

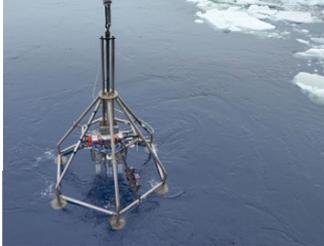
SONDERDRUCK

aus

2 | 2023

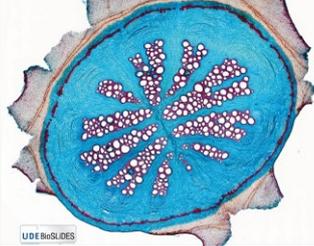
VBio

Verband | Biologie, Biowissenschaften
& Biomedizin in Deutschland



ANTARKTIS-
FORSCHUNG

Ökosystemfunktionen



VIRTUELLE
MIKROSKOPIE

Datenbank für die Lehre



MODELLTECHNIK

3D-Druck
in der Biologie

BIOLOGIE

IN UNSERER ZEIT

Wenn
Schnecken
Chloroplasten
rauben





Die Antarktis ist bekannt für ihre gigantischen Tafelberge (wie dieser im Hintergrund). Sie stammen von den Gletschern des weißen Kontinents und bestehen aus Süßwasser. Meereis hingegen ist gefrorenes Salzwasser. Es entsteht und vergeht im Wechsel der Jahreszeiten. Je nach Region kann das Meereis aber auch über Jahre bestehen und mehrere Meter dick werden.
Foto: Gritta Veit-Köhler.

Meereis bedeutet Leben am Meeresboden

Ökosystemfunktionen im Südpolarmeer

HEIKE LINK | GRITTA VEIT-KÖHLER

Die Lebewesen am Meeresboden verwerten das, was aus dem Wasser zu ihnen in die Tiefe gelangt. Sie ernähren sich vom organischen „Abfall“ und setzen Nährstoffe frei. Diese Nährstoffe wiederum dienen Algen als Dünger. So hält die Gemeinschaft am Meeresboden den ökologischen Kreislauf von Produktion und Abbau in Schwung. Den Abbau und die damit verbundenen biogeochemischen Stoffflüsse nennen wir „Remineralisierung“.

Dieser Beitrag gehört zu unserer Serie über Forschungsprojekte aus dem DFG-Schwerpunktprogramm 1158 „Antarktisforschung“.

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 146 erklärt.

Ökosystemfunktionen sind Prozesse und Wechselwirkungen in einem Ökosystem, die von Produzenten, Konsumenten und Destruenten angetrieben werden. Diese Kategorien umfassen alle Lebensformen: phototrophe Mikroorganismen und Pflanzen, heterotrophe Mikroorganismen und Tiere sowie Pilze. Alle diese Organismen nutzen und verbrauchen organische und anorganische Substanzen auf verschiedene Weisen, bauen sie in ihre Körper ein und geben sie in anderer Form wieder an die Umgebung ab. Daher sind Ökosystemfunktionen abhängig von der Vielfalt der Lebensgemeinschaften in einem Lebensraum [1]. Ökosystemfunktionen wiederum sind die Grundlage für Ökosystemleistungen, von denen wir alle profitieren und auf die wir als Menschheit angewiesen sind [2]. So liegen für uns Leistung und Nutzen der Meere in der Produktion von Sauerstoff und der Aufnahme und Speicherung von Kohlendioxid. Wir können aus den

Meeren Lebensmittel gewinnen, und biogene Strukturen wie Riffe und Mangrovenwälder dienen dem Küstenschutz. Nicht zuletzt haben Meere für uns einen großen Erholungswert. Angesichts der globalen Umwälzungen verändern sich aber auch die Ökosystemleistungen weltweit. Daher müssen wir die Rolle der biologischen Vielfalt für Ökosystemfunktionen verstehen, den Einfluss von Veränderungen der Lebensgemeinschaften untersuchen [3] und die Biodiversität bewahren. Polare Ökosysteme sind dabei von besonderem Interesse, da sie sich durch den Klimawandel schneller und stärker verändern als die Ökosysteme in anderen Regionen [4–6]. Nicht zuletzt bietet neben dem Kampf gegen die Klimaerwärmung die Einrichtung von Meeresschutzgebieten die große Chance, Lebensgemeinschaften, ihre Funktionen und damit den Nutzen, den sie für uns haben, langfristig zu schützen.

Mit dem Meereis fängt alles an

Weitläufig bekannt ist, dass das Meereis eine wichtige Funktion für fast alle großen Tiere in der Antarktis hat: Der Antarktische Krill lebt und frisst unter dem Meereis und bildet mit seiner immensen Biomasse die Nahrungsgrundlage für Wale, viele Robben und Seevögel, vor allem Pinguine. Aber auch die Fauna des Meeresbodens der Antarktis braucht Nahrung. Tiere, die in lichtarmen tieferen Regionen leben, sind auf organisches Material „von oben“ angewiesen. Pflanzliches und tierisches sinkt auf den Grund: Algen, tote Tiere, Kotballen. Oft wird dieser „Abfall“ auf dem Weg in die Tiefe mehrfach genutzt, gefressen und zersetzt. Die Grundlage der Nahrungsnetze im Südozean sind größtenteils Mikroalgen. Sie leben als Phytoplankton im freien Wasser [7] oder sind Eisalgen, die das Meereis als Lebensraum nutzen (Abbildung 1).

Die Primärproduktion, die von den Mikroalgen geleistet wird, hängt in zweifacher Hinsicht von der Eisbedeckung ab. Zum einen sind es die Eisalgen selbst, die sich ansiedeln und vermehren können, solange das Meereis existiert. Von ihnen ernähren sich tierische Gemeinschaften, die sich im und direkt unter dem Meereis entfalten. Schmilzt das Meereis, verschwindet ihr Lebensraum, und es sinken nicht nur die Eisalgen zu Boden, sondern auch die Überreste der Tiere und ihre Exkremente. Zum anderen bildet das abschmelzende Meereis die Grundlage für die Vermehrung der Mikroalgen im freien Wasser (Phytoplankton). Da bei der Entstehung des Meereises hochkonzentriertes Salzwasser durch Solekanälchen abfließt, ist das Meereis selbst weniger salzhaltig als das umgebende Meerwasser. Schmilzt es, so bildet das leichtere, „süßere“ Schmelzwasser eine Deckschicht auf dem Meer. Dadurch entsteht eine stabile Schichtung in der Wassersäule, die eine Algenblüte ermöglicht.

Der Grad und die Variabilität der Eisbedeckung wirken sich also direkt auf die Lebewesen am Meeresboden aus [8]. Wenn weniger oder gar kein Meereis entsteht, dann fehlen die Eisalgen als Nahrungsquelle und es kommt im turbulenten Südozean seltener zu einer stabilen Schichtung. Dadurch treten auch ausgedehnte Algenblüten im freien Wasser seltener auf. Auch die entgegengesetzte Situation ist für die Lebewesen am Meeresboden nicht vorteilhaft: In manchen Gebieten der Antarktis schmilzt das Meereis über mehrere Jahre überhaupt nicht [9]. Dann werden keine Eisalgen freigesetzt und für eine nennenswerte Blüte von Mikroalgen im freien Wasser fehlt das Licht. In beiden Fällen kommt es am Meeresboden zu einem Mangel an Nahrung und die Fauna muss abwarten, bis wieder etwas von oben kommt. Das kann plötzlich und unerwartet passieren. Das Meereis reißt auf, eine ► Phytoplanktonblüte entwickelt sich innerhalb kurzer Zeit und vergeht wieder, die Mikroalgen verklumpen und sinken zusammen mit abgestorbenen Organismen und ihren Kotballen in die Tiefe (Abbildung 2, siehe Phase 1).



ABB. 1 Eisalgen leben an der Unterseite und in den Solekanälchen des Meereises. Die Schollen auf dem Foto wurden von der POLARSTERN bei der Fahrt durch das Packeis umgedreht. Dadurch ist die von den Eisalgen braun-gelblich gefärbte Unterseite sichtbar. Schmilzt das Meereis, bedeutet das Nahrung für die Tiere am Meeresboden. Foto: Gritta Veit-Köhler.

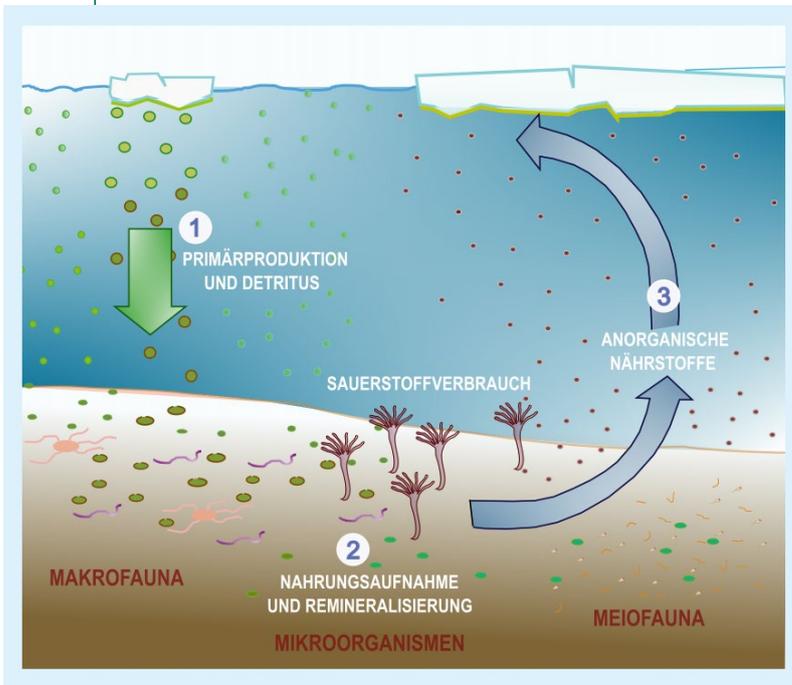
Was passiert am Meeresboden?

Der Nahrungsregen von oben bringt die Fauna auf Trab: Sauerstoffmessungen direkt am Meeresboden zeigen, dass die verfügbare Nahrung sehr schnell gefunden, gefressen und umgesetzt wird [10]. Die Makrofauna ist schon durch ihre Körpergröße auffällig (> 0,5 mm; Definition und Lebensweise siehe [11]), und ihre Vertreter verbrauchen rasch einiges an Sauerstoff, wenn sie Nahrung in Energie umwandeln ([12] Abbildung 2, siehe Phase 2). Auch die zahlenmäßig weit überlegene Meiofauna (Tiere mit einer

IN KÜRZE

- **Ökosystemfunktionen** sind Prozesse und Wechselwirkungen in einem Ökosystem. Sie **sind abhängig von den Umweltbedingungen und den Lebewesen**, die in einem Ökosystem vorkommen.
- Das **Meereis beeinflusst die Primärproduktion im freien Wasser und beheimatet Eisalgen**, die zusätzliche Nahrung für die Tiere am Meeresboden sind, wenn das Meereis schmilzt.
- Die **Lebewesen am dunklen Meeresboden leben von allem, was von oben herunterrieselt: einzellige Algen, tote Tiere, Kotballen.**
- **Im Labor können Nahrungspulse simuliert und die Reaktion der Lebewesen im Sediment untersucht werden.**
- **Gemeinschaften am Meeresboden verbrauchen Sauerstoff in Abhängigkeit von der Futtermenge**, die ihnen zur Verfügung steht. Sie scheiden **Endprodukte** aus, die **neuer Dünger** für die Nahrungskreisläufe sind.
- Die Zusammensetzung der **Gemeinschaften am Meeresboden ist abhängig von der Eisbedeckung an der Oberfläche**. Klimaveränderungen beeinflussen regionale Gegebenheiten.

ABB. 2 | NAHRUNGS- UND NÄHRSTOFFKREISLAUF ZWISCHEN EIS UND MEERESBODEN



Primärproduktion und Detritus (1): Eisalgen und Phytoplankton sind Primärproduzenten im Südozean. Zusammen mit toten Tieren und Kotballen sinken sie zum Meeresboden. **Nahrungsaufnahme und Remineralisierung (2):** Heterotrophe Mikroorganismen, Pilze und Tiere der Meiofauna (z. B. Fadenwürmer, Ruderfußkrebse) und Makrofauna (z. B. Borsten- und Röhrenwürmer, Schlangensterne) zersetzen die Nahrung und verbrauchen Sauerstoff. **Anorganische Nährstoffe (3):** Bei der Remineralisierung werden anorganische Nährstoffe (Mineralstoffe) wie Ammonium, Nitrat, Phosphat und Kieselsäure als Nebenprodukte freigesetzt. Diese dienen als Dünger für die Primärproduktion an der Oberfläche. Grafik (erstellt mit Inkscape 1.1): Gritta Veit-Köhler.



ABB. 3 Bis wir mit dem Forschungseisbrecher POLARSTERN im Packeis und somit in ruhigen Gewässern angekommen sind, müssen wir die Westwindzone der „Roaring Forties“ und „Furious Fifties“ zwischen 40 und 60 Grad südlicher Breite durchqueren. Wellen von bis zu 8 Metern Höhe sind dort keine Seltenheit. Foto: Gritta Veit-Köhler.

Körpergröße von 0,32 bis 0,5 mm, s. [11]) reagiert: Die Tiere bewegen sich durch das Sediment nach oben zur Nahrung und viele sind nach einem Algenregen näher an der Sedimentoberfläche zu finden als vorher [13]. Jeder ►Nahrungspuls kurbelt den Stoffwechsel der Fauna am Meeresboden an. Auch wenn sie nicht sofort mit einer deutlichen Erhöhung ihrer Biomasse durch Wachstum oder Reproduktion reagieren [12, 13], so können sie doch Reserven anlegen und die Voraussetzungen für den Fortbestand des Lebens schaffen. Mikroorganismen wie Bakterien, andere Einzeller und Pilze sind ebenfalls größtenteils abhängig von dem, was von oben kommt.

Aber das ist nur ein Teil der Geschichte. Man könnte den Meeresboden auch als die Kompostierungsanlage des Meeres bezeichnen. Die Organismen verwerten „Abfall“, aber sie erzeugen damit nicht nur Energie und Biomasse und verbrauchen Sauerstoff. Beim Zerlegen der Nahrung scheiden Tiere und Mikroorganismen Stoffwechselprodukte aus, die wichtige wiederverwendbare „Rohstoffe“ sind [14, 15]. Diesen Vorgang nennen wir Remineralisierung. Anorganische Nährstoffe wie Ammonium, Nitrat, Phosphat und Kieselsäure fungieren wie der Dünger, den wir in Form von Kompost auf unsere Gartenbeete streuen. Und hier schließt sich der Kreis, denn diese Nährstoffe sind die Grundlage für die Primärproduktion der Mikroalgen weit oben im freien Wasser und im Meereis (Abbildung 2, siehe Phase 3).

Wir gehen auf Expedition

Je nach geplantem Expeditionsverlauf sticht der Forschungseisbrecher FS POLARSTERN von Kapstadt (Südafrika) oder von Punta Arenas (Chile) Richtung Süden ins Meer (Abbildung 3). An Bord sind neben der Besatzung knapp 50 Wissenschaftler/-innen aus verschiedenen Nationen mit ganz unterschiedlichen Fragestellungen und Fachrichtungen von Meteorologie über Ozeanographie und Geologie bis zur Biologie. Im Frachtraum transportiert die POLARSTERN das Arbeitsmaterial, fachgerecht und sicher in Aluminiumkisten verpackt, durch den Zoll gebracht und bereits Monate vor Abfahrt am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven abgegeben. In Containern verstaut warten Probengefäße, Messtechnik, Filtersysteme und Laborbedarf auf ihren Einsatz.

Ziel unserer drei Expeditionen war das Weddellmeer, das größte der Randmeere, die den antarktischen Kontinent umschließen (Abbildung 4). In mehreren Gebieten des nordwestlichen und des südöstlichen Weddellmeeres wollten wir in unserem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Projekt untersuchen, wie sich die Dauer der Meereisbedeckung auf die Zusammensetzung der Gemeinschaften am Meeresboden auswirkt und wie diese wiederum die Ökosystemfunktionen bestimmen. Dazu haben wir Sedimentproben vom Meeresboden genommen (Abbildung 5) und in Kühlcontainern an Bord der POLARSTERN ökologische Experimente durchgeführt.

Vom Meeresboden ins Kühllabor

Weil die meisten der kleineren Tiere im obersten Zentimeter des Sedimentes leben, wird an Bord der POLARSTERN der Multicorer (MUC) eingesetzt, der Proben vom Meeresboden mit ungestörter Sedimentoberfläche sammeln kann (Abbildung 5). Dieses Gerät ist je nach Version mit acht oder mehr Polycarbonatrohren ausgestattet, die nach der Landung auf dem Meeresboden langsam in das Sediment gedrückt werden. Wird der MUC angehoben, schließen Deckel die sedimentgefüllten Rohre oben und unten ab. Dann wird das Gerät mit der Winde wieder an Deck gehievt und die Stechrohre werden entnommen und ins Kühllabor gebracht.

Einige der Fragen, die wir uns über die Remineralisierung am antarktischen Meeresboden stellen, können wir bereits an Bord beantworten (siehe unten). Im dunklen Kühlcontainer verschließen wir die MUC-Rohre mit luftdichten Deckeln und „inkubieren“ sie bei 0 bis +2 Grad Celsius. So können wir den Sauerstoffverbrauch der Organismen im Sediment verfolgen. Außerdem nehmen wir regelmäßig Wasserproben für die Nährstoffanalyse, wobei sehr sauber gearbeitet werden muss, um Kontaminationen zu vermeiden. Am Ende wird das gesamte Sediment in horizontale Scheiben geschnitten, fixiert und mitsamt der Fauna ins heimische Labor mitgenommen (Abbildung 6).

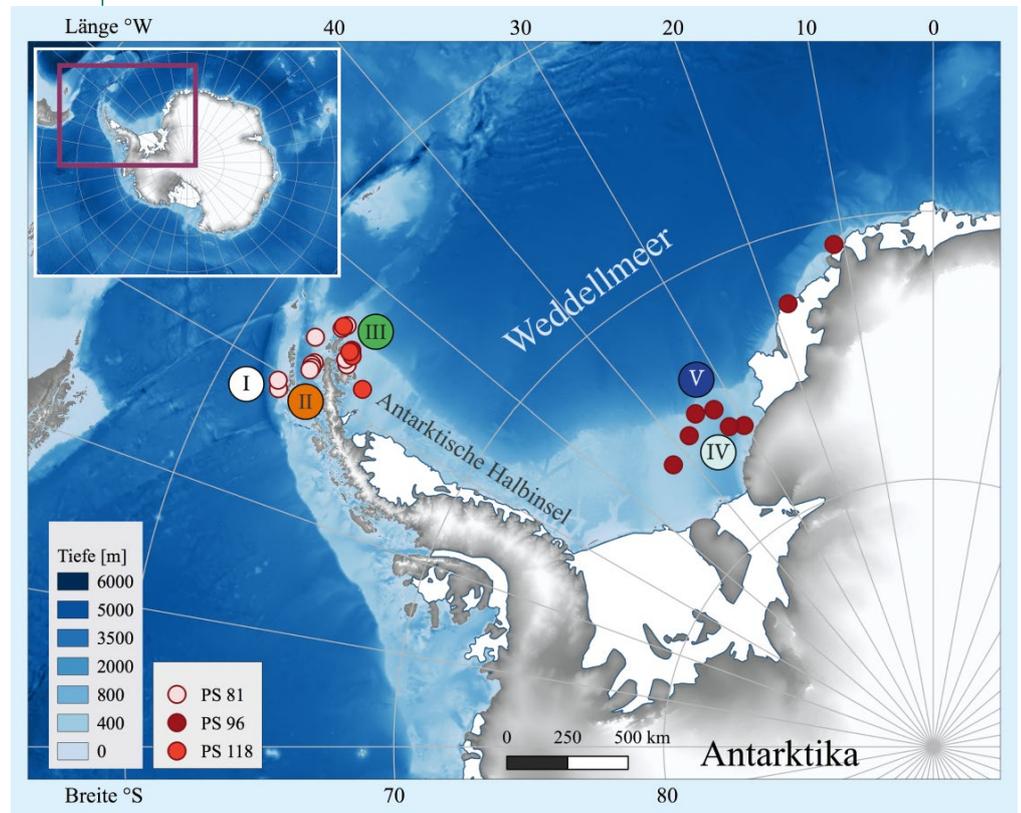
Nahrung bedeutet Atmung

In den luftdicht verschlossenen Inkubationsrohren verarbeiten die Tiere im Sediment weiter die Nahrung, die auf dem ausgestochenen Stück Meeresboden liegt, nur dass wir nun kontrollieren, was passiert: Alle vier Stunden wird die Sauerstoffkonzentration und die Temperatur gemessen, um später den Sauerstoffverbrauch in den Systemen zu berechnen. Die Sauerstoffmessungen werden mit einem optischen Messverfahren durchgeführt, bei dem die Röhren nicht geöffnet werden müssen. Wir gehen aber noch einen Schritt weiter und simulieren in einigen der Inkubationsrohre einen Nahrungspuls, einen „Regen“ von organischem Material, gerade so als ob das Meereis Eisalgen freigesetzt oder in der Wassersäule eine Phytoplanktonblüte stattgefunden hätte. Dazu geben wir zuvor im Labor kultivierte und gefriergetrocknete Mikroalgen in die

Rohre – und das in einer Menge, die auch unter natürlichen Umständen auf die Sedimentoberfläche treffen könnte. Am „Meeresboden“ ist man vorbereitet und die Reaktion folgt auf den Fuß: Die Organismen veratmen bei Nahrungszugabe den vorhandenen Sauerstoff deutlich schneller als in den Kontrollproben ohne zusätzliche Algen. Es wird gefressen, und das ohne eine nennenswerte Anlaufphase (Abbildung 7).

Um die Unterschiede und die Variabilität des Sauerstoffverbrauches zwischen einzelnen Inkubationsrohren bestimmen zu können, werden nicht die absoluten Sauerstoffmengen verglichen, sondern die Steigungen (hier eigentlich die „Gefälle“, also die negativen Steigungen) der Geraden, die durch die einzelnen Messpunkte gelegt werden. So kann man sehen, dass der Sauerstoffverbrauch bei Algenzugabe höher ist (Abbildung 7, grüne Geraden zeigen schnellere Abnahme) als bei den Kontrollinkubationen ohne Algenzugabe (blaue Geraden haben ein geringeres Gefälle). Generell wird die Verschiebung (Aufnahme,

ABB. 4 | UNTERSUCHTE STATIONEN IM WEDDELLMEER



Auf den drei POLARSTERN-Expeditionen PS 81 (2013), PS 96 (2016) und PS 118 (2019) konnten wir an einer Vielzahl von Stationen (farbige Kreise) die Aktivitäten der Bewohner des Meeresbodens erforschen. Dazu gehörten Gebiete mit gar keiner bis geringer Eisbedeckung (I, Drake Passage; II, Bransfieldstraße), mit saisonal variierender Eisbedeckung (III, Nordwestliches Weddellmeer) und mit sehr ausgeprägter und teilweise dauerhafter Eisbedeckung (IV+V, Südöstliches Weddellmeer). Die Farben der Kategorien I-V finden sich in den Ergebnissen wieder, die in Abbildung 10 dargestellt werden. Das rote Rechteck (oben links) zeigt den gewählten Ausschnitt der Detailkarte an. Die Karte wurde mit dem Programm QGIS und Daten von GEBCO und naturalearthdata.com erstellt. Karte: Leon Hoffman.

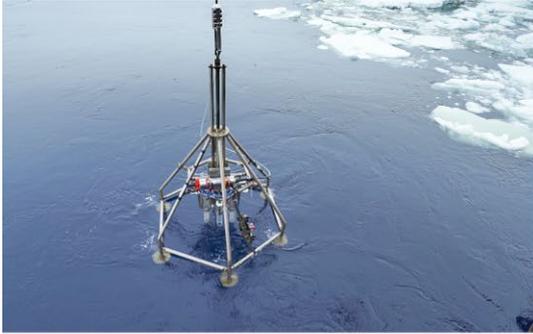


ABB. 5 Der Multicorer (MUC) ist ein Gerät, mit dem Proben vom Meeresboden genommen werden. Wenn der MUC auf dem Grund landet, werden seine Stechrohre langsam ins Sediment gedrückt. Beim Anheben werden sie automatisch zuerst oben und dann unten verschlossen. An Bord werden die Proben entnommen und direkt ins Labor gebracht. Fotos: Gritta Veit-Köhler (o. l., r.), AWI, SENCKENBERG, Universität Kiel (u. l.).



Umbau, Abgabe) von chemischen Verbindungen an der Grenzschicht von Sediment und Wasser ► „Flux“ (Durchfluss) genannt. Und die Sauerstofffluxe variieren nicht nur zwischen einzelnen Proben von einem Standort, sondern sie unterscheiden sich noch deutlicher zwischen Inkubationen, die wir an unterschiedlichen Stationen im Weddellmeer durchgeführt haben (Abbildung 4). Das hängt wiederum mit den Tiergemeinschaften (s. u. „Ein Blick in die Röhre“) und den Umweltvoraussetzungen zusammen, die sich je nach Eisbedeckung in den von uns verglichenen Regionen deutlich unterscheiden.

Remineralisierung als Grundlage für die Produktion

Bei vielen ökologischen Studien wird der Sauerstoffverbrauch nicht einbezogen. Die Messungen sind zu aufwändig. Noch seltener werden Fluxe von Nährstoffen untersucht.

ABB. 6 Die Arbeiten im +2 Grad Celsius kalten Laborcontainer an Bord sind vielfältig: Die MUC-Rohre sind luftdicht verschlossen (u. l.). In den Deckeln sind kleine Motoren eingebaut, die mit Magnetrührern das Wasser über dem Sediment vorsichtig verwirbeln, damit der vorhandene Sauerstoff gleichmäßig verteilt wird. Regelmäßig werden Wasserproben für die Nährstoffanalyse entnommen (o. l.) und die Temperatur gemessen (o. r.). Am Ende werden die Rohre geöffnet, Unterproben des Sediments für Pigmentanalysen gezogen (u. r.) und der gesamte Kern in Scheiben geschnitten und fixiert.

Fotos: Gritta Veit-Köhler.

Um sie zu messen, müssen Wasserproben entnommen werden. Dazu wird ein kleines, ansonsten verschlossenes Loch im Deckel der Inkubationsrohre geöffnet, eine Wasserprobe entnommen und dieselbe Menge Meerwasser wieder aufgefüllt. Nährstoffe sind empfindliche, oft reaktive Moleküle, die aber auch weit verbreitet sind. Daher ist die Handhabung der Proben an Bord schwierig: Weil besonders sauber gearbeitet werden muss, werden die Spritzen vor ihrem Gebrauch mit Säure gewaschen. Damit es nicht zu weiteren Umsetzungsprozessen kommt, müssen die Proben bei -80°C gelagert und bei dieser Temperatur auch bis ins Institut nach Hause transportiert werden. Die Analyse von Ammonium (NH_4^+) ist besonders kompliziert, da es besonders schnell abgebaut wird und die Proben jederzeit kontaminiert werden könnten. Also muss dieser Nährstoff direkt an Bord gemessen werden.

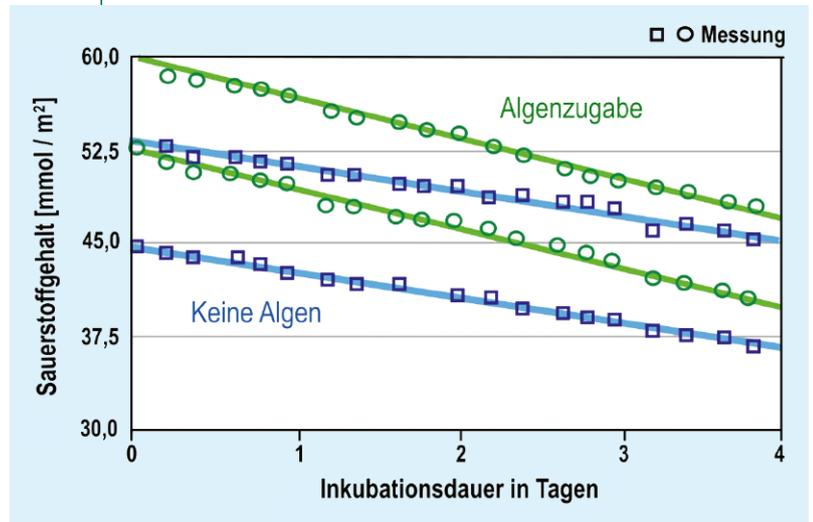
Ammonium ist ein Abbauprodukt des Proteinstoffwechsels und wird von Bakterien über Nitrit (NO_2^-) zu Nitrat (NO_3^-) oxidiert. Insbesondere Nitrat ist ein wichtiger Stickstofflieferant für die Primärproduktion. Stickstoff (N) ist in allen Aminosäuren, den Bausteinen der Proteine, als sogenannte Amino-Gruppe ($-\text{NH}_2$) sowie in den Nucleinsäuren der Erbsubstanz enthalten. Einmal durch Auftrieb vom Meeresboden ins antarktische Oberflächenwasser gelangt (Abbildung 2: Phase 3), wird Nitrat schnell von den Mikroalgen genutzt und während des nordwärts gerichteten Strömungstransports im Weddellmeer verbraucht. So gibt es in den verschiedenen Regionen der Antarktis unterschiedliche Konzentrationen von Nitrat im oberflächennahen Wasser [16]. Der Nährstoff Phosphat (PO_4^{3-}) liefert unter anderem die Bestandteile des Adenosintriphosphats (ATP), das der universelle Energieträger in den Zellen aller Organismen ist. Die Kieselsäure ($\text{Si}(\text{OH})_4$) wiederum bildet den Hauptbestandteil der strukturbildenden, siliziumhaltigen Gerüstmoleküle der als Primärproduzenten wichtigen Kieselalgen (Diatomeen), aber auch von Strahlentierchen (Radiolarien) und Glasschwämmen (Hexactinellida).

Mit der Analyse der Nährstoffe können wir die Effektivität und die Remineralisierungsraten von verschiedenen ► Benthosgemeinschaften beurteilen. Die Ökosystemfunktionen des Weichbodens und seiner Gemeinschaften unterscheiden sich zwischen den von uns untersuchten Stationen und Regionen. Die Vielfalt der Arten, die Anzahl der Individuen und ihre Funktion im Ökosystem Meeresboden sind wichtige Faktoren für den Sauerstoffverbrauch und die Nährstoffflüsse an der Sediment-Wasser-Grenzfläche [15, 17].

Ein Blick in die Röhre

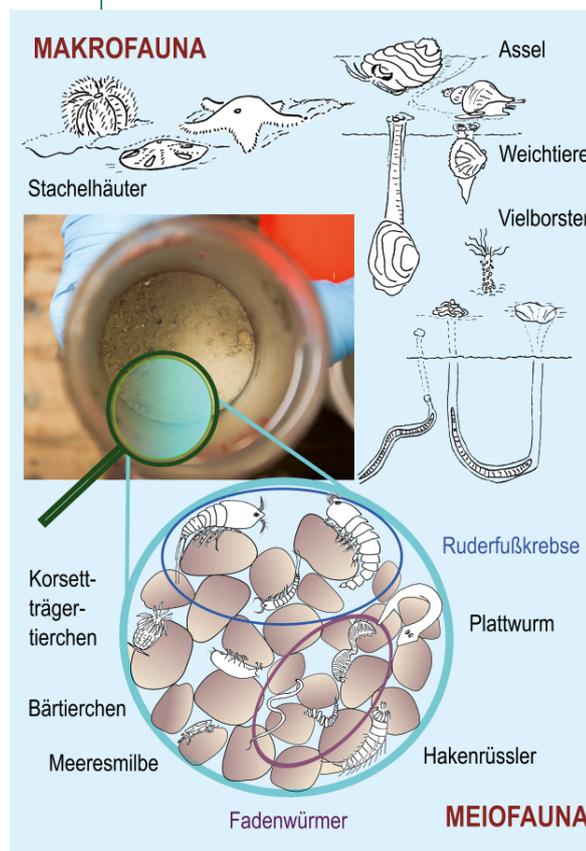
Welche Organismen besiedeln nun die Weichböden der Antarktis und sorgen für die Remineralisierung? Neben den Mikroorganismen leben im und auf dem Sediment hauptsächlich Tiere, die zu zwei Größenklassen gehören, nämlich der Meiofauna und der Makrofauna (Abbildung 8). Zur Makrofauna gehören Stachelhäuter (Echinodermata)

ABB. 7 SAUERSTOFFVERBRAUCH VON BENTHONISCHEN GEMEINSCHAFTEN



Während der mehrtägigen Inkubation im Kühlcontainer nimmt der Sauerstoffgehalt des Wassers in den sedimentgefüllten MUC-Rohren stetig ab, weil die im Sediment lebenden Organismen fressen und dabei Sauerstoff verbrauchen. Um einen Nahrungspuls aus dem freien Wasser zu simulieren, geben wir zusätzlich Mikroalgen in einige der Inkubationsrohre. In diesen Rohren nimmt der Sauerstoffgehalt im Wasser schneller ab (grüne Geraden) als in den Kontrollproben (blaue Geraden). Grafik (erstellt mit Inkscape 1.1): Gritta Veit-Köhler.

ABB. 8 MAKROFAUNA UND MEIOFAUNA IM SEDIMENT



Auf den ersten Blick ist im MUC-Rohr wenig zu sehen. Aber das Leben tobt im Sediment: Makrofauna ist mit einer Körperlänge ab 0,5 cm nicht unbedingt „groß“ und Meiofauna verbirgt sich ohnehin größtenteils in den oberen Zentimetern des Sediments. Grafik (erstellt mit Inkscape 1.1): Gritta Veit-Köhler.

wie Seeigel, Seegurken, Seesterne und Schlangensterne, die auf oder dicht unter der Sedimentoberfläche leben. Wie die Krebstiere (Crustacea: Asseln, Flohkrebse, Scherenasseln) sind sie frei beweglich. Viele Muscheln leben eingegraben im Sediment, während die meisten Schnecken auf dem Meeresboden herumkriechen (Weichtiere: Mollusca). Aber die weitaus häufigsten Tiere der Makrofauna sind Annelida (Ringelwürmer) mit ihren Untergruppen Vielborster (Polychaeta) und Wenigborster (Oligochaeta). Von räuberischen, frei lebenden Arten bis zu fest-sitzenden Formen, die Röhren im oder auf dem Sediment bauen und sich von Detritus (totem organischen Material) ernähren, ist alles dabei. Die Meiofauna wird dominiert von Fadenwürmern (Nematoda), gefolgt von Ruderfußkrebse (Copepoda), Hakenrüsslern (Kinorhyncha) und Muschelkrebse (Ostracoda). Sie alle leben auf oder im Sediment und auch hier gibt es von räuberischen Formen bis zu Resteverwertern alle Varianten, die die Nahrungsökologie zu bieten hat.

Es ist schon länger bekannt, dass sich Makrofauna- und Meiofaunagemeinschaften in der Antarktis je nach Eisbedeckung unterscheiden und verändern [11, 18, 19] und jeweils für sich eine wichtige Rolle bei der Remineralisierung von organischem Material spielen [20]. Bislang existierten aber keine Studien, in denen Tiere beider Größenklassen (Meio- und Makrofauna) gemeinsam untersucht wurden. Ebenso wenig ist bekannt, welchen Anteil Tiere

unterschiedlicher Körpergröße an den Ökosystemleistungen der Weichböden der Antarktis haben. Das wollten wir ändern.

Für derart umfangreiche Studien werden auch schon einmal eine halbe Million Tiere bestimmt und gezählt (Abbildung 9). Unsere Analysen haben ergeben, dass Meiofauna- und Makrofaunagemeinschaften sich zwischen Gebieten mit unterschiedlichen Meereisbedeckungen unterscheiden (Abbildung 10). Gemeinschaften aus Regionen mit geringer Eisbedeckung (Abbildungen 4, 10; Regionen I und II) und aus Gebieten mit fast dauerhafter Eisbedeckung (IV, V) ähneln sich, während Gemeinschaften mit sehr hohen Individuenzahlen nur in Regionen mit stark schwankenden Eisbedeckungsmustern (III) zu finden sind [21]. Das hängt damit zusammen, dass durch das regelmäßige Öffnen und Schließen der Eisdecke die besten Voraussetzungen für eine hohe Nahrungsverfügbarkeit am Meeresboden geschaffen werden. Die mittlere Eisbedeckung in den Sommermonaten – gerechnet über ein oder mehrere Jahre – spielt eine wichtige Rolle für die Ausprägung der Gemeinschaften. Für die Meiofauna ist neben der Eisbedeckung im vorangegangenen Sommer auch die langfristige Eisentwicklung über mehrere Jahre wichtig. Die Struktur der Makrofaunagemeinschaften wird neben der Nahrungssituation lediglich von der Dauer der Eisbedeckung im vorangegangenen Sommer beeinflusst [21].

Aber ganz so einfach ist die Rechnung dann doch nicht. Meiofauna- und Makrofaunagemeinschaften werden von vielen weiteren Umweltparametern unterschiedlich beeinflusst. Während die einen Tiere vor allem frisches organisches Material bevorzugen (gemessen als die Konzentration der Pigmente, die von Mikroalgen gebildet werden, wie Chlorophyll und seine Abbauprodukte), kommt es anderen Gruppen nur auf die Menge des Futters am Meeresboden an (gemessen als Gesamtmenge des organisch gebundenen Kohlenstoffs im Sediment). Und neben der Struktur und Korngröße des Sediments, die für Tiere, die am und im Meeresboden leben, immer sehr wichtige Faktoren sind, spielt auch die Wassertemperatur eine Rolle bei der Ausprägung der Gemeinschaften.

Regionale Unterschiede geben Hinweise

Was passieren kann, wenn sich durch den Klimawandel das Leben am Meeresboden verändert, kann anhand der geographisch weit voneinander ent-



ABB. 9 Am Stereomikroskop eröffnet sich die Welt der Tiere, die im Sediment leben: Der Technische Assistent Marco Bruhn sortiert eine Probe in der hauptsächlich Flohkrebse, Vielborster und Fadenwürmer vorkommen (o. l.). Für spätere detaillierte Analysen werden die Ruderfußkrebse auf einen Hohlsliffobjektträger überführt (u. l.). Fotos: Viola Siegler (o. l., r.), Gritta Veit-Köhler (u. l.).

fernten Regionen unserer Untersuchungen abgeschätzt werden. Sie stehen unter dem Einfluss von unterschiedlichen klimatischen und ozeanografischen Gegebenheiten (Abbildung 4). Was aber, wenn sich Wassertemperatur und Eisbedeckung im Zuge des Klimawandels verändern?

So finden wir im nordwestlichen Weddellmeer sogenannte **Food Banks**, das sind Ansammlungen großer Mengen von Nahrung am Meeresboden, die von regelmäßigen Nahrungspulsen gespeist werden und durch das regelmäßige Öffnen und Schließen des Meereises konstant hoch bleiben. Für die dort massenhaft vorkommenden Organismen bedeuten sie das Überleben während des dunklen Winters und in Jahren, in denen das Meereis mal nicht auftauft [19, 21, 22]. Einmal angenommen, in dieser Region fällt diese Regelmäßigkeit aufgrund von Temperaturerhöhungen weg und es entsteht nur noch alle paar Jahre eine geschlossene Eisdecke – es könnte sich eine Situation wie in der Bransfieldstraße einstellen (Abbildungen 4, 10): weniger Nahrung, niedrigere Tierzahlen, geringere Diversität, reduzierte Ökosystemleistungen.

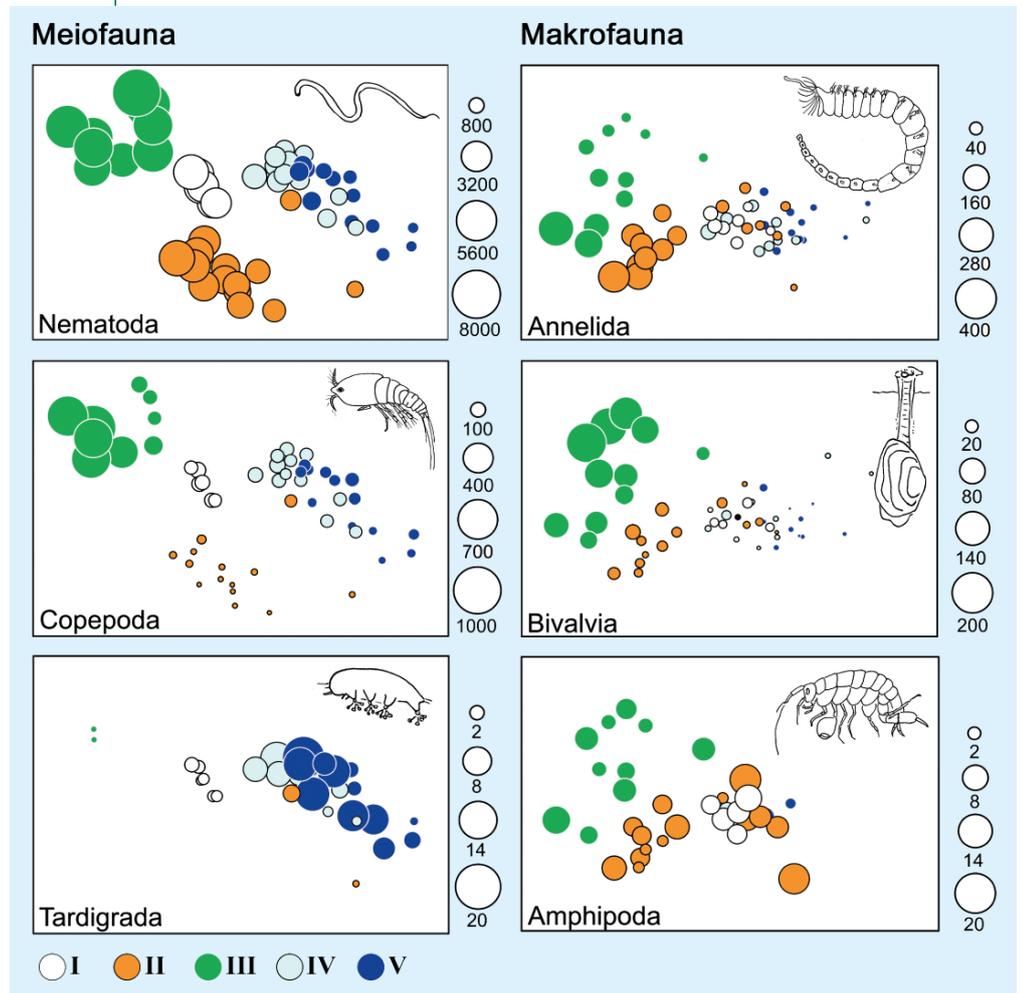
Allerdings sagen Studien aus, dass Veränderungen in der Zusammensetzung der Makrofaunagemeinschaften am Meeresboden oft erst nach mehreren Jahren oder Jahrzehnten beobachtet werden [23]. Klimabedingte Umweltveränderungen führen also schleichend zu einer zeitlichen und räumlichen Variabilität der taxonomischen Diversität (Zusammensetzung und Anzahl der Arten) und der funktionellen Diversität (Übernahme verschiedener Rollen durch Lebewesen im Ökosystem) und somit der Ökosystemfunktionen. Umso wichtiger wäre es, bereits jetzt die Artenzusammensetzung und Ökosystemfunktionen des Meeresbodens regelmäßig in einem Gebiet zu beobachten, wo wir in Zukunft Veränderungen durch den Einfluss des Klimawandels erwarten [24].

Ökologie geht nur im Team

Natürlich kann man all diese Expeditionen und Untersuchungen nicht alleine schaffen, und so sind oft Technische Assistent/-innen und immer Student/-innen mit im Team,

die die Proben an Bord und auch im heimischen Labor weiterbearbeiten, chemische Analysen durchführen, Tiere bestimmen und statistische Auswertungen machen (Abbildung 11). Mit den Ergebnissen schreiben Studierende dann ihre wissenschaftlichen Abschlussarbeiten. Unsere drei Expeditionen waren die Basis für insgesamt vier Praxismodule, sechs Bachelorarbeiten, drei Masterarbeiten und eine Doktorarbeit. Auch die Betreuung junger Wissenschaftler/-innen gehört zur Arbeit von Forscher/-innen. Es ist ein wichtiger Beitrag zu deren Ausbildung und die Basis gemeinsamer wissenschaftlicher Publikationen.

ABB. 10 | TIERGEMEINSCHAFTEN IN DEN UNTERSUCHUNGSGEBIETEN



Meiofaunagemeinschaften (linke Spalte) und Makrofaunagemeinschaften (rechts) aus den Untersuchungsgebieten I–V, die sich in ihren Eisbedeckungsmustern unterscheiden (geografische Lage I–V siehe Abbildung 4). Jeder Punkt in diesen multidimensionalen Skalierungen (MDS) entspricht einer Probe und somit ihrer Gemeinschaft von Tiergruppen und Individuenzahlen. Der Abstand der Punkte zeigt die Ähnlichkeit zwischen den Proben auf: je näher desto ähnlicher. Meiofaunagemeinschaften unterschiedlicher Gebiete sind deutlicher voneinander abgegrenzt als Makrofaunagemeinschaften, bei denen sich die Proben verschiedener Gebiete ähnlicher sind. Die Größe der Punkte (Bubbles) entspricht der Anzahl von Individuen der jeweils dargestellten Gruppe (Skala rechts neben den Grafiken: Meiofauna – Individuen pro 10 cm²; Makrofauna – Individuen pro 100 cm²). Gezeigte Tiergruppen: Meiofauna – Nematoda (Fadenwürmer), Copepoda (Ruderfußkrebse), Tardigrada (Bärtierchen); Makrofauna – Annelida (Ringelwürmer), Bivalvia (Muscheln), Amphipoda (Flohkrebse). Kombination von Teilen der Abbildungen 5 und 6 in [21], Creative Commons by Attribution (CC-BY) 4.0 licence.



ABB. 11 Erst die Arbeit, dann die Belohnung: Geräteeinsätze an Bord sind körperlich anstrengend, gerade bei den Witterungsbedingungen in der Antarktis. Wenn die POLARSTERN dann während einer zweimonatigen Expedition einmal am Schelfeis festmacht, um die Neumayer-Station III auf dem antarktischen Kontinent zu versorgen, können auch die Wissenschaftler/-innen von Bord gehen (v. l. n. r.: Friederike Säring, Ben Behrend, Yasemin Bodur, Derya Seifert, Heike Link, Gritta Veit-Köhler). Fotos: Gritta Veit-Köhler (l.), Dieter Piepenburg (r.).

GLOSSAR

Benthosgemeinschaften: Gemeinschaften verschiedener Organismengruppen am Meeresboden. Dabei kann es sich um einzellige (z. B. Bakterien, Mikroalgen) oder mehrzellige Lebewesen handeln (z. B. Pilze, Pflanzen, Tiere). Die Tiere am Meeresboden ordnen wir in verschiedene Größenklassen ein, die sich auch in ihrer Ökologie unterscheiden (z. B. Meiofauna, Makrofauna). Gemeinschaften bestehen aus den Individuen verschiedener Arten. Ihre Zusammensetzung wird von der Biodiversitätsforschung untersucht und beschrieben.

Flux: Bewegung von Energie und Elementen zwischen verschiedenen Kompartimenten z. B. eines Organismus oder Ökosystems. Beispiele für Flux sind Atmung (Sauerstoffverbrauch, Abgabe von Kohlendioxid), Photosynthese (Bindung von Kohlendioxid, Abgabe von Sauerstoff), Remineralisierung (Abgabe von Stoffwechselprodukten, hier anorganischen Substanzen, die u. a. als Dünger für neuerliche Photosynthese dienen können). In unseren Untersuchungen messen wir in Form von Fluxen den Verbrauch von Sauerstoff und die Nährstoffabgabe durch Benthosgemeinschaften im bodennahen Meereswasser.

Food Bank: In Meeresgebieten mit besonders hoher saisonaler Primärproduktion und tiefen Wassertemperaturen wird nicht immer die gesamte Biomasse verbraucht, die mit einem Nahrungspuls auf den Meeresboden gelangt. Zwar kommen Meeresbodenbewohner wie Fadenwürmer, Ruderfußkrebse, Muscheln oder Borstenwürmer in solchen Gebieten mit sehr großen Individuendichten vor, dennoch verwerten sie nicht die gesamte verfügbare Nahrung auf einmal. Zusätzlich sorgen die tiefen Wassertemperaturen (im Südozean oft bis zu -2°C) dafür, dass auch der Abbau der organischen Substanz durch Bakterien verlangsamt ist. So haben die Lebewesen am Meeresboden das ganze Jahr über genügend Nahrung, obwohl es nur im Sommer zu Nahrungseinträgen von oben kommt [22].

Multidimensionale Skalierung: Proben, die mehrere Variablen beinhalten [in unserem Fall die Individuenzahlen verschiedener

Für ihren Einsatz für das DFG-Projekt LI2313/6-1 | VE260/10-1 „*Role of meio- and macrofauna in benthic ecosystem functioning: Testing effects of different ice cover regimes*“ im Schwerpunktprogramm SPP 1158 „Antarktisforschung“ danken wir Friederike Säring sowie Moritz Baumann, Ben Behrend, Yasemin Bodur, Merten Bohn, Marco Bruhn, Finn Corus, Benita Degen, Stephan Durst, Jutta Heitfeld, Leon Hoffman, Erik Kusch, Kirsten Macsween, Dorothea Okoniewski, Jan Schuckenbrock, Derya Seifert, Josefine Steiling, Ann-Kathrin Weßels und Jule Wilsenack. Unsere Kooperationspartner/-innen sind Dr. Andreas Bick (Universität Rostock), Dr. Freija Hauquier (Universität Gent, Belgien), Dr. Kerstin Jerosch, Kai-Uwe Ludwichowski, Hendrik Pehlke und Prof. Dr. Dieter Piepenburg (Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung), Iris Liskow, Prof. Dr. Maren Voß und Prof. Dr. Joanna Waniek (Institut für Ostseeforschung Warnemünde), PD Dr. Christoph Mayr (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg), Prof. Dr. Claus Nielsen (Zoologisk Museum København, Dänemark) und Prof. Dr. Ursula Witte (University of Aberdeen, Großbritannien).

Tiergruppen (Abbildung 10) oder auch die verschiedenen Nährstoffflüsse], können mithilfe von Verfahren der multivariaten Statistik verglichen werden. Dazu werden Similaritätsanalysen durchgeführt, mit denen die Ähnlichkeit (Similarität) zwischen allen Proben bestimmt wird. Die grafische Darstellung der zwischen den einzelnen Proben gefundenen Ähnlichkeiten erfolgt in einem multidimensionalen Raum (multidimensionale Skalierung, MDS). Jeder Punkt im MDS entspricht einer Probe mit der Gesamtheit der Tiergemeinschaft, die in ihr vorgefunden wurde. Die Abstände der „Proben“-Punkte im MDS verdeutlichen die Ähnlichkeit zwischen den Proben: je näher, desto ähnlicher. Zur Veranschaulichung können auf die Probenpunkte die Individuenzahlen einzelner Tiergruppen projiziert werden (Abbildung 10). In unserem Fall kann dadurch abgelesen werden, welche Tiergruppen maßgeblich für die Unterschiede der Gemeinschaften (und somit der Proben) zwischen den untersuchten Gebieten „verantwortlich“ sind. Auch bei dieser als „Bubble Plot“ bezeichneten Darstellungsweise repräsentiert die Position jedes Punktes weiterhin die Gesamtheit aller Tiere in einer Probe.

Nahrungspuls: Gesteigerter und zeitlich begrenzter Nahrungseintrag aus der Wassersäule zum Meeresboden. Nahrungspulse entstehen nach Phytoplanktonblüten oder durch das Abschmelzen von Meereis, wodurch Eisalgen freigesetzt werden, die absterben und zum Meeresboden sinken. Auf dem Sediment ist der frische Nahrungseintrag oft anhand einer lockeren grünen Auflage zu erkennen.

Phytoplanktonblüte/Phytoplanktonbloom: Bei günstigen Umweltbedingungen (u. a. ausreichend Licht und Nährstoffe, stabile Schichtung der Wassersäule) kommt es zu einer massenhaften Vermehrung der Mikroalgen im freien Wasser, einer so genannten „Blüte“. Diese Algenblüten sind auch auf Satellitenaufnahmen erkennbar. Das Phytoplankton stirbt anschließend ab, sinkt zum Meeresboden und wird so zur Nahrung für die dort lebenden Gemeinschaften.

Zusammenfassung

Gemeinsam mit unseren Student/-innen und Kooperationspartner/-innen arbeiten wir daran, die Ökosystemfunktionen der Weichböden auf den Schelfgebieten der Antarktis besser zu verstehen. Dafür haben wir an drei Expeditionen mit FS POLARSTERN teilgenommen und Sedimentproben vom Meeresboden in Kühlcontainern an Bord experimentell untersucht. Sauerstoffverbrauch und Remineralisierung sind Funktionen der Gemeinschaften von Lebewesen im Sediment. Als Stoffwechselprodukte setzen sie Nährstoffe frei und sorgen dafür, dass der Kreislauf von Produktion und Abbau weiterläuft. Dabei spielt die Versorgung mit organischem Material aus den oberen lichtdurchfluteten Zonen des Ozeans eine entscheidende Rolle. Und diese Versorgung ist maßgeblich von der Eisbedeckung abhängig.

Summary

Sea ice means life at the seafloor: Ecosystem functions in the Southern Ocean

Together with our students and cooperation partners we are working on a better understanding of the ecosystem functions of soft bottoms on the Antarctic shelf. Therefore, we participated in three expeditions with RV POLARSTERN and experimentally studied sediment samples from the seafloor in reefer containers on board. Oxygen consumption and remineralization are functions of communities of organisms in the sediment. They release nutrients as metabolic end products and ensure that the cycle of production and decomposition continues. The supply of organic material from the photic zone of the ocean plays a crucial role in this process. And this supply largely depends on the sea-ice cover.

Schlagworte

Antarktis, Benthos, Eisbedeckung, Lebensgemeinschaften, Nahrung, Nährstoffkreislauf, Ökosystemfunktion, Meiofauna, Makrofauna

Literatur

- [1] S. Naeem et al. (2012). The functions of biological diversity in an age of extinction. *Science* 336, 1401–1406.
- [2] B. J. Cardinale et al. (2012). Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature* 486, 59–67.
- [3] D. U. Hooper et al. (2012). A global synthesis reveals biodiversity loss as a major driver of ecosystem change. *Nature* 486, 105–108.
- [4] S. C. Doney et al. (2012). Climate change impacts on marine ecosystems. *Annu Rev Mar Science* 4, 11–37.
- [5] J. Gutt et al. (2015). The Southern Ocean ecosystem under multiple climate change stresses - an integrated circumpolar assessment. *Glob Chang Biol* 21(4), 1434–1453.
- [6] G. Hempel, D. Piepenburg (2010). Nord- und Südpolarmeer im Klimawandel. Ein biologischer Vergleich. *Biol Unserer Zeit* 40(6), 386–395.
- [7] B. Beszteri et al. (2020). Kleinlebewesen im sich wandelnden Südpolarmeer – Polares Plankton. *Biol Unserer Zeit* 50(1), 28–38.
- [8] K. R. Arrigo et al. (2008). Impact of a shrinking Arctic ice cover on marine primary production. *Geophys Res Lett* 35, L19603.
- [9] J. King (2014). Climate science: A resolution of the Antarctic paradox. *Nature* 505, 491–492.
- [10] O. Sachs et al. (2009). Benthic organic carbon flux and oxygen penetration reflect different plankton provinces in the Southern Ocean. *Deep-Sea Res I* 56, 1319–1335.
- [11] G. Veit-Köhler et al. (2022). Vom antarktischen Schelf bis in die Tiefsee – Große Artenvielfalt im Südpolarmeer. *Biol Unserer Zeit* 51(1), 47–57.
- [12] H. Link et al. (2011). Spring-to-summer changes and regional variability of benthic processes in the western Canadian Arctic. *Polar Biol* 34(12), 2025–2038.
- [13] G. Veit-Köhler et al. (2011). Antarctic deep-sea meiofauna and bacteria react to the deposition of particulate organic matter after a phytoplankton bloom. *Deep Sea Res II* 58, 1983–1995.
- [14] C. Bienhold, A. Boëtius (2017). Mikroorganismen des Tiefseebodens: Vielfalt, Verteilung, Funktion. In: G. Hempel et al. (Ed.) *Faszination Meeresforschung: Ein ökologisches Lesebuch*. Springer Berlin, Heidelberg, S. 211–222.
- [15] H. Link et al. (2013). Are Hotspots Always Hotspots? The Relationship between Diversity, Resource and Ecosystem Functions in the Arctic. *PLOS ONE* 8, e74077.
- [16] D. M. Sigman et al. (1999). The $\delta^{15}\text{N}$ of nitrate in the Southern Ocean: consumption of nitrate in surface waters. *Global Biogeochem Cycles* 13(4), 1149–1166.
- [17] E. N. Ieno et al. (2006). How biodiversity affects ecosystem functioning: roles of infaunal species richness, identity and density in the marine benthos. *Mar Ecol Prog Ser* 311, 263–271.
- [18] E. Sañé et al. (2012). Benthic macrofauna assemblages and biochemical properties of sediments in two Antarctic regions differently affected by climate change. *Cont Shelf Res* 35, 53–63.
- [19] G. Veit-Köhler et al. (2018). Oceanographic and topographic conditions structure benthic meiofauna communities in the Weddell Sea, Bransfield Strait and Drake Passage (Antarctic). *Prog Oceanogr* 162, 240–256.
- [20] U. Witte et al. (2003). In situ experimental evidence of the fate of a phytodetritus pulse at the abyssal sea floor. *Nature* 424, 763–766.
- [21] F. Säring et al. (2022). Sea-ice-related environmental drivers affect meiofauna and macrofauna communities differently at large scales (Southern Ocean, Antarctic). *Mar Ecol Prog Ser* 700, 13–37.
- [22] S. L. Mincks et al. (2005). Persistence of labile organic matter and microbial biomass in Antarctic shelf sediments: evidence of a sediment “food bank”. *Mar Ecol Prog Ser* 300, 3–19.
- [23] J. M. Grebmeier (2012). Shifting patterns of life in the Pacific Arctic and sub-Arctic seas. *Ann Rev Mar Sci* 4, 63–78.
- [24] J. Gutt et al. (2022). Reviews and syntheses: A framework to observe, understand and project ecosystem response to environmental change in the East Antarctic Southern Ocean. *Biogeosciences* 19, 5313–5342.

Verfasst von:



Dr. Heike Link untersucht die Zusammenhänge von Ökosystemfunktionen, biogeochemischen Prozessen und Diversität am Meeresboden. Dafür war sie mehrfach mit der AMUNDSEN (Kanada) und POLARSTERN in Arktis und Südlichem Ozean auf Forschungsreise. An der Universität Rostock koordiniert sie das Department Maritime Systeme der Interdisziplinären Fakultät und ist Mitglied im Zukunftsforum Ozean des Konsortiums Deutscher Meeresforschung.



Dr. Gritta Veit-Köhler hat auf Forschungsstationen in der Arktis und Antarktis gearbeitet und an mehreren POLARSTERN-Expeditionen teilgenommen. Gemeinsam mit ihren Student/-innen erforscht sie die Ökologie der Meiofauna und die Taxonomie von bodenlebenden Ruderfußkrebse. Sie leitet das Fachgebiet Ökologische Biodiversitätsforschung am Deutschen Zentrum für Marine Biodiversitätsforschung (DZMB) bei Senckenberg am Meer in Wilhelmshaven.

Korrespondenz

Dr. Gritta Veit-Köhler
Senckenberg am Meer
Deutsches Zentrum für Marine Biodiversitätsforschung
Südstrand 44
26389 Wilhelmshaven
E-Mail: gveit-koehler@senckenberg.de



Verband | Biologie, Biowissenschaften
& Biomedizin in Deutschland

**GEMEINSAM
FÜR DIE**

BIEWISSENSCHAFTEN

Gute Gründe, dem VBIO beizutreten:

- Werden Sie Teil des größten Netzwerks von Biowissenschaftlern in Deutschland
- Unterstützen Sie uns, die Interessen der Biowissenschaften zu vertreten
- Nutzen Sie Vorteile im Beruf
- Bleiben Sie auf dem Laufenden – mit dem VBIO-Newsletter und dem Verbandsjournal „Biologie in unserer Zeit“
- Treten Sie ein für die Zukunft der Biologie



www.vbio.de

Jetzt beitreten!

