

## 3.17 Der Rückgang des polaren Meereises und seine ökologischen Auswirkungen

DIETER PIEPENBURG, IRIS WERNER, HOLGER AUDEL & HANS-ULRICH PETER

*The decline of the polar sea ice and its ecological impact: Sea ice is a major characteristic of Arctic and Antarctic seas and of utmost importance as a main ecological driver. It provides a unique marine habitat for highly adapted organisms but also strongly affects the pelagic and benthic biota beneath, as it governs key coupling processes between the water column and the sea floor. Climate change is particularly obvious in the Arctic Ocean, as well as off the Antarctic Peninsula, where warming results in a rapid shrinkage of the summer sea ice cover. This decline is not only threatening the sea-ice communities and their associated fauna and food webs. It will also have wide-ranging effects on the pelagic and benthic habitats and will thus very likely result in a profound ecological regime shift of the polar seas in the near future.*

Die Meere der Arktis und Antarktis sind durch das Vorkommen von Meereis charakterisiert (THOMAS & DIECKMANN 2009). Grundsätzlich können drei Zonen unterschieden werden: 1) eine polferne, fast ganzjährig eisfreie Zone, in die nur gelegentlich Treibeisfelder und Eisberge driften, 2) weiter polwärts eine saisonale Eiszone, die im Winter von neu gebildetem Eis bedeckt wird, das aber im folgendem Sommer wieder schmilzt («einjähriges Eis»), und 3) in den hohen Breiten eine permanente Eiszone, die auch im Sommer einen bis mehrere Meter dicken Panzer »mehrjährigen Eises« trägt. Die Grenzen zwischen diesen Zonen sind allerdings nicht scharf, Eisschollen unterschiedlichen Alters vermischen sich durch Strömungen, und die Eisrandzone ist oft viele Kilometer breit.

In den arktischen Meeren, d.h. dem tiefen zentralpolaren Nordpolarmeer und seinen randlichen Schelfmeeren nördlich Eurasiens und Nordamerikas (s. Kap. 2.5: Notz), zählen nur kleine Gebiete zur ganzjährig eisfreien Region. Die saisonale und die permanente Eiszone waren in früheren Jahrzehnten mit etwa je 7 Mio. km<sup>2</sup> etwa gleich groß. Das Verhältnis verschiebt sich aber seit etwa 30 Jahren als Folge des globalen Klimawandels rasch zugunsten der nur saisonalen Eisbedeckung. Nördlich von Grönland staut sich das älteste und dickste (> 6 m) mehrjährige Eis. Die arktischen Schelfmeere sind im Winter mit dünnem (etwa 1 m dickem) einjährigem Eis bedeckt und werden im Sommer weitgehend eisfrei.

Der Nordteil des Südpolarmeeres, das als Ringozean den zentralpolaren antarktischen Kontinent umschließt (s. Kap. 2.5: Notz), ist auf einer Fläche von etwa 16 Mio. km<sup>2</sup> ganzjährig eisfrei. Der Süden mit insgesamt etwa 22 Mio. km<sup>2</sup> ist im Winter größtenteils mit saisonalem Packeis bedeckt. Etwa vier Fünftel davon schmilzt im Sommer, der Rest wird zu bis zu 3 Meter dickem mehrjährigem Eis, das vor den Küsten des Kontinents sowie im Weddell-, Ross- und Amundsenmeer eine relativ kleine permanente Eiszone von etwa 4 Mio. km<sup>2</sup> bildet.

### Ökologische Bedeutung des Meereises in den Polarmeeren

Das Meereis ist für die marinen Ökosysteme in den Polarregionen von größter Bedeutung, und zwar als eigenes, spezifisch polares Habitat (Sympagial), aber indirekt auch für die Gemeinschaften des Freiwassers (Pelagial) und des Meeresbodens (Benthal), da die drei Lebensräume über verschiedene Prozesse, die so genannte »kryo-pelago-benthische Kopplung«, eng miteinander verknüpft sind.

#### Meereis

Während des Gefrierens von Meerwasser entsteht ein fein verzweigtes, dreidimensionales Kanalsystem, das mit flüssiger Salzlake gefüllt ist und das gesamte Eis durchzieht (s. Kap. 2.5: Notz). In diesem Salzlakekanalsystem kommen spezifische Gemeinschaften aus einer Vielzahl von Viren, Bakterien, Pilzen, einzelligen Algen sowie ein- und auch kleinen mehrzelligen Tieren vor (Abb. 3.17-1), obwohl die extremen Lebensbedingungen im Meereis hohe physiologische Ansprüche an seine Bewohner stellen (KIKO et al. 2008). Innerhalb des Eises kann die Temperatur im Jahresverlauf von -30° C bis 0° C schwanken, in allen Jahreszeiten gibt es steile Gradienten von der Oberfläche zur Unterseite des Eises. Je niedriger die Eistemperatur, desto enger sind diese Salzlakekanäle und desto höher ist der Salzgehalt in der Lauge, z. B. ist er bei -20° C bereits sechsmal größer (> 200 g/kg) als im normalen Meerwasser (etwa 35 g/kg). Mehrere Monate lang herrscht im polaren Winter komplette Dunkelheit, aber auch während des Sommers wird viel Licht vom Eis reflektiert und absorbiert, so dass nur ein Bruchteil davon bei den Eisalgen ankommt. Die Organismen im Meereis sind ökologisch und physiologisch an diese extremen Bedingungen mit speziellen Anpassungen (z.B. Gefrierschutzproteinen, Dauerstadien, Energiespeichern und speziellen Antennenpigmenten) adaptiert.

Trotz der extremen Lebensbedingungen kann die

Algenbiomasse im Eis einige Größenordnungen höher sein als im unterliegenden Wasser und durch ihre Dichte das Eis grünlich-bräunlich färben. Einem »Hängenden Garten« an der Oberfläche polarer Meere ähnlich, können die Eisalgen in der saisonalen Packeiszone bis zu 30% und in der permanenten Packeiszone bis zu 60% zur gesamten Primärproduktion beitragen. Die einzel-

ligen (z.B. Ciliaten, Foraminiferen, Flagellaten) und mehrzelligen Tiere (z.B. Rotatorien, Nematoden, Turbellarien, Copepoden) im Eis ernähren sich in einem komplexen Nahrungsnetz von den Eisalgen, von Bakterien und auch räuberisch voneinander (Abb. 3.17-1). Gemeinsam ist allen Eisorganismen, dass sie wegen der räumlichen Enge im Salzlaugenkanalsystem nicht viel

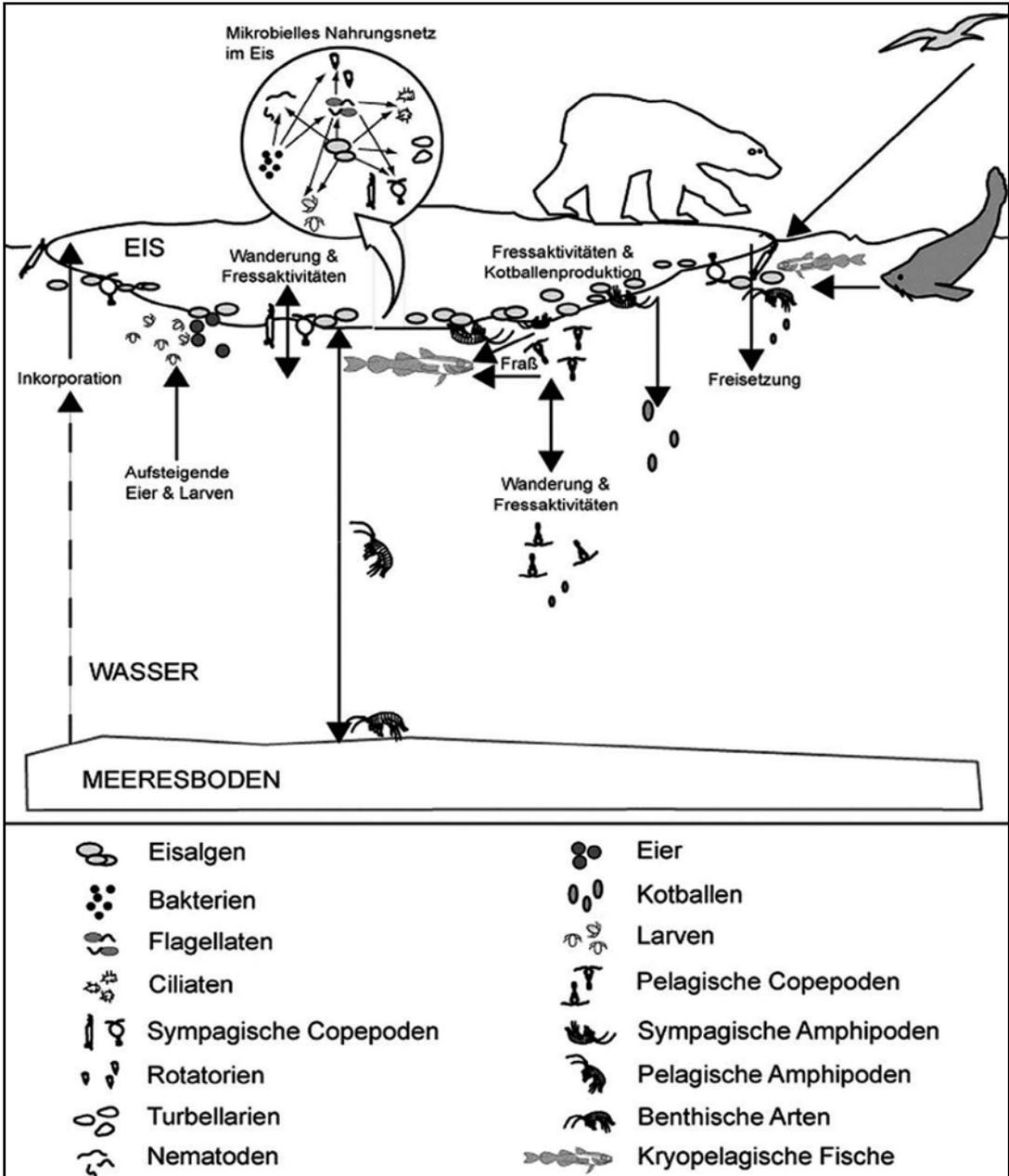


Abb. 3.17-1: Meereis-Nahrungsnetz, mit Verknüpfungen zum Freiwasser und Meeresboden

größer als 1 mm sein dürfen. An der Eisunterseite hat sich eine größere, spezielle Untereis-Fauna angesiedelt, die hauptsächlich aus verschiedenen Krebstieren (Amphipoden in der Arktis, Krill in der Antarktis) besteht. Sie bildet wiederum die Beute für Fische, Robben und Seevögel, die unter dem Eis jagen (Abb. 3.17-1).

### Freiwasser

Die ökologischen Bedingungen und Lebensgemeinschaften des Freiwassers (Pelagial) polarer Meere werden stark vom Meereis geprägt. Aufgrund der Eisbedeckung, des generell niedrigen Sonnenstandes und der oft monatelangen winterlichen Polarnacht dringt nur wenig Sonnenlicht in die Wassersäule ein. Daher ist die jährliche Produktionsphase für die einzelligen Algen des Phytoplanktons in der saisonalen Eiszone auf wenige Sommermonate beschränkt, und in der permanenten Packeiszone sind nur wenige dunkeladaptierte Arten produktiv. In beiden Polarregionen stellen Diatomeen (Kieselalgen) den größten Anteil des Phytoplanktons. Pflanzennährstoffe wie Phosphat, Nitrat und Silikat, aber auch Eisen, gelangen über die großen Flüsse in die arktischen Schelfmeere und werden dort durch die pflanzliche Photosynthese im Sommer weitgehend aufgezehrt. Aufgrund des generellen Licht- und Nährstoffmangels liegt im zentralen Nordpolarmeer die Primärproduktion unter 30 g C/m<sup>2</sup>. Dagegen sind die ganzjährig eisfreien, küstennahen Gebiete der westlichen Barentssee (bis 200 g C/m<sup>2</sup>), aber auch Polynjas und Eisrandzonen (bis >300 g C/m<sup>2</sup>), hochproduktive Meeresregionen. Im nördlichen, eisfreien Teil des Südpolarmees herrschen bei relativ niedrigen geographischen Breitengraden etwa die gleichen Lichtverhältnisse wie in der Nordsee. Trotz des günstigen Angebotes von Phosphat, Nitrat und Silikat ist er aber ähnlich unproduktiv wie das zentrale Nordpolarmeer, weil die Primärproduktion durch Eisenmangel, die starke vertikale Durchmischung und den intensiven Wegfraß durch Krill und andere herbivore Tiere limitiert wird (ASSMY et al. 2009).

Das Zooplankton der arktischen Meere wird vor allem durch herbivore, d.h. Algen fressende, Ruderfußkrebse (Copepoden) der Gattung *Calanus* dominiert. Die drei äußerlich sehr ähnlichen Arten *C. glacialis*, *C. hyperboreus* und *C. finmarchicus* unterscheiden sich hauptsächlich in Körpergröße und Fettgehalt und bewohnen unterschiedliche Regionen des Nordpolarmees. Ebenfalls wichtig ist der räuberische Flohkrebs *Themisto libellula*, der eine ökologische Schlüsselposition als Nahrungsquelle für Wale und verschiedene Robben- und Seevogelarten einnimmt. In der Antarktis ist neben den Copepoden vor allem der Krill (*Euphausia superba*) zahlreich. Viele polare Zoo-

plankter sind in ihrem Lebenszyklus mit dem Meereis verknüpft (Abb. 3.17-1), einige nutzen im Frühjahr die frühe Produktion der Eisalgen als Nahrungsquelle, andere überwintern sogar im Eis (AUEL et al. 2009). Viele Copepoden überwintern, von ihren Fettreserven zehrend, als Jugendstadien in großen Tiefen, wo sie sicher vor ihren Räubern sind. Andere Arten, wie der antarktische Krill, halten sich im Winter unter dem Meereis auf, leben teils von ihrem Fettvorrat und weiden Eisalgen von der Unterseite des Meereises ab. Die Eiablage erfolgt meist im zeitigen Frühjahr, so dass die Larven während der Eisalgen- und Planktonblüte ein gutes Nahrungsangebot vorfinden.

### Meeresboden

Auch die Gemeinschaften des Meeresbodens (Benthos) polarer Meere werden – wenn auch weniger stark als das Plankton – vom Meereis beeinflusst. Das Benthos der beiden Polarregionen unterscheidet sich erheblich, vor allem als Folge der unterschiedlichen Vereisungsgeschichte. Weil die Arktis als ein von extremer Kälte und Eis geprägter Lebensraum weniger als drei Mio. Jahre alt ist, ist die marine Fauna noch eng mit der atlantischen und – deutlich weniger ausgeprägt – pazifischen Fauna verwandt. In der Antarktis setzte die Vereisung bereits vor 20 bis 30 Mio. Jahren ein, und so konnten sich hier viele endemische, hoch angepasste Arten entwickeln. Der Faunenaustausch mit angrenzenden Regionen, zum Beispiel Südamerika, ist vergleichsweise gering. Das arktische Benthos gilt deshalb als »jung«, »arm« und »unausgereift«, das antarktische dagegen als »alt«, »reich« und »stabil«. Allerdings haben Befunde der letzten zehn Jahre gezeigt, dass diese Unterschiede nicht so ausgeprägt sind wie früher vermutet (PIEPENBURG 2005). Die Lebensbedingungen in der Arktis sind durch ausgeprägte jahreszeitliche Schwankungen in wichtigen Umweltfaktoren gekennzeichnet, z. B. durch die sommerliche Reduktion des Salzgehalts auf den flachen Schelfen als Folge der Eisschmelze und des starken Flusswasser-Eintrags. Auf den schmalen und tiefen Schelfen der Antarktis sind die Umweltbedingungen stabiler. Das Benthos auf dem Schelf und am Kontinentalhang ist reich an Arten und Biomasse. Typisch sind dreidimensionale Gemeinschaften, in denen große Glasschwämme die Basis für eine diverse assoziierte Fauna bilden.

Wie in allen Ozeanen ist die Nahrungsversorgung des Benthos der Polarmeere an den jahreszeitlichen Produktionszyklus im Pelagial gebunden. Licht dringt nur bis zu einer vom Trübungsgrad abhängigen Tiefe in das Wasser ein und beschränkt das Algenwachstum auf die »euphotische« Oberflächenschicht (max. 200 m). Die Nahrungsgrundlage benthischer Ökosysteme

in größeren Wassertiefen muss deshalb von oben importiert werden. Das Benthos ist somit von der Primärproduktion des Phytoplanktons und der Eisalgen abhängig, weil ein Teil davon über die Sedimentation an den Meeresboden gelangt. Dieser Prozess ist weltweit elementar für die Existenz benthischer Gemeinschaften und in den Meeren hoher Breiten – Arktis wie Antarktis – in der Regel besonders wichtig, weil hier ein überproportional hoher Anteil der Eisalgen- und Phytoplanktonproduktion in die Tiefe absinkt.

#### **Kryo-pelago-benthische Kopplung zwischen Eis, Wasser und Boden**

Die ökologisch fundamentale Beziehung zwischen den Lebensräumen Meereis, Freiwasser und Meeresboden wird als »kryo-pelago-benthische Kopplung« bezeichnet (Abb. 3.17-1). Auf den flachen arktischen Schelfen, aber auch im Südpolarmeer ist sie vor allem in der Zone der saisonalen Eisbedeckung ausgeprägt und führt zu einer hohen marinen Gesamtproduktivität. Das relativ dünne und poröse einjährige Eis bietet besonders im Frühjahr große, gut belichtete und nährstoffreiche Siedlungsflächen für Eisalgen. Es ist Weidegrund und Unterschlupf für herbivore Meereis- und Planktonorganismen sowie deren Räuber. Vielfältige Nahrungsbeziehungen zwischen Bewohnern des Meereises und der Wassersäule finden durch Wanderungen in beide Richtungen statt. An den Eisrändern entwickeln sich reiche Planktonblüten, die das Fraßvermögen des Zooplanktons übersteigen und daher rasch aus dem oberen Pelagial in die Tiefe sedimentieren und dort dem Benthos als Nahrungsquelle dienen (HEMPEL & PIEPENBURG 2010). In der Antarktis werden die Eisrandblüten von dichten Krillschwärmen beweidet, die wiederum Walen, Pinguinen und Krabbenfresserrobben Futter in hoher Konzentration bieten.

#### **Fische, Vögel und Säugetiere**

Die oberen Nahrungsnetz-Ebenen der polaren marinen Ökosysteme werden von Wirbeltieren dominiert. Und in der Regel sind auch diese in vielfältiger Weise an das Meereis gebunden. Unter dem Eis der arktischen Meere ist beispielsweise der kleine aber häufige Polardorsch (*Boreogadus saida*), der die Flohkrebse von der Eisunterseite abweidet, ein Schlüsselement im marinen Nahrungsnetz.

In beiden Polarmeeren sind Warmblüter statt der Fische die obersten Glieder der Nahrungsnetze. Raubmöwen, Möwen, Albatrosse und Sturmvögel ernähren sich alle von Zooplankton, Krill, Fischen und Tintenfischen. Einige arktische Alkenarten (z. B. Gryllteisten, Lummen) tauchen auch unter das Meereis und fressen die Amphipoden von der Eisunterseite. Die Pinguine in

der Antarktis sind flugunfähig, aber umso gewandter und ausdauernder »fliegen« sie unter Wasser. Kaiserpinguine brüten im antarktischen Winter auf dem kontinentnahen Festeis (Abb. 3.17-2).

Furchenwale, Schwertwale und Pottwal-Bullen wandern zum Fressen im Sommer in beide Polarmeere. Für die ganzjährig in der Arktis lebenden Grönlandwale, Narwale und Belugas gibt es keine südlichen Pendanten. In der Arktis sind Eisbär, Walross und mehrere Arten von Hundsrobben eng mit dem Meereis als Lebensraum assoziiert. In der Antarktis durchlaufen Krabbenfresser- und Weddellrobben, Seeleoparden und Rossrobben ihren ganzen Lebenszyklus auf dem Meereis, während Seebären und See-Elefanten zur Fortpflanzung und zum Haarwechsel auf den maritim- und subantarktischen Inseln an Land gehen. Besonders das Festeis in Küstennähe dient neben den Pinguinen auch Robben als Brut-, Wurf- bzw. Ruheplatz.

#### **Klimawandel und Meereisschwund**

Die Zunahme von CO<sub>2</sub> und anderen Treibhausgasen in der Atmosphäre und die daraus resultierende globale Erwärmung hat nach Meinung der meisten Experten derzeit – und zukünftig – den stärksten Effekt auf die Ökologie der Polarmeere (DUARTE 2008; TURNER et al. 2009). Ausmaß und Effekte des Klimawandels sind regional allerdings sehr unterschiedlich.

#### **Arktis**

Am stärksten sind die Auswirkungen in der Arktis, wie vor allem der dramatische, von Satellitenbeobachtungen eindeutig belegte Schwund der nordpolaren Meereisbedeckung am Ende der sommerlichen Schmelzphase in den letzten 30 Jahren zeigt (s. Kap. 2.5: Notz). Prognosen verschiedener Klimamodelle besagen, dass noch in diesem Jahrhundert, eventuell sogar vor 2050, das arktische Meereis im Sommer bis auf geringe Reste verschwinden wird. Dies bedeutet, dass das Nordpolarmeer, ähnlich wie heute die nördliche und östliche Ostsee und weite Teile des Südpolarmees, nur noch während der Wintermonate von Eis bedeckt sein wird. Dies wiederum wird drastische Auswirkungen auf das gesamte arktische Ökosystem haben (ANON. 2005).

Ohne Zweifel wird ein Rückzug des Meereises vor allem die Lebensgemeinschaften des Sympagials beeinflussen. Mit dem mehrjährigen Meereis verschwindet ein einzigartiger Lebensraum mit allen Organismen, die mehrjährige Lebenszyklen haben und deshalb auf das Eis im ganzen Jahresgang angewiesen sind, z.B. die arktischen Untereis-Amphipoden. Damit geht ein Verlust von Biodiversität einher, denn es werden auch einzellige Algenarten und andere mehrzellige Tiere betroffen sein. Die mit dem Meereis assoziierten



Abb. 3.17-2: KAISERPINGUINE.

Nahrungsnetze werden sich stark verändern, die geografische Lage von produktiven Eisrandzonen werden sich nach Norden verlagern. Durch die kürzeren Eisbedeckungszeiten werden auch Tiere, die das Eis nur temporär nutzen, durch die zeitliche Entkoppelung in ihrem Lebenszyklus gestört. Besonders stark betroffen vom Rückgang des arktischen Meereises sind Ringelrobben und Bartrobben, sowie ihr Jäger, der Eisbär (s. Kap. 3.24: Steinecke), da sie in fast allen Lebensbereichen, z. B. Rast, Haarwechsel, Paarung, auf das Meer eis angewiesen sind.

Aufgrund der ausgeprägten kryo-pelago-benthischen Kopplung in arktischen Meeren wird nicht nur das direkt betroffene Sympagial, sondern auch die pelagischen und benthischen Lebensräume stark beeinflusst werden. Besonders problematisch ist die zeitliche Entkopplung der jährlichen Eisalgen- und Phytoplanktonblüten von den Lebenszyklen wichtiger arktischer Schlüsselarten des Zooplanktons, die ihre Reproduktions- und Wachstumsphasen auf das arktische Produktionsregime abgestimmt haben (SØREIDE et al. 2010). Ein Ausfall der Eisalgenblüte und eine verfrühte Phytoplanktonblüte würden ihren Fortpflanzungserfolg stark gefährden. Weil arktisches Zooplankton generell größer, fett- und energiereicher als nahverwandte atlantische Arten und daher die bevorzugte Beute für Fische, Seevögel und bestimmte Robben ist, wird eine Verschiebung in der Artenzusammensetzung zu kleineren, weniger nahrhaften Vertretern das Nahrungsangebot für viele arktische Tierarten dramatisch verschlechtern. Modellrechnungen deuten außerdem darauf hin, dass die Entkopplung der Primärproduktion von den Lebenszyklen dominanter Zooplanktonarten zu einem pelagischen Ökosystem führen könnte, in

dem mikrobielle Prozesse dominierten und kaum Energie übrig bliebe für Fische, Benthos und Warmblüter. Das gesamte marine Ökosystem wird sich demnach von einem Eisalgen-dominierten zu einem von Phytoplankton dominierten System verschieben, in dem die pelagischen gegenüber den benthischen Nahrungsnetzen an Bedeutung gewinnen.

### Antarktis

Der Einfluss des Klimawandels auf die Meereisbedeckung ist in den antarktischen Meeren – mit Ausnahme des westlichen Teils der Antarktischen Halbinsel – bislang nicht so deutlich wie in der Arktis (s. Kap. 2.5: Notz). Detaillierte Daten aus den drei Jahrzehnten seit Beginn der Satellitenbeobachtungen zeigen im Mittel sogar eine Eiszunahme von etwa 1% pro Dezenium. Nach Expertenmeinung hat in der Antarktis das Ozonloch bisher den Temperaturanstieg verzögert (TURNER et al. 2009). Da sich das Ozonloch aber in Zukunft langsam auffüllt, wird erwartet, dass in den kommenden Jahrzehnten auch in der Antarktis eine starke Erwärmung eintreten wird, besonders im Winter und Frühjahr. Mittelfristig wird deshalb im Südpolarmeer, ähnlich wie in der Arktis, die Ausdehnung und Dauer der Eisbedeckung abnehmen.

Diese Entwicklung wird sehr wahrscheinlich negative Auswirkungen auf den Krill und damit auf das gesamte antarktische Ökosystem haben; denn die Krill-Larven sind auf die Eisalgen als Winter- und Frühlings-Nahrung angewiesen, und Jahre mit einer langdauernden Eisbedeckung liefern deshalb gute Krilljahrgänge. Für den Bereich der Antarktischen Halbinsel wurde bereits ein signifikanter Rückgang des mehrjährigen Eises registriert, und tatsächlich sind hier die Krillbestände und die von ihnen abhängigen Ko-

lonien der Adélie-Pinguine stark geschrumpft. Ähnlich wie in der Arktis wird es zu einer ozeanweiten Veränderung der grundlegenden ökologischen Struktur kommen, nämlich einer Verschiebung vom »Krill-System« zu weniger produktiven Salpen-dominierten Systemen des offenen Wassers (TURNER et al. 2009).

Neben der globalen Erwärmung könnte auch der exzessive Walfang im 20. Jahrhundert das pelagische Ökosystem des Südpolarmeereres gravierend verändert haben (SMETACEK & NICOL 2005). Durch ihr Fraßverhalten »recyclen« Wale einen Teil der Nährstoffe, vor allem Eisen, in der euphotischen Zone und ermöglichen so neues Algenwachstum. Krill und Salpen hingegen produzieren kompakte Kotbälle, die schnell in größere Tiefen absinken und so zu einem kontinuierlichen Verlust von Nährstoffen aus der Oberflächenschicht führen. Die großräumige Vernichtung der Walbestände im Südpolarmeer hat vielleicht auf diese Weise gravierenden Einfluss auf die Nährstoffflüsse genommen und damit zu einem langfristigen und stetigen Produktivitätsrückgang beigetragen.

### Schlussbetrachtung

Die eisbedeckten Polarmeere sind einzigartige und sensible Lebensräume, die unseres besonderen Schutzes bedürfen. Das Südpolarmeer ist noch eines der saubersten Meere der Welt, da es dank des internationalen Antarktis-Vertragswerkes geschützt ist. Auch in der Arktis sind Eisbären, Robben und Wale heute großenteils vor kommerzieller Ausbeutung gesichert, aber es gibt keine vergleichbare, ökosystemorientierte Konvention. Ein solches völkerrechtlich verbindliches Vertragswerk erscheint dringend geboten angesichts der unkontrollierten Belastungen durch Schadstoffe aus Flüssen, der bevorstehenden Entwicklung einer Offshore-Industrie und der Zunahme von Transitverkehr und Tourismus auf den im Sommer zukünftig eisfreien Schiffrouten der Nordwest- und Nordostpassage. Regionale Schutzkonventionen können aber die Polarmeere nicht vor dem rapiden Schwund des Meereises als Folge des weltweiten Klimawandels bewahren, der in der Arktis bereits jetzt feststellbar und in der Antarktis in mittelfristiger Zukunft zu erwarten ist. Der Meereisrückgang wird nicht nur zum Habitatverlust für die Meereisgemeinschaften, von Eisalgen bis zum Eisbär, führen. Wegen der in den Polarmeerern besonders intensiven ökologischen Kopplungsprozesse wird er auch weit reichende Folgen für das Pelagial und Benthos haben, die gravierende Umwälzungen der gesamten Ökosystemstruktur hervorrufen werden. Nur globale klimapolitische Maßnahmen können diese Entwicklung verlangsamen und ihre nur schwer zu prognostizierenden Auswirkungen mildern.

### Literatur

- ANON (2005): Der Arktis-Klima-Report – Die Auswirkungen der Erwärmung. Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven.
- ASSMY P., LOCHTE K. & V. SMETACEK (2009): Plankton productivity and the role of iron in the Southern Ocean. In: HEMPEL, I. & G. HEMPEL (Hrsg.). Biological studies in polar oceans. Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 227–235.
- AUEL H., HAGEN W. & S. SCHIEL (2009): Size does matter – In the sea of giants and dwarfs. In: HEMPEL, I. & G. HEMPEL (Hrsg.). Biological studies in polar oceans. Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 93–98.
- DUARTE C. M. (Hrsg.) (2008): Impacts of global warming on polar ecosystems. Fundación BBVA, Bilbao.
- HEMPEL G. & D. PIEPENBURG (2010): Nord- und Südpolarmeer im Klimawandel – ein biologischer Vergleich. Biologie in unserer Zeit 40(6), 386–395.
- KIKO R., J. MICHELS, E. MIZDALSKI, S. B. SCHNACK-SCHIEL & I. WERNER (2008): Living conditions, abundance and composition of the surface and subsurface layers in pack ice in the Western Weddell Sea. Deep Sea Research II 55, 1000–1014.
- PIEPENBURG D. (2005): Recent research on Arctic benthos: common notions need to be revised. Polar Biology 28, 733–755.
- SMETACEK V. & S. NICOL (2005): Polar ocean ecosystems in a changing world. Nature 437, 362–368.
- SØREIDE J., LEU E., BERGE J., GRAEVE M. & S. FALK-PETERSEN (2010): Timing of blooms, algal food quality and *Calanus glacialis* reproduction and growth in a changing Arctic. Global Change Biology 16, 3154–3163.
- THOMAS D.N. & G. S. DIECKMANN (2009): Sea Ice (2nd Edition). Wiley-Blackwell, Oxford.
- TURNER J., R. BINDSCHADLER, P. CONVEY, G. DI PRISCO, E. FAHRBACH, J. GUTT, D. HODGSON, P. MAYEWSKI & C. SUMMERHAYES (Hrsg.) (2009): Antarctic climate change and the environment. Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR), Cambridge.

Prof. Dr. Dieter Piepenburg  
Akademie der Wissenschaften und der Literatur Mainz  
c/o Institut für Polarökologie - Universität Kiel  
Wischofstr. 1-3, Geb. 12 - 24148 Kiel  
dpiepenburg@ipoe.uni-kiel.de

Dr. Iris Werner  
Institut für Polarökologie - Universität Kiel  
Wischofstr. 1-3, Geb. 12 - 24148 Kiel

Dr. Holger Auel  
Marine Zoologie (FB 2) - Universität Bremen  
Postfach 330440, 28334 Bremen

Dr. Hans-Ulrich Peter  
Institut für Ökologie - Universität Jena  
Dornburgerstr. 159 - 07743 Jena