

3.5 Klimabedingte ökologische Veränderungen in den Bodenfaunen polarer Schelfmeere

DIETER PIEPENBURG & JULIAN GUTT

Ecological shifts in polar shelf bottom habitats in response to climate change: *Bottom communities (benthos) of Arctic and Antarctic shelf seas differ pronouncedly in composition, diversity, and ecosystem functioning, reflecting the major evolutionary and ecological disparities between the two polar regions. Though polar systems are in general thought to be particularly sensitive to climate-induced environmental changes, it is likely that Arctic and Antarctic bottom assemblages will respond differently to the external forcing. In the Arctic, higher water temperatures, increased fluvial run-off and reduced ice cover are assumed to give rise to severe ecosystem changes propagating through all trophic levels, ultimately resulting in a shift in the relative importance of sea-ice, pelagic and benthic biota in the overall marine carbon and energy fluxes and a switch from a ‚sea-ice algae–benthos‘ to a ‚phytoplankton–zooplankton‘ dominance. In contrast, circumpolar significant shifts in the Antarctic benthos as a direct response to sea-temperature rise are not likely for the near future. Instead, a continuing disintegration of ice shelves and shrinking of the sea-ice will impact bottom communities at a regional scale. Acidification might become a major problem for marine organisms in both polar areas.*

Extrem niedrige, nur knapp über dem Gefrierpunkt liegende Meerwasser-Temperaturen, Eisbedeckung und – über das gesamte Jahr gesehen – Nahrungsknappheit, das sind die zentralen Lebensbedingungen gleichermaßen für das arktische und antarktische Leben am Meeresboden, das Benthos. Neben diesen Gemeinsamkeiten gibt es aber auch gravierende Unterschiede zwischen den beiden Polargebieten, die letztlich auf großräumige geographische, erdgeschichtliche, klimatische und ozeanographische Verhältnisse zurückgehen (HEMPEL & PIEPENBURG 2010).

Das Nordpolarmeer (im Englischen: Arctic Ocean) ist ein zentralpolares Mittelmeer des Atlantischen Ozeans, das zum größten Teil von den eurasischen und nordamerikanischen Kontinentalmassen mit breiten und flachen Schelfplateaus an ihren Rändern umgeben ist (s. Kap. 2.2 - SCHAUER). Bei dem Südlichen Ozean (im Englischen: Southern Ocean) handelt es sich um einen riesigen Wasserkörper, der um den fast vollkommen vergletscherten zentralpolaren antarktischen Kontinent zirkuliert (s. Kap. 2.1 - FAHRBACH et al.). Er ist im Süden durch überwiegend schmale, aber ausgeprägt tiefe Schelfe gesäumt (bis 800 m), an die sich nach Norden die Tiefsee anschließt. Die großräumigen Strömungsverhältnisse sorgen auf der nördlichen Hemisphäre dafür, dass es zwischen Nordpolarmeer und Atlantik einen regen Austausch von Oberflächenwassermassen – wie auch Faunen und Floren – gibt. Der Südliche Ozean hingegen ist durch den abrupten Temperaturunterschied an der zirkumpolaren Polarfront, der »Antarktischen Konvergenz«, an der Ozeanoberfläche biogeographisch wirkungsvoll von den nördlich angrenzenden Ozeanen isoliert.

Schließlich ist der Südliche Ozean als extremer Kaltwasser-Lebensraum erdgeschichtlich viel älter als

die Nordpolarmeer: Spätestens seit der Öffnung der Drake-Passage, der Meerenge zwischen Südamerika und der Antarktischen Halbinsel, und der Entwicklung einer tiefen zirkumpolaren Strömung im frühen Miozän vor ca. 23 Mio. Jahren findet man in der Antarktis ähnliche Umweltbedingungen wie jetzt (s. Kap. 1.2 - KLEINSCHMIDT). Die Arktis hingegen war noch während des gesamten Miozäns, also weitere 19 Mio. Jahre lang, durch ein gemäßigtes Klima beherrscht und »richtig polare«, d.h. von Eis geprägte Bedingungen, sind im Nordpolarmeer erst mit dem Beginn des Pleistozäns vor knapp 2 Mio. Jahren nachzuweisen (s. Kap. 1.1 - VENZKE).

Allgemeine Merkmale des polaren Benthos

Überall im Weltmeer gilt, dass das Licht nur bis zu einer gewissen, vom Trübungsgrad abhängigen Tiefe (max. 200 m) in das Wasser eindringen kann. Nur in dieser oberen »euphotischen Zone« können Pflanzen dauerhaft vorkommen, weil in größeren Tiefen mangels Sonnenlichts keine Photosynthese möglich ist. Das bedeutet für die benthischen Nahrungsgfuge unterhalb dieser Zone – und dazu gehören weltweit etwa 98% der Meeresböden –, dass die Nahrungsgrundlage von außen importiert werden muss. Somit hängen diese Systeme von der Primärproduktion des Phytoplanktons in der euphotischen Zone ab, das teilweise zum Meeresboden absinkt. Dieser Prozess ist elementar für die Existenz benthischer Gemeinschaften und wird als »pelago-benthische Kopplung« bezeichnet. Als Trend wird angenommen, dass diese Kopplung in vielen Meeresregionen hoher Breiten – Arktis wie Antarktis – besonders stark ausgeprägt ist, d.h. dass ein überproportional hoher Anteil der Phytoplanktonproduktion

in die Tiefe gelangt (GREBMEIER & BARRY 1991). Besonders wichtig scheint in diesem Zusammenhang das Meereis zu sein. Es beeinflusst zum einen die Algenproduktion in der Wassersäule, z.B. durch Beschattung oder durch die Stabilisierung der Wasserschichtung, zum anderen stellt es aber auch einen eigenständigen Lebensraum dar, in dem neben vielfältigen anderen Organismen insbesondere autochthone (d.h. im Meer eis selbst vorkommenden) Primärproduzenten, die zu den einzelligen Kieselalgen gehörigen »Eisalgen«, leben. Vor allem Eisrandgebiete und Polynjas (ein Lehnwort aus dem Russischen für eisfreie Zonen in einem sonst eisbedeckten Gebiet) können Regionen deutlich erhöhter Gesamtproduktivität (Eisalgen und Phytoplankton) sein und damit eine intensive Sedimentation organischer Substanz zum Meeresboden sowie eine günstige Nahrungsversorgung für das Benthos aufweisen (s. Kap. 3.3 – WERNER). Deshalb wird für die Polargebiete das Konzept der »pelago-benthischen« zu dem einer »kryo-pelago-benthischen« Kopplung erweitert (GREBMEIER & BARRY 1991; BOETIUS et al. 2013).

Arktis

Die zahlreichen Feldstudien der vergangenen 25 Jahre haben deutlich gemacht, dass es kein einheitliches »arktisches Benthos« gibt, sondern dass die marinen Bodenfaunen arktischer Meere sehr heterogen sind. Wie angesichts der aus menschlicher Sicht extrem unwirtlichen Umweltbedingungen zu erwarten, sind etliche Regionen in der Regel sehr arm an Diversität und Biomasse, z.B. die Tiefsee des zentralen Nordpolarmeeres oder weite Bereiche der hocharktischen Schelfmeere nördlich Sibiriens. Andere Schelfgebiete aber, zum Beispiel das Barents- und das Beringmeer, sowie generell ozeanische Regionen im Einflussbereich von Fronten, Eisrandzonen und Polynjas beherbergen wegen der dort besonders stark ausgeprägten kryo-pelago-benthischen Kopplung eine erstaunlich diverse und biomassereiche Bodenfauna (Abb. 3.5-1).

Die meisten der in der Arktis vorkommenden Arten sind, ganz im Gegensatz zu den Verhältnissen in der Antarktis, nicht typisch »arktisch« in dem Sinne, dass sie nur dort vorkommen, d.h. »endemisch« für die arktischen Meere sind, sondern Einwanderer aus südlich angrenzenden Gebieten, vor allem aus dem nördlichen Atlantik. Sie leben somit in der Arktis am nördlichen Rand ihres jeweiligen Verbreitungsgebietes.

Ein weiterer wichtiger Unterschied zur Antarktis besteht nach gängiger Lehrmeinung darin, dass das arktische Schelfbenthos in stärkerem Maß durch eine Vielzahl unterschiedlicher »Störungen« – von der kleinräumigen Bioturbation durch grabende Organismen bis

zur großräumigen Zerstörung ganzer Gemeinschaften durch strandende Eisberge – geprägt wird (DAYTON 1990). Im ökologischen Kontext werden mit diesem Begriff wertfrei von außen kommende, natürliche oder anthropogene, zeitlich begrenzte Veränderungen der Systemzustände auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen bezeichnet.

Zusammen mit der – auf geologischen und evolutionsbiologisch relevanten Zeitskalen – recht kurzen Geschichte der Arktis als extrem kaltem, polarem Großökosystem und dem geringen Anteil endemischer Arten führt diese Rahmenbedingung dazu, dass die arktischen Bodenfaunen generell als »jung« und »unausgereift« bezeichnet werden – und dies vor allem im Vergleich zu den vergleichsweise »alten« und »stabilen« Benthosgemeinschaften der Antarktis (CLARKE & JOHNSTON 2003).

Antarktis

Auf dem Kontinentalschelf der Antarktis gibt es zum einen Lebensgemeinschaften, in denen mobile Weidgänger häufig sind, und andere, die von sessilen Suspensionsfressern (Abb. 3.5-2a) dominiert werden (GUTT et al. 2010). Diese wechseln sich rund um den Kontinent immer wieder ab und erzeugen so ein fleckenhaftes Muster. Als Grund für diese graduellen Unterschiede wird die artspezifische Anpassung insbesondere an die Strömungs- und die davon abhängigen Nahrungsverhältnisse angenommen. Dabei spielen wegen ihrer Komplexität noch gar nicht entschlüsselte Umweltansprüche der frühen Lebensstadien möglicherweise eine wichtige Rolle. Insbesondere in den hochantarktischen Suspensionsfressergemeinschaften baut sich auch eine hohe Biomasse bis zu Weltrekordmarken auf. Den höchsten Artenreichtum gibt es in Gebieten, in denen sich verschiedene Faunenkomponenten mischen, insbesondere westlich der Antarktischen Halbinsel. Stark verarmte Artenassoziationen kann es unter dem Schelfeis, am Kontinentallhang und in isolierten Flachwasserbereichen geben, die unter andauerndem Störeinfluss durch das Meereis stehen.

So sehr auch das Leben am antarktischen Meeresboden grundsätzlich von Algenblüten im Eis und in der Wassersäule abhängt, sind viele antarktische Bodentiere offensichtlich nicht auf Nahrungszufuhr zu einer ganz bestimmten Jahreszeit angewiesen. Unter schwierigen Bedingungen können sie hungern und pflanzen sich nur fort, wenn die Bedingungen günstig sind. Es gibt in der Antarktis also für bestimmte Arten keine besonders enge kryo-pelago-benthische Kopplung.

Möglicherweise spiegeln diese Verhältnisse eine Anpassung an die vergangenen pleistozänen Kaltzeiten

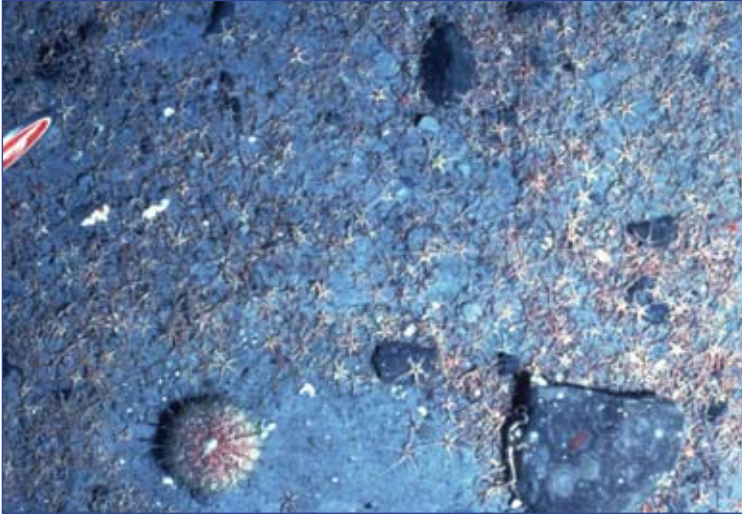


Abb. 3.5-1: Meeresboden im nördlichen Barentsmeer (Arktis). Das Massenvorkommen von bodenbewohnenden Schlangensterne (*Ophiocten sericeum*) im Einflussbereich der produktiven Eisrandzone deutet auf eine starke kryopelago-benthische Kopplung – und somit gute Nahrungsverfügbarkeit für benthische Gemeinschaften – hin (Maßstab: weißer Balken = 10 cm).

wider, in denen das Benthos in Refugien auf dem Schelf – der größte Teil des Kontinentalsockels war durch aufliegendes Schelfeis bedeckt –, am Kontinentalhang oder bei subantarktischen Inseln lebte. In der Antarktis prägte die fast permanente Meereisbedeckung zu diesen Zeiten eine gegenüber heute stark verminderte Nahrungsverfügbarkeit für das Benthos. Da viele Arten für die Antarktis »endemisch« sind, müssen sie unter diesen eingeschränkten Nahrungsbedingungen die Eiszeiten überlebt haben und sind somit auch heute noch daran angepasst. In Gegensatz zu der traditionellen Einschätzung, dass das Leben in antarktischen Meeren überwiegend von hoher Umweltstabilität geprägt ist, haben jüngere Untersuchungen überraschende Ergebnisse zu einer hohen Dynamik im Benthos ergeben.

Mögliche Auswirkungen von klimabedingten Umweltänderungen

Die wichtigsten natürlichen – und indirekt auch anthropogenen – Umweltveränderungen, die Auswirkungen auf das polare Benthos haben werden, sind auf die Klimadynamik zurückzuführen: Zerstörung von Lebensräumen, Wandel in der Nahrungszufuhr und Veränderungen der physikalischen und chemischen Umweltbedingungen im Wasser.

Neben der Ozeanerwärmung und dem Meer- und Schelfeistrückgang, die in beiden Polarregionen unterschiedlich stark verlaufen und sich deshalb teilweise auch unterschiedlich auswirken werden (siehe unten), lösen vor allem die Zukunftsprojektionen zur zunehmenden Ozeanversauerung Besorgnis aus (RIEBESSELL & SCHULZ 2011). Infolge der erhöhten Aufnahme von CO_2 aus der Luft und der vermehrten Bildung von Kohlenensäure sinkt der pH-Wert im Meerwasser, da sich das CO_2 nicht wie in der Atmosphäre chemisch neutral verhält,

sondern im Ozean chemisch aktiv wird. Damit ist auch eine Reduzierung des Karbonatgehalts im Meerwasser verbunden, mit unmittelbar negativen Auswirkungen für alle Organismen, die Karbonat (CO_3^{2-}) für den Aufbau ihrer kalkigen Skelette oder Schalen benötigen. Wegen der erhöhten Löslichkeit des CO_2 bei niedrigen Temperaturen ist dieser Effekt in den Polarmeeren besonders gravierend. Hier können unverminderte CO_2 -Emissionen in die Atmosphäre schon bis Ende dieses Jahrhunderts sogar zu einer Karbonat-Untersättigung des Meerwassers führen (RIEBESSELL & SCHULZ 2011). Davon wäre die gesamte Wassersäule auf nahezu der gesamten Fläche der polaren Meere so betroffen, dass der Aufbau und Erhalt von Kalkskeletten und -schalen mariner Organismen sowie andere physiologische Funktionen beeinträchtigt werden könnten. Es fehlen aber noch Ergebnisse aus laufenden Untersuchungen, um allgemeingültige Aussagen über die Folgen für kalkschalige und andere polare Benthos-Schlüsselorganismen treffen zu können.

Die möglichen ökologischen Folgen dieser und anderer gravierender Umweltveränderungen reichen von graduellen Verschiebungen der Dominanzverhältnisse und Artenzusammensetzung in den Gemeinschaften, die mit einer Verarmung, aber auch einer Erhöhung der Diversität einhergehen können, bis zu deren völligem Zusammenbruch, verursacht durch den Ausfall ökologischer Schlüsselfunktionen. Die Reaktionen der Bodenfaunen auf die Veränderungen werden vor allem vom Grad der Anpassungsfähigkeit und den Ausbreitungsmechanismen bestimmt.

Die Unterschiede in den aktuellen Klimaprojektionen für Arktis und Antarktis lassen erwarten, dass auch die auf geographische und erdgeschichtliche Unterschiede zurückgehenden Konsequenzen für die po-

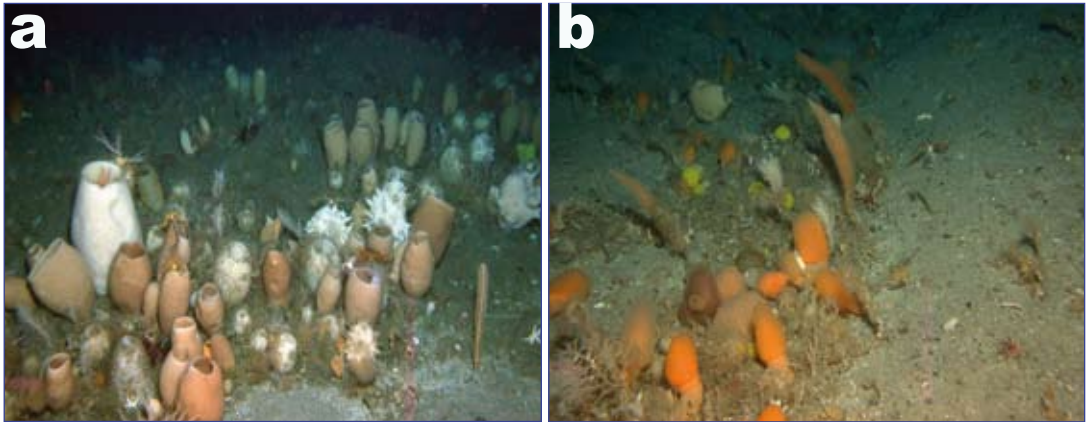


Abb. 3.5-2: **a)** Schwammgemeinschaften, wie diese im südöstlichen Weddellmeer (Antarktis) in ca. 230 m Tiefe, sind ein typisches Element des antarktischen Benthos. Wegen der Langsamwüchsigkeit ausgewachsener Exemplare und der Vergesellschaftung mit einer reichen Begleitfauna reagieren sie wahrscheinlich besonders sensibel auf Umweltveränderungen. Breite des fotografierten Areals im Vordergrund: ca. 70 cm. **b)** Im selben Gebiet besiedeln orangefarbige und quittegelbe Seescheiden sowie Büschel-förmige Hornkorallen einen ehemaligen Eisbergkratzer relativ schnell. Solche Pioniergemeinschaften haben aber nur eine geringe Lebensvielfalt. Im Hintergrund links ist ein Glasschwamm zu sehen, der die Eisbergstörung auf der Seite liegend überlebt hat. Breite des fotografierten Areals im Vordergrund: ca. 45 cm.

laren Ökosysteme anders ausfallen werden. Die Fauna der arktischen Tiefseebecken ist biogeographisch durch Schwellen von den angrenzenden Ozeanen deutlich isoliert, während die Lebensgemeinschaften der Küsten und Schelfe mit denen in südlicheren Gegenden in Kontakt stehen; Rückzugsgebiete nach Norden hingegen gibt es für die Flachwasserfauna wegen der dortigen Tiefseebecken nicht. In der Antarktis sind die Verhältnisse umgekehrt, d.h. die Schelfe sind von anderen Kontinenten isoliert, aber es gibt eingeschränkte Rückzugsmöglichkeiten nach Süden in möglicherweise langfristig stabil kalte Gebiete. Die in der Antarktis liegenden Habitate hingegen könnten einer Einwanderung von weiter nördlich verbreiteten Arten ausgesetzt sein, wenn der noch existierende steile Temperaturgradient abgeschwächt wird. Die südpolare Tiefseefauna hat die Möglichkeit, sich uneingeschränkt mit der nördlich angrenzender Ozeane auszutauschen,

Arktis

Heute gilt als gesichert, dass sich die Erwärmung der Meere in der Arktis am schnellsten vollzieht, und man geht davon aus, dass sich dieser Trend in Zukunft noch verstärken wird: die meisten Klimamodelle prognostizieren, dass sich die Arktis generell zwei- bis dreimal stärker als im globalen Mittel erwärmen wird (TRENBERTH et al. 2007) und deshalb die mittleren Wassertemperaturen im Nordpolarmeer bis 2100 um 4–6°C steigen werden (ANONYMUS 2004). Über die bloße Temperaturerhöhung hinaus wird diese klimatische Umwälzung großskalige Auswirkungen auf weitere

ökologisch relevante Umweltbedingungen haben. Zum Beispiel wird deutlich mehr Süßwasser über die Flüsse in die arktischen Meere eingetragen werden, und die Meereisbedeckung wird so drastisch schrumpfen, dass bis 2100 vermutlich fast die gesamte Arktis, auch das zentralpolare Nordpolarmeer, im Sommer eisfrei sein werden. Die Gesamtheit der Veränderungen, vor allem der Rückgang des Meereises, wird gravierende ökologische Folgewirkungen nach sich ziehen, die alle trophischen Ebenen und sämtliche marinen Biota umfassen (ANONYMUS 2004). Sicherlich sind vor allem die Meereis-Ökosysteme und das obere Pelagial am stärksten betroffen. Für das Benthos – selbst für die Fauna in größeren Tiefen – ist wahrscheinlich die wichtigste Konsequenz, dass sich über die kryo-pelago-benthische Kopplung die Quantität und Qualität des Nahrungsangebots und damit das darauf beruhende komplizierte Geflecht der biologischen Wechselbeziehungen am Meeresboden deutlich verändern werden.

Gemäß einer Hypothese, die immer noch Arbeitsgrundlage etlicher wissenschaftlicher Studien zur Veränderung arktischer Ökosysteme als Folge klimatischer Umwälzungen ist, wird durch den Rückgang des Meereises das Verhältnis von Eisalgen und Phytoplankton in der Primärproduktion entscheidend beeinflusst (Abb. 3.1-3). Man geht ferner davon aus, dass dadurch insgesamt die Intensität der kryo-pelago-benthischen Kopplung so geändert wird, dass dem Zooplankton insgesamt mehr Nahrung zur Verfügung stehen wird und dem Benthos weniger (PIEPENBURG 2005). Selbst wenn also die Gesamtproduktivität der wärmeren und weitgehend eisfreien arktischen Meere der Zukunft

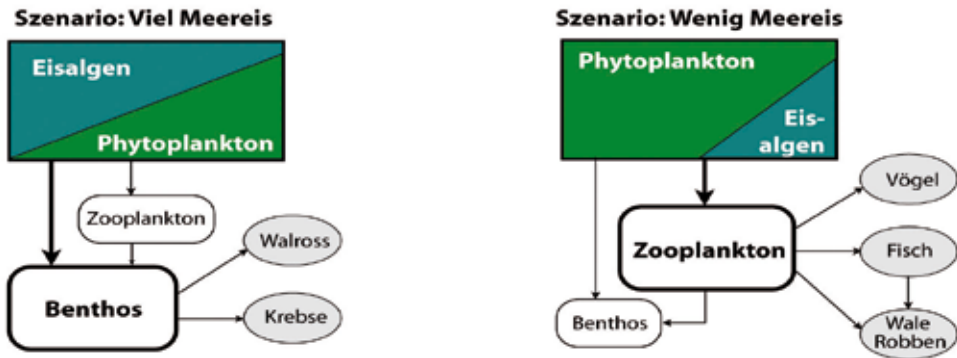


Abb. 3.5-3: Konzeptionelles Modell für grundlegende Veränderungen im Energieflussmuster durch Meereis-, Plankton- und Benthosgemeinschaften als Folge des klimabedingten Rückgangs des arktischen Meereises (nach CARROLL & CARROLL 2003).

steigen sollte, würde nach dieser Hypothese das Benthos wahrscheinlich in der Gesamtbilanz davon nicht profitieren, sondern – ähnlich wie die Meereisorganismen – zu den »Verlierern« der sich anbahnenden ökologischen Umwälzungen gehören. Nach anderen Prognosen dagegen soll eine höhere Gesamtproduktivität nach dem Rückgang des Eises nicht nur die pelagischen Gemeinschaften, sondern mittelbar auch die Meeresbodenfaunen positiv beeinflussen, zumindest auf den flachen, küstennahen Schelfen, wo die pelago-benthische Kopplung wegen der geringen Wassertiefe naturgemäß immer sehr eng ist.

Allerdings gibt es derzeit noch keine verlässlichen Daten, die das eine oder andere Szenario wissenschaftlich eindeutig untermauern. Und obgleich als gesichert gilt, dass die Arktis als ganzes sehr empfindlich auf die Klimaumwälzung reagieren wird, ist strittig, wie sensitiv das arktische Benthos gegenüber den sicherlich gravierenden Umweltveränderungen tatsächlich ist. Gerade der »unausgereifte« Charakter der Bodenfaunen – zurückzuführen auf die kurze und wechselvolle Geschichte der Arktis sowie den hohen Grad an ökologischen »Störungen« (s.o.; DAYTON 1990) – lässt den Schluss zu, dass die benthischen Gemeinschaften eher sehr »widerstandsfähig« und »elastisch« sind und relativ große ökologische Veränderungen abpuffern können.

Wie für den großräumigen Vergleich zwischen Arktis und Antarktis gilt auch auf einer kleineren räumlichen Skala die allgemeine Feststellung, dass die verschiedenen arktischen Bodenfaunen nicht in gleicher Weise von der Veränderung betroffen sind und nicht uniform darauf reagieren werden. So wird zum Beispiel die Fauna in den flachen Küstengewässern vor allem vom Verschwinden des Meereises und dem Zunehmen der Flusseinträge von Süßwasser, Trüb-, Nähr- und Schadstoffen beeinflusst werden. Außerdem ist mit

einer (zeitweisen) Zunahme von Gletscherkaltungen und somit auch der Eisbergstrandungen zu rechnen, die je nach Intensität und Häufigkeit diversitätssteigernd oder –erniedrigend wirken können (siehe unten). Die Gemeinschaften der tieferen, küsternen Schelfe und des zentralen Nordpolarmeers dagegen werden vor allem von der Verschiebung im Muster der kryo-pelago-benthischen Kopplung betroffen sein.

Die Ozeanerwärmung wird zudem zu einer Veränderung der Verbreitungsgebiete von Benthosarten und damit zu einer Einwanderung kälte-toleranter subarktischer und borealer Arten in bisher nicht besiedelte Regionen des Nordpolarmeeres führen. So werden sich zum Beispiel Miesmuscheln und atlantische Nutzfischarten wie der Kabeljau nach Norden in die Arktis ausbreiten und können als Bioinvasoren die einheimische arktische Fauna eventuell verdrängen bzw. die aufeinander eingespielten Gleichgewichte in den Nahrungsgefügen nachhaltig verändern (WASSMANN et al. 2011).

Außerdem ist auch zu beachten, dass in der Arktis neben den großräumig wirkenden, klimabedingten Veränderungen auch noch mit gravierenden regionalen anthropogenen Umwelteinflüssen zu rechnen ist, z.B. im Zusammenhang mit der Ausbeutung biologischer und mineralischer Ressourcen, Schiffsverkehr und Tourismus (Referenzen auf entsprechende Kapitel im vorliegenden Buch, z.B. Kap. 5.11 – SOMMERKORN, Kap 5.7 – LANGE, Kap. 5.5 – MEYER).

Antarktis

Das Klima ändert sich auf der Südhalbkugel derzeit am stärksten an der Antarktischen Halbinsel, wo vermehrt Warmluft in die Antarktis einfließt, die im Ozean zu einer weit über dem globalen Durchschnitt liegenden Erwärmung der oberen 50 m der Wassersäule führt. Zusätzlich gibt es Auftrieb von warmem Tiefenwasser und

weiter nördlich am Rand der Antarktis eine Verschiebung der »Antarktischen Konvergenz« nach Süden. Klima-Projektionen für größere Küstenbereiche reichen von nur leichtem Temperaturanstieg im Ozean bis zu folgen-schweren Veränderungen für das Meer- und Schelfeis.

Hinsichtlich der Umweltfaktoren steht die Flachwasserfauna nahezu ständig unter dem direkten Einfluss des Meereises. Als Folge einer wenigstens bedingten Anpassung an entsprechende Störungen und Schwankungen ist sie wenig divers und kann als relativ unempfindlich eingestuft werden. Die meisten Tiere können nämlich wegen ihrer mobilen Lebensweise bei ungünstigen Bedingungen ausweichen oder zerstörte Bereiche schnell wiedererobern.

Für mittleren Wassertiefen zwischen 50 und 150 m bleibt unklar, ob man nach wie vor von einer zirkumpolaren Artenverbreitung in vielen systematischen Großgruppen ausgehen muss oder ob die jüngsten Entdeckungen vieler Gruppen von Geschwisterarten grundsätzlich ein räumlich begrenztes Vorkommen der einzelnen Arten anzeigt. So wären viele Arten auch nur bei kleinräumiger Habitatschädigung, wie z.B. durch kommerzielle Langleinen- oder Schleppnetzfisherei, gefährdet.

Als nachhaltigste Folge des Klimawandels für Schelfhabitats muss eine Veränderung in der Schelfeis- und Eisbergdynamik angesehen werden. Am meisten ist dabei der Lebensraum unter Klima-bedingt weg-brechendem Schelfeis betroffen. Schon in den 1970er Jahren sind unter dem Ross-Schelfeis die weltweit wohl geringsten Stoffwechselraten in den Weltozeanen gemessenen worden, was auf sehr niedrige Nahrungs-zufuhr zurückgeführt wurde. In dem 1995 bzw. 2002 kollabierten Schelfeisgebiet Larsen A/B östlich der Antarktischen Halbinsel, dem größten seiner Art, ist 12 bzw. 5 Jahre danach eine ungewöhnlich hohe Anzahl von meio- und makrobenthischen Tiefseearten festgestellt worden, die der ehemaligen Schelfeis-bedeckten Situation zugeordnet werden muss. Gleichzeitig wurden Pionierarten in großen Mengen gefunden, die aber schon fünf Jahre nach ihrem Auffinden schon wieder verschwunden waren. Auch andere Arten zeigten eine auffällige Dynamik in ihrer Populationsentwicklung, wie z.B. Schwämme mit erfolgreicher Rekrutierung und deutlich messbarem Wachstum, Schlangensterne mit Populationschwankungen bei verschiedenen Ernährungstypen und Tiefseeegurken, die plötzlich massenhaft auftreten – ein Phänomen, das bei günstigen Nahrungsbedingungen auch aus der Arktis bekannt ist.

Schelfeisabbrüche bringen auch eine erhöhte Anzahl von Eisbergen und deren Strandungen mit sich. Alleine schon natürlicherweise wird das Benthos insbesondere zwischen 50 und 250 m Wassertiefe regel-

mäßig von auf Grund laufenden Eisbergen beeinflusst. Dieser Effekt ist an den Flanken von bodenmorphologischen Erhebungen, den so genannten »Eisbergbänken« besonders ausgeprägt. Dabei ist die Vernichtung der durch sessile Tiere gekennzeichneten Gemeinschaften besonders nachhaltig (Abb. 3.1.5-2b). Die dort häufigen Schwämme und Moostierchen stellen nämlich den kleinskaligen Lebensraum für eine reiche Begleitfauna dar, wie z.B. von Flohkrebse und Stachelhäuter, und sind teilweise langsamwüchsig, weshalb sich die Lebensgemeinschaften nur sehr langsam erholen (GUTT & PIEPENBURG 2003). Diese Fauna ist an die lokale Zerstörung ihres Lebensraumes »gewöhnt« und es kann sogar ein regional diversitätssteigernder Effekt gemessen werden, weil sich durch das Nebeneinander von verschiedenen Wiederbesiedlungsstadien ein »Flickenteppich« entwickelt.

Erste eigene Modellrechnungen zeigen, dass über-durchschnittliche Störungsraten durch strandende Eisberge eher zu einer weiteren Erhöhung als zu einer Erniedrigung der Lebensvielfalt führen. Dadurch wird nämlich der »Flickenteppich« zunächst noch »bunter« (Abb. 3.5-2b). Wo allerdings der Grenzwert liegt, bei dem ein solches System eventuell sogar zusammenbricht, ist noch unbekannt. Der Einsatz nicht-invasiver bildgebender Methoden (Unterwasservideo und- fotografie) trägt dem daraus folgenden Gebot, das antarktische benthische Ökosystem nur so viel, wie für die Forschung unbedingt nötig zu stören, bereits Rechnung. Möglicherweise ist das Benthos sogar weniger durch moderate klimabedingte Erhöhung von Störungsraten, sondern auch durch das Ausbleiben von Eisbergstrandungen gefährdet, weil ein solches Phänomen diversitätserniedrigend wirken kann. Dies ist vorstellbar, wenn regional zunächst viel Schelfeis abbricht, wie es zur Zeit an der Antarktischen Halbinsel beobachtet wird, und danach kaum noch Eisberge entstehen. In solchen Gebieten führt »neues« Algenwachstum zu einer zusätzlichen biologischen Aufnahme von Kohlendioxid im Meer und entsprechender Reduzierung dieses Klimagases in der Atmosphäre.

Die klimasensible Meereisdynamik hat, ebenso wie in der Arktis, einen beträchtlichen Einfluss auf die Primärproduktion in der lichtdurchfluteten obersten Wasserschicht. Prinzipiell entsteht hier die Nahrung für das auch in tieferem Wasser lebende Benthos, insbesondere für die vielen Suspensions- und Detritusfresser. Die Nahrungsverfügbarkeit kann einen grundsätzlichen Einfluss auf die Biodiversität haben: Ist sie so groß, dass es keine Nahrungskonkurrenz gibt, wirkt sie positiv auf die Diversität, da es nicht zur Verdrängung konkurrenzschwächerer Arten kommt; übersteigt sie einen

Schwellenwert und führt zu einer »Überdüngung« des Systems, kann sie einen negativen Effekt auf die Lebensvielfalt haben. Das antarktische Benthos ist aber, bedingt durch die Vereisungsgeschichte, an schwankende Nahrungsverfügbarkeit angepasst. Schließlich hat es auch die vielen Kaltzeiten unter vermutlich deutlich anderen Bedingungen überlebt. Deshalb ist bei zukünftigen moderaten Veränderungen in der Meereisdehnung und Nahrungsverfügbarkeit kein wesentlicher Effekt zu erwarten, außer bei deutlich spezialisierten oder besonders sensiblen benthischen Arten. Eine kritische Situation könnte allerdings durch Extremereignisse entstehen, wie zum Beispiel bei der bereits beobachteten Verschiebung des Größen- oder Artenspektrums der zoo- und phytoplanktischen Nahrungsorganismen oder beim Absinken ungewöhnlich großer Algenmengen, wenn sie die Filtrierapparate der Tiere verstopfen.

Zusätzlich wurden bei Schwammgesellschaften im Rossmeer, deren ausgewachsene Exemplare bisher als äußerst langsamwüchsig galten, jüngst außergewöhnlich erfolgreiche Rekrutierung von Jungtieren, schnelles Wachstum und auch flächendeckende lokale Sterblichkeit innerhalb hoher Konzentrationen gefunden. Diese erstaunliche Dynamik wird auf veränderte Nahrungszufuhr durch Veränderungen im Meereis, ausgelöst durch strandende Eisberge, zurückgeführt.

Dort, wo küstennah die Vergletscherung des Festlandes Klima-bedingt zurückgeht, sind durch erhöhten Eintrag terrestrischen Materials besonders negative Konsequenzen für das marine Ökosystem zu erwarten. Hier von wären die diversen und auf Wassertrübung sensibel reagierenden Suspensionsfresser am meisten betroffen.

Obwohl noch keine vermeintlich biologisch relevante Erwärmung in den meisten küstennahen antarktischen Gewässern gemessen wurde, soll hier trotzdem auf mögliche direkte Folgen hingewiesen werden. Solange die Erwärmung nicht mehr als 1–2 °C ausmacht, wie es die meisten Zukunftsprojektionen bis zum Ende dieses Jahrhunderts zeigen, ist auf Grund von Untersuchungen am Stoffwechsel von Beispielarten davon auszugehen, dass diese nicht nachhaltig leiden werden. Wenn die Erwärmung darüber hinausgeht, könnten die Populationen vieler Arten nach Süden oder in größere Wassertiefen ausweichen. Sehr kontrovers werden die kürzlichen Funde von Steinkrabben westlich der Antarktischen Halbinsel, die bisher überwiegend aus nördlicheren Breiten bekannt waren, diskutiert, weil sie mit ihrer räuberischen Ernährung eine Bedrohung für andere Benthostiere darstellen könnten. Wohl gibt es Hinweise für eine klimabedingte Ausdehnung ihres Vorkommens, aber keine Beweise, schon gar nicht für eine oft zitierte Invasion solcher Tiere aus nördlich angrenzenden Meeresgebieten.

Schlussbetrachtung

Polare Gemeinschaften gelten generell als sehr sensitiv – vor allem in der Antarktis – und können daher eine Indikatorfunktion hinsichtlich Umweltveränderungen einnehmen (ANONYMUS 2004). Die größeren Benthostiere sind dafür besonders geeignet. Im Gegensatz zu den meist kurzlebigen Planktonorganismen integrieren sie nämlich auf Grund ihrer längeren Lebensspanne Umweltbedingungen über Jahre bis vielleicht sogar Jahrhunderte. Insbesondere die am Boden festsitzenden (sessilen) Arten, z.B. Schwämme, aber auch die sich nur sehr begrenzt in ihrem erwachsenen Leben ausbreitenden Arten, z.B. Schlangensterne, müssen in ihren Habitaten ein Leben lang günstige Lebens- und Futterbedingungen vorfinden. Untersuchungen der Umweltänderungen und der Dynamik in den Verbreitungsmustern der Lebensgemeinschaften (»Biodiversity Change«) über so lange Zeitspannen sind im Rahmen üblicher Forschungsprojekte kaum durchführbar. Daher ist ein umfangreiches Monitoring von biologischen Strukturen und Funktionen in den Polargebieten dringend nötig. Isotopenanalysen in bestimmten Skelettelementen einzelner Tiere können zusätzlich Aufschluss über den Wandel der Lebens- und Futterbedingungen während des gesamten Lebens geben, weil diese Informationen in den Verhältnissen verschiedener stabiler Isotope (Kohlenstoff, Sauerstoff, Stickstoff) gespeichert werden. Klimafolgen können dann mit Hilfe räumlich expliziter, individuen-basierter Modelle am Computer simuliert werden. Hierzu sind allerdings ausreichende Basisdaten zu ökologischen Ansprüchen, Anpassungsmechanismen und der Lebensgeschichte von Schlüsselorganismen nötig.

Für die Antarktis fasst der »Antarctic Climate Change and the Environment«-Bericht (ACCE, TURNER et al. 2009) des »Scientific Committee on Antarctic Research« (SCAR) mit regelmäßigen Updates alle entsprechenden physikalischen und biologischen Ergebnisse zusammen. In Zukunft wird auch das neue SCAR-Biologie-Programm »Antarctic Thresholds - Ecosystem Resilience and Adaptation« (AnT-ERA) dazu maßgeblich beitragen. In der Arktis wurde 1991 das »Arctic Monitoring and Assessment Programme« (AMAP) und 2004 die Initiative »Arctic Ocean Diversity« (ArcOD) mit entsprechenden Zielen ins Leben gerufen. Inzwischen begreift man dabei die menschlichen Bewohner der arktischen Küsten ebenfalls als Teil der betroffenen Ökosysteme und nicht nur als deren außen stehende Nutzer – ein Ansatz, der die Prognosefähigkeit der klimagekoppelten ökologischen Modelle sicherlich erhöhen wird, da so auch wichtige anthropogene Einflussfaktoren adäquat berücksichtigt werden.

Literatur

- ANONYMUS (2004): Arctic Climate Impact Assessment (ACIA): Impacts of a warming Arctic. Cambridge University Press, Cambridge, 139 S.
- BOETIUS, A., J. GUTT, E. HELMKE & B. MEYER (2013): Leben im und unter dem Eis. In: BECK, E. (Hrsg.) Die Vielfalt des Lebens: Wie hoch, wie komplex, warum? Wiley-VCH, Weinheim, 148-160.
- CARROLL, M. K. & J. CARROLL (2003): The Arctic Seas. In: BLACK K.D. & G. B. SHIMMIELD (Hrsg.) Biogeochemistry of Marine Systems. Blackwell, Sheffield, 27-156.
- CLARKE, A. & N. M. JOHNSTON (2003): Antarctic marine benthic diversity. *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.* 41, 47-114.
- DAYTON, P. K. (1990): Polar benthos. In: SMITH, W.O. (Hrsg.) Polar oceanography, Part B: Chemistry, biology, and geology. Academic Press, San Diego, 631-685.
- GREBMEIER, J. M. & J. P. BARRY (1991): The influence of oceanographic processes on pelagic-benthic coupling in polar regions: A benthic perspective. *J. Mar. Syst.* 2, 495-518.
- GUTT, J. & D. PIEPENBURG (2003): Scale-dependent impacts of catastrophic disturbances by grounding icebergs on the diversity of Antarctic benthos. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 253, 77-83.
- GUTT, J., G. HOSIE & M. STODDART (2010): Marine Life in the Antarctic. In: MCINTYRE, A. D. (Hrsg.), Life in the World's Oceans: Diversity, Distribution, and Abundance. Blackwell Publishing Ltd., Oxford, 203-220.
- HEMPEL, G. & D. PIEPENBURG (2010): Nord- und Südpolarmeer im Klimawandel. Ein biologischer Vergleich. *Biologie in unserer Zeit* 40, 386-395.
- PIEPENBURG, D. (2005): Recent research on Arctic benthos: common notions need to be revised. *Polar Biol.* 28, 733-755. doi:10.1007/s00300-005-0013-5.
- RIEBESELL, U. & K. SCHULZ (2011). Auswirkungen der Ozeanversauerung auf marine Lebensprozesse. In: LOZAN, J. L., GRABL, H., KARBE, L., & K. REISE (Hrsg.), Warnsignale Klima: Die Meere. Verlag: Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg, 173-177.
- TRENBERTH, K. E., JONES, P. D., AMBENJE, P. et al. (2007): Observations: surface and atmospheric climate change. In: SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M., CHEN, Z., MARQUIS, M., AVERYT, K.B., TIGNOR, M. & H.I. MILLER (Eds), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- TURNER, J., R. BINDSCHADLER, P. CONVEY, G. DI PRISCO, E. FAHRBACH, J. GUTT, D. HODGSON, P. MAYEWSKY & C. SUMMERHAYES (2009): Antarctic Climate Change and the Environment. SCAR, Scott Polar Research Institute, Cambridge; 526 S.
- WASSMANN, P., DUARTE, C. & S. AGUSTÍ (2011): Footprints of climate change in the Arctic marine ecosystem. *Global Change Biology* 17, 1235-1249.

Kontakt:

Prof. Dr. Dieter Piepenburg
 Institut für Ökosystemforschung, Universität Kiel
 dpiepenbur@ecology.uni-kiel.de
 Prof. Dr. Julian Gutt
 Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum
 für Polar- und Meeresforschung
 julian.gutt@awi.de