

4.3 Rückgang des arktischen Meereises und seine ökologischen Auswirkungen

HAUKE FLORES

Rückgang des arktischen Meereises und seine ökologischen Auswirkungen: Durch den Klimawandel vermindert sich die sommerliche Meereisbedeckung in der Arktis rasant. Das Meereis bietet zahlreichen Organismen, von mikroskopischen Eisalgen bis zum Eisbären, einen einzigartigen Lebensraum. Die Struktur eisassoziierter Gemeinschaften reagiert empfindlich auf Veränderungen des Meereis-Lebensraumes. Eisalgen sind eine wichtige Kohlenstoffquelle einiger der häufigsten Zooplanktonarten. Über die Nahrungskette könnte die fortschreitende Verminderung und zeitliche Verschiebung der Meereisbedeckung und ihrer Eisalgenblüten auch den ökologisch bedeutsamen Polarorsch empfindlich treffen. Durch Veränderungen der Nahrungsnetzstruktur und negative Folgen für ökologische Schlüsselarten könnte der weitere Meereisrückgang einen Systemwechsel auslösen, der für heutige Ikonen der arktischen Tierwelt wie den Eisbär vermutlich gravierende Auswirkungen haben wird.

Decline in the Arctic sea ice and its ecological impact: Climate change is causing a dramatic decline of Arctic summer sea ice. Sea ice constitutes a unique habitat for a variety of organisms, including microscopic ice algae and polar bears. The structure of ice-associated communities is sensitive to changing sea ice habitat properties. Ice algae are an important carbon source of some of the most abundant zooplankton species. Through the food web, the on-going decline and temporal shift of the sea ice cover and its ice algae blooms could severely impact on the ecologically important polar cod. Through changes in food web structure and impacts on ecological key species, further sea ice decline could trigger a system shift, causing severe ramifications on today's iconic Arctic fauna, e.g. polar bears.

Die Arktis ist eine der am stärksten vom Klimawandel betroffenen Regionen der Erde. Besonders starke Auswirkungen hat die globale Erwärmung auf einen weltweit einzigartigen Lebensraum: Das arktische Meereis. Während die sommerliche Meereisausdehnung 1990 noch ca. 4,5 Mio. km² betrug, lag sie zuletzt (2016) bei 2,5 Mio. km² (Abb. 4.3-1). Der mittlere Rückgang der Meereisausdehnung zwischen 1989 und 2016 beträgt etwa 800.000 km² pro Jahrzehnt. Die drei Jahre mit den jeweils niedrigsten je gemessenen Meereisausdehnungen (2007, 2012, 2016) liegen allesamt in den vergangenen zehn Jahren. Modelrechnungen sagen für die Arktis bereits in den kommenden Jahrzehnten vollkommen eisfreie Sommer voraus. Neben der Ausdehnung in der Fläche verringert sich der Anteil mehrjährigen Eises kontinuierlich, und auch das einjährige Eis verändert seine strukturellen Eigenschaften, wie z.B. die Eisdickenverteilung und die Bedeckung mit Schmelztümpeln (IPCC 2013).

Im Zusammenspiel mit anderen Umweltveränderungen ergeben sich tiefgreifende Veränderungen der Lebensräume in den heute mit Meereis bedeckten Gebieten der Arktis. So sagen einige Modelle eine Zunahme der fotosynthetischen Primärproduktion durch im Wasser schwebende einzellige Algen (Phytoplankton) voraus, da mit geringerer Eisdicke und kürzerer Dauer der Eisbedeckung mehr Licht in den Ozean eindringt. Dies würde sich vermutlich auch positiv auf Populationen des Zooplanktons und der von ihm abhängigen Fische und Meeressäuger auswirken. Gleichzeitig aber begünstigt das schmelzende Eis im Zusammenspiel mit der Zufuhr von Süßwasser aus Flüssen die Bil-

dung einer Süßwasserschicht an der Oberfläche. Dies verhindert die Nährstoffzufuhr aus der Tiefe und kann so die Phytoplanktonproduktion trotz erhöhter Sonneneinstrahlung schnell zum Erliegen bringen (WASSMANN 2011). Falls dieser Prozess überwiegt, könnte die erwartete Steigerung der Primärproduktion ausbleiben, und der Klimawandel hätte wenig positive Effekte auf die Tierpopulationen der Arktis.

Neben dem Phytoplankton stellen sogenannte Eisalgen eine zweite wichtige Kohlenstoffquelle in den arktischen Ökosystemen dar. Eisalgen leben in kleinen Kanälchen und Aushöhlungen im Meereis, den Solekanälen. Solekanäle bilden sich während des Gefrierprozesses, weil bei der Eisbildung kaum Salze in die Kristalle eingebaut werden. Wegen ihres niedrigeren Gefrierpunkts bleibt die zurückbleibende, hoch konzentrierte Sole flüssig und füllt so ein labyrinthartiges Kanalsystem im Meereis aus. In heute ganzjährig bedeckten Gebieten der Zentralarktis können Eisalgen bis zu 60% der Primärproduktion ausmachen (FERNANDEZ-MENDEZ et al. 2015). Ähnliches gilt zeitweise auch in weiter südlich gelegenen Gebieten, wenn während des Frühlings und des Herbstes wegen der noch vorhandenen bzw. neu entstehenden Eisbedeckung nur wenig Licht in die Wassersäule dringt. Zu diesen Jahreszeiten sind die Eisalgen im Vorteil, denn viele von ihnen sind an geringe Lichtintensitäten angepasst und können auch bei Dämmerlicht noch effektiv Fotosynthese betreiben.

Neben den Eisalgen wird das arktische Meereis von verschiedensten Organismen als Lebensraum genutzt. In den Solekanälen leben Einzeller wie Wimperntierchen und Kämmerlinge (Foraminiferen), Plattwürmer

(Turbellarien), Rädertiere (Rotatorien), Krebstiere und sogar Nesseltiere. Die Unterseite des Eises ist besonders interessant, weil sie mit ihren zerklüfteten Press-eisrücken, Spalten und übereinander geschobenen Eisschollen auch größeren Wirbellosen wie Flohkrebse (Amphipoden, *Abb. 4.3-2*) und Ruderfußkrebse (Copepoden) einen geschützten Lebensraum bietet (WERNER & GRADINGER 2002). Hier stellt ihnen der Polardorsch nach, der seinerseits Schutz vor Seevögeln (z.B. Eissturmvogel) und Robben (z.B. Ringelrobbe) sucht (*Abb. 4.3-3*). Schließlich suchen auch Schwertwale und Eisbären unter und zwischen den Eisschollen ihre Nahrung. Den Eisbären dient das Meereis auch als Untergrund für ihre weiten Wanderungen. Insgesamt zählt man unter den mehrzelligen Wirbellosen etwa 50 Arten zur arktischen Meereisfauna (BLUHM et al. 2011). Allerdings ist das Meereis auch mit modernem Forschungsgerät nur schwer zugänglich, und riesige Gebiete der Arktis sind noch kaum erforscht. Dies macht es unwahrscheinlich, dass man die tatsächliche Artenzahl der arktischen Meereisfauna kennt, bevor durch den Klimawandel tiefgreifende Veränderungen eintreten.

Von einigen am oder im arktischen Meereis lebenden Tieren wird angenommen, dass sie obligate Meereisbewohner sind. Sie können ihre Lebenszyklen in einem sommerlich eisfreien Ozean nicht vollenden. Vertreter der fakultativen Meereisfauna nutzen den Meereis-Lebensraum nur zeitweise. Der pelagische Ruderfußkrebs *Calanus glacialis* zum Beispiel sucht im Vorfrühling die Eisunterseite auf, um Eisalgen zu grasen. *C. glacialis* dominiert die Zooplanktonbiomasse in weiten Teilen des arktischen Ozeans. Dies zeigt die wichtige Rolle, die der Eisunterseite für die Verbindung zwischen dem Meereis und dem pelagischen Nahrungsnetz zukommt. Massenhaft vorkommende Zooplankter wie *C. glacialis*, aber auch der Eisamphipode *Apherusa glacialis*, grasen Eisalgen und werden



Abb. 4.3-2: Der Amphipode Gammarus wilkitzkii lebt an der Unterseite des Meereises. Dieses Exemplar ist etwa 2,5 cm groß.



Abb. 4.3-3: Der Polardorsch (Boreogadus saida). Dieses Jungtier ist etwa 15 cm lang.

ihrerseits von pelagischen Räubern gefressen, z.B. von Rippenqualen, Pfeilwürmern oder Polardorschen. Auf diese Weise gelangen die von den Eisalgen durch Photosynthese aufgebauten Kohlenstoffverbindungen in das pelagische Nahrungsnetz. Schließlich gelangen sie durch die Nahrungskette, sinkende Partikel und die Vertikalwanderung des Zooplanktons bis zum Meeresboden. Zweifellos ist die vielfältige, an das Meereis angepasste, Lebensgemeinschaft bedingt durch den Kli-

September-Mittel der Meereis-Fläche in der Arktis von 1989-2016

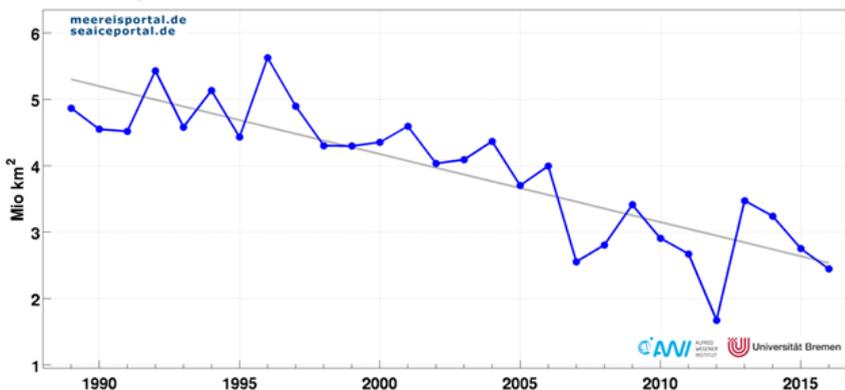


Abb. 4.3-1: Von Meereis bedeckte Fläche in der Arktis zwischen 1989 und 2016. Quelle: www.meereisportal.de.

mawandel dabei, sich tiefgreifend zu verändern. Jedoch ist es noch zu früh und unser Wissen über diese Organismen ist zu begrenzt um vorherzusagen, wie die einzelnen Arten und das Ökosystem als Ganzes reagieren werden. So zeigen zum Beispiel neuere Studien, dass als obligat eisassoziiert geltende Amphipoden schwierige Zeiten auch in der Tiefsee überdauern könnten (BERGE et al. 2012).

Einen Einblick in die zukünftige Entwicklung der Meereis-Lebensgemeinschaften können statistische Analysen geben, mit denen die Beziehung zwischen Verbreitungsmustern von Schlüsselarten bzw. Artgemeinschaften und Meereis-Habitateigenschaften, z.B. dem Alter des Eises und der Eisdicke, untersucht wird. Moderne video-optische Technik, die von Tauchern oder Unterwasserdrohnen eingesetzt wird, hat gezeigt, dass lokale Abundanzen von Eisamphipoden unter mehrjährigem Eis höher sind als unter einjährigem Eis (HOP et al. 2000). Dies deutet darauf hin, dass sich die Lebensbedingungen für bestimmte Eisamphipodenarten mit dem weiteren Rückgang des mehrjährigen Eises weiter verschlechtern könnten. Um Aussagen über die Bedeutung von Habitateigenschaften für die Verteilung eisassoziierten Organismen in den räumlichen Dimensionen der großen Ozeanbecken in der Zentralarktis treffen zu können, ist der Einsatz von Tauchern und Unterwasserdrohnen meist zu aufwändig. Untereis-Schleppnetze, die mit einer Vielzahl von Sensoren die Eigenschaften des Meereises messen, erlauben multi-Parameterstudien über große Gebiete. Die erste Studie dieser Art konnte zeigen, dass Meereis-Habitateigenschaften einen starken Einfluss auf die Struktur der Untereis-Lebensgemeinschaft haben.

So waren Gebiete mit dickerem Meereis und höheren Nährstoffkonzentrationen mit höheren Abundanzen des fakultativ eisassoziierten *C. glacialis* und anderer Copepoden korreliert. Im Gegensatz dazu dominierten in Gebieten mit aufbrechendem Meereis und geringen Nährstoffkonzentrationen Amphipoden. Der enge Zusammenhang zwischen Habitateigenschaften und der Artzusammensetzung deutet darauf hin, dass die Untereis-Lebensgemeinschaft dynamisch auf Umweltveränderungen reagiert. Dies hat wiederum Auswirkungen auf die Biodiversität und die Nahrungsnetzstruktur im arktischen Ozean, wenn sich die Flächenausdehnung und die Struktureigenschaften des Meereises weiter verändern (DAVID et al. 2015).

Die zukünftige Biodiversität und Produktivität arktischer Ökosysteme wird zu einem Gutteil davon beeinflusst, wie stark sich der Beitrag von Eisalgen zum Kohlenstoffumsatz in den Nahrungsnetzen verändert. Allerdings ist es noch schwer abschätzbar, wie sich die Verminderung des Meereises auf den Kohlenstofffluss im pelagischen Nahrungsnetz auswirken wird, weil es nur wenig Kenntnisse über die relative Bedeutung des Eisalgen-Kohlenstoffs in arktischen Ökosystemen gibt. Um dies abschätzen zu können, sollte man zunächst das Ausmaß der gegenwärtigen Abhängigkeit ökologischer Schlüsselarten von Eisalgen-Kohlenstoff kennen. Dies ist seit einigen Jahren mit Hilfe isotonenbasierter Biomarkeranalysen möglich. Da während der Photosynthese das leichtere Kohlenstoffisotop ¹²C bevorzugt in die Biomoleküle der Algen eingebaut wird, ist ¹²C in von Algen erzeugten Kohlenstoffverbindungen i.d.R. stark angereichert. Im Meereis jedoch ist Kohlenstoff oft knapp, so dass Eisalgen ¹²C nicht so stark anrei-

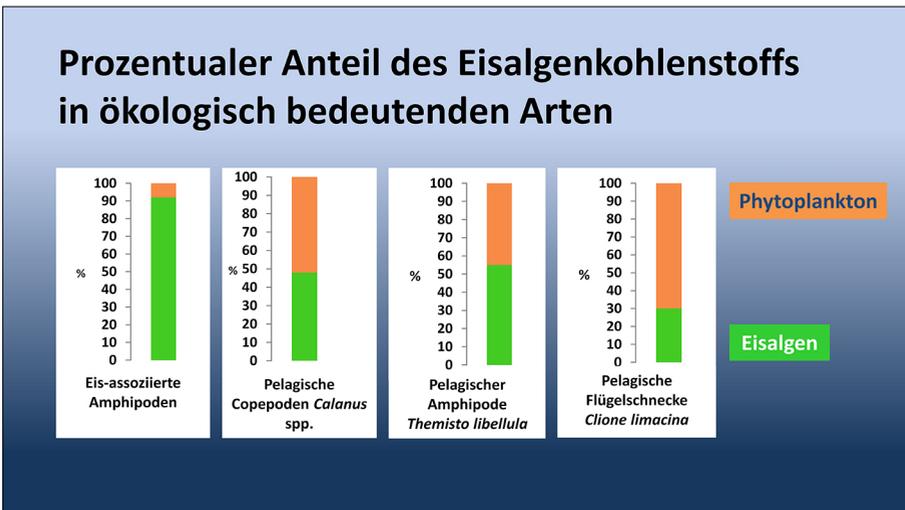


Abb. 4.3-4: Beitrag von Eisalgen-Kohlenstoff zur Biomasse verschiedener Zooplankter und Eisamphipoden, ermittelt mit der Isotopenanalyse von Fettsäuren (KÖHLBACH et al. 2016) (Graphik: Kohlbach, D. & H. Flores).



Abb. 4.3-5: Die Flügelschnecke *Clione limacina* (ca. 2 cm).

chern können. Sie enthalten deshalb höhere Anteile des schwereren ^{13}C als Phytoplankton. Die isotopische Signatur der Kohlenstoffverbindungen aus Eisalgen wird im Nahrungsnetz weitergegeben. Besonders gut lässt sie sich anhand von bestimmten Fettsäuren verfolgen, die in der Nahrungskette unverändert erhalten bleiben. Aus dem Vergleich der Fettsäure-Isotopen-Signaturen eines Organismus mit den entsprechenden Signaturen aus Eisalgen und Phytoplankton lässt sich dann der relative Anteil des Eisalgen-Kohlenstoffs in der Körpersubstanz errechnen. So konnte in einem küstennahen Ökosystem der Kohlenstoff von Eisalgen bis in die Spitze der Nahrungspyramide (Meeresvögel und Robben) nachgewiesen werden (BUDGE et al. 2008). Bei Eisamphipoden aus der Zentralarktis lag der Beitrag von Eisalgenkohlenstoff bei etwa 90% (Abb. 4.3-4). In pelagischen Flügelschnecken (Abb. 4.3-5) lag er bei unter 30%. Bemerkenswerterweise war der Eisalgenkohlenstoff-Beitrag aber auch bei pelagischen Zooplanktern wie Ruderfußkrebsen und dem räuberischen Amphipoden *Themisto libellula* bei bis zu 50% (Abb. 4.3-4; KOHLBACH et al. 2016). Aufgrund ihrer hohen Abundanz nehmen diese Organismen eine Schlüsselstellung im Nahrungsnetz ein und deuten auf einen signifikanten Beitrag des Eisalgen-Kohlenstoffs für das Funktionieren hocharktischer mariner Ökosysteme hin. Im Umkehrschluss hieße dies, dass eine Verminderung des Eisalgen-Beitrages im Nahrungsnetz durch den Rückgang des Meereises gravierende Auswirkungen auf die Struktur und Biodiversität arktischer Ökosysteme haben wird.

Wie sich der Rückgang des Meereises und seiner Eisalgen kaskadenartig in die Nahrungsnetze auswirken würde, sei am Beispiel des Systems Meereis – *Calanus* – Polardorsch erläutert. Viele Polardorsche verbringen die ersten ein bis zwei Jahre ihres Lebens an der Unterseite des Eises. Dort finden sie Schutz vor Räubern und wertvolle Beute (GRADINGER & BLUHM 2004). Diese besteht zum Großteil aus Copepoden und Eisamphipoden. Zudem sind Polardorsche hervorragend an

das Leben am Gefrierpunkt angepasst. Beispielsweise bilden sie Gefrierschutz-Glykoproteine (Antifreeze Glycoproteins, AFGP), um das Gefrieren der Körperflüssigkeiten zu verhindern. Diese Anpassungen funktionieren für den Polardorsch so gut, dass er unter dem zentralarktischen Packeis praktisch flächendeckend verbreitet ist. Möglicherweise driften die jungen Polardorsche ein- bis zwei Jahre quer über den Arktischen Ozean, bevor sie wieder Anschluss an die Bestände auf den Schelfen finden. Dies legen Ergebnisse einer auf Satellitendaten und Eisdriftmodellen basierenden Rückverfolgung von Eisflächen nahe, unter denen Polardorsche gefangen wurden (DAVID et al. 2016). Wenn das sommerliche Meereis weiter zurückgeht, könnte diese Drift aber vorzeitig in der Arktischen Tiefsee enden, ohne dass die Schelfbestände erreicht werden. In der Zooplankton-armen Zentralarktis hätten die jungen Polardorsche nur geringe Überlebenschancen.

Zudem könnte die Verfügbarkeit einer wichtigen Nahrungsquelle des Polardorschens empfindlich geschwächt werden: Der Copepode *Calanus glacialis* hat seinen Lebenszyklus perfekt auf den Rhythmus von Eisalgenblüte und späterer Phytoplanktonblüte angepasst. Die energiereichen Eier reifen im frühen Frühjahr heran, wenn die Eisalgenblüte reichhaltige Nahrung für die Weibchen bereithält. Die Entwicklungszeit der Eier dauert in etwa so lange, bis für die heranwachsenden Naupliuslarven durch die erste Phytoplanktonblüte Nahrung im Überfluss zur Verfügung steht. Bricht das Eis eher auf und tritt die Phytoplanktonblüte damit vorzeitig ein, so entwickeln sich die Naupliuslarven erst, wenn die Phytoplanktonblüte bereits vorüber ist. So treffen sie nicht auf das optimale Nahrungsangebot. Das kann sich negativ auf die *Calanus glacialis*-Population, und damit auf die Nahrungsverfügbarkeit für Polardorsche auswirken (SØREIDE et al. 2010). So stellt der Meereisrückgang für den Polardorsch sowohl durch Habitatverlust für die Jungtiere als auch durch verminderte Nahrungsverfügbarkeit eine Herausforderung dar. Da Polardorsche ihrerseits die Hauptnahrung vieler arktischer Vogel- und Robbenarten bilden, könnten sich diese Veränderungen an der Basis des Meereis-assoziierten Nahrungsnetzes kaskadenartig fortsetzen, bis auch Eisbären und die Zielarten arktischer Jäger betroffen sind.

Die marinen Ökosysteme der Arktis befinden sich in einer Phase radikaler Veränderung. Während neue Arten aus gemäßigten Breiten auf die peripheren Schelfgebiete drängen, schwindet in der zentralen Arktis mit dem Meereis der Lebensraum endemischer und speziell angepasster Organismen. Insbesondere werden sich die räumliche Verteilung und die zeitliche Abfolge von Eisalgen- und Phytoplanktonblüten verschieben.

So könnte in niedrigeren Breiten das Wachstum der Eisalgen im frühen Frühjahr zunächst durch dünneres Meereis begünstigt werden. Da das Meereis früher aufbricht und sich im Herbst erst später wieder bildet, werden Phytoplanktonblüten früher auftreten. Weil die Nährstoffe aber auch eher verbraucht sind, wird sich im Sommer eine längere Phase mit geringer Nahrungsverfügbarkeit ergeben (WASSMANN 2011). Auch werden sich in manchen Regionen die hochproduktiven Eisrandzonen von den Schelfen weg in die zentralarktische Tiefsee verlagern. Sie wären dann entkoppelt von den reichhaltigen Zooplankton- und Fischbeständen in flacheren Gewässern. Schließlich wird sich mit der späteren Bildung von Meereis die herbstliche Eisalgenblüte verkürzen. Dies könnte sich negativ auf die überwinterte Meereisfauna auswirken, die sich während der dunklen Monate allein von dem im Eis gespeicherten organischen Material ernähren kann.

Ökologische Schlüsselarten wie Polardorsch und *Calanus glacialis* können sowohl in eisbedeckten Gebieten als auch im offenen Wasser leben. Allerdings stellt die Anpassung an das Leben im Meereis womöglich einen Wettbewerbsvorteil dar, der sie bald nicht mehr vor Konkurrenten aus gemäßigten Breiten schützt. In den heute für große Teile des Jahres von Meereis bedeckten Gebieten werden sich die Zusammensetzung von eisassoziierten Lebensgemeinschaften und die Struktur der Nahrungsnetze verändern. Auf lange Sicht werden Eisalgen und der Transfer der von ihnen hergestellten Biomasse in die pelagischen und benthischen Nahrungsnetze an Bedeutung verlieren. Dies wird Auswirkungen auf verschiedene Ökosystemfunktionen, wie etwa den Kohlenstoffexport und die Sekundärproduktion haben. Diese Auswirkungen werden womöglich von zunehmender Phytoplanktonproduktion z.T. kompensiert. Wie stabil die zukünftigen Ökosysteme aber in der lichtarmen Zeit vom Herbst bis zum Vorfrühling sein werden, ist nur schwer absehbar. So könnte der weitere Meereisrückgang über ökologische Schlüsselarten wie den Polardorsch einen Systemwechsel einläuten, der für heutige Ikonen der arktischen Tierwelt wie den Eisbär vermutlich gravierende Auswirkungen haben wird.

Literatur

- BUDGE, S., M. WOOLLER, A. SPRINGER, S. IVERSON et al. (2008): Tracing carbon flow in an Arctic marine food web using fatty acid-stable isotope analysis. *Oecologia* 157: 117-129.
- BERGE, J. O., M. A. VARPE, A. MOLINE, P. E. WOLD et al. (2012): Retention of ice-associated amphipods: possible consequences for an ice-free Arctic Ocean. *Biol. Letters* 8: 1012-1015.
- BLUHM, B. A., A. V. GEBRUK, R. GRADINGER, R. R. HOPCROFT et al. (2011): Arctic marine biodiversity: An update of species richness and examples of biodiversity change. *Oceanography* 24: 232-248.
- DAVID, C., B. A. LANGE, B. RABE & H. FLORES (2015): Community structure of under-ice fauna in the Eurasian central Arctic Ocean in relation to environmental properties of sea ice habitats. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 522: 15-32.
- DAVID, C., B. A. LANGE, T. KRUMPEN, F. L. SCHAAFSSMA et al. (2016): Under-ice distribution of polar cod *Boreogadus saida* in the central Arctic Ocean and their association with sea-ice habitat properties. *Polar Biol.* 39: 981-994.
- FERNANDEZ-MENDEZ, M., C. KATLEIN, B. RABE, M. NICOLAUS et al. (2015): Photosynthetic production in the central Arctic Ocean during the record sea-ice minimum in 2012. *Biogeosc.* 12: 3525-3549.
- GRADINGER, R. R. & B. A. BLUHM (2004): In-situ observations on the distribution and behavior of amphipods and Arctic cod (*Boreogadus saida*) under the sea ice of the High Arctic Canada Basin. *Polar Biol.* 27: 595-603.
- HOP, H., M. POLTERMANN, O. J. LØNNE, S. FALK-PEETERSEN et al. (2000): Ice amphipod distribution relative to ice density and under-ice topography in the northern Barents Sea. *Polar Biol.* 23: 357-367.
- IPCC (2013): Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- KOHLBACH, D., M. GRAEVE, B. A. LANGE, C. DAVID et al. (2016): The importance of ice algae-produced carbon in the central Arctic Ocean ecosystem: Food web relationships revealed by lipid and stable isotope analyses. *Limnol. Oceanogr.*
- SØREIDE, J. E., E. LEU, J. BERGÉ, M. GRAEVE et al. (2010): Timing of blooms, algal food quality and *Calanus glacialis* reproduction and growth in a changing Arctic. *Global Change Biol.* 16: 3154-3163.
- WASSMANN, P. (2011) Arctic marine ecosystems in an era of rapid climate change. *Progr. Oceanogr.* 90: 1-17.
- WERNER, I. & R. GRADINGER (2002) Under-ice amphipods in the Greenland Sea and Fram Strait (Arctic): environmental controls and seasonal patterns below the pack ice. *Mar. Biol.* 140, 317-326.

Kontakt:

Dr. Hauke Flores
 Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven
 hauke.flores@awi.de

Flores, H. (2016): Rückgang des arktischen Meereises und seine ökologischen Auswirkungen. In: Lozán, J. L., S.-W. Breckle, R. Müller & E. Rachor (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Die Biodiversität*. pp. 232-236. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal.klima.die-biodiversitaet.37.