



der Konvention der Vereinten Nationen im Jahre 1992 zum Schutz der biologischen Vielfalt – dem sog. Rio-Abkommen – ist „Biodiversität“ weltweit zu einem Begriff für ein hohes Ziel der Menschheit geworden, das es zu bewahren gilt. Inzwischen ist klar geworden, dass alles, was in einem Ökosystem abläuft, von seinen Organismen bewerkstelligt wird, und die Vielfalt dieser Organismengemeinschaften die Leistungen und die Stabilität der Land- und Meeressysteme bedingt. Viele dieser Leistungen nutzt der Mensch, ohne sie könnte er nicht leben. Von uns oft nicht bemerkt, wirkt die Biodiversität unaufhörlich in unser tägliches Leben hinein.

Das Lesebuch, geschrieben von Wissenschaftlern und Wissenschaftlerinnen der großen deutschen Wissenschaftsorganisationen und herausgegeben von einem renommierten Experten auf dem Gebiet, bringt dem Leser nicht nur die ungeheure Vielfalt des Lebens näher, sondern zeigt auch in einer gut verständlichen Sprache die Prinzipien und die Bedeutung der Biodiversität für das Leben auf der Erde auf. Darüber hinaus widmet sich das Buch dem komplexen und keineswegs immer negativen Zusammenspiel von menschlichen Aktivitäten und Biodiversität, und es diskutiert die verschiedenen Ansätze, um dieses Zusammenspiel zum Nutzen von Natur und Mensch zu verbessern. Das Buch wurde sprachlich und inhaltlich von der bekannten Wissenschaftsjournalistin Claudia von See bearbeitet und ist nicht nur fachlich aktuell, sondern auch ein echter Lesegenuss.



**Erwin Beck,** Jahrgang 1937, ist Emeritus-Professor an der Universität Bayreuth. Mit einer Dissertation in der Pflanzensystematik wurde er 1963 an der Universität München promoviert. Von 1975 bis 2007 war er Inhaber des Lehrstuhls für Pflanzenphysiologie an der Universität Bayreuth. Er verfasste mehr als 200 Publikationen aus verschiedenen Gebieten der Pflanzenwissenschaften, ist langjähriges Kuratoriumsmitglied der Zeitschrift *Biologie in unserer Zeit* und Herausgeber/Mitherausgeber mehrerer Bücher aus den Lebenswissenschaften. Er war Präsident der Deutschen Botanischen Gesellschaft, des Verbands Deutscher Biologen und Vorstandsmitglied der International Union of Biological Sciences.

Er war Mitglied in verschiedenen Gremien der Deutschen Forschungsgemeinschaft und leitet seit 2008 deren Senatskommission für



Erwin Beck (Hrsg.) Die Vielfalt des Lebens



# Die Vielfalt des Lebens

Erwin Beck (Hrsg.)

Wie hoch,  
wie komplex,  
warum?



Zur Vielfalt des Lebens an den Polen:

## Leben im und unter dem Eis

Antje Boetius, Julian Gutt, Elisabeth Helmke, Bettina Meyer

*Das Leben im und unter dem Eis der Polarmeere gibt uns noch immer viele Rätsel auf – wir bezeichnen eisige Lebensräume als „extrem“ und wundern uns über die besonderen Anpassungen von Mikroorganismen, Pflanzen und Tieren sowie einiger menschlicher Kulturen an die gefrorene Umwelt. Die ersten Polarforscher riskierten ihr Leben, um in die eisigen Welten vorzudringen. Mittlerweile scheint eher der Mensch die Natur als die Natur den Menschen zu bedrohen. Das Eis der Polarregionen – besonders der Arktis – schwindet durch die globale Erwärmung wesentlich schneller als vorhergesagt. Die Zukunft der eisbedeckten Lebensräume und ihrer Bewohner ist ungewiss.*

Eisige Lebensräume mit jährlichen Durchschnittstemperaturen unter 0 °C umfassen ungefähr ein Viertel der Landfläche der Erde und ein

◀ Wie ist Leben im und unter dem Eis möglich? Was lebt dort und wie übersteht es die eisigen Temperaturen, die lange Winterdunkelheit und die enormen Schwankungen in der Nahrungverfügbarkeit und den Lebensbedingungen? Was werden wir zukünftig noch unter dem Eis entdecken und wie gehen wir damit um, dass mit dem Abschmelzen des Eises enorme Gas- und Ölvorräte sowie andere Bodenschätze der Erschließung zugänglich werden? Unsere Aufnahme zeigt den deutschen Forschungseisbrecher „Polarstern“ am antarktischen Drescher-Inlet, im Vordergrund Kaiserpinguine (*Aptenodytes forsteri*), die zu den bekanntesten Pinguinarten der Antarktis zählen. Bild: Joachim Plötz, AWI.

Zwanzigstel des Ozeanvolumens. Heute bereisen immer mehr Forscher, Touristen und Abenteuerer die Polarregionen. Sie nutzen Schiffe, Flugzeuge, Hubschrauber, U-Boote und Eisstationen; aber sie staunen nach wie vor über die Fremdheit dieser Umwelt – genauso wie die ersten Polarforscher.

### Arktische und antarktische Lebensräume im Kurzprofil

Die Erde hat zwei Polarregionen – die Arktis um den Nordpol und die Antarktis um den Südpol. Beide umfassen je circa 25 Millionen km<sup>2</sup> Erdoberfläche und eine Vielzahl von Lebensräumen im Meer und an Land, nämlich alle, die nördlich oder südlich der Polarkreise bei 66°N oder S liegen. Arktis und Antarktis sind durch begrenzte Sonneneinstrahlung, extreme atmosphärische Temperaturschwankungen, Winterdunkelheit und permanente Vereisung charakterisiert – und doch sehr verschieden. So sind Eisbären (Abb. 1) die Ikonen des arktischen Ökosystems und Pinguine die der Antarktis. Bis ins 20. Jahrhundert hinein spekulierten Wissenschaftler und Abenteuerer, ob in der Arktis ein unbekannter Kontinent zu finden wäre – heute wissen wir, dass der eurasische und amerikanische Kontinent einen tiefen Ozean umschließen. Auch der antarktische Kontinent wurde erst Anfang des 19. Jahr-



Abb. 1 Eisbär in der hohen Arktis.  
Bild: Mario Hoppmann, AWI; Polar-  
sternexpedition ARK26-3 2011.

hundert entdeckt, in der Hoffnung ein südliches Paradies „Terra australis“ zu finden. Beide Polarregionen bergen besonders unterhalb der permanenten Eisdecke riesige unerforschte Lebensräume, von deren Organismenwelt wir wenig wissen. In der Arktis sind vor allem die eisbedeckten, bis zu 5000 Meter tiefen Becken unbekannt, denn aus ihnen wurden bislang kaum Proben geborgen. In der Antarktis sind es die mit schwimmendem Meeris bedeckten Gebiete, die sich in manchen Bereichen über Hunderte von Kilometern vor dem Kontinent ins Meer erstrecken und in die noch kein Forschungsschiff oder Tauchboot vordringen konnte.

Die Antarktis ist eines der ältesten und größten in sich geschlossenen Ökosysteme der Erde, in dem neben Australien, Neuseeland und Südafrika vermutlich die meisten endemischen Arten beheimatet sind. Sie ist seit gut 25 Millionen Jahren der kälteste, windigste und trockenste Kontinent der Erde, daher war sie vor der Errichtung dauerhafter Forschungsstationen unbewohnt. Heute leben auf diesen Stationen circa 1000 Polarforscher. Der antarktische Kontinent wird vom so genannten Zirkumpolarstrom umkreist. Das Absinken kalter schwerer Wassermassen in die Tiefe bildet das Herz der globalen Ozeanumwälzung, die entscheidend für das Klima und die Wärmeverteilung auf der Erde ist.

Die Erderwärmung wirkt sich in der Antarktis sehr unterschiedlich aus. Einerseits zählt die antarktische Halbinsel zu den sich am schnellsten erwärmenden Regionen auf unserer Erde, andere Gebiete kühlen dagegen ab und gewinnen an Meeris [1]. Der größte menschliche Eingriff in das antarktische Ökosystem war bisher der Walfang des 20. Jahrhunderts. Über 95% der Walbestände wurden in wenigen Jahren vernichtet, bis es durch den Zweiten Weltkrieg zu einem Ende des Walfangs und danach zu seiner Regulierung kam. Doch bis heute sind einige Walarten sehr selten geblieben. Wie das Leben im antarktischen Ozean vor dem Zusammenbruch des Walbestandes aussah, bleibt ein Rätsel. Andere charismatische Tiere der Antarktis sind die Robben (Hunds- und Ohrenrobbe) und die verschiedenen Pinguinarten, beispielsweise die Adelige- und Kaiserpinguine. An Land gibt es ansonsten nur wenige große Tiere, einige Seevögel wie den Königsalbatros, und nur wenige Blütenpflanzen wie die Schmiele, ansonsten Algen, Moose und Flechten. Und dennoch wimmelt es in der Antarktis von unbekanntem Leben. Eine unglaubliche Vielfalt an Kleinstlebewesen bleibt zu entdecken – in den antarktischen Böden, im und unter dem Eis, im Ozean und vor allem am Meeresboden. So fand die Forscherin Angelika Brandt von der Universität Hamburg während des Census of

Marine Life Projektes ANDEEP während weniger Expeditionen 700 neue Arten von wirbellosen Tieren in Wassertiefen von 800 bis 6000 Metern am Meeresboden des Weddell-Meer [2].

Um der Gefahr der Überfischung im Südlichen Ozean entgegenzuwirken, wurde 1982 die Konvention zum Schutz der lebenden Meeresressourcen der Antarktis (CCAMLR) geschlossen. Es ist ein erster vorbeugender Ansatz für eine nachhaltige Fischereiwirtschaft und den Schutz mariner Lebensräume. Zusätzlich gelten die Konvention zur Erhaltung der antarktischen Robben, die Regeln des Wissenschaftlichen Komitees für Antarktisforschung (SCAR) sowie der Internationalen Walfangkommission (IWC). Der Einfluss des sich verändernden Klimas auf die Meeresressourcen muss in zukünftigen Schutzkonzepten berücksichtigt werden. Gerade in der heutigen Zeit stark unterschiedlicher ökologischer und ökonomischer Interessen werden auf der einen Seite immer mehr Schutzgebiete ausgewiesen, auf der anderen Seite gibt es aber auch Initiativen, den Umwelt-, Natur- und Artenschutz in der Antarktis und angrenzenden Meeresgebieten zu lockern. An der Spitze der Fangmengen im Südozean steht seit den 1970er Jahren der Krill – kleine planktische Krebschen vor allem der Art *Euphausia superba*, die als Nahrungsmittel, Fischfutter oder für pharmazeutische Produkte genutzt werden. Dann folgt der Schwarze Seehecht (*Dissostichus eleginoides*) – Schätzungen zufolge lagen die illegalen Fangquoten speziell dieser Fischart in den vergangenen Jahren bis zu zwölfmal höher als die genehmigten, so dass der Bestand durch Überfischung gefährdet sein könnte.

Die Arktis ist seit 40 Millionen Jahren zumindest teilweise eisbedeckt, wie neuere geologische Bohrungen zeigen. Seit der Öffnung der tiefen Framstraße zwischen Grönland und Norwegen vor circa 17 Millionen Jahren bildete sich eine Verbindung zum atlantischen Tiefenwasser mit wichtigen Konsequenzen für Klima, Wärmetransport und Belüftung der Tiefsee. In der Arktis gibt es bisher kaum Schutzgebiete – sie be-

schränken sich auf Inseln wie Nordspitzbergen (zu Norwegen), Franz-Josef-Land (Russland), die Ellesmere-Insel (Kanada) und Nordostgrönland. Einen enormen Fischreichtum an Lachs- und Kabeljauartigen gab es in der sommerlichen Eisrandzone um Alaska, Kanada, Grönland und in der Norwegensee, doch aufgrund des hohen Fischereidruckes in den 1970er Jahren ist der Ertrag überall stark zurückgegangen. Im zentralen Arktischen Ozean spielt Fischerei aufgrund der recht geringen Produktivität bisher keine wesentliche kommerzielle Rolle, doch leben dort seit mindestens 14.000 Jahren Menschen von der Jagd auf Fisch, Robben und andere Meeressäuger – heute sind es über eine Million Menschen, deren Geschichte und Kultur sich auf diese und andere Naturressourcen der Arktis beziehen. Noch bleibt das Land um den Arktischen Ozean herum eine dünn besiedelte Region, die nördlichste Stadt der Welt ist Longyearbyen auf Spitzbergen bei 78°N. Eine kürzlich herausgegebene Studie des International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN) schlägt eine Reihe von Schelfgebieten um Kanada, Alaska, Russland, Norwegen und Grönland herum zur Einrichtung von Schutzgebieten vor. Diese Lebensräume sind kritische Rückzugsgebiete für eine enorme Vielfalt von Vögeln (beispielsweise Eiderenten, Albatrosse, Lumme, Wildgänse), Walrosse, verschiedene Walarten, Robben, Seehunde und Eisbären sowie einige Fische wie den Arktischen Dorsch und die Äsche. Zumindest an den Schelfen drohen Interessenskonflikte durch den Rückgang des Eises, der industrielle Aktivitäten wie Schiffsverkehr, Fischerei, Öl- und Gasexploration begünstigt.

Die unvorhergesehen rasche Erwärmung und der Eistrückgang in der Arktis beschäftigen derzeit viele Forscher. Ein Drittel aller Küsten weltweit liegen im arktischen Permafrost – durch Erosion beim Auftauen der Permafrostböden und Anstieg des Wasserspiegels werden erhöhte Einträge an Sediment, Kohlenstoff und Schadstoffen zu einer schnellen Veränderung der arktischen Küstenmeere führen. Die eisbedeckte

Fläche im Nordpolarmeer variiert jahreszeitlich, ist aber inzwischen auch einer starken klimatischen Abnahme unterworfen. Während Anfang der 1980er Jahre die Eisbedeckung in ihrem Septemberminimum noch 7,5 Millionen km<sup>2</sup> des Nordpolarmeers umfasste, ist sie in den vergangenen Jahren auf fast die Hälfte zurückgegangen [3]. Auch die Meereisdicke hat sich in dieser Zeit von durchschnittlich 4,5 Meter auf weniger als einen Meter verringert. Das Meereis wird von Vögeln und Wirbeltieren als Rast-, Jagd- und Wanderraum genutzt, es ist außerdem wichtig für die Produktivität der Polarmeere. Daher ist eine Änderung der Lebensbedingungen für die arktische Fauna und Flora zu erwarten. Die Zusammenhänge zwischen Eis und Leben sind vielfältig: Veränderungen im arktischen Meereis schlagen sich in der ozeanischen und atmosphärischen Zirkulation nieder, in der Wassertemperatur, im Süßwassergehalt und in biogeochemischen Prozessen.

#### Leben im Eis – von Eisalgen, Meereis-Bakterien und ihren Räubern

Das Meereis ist ein besonderer Lebensraum der Polarregionen, welcher im Winter circa 20 Millionen km<sup>2</sup> des Antarktischen und circa 15 Millionen km<sup>2</sup> des Arktischen Ozeans bedeckt. In den Sommermonaten schmilzt das Meereis in beiden Regionen inzwischen auf einen Rest von rund vier Millionen km<sup>2</sup> weg.

Eisrandzonen, wie zum Beispiel die arktische Bering- und Barentssee, zählen zu den produktivsten Gebieten der Erde mit einem Reichtum an Fischen, Vögeln und Meeressäugern. Im Frühjahr verursacht die Eisschmelze eine stabile Schichtung des Wassers. In der salzarmen, leichten Oberflächenschicht verbleiben die Algen länger im Licht, was je nach Nährstoffverfügbarkeit ein schnelles Wachstum mit sich bringt.

Auch ein großer Teil des Meereises ist erstaunlicherweise dicht besiedelt. Honiggelbe, giftgrüne bis schokoladenbraune Verfärbungen an umgeborenen Schollen (Abb. 2) sind ein eindeuti-

ges Indiz für die Akkumulation von Eisalgen, meist Diatomeen. Diese leben zusammen mit Bakterien und anderen Kleinstlebewesen in flüssigen Salzkanalesystemen und versorgen die Meereislebensgemeinschaft mit Nahrung. In der Grenzschicht zwischen Eis und Wasser sind oftmals zahlreiche Kleinstlebewesen wie beispielsweise Ruderfußkrebse mit dem Eis assoziiert, die wiederum von größeren Lebewesen wie verschiedenen Krebsen, Quallen und Fischen gefressen werden. An der Unterfläche des Eises sind zudem oftmals im Frühjahr Algenteppiche ausgebildet, die abgeweidet werden.

Der Meereis-Lebensraum entsteht, wenn die Temperatur im Meerwasser unter  $-1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  fällt. Es bilden sich zunächst nur reine Süßwasser-Eiskristalle, wodurch die Salzkonzentration des verbleibenden Meerwassers zwischen den Eiskristallen ansteigt. Die Eiskristalle wachsen zu immer größeren Gebilden zusammen und schließen die flüssige Salzlauge (Sole) ein, die sich in

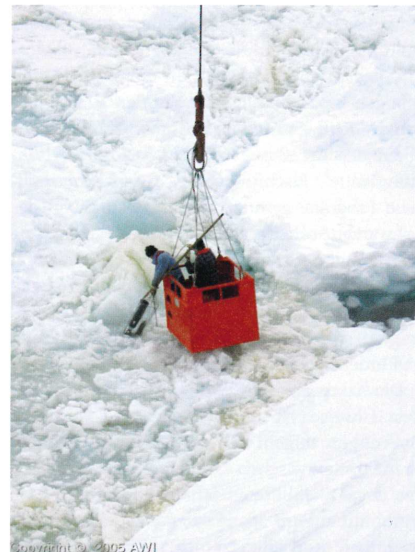


Abb. 2 Probennahme von Meereis und seinen Bewohnern. Bild: AWI.

Kanalsystemen und Taschen sammelt. Der Salzgehalt der Sole ist direkt von der Temperatur abhängig: Er steigt, wenn die Temperatur sinkt und mehr Eis ausfriert. Bei Temperaturen unter  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  liegen die Salinitäten bereits über 15% und können dadurch das Leben in den Solekanälen erschweren. Die Bedingungen im Eis sind nicht überall gleich. Wenn Nährstoffe knapp werden, sammeln sich die Eisalgen am Boden des Meereises direkt über dem Wasser. Doch manchmal findet sich die höchste Produktivität auch im Schnee auf der Oberfläche, in den Schmelztümpeln, oder auch inmitten der Eisschicht, in den Solekanälen (Abb. 3). Eine besondere Herausforderung für Organismen sind die Verhältnisse an der Meereisoberfläche, wo sie den extremen atmosphärischen Bedingungen und der direkten Sonneneinstrahlung mit teilweise hohem UV-Anteil ausgesetzt sind. Im Winter liegen die Temperaturen dabei zeitweise unter  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  und im Sommer kommt es zu ständig wechselnden Auftau- und Gefrierprozessen. Der untere, durch das umgebende Meerwasser isolierte Eiskernbereich bietet konstantere Bedingungen, jedoch liegen die Temperaturen auch hier um  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Die Diatomee (Kieselalge) *Fragilariopsis cylindrus* ist einer der wichtigsten Primärproduzenten im Meereis beider Polarregionen (Abb. 4). Sie wurde zur Alge des Jahres 2011 gewählt, ihre Erbsubstanz ist inzwischen vollständig sequenziert und Untersuchungen zu ihrer besonderen Anpassung an die polare Umwelt laufen auf Hochtouren. Kieselalgen unterscheiden sich von allen anderen Algen durch den Besitz einer Kieselschale. Wo ausreichend Kieselsäure zur Verfügung steht, dominieren die Kieselalgen den Phytoplanktonbestand und bilden wertvolle Nahrung – nicht nur für das Leben unter dem Eis, sondern auch für die Tiefseebewohner, da Diatomeenkümpfen schneller als anderer Algendetritus absinken. Warum manche Kieselalgen in beiden, andere aber nur in einer der Polarregionen vorkommen, ist noch unklar. Neben den großen Diatomeen gibt es auch viele Kleinstalgen – das so genannte Nano- und Piko-

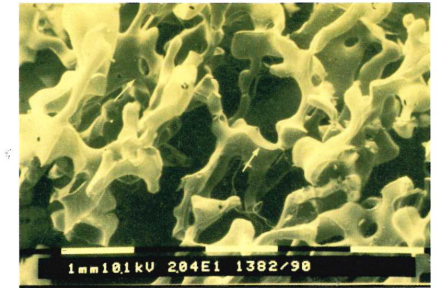


Abb. 3 Solekanäle im Meereis. Bild: Jürgen Weissenberger, AWI.

Phytoplankton von unter 200 oder gar 20  $\mu\text{m}$  Durchmesser. Sie könnten von einer Erwärmung des Meerwassers am stärksten profitieren. Doch auch die Algenfresser im Eis können eine wichtige Rolle spielen: Die häufigsten Vertreter der so genannten Meiofauna im Meereis sind einzellige Wimpertierchen, Foraminiferen, aber auch Bandwürmer, Borstenwürmer, Ruderfußkrebse und Rädertierchen. Die Tiere schwimmen oder kriechen durch die Solekanäle, fressen und vermehren sich dort. Neben Primärproduzenten und ihren Räubern gibt es auch eine er-

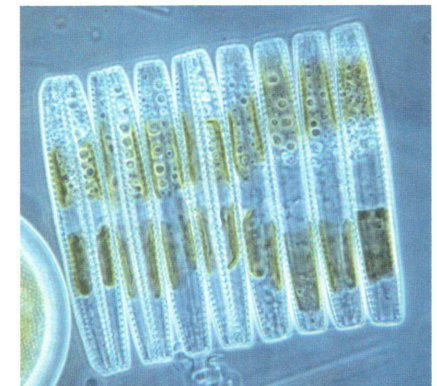


Abb. 4 Die Diatomee *Fragilariopsis cylindrus*. Bild: Dick Crawford, AWI.

staunliche Vielfalt und Biomasse von Bakterien, die das Nahrungsnetz komplettieren (siehe auch „Vielfalt der marinen Mikroorganismen“ auf Seite 49ff.).

Ein Blick ins Mikroskop macht Unterschiede zwischen den Bakteriengemeinschaften im Meereis und jene im umgebenden Wasser deutlich. Nicht nur die Konzentration der Meereis-Bakterien ist in der Regel höher, sondern die Zellen sind auch deutlich größer, zum Teil um das Zehnfache. Sie weisen eine ungewöhnliche morphologische Vielfalt auf – runde, lange, spiralförmige Zellen, Ketten und Klumpen. Charakteristisch für Meereis-Bakterien ist auch ihre Schleimhülle, die vermutlich die Zellen vor Frost und Salzgehaltsschwankungen schützt. Die meisten Meereisbakterien sind sehr eng an die eiskalten Bedingungen angepasst. Man nennt sie psychrophil – kälteliebend – sie wachsen am besten bei Temperaturen unter 5 °C und gehen bei Raumtemperatur zugrunde. Die besondere Anpassung an den Standort und eine gute Kultivierbarkeit machen Meereisorganismen auch für die Biotechnologie interessant. So wurden kürzlich Antifrost-Proteine einer Eisalge isoliert und charakterisiert, die vielleicht in der Lebensmittelindustrie eingesetzt werden können, um Tiefkühlware vor Gefrierbrand zu schützen [4].

Viele antarktische Meereis-Bakterien sind auch im arktischen Eis zu finden, es bleibt jedoch rätselhaft, wie diese wärmeempfindlichen Bakterienarten den Äquator überqueren konnten. Die arktische Meereisflora ist deutlich diverser als die antarktische, was vermutlich mit dem starken terrestrischen Eintrag im arktischen Ozean zusammenhängt – viele Eisschollen bilden sich an den weiten flachen Schelfküsten der Arktis und werden dann auf den offenen Ozean heraustransportiert. Zudem gibt es im arktischen Meereis im Sommer viele Süßwasser-Schmelztümpel, die für sich genommen ein besonderes Habitat darstellen. Dort leben wie in Seen und Flüssen vor allem Beta-Proteobakterien und grampositive Bakterien, die zu den Actinomyceten gehören. In den Salzkanaälchen leben dagegen vor allem Alpha-

und Gamma-Proteobakterien [5]. Das Meereis ist also kein einheitlicher Standort, es umfasst viele unterschiedliche Habitate, die verschieden besiedelt werden. Das Meereis, die Schmelztümpel und Schneeeauflagen sowie die Untereis-Algenmatten enthalten hochproduktive Lebensgemeinschaften. Daher wird befürchtet, dass der Verlust des mehrjährigen Meereises zu einem verminderten Nahrungseintrag in den tiefen Arktischen Ozean führt.

#### Leben vom Eis – Schlüsselorganismus Krill

Der die Antarktis umgebende Südozean ist eine der größten Kohlenstoff-Senken der Erde. Im kalten Meerwasser lösen sich große Mengen des Treibhausgases Kohlenstoffdioxid, welches von den einzelligen Algen zur Photosynthese genutzt wird. Durch das reichhaltige Angebot an Nährstoffen wie Nitrat, Phosphat und Silikat in bestimmten Regionen des Südozeans kommt es zu enormen Diatomeenblüten, die von November bis März anhalten, bis sie durch andere Nährstoffe oder Licht limitiert werden. Ein Teil der Algen sinkt in die Tiefe ab, wodurch der in den Algenzellen gebundene Kohlenstoff für einige Zeit dem atmosphärischen Kreislauf entzogen wird. Produktivität und Effektivität dieser so genannten biologischen Kohlenstoffpumpe im Südozean werden vor allem vom Spurenelement Eisen kontrolliert, das nur in geringen Konzentrationen im offenen Antarktischen Ozean vorhanden ist (siehe hierzu auch den Beitrag „Vielfalt der marinen Mikroorganismen“ auf Seite 49).

Das Nahrungsnetz im Wasserkörper des Südozeans ist gegenüber früheren Vorstellungen keine lineare Nahrungskette (Diatomeen-Krill-Wale), sondern ein wesentlich komplexeres System, in dem die einzelnen trophischen Ebenen eng miteinander vernetzt sind. Der Antarktische Krill (Abb. 5) nimmt in diesem System dennoch eine Schlüsselstellung ein: Durch seinen hohen Fraßdruck auf die Diatomeenblüten und die Bildung von schnell sinkenden Kotschnüren trägt er signifikant zum vertikalen Kohlenstofftrans-



Abb. 5 Krill – der Antarktische Leuchtkrebs *Euphausia superba*.  
Bild: Joachim Plötz, AWI.

port in die Tiefe bei. Er bildet die wichtigste Ernährungsgrundlage für Wale, Robben, Pinguine und andere Meeresvögel und viele Fische der Antarktis. Sein Bestand liegt im Südpolarmeer bei 500 Millionen Tonnen. Zum Vergleich: die weltweit jährlich gefangene Menge an Fisch und Schalentieren liegt unter 100 Millionen Tonnen.

Die historische Datenreihe zeigt jedoch einen alarmierenden Rückgang der Krill-Biomasse seit den 1970er Jahren, dessen Ursache derzeit untersucht wird. Der Krillfischerei wird bisher kein Einfluss auf den Bestand zugeschrieben. Sie nimmt weiter zu und erzielt hohe Erträge, bleibt aber mit einer jährlichen Fangmenge von derzeit circa 200.000 Tonnen noch weit unter der erlaubten Fangmenge von vier Millionen Tonnen. Aufgrund einiger interessanter Inhaltsstoffe hat auch die Pharmazie den Krill entdeckt. Der zunehmende Bau neuer Krillfangschiffe verdeutlicht diesen Trend. Die klimatischen Veränderungen im nordwestlichen Bereich der antarktischen Halbinsel und die damit einhergehende abnehmende Meereisbedeckung erhöhen zukünftig den Fischereidruck auf den Krill. Notwendig ist daher ein nachhaltiges Fischereimanagement, welches den Einfluss des sich verändernden Klimas auf die Ökosysteme des Südozeans berücksichtigt.

Im westatlantischen Sektor des Südozeans sind 50–70% des Krillbestandes sowie die höchste Dichte an Krillräubern beheimatet. Die Abnahme der Populationsdichte des Krills in diesem Gebiet wird derzeit vor allem mit der sich verändernden Meereisbedeckung erklärt. Wäh-

rend in den 1970er Jahren die Meereisbildung im März einsetzte, erfolgt sie heute im April/Mai oder später, was eine verkürzte winterliche Meereisbedeckung zur Folge hat. Die Abhängigkeit des Krills vom Meereis ist noch weitgehend ungeklärt. Während die winterliche Meereisbedeckung und die daran geknüpfte Lebensgemeinschaft für die Larven eine große Rolle spielt, scheint sie für die adulten Tiere weniger wichtig zu sein [6]. Hingegen scheint das Ausmaß der Algenblüten im Frühjahr einen erheblichen Einfluss auf den Reproduktionserfolg der erwachsenen Tiere zu haben. Es wird angenommen, dass für den Krill nicht mehr ausreichend Phytoplankton zur Verfügung steht, um eine optimale Fortpflanzungsaktivität zu gewährleisten. Insgesamt sind die Anpassungsmechanismen des Krills bisher nur wenig bekannt. Aufgrund seiner zentralen Stellung im marinen antarktischen Nahrungsnetz ist es jedoch wichtig zu verstehen, wie sich die komplexen Auswirkungen der klimatisch bedingten Umweltveränderungen auf alle Lebensphasen dieses Schlüsselorganismus auswirken [7].

Der abnehmende Krillbestand wird von einer Zunahme wärmetoleranter Salpen (*Salpa thompsoni*) begleitet [8]. Salpen gehören zu der global verbreiteten Gruppe der freischwimmenden Manteltiere, welche sich durch hohe Fraß- und Wachstumsraten auszeichnen. Im Sommer können die Salpen zudem den Bestand an Krilllarven dezimieren. Eine ansteigende Salpenhäufigkeit kann deshalb den Krillbestand gefährden.

Die Auswirkung des Krillrückgangs auf die biologische Vielfalt zeigt sich auch bei den Adelige-Pinguinen, die ausschließlich vom Krill leben. So ging die Verringerung des Krillbestandes mit einem Rückgang im Bruterfolg und dem Bestand der Pinguine einher. Auswirkungen auf das ganze Ökosystem von der Meeresoberfläche bis in die Tiefsee sind zu erwarten.

#### Leben unterm Eis – Vielfalt des antarktischen Meeresbodens

Die Tierwelt des antarktischen Meeresbodens ist enorm zahl- und artenreich – besonders in Schelfgebieten mit saisonalem Meereis. Frühe Untersuchungen der Bodenfauna machten den Gigantismus verschiedener Arten, ihre Langlebigkeit und den hohen Grad nur dort vorkommender (endemischer) Arten bekannt. An einzelnen Stellen werden über 100 Kilogramm Biomasse pro Quadratmeter erreicht – in Form von riesigen Schwämmen, die eine reiche Begleitfauna anziehen (Abb. 6). Bildgebende Untersuchungstechniken wie der Einsatz geschleppter Kameras und Unterwasserroboter ermöglichten jedoch die erstaunliche Beobachtung, dass zwischen den dichten, bunten Ansammlungen meeresgrundbewohnender Tiere und wüstenartigen

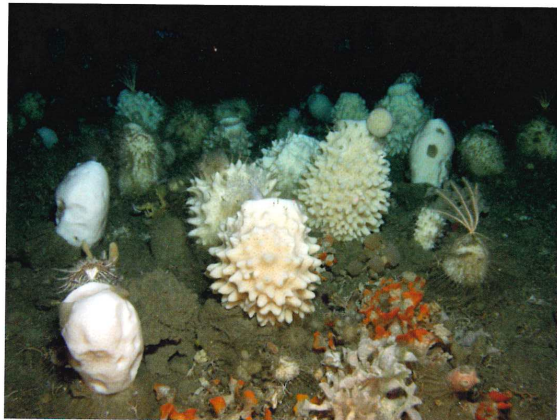


Abb. 6 Schwammgärten der Antarktis. Bild: Julian Gutt, Werner Dimmler, AWI/Marum, Universität Bremen.

Flächen fast ohne Lebensspuren oft nur wenige Kilometer liegen [9].

Wo das bis zu mehrere hundert Meter mächtige Schelfeis wie ein riesiger Deckel auf dem Wasser schwimmt, gibt es wegen Lichtmangel kaum Photosynthese und Nahrung für Tiere kann nur in minimalen Mengen horizontal herantransportiert werden. In diesen Nahrungswüsten wurden entsprechend niedrige Stoffwechselraten gemessen. Bei den seltenen größeren Tieren, die dort gefunden werden, handelt es sich schon bei ungefähr 150 Meter Wassertiefe um Tiefseetiere, die sonst nur zwischen 1000 und 8000 Meter vorkommen [10]. Viele Tiergruppen scheinen außerdem unter dem dicken Schelfeis völlig zu fehlen.

Solche fleckenhaften Besiedlungsmuster gibt es am antarktischen Meeresboden aber auch noch kleinräumiger. Im Schelfbereich kommt es vor, dass riesige Eisberge den Meeresboden in bis zu 400 Meter Wassertiefe durchpflügen (Abb. 7). Dabei wird entlang des Weges der Eisberge die gesamte Fauna vertrieben oder vernichtet – es entstehen kurzfristig tote Zonen am Meeresboden. Ein erstes Wiederbesiedlungsstadium ist dann zunächst durch eine niedrige Organismenvielfalt gekennzeichnet, denn nur einige wenige Pionierarten vermehren sich explo-

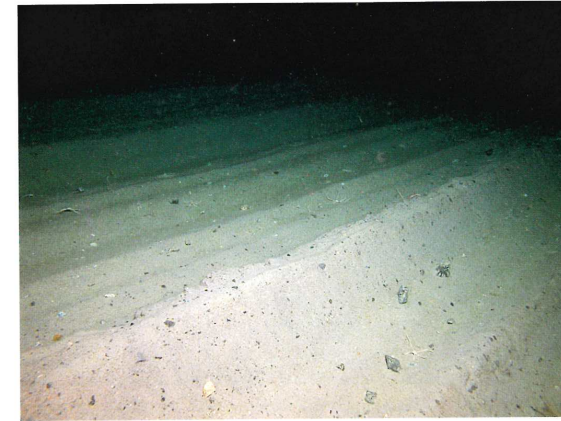


Abb. 7 Schleifspuren von Eisbergen am Meeresboden. Bild: Julian Gutt, Werner Dimmler, AWI/Marum, Universität Bremen.

sionsartig. Hat sich irgendwo erst einmal eine Gruppe von Schwämmen angesiedelt, beherbergen diese als so genannte Ökosystemingenieure viele andere Tiergruppen, beispielsweise Stachelhäuter, Krebstiere und Fische.

Für die Simulation solch chaotischer, zufälliger Störungen auf unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen werden Computermodelle entwickelt, die langfristige Sukzessionen im Zeitraffer simulieren, denn auf den realen Zeitskalen ist keine Beobachtung möglich. Die meisten antarktischen Meeresbodenbewohner wachsen sehr langsam und integrieren damit auch Störungen und Veränderungen über ebenso lange Zeiträume – ihre Zusammensetzung und Biomasseverteilung ist also ein Archiv für Energieverfügbarkeit, Störung und Stabilität über Jahrzehnte bis Jahrhunderte.

Das soeben abgeschlossene internationale Großprojekt „Census of Antarctic Marine Life“ hat sich daher nicht nur mit der aktuellen Zählung des Lebens im Südozean beschäftigt, sondern auch mit der Rolle historischer Ereignisse und der Evolution von Ökosystemen. Seit dem Überfrieren der Antarktis vor über 34 Millionen Jahren hat es immer wieder einen Austausch von

Tieren zwischen dem eiskalten Wasser rund um den antarktischen Kontinent und den weiter äquatorwärts gelegenen deutlich wärmeren Gewässern gegeben [11]. Arten, die eigentlich nur nördlich oder südlich dieser Wassermassengrenze vorkommen, können mit ozeanischen Wirbeln oder großräumiger Meereszirkulation am Tiefseeboden durchaus diese Grenze passieren. Die traditionelle Sichtweise, dass die Antarktis und der sie umgebende Südozean ein isoliertes System darstellen, wurde aufgrund neuer Entdeckungen wie zum Beispiel der Einschleppung der nordatlantischen Spinnenkrabbe *Hyas araneus* sowie durch das Auftreten von Steinkrabben in Frage gestellt. Der starke Temperaturabfall südlich der Polarfront verhinderte bisher, dass sich Eindringlinge nach Überquerung des antarktischen Zirkumpolarstroms etablieren konnten. Die regionale Erwärmung an der Antarktischen Halbinsel innerhalb der vergangenen 50 Jahre könnte jedoch erhebliche Konsequenzen für die charakteristische Biodiversität des antarktischen Lebensraums mit sich bringen. Zur Ausbreitung einwandernder Arten, die die vorhandenen Lebensgemeinschaften verändern oder gar zerstören könnten, gibt es aufgrund fehlender

Langzeitbeobachtungen kaum Daten. Es wird vermutet, dass solche Prozesse jetzt schon unbeobachtet ablaufen.

#### Leben mit Eis – Langzeitbeobachtungen in der Arktis

Die Arktis ist eines der Gebiete der Erde, bei denen die globale Erwärmung zu starken regionalen Veränderungen der Oberfläche führt, wie die drastische Abnahme der Eisbedeckung zeigt. So ist die Erwärmung der arktischen Atmosphäre in den vergangenen Jahrzehnten doppelt so schnell wie im globalen Durchschnitt vorangeschritten. Die Folgen für die arktische Biodiversität vom Schelf bis zur Tiefsee können kaum abgeschätzt werden, weil die Zusammensetzung und Verteilung insbesondere der funktionell wichtigen Kleinstlebewesen im Eis, Plankton und Benthos noch weitgehend unbekannt sind. Für den Arktischen Ozean arbeitete ein Projekt des Census of Marine Life mit Hochdruck an einer Datenbank ([www.arcodiv.org](http://www.arcodiv.org)) zur Verteilung von marinen Arten einschließlich der Vögel, anhand derer zukünftige Veränderungen der Lebensgemeinschaften im Eis, Ozean und am Meeresboden erkannt werden können.

Der Wassermassenaustausch zwischen dem Atlantik und dem Arktischen Ozean über die Framstraße und zum Pazifik über die Beringstraße beeinflusst das marine Ökosystem stark, beispielsweise die Larvenverbreitung und das Überleben fremder Arten in der Polarregion. Der Einfluss auf die Entwicklung der Primärproduktion ist unbekannt, denn der höheren Lichtverfügbarkeit durch den Eisrückgang steht vermutlich eine niedrigere Nährstoffverfügbarkeit durch zunehmende Schichtung in der Meeresoberfläche gegenüber.

Aufgrund der starken Kopplung zwischen dem Wasserkörper und dem Meeresboden (dem Benthos) im Arktischen Ozean können große Ökosystemverschiebungen am Meeresgrund erwartet werden [12]. Derzeit analysieren Forscher des Alfred-Wegener-Instituts für Polar- und Mee-

resforschung und des Max-Planck-Instituts für Marine Mikrobiologie mit verschiedenen molekularen Markern tiefgefrorene Archivproben, um mikrobielle Lebensgemeinschaften der vergangenen 20 Jahre mit den heutigen zu vergleichen [13].

Ganzjährige Untersuchungen des Arktischen Ozeans werden dabei noch immer durch das winterliche bis ganzjährige Meereis und widrige Witterungsbedingungen stark beeinträchtigt, da diese den Zugang mit Forschungsschiffen für den größten Teil des Jahres einschränken. Die natürliche Variabilität der Umwelt und die saisonale Entwicklung und Interaktion verschiedener Lebensstadien, beispielsweise des Planktons und der im Wasserkörper schwimmenden Tiere, sind kaum erforscht. Daher sind permanente, langfristige Beobachtungen zu Änderungen der Umweltparameter – wie zum Beispiel Veränderungen von Eisdicke, Frischwassereintrag, Erwärmung und Schichtung der Deckschicht, Nährstofftransport und Lichtverfügbarkeit – wichtig für das Erkennen der Folgen des Klimawandels im Ozean. Zeitreihen können derzeit nur durch Schiffsmessungen oder aber die Ausbringung von ein- bis zweijährigen, autonomen, verankerten oder driftenden Instrumenten- und Sensorplattformen gewonnen werden (Abb. 8). Im Jahr 1999 wurde ein ökologisches Tiefsee-Langzeit-Observatorium eingerichtet, das Observatorium HAUSGARTEN. Dieses besteht aus 17 Stationen, die in Wassertiefen von 1000 bis 5500 Metern in einem Gebiet von 40 × 80 nautischen Meilen westlich von Spitzbergen (Norwegen) installiert wurden. Dort werden jährlich im Sommer Proben genommen und biologische Kurz- und Langzeit-Experimente durchgeführt. In regelmäßigen Abständen werden mit Hilfe eines ferngesteuerten, für den Tiefseeinsatz konzipierten Unterwasserfahrzeugs (Remotely Operated Vehicle) gezielt Proben genommen und Experimente ausgebracht.

Eine technische Herausforderung sind ganzjährige Beobachtungen der Wasseroberfläche:



Abb. 8 Autonome Unterwasserroboter des AWI nach dem Einsatz unternommen. Bild: Marianne Jacob, AWI.

Durch den Eisgang sind bisher Dauermessungen in den produktiven oberen 20 Metern der Wasserschicht technisch und logistisch unmöglich. Dabei ist besonders die Frage nach den Konsequenzen der Erwärmung und abnehmenden Eisbedeckung für die Produktivität und Biodiversität der arktischen Ökosysteme sehr wichtig. Vor diesem Hintergrund arbeiten Wissenschaftler mehrerer Nationen an einem Konzept für das Ozean-Beobachtungssystem FRAM (Frontiers in Arctic Monitoring). Wenigstens an einem Standort in der Arktis könnten durch die Integration neuer Sensor-Technologien mit Satellitenkommunikation oder mit einem Tiefseekabel kontinuierliche physikalische, biogeochemische und biologische Messungen bereitgestellt und direkt per Internet übertragen werden.

#### Fazit

Die Veränderungen der Lebensvielfalt durch Klimawandel und menschliche Eingriffe rücken die Polargebiete zunehmend in den Fokus von wissenschaftlicher und öffentlicher Aufmerksamkeit. Der Rückgang des arktischen Meereises ist ein Vorgang, der mit noch größerer Geschwindigkeit voranschreitet, als durch Klimamodelle

vorhergesagt wurde. Tiere, Pflanzen und Mikroorganismen haben sich über viele Millionen Jahre an die von Kälte, Eis und starker Saisonalität geprägten extremen Umweltbedingungen der Polargebiete angepasst. Ihre besonderen physiologischen und biologischen Merkmale machen sie außerordentlich empfindlich gegenüber schnellen Veränderungen ihres Lebensraumes. Die Verdrängung einheimischer Arten durch Einwanderer und Verschiebungen in Nahrungsnetzen gehören zu den ersten Konsequenzen dieser Veränderungen. Erwärmung, Eisrückgang und eine verstärkte menschliche Nutzung der Polarregionen könnten daher die Biodiversität, Funktion und Dienstleistungen (beispielsweise die Bindung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre der betroffenen Ökosysteme stark beeinflussen. Die Auswirkungen dieser Veränderungen auf die polaren Ökosysteme sind bisher kaum abschätzbar. Sie zu verstehen, stellt eine enorme Herausforderung für die Wissenschaft dar.

## Literatur

- [1] Steig, E.J., Schneider, D.P., Rutherford, S.D., Mann, M.E., Comiso, J.C., Shindell, D.T. (2009) Warming of the Antarctic icesheet surface since the 1957 International Geophysical Year. *Nature*, **457**, 459–462.
- [2] Brandt, A., Gooday, A.J., Brandão, S.N., Brix, S., Brökeland, W., Cedhagen, T., Choudhury, M., Cornelius, N., Danis, B., De Mesel, I. et al. (2007) First insights into the biodiversity and biogeography of the Southern Ocean deep sea. *Nature*, **447**, 307–311.
- [3] Screen, J. A., Simmonds, I. (2010) The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *Nature*, **464**, 1334–1337.
- [4] Bayer-Giraldi, M., Weikusat, I., Besir, H., Dieckmann, G. (2011) Characterization of an antifreeze protein from the polar diatom *Fragilariopsis cylindrus* and its relevance in sea ice. *Cryobiology*, **63**, 210–219.
- [5] Brinkmeyer, R., Knittel, K., Jurgens, J., Weyland, H., Amann, R., Helmke, E. (2003) Diversity and structure of bacterial communities, in: Arctic versus Antarctic pack ice: A comparison. *Applied and Environmental Microbiology*, **69**, 6610–6619.
- [6] Meyer, B. (2012) The overwintering of Antarctic krill, *Euphausia superba* from an ecophysiological point of view – A review. *Polar Biol*, **35**, 15–37.
- [7] Meyer, B., Auerswald, L., Siegel, V., Spahic, S., Pape, C., Fach, B.A., Teschke, M., Lopata, A.L., Fuentes, V. (2010) Seasonal variation in body composition, metabolic activity, feeding, and growth of adult krill *Euphausia superba* in the Lazarev Sea. *Marine Ecology Progress Series*, **398**, 1–18.
- [8] Atkinson, A., Siegel, V., Pakhomov, E., Rothery, P. (2004) Long-term decline in krill stock and 721 increase in salps within the Southern Ocean. *Nature*, **432**, 100–103.
- [9] Brandt, A., Gutt, J. (2011) Biodiversity of a unique environment: the Southern Ocean benthos shaped and threatened by climate change, in: *Biodiversity Hotspots* (eds. Zachos, F.E., Habel, J.C.), Springer, Berlin, 503–526.
- [10] Gutt, J., Barratt, I., Domack, E., d'Udekem d'Acoz, C., Dimmler, W., Grémare, A., Heilmayer, O., Isla, E., Janussen, D., Jorgensen, E. et al. (2011) Biodiversity change after climate induced ice-shelf collapse in the Antarctic. *Deep-Sea Research II*, **58**, 74–83.
- [11] Gutt, J., Hosie, G., Stoddart, M. (2010) Marine Life in the Antarctic, in *Life in the World's Oceans: Diversity, Distribution, and Abundance* (ed McIntyre, A.D.), Wiley-Blackwell, 203–220.
- [12] Bergmann, M., Soltwedel, T., Klages, M. (2011) The interannual variability of megafaunal assemblages in the Arctic deep sea: preliminary results from the HAUSGARTEN observatory (79°N). *Deep Sea Research I*, **58**, 711–723.
- [13] Bienhold, C., Boetius, A., Ramette, A. (2012) The energy-diversity relationship of complex bacterial communities in Arctic deep-sea sediments. *The ISME Journal*, **6**, 724–32.