragen bei der Entstehung des ersten Lebens.
3. Übereinstimmung zwischen den hypothetisch angenommenen Vorgängen oder Erscheinungen mit heutigen Lebensabläufen.
4. Experimentelle Überprüfbarkeit wichtiger Teilaussagen der Hypothese.

Robustheit

Aufbau und Verhalten von Meereis hängen im wesentlichen nur von den zugrundeliegenden zeitlosen physikalischen Gesetzmäßigkeiten ab. Die vor Beginn des Gefrierens im Meerwasser gelösten Stoffe bzw. ihre Konzentrationen spielen bei der Ausbildung der Mikrostruktur und des charakteristischen Verhaltens von Meereis eine nur untergeordnete Rolle. Ähnlich unwichtig ist in diesem Zusammenhang auch die Zusammensetzung der gasförmigen Atmosphäre über dem Meerwasser. Daraus folgt, daß die Hypothese keine unsicheren Annahmen über die entsprechenden Zustände auf der Urerde benötigt.

Die für die Hypothese wesentliche Annahme besteht darin, daß überhaupt irgendwo und irgendwann Eis auf der Urerde existiert haben möge. Diese Annahme allerdings scheint nicht unsicher zu sein, sondern trifft mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit zu. Denn die dazu alternative Annahme, daß auf der Urerde während einer Zeitphase von z.B. 100 Mio. Jahren ununterbrochen ein Zustand geherrscht haben soll, bei dem nirgends auf der Erde Eis aufgetreten ist, scheint extrem unwahrscheinlich zu sein.

Die Menge und die Beständigkeit des hypothetisch geforderten Eises auf der Urerde spielt keine wesentliche Rolle. Denn einerseits bietet bereits ein Kubikmeter Eis die unvorstellbar große Zahl von 10^{15} Zellstrukturen, in denen das Leben entstehen konnte. Und andererseits hat sich das

Leben im Eis vermutlich sehr rasch entwickelt, so daß keine zeitlich ausgedehnten Eis-Phasen auf der Uerde angenommen werden müssen. Somit läßt sich feststellen, daß die Hypothese eine gewisse Robustheit besitzt und nicht auf unsicheren Annahmen beruht.

Ganzheitlicher Lösungsansatz

In Kap. 5 wurde ein Weg skizziert, wie sich das erste Leben entsprechend der Hypothese im Meereis entwickelt haben könnte. Dabei wurden die bekannten Teilergebnisse über die Entwicklung des Lebens berücksichtigt. Insbesondere wurden dabei für alle in Tab. 1.1 zusammengestellten offenen Fragen zur Entstehung des Lebens im Prinzip Lösungsansätze skizziert. Damit scheint der von der Hypothese verlangte ganzheitliche Lösungsansatz möglich zu sein.

Übereinstimmung

Die Hypothese zeigt eine große Zahl von Übereinstimmungen zwischen einerseits den im Meereis beobachteten Vorgängen und andererseits den für die heute existierenden Lebewesen wichtigen Prozessen und Erscheinungen. Das liegt daran, daß Meereis hinsichtlich seines zellulären Aufbaus und seinem dynamischen Verhalten einem lebenden Organismus in einer erstaunlich weitgehenden Weise gleicht. In den vorangegangenen Kapiteln wurden viele der Übereinstimmungen bereits diskutiert. In Tab. 6.1 sind einige der auffälligsten Übereinstimmungen zusammengestellt.

Experimentelle Überprüfbarkeit

Meereis existiert aufgrund der zeitlos gültigen physikalischen Gesetze auf der heutigen Erde im Prinzip genauso, wie es vor 4 Mrd. Jahren auf der Uerde existiert haben mag. Darüber hinaus läßt sich Meereis ohne Schwierigkeiten im Labor herstellen. Somit ist die Möglichkeit gegeben, zumindest einige wichtige Teilaussagen der Hypothese experimentell zu überprüfen.

Der dazu notwendige grundsätzliche Versuchsaufbau ist relativ schlicht. Probenbehälter, gefüllt mit künstlich hergestelltem „Meerwasser“, werden unter definierten Bedingungen periodisch zum Gefrieren und zum Schmelzen gebracht. Mit Hilfe der räumlichen und zeitlichen Temperaturgradienten, realistischen Druckstößen sowie einer Einstrahlung von UV-Licht lassen sich die im realen Meereis herrschenden Umweltbedingungen simulieren.

Die Zusammensetzung des verwendeten „Meerwassers“ sollte bei den Versuchen systematisch variiert werden bezüglich der zugesetzten Beimengungen, wie z.B. Salze, Aminosäuren, Thiole und mineralische

Staubpartikel. Mit diesen Beimengungen kann die Ursuppe auf der Urerde simuliert werden.

Während des Versuchsablaufs kann beobachtet werden, welche Reaktionsprodukte unter welchen Bedingungen im „Reaktor Eis“ entstehen.

Insbesondere könnte die experimentelle Untersuchung der folgenden Teilaspekte von Interesse sein:

- Welche Eigenschaften besitzen die im Meereis beobachteten Grenzflächen ?
- Wird der Ablauf von Kondensationsreaktionen im Eis gefördert ?
- Welche katalytischen Reaktionen laufen ab ?
- Entstehen Makromoleküle im Eis ?
- Finden Entmischungs-, Trenn- und Sortiervorgänge zwischen unterschiedlichen Molekülarten im Eisgefüge statt ?
- Ist Meereis unter bestimmten Bedingungen optisch aktiv ?
- Findet eine Diskriminierung der verschiedenen Konformere statt ?
- Sind die strukturierten Oberflächen der Kristalle im Eis tatsächlich als Replikationsmatrizen geeignet ?
- Verändern sich die im Eis natürlich gegebenen Grenzflächen unter der Wirkung gewisser Makromoleküle in die Richtung von Biomembranen?

Abschließend kann gefolgert werden, daß die Hypothese alle vier Beurteilungskriterien erfüllt - siehe Tab. 6.2.

Durch die Expedition im Eis von Spitzbergen sind wichtige Voraussetzungen für eine Fortsetzung der Untersuchungen geschaffen. Einerseits nämlich sind zusätzlich zu den bereits bekannten Fakten einige weitere Randbedingungen geklärt, unter denen Meereis in realistischer Weise im Labor simuliert werden kann. Andererseits ist deutlich geworden, in welcher überwältigend starker Weise das heutige Meereis mit Mikroorganismen belebt ist. Weiterhin ist das Verständnis gewachsen, wie die Bakterien heute im Jahresablauf im Eisgefüge leben und sich dort vermehren. Von diesen vertieften Kenntnissen ausgehend konnte die vorliegende Hypothese zur Entstehung des Lebens aufgestellt und plausibel gemacht werden. Allerdings sind zur weiteren Überprüfung experimentelle Nachweise unter definierten Laborbedingungen notwendig. Außerdem sind tiefergehende Felduntersuchungen an realem Meereis ausgehend von den jetzt vorliegenden Ergebnissen sowie den zwischenzeitlich geführten Diskussionen mit anderen Wissenschaftlern sinnvoll. Einige der an realem Meereis noch zu überprüfenden Fragestellungen könnten z.B. sein:

1. Welche elektrischen Potentialverteilungen treten in der Mikrostruktur von Meereis auf ? Wie ist deren zeitlich dynamisches Verhalten ? Unter welchen Bedingungen während des Gefrierens bzw. des Abtauens treten elektrische Potentialdifferenzen auf ?
Erste Vorversuche deuten darauf hin, daß zwischen den Mikrozellen im Meereis elektrische Potentialsignale meßbar sind, welche in ähnlicher Weise im Rahmen medizinischer Untersuchungen an lebenden Biozellen bzw. Nervensträngen beobachtet werden. Eine fundierte Modellvorstellung über die im Meereis entstehenden und fluktuierenden elektrischen Potentiale könnte weitere Hinweise zur Ähnlichkeit zwischen Meereis und lebenden Zellsystemen liefern.
2. Welche chemischen, möglicherweise katalytisch geförderten Reaktionen laufen im realen Meereis ab, wenn in definierter Weise ausgewählte Reaktionsteilnehmer dem Eis zugefügt werden ? Wie rasch finden derartige Reaktionen statt ? Welche äußeren Bedingungen im realen Meereis, wie Temperaturgradienten, Druckstöße, UV-Einstrahlung u. a. wirken sich dabei aus ?
3. Finden in realem Meereis tatsächlich Entmischungs- und Sortiervorgängen zwischen verschiedenen in definierter Weise in das Eis versuchsweise eingebrachter Makromolekülarten statt ?
4. Werden in den unterschiedlich tief gelegenen Schichten im realen Meereis durch die langfristige Einwirkung einer starken UV-Strahlung Strukturveränderungen bzw. die Entstehung von unterschiedlichen Reaktionsprodukten erkennbar ?

Es erhebt sich die Frage, ob im Rahmen einer möglicherweise internationalen Kooperation zwischen Forschungseinrichtungen unterschiedlicher Art einige Aspekte der aufgestellten Hypothese vertieft untersucht werden könnten.

7. Literaturverzeichnis

- Aarset A.V., Aunaas T., „Physiological Adaptations to Low Temperatures and Brine Exposure in the Circumpolar Amphipod *Gammarus Wilkitzkii*“, *Polar Biol.*, **8** (2), 129-133, (1993)
- Antranikian G., „Vorläufige Ergebnisse über die im Eis von Spitzbergen gefundenen Bakterienproben“, private Mitteilung, 2000
- Arrigo K.R., Dieckmann G., Gosselin M., Robinson D.H., Fritsen C.H., Sullivan C.W., „High resolution study of the platelet ice ecosystem in McMurdo Sound, Antarctica: biomass, nutrient, and production profiles within a dense microalgal bloom“, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **127**, 255-268, (1995)
- Assur A., „Composition of sea ice and its tensile strength“, *Arctic Sea Ice*, U.S. National Academy of Science – National Research Council, Pub. 598, 106-138, (1958)
- Bernal J.D., „The Origin of Life“, Weidenfeld and Nicolson, London, pp. 345, (1967)
- Bowman J.P., McCammon S.A., Brown M.V., Nichols D.S., McMeekin T.A., „Diversity and Association of Psychrophilic bacteria in antarctic sea ice“, *Applied and Environmental Microbiology*, **63**, 3068-3078, (1997)
- Bronshteyn V.K., Chernov A.A., „Freezing potentials arising on solidification of dilute aqueous solutions of electrolytes“, *Journal of Crystal Growth*, **112**, 129-145, (1991)
- Bühler R.W., „Meteorite - Urmaterie aus dem interplanetaren Raum“, Birkhäuser Verlag, Basel, [ISBN 3-7643-1876-7], pp. 88, (1988)
- Cairns-Smith A.G., „Genetic takeover and the mineral origins of life“, Cambridge University Press, Cambridge 1982, [ISBN 0-521-23312-7], pp. 477, (1982)
- Cheung H.M., Bhatnagar A., Jansen G., „Sonochemical destruction of chlorinated hydrocarbons in dilute aqueous solution“, *Environ. Sci. Technol.*, **25**, 1510-1512, (1991)
- Crick F. H. C., „Life itself. It's Origin and Nature“, Simon & Schuster, New York, [ISBN 0-671-25562-0], pp. 192, (1981)
- Crick F.H.C., „On Protein Synthesis“, *Proc. of the "Symp. of the Soc. for Experimental Biology"*, Cambridge Univ. Press, **12**, [ISBN 0081-1386], 138-163, (1958)
- Duval P., „Anelastic behaviour of polycrystalline ice“, *Journal of Glaciology*, **21**, 621-628, (1978)
- de Duve C., „Vital Dust, Life as a Cosmic Imperative“, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, [ISBN 3-86025-352-2], pp. 549, (1995)

- de Duve C., „Blueprint for a Cell“, Burlington, N.C. (Neil Patterson Publishers, Carolina Biological Supply Company), [ISBN 0-89278-410-5] , pp. 275, (1991)
- Delille D., Rosiers C., „Seasonal changes of antarctic marine bacterioplankton and sea ice bacterial assemblages“, *Polar Biol.*, **16**, 27-34, (1995)
- Eigen M., Schuster P., „The Hypercycle - A Principle of Natural Self-Organization“, Springer, Heidelberg, [ISBN 3-540-09293-5], pp. 92, (1979)
- Eigen M., Schuster P., „Stages of Emerging Life“, *J. Mol. Evol.*, **19**, 47-61, (1982)
- Fox S.W., Dose K., „Molecular Evolution and the Origin of Life“, Freeman and Company, San Fransico, [ISBN 0-7167-0163-4], pp. 359 , (1972)
- Grossmann S., Dieckmann G.S., „Bacterial standing stock, activity and carbon production during formation and growth of sea ice in the Wedell Sea, Antarctica“, *Appl. Environ. Microbiol.*, **60**, 2746-2753, (1994)
- Gulliksen B., Lønne O.J., „Sea ice macrofauna in the Antarctic and the Arctic“, *J. Mar. Syst.*, **2**, 53-61, (1991)
- Halter P.U., „Properties of the solid-liquid interface layer of growing ice crystals: a raman and rayleigh scattering study“, Dissertation to the Swiss Federal Inst. of Technology, pp. 59, (1987)
- Hanley T.O'D., Weber A.H., „Freezing potentials and currents in potassium fluoride solutions at constant growth rates“, *Journal of Glaciology*, **66**, 483-499, (1973)
- Holm N.G. (ed.), „Marine Hydrothermal systems and the Origin of Life“, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, [ISBN 0-7923-2018-2], pp. 242, (1992)
- Joyce G.F., Visser G.M., van Boeckel C.A.A., van Boom J.H., Orgel L.E., van Westrenen J., „Chiral selection in poly(C)-directed synthesis of oligo(G)“, *Nature*, **310**, 602-604, (1984)
- Kahraman R., Zughbi H.D., Al-Nassar Y.N., „A Simplified Numerical Model for melting of Ice with Natural Convection“, *International Communication in Heat and Mass Transfer*, **25**, 359-368, (1998)
- Kristianson J.K., Hreggvidsson G.O., „Ecology and habitats of extremophiles“, *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, **11** (1), 17-25, (1995)
- Lange A.M. „Basic properties of antarctic sea ice as revealed by textural analysis of ice cores“, *Annals of Glaciology*, **10**, 95-101, (1988)
- Levy M., Miller S.L., „The stability of the RNA bases: Implications for the origin of life“, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **95**, 7933-7938, (1998)
- Lock G.S.H., „The Groth and Decay of Ice“, Cambridge University Press (Cambridge) [ISBN 0-521-33133-1], pp. 434, (1990)

- Menzel M., Han S., Stapf S., Blumich B., "NMR Characterization of the Pore Structure and Anisotropic Self-Diffusion in Salt Water", *J. Magn. Reson.*, **143** (2), 376-381, (2000)
- Miller S.L., Orgel L.E., „The Origins of Life on Earth“, Prentice Hall, New Jersey, [ISBN 0-13-642082-6], pp. 229, (1974)
- Miller S.L., „The Prebiotic Syntheses of Organic Compounds as a Step toward the Origin of Life“, in „Major Events in the History of Life“, (ed. Schopf J.W.), Bartlett Publishers, Boston, [ISBN 0-86720-268-8], 1-28, (1992)
- Mobley C.D., Cota G.F., Grenfell T.C., Mafione R.A., Scott Pegau W., Perovich D.K. „Modeling light propagation in sea ice“, *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **36**, 1743-1749, (1998)
- Monod J., „Le hazard et la nécessité“, Editions du Seuil, Paris (1970), Übersetzung aus dem Französischen: „Zufall und Notwendigkeit“, R. Piper & Co. Verlag, München, [ISBN 3-492-01913-7], (1971)
- Morowitz H.J., „Beginning of Cellular Life: Metabolism Recapitulates Biogenesis“, New Haven (Yale University Press), [ISBN 0-300-05483-1], pp. 195, (1992)
- Müller A.W.J., „Were the First Organisms Heat Engines? A New Mode for Biogenesis and the early Evolution of Biological Energy Conversion“, *Prog. Biophys. Molec. Biol.*, **63**, 193-231, (1995)
- Naats E.I., Borovoi A.G., Opiel U.G., „Backscattering by hexagonal ice crystals“, 5th Int. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics (Tomsk, Russia, 1998) in *Proc. of SPIE*, **3583**, 155-161, (1999)
- Oparin A.I., „The Origin of Life“, The Macmillan Company, New York New York, Übersetzung von Morgulis S. pp. 270, (1938)
- Pennisi E., „In Industry, Extremophiles Begin to Make Their Mark“, *Science*, **267**, 705-706, (1997)
- Puval P., „Anelastic behaviour of polycrystalline ice“, *J. of Glaciology*, **21**, 621-628, (1978)
- Rinck P.A., Petersen S.B., Müller R.N., „Magnetresonanz-Imaging und -Spektroskopie in der Medizin“, Georg Thieme Verlag Stuttgart - New York, [ISBN 3-13-664901-X], pp. 102, (1986)
- Sakshaug E., „Ökosystem Barentshavet“, Universitetsforlaget Oslo, [ISBN 82-00-03963-3], pp. 304, (1994)
- Schrödinger E., „What is Life?“, Cambridge University Press, Cambridge, [ISBN 0-521-42708-8], pp. 184, (1944)
- Schuster M., Ullmann G., Ullmann U., Jakubke H.-D., „Chymotrypsin-catalyzed peptide synthesis in ice: use of unprotected amino acids as acyl acceptors“, *Tetrahedron Letters*, **34**, 5701-5702, (1993)

- Spindler M., Dieckmann G.S., „Das Meereis als Lebensraum“, Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg, **2/1991**, 48-57, (1991)
- Steponkus P.L., Stout D.G., Wolfe J., Lovelace R.V.E., „Freeze-induced electrical transient and cryoinjury“, *Cryo-Letters*, **5**, 343-348, (1984)
- Tardent P., „Meeresbiologie“, Georg Thieme Verlag Stuttgart, New York, pp. 305, (1993)
- Trinks H., „Zur Entstehung vom Leben im Eis“, Technische Universität Hamburg-Harburg, priv. Mitteilung, (1998)
- Untersteiner N., „The Geophysics of Sea Ice“, Proc. of the NATO Advanced Study Institute on Air-Sea-Ice Interaction, held September 28 – October 10, 1981, in Acquafredda di Maratea, Italy / ed. by N. Untersteiner, Plenum Press, New York, [ISBN 0-306-42465-7], pp. 163, (1986)
- Wächtershäuser G., „Before Enzymes and Templates: Theory of surface metabolism“, *Microbiol. Rev.*, **52**, 452-484, (1988)
- Wasson J.T., „Meteorites, Minerals and Rocks“, Kap. 15: „Organic Matter“, Springer Verlag Berlin“, [ISBN 3-540-06744-2], 164-168, (1974)
- Watson D., Crick F.H.C., „A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid“, *Nature*, **171**, 787-788, (1953)
- Woese C.R., „Archaeobacteria“, *Sci. Am.*, **244** (6), 94-106, (1981)
- Zhan C., Sinha, N.K., Evgin E., „A three dimensional anisotropic constructive model for ductile behaviour of columnar grained sea ice“, *Acta Mater.*, **44**, 1839-1847, (1996)

Tabellen

- Welche Bedingungen auf der Urerde führten zur Entstehung des ersten Lebens ?
- Wo auf der Erde entstand das Leben ?
- Wieso konnte Leben überhaupt entstehen, wenn eine zufällige Entstehung praktisch unmöglich war ?
- Welche Energie ermöglichte den Aufbau komplexer Moleküle ?
- Wie liefen energieverzehrende Kondensationsreaktionen ab ?
- Wie bildeten sich Thioester ?
- Wie entstanden katalytische Wirkungen ?
- Wie wurde der thermische Zerfall komplexer Moleküle verhindert ?
- Wie wurden die Bausteine getrennt und sortiert ?
- Wie entstand die Chiralität in allen Proteinen ?
- Wie wurden die richtigen Konformere ausgewählt ?
- Wie entwickelte sich die Replikation mittels Matrizen ?
- Wie entwickelten sich Selbstorganisationsreaktionen ?
- Wie bildeten sich autokatalytische Reproduktionssysteme ?
- Wie entwickelte sich die Kompartimentierung ?
- Wie entstanden Biomembrane ?
- Wie entwickelten sich die spezifischen Funktionen von Biomembranen ?
- Wie entstanden so komplexe Gebilde wie Mitochondrien und Golgi-Apparat?
- Wie sah die gemeinsame Wurzel aus von Archaeobakterien, Prokaryoten und Eukaryoten ?
- Wie lange dauerte die Entwicklung zum ersten Leben ?

Tab. 1.1: Zusammenstellung einiger Fragen zur Entstehung des Lebens

| Bestandteil | | Konzentration [kg in ⁻³] | Erscheinungsform |
|-------------|----|--------------------------------------|--|
| Chlor | Cl | 19,87 | Cl ⁻ |
| Natrium | Na | 11,05 | Na ⁺ |
| Magnesium | Mg | 1,326 | Mg ²⁺ |
| Schwefel | S | 0,928 | SO ₄ ²⁻ |
| Kalzium | Ca | 0,422 | Ca ²⁺ |
| Kalium | K | 0,416 | K ⁺ |
| Brom | Br | 0,068 | Br ⁻ |
| Kohlenstoff | C | 0,028 | HCO ₃ ⁻ |
| Kohlenstoff | C | 0,010 | CO ₂ |
| Strontium | Sr | 0,0085 | Sr ²⁺ |
| Bor | B | 0,0045 | H ₃ BO ₃ , B(OH) ₄ ⁻ |
| Fluor | F | 0,0014 | F ⁻ |
| Sauerstoff | O | 0,0007 | O ₂ |
| Nitrat | | 0,0007 | NO ₃ |
| Silikat | | 0,0005 | SiO ₃ ²⁻ |
| Phosphat | | 0,0001 | PO ₄ ³⁻ |

Die Anteile von CO₂ und HCO₃⁻ hängen stark ab von pH-Wert, Salzgehalt und Temperatur.

Durchschnittliche Werte dafür sind:

$$\text{pH} = 8,2 \pm 0,2$$

$$\text{Salzgehalt} = 3,5 \%$$

$$\text{Temperatur} = 0^\circ \text{C} \pm 2^\circ \text{C} \text{ (am Expeditionsort)}$$

Tab. 3.1: Zusammensetzung und Eigenschaften von Meerwasser in der Nähe des Expeditionsorts nach [Sakshaug 1994]

- Zelluläre Struktur, typische Abmessungen 5 - 50 μm , 10^{15} Zellen pro m^3 .
- Grenzflächen mit einer Gesamtfläche von 10^4 - 10^5 m^2 pro m^3 .
- Kaviolen, Kanäle, Gasbläschen.
- Kommunizierendes Netzwerk von Flüssigkeit.
- Kristallisation von u. a. Ca CO_3 , $\text{Na}_2 \text{SO}_4$, NaCl .
- Charakteristische Netzstrukturen auf Kristalloberflächen.
- Aufkonzentration der Salzlösung mit bis zu 8-fachen Werten.
- Einlagerung von kleinen Partikeln mit 10 -100facher Anreicherung.
- Trenn- und Sortiervorgänge.
- Möglicherweise optische Aktivität von Eiskristallen.
- Veränderung der Oberflächenstruktur von Eiszellen durch gelöste Fremdstoffe.
- Veränderung der Oberfläche von Eiszellen durch UV-Licht.
- Wachstumsgeschwindigkeit von Eiskristallen bis zu 1 mm s^{-1} .
- Strömungsgeschwindigkeit in Kanälen bis zu $0,5 \text{ mm s}^{-1}$.
- Schmelzen von Eiszellen mit bis zu $0,1 \text{ mm s}^{-1}$.
- Amöboide Bewegung von Membranen.
- Platzen von Eisgefügen und Kaviolen.
- Eruptives Hervorbrechen von Gasbläschen (1 - 10 μm) aus Eis.
- Migration von Kaviolen mit $1 - 20 \mu\text{m h}^{-1}$.

Tab. 3.2: Zusammenstellung einiger der beobachteten Eigenschaften von Meereis und der darin ablaufenden dynamischen Vorgänge

Energie-Vergleich zwischen Eisbildung und Sonneneinstrahlung [Wm^{-2}]:

| | | |
|--|----------|-----|
| Erstarrungsenergie von Wasser, freierdend bei Eiswachstum | Maximal: | 830 |
| | Mittel: | 34 |
| | | |
| Sonneneinstrahlung auf Wasser- bzw. Eisoberfläche (Barentssee) | Maximal: | 900 |
| | Mittel: | 50 |

Spezifische Energiewerte im Eis [Kcal Mol^{-1}]:

| | |
|--|-----|
| Erstarrungsenergie H_2O | 1,5 |
| Wasserstoffbrücken, Bindungsenergie | 5,0 |
| Oberflächenspannungsenergie | 3 |
| Kristallisation von Ca CO_3 , NaCl u. ä. | 140 |

Typische Reaktionsenergiewerte in lebenden Systemen [Kcal Mol^{-1}]:

| | |
|------------------------|-------|
| Membranpotential | 1 - 4 |
| Natrium / Kalium Pumpe | 1,65 |
| Hydrolyse ATP zu ADP | 7 |
| Bildung von ATP | 686 |

Tab. 3.3: Zusammenstellung einiger der im Meereis auftretenden Energieformen und ihre spezifischen Werte im Vergleich zu einigen für das Leben wichtigen Energiewerten

- Ausgeglichenes Mikroklima bezüglich Temperatur, Druck, Energie, Licht und Stoffkonzentration.
- Zelluläre Struktur mit festen Stützelementen und weichen, flexiblen Grenzschichten sowie eine mit allen Nährsalzen angereicherte flüssige Phase.
- Hohe räumliche Dichte der Zellen im Eiskörper mit ca. 10^{15} pro m^3 .
- Lokale Aufkonzentration von Nährsalzen und kleinen Partikeln in Verbindung mit Trenn- und Sortiervorgängen.
- Möglicherweise optische Aktivität, dadurch scheint die Auswahl von Konformeren denkbar zu sein.
- Lokal frei werdende Energieimpulse insbesondere bei der Erstarrung von Wasser, beim Wachstum von Kristallen sowie bei der sprunghaften Veränderung der Oberflächenstruktur. Dadurch werden Kondensationsreaktionen und andere endotherm ablaufende Reaktionen gefördert.
- Mögliche katalytische Wirkungen an Grenzflächen von Kristalloberflächen und eingelagerten festen Partikeln. Dadurch wird die Bildung von Makromolekülen gefördert.
- Große thermische Stabilität von möglicherweise entstandenen Makromolekülen im Eis wegen der niedrigen Temperaturen.
- Kommunizierendes Netzwerk von mit Flüssigkeit gefüllten winzigen Kanälen im Eisgefüge. Dadurch Verbreitung erfolgsversprechender Moleküle möglich.
- Kristalloberflächen mit charakteristischen Netzstrukturen, ähnlich wie Matrizen zur Replikation.
- Grenzschichten.
- Formung von „Doppelmembranen“, Einstülpungen und pulsierenden Bläschen sowie amöboide Bewegung der Membranen.

Tab. 3.4: Zusammenstellung der Eigenschaften von Meereis, welche für die Entstehung und Beherrschung von Leben bedeutsam sein könnten

| Parameter und Vorgänge | Nachgewiesen durch: | | | Notwendige weitere Untersuchungen |
|--|---------------------|---------|-------------|-----------------------------------|
| | Experiment | Theorie | Publikation | |
| Eigenschaften: | | | | |
| Umhüllung von Mikrobereichen mit Abmessungen: 10-100 µm | X | | X | |
| Dicke: 3 - 100 µm | X | | X | X |
| Fläche: 10 ⁴ -10 ⁵ m ² /m ³ | X | | | |
| Flexibel, amöboide Bewegungen | X | | | X |
| „Semipermeabel“ | X | X | X | |
| Wasserähnlich | | | X | X |
| Vermehrte Wasserstoffbrücken | | | X | X |
| Trennung der Mikrobereiche im Eis mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften (Inhomogenitäten) bezüglich: | | | | |
| Mechanische Festigkeit | X | X | X | |
| Thermische Leitfähigkeit | | X | X | |
| Thermische Diffusivität | | X | X | |
| Ionenkonzentration | | X | X | |
| Elektrische Potentiale | | X | X | X |
| Konzentration von Makromolekülen | X | X | | X |
| pH-Wert | | X | X | X |
| Löslichkeit von Gasen | X | X | X | X |
| An bzw. in den Grenzschichten finden statt: | | | | |
| Energieaustausch (Festfrieren H ₂ O) | X | X | | X |
| Strömungsvorgänge | X | | X | X |
| Anlagerung von Mikroteilchen | X | | | X |
| Katalytische Wirkungen | | X | X | X |
| Trennen und Sortieren von Makromolekülen | X | X | | X |

Tab. 3.5: Zusammenstellung der Eigenschaften von Mikrogrenzschichten im Meereis

- Meerwasser im Woodfjord
- Meerwasser in der Mushamna Lagune
- Wasser aus Gletscherflüssen
- Süßwasser in kleinem See
- Meereis aus jungem Eisfeld
- Meereis aus mehrjährigen Eisblöcken
- Meereis von der Unterseite (Tauchen)
- Eis aus Süßwassersee
- Eis von Gletscher
- Schneematsch auf Eisoberfläche
- Sedimente auf Meeresboden
- Sedimente aus Gletscherflüssen
- Magen und Darm von Fischen
- Oberfläche von Fischen (Schleim)
- Krebse im Woodfjord
- Schnecken im Woodfjord
- Verwesender Fisch
- Verwesender Robbenspeck

Tab. 4.1: Zusammenstellung der Fundorte für die entnommenen Proben am Expeditionsort in Spitzbergen
An allen Fundorten herrschten Temperaturen zwischen +1° C und -10° C. Der Salzgehalt im Meerwasser war ca. 3,5 %. Der Sauerstoffgehalt im Wasser war jeweils dicht am Sättigungswert. Der pH-Wert variierte zwischen 7.0 und 8.2

| Probe Nr. | Komponenten | Wachstum v. Bakterien |
|--|------------------------------|-----------------------|
| 1 | A+B+C+Antibiotics (50 µg/ml) | stark |
| 2 | A+B+C | stark |
| 3 | A+B+Lactose 5 % | schwach |
| 4 | A+B+Starch 5 % | mittel |
| 5 | A+B+Trypton 5 % | schwach |
| 6 | A+B+Xylon 5 % | stark |
| 7 | A+B+Chitin | schwach |
| 8 | A+B+Oliveoil 10 % | mittel |
| 9 | A+B+Pektin 5 % | mittel |
| 10 | A+B+Wool | schwach |
| 11 | Algenschleim | mittel |
| 12 | Algenschleim+A+B+C | stark |
| A = Nährsalze, B = Phosphat, C = Zucker Antibiotics = Chloramphenicol + Kamanycin Ampicilin | | |

Tab. 4.2: Zusammenstellung von Nährlösungen, welche zum Ansetzen von Bakterienkulturen verwendet wurden

- Bakterien (diverse Arten)
- Archaeobakterien (?)
- Ciliaten (diverse Arten)
- Flagellaten (diverse Arten)
- Kieselalgen (u.a. Porosiva glaciobs,
Thalessiosiva antactica,
Nitschia promare
Nitschia frigid
Melosiva Arctica)
- Blutschneealge (Chlamydomenas nivalis)
- Krebse (Gammany wilkitzkii)
- Rippenqualle (Ctenophora)
- Meduse (Aglantha Digitale)
- Meeresschnecken
- Polardorsch

Tab. 4.3: Zusammenstellung einiger der in den Proben gefundenen Organismen

| Organismus | Bestandsdichte | Generationszeit |
|--|----------------|-----------------|
| Bakterien | 400 | 20 - 40 Stunden |
| Planktonalgen | 2000 | 1 - 10 Tage |
| Krebse | 3000 | 1 - 2 Jahre |
| Lodde | 400 | 3 - 5 Jahre |
| Dorsch | 300 | 10 Jahre |
| Wal | 20 | 15 Jahre |
| Robbe | 10 | 15 Jahre |
| Seevogel | 1 | 10 Jahre |
| Eisbär | 0,1 | 15 Jahre |
| Eisflora (km ⁻² , frisches Eis) | 100 | 1 - 20 Tage |
| Eisflora (km ⁻² , altes Eis) | 1500 | 1 - 20 Tage |
| Eisfauna (km ⁻² , frisches Eis) | 20 | 1 Jahr |
| Eisfauna (km ⁻² , altes Eis) | 450 | 1 - 2 Jahre |

Tab. 4.4: Zusammenstellung von Bestandsschichten in der Barentssee [Sakshaug 1994]. Die Werte sind angegeben als [kg Kohlenstoff pro km²]

| Meereis | Heute lebender Organismus |
|--|---|
| Meereis entsteht, wächst, altert und stirbt, irreversibler Prozeß | Alle lebenden Organismen (nicht Einzeller) entstehen, altern und sterben, irreversibler Prozeß |
| Meereis beherbergt eine Vielzahl von Mikroorganismen | Psychrophile Bakterien, Halobakterien |
| Zelluläre Struktur von Meereis mit: <ul style="list-style-type: none"> • Salzlösung in Kanälen und Kaviolen • Zellgröße: 10 - 100 µm • Zusammensetzung Salzlösung: konzentriertes Meerwasser • Verhältnis von festen zu flüssigen Elementen bei -10° C beträgt 1:4 | Organismus besitzt Zellen mit: <ul style="list-style-type: none"> • Körper- und Zellflüssigkeit • Zellgröße: 1 - 100 µm • Zusammensetzung Körperflüssigkeit: ähnlich Meerwasser (z.T. hoch konzentriert) • Verhältnis von festen Stützelementen zur Weichteilen beträgt ca. 1:4 |
| Grenzschichten im Eisgefüge mit: <ul style="list-style-type: none"> • Wasserstoffbrücken • Aufrechterhaltung von Konzentrationsgefällen • Formung von „Doppelmembranen“ und Einstülpungen • Amöboide Bewegungen | Biomembrane im Organismus mit: <ul style="list-style-type: none"> • Wasserstoffbrücken • Semipermeabilität • Membranpotential • Doppelmembranen • Kontraktion, Formänderungen |
| Kommunikatives Netzwerk zwischen festen Eiselementen, Kaviolen, Membranen gefüllt mit Salzlösung | Stoffwechselkreislauf von Körperflüssigkeit in den Zellen sowie zwischen den Zellen |
| Erstarrungsenergie im Meereis Mittlere Werte: 34 W m ⁻² Maximale Werte: 830 W m ⁻² | Energieeinstrahlung von der Sonne Mittlere Werte: 50 W m ⁻² Maximale Werte: 900 W m ⁻² |
| Trennung von Na ⁺ und K ⁺ Ionen im Eis | Na/K-Pumpe |
| Kristallisation von Ca CO ₃ ab -2° C, immer im Eis vorhanden | Häufigstes von nahezu allen Lebewesen gebildetes Mineral |
| Replikation von Kristallgittern | Replikation von DNA |
| Möglicherweise optische Aktivität | Optische Aktivität aller Aminosäuren |

Tab. 6.1: Zusammenstellung einiger Erscheinungen und Vorgänge, welche in heute lebenden Organismen in ähnlicher Weise auftreten wie im Meereis, dem hypothetischen Entstehungsort für das erste Leben

| Nr. | Beurteilungskriterium | Die Hypothese erfüllt das Kriterium, u. a. mit |
|-----|---|--|
| 1 | Robustheit gegenüber unsicheren Annahmen. | Es werden keine unsicheren Annahmen benötigt. Aufbau und Verhalten von Meereis ist weitgehend unabhängig von den Randbedingungen. Die Annahme, daß irgendwann und -wo auf der Urerde Eis existiert habe, trifft mit hoher Wahrscheinlichkeit zu. |
| 2 | Ganzheitlicher Lösungsansatz für alle offenen Fragen zur Entstehung des Lebens. | Die Hypothese liefert Lösungsansätze für alle wichtigen Fragen, z.B. <ul style="list-style-type: none"> • Energie zum Ablauf endothermer Reaktionen? • Thermischer Zerfall von Makromolekülen? • Trennen und Sortieren von Bausteinen? • Chiralität bei Proteinen? • Replikation von DNA? • Entstehung von Zellen und Membranen? |
| 3 | Übereinstimmung zwischen den hypothetisch angenommenen Vorgängen und heutigen Lebensabläufen. | Die Übereinstimmung ist sehr weitgehend , weil Meereis den heute lebenden Organismen in gewisser Weise gleicht. |
| 4 | Experimentelle Überprüfbarkeit wichtiger Teilaussagen der Hypothese. | Das Meereis auf der Urerde gleicht weitgehend dem heutigen Meereis. Meereis kann im Labor problemlos simuliert werden. Somit lassen sich alle wichtigen Aussagen der Hypothese experimentell überprüfen. |

Tab. 6.2: Zusammenstellung von Kriterien zur Beurteilung der Hypothese über die Entstehung des ersten Lebens im Meereis

Abbildungen

(Alle Mikroskop-Aufnahmen von Eisstrukturen zeigen einen Ausschnitt mit einer Kantenlänge von ca. 300 μm)

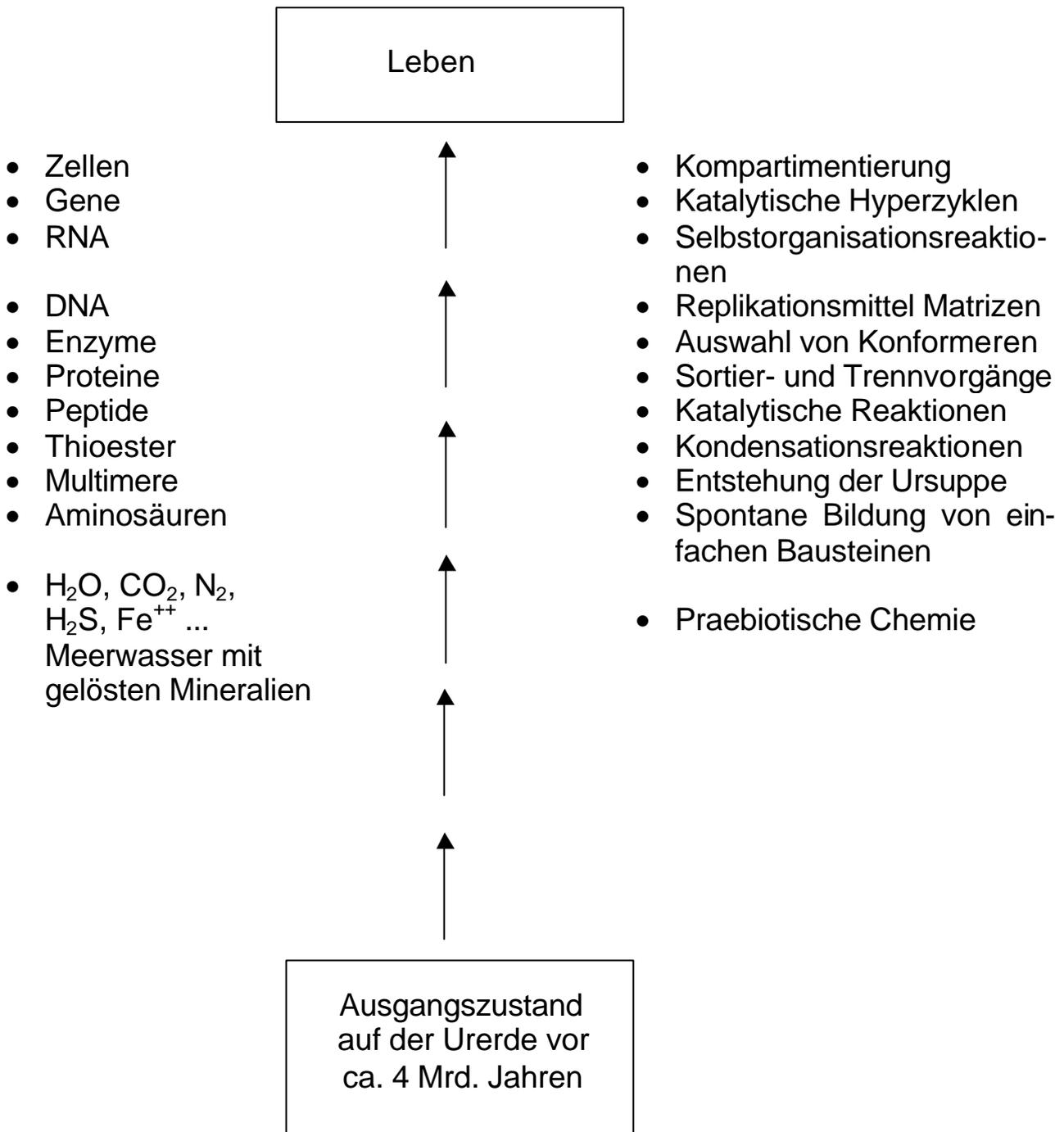


Abb. 1.1: Zusammenstellung einiger Entwicklungszustände und Abläufe während der Entstehung des Lebens



Abb. 2.1: Reiseverlauf und Verlauf der Eisdrift sowie Aufenthaltsort der Expedition am Nordrand von Spitzbergen ($79^{\circ} 40' \text{ Nord}$, $14^{\circ} 16' \text{ Ost}$)



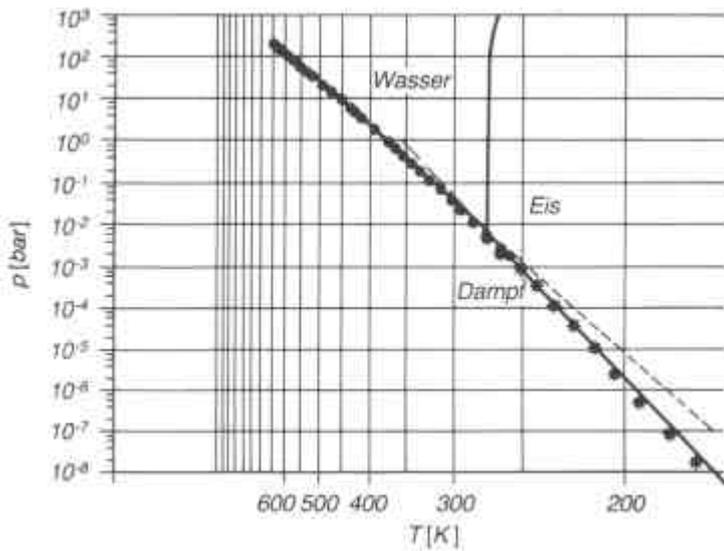
Abb. 2.2: Expeditionsschiff MESUF in Mushamna



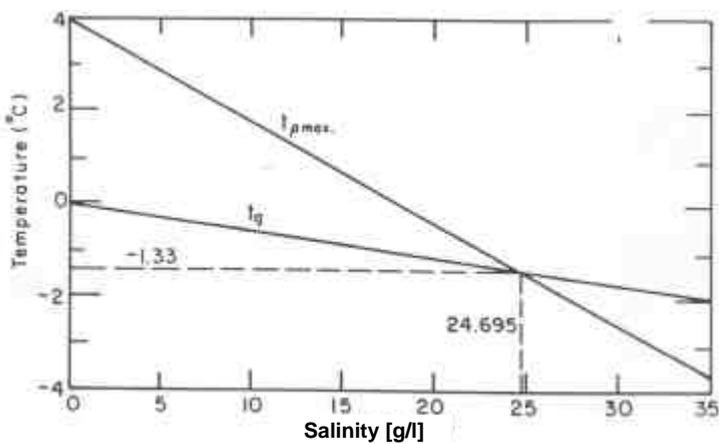
Abb. 2.3: Durchführung von Feldversuchen während der Expedition



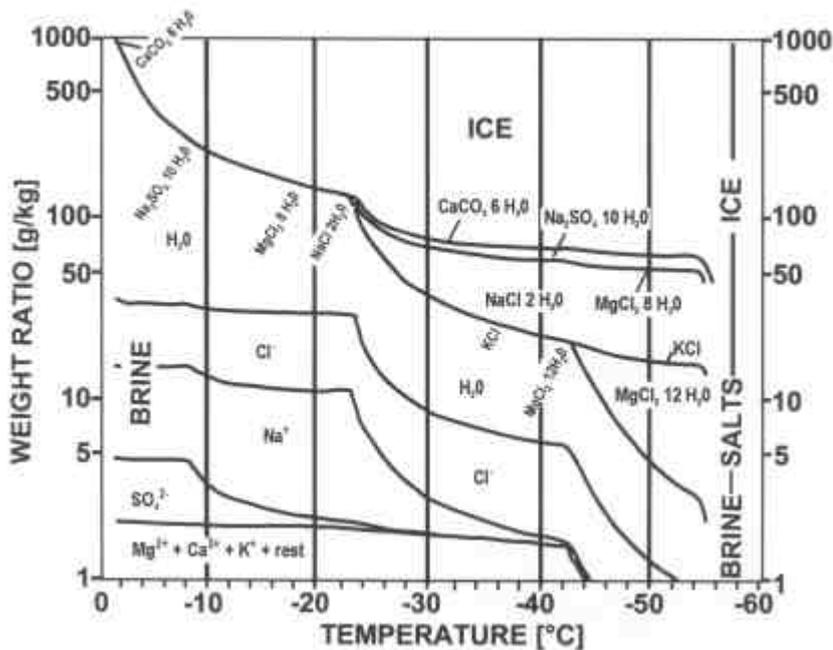
Abb. 2.4: Laborarbeiten während der 4-monatigen Polarnacht an Bord von MESUF



Zustandsdiagramm für Süßwasser und Eis



Verlauf von max. Dichte $t_{\rho \max}$ und Gefrierpunkt t_g in Abhängigkeit von der Salinität bei Meerwasser



Temperaturabhängiges Phasenverhältnis von Meereis. Mit abnehmender Temperatur kristallisieren die verschiedenen Salze aus [nach Assur 1958]

Abb. 3.1: Zusammenstellung der für Wasser und Eis charakteristischen physikalischen Parameter

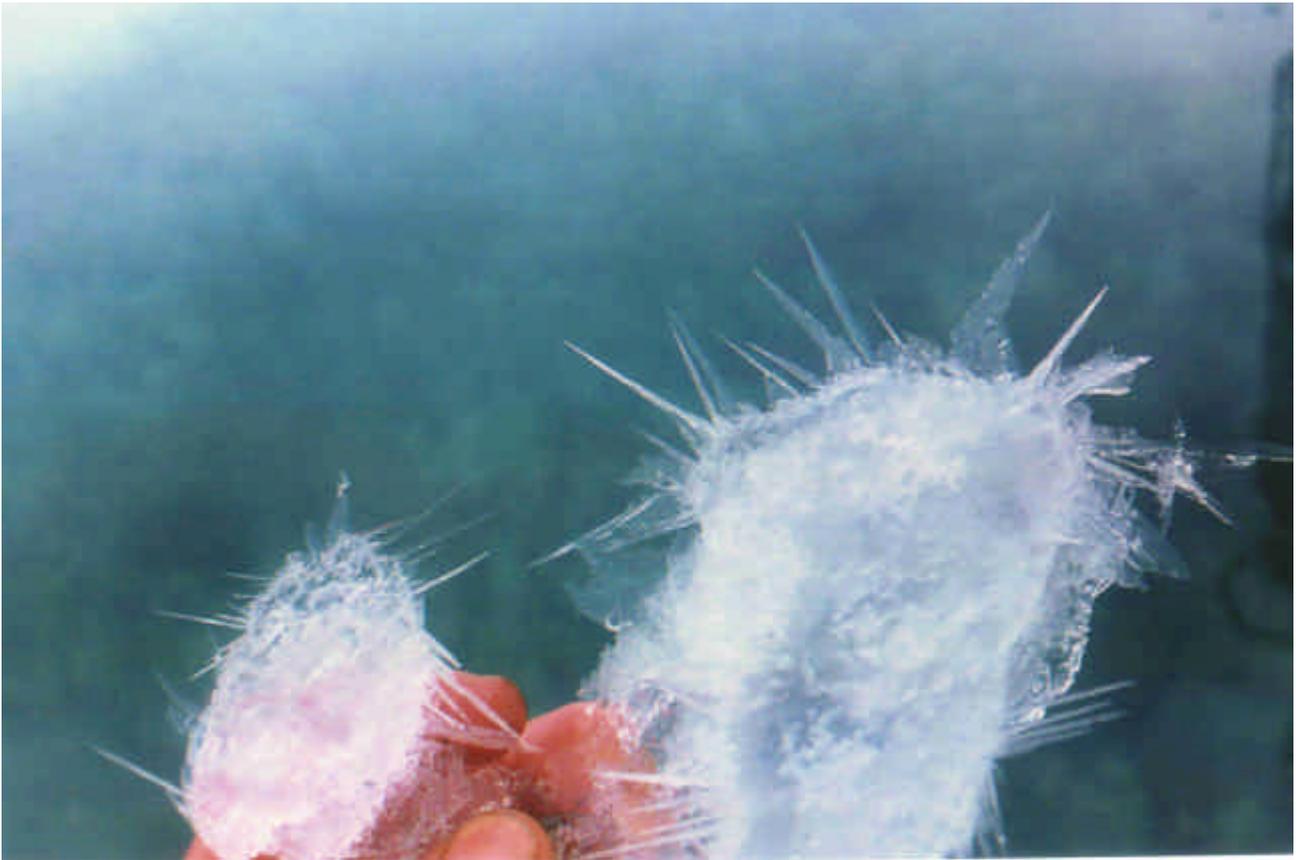


Abb. 3.2: Aufnahme von frisch gebildeten Eiskristallen auf Meerwasser



Abb. 3.3: Eiskristalle unmittelbar nach ihrer Bildung auf der Oberfläche von Meerwasser

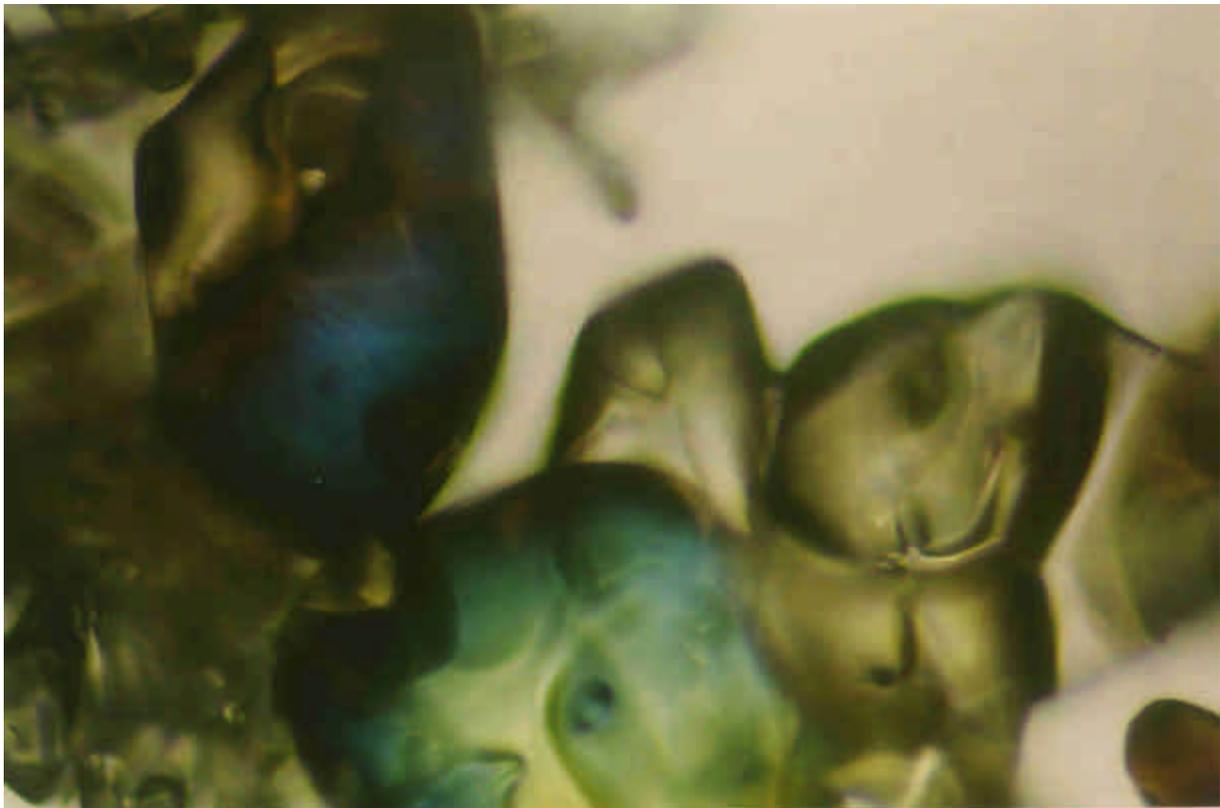


Abb. 3.4: Typische Mikrostruktur von jungem Meereis mit abgerundeten Formen, nachdem die ursprünglichen Eiskristalle zusammengestoßen sind und sich z. T. vereinigt haben



Abb. 3.5: Arbeit mit dem Mikroskop auf dem Eis

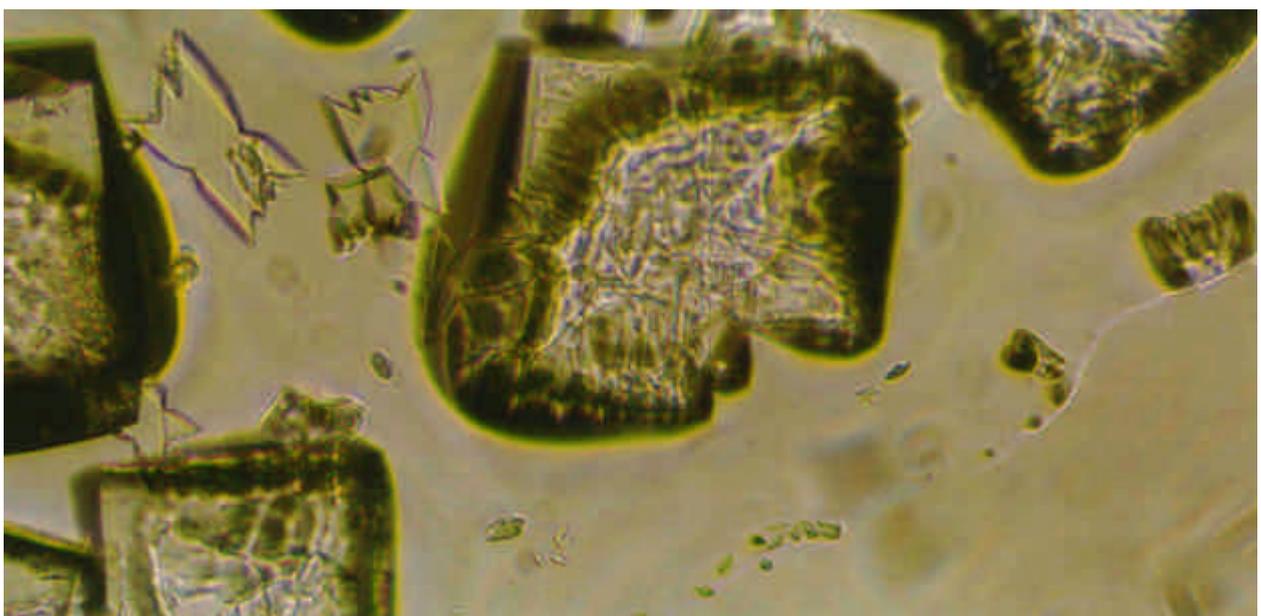
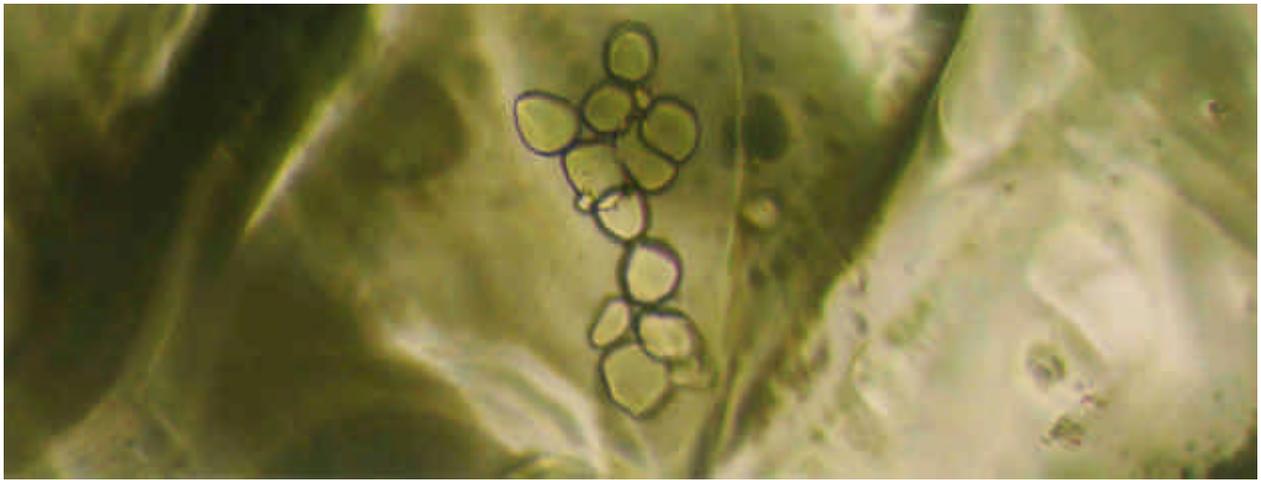
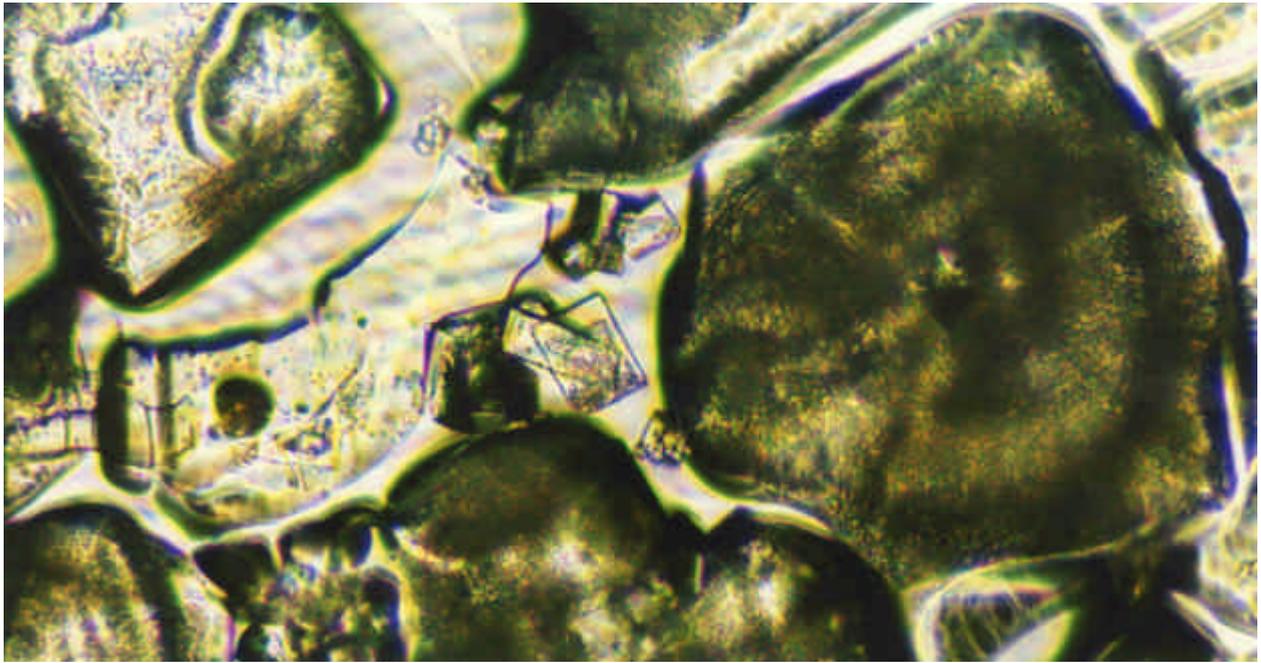


Abb. 3.6: Salzkristalle innerhalb der Mikrostruktur von Meereis

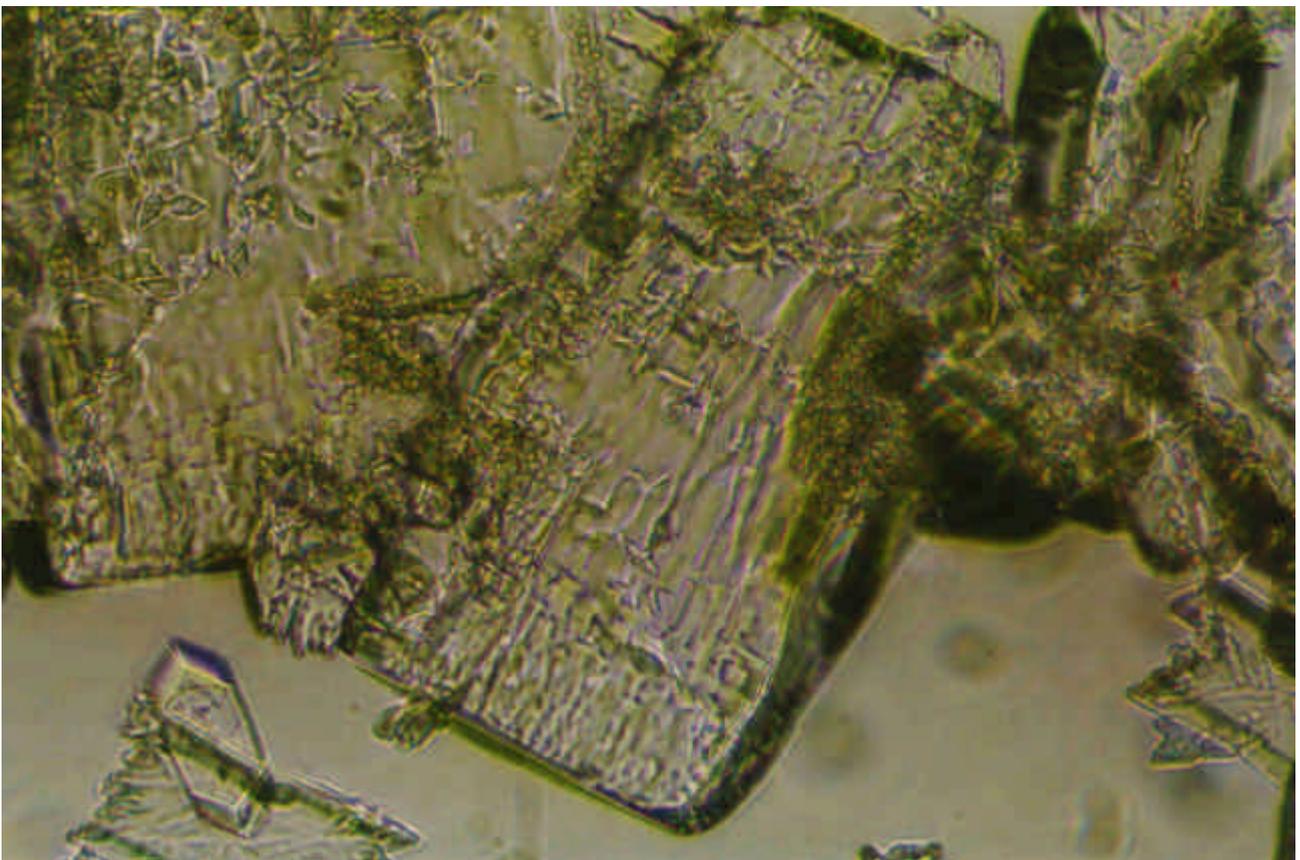
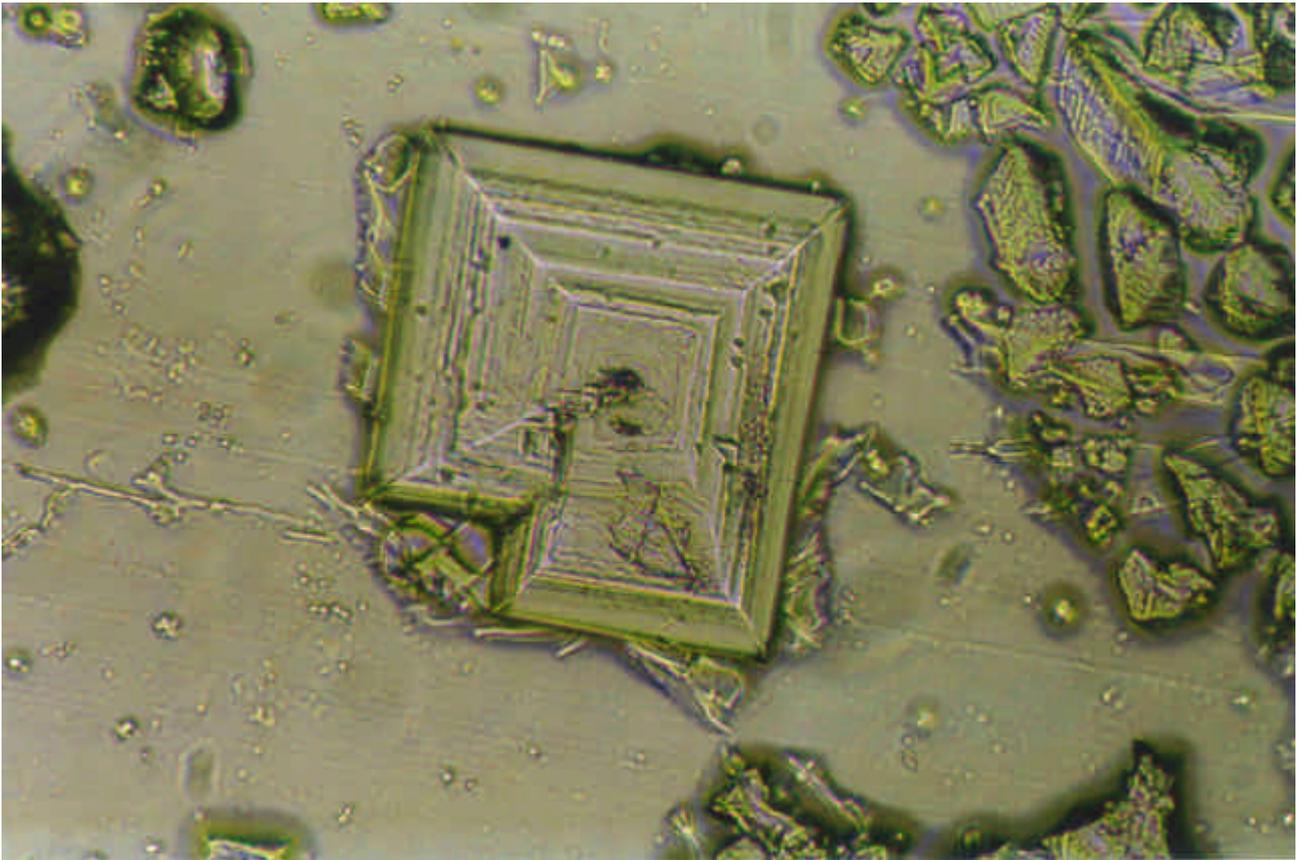


Abb. 3.7: Kristallformationen auf der Oberfläche von Meereis bei sehr niedrigen Temperaturen von ca. -25°C



Abb. 3.8: Membranähnliche Strukturen im Eisgefüge

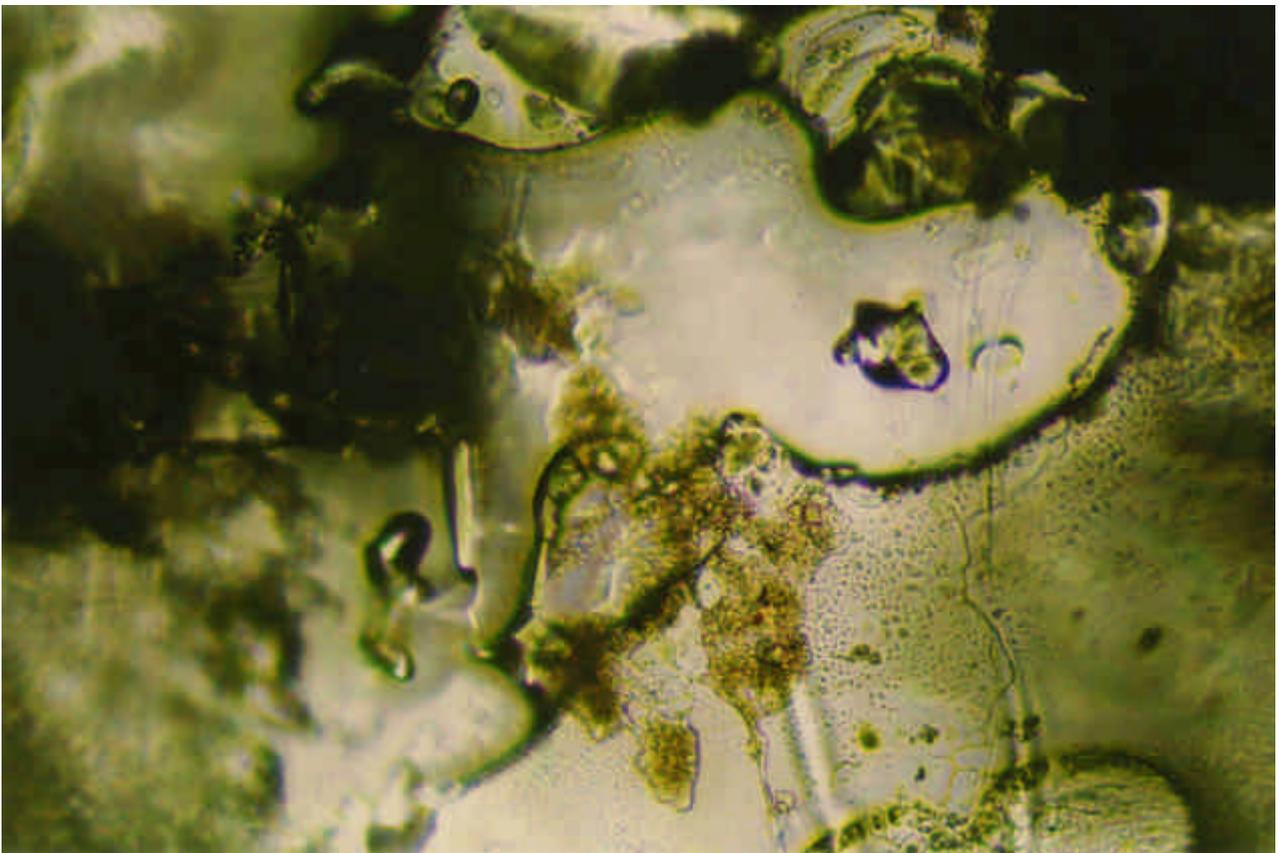


Abb. 3.9: Anreicherung von kleineren Partikeln im Eisgefüge

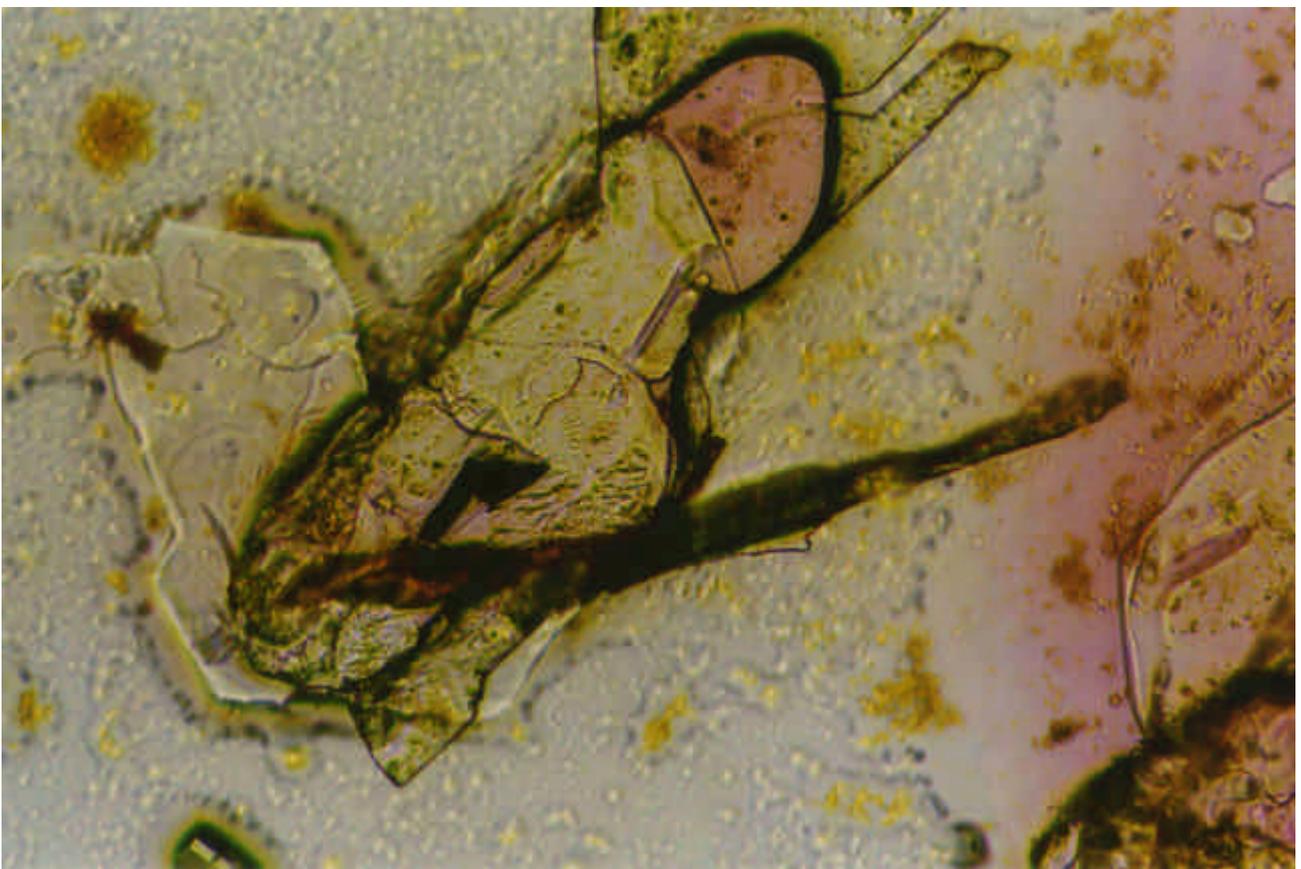
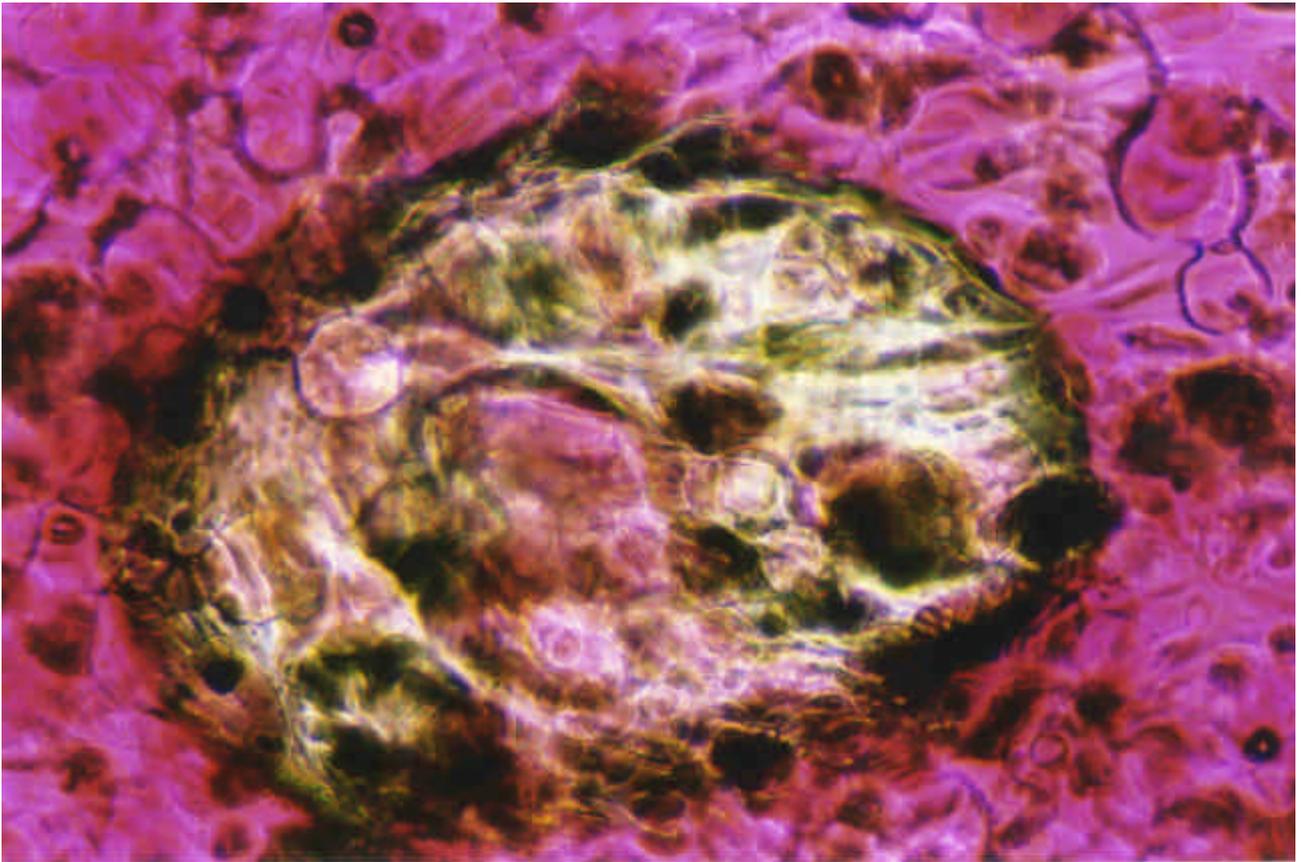


Abb. 3.10: Verteilung der farblich markierten Salzlösung in dem kommunizierenden Netzwerk von Kanälen im Eisgefüge

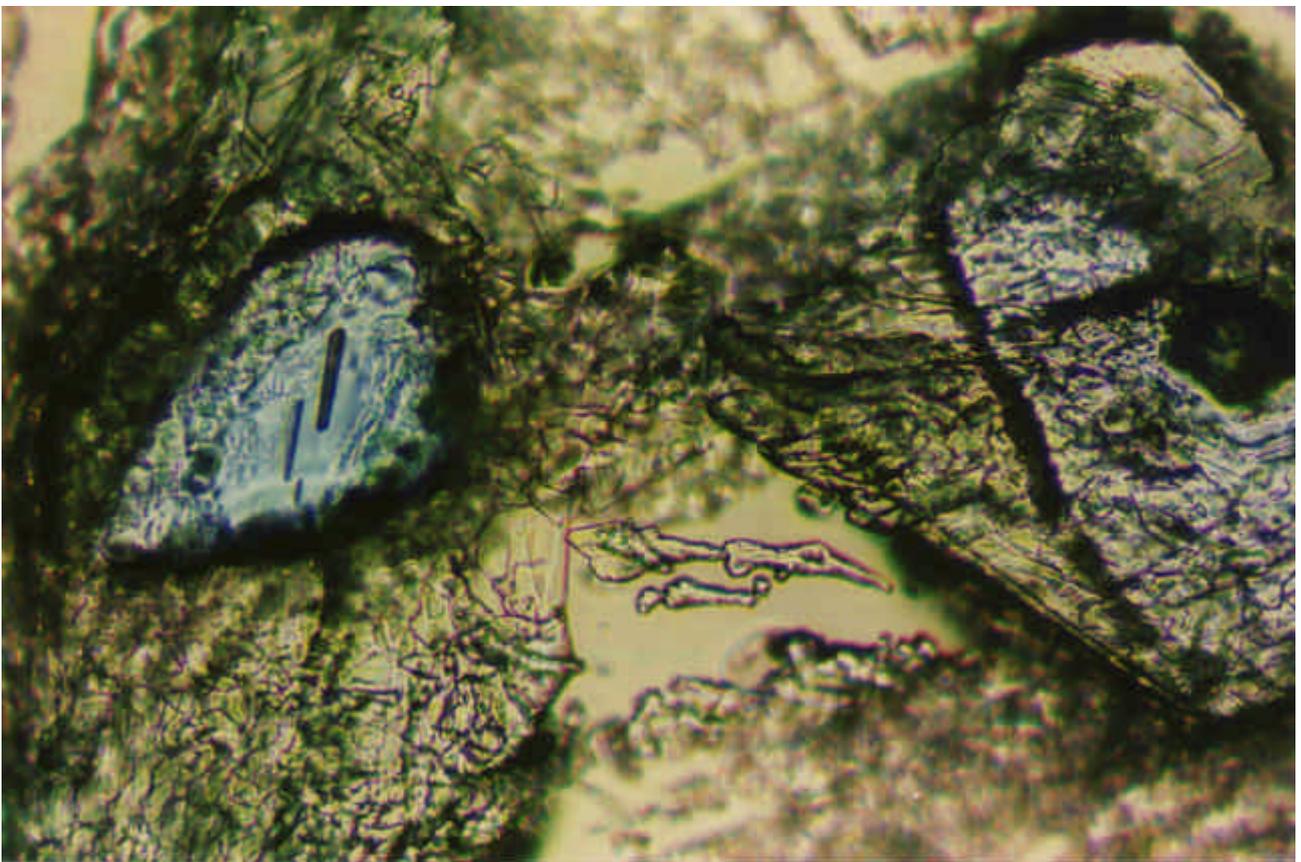
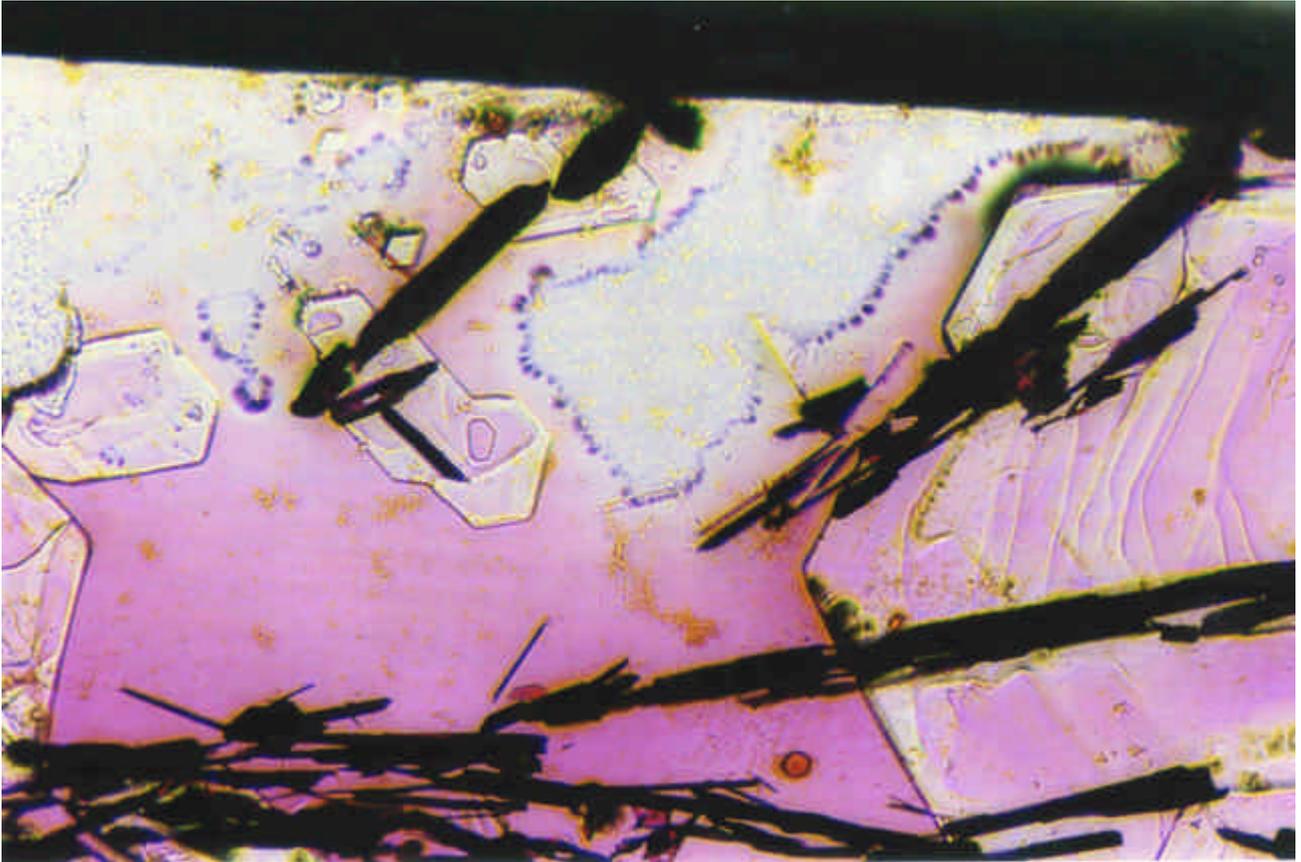


Abb. 3.11: Sortier- und Trennvorgänge im Eisgefüge

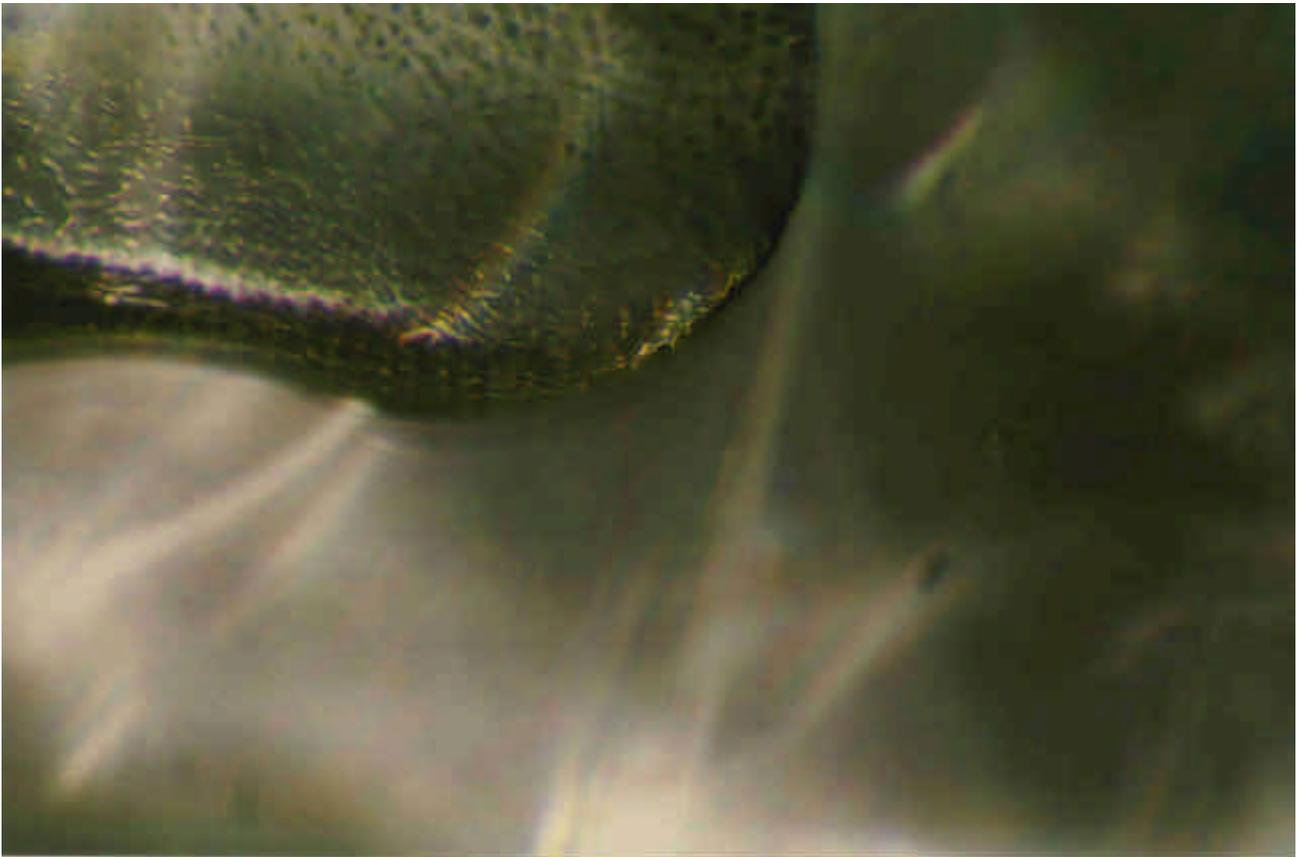
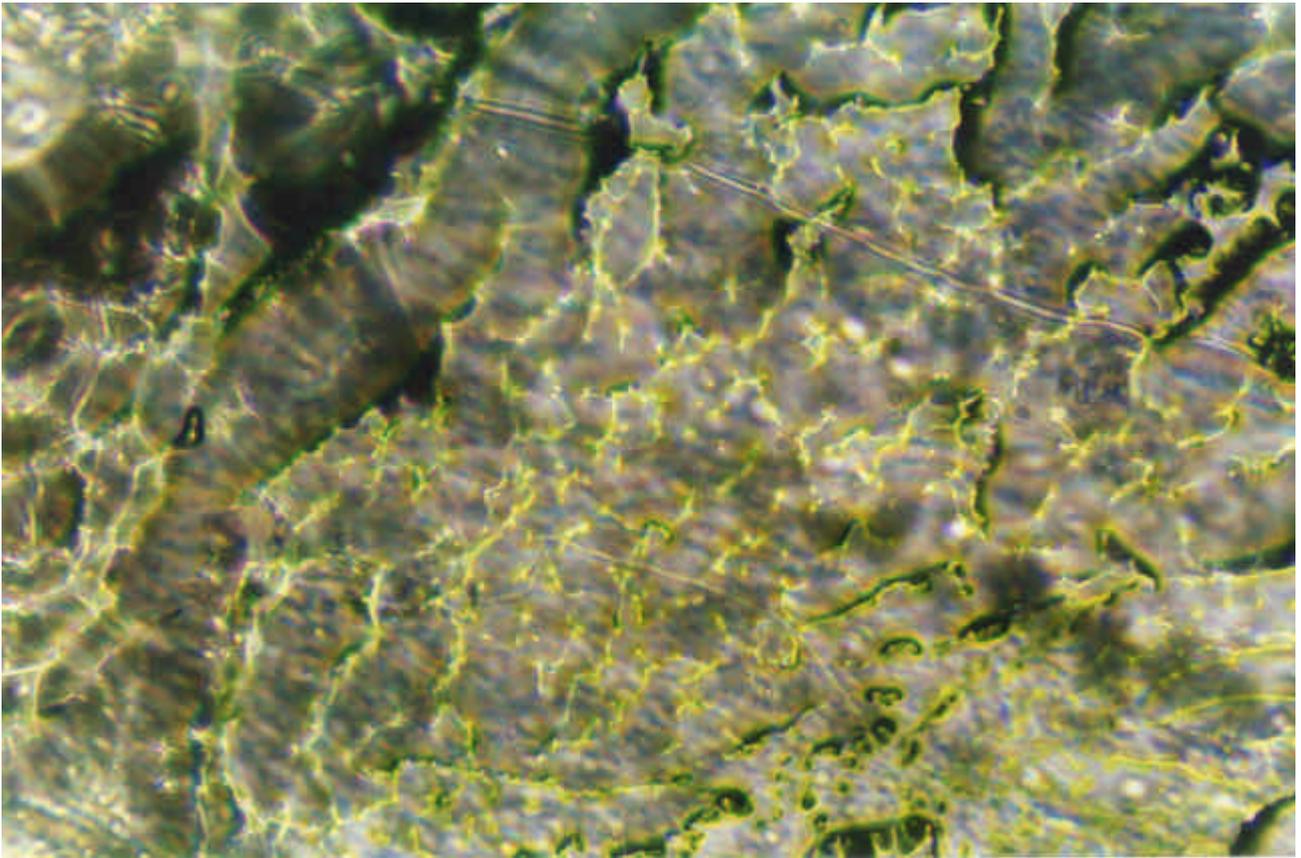


Abb. 3.12: Strukturveränderungen auf der Oberfläche von Eiszellen nach der Bestrahlung mit UV-Licht

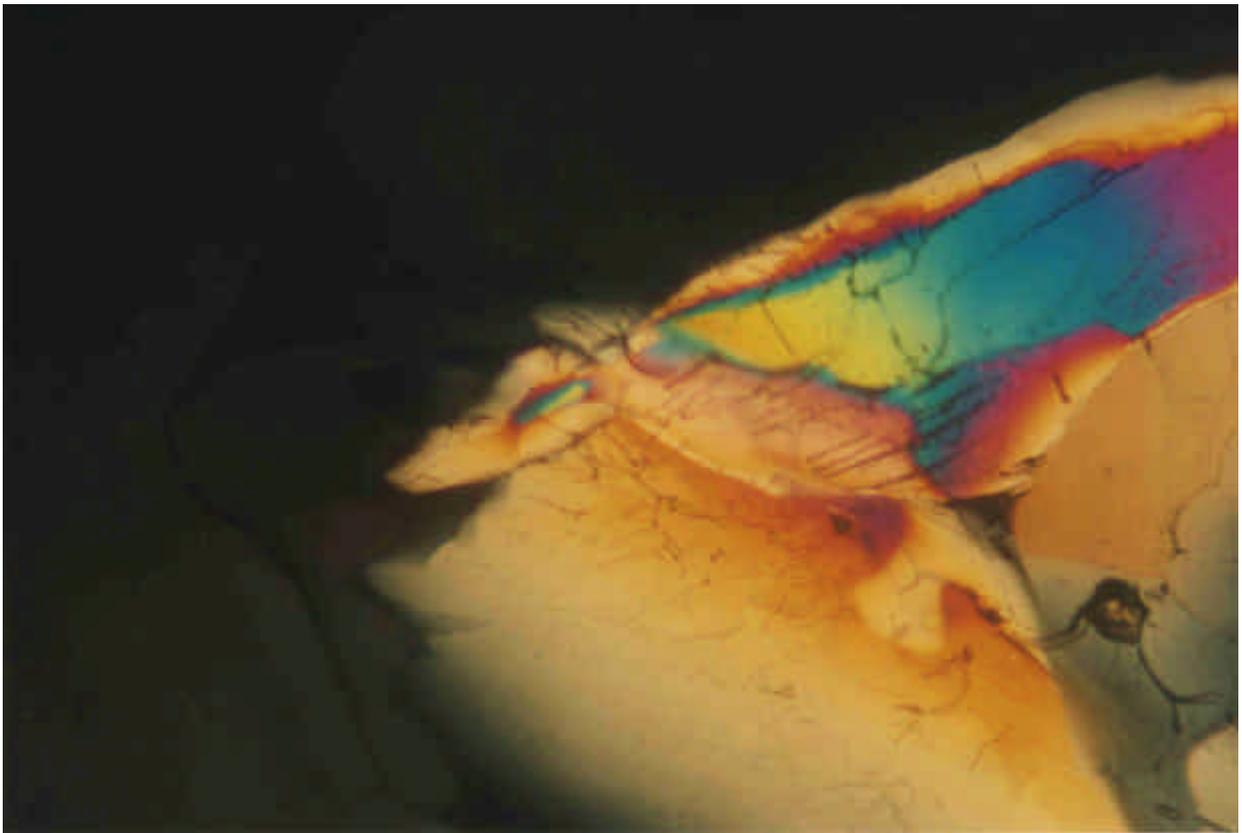
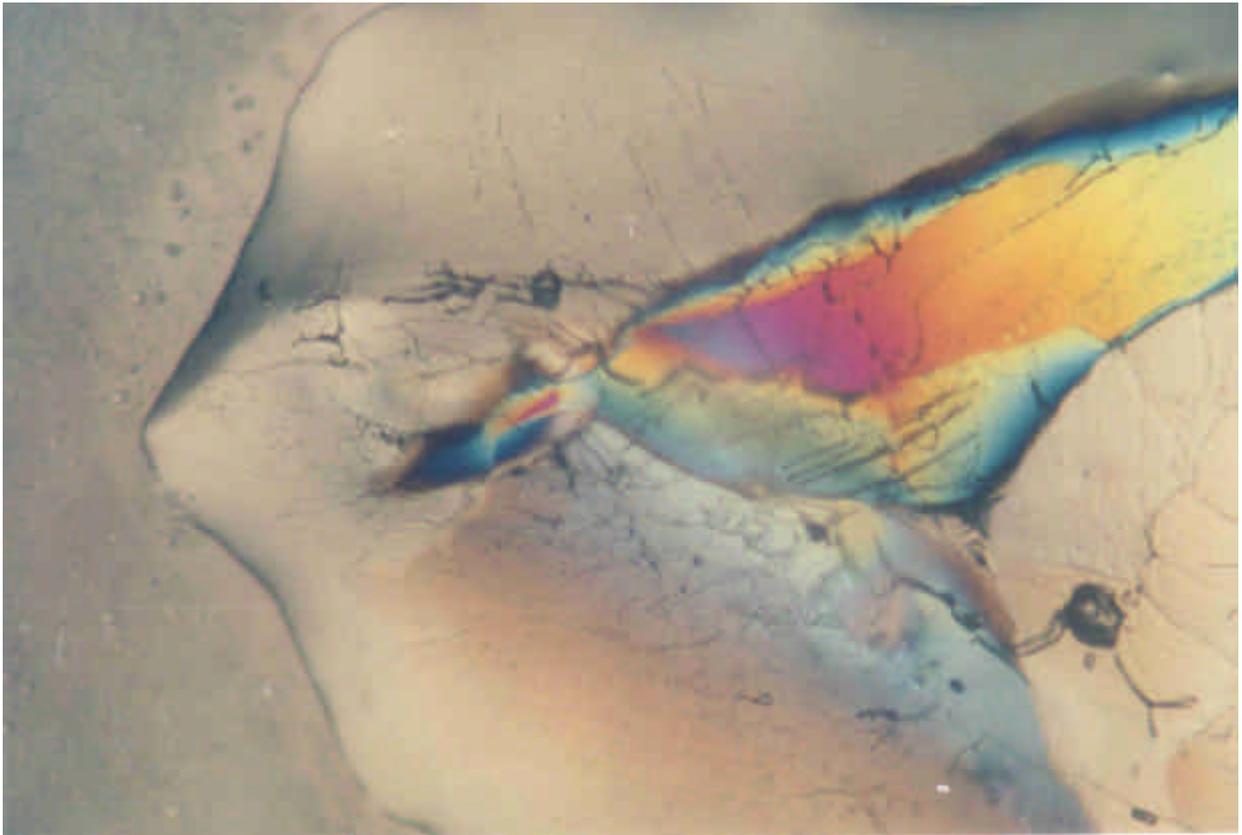


Abb. 3.13: Untersuchung der optischen Aktivität von Meereis. Die Eisprobe wird mit polarisiertem weißem Licht durchstrahlt. Das durchtretende Licht wird mittels eines drehbaren Analysators betrachtet. Die beobachtete Farbfolge deutet auf „linksdrehend“ hin.

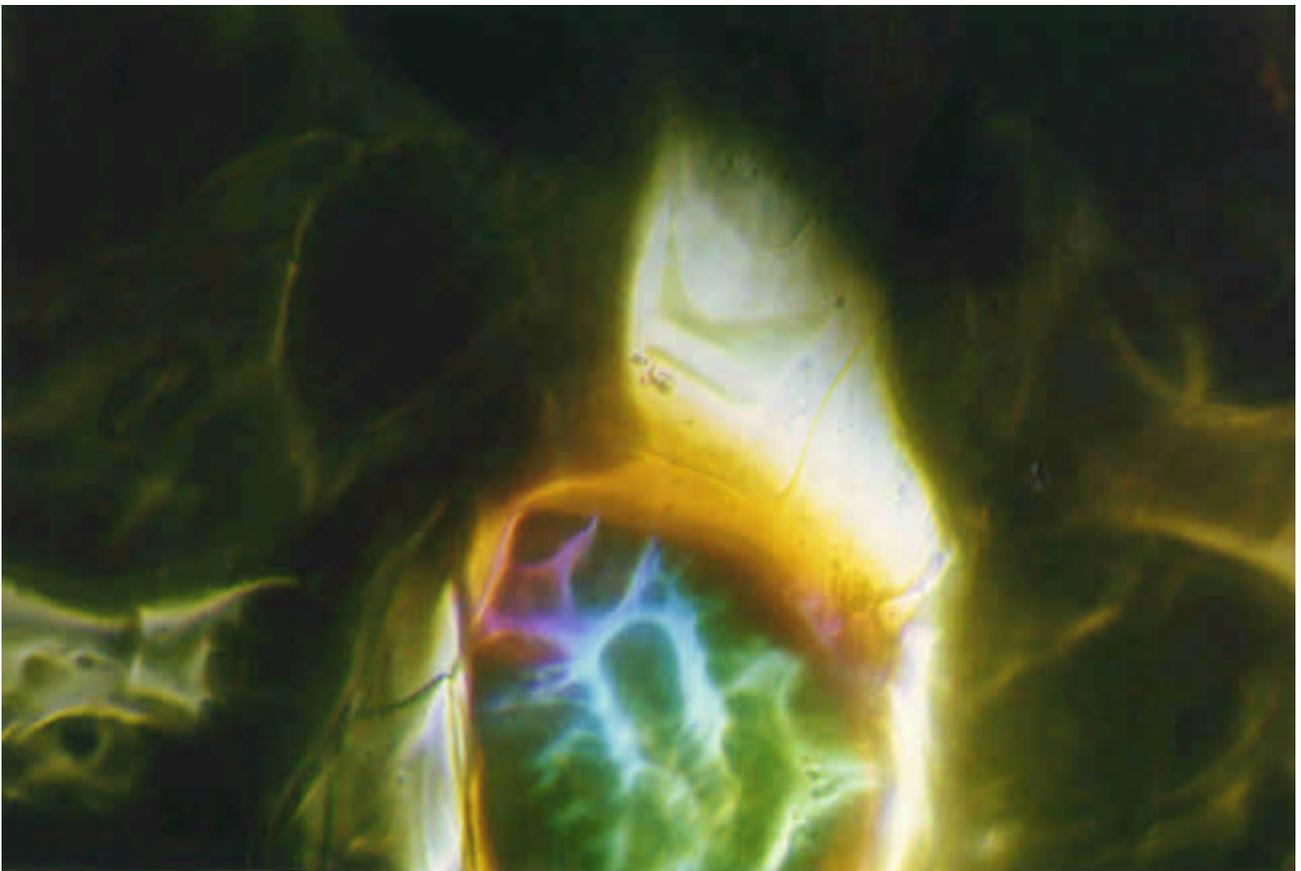
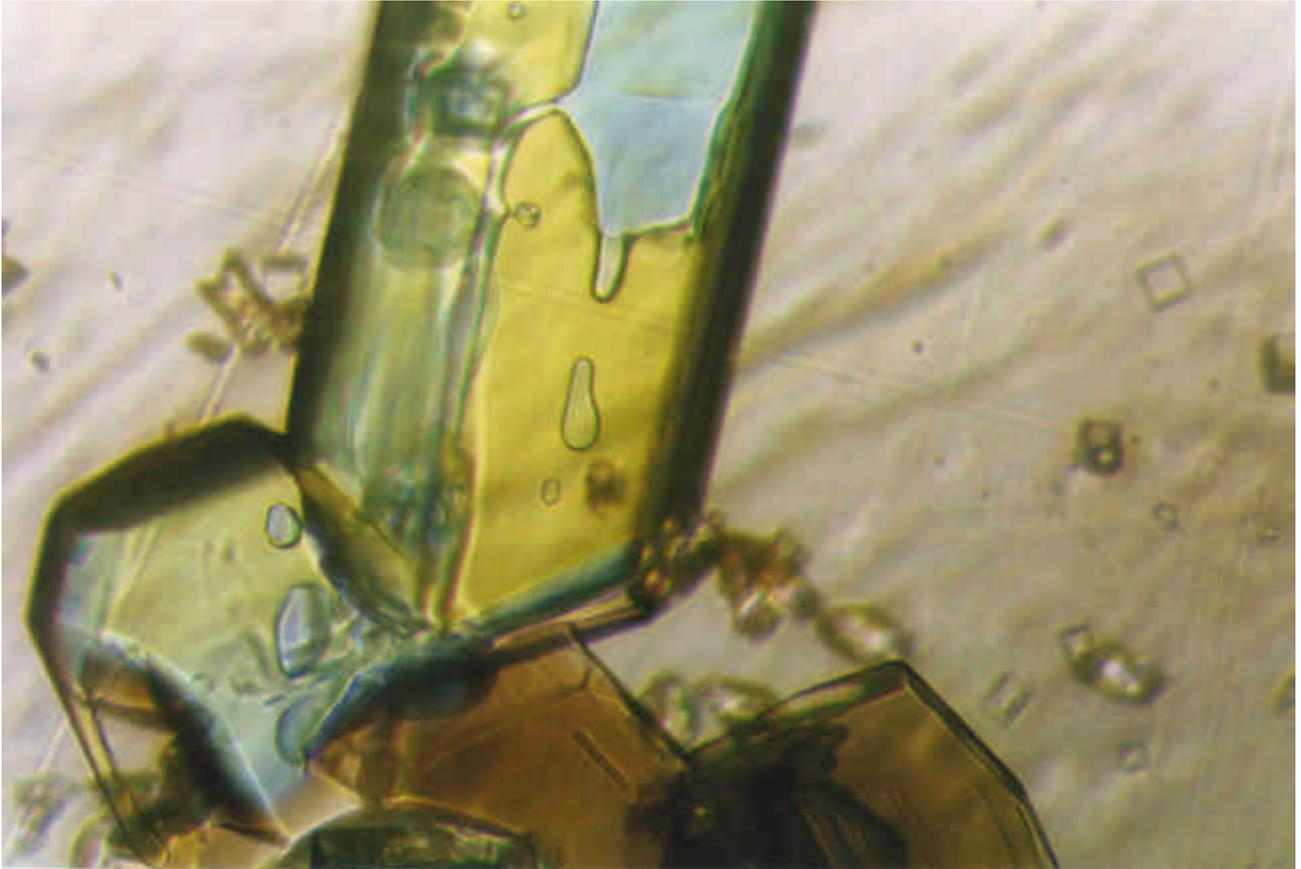


Abb. 3.14: Beispiele zur Untersuchung der optischen Eigenschaft von Meereis

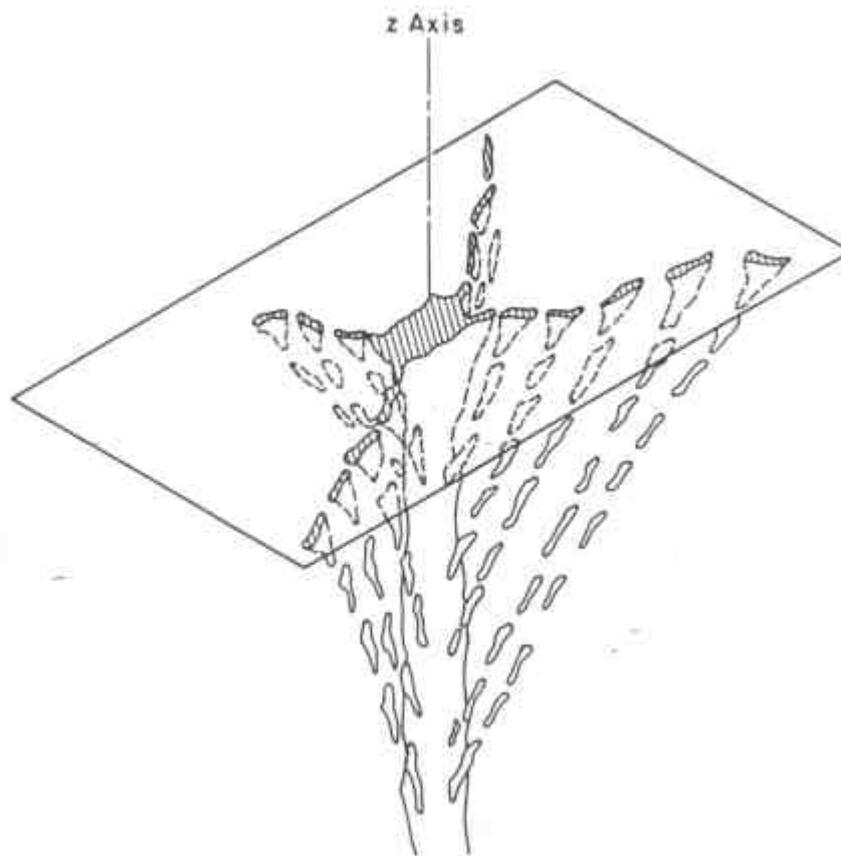


Abb. 3.15: Prinzipielle Darstellung zur Entstehung von Entsalzungskanälen in altem Eis und Foto der dabei entstehenden Eisstalaktiten an der Unterseite des Eises

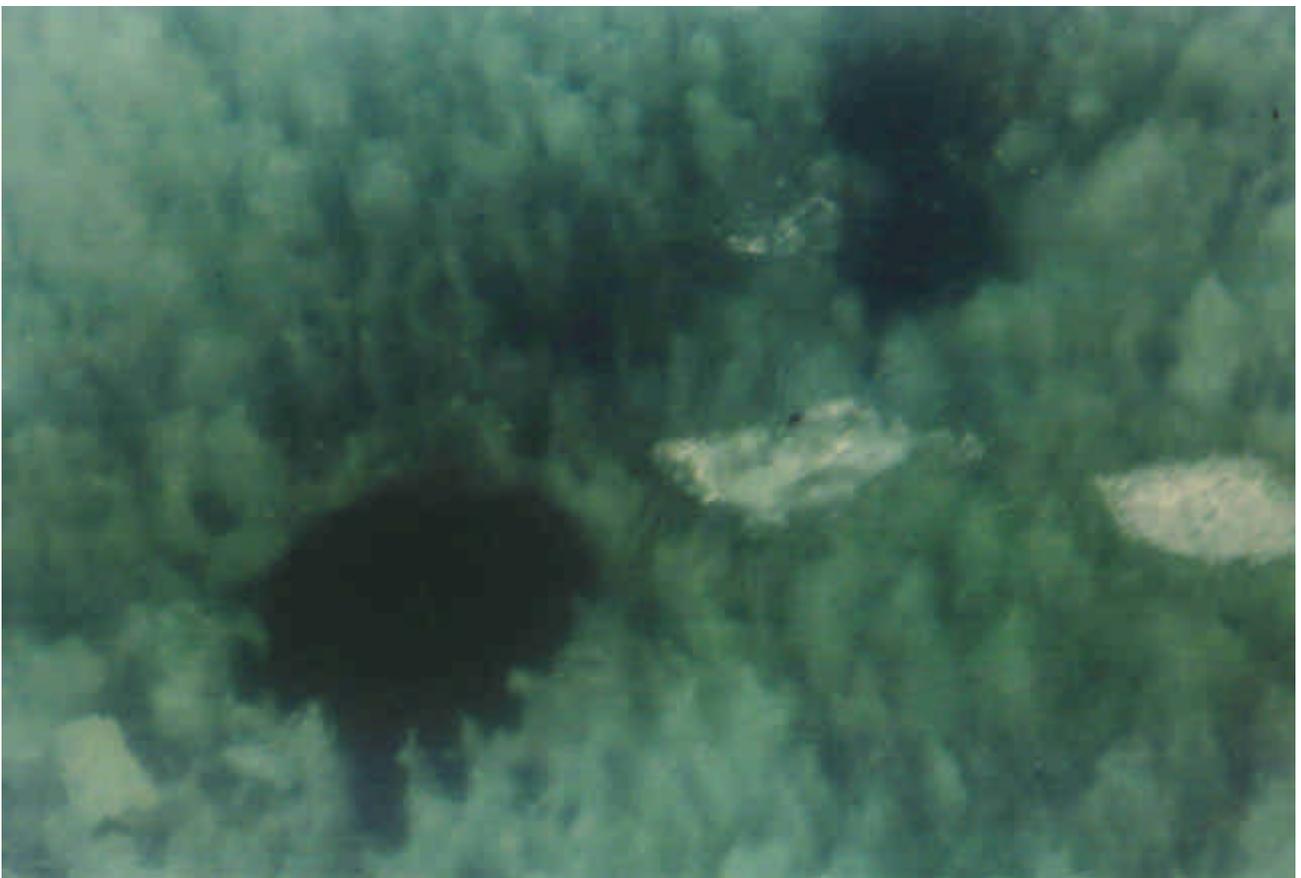


Abb. 3.16: Altes Eis während des weit fortgeschrittenen Schmelzvorganges

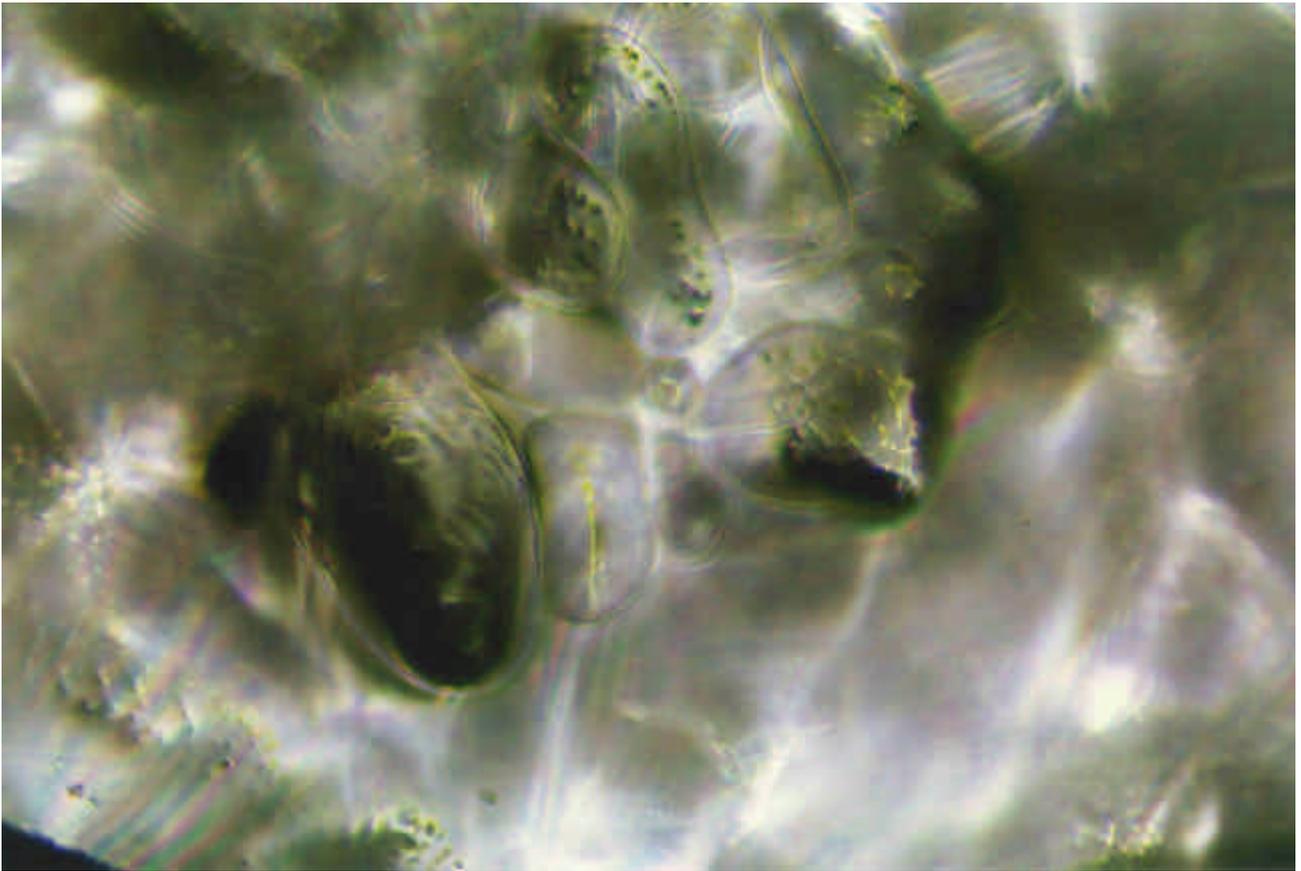


Abb. 3.17: Ablagerung von kleinen Partikeln und organischen Bestandteilen auf den Oberflächen von Kaviolen und Bläschen im Eis

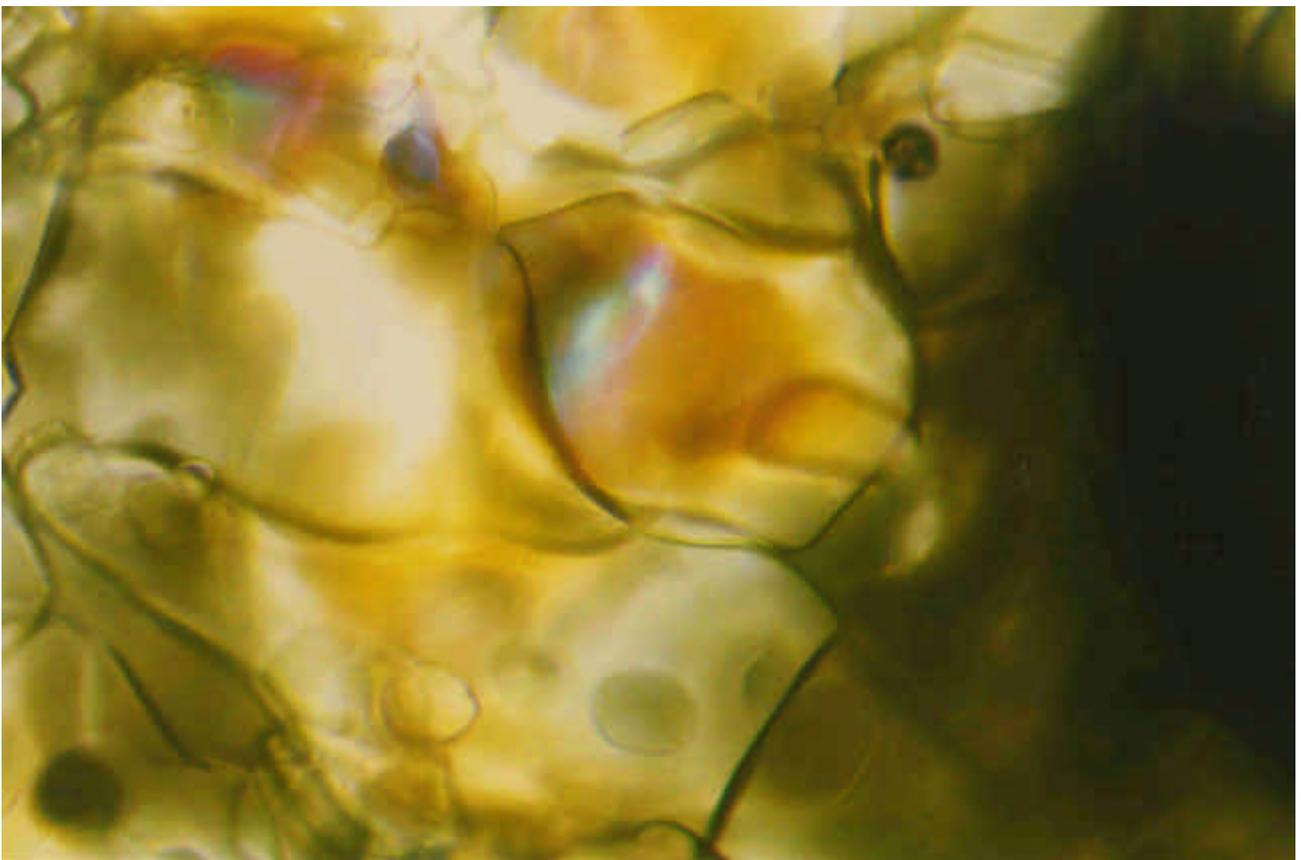
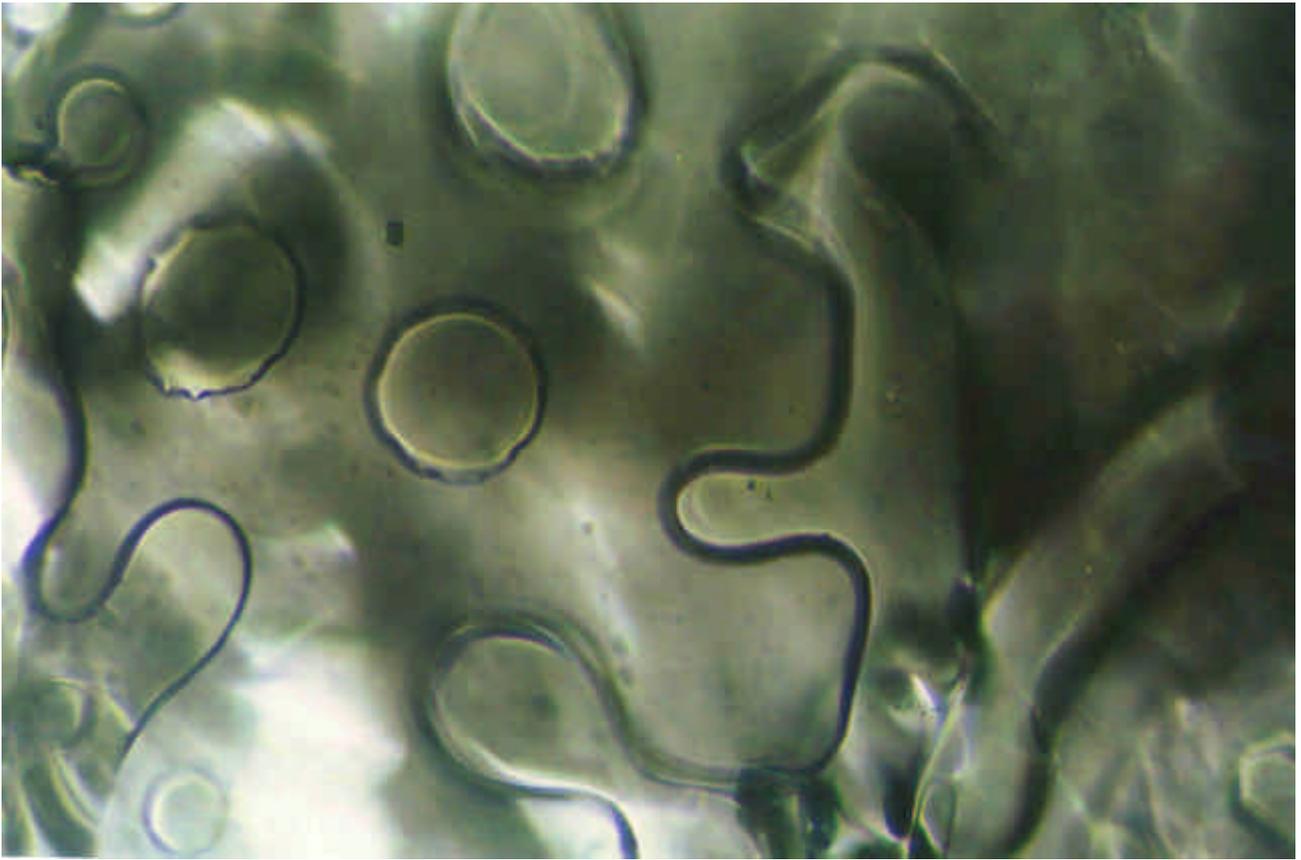
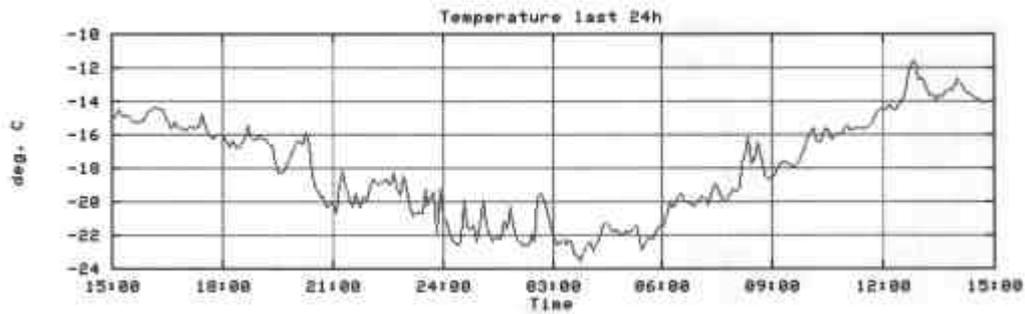
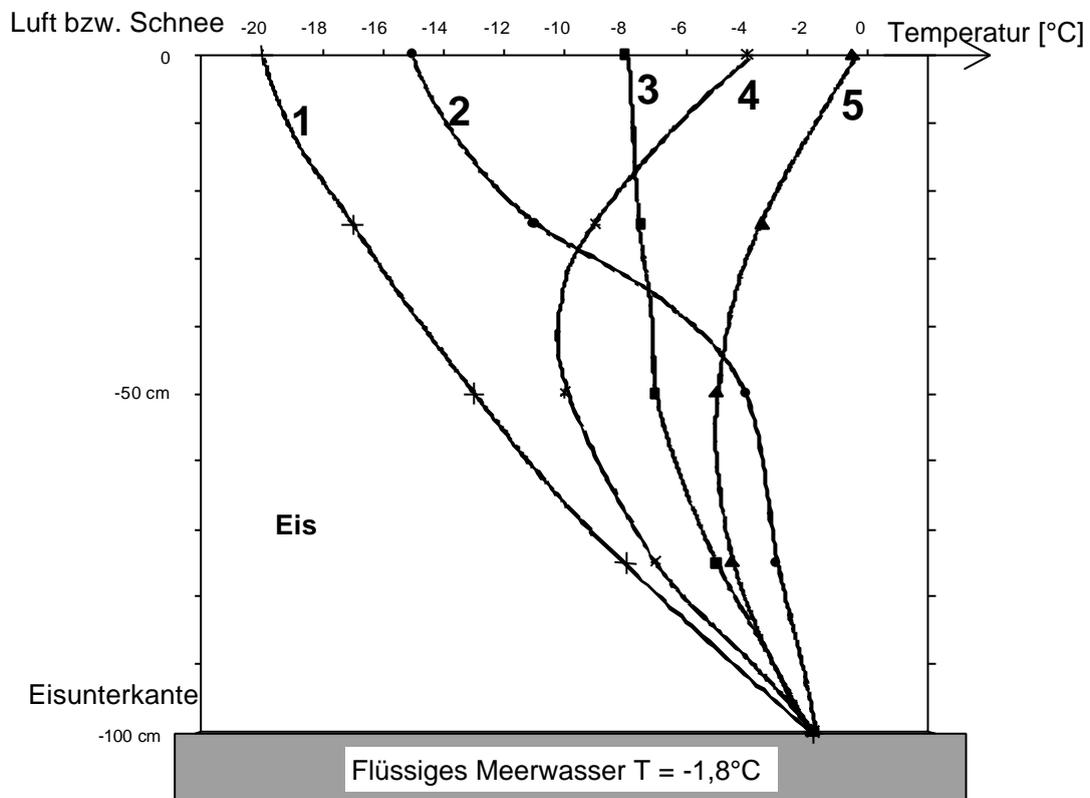


Abb. 3.18: Unterschiedliche Membranformen, welche sich unter der Wirkung von Temperaturgradienten zeitlich verändern



Typischer zeitlicher Temperaturverlauf in der Luft (24. April)



- Fall 1: Schneefreie Eisoberfläche, langanhaltende Kälte
- Fall 2: 50 cm Schnee auf Eisoberfläche
- Fall 3: 100 cm Schnee auf Eisoberfläche
- Fall 4: wie Fall 1, aber nach plötzlichem Temperaturanstieg
- Fall 5: wie Fall 4, aber nach weiteren 10 Tagen

Abb. 3.19: Typische experimentell ermittelte Temperaturverteilungen im Meereis sowie in der darüberliegenden Luft

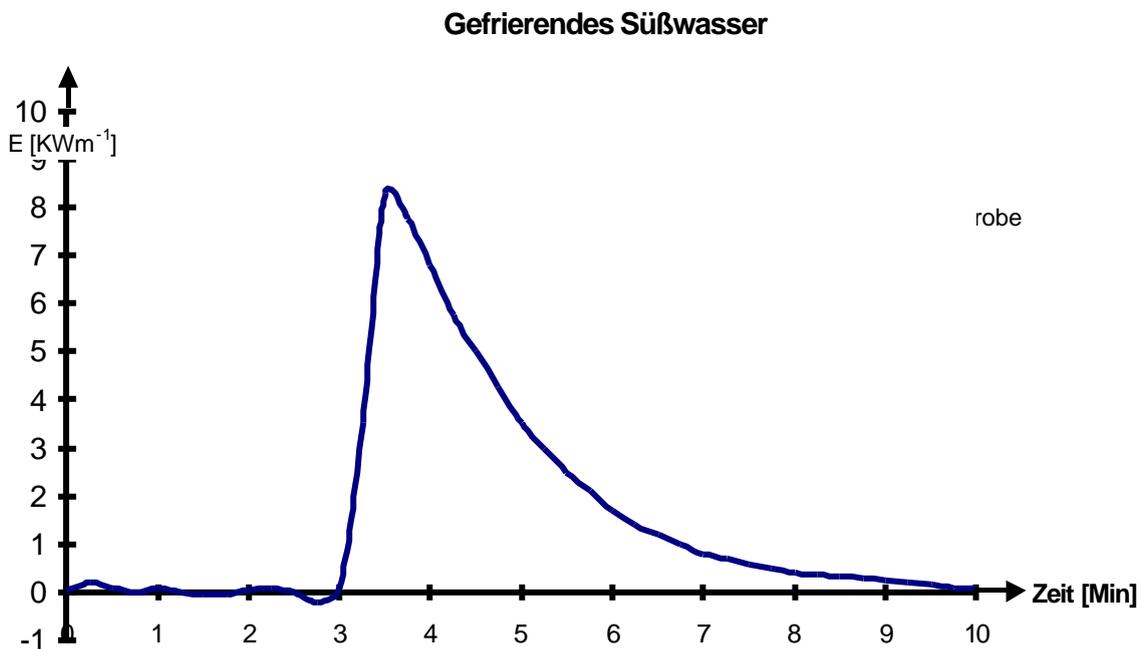
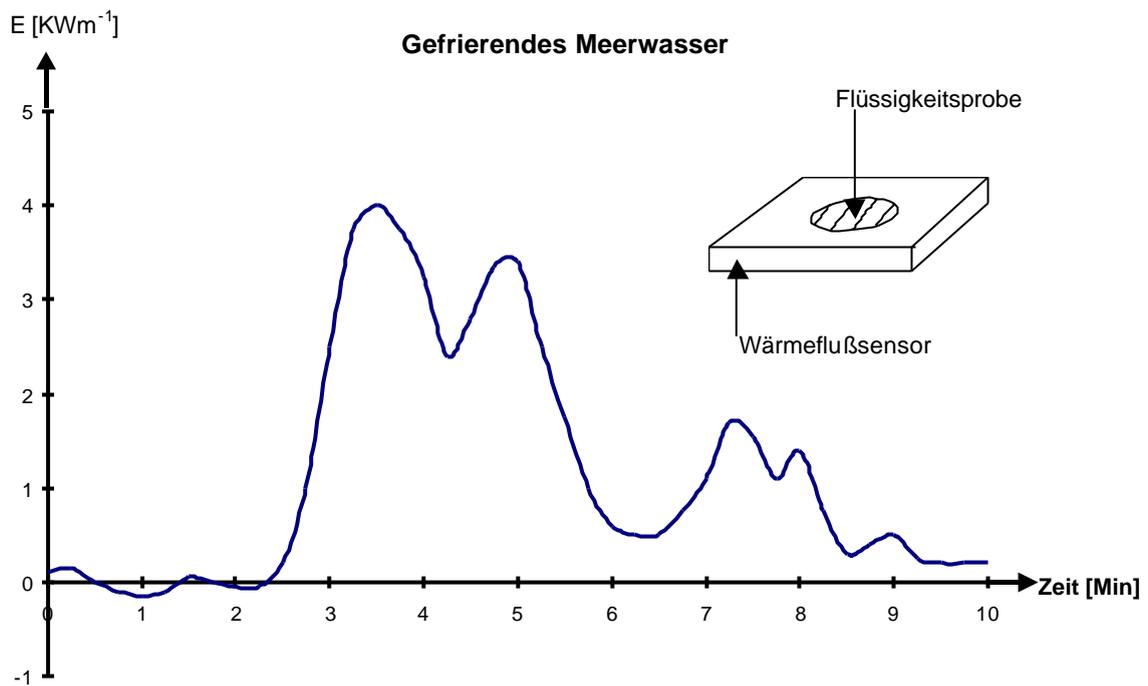


Abb. 3.20: Zeitlicher Verlauf der im Eis während des Gefrierens auftretenden Energieströme, welche durch die Oberfläche der gefrierenden Flüssigkeitsprobe in den Wärmeflußsensor eindringen.

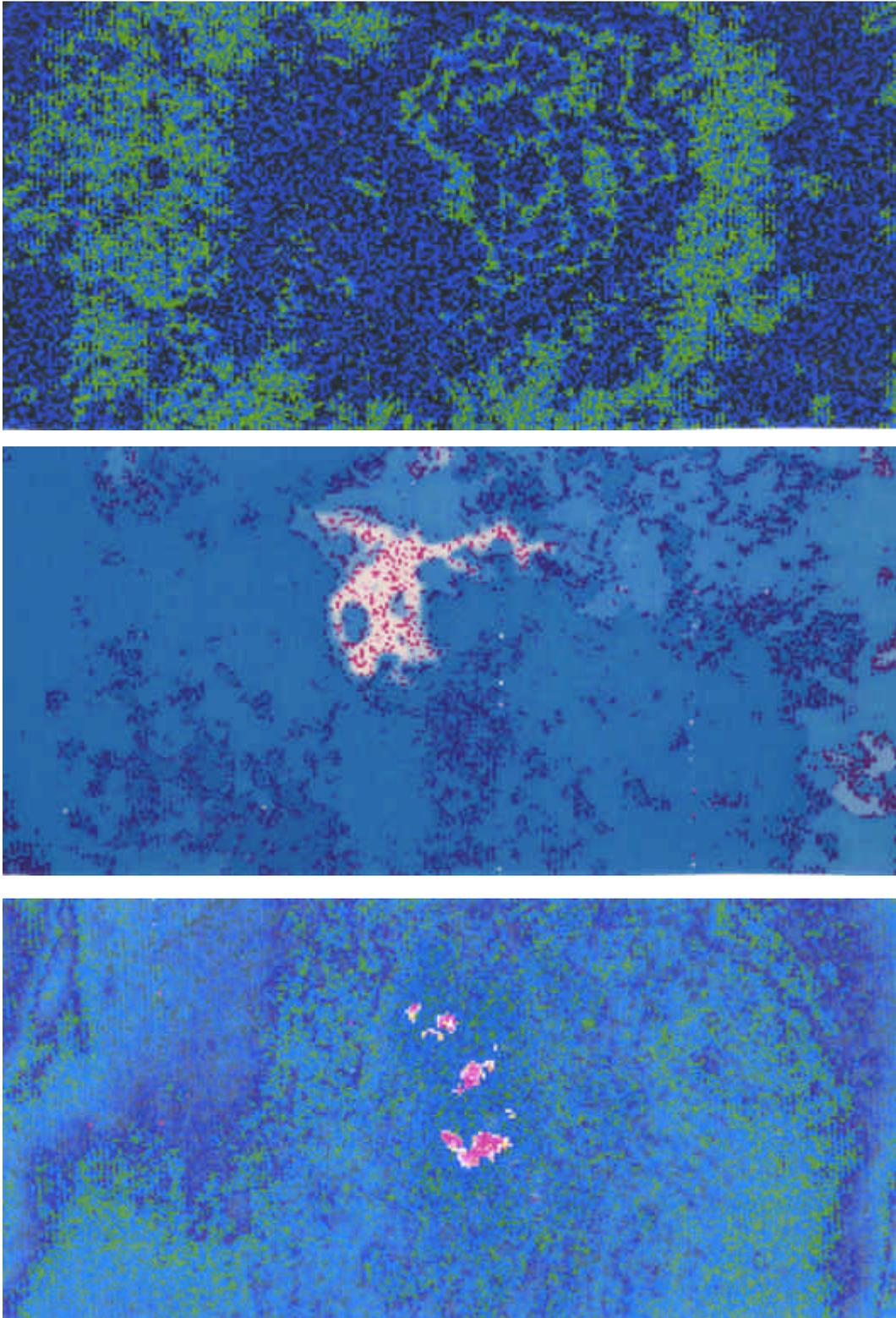


Abb. 3.21: Mit einer hochempfindlichen IR-Wärmebildkamera wurden Meereisproben aufgenommen, um die im Eis vorhandenen Temperaturinhomogenitäten sichtbar zu machen.
Oben: frisch aufgebrochene Eisprobe
Mitte: ein Tropfen Süßwasser verteilt sich und gefriert im Meer-eis (wärmer)
Unten: einige Salzkörner lösen sich im Eis auf (kälter)

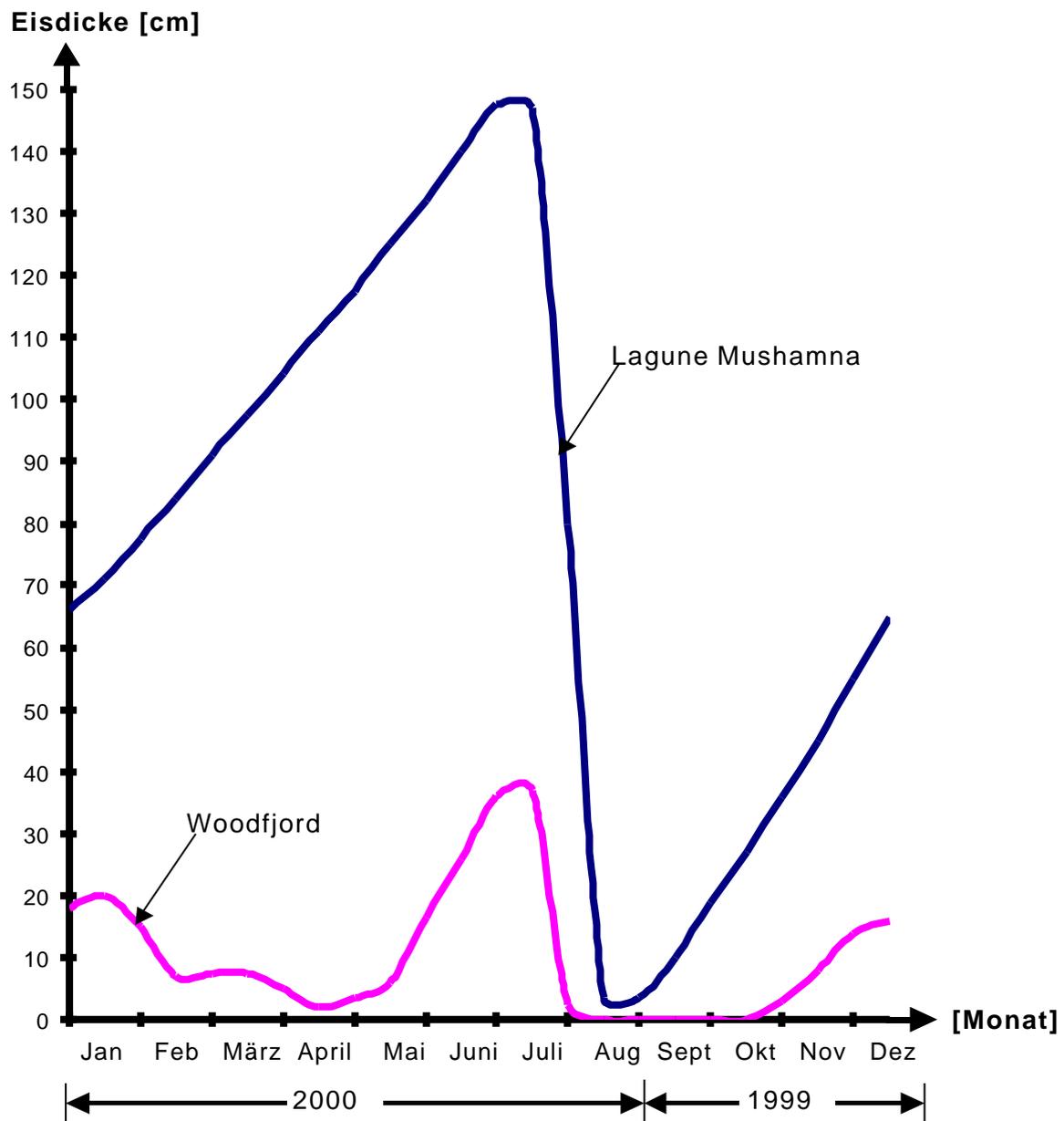
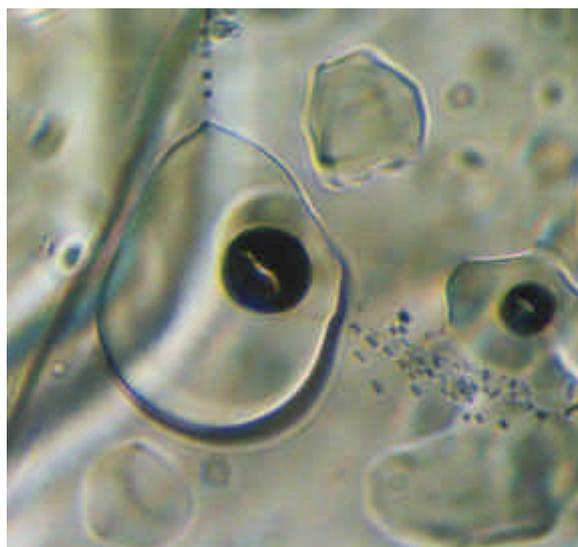
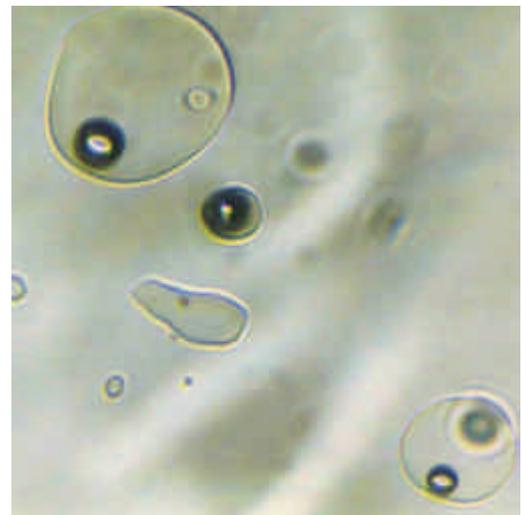


Abb. 3.22: Eisstärken auf dem Woodfjord und in der Lagune Mushamna im Verlaufe des Expeditionsjahres



Zwei Eiszellen trennen sich

Ein Gasbläschen rotiert in Flüssigzone

Abb. 3.23: Beispiele zur Dynamik im Eisgefüge.
Zeitlicher Bildabstand jeweils von oben nach unten 3 Sekunden.

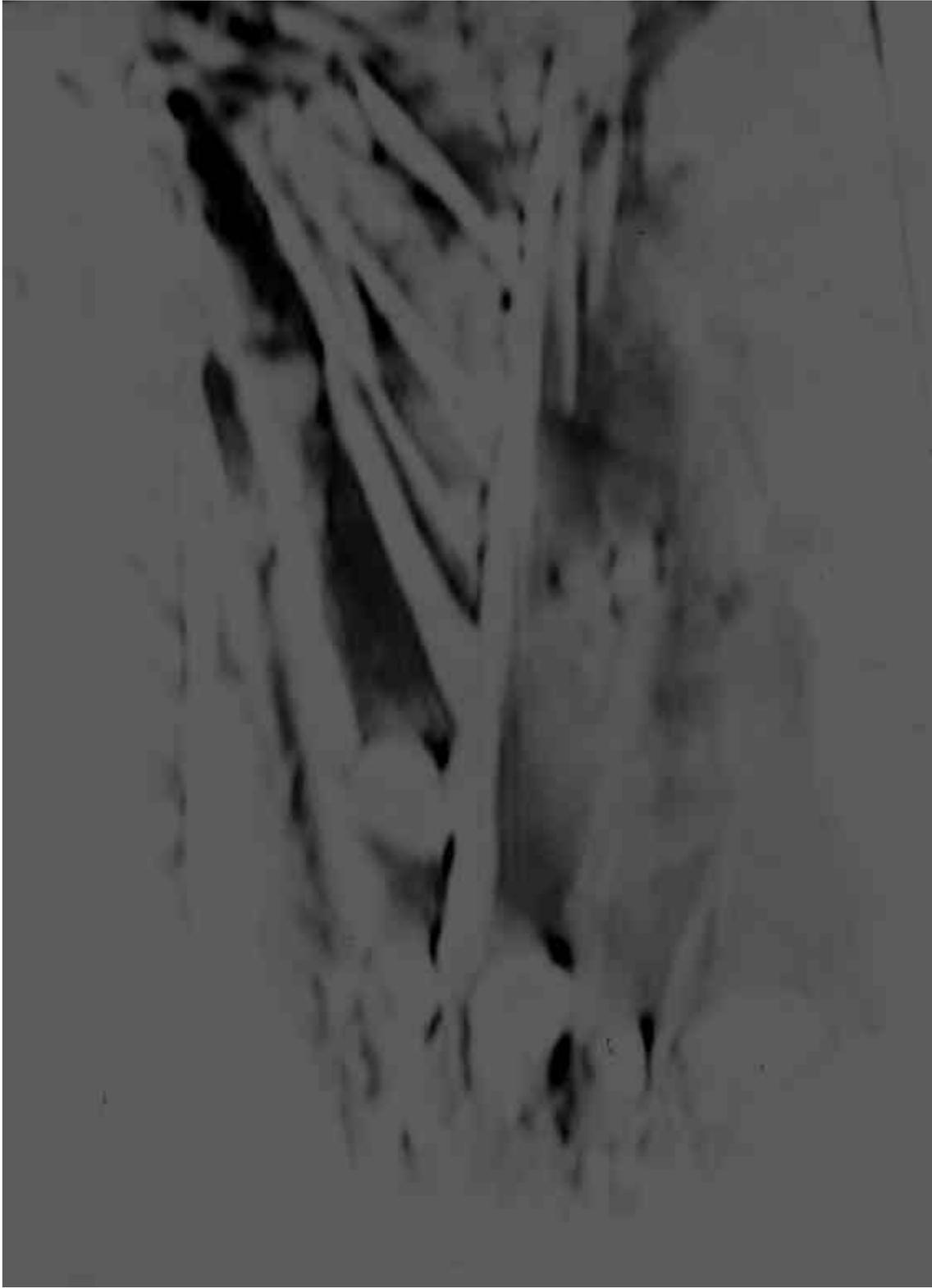


Abb. 3.24: Künstlich hergestellte Eiszyylinder werden mittels Kernspintomographie untersucht. Süßwassereis zeigt keinerlei Strukturen. Gefrorenes Meerwasser dagegen läßt Kaviolen, Kanäle und Mikrostrukturen im Meereis erkennen. Dieser Effekt wird auf die Existenz der Grenzschichten zwischen gefrorenem Süßwasser und hochkonzentrierter Salzlösung zurückgeführt.

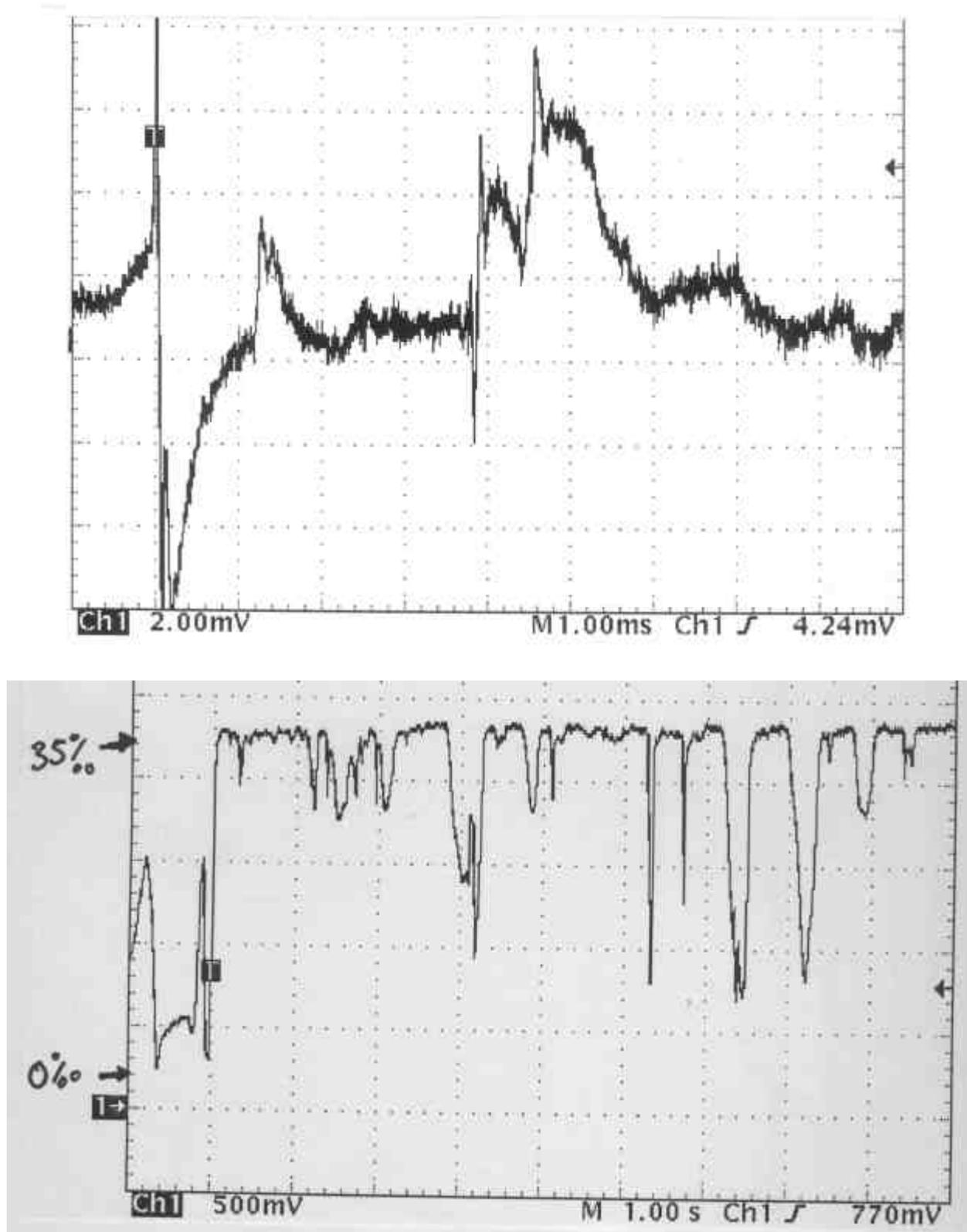


Abb. 3.25: Mittels einer medizinischen Sonde (Durchmesser: 0,4 mm) zur Messung von Potentialsignalen in Nervenfasern werden Potentialdifferenzen in der zellü-
 aren Struktur von Meereis beim Durchstoßen der Grenzschichten registriert (oben). Mittels einer sehr ähnlichen Sonde wird in gleicher Weise die
 sprunghafte Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit beim Durchstoßen
 der Grenzschichten gemessen (unten)

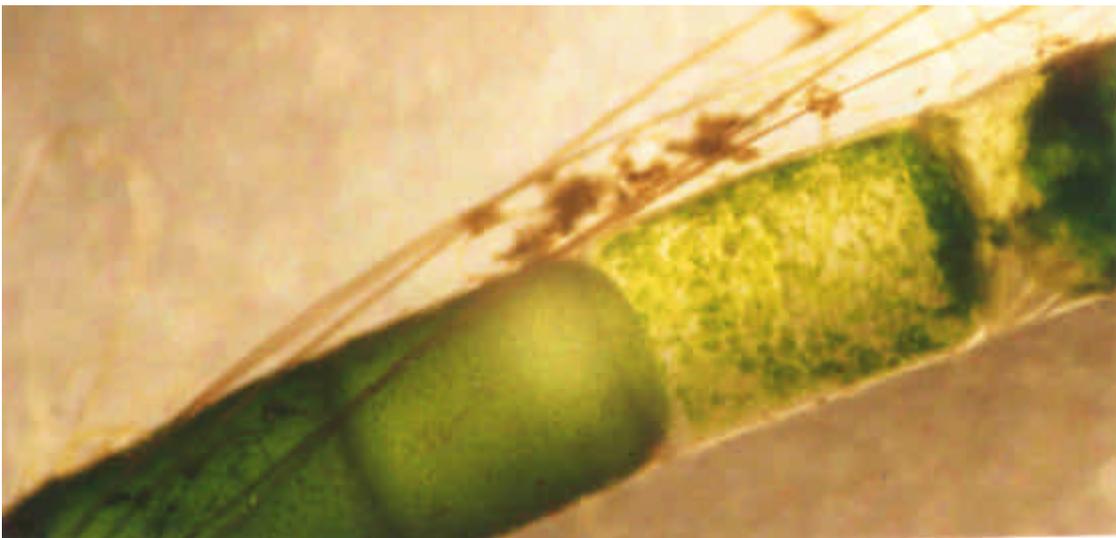
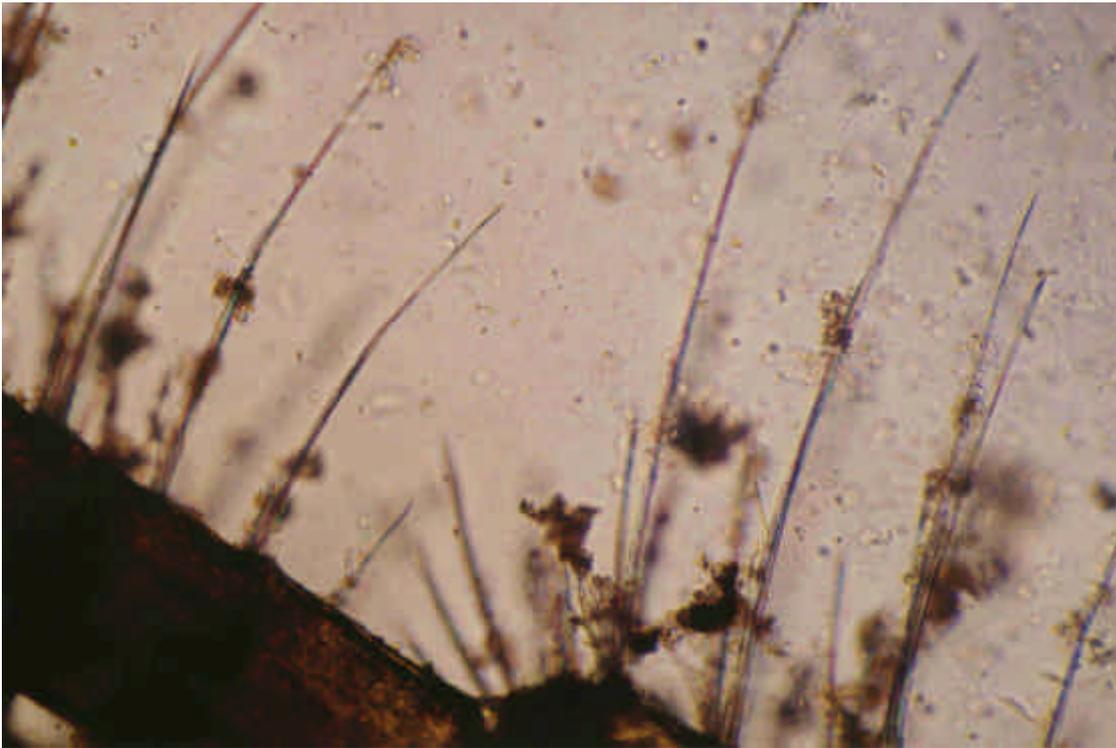


Abb. 4.1: Entnahme von Proben mit Mikroorganismen aus:
Fangbeinen von Krebsen, absterbenden Algen, Planktonkolonie

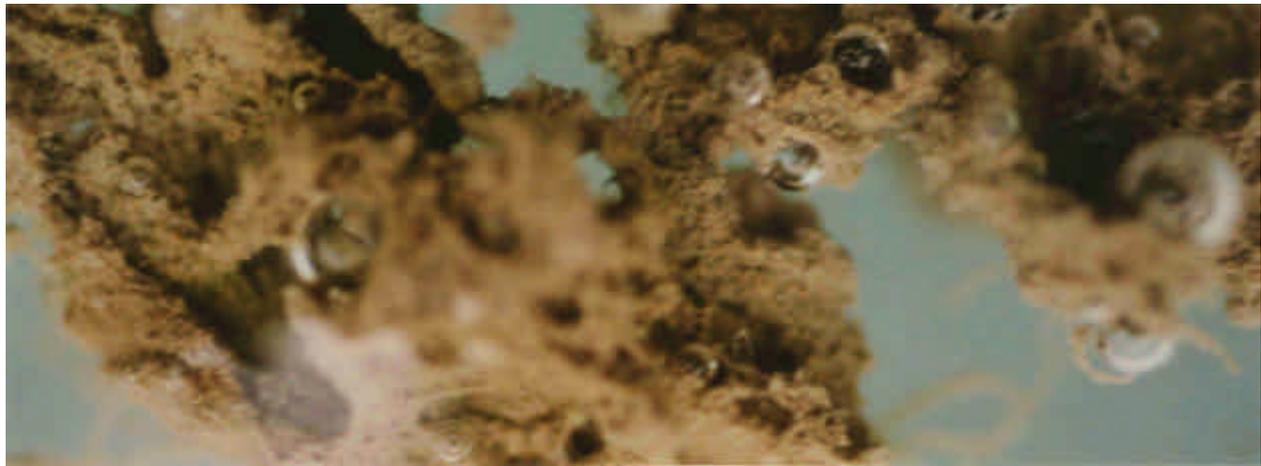


Abb. 4.2: Mikroorganismen aus verschiedenen Proben bei -5° bis 0°C : Eier, Schlamm, Schimmelbewuchs

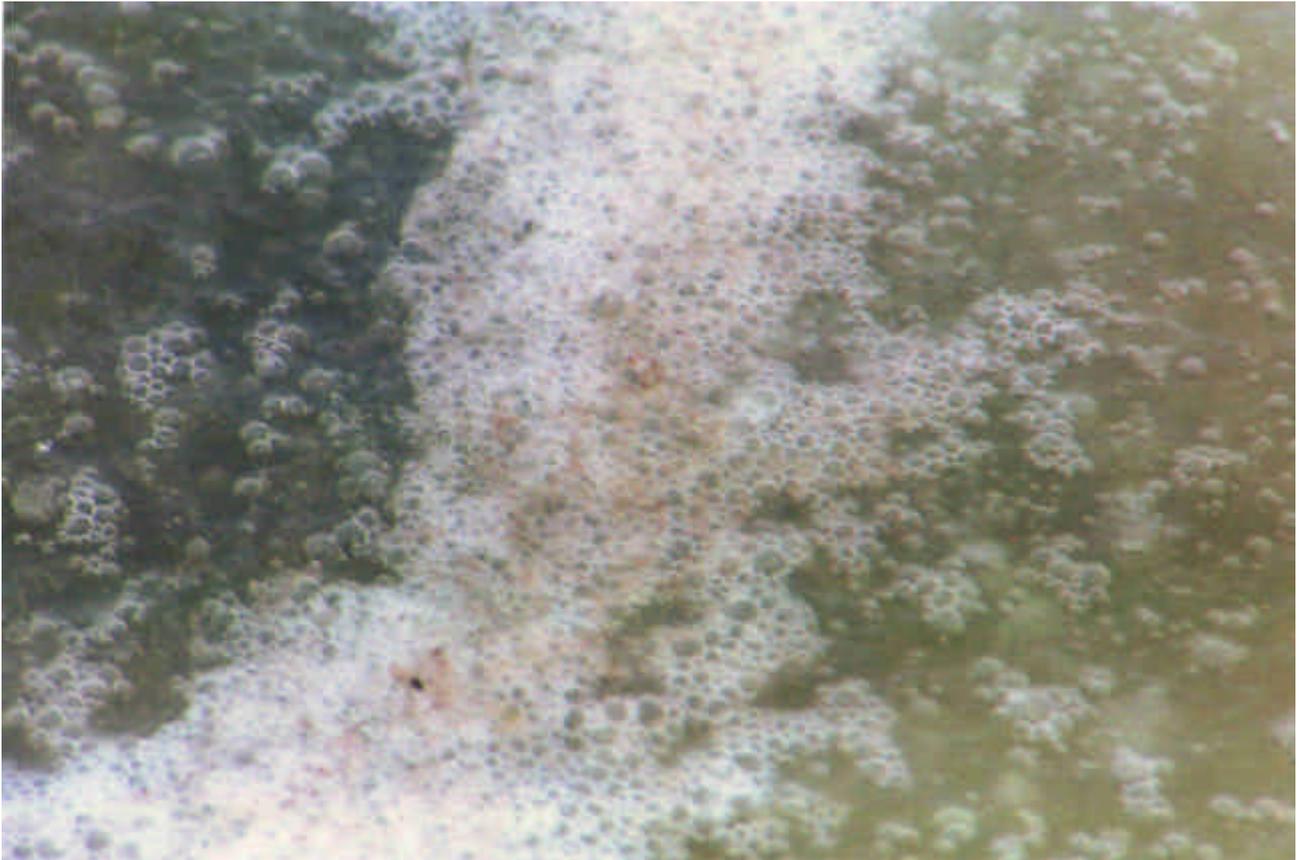


Abb. 4.3: Entstehung von Schaumbläschen aufgrund organischer Aktivitäten im Eis



Abb. 4.4: Während des Tauchens im Eis beobachtete Kleinlebewesen: Krebse, Rippenqualle, Meerschnecke

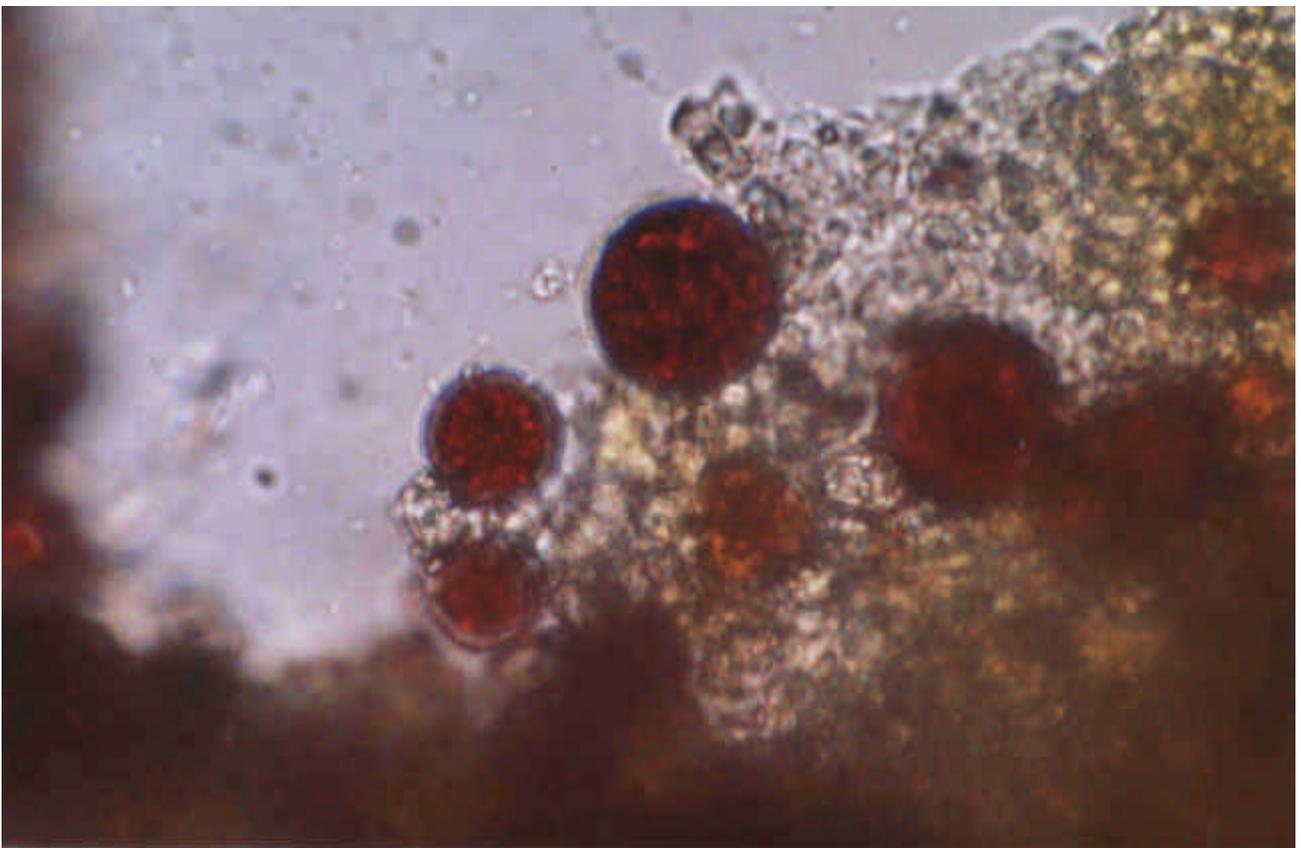
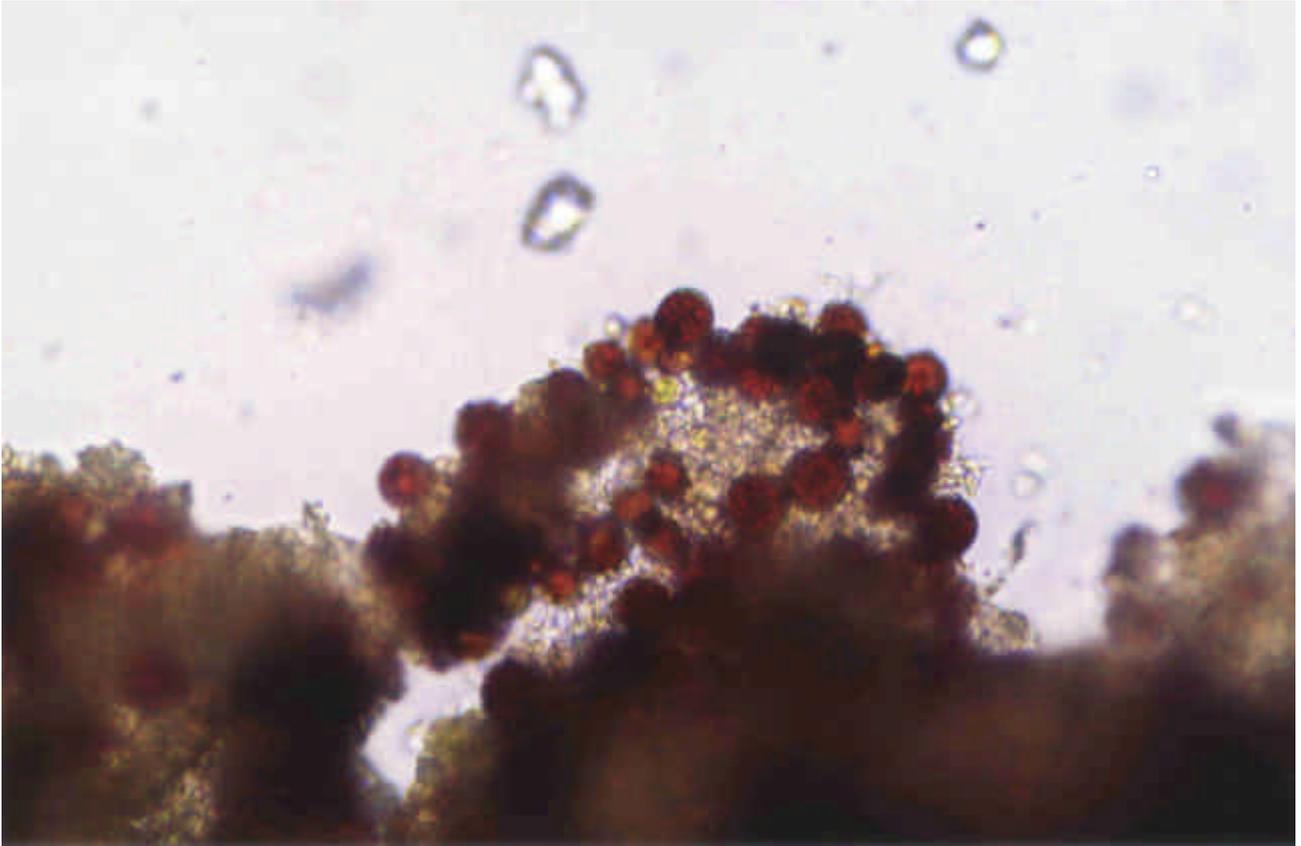


Abb. 4.5: Blutschneevalgen in Verbindung mit Pilzfäden im Schnee

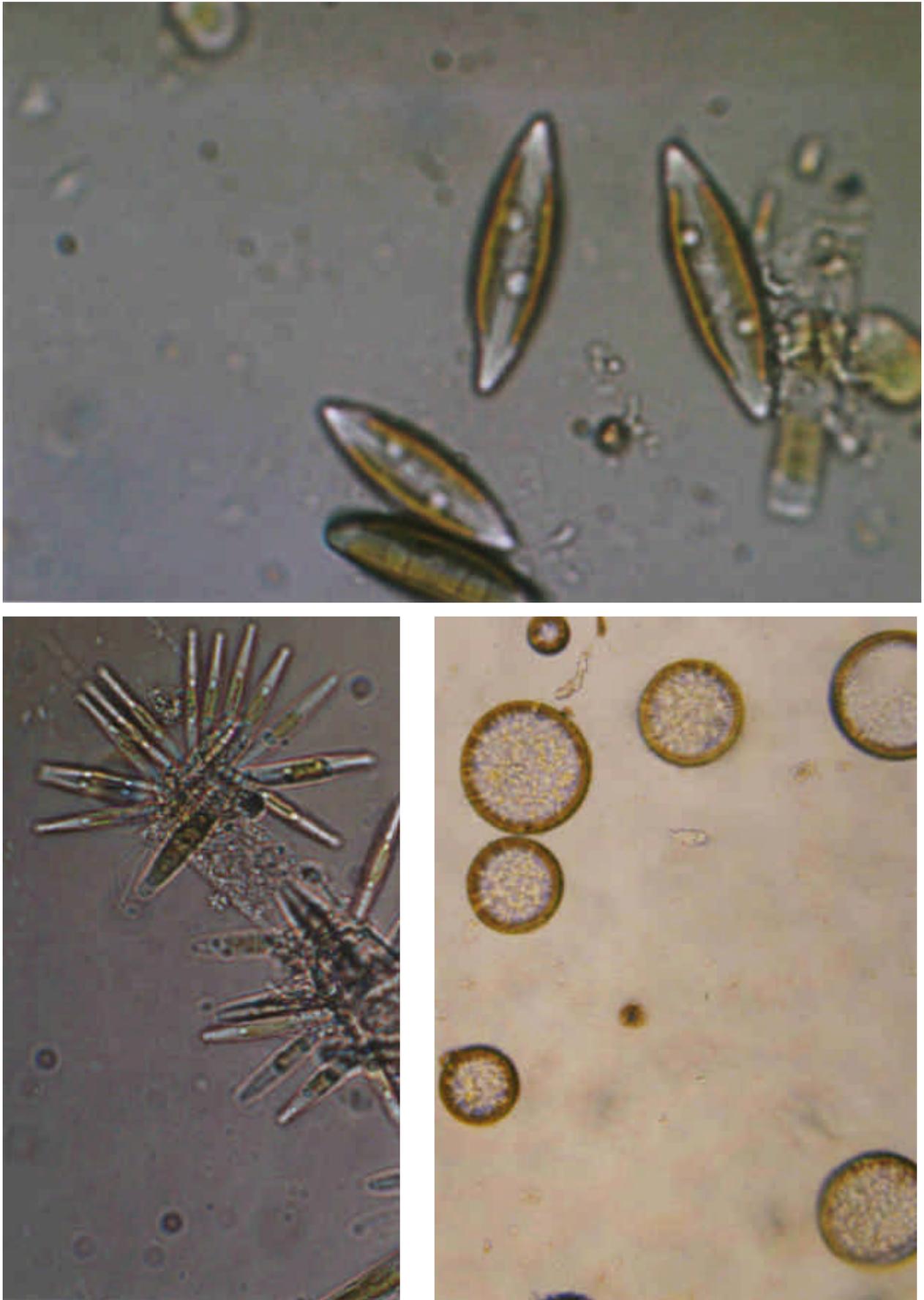


Abb. 4.6: Kolonien von Kieselalgen im Eis

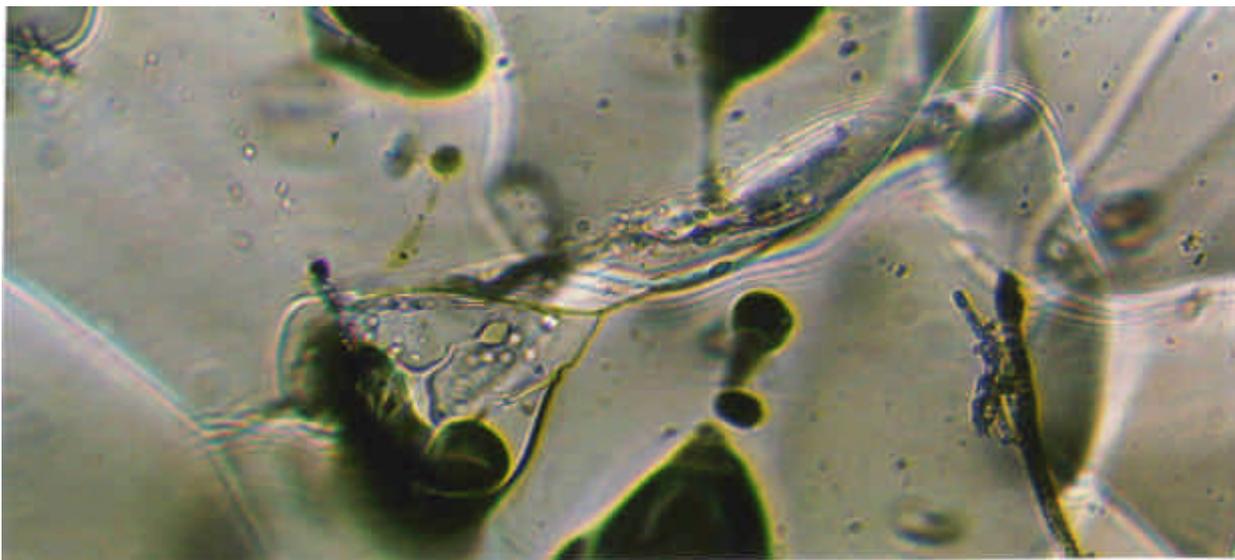
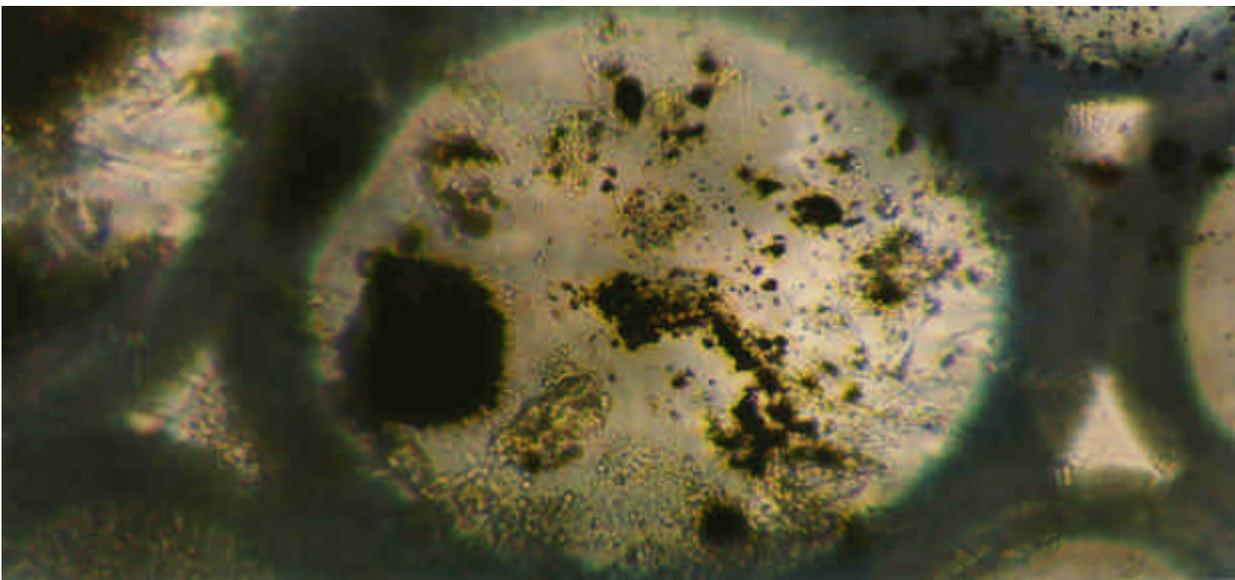
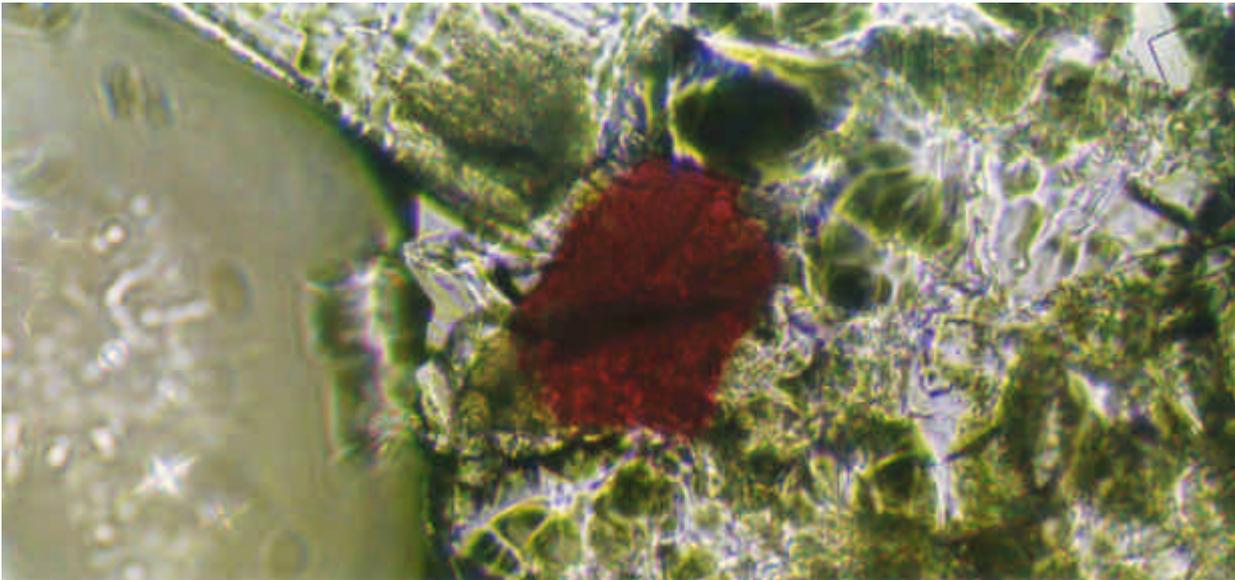


Abb. 4.7: Reichhaltiges mikrobielles Leben im Eisgefüge:
Blutschneealge, Gasbläschen, Eiskanal

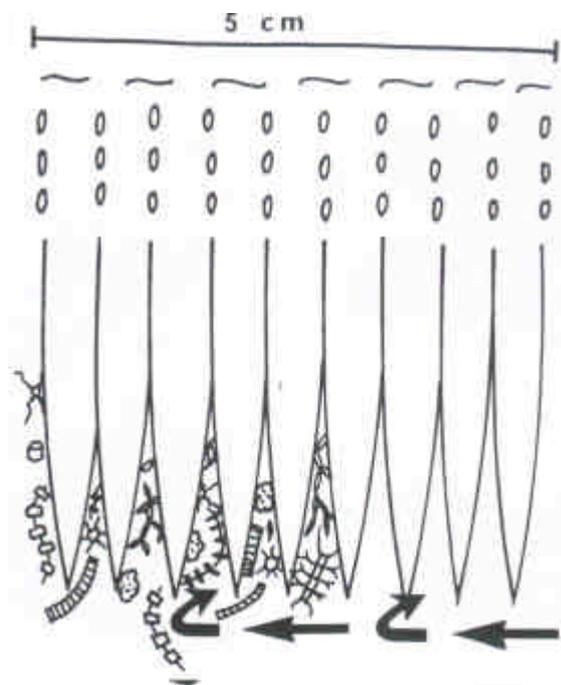
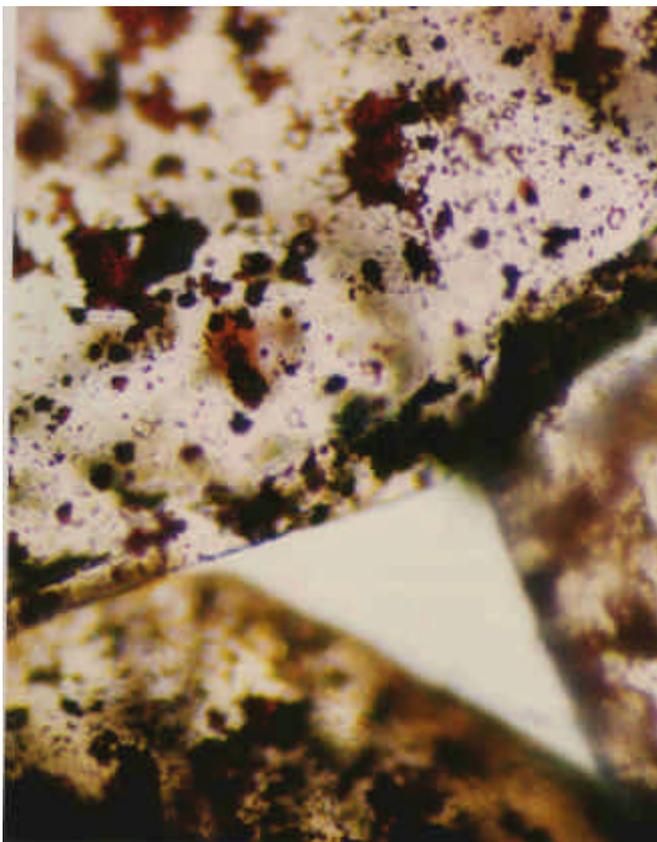
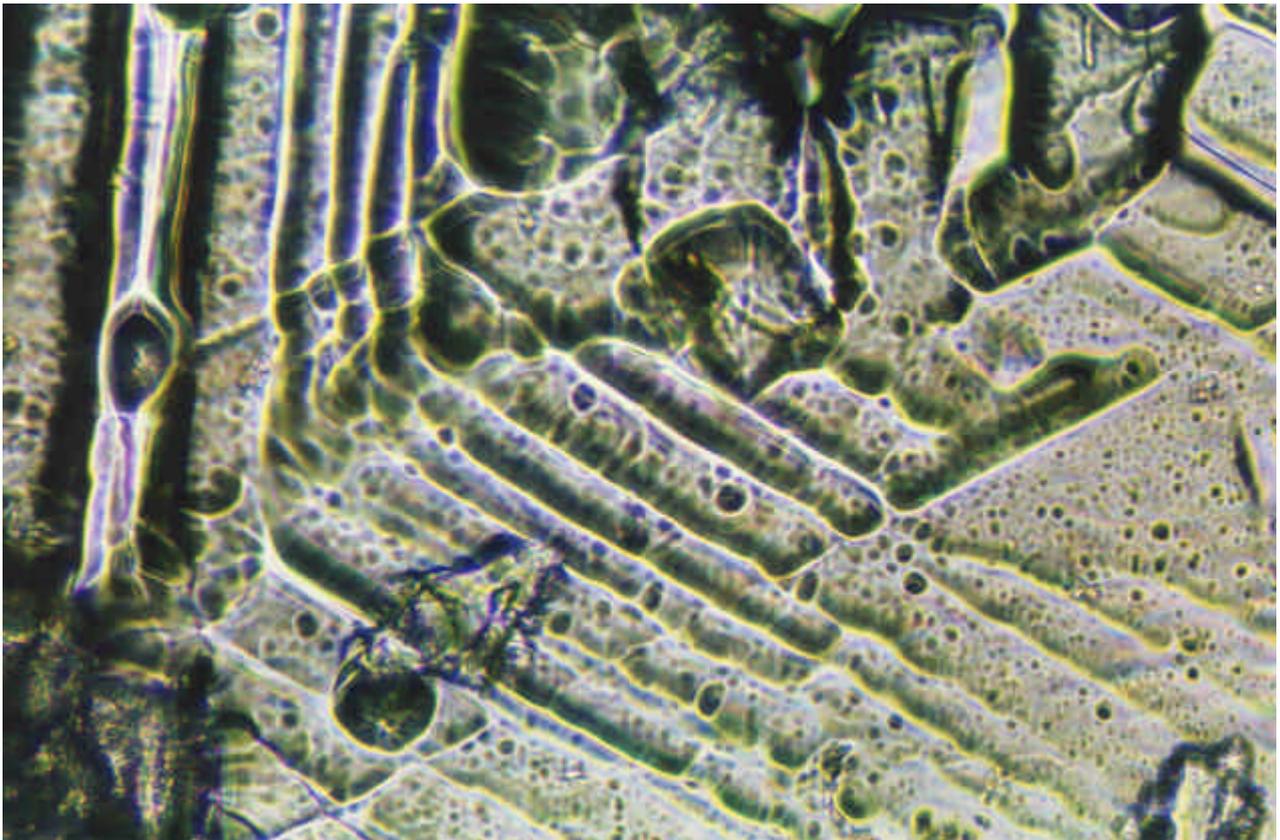


Abb. 4.8: Siebwirkung von Eis gegenüber organischen Stoffen und Staubpartikeln im Meerwasser

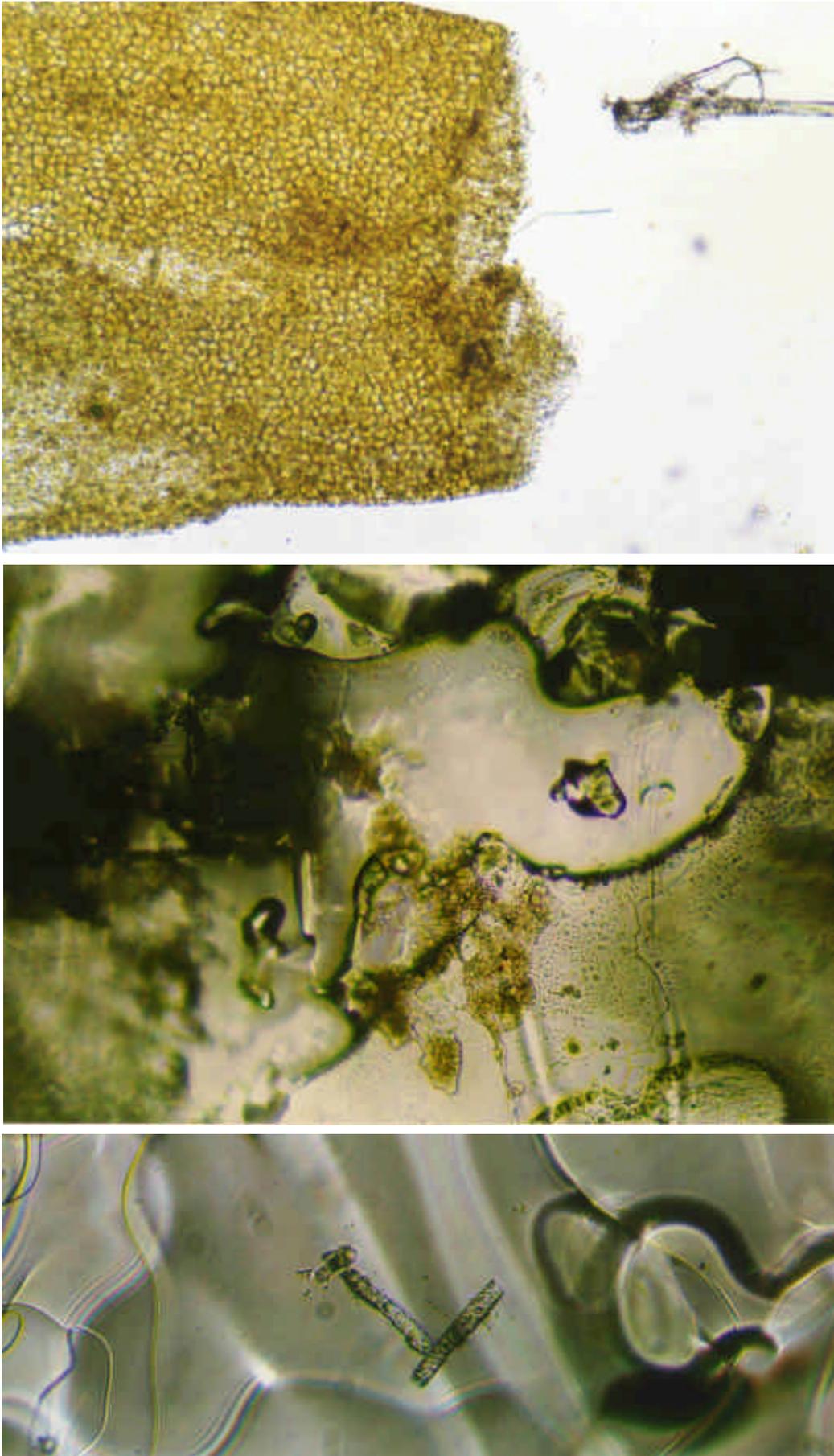


Abb. 4.9: Befall von abgestorbenen Algenresten durch Mikroorganismen

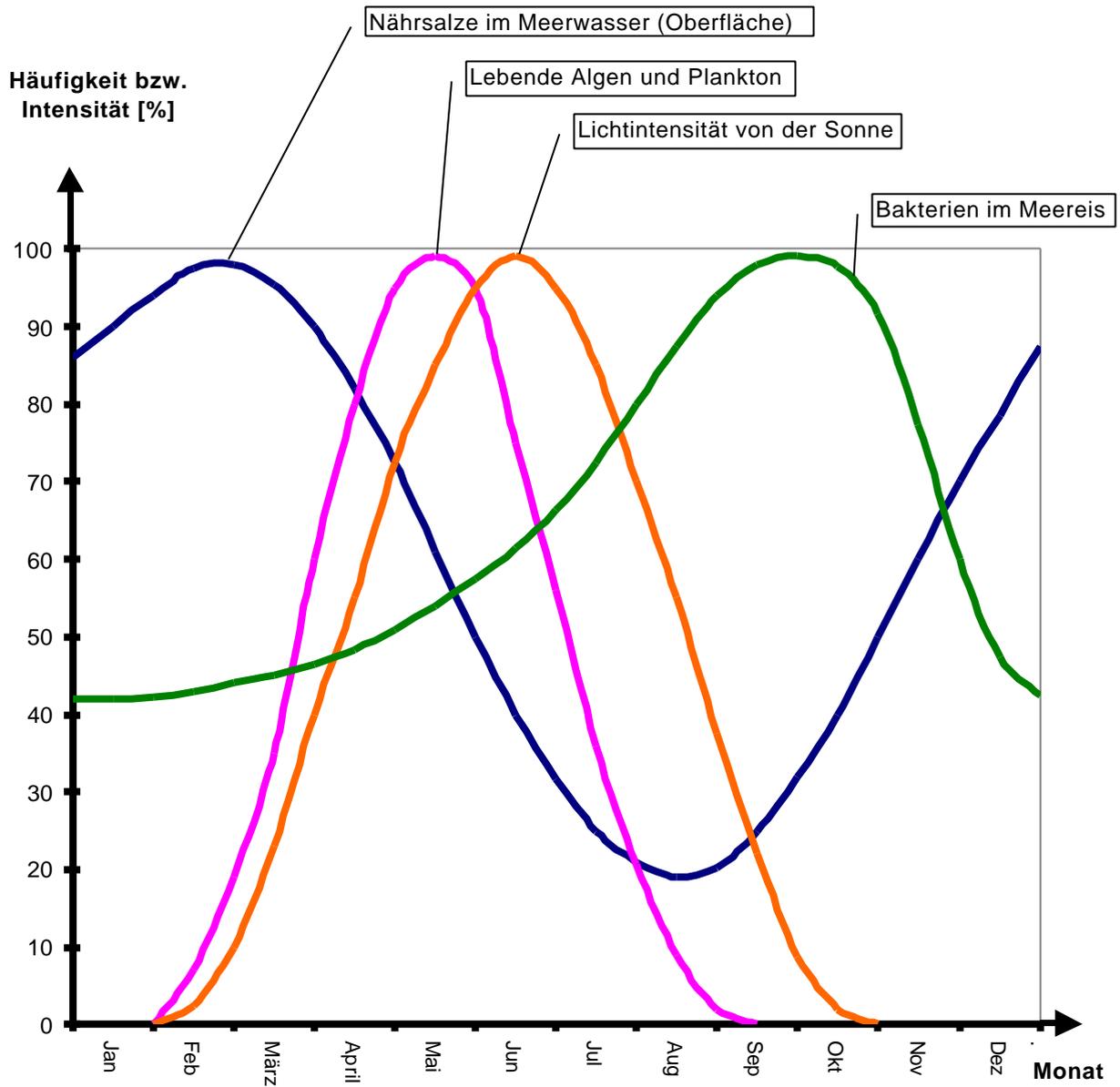


Abb. 4.10: Jahreszeitliche Variation von Lichtintensität und Konzentration von Nährsalzen an der Oberfläche des Meerwassers am Expeditionsort sowie die daraus resultierende Häufigkeit von pflanzlichen Organismen und Bakterien im Meereis

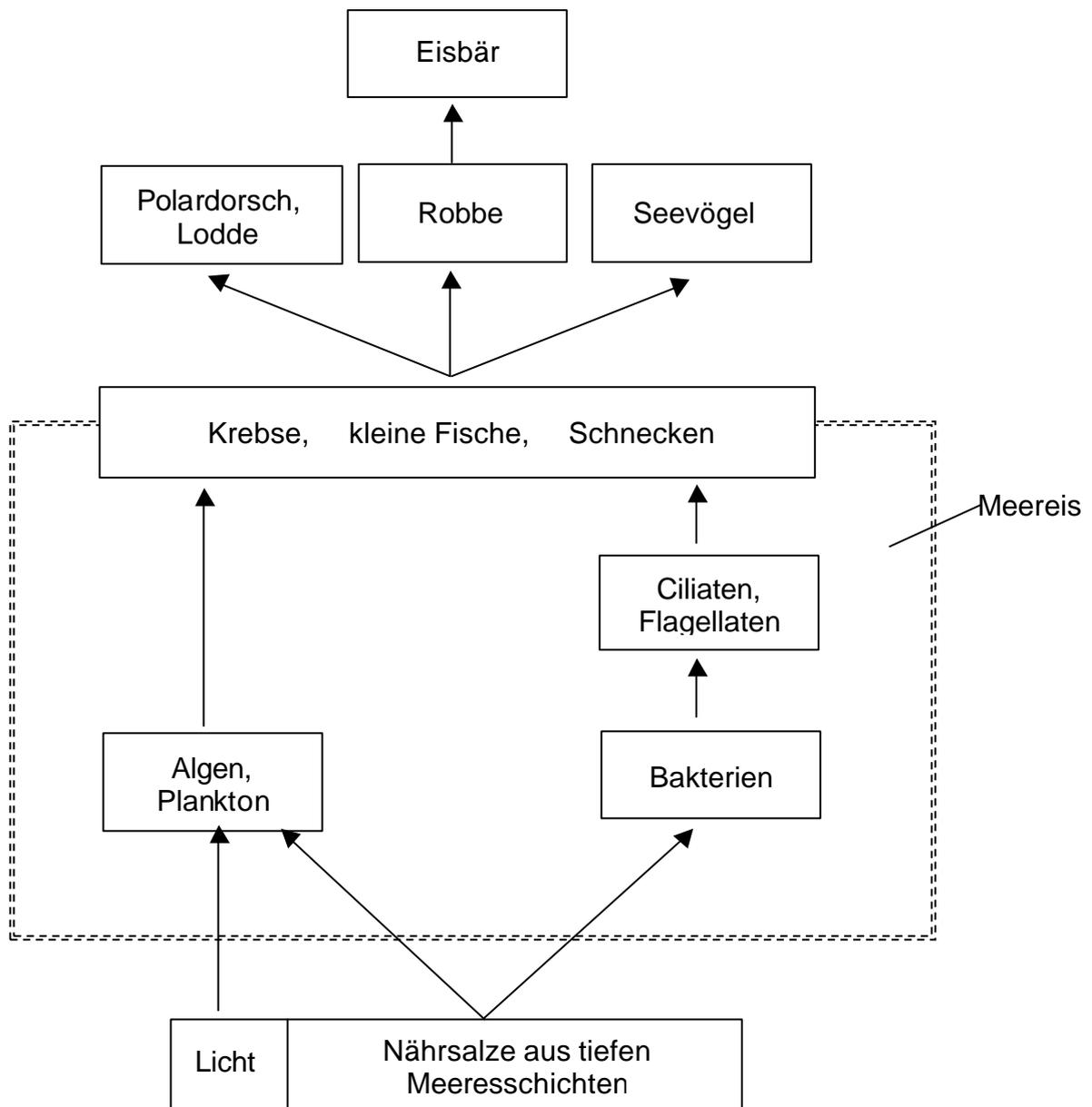


Abb. 4.11: Vereinfacht dargestellte Nahrungskette im Meereis von Spitzbergen

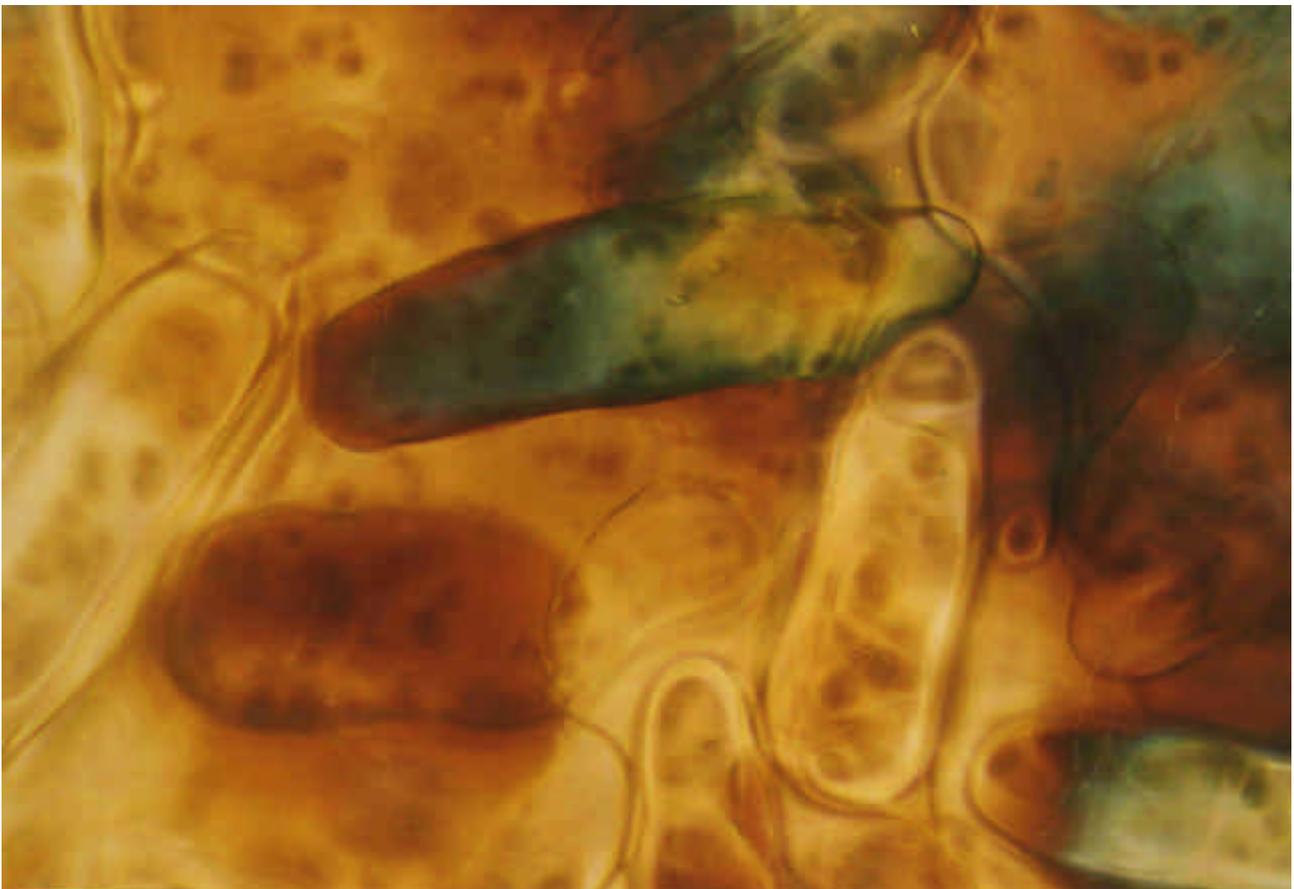
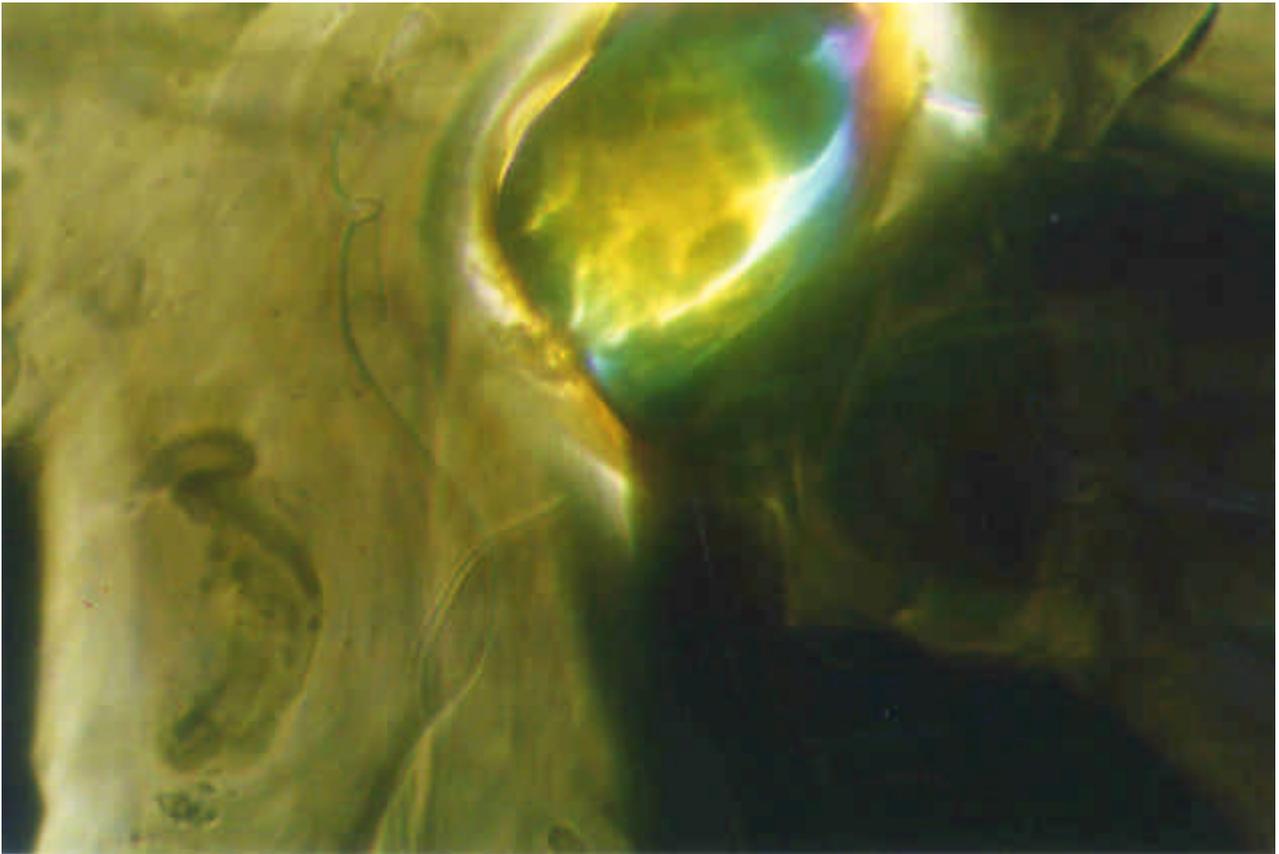


Abb. 4.12: Mikroorganismen im Kanalsystem von Meereis mit vorbeiströmenden Nährstoffen

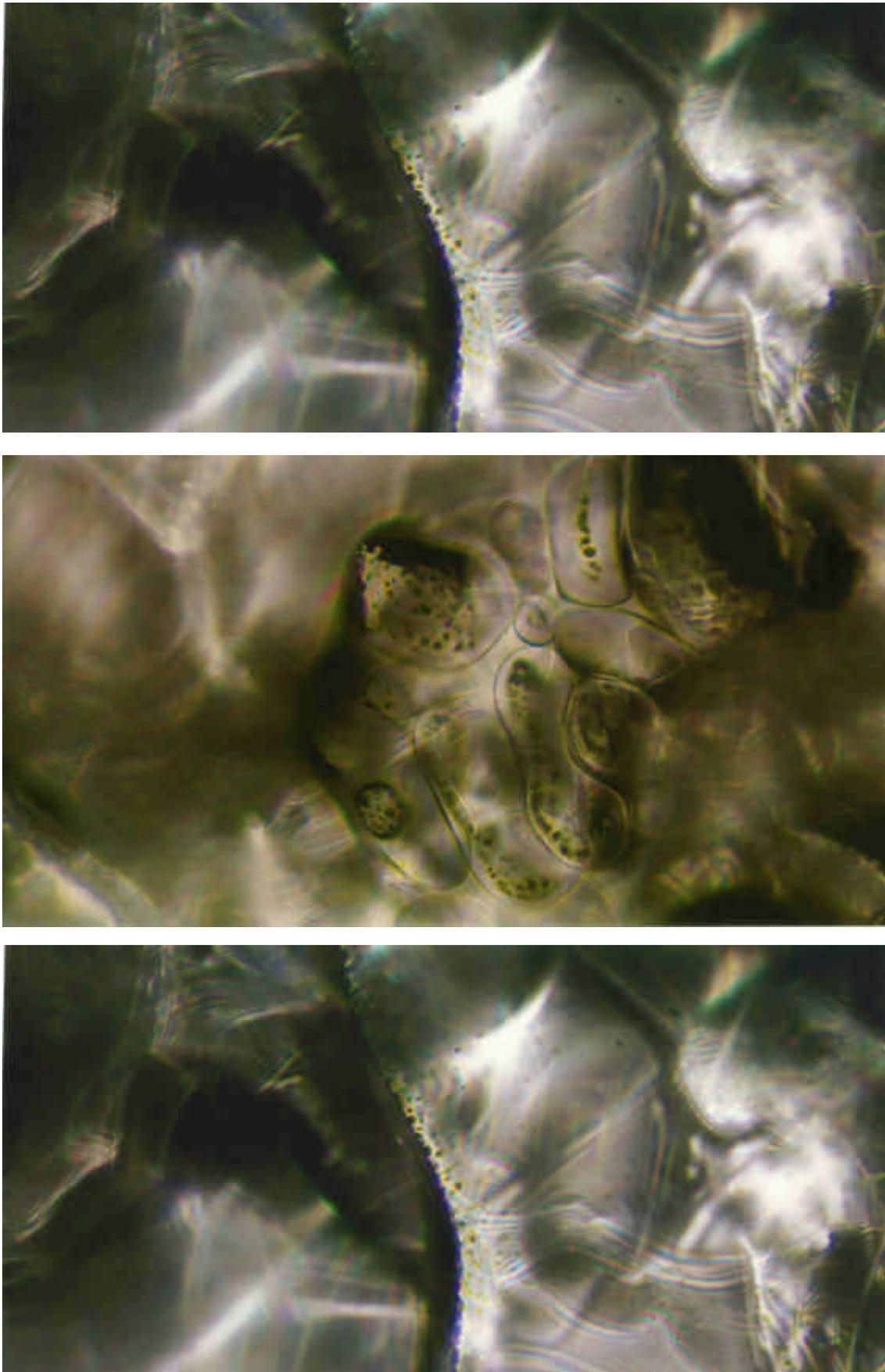


Abb. 4.13: Mikroorganismen siedeln sich bevorzugt an den Rändern und Grenzflächen von festen Eisstrukturen an

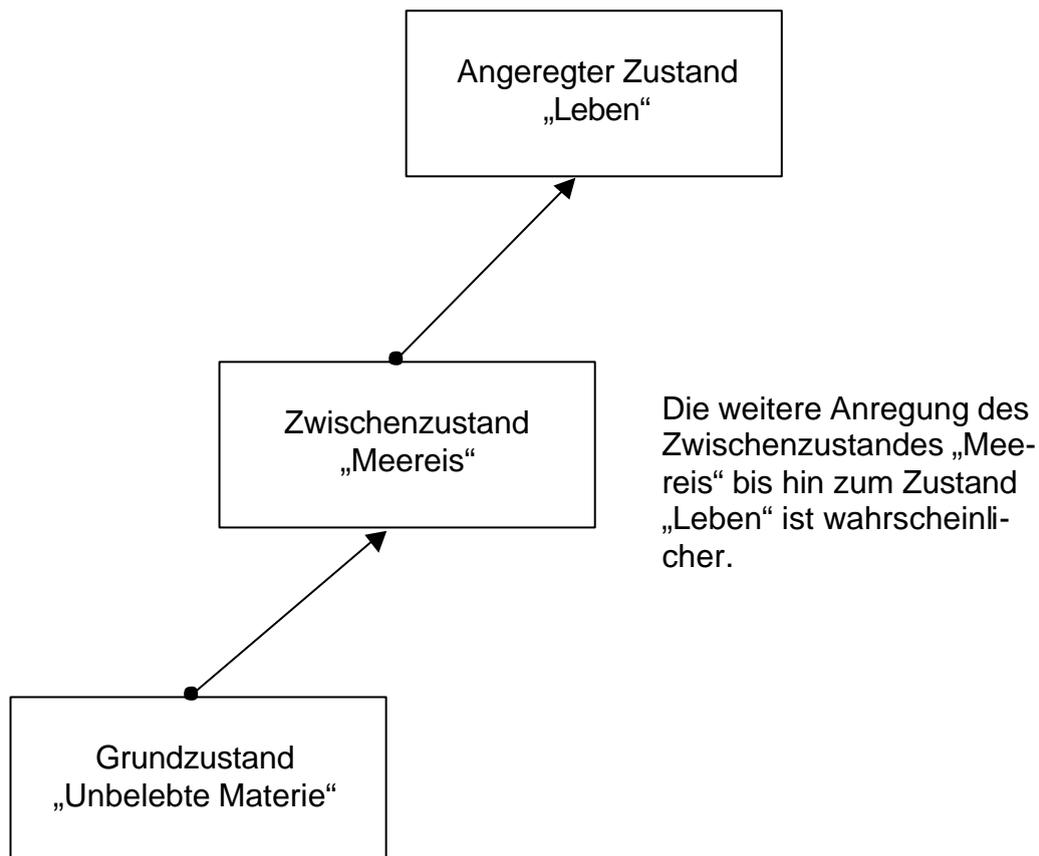
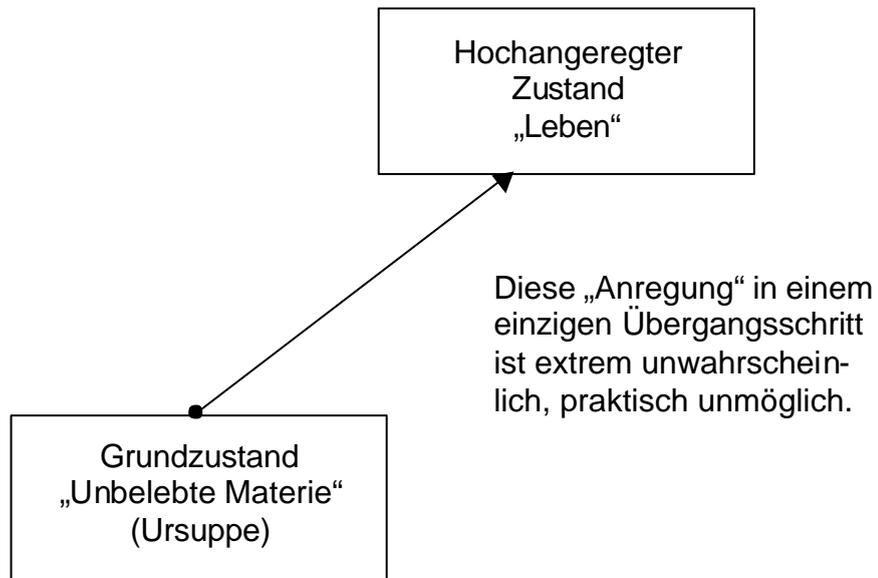


Abb. 5.1: Prinzipielle Darstellung, wie ein sehr unwahrscheinlicher, hochangeregter Zustand (Leben) unter Zuhilfenahme eines Zwischenzustandes (Meereis) schließlich doch erreicht werden könnte

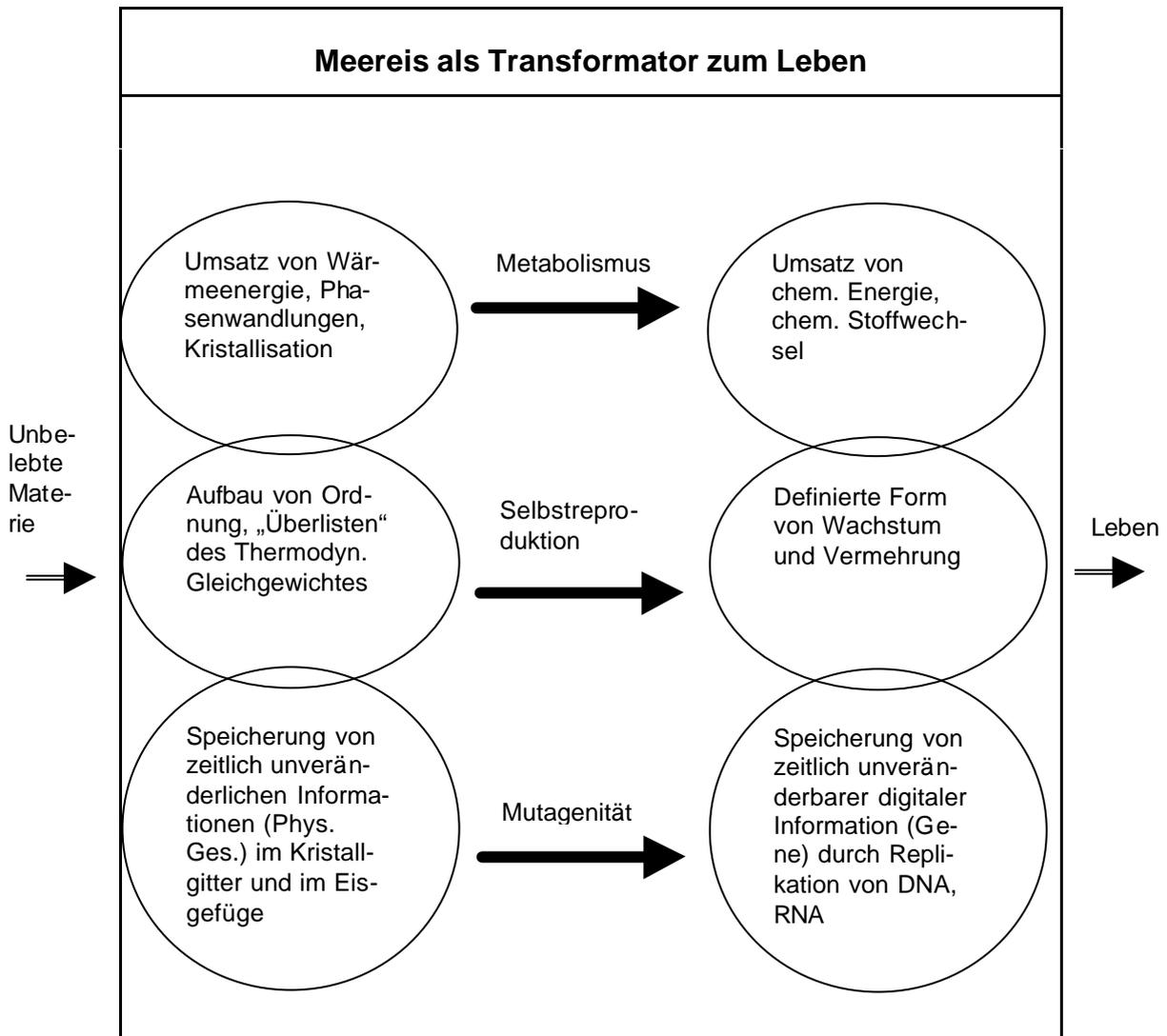
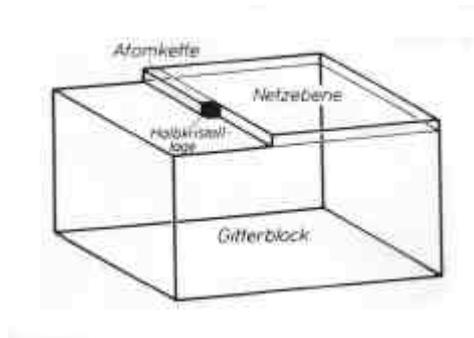
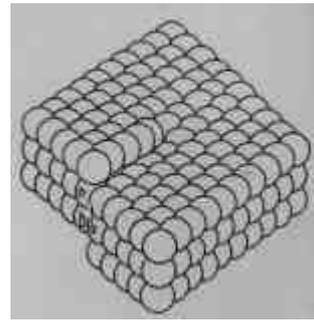


Abb. 5.2: Prinzipielle Darstellung von Meereis als Transformator bei der Entwicklung von Metabolismus, Selbstreproduktion und Mutagenität auf dem Weg zum Leben



Halbkristallage als Ansatzpunkt eines Teilchens, das eine angefangene Teilchenkette weiter wachsen lässt.



Prinzip der Schraubenversetzung in einem kubischen Kristall.



Elektronenmikroskopische Aufnahme einer frisch gewachsenen Kristallfläche (Spiralwachstum). Nach Gahm aus W. Finkelburg.

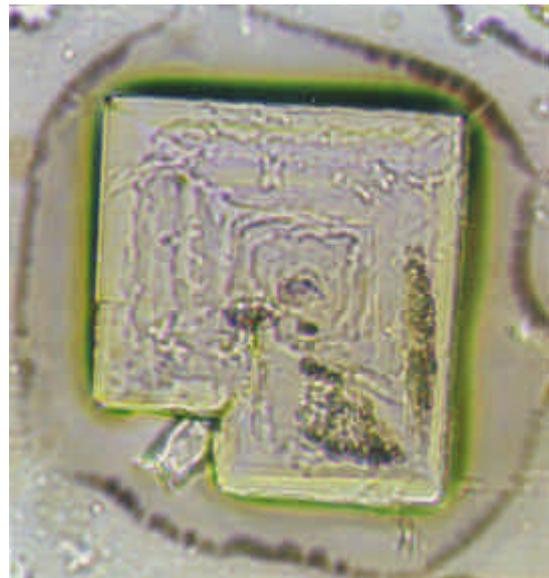
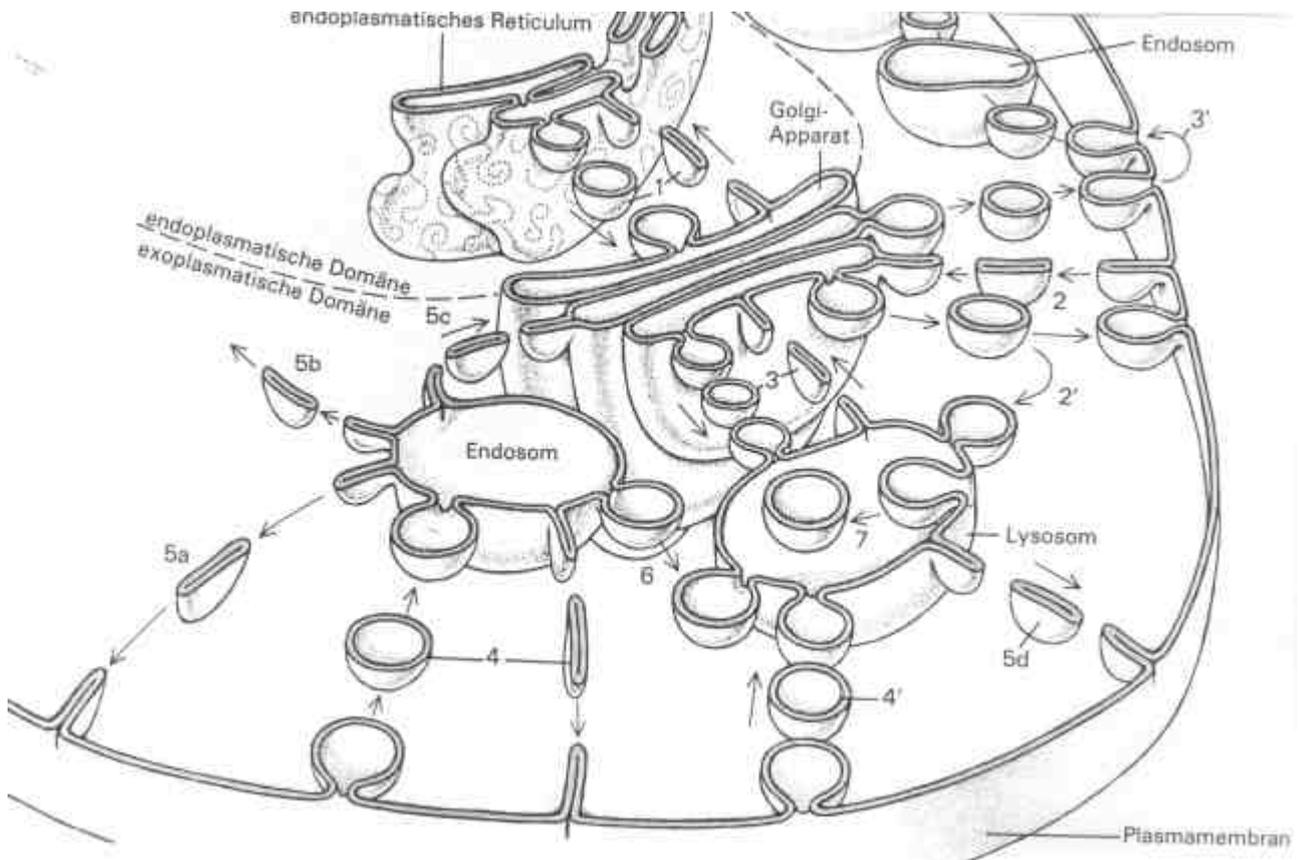


Foto eines im Meereis beobachteten Salzkristalls. Die Oberfläche zeigt regelmäßige Strukturen.

Abb. 5.3: Ausbildung von charakteristischen Strukturen auf der Oberfläche von Kristallen im Meereis, welche die Wirkung von Matrizen haben könnten. Damit könnte die Reproduktion identischer Makromolekülstrukturen erklärbar werden



Zellärer Aufbau mit Golgi-Apparat, Membranen und Endosomen (nach de Duve)

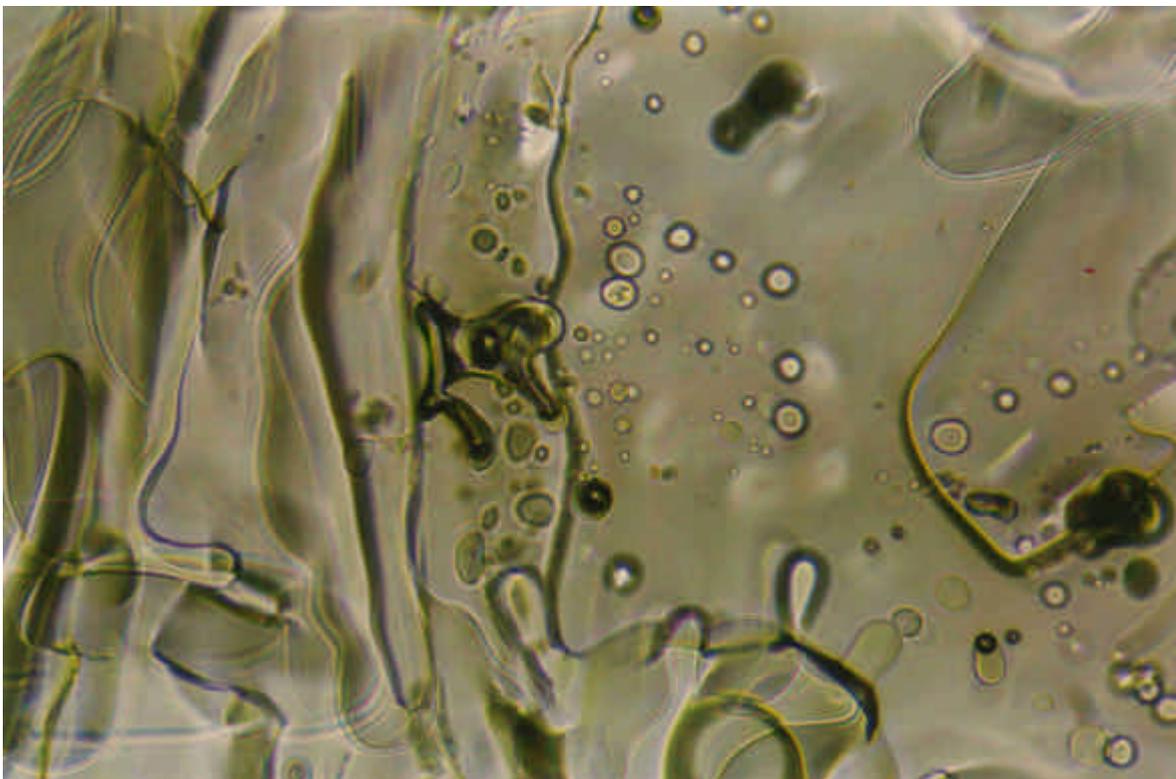


Foto aus dem Inneren von Meereis

Abb. 5.4: Gegenüberstellung des prinzipiellen Aufbaus von Elementen lebender Zellen und dem durch Membranen und Kaviolen geprägten Aussehen von Meereis

Dank

Die Expedition konnte nur mit Hilfe der Unterstützung zahlreicher Institutionen und engagierter Menschen durchgeführt werden.

Dafür danke ich allen sehr herzlich !

Insbesondere möchte ich danken:

| | |
|----------------------------------|--|
| TUHH: | für die Gewährung eines Forschungsfreiraumes sowie für die Ausstattung der Expedition mit wissenschaftlichen Geräten |
| Deutsche Bundesstiftung Umwelt | für die finanzielle Förderung insbesondere bezüglich der Untersuchung von Psychrophilen für deren potentielle industrielle Nutzung |
| Fa. Siemens: | für die finanzielle Förderung der Forschungsarbeiten |
| Fa. Nestlé: | für die Lieferung von Proviant für die Expedition |
| Herrn Laurens Spethmann: | für die herzliche Anteilnahme am Expeditionsverlauf sowie für die großzügige Stiftung von Tee |
| Herrn Paulmann und Herrn Peters: | für die weitblickende und sorgfältige Ausrüstung des Expeditionsschiffes MESUF |
| Governor von Spitzbergen: | für die freundliche Genehmigung zur Durchführung der Expedition sowie für die logistische Unterstützung auf Spitzbergen |
| Herrn Trond Lökke: | für die ständige Hilfe und wertvollen Ratschläge in Spitzbergen |
| Prof. Antranikian: | für die wissenschaftliche Beratung und Unterstützung während der Expedition von Seiten der TUHH |
| Prof. Wolter: | für die engagierte Anteilnahme und die interessanten Ideen während des Expeditionsverlaufs |
| Frau Saskia Kapels: | für die liebevolle Betreuung von der TUHH aus während der Expeditionsdurchführung |
| Dr. Wolfgang Schröder | für die fruchtbaren Diskussion neuer Ideen und die kollegiale Zusammenarbeit bei der Weiterentwicklung des Forschungsprojektes |
| Dr. Michael Otto | für die großzügige Unterstützung bei den Druckkosten für dieses Buch |

