

# FORSCHUNGSAGENDA POLARREGIONEN IM WANDEL

Konzeptpapier des MARE:N-Begleitkreises





## INHALT

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>FORSCHUNGSTHEMEN</b>	<b>6</b>
2.1	Die polare Verstärkung des Klimawandels	6
2.2	Die Eisschilde: Kippunkte für den Meeresspiegel	12
2.3	Das Südpolarmeer als Speicher für Wärme und Kohlenstoff	16
2.4	Die Zukunft von Permafrost-Ökosystemen	20
2.5	Ökosysteme in den Polarmeen unter Klimastress	24
2.6	Schutzkonzepte für die Antarktis	28
2.7	Wissenschaft für nachhaltige Entwicklung in der Arktis	32
2.8	Auswirkungen menschlicher Aktivitäten auf die Ökosysteme in der Arktis	38
<b>3</b>	<b>QUERSCHNITTSTHEMEN</b>	<b>44</b>
3.1	Modellentwicklung	44
3.2	Zukunftsprojektionen und Vorhersagen	50
<b>4</b>	<b>FORSCHUNGSUMFELD</b>	<b>54</b>
4.1	Infrastruktur	54
4.2	Instrumente und Beobachtungssysteme	62
4.3	Nachwuchsförderung	66
4.4	Internationale Organisation und Zusammenarbeit	68
4.5	Wissenstransfer und Kommunikation	70
	<b>BETEILIGTE AUTORINNEN UND AUTOREN</b>	<b>74</b>
	<b>QUELLEN UND LITERATUR</b>	<b>76</b>

## 1 Einleitung

Der Klimawandel macht auch vor den Polargebieten nicht halt. Im Gegenteil: In den letzten Jahrzehnten hat sich die Arktis zwei- bis dreimal so stark erwärmt wie die restliche Welt, mit möglicherweise größeren Auswirkungen auf das Klima in Europa, als man noch vor einigen Jahren angenommen hat. Sichtbare Anzeichen des Klimawandels sind zum Beispiel der starke Rückgang des Meereises in der Arktis und das Abtauen der Permafrostböden. Obwohl die Antarktis bis jetzt am wenigsten vom Menschen beeinflusst wurde, wurde durch das unerwartet schnelle Abschmelzen von Teilen des antarktischen Eisschildes in den vergangenen Jahrzehnten möglicherweise ein Kippunkt überschritten, und die Obergrenze des globalen Meeresspiegelanstiegs bis zum Jahr 2100 musste im Vergleich zu früheren IPCC-Berichten nach oben verschoben werden. Der Klimawandel beeinflusst immer stärker die Lebensbedingungen in den Polargebieten – von den Kleinstlebewesen bis hin zu Pinguinen, Walen und Eisbären. Der Klimastress auf die Ökosysteme wird noch durch die zunehmende Umweltverschmutzung verstärkt. Beispiele für die Arktis sind erhöhter Schiffsverkehr, intensivere Fischerei sowie verstärkter Abbau und Transport von Rohstoffen. Dieser tiefgreifende Wandel stellt besonders die etwa vier Millionen dauerhaft in der Arktis lebenden Menschen (davon etwa zehn Prozent Angehörige indigener Völker) vor große Herausforderungen.

Eine leistungsstarke, international vernetzte deutsche Polarforschung ist eine unabdingbare Voraussetzung, um die dem Wandel in den Polarregionen zugrunde liegenden Prozesse besser zu verstehen und die lokalen, regionalen und globalen Konsequenzen zu evaluieren. Ein wesentlicher Aspekt dabei ist die Verbesserung der polaren Komponenten von Klima- und Erdsystemmodellen, um zeitnah zu präziseren Projektionen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts und darüber hinaus zu gelangen. Dieses Wissen muss genutzt und kommuniziert werden, um zusammen mit Akteuren und Akteurinnen aus Politik, Wirtschaft und Gesellschaft Handlungsoptionen für eine nachhaltige Entwicklung der Polargebiete zu erarbeiten und faktenbasierte Entscheidungsfindungen zu unterstützen. In der Arktisforschung sind die Zusammenarbeit und der Dialog mit der lokalen und indigenen Bevölkerung von essenzieller Bedeutung. Gleichzeitig muss das Bewusstsein in unserer Gesellschaft gestärkt werden, um die Einzigartigkeit und Schönheit der Polarregionen für zukünftige Generationen zu erhalten.

Die Antarktis ist seit 1961 durch den Antarktisvertrag geschützt. Militärische Aktivitäten sowie die Beseitigung und Einfuhr radioaktiver Abfälle sind verboten. Das

dazugehörige Umweltschutzprotokoll, das 1998 in Kraft trat, schützt zudem die antarktische Umwelt und verbietet den Abbau von Rohstoffen, um die Antarktis als ein dem Frieden und der Wissenschaft gewidmetes Naturreservat zu bewahren. Die einzigartigen und sensiblen Ökosysteme konnten somit bis jetzt weitgehend erhalten werden, obwohl sie in jüngster Zeit auch anthropogenen Veränderungen durch Umweltverschmutzung und Tourismus ausgesetzt sind. Für die Arktis existiert ein vergleichbares internationales Übereinkommen nicht; es gelten die nationalen Regeln in den jeweiligen Hoheitsgebieten. Der Arktische Rat ist das führende zwischenstaatliche Forum für die Arktis. Er fördert die Zusammenarbeit zwischen den Anrainern, der indigenen Bevölkerung und anderen Bewohnern und Bewohnerinnen der Arktis, insbesondere im Hinblick auf die nachhaltige Entwicklung und den Umweltschutz in der Region. Deutschland hat seit der Gründung des Rats im Jahr 1996 einen Beobachterstatus und bringt seine wissenschaftliche Expertise in den Rat aktiv ein.

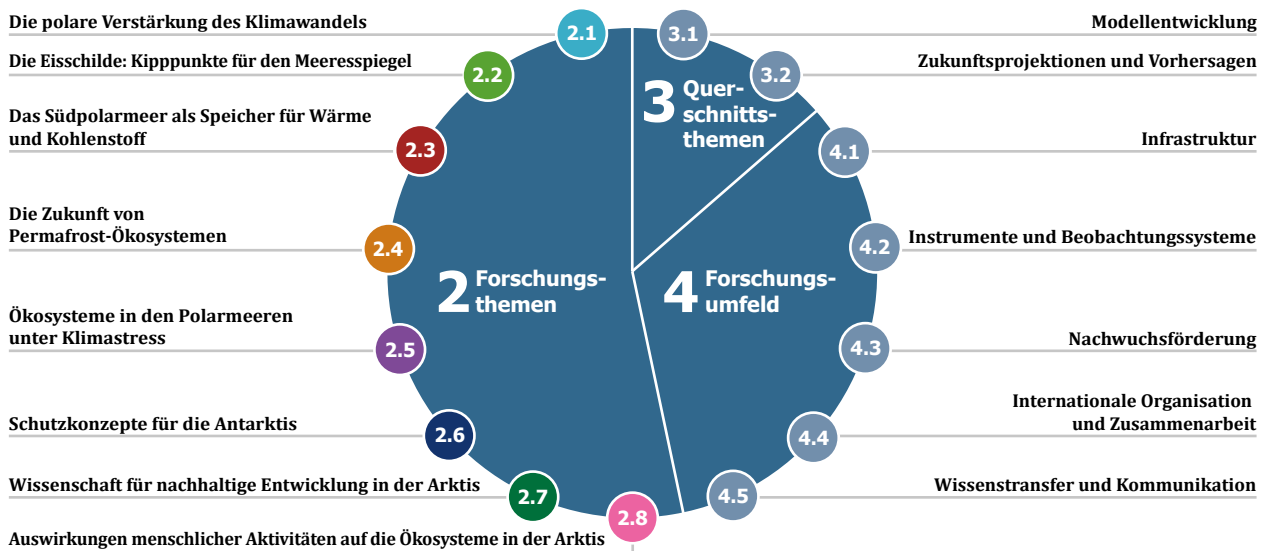
Die deutsche Polarforschung ist international hervorragend vernetzt, was sich auch an den zahlreichen deutschen Delegierten im *Scientific Committee on Antarctic Research* (SCAR), im *International Arctic Science Committee* (IASC) sowie in Gremien der Weltmeteorologischen Organisation (WMO) mit polarem Fokus zeigt. SCAR entwickelt und koordiniert Wissenschaftsprogramme in der Antarktis und dem Südpolarmeer und berät als regierungsunabhängige Organisation die Antarktis-Vertragsstaaten und andere Organisationen, wie den Weltklimarat (IPCC). Die Hauptaufgaben des IASC sind die Förderung von internationaler Zusammenarbeit in der Arktisforschung mit dem Ziel eines größeren Verständnisses der Arktis und ihrer Rolle im Erdsystem. Die WMO spielt insbesondere bei der Koordination von Forschungsaktivitäten im Bereich der Modellentwicklung, Vorhersagen und Klimaprojektionen eine zentrale Rolle.

### Agendaprozess

Das Forschungsprogramm der Bundesregierung „MARE:N – Küsten-, Meeres- und Polarforschung für Nachhaltigkeit“ zielt auf eine enge Verzahnung unterschiedlicher Förderinstrumente und eine Beteiligung aus Wissenschaft, Gesellschaft, Politik und Wirtschaft ab. Die entstehenden Synergieeffekte werden genutzt, um den Erfordernissen einer zukunftsweisenden Küsten-, Meeres- und Polarforschung gerecht zu werden. Die Forschungsaktivitäten innerhalb von MARE:N sind eingebunden in die internationalen Programme der UN und der EU. Sie tragen zur Erarbeitung internationaler Strategien für den Schutz und die

nachhaltige Entwicklung der Küsten-, Meeres- und Polargebiete bei, die die Umsetzung sowohl der europäischen Richtlinien als auch der „Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung“ der UN unterstützen. Das Forschungsprogramm MARE:N ist als offener, lernender Handlungsrahmen angelegt. Zukunftsrelevante Forschungsthemen werden gemeinsam mit Expertinnen und Experten aus Wissenschaft, Politik und Gesellschaft in zielgerichteten Agendaprozessen entwickelt. Der Agendaprozess „Polarregionen im Wandel“ begann mit der Konsultation von zwei Expertenkreisen, zum einen des Arktisdialogs und zum anderen des deutschen Nationalkomitees der Polarforschung (SCAR/IASC). Die Konsultationsprozesse in den Fachgremien führten zur ersten disziplinübergreifenden Themenfindung sowie zur Berufung der Vorsitzenden und Mitglieder des Begleitkreises durch das BMBF. Für die Umsetzung des MARE:N-Agendaprozesses „Polarregionen im Wandel“ wurden 24 Expertinnen und Experten in den wissenschaftlichen Begleitkreis berufen. Der Begleitkreis entwickelte unter der Leitung von Prof. Dr. Monika Rhein (Institut für Umweltphysik IUP und Zentrum für Marine

Umweltwissenschaften MARUM, Universität Bremen, Vorsitzende NK SCAR/IASC) und Prof. Dr. Thomas Jung (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI) die hier vorgelegte Forschungsagenda. Der wissenschaftliche Begleitkreis, bestehend aus Expertinnen und Experten der Polarforschung sowie der Sozial- und Politikwissenschaften, entwickelte unter Mitarbeit von über 80 weiteren Expertinnen und Experten das vorliegende Konzeptpapier, das den künftigen Forschungsbedarf in acht gesellschaftlich relevante Forschungsthemen gliedert, ergänzt durch zwei Querschnittsthemen und das benötigte Forschungsumfeld (siehe Abbildung). Das Konzeptpapier des MARE:N-Begleitkreises „Polarregionen im Wandel“ ermöglicht es der Bundesregierung, die von der Wissenschaft formulierten Forschungsbedarfe für die anstehenden politischen Prozesse im nationalen, europäischen und internationalen Rahmen umzusetzen. Das vorliegende Konzeptpapier des MARE:N-Begleitkreises wird im Mai 2021 dem BMBF übergeben und bildet die Grundlage für zukünftige nationale Förderbekanntmachungen.





Das deutsche Forschungsflugzeug Polar 6 hebt an der britischen Antarktis-Forschungsstation Rothera zu einem Messflug ab

## 2 Forschungsthemen

### 2.1 DIE POLARE VERSTÄRKUNG DES KLIMAWANDELS

#### Leitfragen:

- Was sind die für die polare Verstärkung wesentlichen Prozesse (lokal ↔ ferngetrieben, dynamisch ↔ thermodynamisch, Atmosphäre ↔ Ozean, Meereis und Land, Arktis ↔ Antarktis)?
- Wie gut können Wettervorhersage-, Klima- und Erdsystemmodelle die in den Polarregionen zentralen Prozesse und Phänomene abbilden?
- Welche Entwicklungspfade sind für die polare Verstärkung im 21. Jahrhundert und darüber hinaus möglich?
- Welche Auswirkungen hat der polare Klimawandel auf Klimavariabilität und Extremereignisse in den Polarregionen und in mittleren Breiten – heute und in der Zukunft?
- Was können wir aus der Klimavariabilität heute und in der Vergangenheit über aktuelle und künftige Entwicklungen in den Polarregionen lernen?

#### Gesellschaftliche Relevanz

Als Folge der durch den CO<sub>2</sub>-Anstieg verursachten globalen Erwärmung werden derzeit in der Arktis dramatische Klimaänderungen beobachtet: Die bodennahe Lufttemperatur hat sich in den vergangenen 30 Jahren um 1,4 °C erhöht. Damit wurde die globale Erwärmung in der Arktis in diesem Zeitraum um einen Faktor von 2,3 verstärkt. Die sommerliche Meereisbedeckung des Arktischen Ozeans ist zwischen 1970 und 2020 um nahezu die Hälfte zurückgegangen. Der Eisschild Grönlands schmilzt drastisch ab und forciert somit einen weiteren Anstieg des Meeresspiegels.

In der Antarktis wird bisher eine verstärkte Erwärmung nur für die Antarktische Halbinsel beobachtet. Prinzipiell wirken im polaren Südozean ähnliche Verstärkungsmechanismen wie in der Arktis. Man geht heute aber davon aus, dass sich die Verstärkung klimarelevanter Prozesse in der Antarktis aufgrund der Wärmeaufnahme des Ozeans erst zeitlich verzögert als Erwärmung der unteren Luftschichten manifestieren wird. Dieser Temperaturanstieg des Ozeans zusammen mit möglichen Umstellungen der Ozeanzirkulation kann dazu führen,

dass sich das Wasser unterhalb der Eisschelfe stark erwärmt und somit zu einem deutlichen Anstieg des Meeresspiegels beiträgt.

Die derzeit beobachteten Klimaänderungen in den Polarregionen zeigen schon jetzt umfassende und gravierende Auswirkungen auf Ökosysteme und die Lebensweise der dort lebenden Bevölkerung. Aufgrund der polaren Klimaänderungen ergeben sich zudem neue Möglichkeiten für die wirtschaftliche Nutzung der Polarregionen (beispielsweise für die Schifffahrt und den Tourismus) und damit einhergehende Risiken (zum Beispiel Ölkatastrophen). So ist zwischen 2013 und 2019 die Arktis-Schifffahrt um 75 Prozent gestiegen. Entlang der Nordostpassage wird zwischen 2020 und 2030 ein erheblicher Anstieg der Schifffahrt durch die Förderung von Ressourcen erwartet. Aus diesem Grund wollen die fünf arktischen Anrainerstaaten die Umweltauswirkungen der Schifffahrt auf die empfindlichen Ökosysteme des Nordens minimieren und gleichzeitig die Sicherheit der Schifffahrtsaktivitäten gewährleisten (siehe auch Kapitel 2.8).

Es ist davon auszugehen, dass der Klimawandel in den Polarregionen über sogenannte atmosphärische und ozeanische Telekonnektionen das Wetter und Klima sowie damit einhergehende Extremereignisse wie beispielsweise besonders warme oder kalte Winter oder Hitze und Trockenperioden im Sommer in Deutschland, Europa und anderen Teilen der Welt beeinflusst. Auch aus diesem Grund stellen die Polarregionen einen zentralen Schwerpunkt der globalen Klimaforschung von herausragender gesellschaftlicher Relevanz dar.

Zuverlässige Vorhersagen und Projektion auf Zeitskalen von Tagen bis hin zu Jahrhunderten mit Wetter-, Klima- und Erdsystemmodellen werden dringend benötigt, um wichtige gesellschaftliche Entscheidungsprozesse evidenzbasiert zu unterstützen. Entscheidend für die Verlässlichkeit von Projektionen der zukünftigen Entwicklung des polaren Klimas ist eine realitätsnahe quantitative Abbildung der relevanten Prozesse der polaren Verstärkung in Modellen, die eine wesentliche Basis für die Entwicklung wirksamer und nachhaltiger Anpassungs- und Handlungsstrategien zur zukünftigen Entwicklung von Ökonomie und Gesellschaft bilden.

## Stand der Forschung

### Arktis

Die Ursachen und Mechanismen der rasanten Klimaänderungen in der Arktis sind nur teilweise geklärt. Somit sind auch Projektionen zukünftiger Entwicklungen mit erheblichen Unsicherheiten behaftet.

Als wesentliche lokale Treiber der arktischen Verstärkung sind der Boden-Albedo-Effekt, die vertikale Temperatur-Gradienten-Rückkopplung, die Wasserdampf- und Aerosol-Wolken-Wechselwirkungen und der Planck-Effekt bekannt. Die relative Stärke dieser Prozesse, ihre gegenseitigen Wechselwirkungen sowie ihre möglichen Änderungen in einer zukünftig wärmeren Welt sind bisher noch nicht umfassend evaluiert. Wichtige, wenn auch nicht vollständige Beobachtungen zur Erforschung dieser lokalen Treiber sind während der MOSAiC-Expedition und im Rahmen des (AC)<sup>3</sup>-Projekts zur arktischen Verstärkung gewonnen worden.

An den Rändern des Arktischen Ozeans wird ein erheblicher Teil des Meereisrückgangs der sogenannten Atlantifizierung zugeschrieben, wobei aufgrund der verringerten ozeanischen Schichtung vermehrt Wärme durch tiefreichende ozeanische Vermischung im Winter an die Meeresoberfläche transportiert wird. Gleichzeitig verringert in den eurasischen Schelfmeeren, die besonders hohe Eisbildungsraten aufweisen, die erhöhte sommerliche Speicherung von Wärme und ihre Abgabe im Winter das Meereiswachstum. Die Sensitivitäten dieser ozeanischen Prozesse sind mangels kritischer Messdaten im Winter kaum erforscht und in Klimamodellen unzureichend aufgelöst.

Es wird zunehmend wahrscheinlicher, dass die arktische Verstärkung auch durch Änderungen in niederen Breiten angetrieben wird. Für die Atmosphäre spielen hierbei Einbrüche relativ warmer und feuchter Luftmassen aus den mittleren Breiten in die zentrale Arktis eine wichtige Rolle. Das Verständnis der dazugehörigen Transformationsprozesse in den Luftmassen während ihres Transports rückt zunehmend in das Zentrum der Forschungsaktivitäten.

Die möglichen atmosphärischen Fernwirkungen der arktischen Verstärkung auf das Wetter und Klima in mittleren Breiten werden in der Wissenschaft sehr kontrovers diskutiert (SROCC). Die Beobachtungen zeigen hohe Korrelationen; ob dies aber auch Kausalität bedeutet, ist derzeit ungeklärt. Noch unsicherer sind Schlussfolgerungen bezüglich der damit verbundenen Verstärkung der Klimavariabilität und vermehrt auftretender Extremwetterereignisse in mittleren Breiten. Modell-Studien zeigen deutlich schwächere atmosphärische Telekonnektionen, deuten aber ebenfalls auf einen Einfluss der Arktis auf den Jetstream in mittleren Breiten hin (eher im Sinne einer Südwärts-Verschiebung als einer Verstärkung des Mäandrierens). Es ist nicht auszuschließen, dass existierende Modelle die tatsächlichen Telekonnektionen unterschätzen. Eine mögliche Ursache könnten zu schwache Rückkopplungen der Stürme auf den Jetstream (sogenannte *eddy feedbacks*) sein.

Auch die Zunahme des ozeanischen Wärmetransports in die Arktis ist Gegenstand der aktuellen Forschung. Langzeitbeobachtungen ergeben, dass sich die Temperatur der in den Arktischen Ozean einströmenden atlantischen Wassermassen in den vergangenen Jahrzehnten um ungefähr 1 °C erhöht hat. Diese Erwärmung liegt deutlich über dem globalen Temperaturanstieg in den oberflächennahen Ozeanen. In diesem Zusammenhang ist insbesondere unklar, inwieweit die Erwärmung des tieferen Arktischen Ozeans durch Änderungen im Nordatlantik (Atlantische Meridionale Umwältzirkulation) im Vergleich zu solchen im Europäischen Nordmeer bedingt ist.

Insgesamt hat sich die Forschung bisher hauptsächlich auf die Änderungen des mittleren Zustands des Arktischen Klimasystems fokussiert. Es wird aber zunehmend klarer, dass sich Klimavariabilität und Extremereignisse in einer wärmeren Arktis erheblich verändern werden. Diese Änderungen sind weitestgehend unerforscht und stellen eine wesentliche Wissenslücke dar.

## **Antarktis**

In der Antarktis wurde bisher noch keine großflächige Verstärkung der bodennahen Lufttemperaturen beobachtet, die mit derjenigen in der Arktis vergleichbar ist. Die bisherige Verstärkung in der Antarktis ist eher regional begrenzt und hauptsächlich dynamischer Natur, das heißt, sie ist auf eine Änderung der atmosphärischen Zirkulation zurückzuführen. Man geht heute davon aus, dass sich die Verstärkung in der Antarktis erst deutlich später als in der Arktis zeigen wird (wie stark und wann genau ist bisher noch nicht präzise quantifiziert). Die Aufnahme der zusätzlichen „anthropogenen Wärme“ durch den Südozean spielt dabei eine entscheidende Rolle. In der Tat wurden in den vergangenen Jahrzehnten deutliche Erwärmungstrends in den tieferen Wassermassen des Südozeans beobachtet. Diese übertreffen den globalen Erwärmungstrend im tiefen Ozean um das Fünffache. Weiterhin wird eine Abnahme und Südwärts-Verlagerung der großräumigen Westwindssysteme über dem Antarktischen Zirkumpolarstrom festgestellt. Insgesamt mehren sich in den letzten Jahren die Hinweise, dass das Meereis-Ozean-Atmosphäre-System in der für die Eisbildung und die Stabilität der Schelfeise so kritischen Region der Kontinentalschelfe auf überregionale atmosphärische und ozeanische Antriebe reagiert (Forschungsthema 2).

Die Meereisbedeckung im Südozean, der den antarktischen Kontinent umgibt, hat sich in den vergangenen vier Dekaden kaum verändert. Im starken Gegensatz dazu simulieren Klimamodelle im gleichen Zeitraum einen signifikanten Rückgang (SROCC). In diesem Zusammenhang spricht man von dem Antarktischen Meereis-Paradox.

Die beobachteten Änderungen der Meereisausdehnung sind durchaus beträchtlich – aber eher von regionaler Bedeutung (zum Beispiel entlang der Antarktischen Halbinsel). In diesem Zusammenhang spielt auch das episodische Auftreten der Weddell-Polynja eine Rolle. Weiterhin deuten Satellitendaten der Meereisausdehnung auf eine erhebliche Zunahme der zwischenjährlichen Variabilität der Meereisausdehnung in den vergangenen Jahren hin. In der Forschung wird das als Anzeichen für eine imminente umgreifende Veränderung betrachtet.

## **Arktis und Antarktis**

Für beide Polarregionen weisen Wetter- und Klimavorhersagen teilweise signifikante Unsicherheiten auf (zum Beispiel das Antarktische Meereis-Paradox). Die realistische Darstellung der Boden-Albedo, der Energie-, Impuls- und Feuchteflüsse, der Ozeanwirbel, der Grenzschicht-Entwicklung sowie des Lebenszyklus von Mischphasenwolken und ihrer Kopplung an die Atmosphärendynamik stellen beispielhaft aktuelle Herausforderungen für die Modellierung dar. Außerdem gibt es wesentliche Lücken bei der adäquaten Berücksichtigung der dynamischen und thermodynamischen Wechselwirkungsprozesse zwischen Ozean, Meereis, Landeis und Atmosphäre. Verbesserungspotenzial zeichnet sich dabei insbesondere durch besseres Prozessverständnis sowie die adäquate Darstellung zentraler Prozesse in Modellen ab.

Klima-Archive aus beiden Polargebieten zeigen, dass schnelle Klimaänderungen in polaren Breiten mit ausgeprägten Wechseln in Temperatur und Niederschlag auf Zeitskalen von Jahren, Dekaden und Jahrhunderten nicht ungewöhnlich sind. Ein prominentes Beispiel ist das letzte warmzeitliche Maximum vor circa 125 000 Jahren, als die Temperatur in hohen Breiten deutlich über der heutigen lag. Zu dieser Zeit erreichten die atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen typische interglaziale Höchstwerte, die für CO<sub>2</sub> deutlich (circa 25 Prozent) unter der heutigen Konzentration von 415 Parts per Million lagen. Der damalige signifikante Anstieg der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration wird unter anderem mit einem Rückzug des Meereises erklärt. Im Pliozän vor drei bis fünf Millionen Jahren war es mehrere Grad wärmer als heute, mit einer ausgeprägten polaren Verstärkung. Dies ist somit vergleichbar mit Klimaszenarien für die nächsten hundert Jahre. Noch wärmer war es während des mittleren Miozäns vor circa 15 Millionen Jahren. Auffällig sind hierbei die ausgeprägte polare Verstärkung und die Sensitivität gegenüber externen Störungen. Diese Warmzeiten sind allerdings noch unzureichend dokumentiert und in ihren Ursachen und Rückkopplungen in hohen Breiten nicht verstanden. Ihre Rekonstruktion und modellgestützte Interpretation liefert gleichwohl einen wichtigen Beitrag, um die natürliche Klimadynamik in ihrer Gesamtheit zu verstehen.



### Forschungsbedarf

#### **Quantifizierung der Treiber für die polare Verstärkung**

Es besteht dringender Forschungsbedarf bei der Quantifizierung lokaler und ferngetriebener Verstärkungseffekte des gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Eis-Land-Systems in den Polarregionen. Dazu gehören insbesondere die physikalischen und auch (biogeo)chemischen Prozesse, welche die Wärme-, Impuls-, Feuchte- und Stoff-Flüsse an den Grenzflächen zwischen Atmosphäre und Oberfläche bestimmen. Das schließt auch horizontale Transporte in Atmosphäre und Ozean ein. Tiefe Grenzschichtwolken sind ebenfalls als ein wesentlicher Faktor identifiziert, insbesondere deren regionale Wirkung auf das Strahlungsfeld über intensiv reflektierenden Eis- und Schneeflächen und unter Temperaturinversionen in verschiedenen Jahreszeiten. Der Einfluss hoher Eiswolken auf den bodennahen Strahlungsenergiehaushalt in der Arktis muss erforscht werden. Die Rolle von Aerosolpartikeln in einer veränderten Arktis (mehr anthropogene Quellen durch die zunehmende wirtschaftliche Nutzung der Arktis, mehr marine Aerosolquellen durch den Rückgang der Meereisbedeckung) sowie deren Wechselwirkungen mit Wolken- und atmosphärenchemischen Prozessen muss geklärt werden.

#### **Bestimmung der Energiebilanz des Meereises**

Um die Rolle der verschiedenen Mechanismen für Bildung und Abschmelzen von Meereis quantifizieren zu können, müssen die einzelnen Beiträge zur Energiebilanz bestimmt werden. Dazu müssen langjährige Messungen der Grenzflüsse von Energie und Impuls durchgeführt und Fortschritte in der Modellierung der kleinskaligen Dynamik des gekoppelten Systems (atmosphärische Grenzschicht, Meereis und Schneeaufgabe sowie ozeanische Deckschicht und Schicht des warmen, atlantischen Wassers unterhalb der Deckschicht) vorgenommen werden. Besonderes Augenmerk sollte auf die kritischen Eisbildungsgebiete wie die Schelfregionen und die Eisrandzone gelegt werden. In der Antarktis beziehungsweise dem Südozean muss die Resilienz der Meeresbedeckung gegenüber der globalen Erwärmung erklärt werden, die so von Klimamodellen nicht simuliert wird (Antarktisches Meereis-Paradox). Insbesondere gilt es dabei, die Frage zu beantworten, welche ozeanischen und atmosphärischen Prozesse sowie deren Sensitivitäten und Rückkopplungen es sind, die – im Gegensatz zur Arktis – dieses System so robust erscheinen lassen. In diesem Zusammenhang besteht wichtiger Forschungsbedarf, die Wirkung der großräumigen Antriebe auf die zirkumpolare Reaktion von Meereis-Ozean-Prozessen im Bereich der Kontinental-schelfregionen zu verstehen, die so kritisch für die Meereisbildung und das basale Schmelzen in den Schelfeiskavernen sind (Forschungsthema 2).

#### **Durchführung von Beobachtungen für Prozessverständnis, Dokumentation langzeitlicher und regionaler Änderungen**

Für geeignete Vergleiche der Modellergebnisse mit der Realität sind kombinierte Messaktivitäten mit gekoppelter Nutzung von Daten aus dezidierten Messkampagnen (Prozessverständnis), bodengebundene Langzeitmessungen (zur Verfolgung der zeitlichen Entwicklung und der saisonalen Abhängigkeit der polaren Verstärkung) sowie Satellitendaten (regionale Abdeckung) erforderlich. Hierbei ist es notwendig, die große Bandbreite räumlicher und zeitlicher Skalen abzudecken und heterogene Datensätze bestmöglich zu kombinieren. Ganzjährige Messungen vor Ort sind nötig, um den polaren Klimawandel zu dokumentieren und die Prozesse im Jahresverlauf zu beobachten, aber auch um den besonderen Herausforderungen der Satellitenfernerkundung in den Polarregionen zu begegnen sowie Fernerkundungsalgorithmen zu evaluieren und weiterzuentwickeln.

#### **Evaluation von Modellen**

Wettervorhersage-, Klima- und Erdsystemmodelle müssen für die Polarregionen systematisch mit kontinuierlichen Messungen von Bodenstationen (autonom und bemannt), Radiosonden, Satelliten und anderen Komponenten des Beobachtungssystems evaluiert werden. Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf kleinräumigen Prozessen, die für zuverlässige Vorhersagen und Klimaprojektionen realitätsnäher dargestellt werden müssen. Die vielfältigen Wechselwirkungen der Atmosphäre mit Meereis, Ozean und Land müssen untersucht und realistisch in Modellen dargestellt werden. Dazu zählen beispielsweise verbesserte Darstellung von Grenzschichtprozessen an den Grenzflächen zwischen Atmosphäre, Ozean und Meereis aber auch zwischen Schelfeisen in dem Ozean in Klima- und Erdsystemmodellen.

#### **Fernwirkungen**

Die (wechselseitigen) Zusammenhänge zwischen der arktischen Verstärkung und den Windsystemen der mittleren Breiten (Jetstream) sowie den damit verbundenen Extremereignissen müssen mithilfe von Beobachtungsdaten und Modelleexperimenten (zum Beispiel unter Verwendung des „Polar Amplification Model Intercomparison Project“-Protokolls) auf Kausalität hin überprüft werden. Dazu muss unter anderem verstanden werden, wie lokale Prozesse und Wechselwirkungen im Vergleich zu Effekten wirken, die durch meridionale Transporte bedingt sind (zum Beispiel Warmlufteinschübe und Kaltluftausbrüche, ozeanische Transporte). Die im Verlauf von Luftmasstransporten in die Arktis ablaufenden Transformationsprozesse (einschließlich Aerosol-, Wolken- und Niederschlagsbildung) sind in Modellen immer noch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Diese Prozesse müssen deshalb detailliert

beobachtet und deren Darstellung in Modellen verbessert werden. Die Fernwirkungen können auch ozeanischen Ursprungs sein. So führt verstärktes Abschmelzen zu mindestens zeitweise zu Salzgehaltanomalien, die in den Nordatlantik wandern und dort die Tiefwasserbildung abschwächen könnten – mit erheblichen Auswirkungen für die AMOC (*Atlantic Meridional Overturning Circulation*). Salzgehaltanomalien könnten auch durch verstärkten Niederschlag, zunehmende Flusseinträge und das Abschmelzen des Grönländischen Eisschildes bedingt sein. Dass die arktische Verstärkung zu einer Abschwächung der AMOC beiträgt, ist mittlerweile klar – zu untersuchen ist hingegen, wie stark diese Abschwächung sein wird.

### **Entwicklungspfade der arktischen Verstärkung**

Es muss untersucht werden, welche Entwicklungspfade der arktischen Verstärkung im 21. Jahrhundert möglich sind und inwiefern und insbesondere wann für die Zukunft eine ähnlich starke Erwärmung der Antarktis zu erwarten ist. Insbesondere wird es in diesem Zusammenhang nicht nur darum gehen, mittlere Änderungen zu beschreiben und zu verstehen. Es muss vielmehr ein besseres Verständnis möglicher Änderungen der Klimavariabilität auf Zeitskalen von Monaten bis hin zu Jahrzehnten sowie der Änderungen von Extremereignissen in Polarregionen erreicht werden.

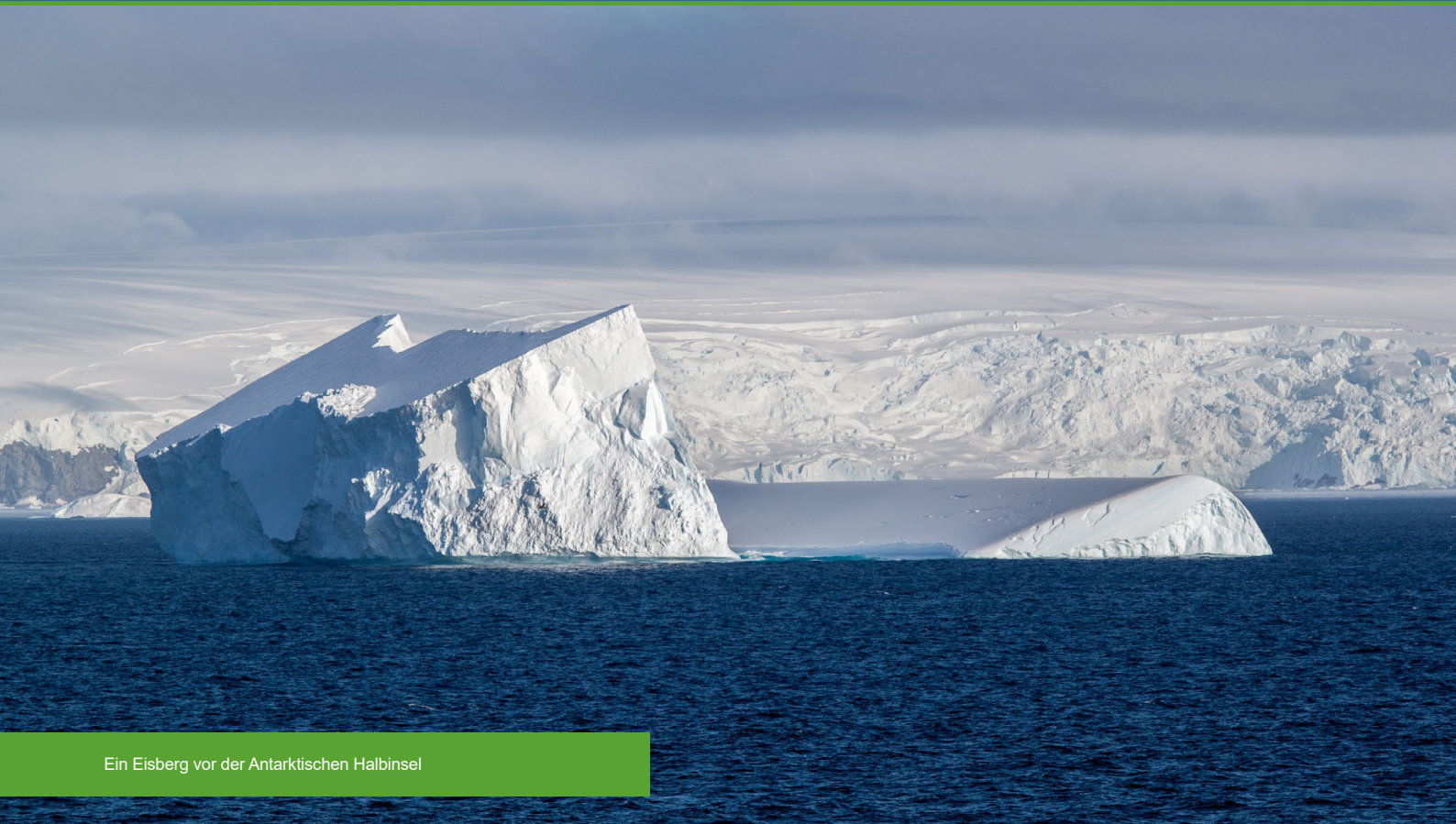
### **Tempo der heutigen polaren Verstärkung im Vergleich zu anderen Warmzeiten**

Die Rekonstruktionen polarer Temperaturen und Meereisbedingungen sowie komplexer biogeochemischer Proxies in verschiedenen Ablagerungsräumen müssen weiterentwickelt werden. Eine Verbesserung der stratigraphischen Auflösung und die Verknüpfung mit terrestrisch-marinen Daten sind notwendig, ebenso wie die Erforschung der klimabedingten Auswirkungen auf den Sedimenttransport. Simulationen der treibenden Mechanismen und Prozesse auf erdgeschichtlich längeren Zeitskalen als der derzeitigen Erwärmung dienen dazu, Ausmaß und Tempo der derzeitigen polaren Klimaänderungen in einen längerfristigen Zusammenhang zu stellen und wesentliche Treiber der langfristigen Entwicklung aufzudecken. Dazu gehört auch die Verknüpfung mit terrestrisch-marinen Datenreihen aus der Arktis und Antarktis, um die Amplituden und Geschwindigkeiten erdgeschichtlicher Klimaänderungen zu erfassen.

### **Daraus leitet sich folgender Forschungs- und Entwicklungsbedarf ab:**

- Verbesserung des Prozessverständnisses für die Ursachen und Auswirkungen des Klimawandels in den Polarregionen auf unterschiedlichen Zeitskalen. Dazu gehört die Quantifizierung arktischer ↔ antarktischer, regionaler ↔ großskaliger, lokaler ↔ ferngetriebener, atmosphärischer ↔ ozeanischer/kryosphärischer und dynamischer ↔ thermodynamischer Treiber der polaren Verstärkung. Dies umfasst auch Untersuchungen zu möglichen Änderungen von Klimavariabilität und Extremereignissen in den Polarregionen.
- Untersuchung der Ursachen der stark unterschiedlichen Änderungen der Meereisausdehnung in der Arktis im Vergleich zur Antarktis (Antarktisches Meereis-Paradox) und Beantwortung der Frage, ob das antarktische Meereis kurz vor einem starken Rückgang steht.
- Etablierung skalenauflösender, ganzjähriger Messsysteme zur Bestimmung von Energieflüssen und Energiebudgets in Schlüsselregionen der polaren Verstärkung (Eisrandzone, Schelfregionen, Randströme).
- Durchführung dezidierter Messkampagnen und Langzeitbeobachtungen zur prozess- und klimaorientierten Modellevaluierung, zur Entwicklung neuer beziehungsweise Verbesserung vorhandener Parametrisierungen, zur Evaluierung einer neuen Generation hochauflösender Modelle („Digitale Zwillinge“) sowie zur Evaluierung von Satelliten-Fernerkundungsdaten.
- Untersuchung des Einflusses der polaren Verstärkung über atmosphärische und ozeanische Prozesse auf das Wetter, Klima und Extremereignisse in mittleren Breiten. Dazu gehört auch die Beantwortung der Frage, ob Kausalität aus Beobachtungsdaten fehlinterpretiert wird und ob Modelle die Fernwirkungen unterschätzen.
- Abschätzung der möglichen zukünftigen Entwicklungspfade der polaren Verstärkung im 21. Jahrhundert einschließlich einer Quantifizierung der Unsicherheiten der regionalen und globalen Auswirkungen.
- Einordnung der derzeitigen polaren Klimaänderungen mithilfe von Daten und Modellen aus der erdgeschichtlichen Vergangenheit unter Einbeziehung einer systematischen Nutzung mariner und terrestrischer hochaufgelöster Zeitreihen vergangener Warmzeiten. Von besonderem Interesse sind hier Umweltdaten von Eiskernen.





Ein Eisberg vor der Antarktischen Halbinsel

## 2.2 DIE EISSCHILDE: KIPPPUNKTE FÜR DEN MEERESSPIEGEL

### Leitfragen:

- Wie hoch sind die Beiträge abschmelzender Eisschilde und Polargebiete zum globalen und regionalen Meeresspiegelanstieg – heute und in der Zukunft?
- Wie groß ist die Gefahr, dass Teile des antarktischen Eisschilds und der Eisschild von Grönland instabil werden oder extremen Masseverlust erfahren, und sind solche Ereignisse in der Erdgeschichte schon eingetreten?
- Wie beeinflusst das Abschmelzen des Grönländischen Eisschilds die Ozeanzirkulation und damit regionale Änderungen des Meeresspiegels?
- Wie können die Wechselwirkungen von Eisschilden mit Ozean und Atmosphäre besser verstanden, quantifiziert und modelliert werden, um die Prognosen für den regionalen und globalen Meeresspiegel für die nächsten 100 bis 300 Jahre zu verbessern?

### Gesellschaftliche Relevanz

Im Jahr 2050 werden etwa eine Milliarde Menschen nahe der Küste wohnen, heute sind es 680 Millionen. Viele von ihnen sind dem Anstieg des Meeresspiegels – global um 23 Zentimeter seit Anfang des 20. Jahrhunderts – und

verstärkten Extremereignissen (zum Beispiel Sturmfluten) ausgesetzt. Anfangs war die Ausdehnung des immer wärmeren Ozeanwassers der wichtigste Grund, aber seit 2006 steigt der globale Meeresspiegel rund zweieinhalbmal schneller als im Zeitraum 1900–1990. Hauptursache ist das verstärkte Abschmelzen der Grönländischen und antarktischen Eisschilde sowie der Gletscher. Unerwartet schnell verlor der westantarktische Eisschild an Masse. Der Sonderbericht über Ozean und Kryosphäre (SROCC, 2019) des Weltklimarats erhöhte daraufhin die Obergrenze des globalen Meeresspiegelanstiegs bis zum Jahr 2100 auf 1,10 Meter und bewertete den Eisschild als weniger stabil als in früheren Berichten. Bis zum Jahr 2050 werden extreme Wasserstände, die historisch betrachtet Jahrhundertereignisse waren, an vielen Küstenorten mindestens einmal pro Jahr eintreten. Dies alles hat Folgen für die Lebensumstände an den Küsten und für die Schutzmaßnahmen, die durchgeführt werden müssen, damit Menschen und deren Lebensgrundlagen geschützt werden. In den kommenden Jahrhunderten könnte bei einem weiteren durch den Klimawandel bedingten Temperaturanstieg der Kippunkt von Teilen des antarktischen Eisschilds erreicht werden – das heißt, das Abschmelzen wäre nicht mehr aufzuhalten – und der Meeresspiegel global um mehrere Meter ansteigen.

### Stand der Forschung

Die Inlandeismassen der Antarktis und Grönlands binden den bei Weitem größten Teil des Süßwassers der Erde. Würde der mehrere 1000 Meter dicke antarktische Eisschild komplett desintegrieren, dann stiege der globale Meeresspiegel um etwa 58 Meter, und ein Verlust des Grönland-Eisschilds würde zusätzliche 7,40 Meter beitragen. Bis vor Kurzem dominierte die Ausdehnung des Ozeans durch dessen Erwärmung den Anstieg des globalen Meeresspiegels, in den letzten drei Jahrzehnten wurde jedoch der Beitrag durch den Massenverlust der polaren Eisschilde und der Gletscher stärker. Die beobachtete Beschleunigung des Masseverlusts des antarktischen Eisschilds hat im Sonderbericht des Weltklimarats über Ozean und Kryosphäre (SROCC) aus dem Jahr 2019 zu einer Erhöhung der geschätzten Obergrenze des Meeresspiegelanstiegs bis zum Jahr 2100 geführt. Der westliche Teil des antarktischen Eisschilds könnte laut SROCC-Bericht einen Kippunkt erreicht haben, sodass die Desintegration nicht mehr rückgängig gemacht werden kann. Dies würde bedeuten, dass der Meeresspiegel in den kommenden Jahrhunderten noch schneller steigen wird, als bisher vermutet. Diese Prognosen sind jedoch mit einer großen Unsicherheit behaftet. Das liegt an den wenigen Beobachtungen und dem noch unzureichenden Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Ozean, Meereis, Eisschilden und der festen Erde, dem begrenzten Verständnis des Gleitens des Eisschilds über den Untergrund und der mangelnden Kenntnis des geothermalen Wärmestroms. Das Grönländische Eisschild sowie die arktischen Gletscher und Eiskappen außerhalb Grönlands haben im Zeitraum 2006–2015 gleiche Beiträge zum globalen Meeresspiegel geleistet und werden auch zukünftig eine bedeutende Rolle spielen.

### Forschungsbedarf

Das Ziel der Forschung ist es, zuverlässige Projektionen der polaren Anteile zum globalen und regionalen Meeresspiegel in den nächsten 100 bis 300 Jahren zu gewinnen. Auf diesem Zeithorizont erwarten wir deutliche Beiträge der Gletscher und Eisschilde zum globalen Meeresspiegelanstieg bis zu mehreren Metern, sodass auch das Management der Auswirkungen für die Menschheit eines derart langen Zeitraums bedarf. Von entscheidender Bedeutung für verbesserte Prognosen des globalen und regionalen Meeresspiegelanstiegs ist es, alle Eismassen und die Prozesse, die ihr Abschmelzen beeinflussen, realitätsnäher in die Klimamodelle einzubinden, als es heute möglich ist. Mehrere Schritte sind nötig, um dieses Ziel zu erreichen: Unser Wissen muss auf allen Zeitskalen durch Beobachtungen und Prozessstudien substanziell erweitert werden, um die Entwicklung einer realitätsnahen physikalisch motivierten Modellierung der Kalbungsprozesse, des Gleitens von Gletschern über den Untergrund sowie der Hydrologie der Eisschilde und Gletscher zu ermöglichen.

Die Einbindung dieser verbesserten Simulationen in Klimamodelle ist der letzte Schritt. Für die Evaluierung der Modelle spielen internationale Vergleiche in transparenten Verfahren eine besondere Rolle.

### Wechselwirkung Ozean–Eisschilde

Eisströme von den antarktischen Eisschilden fließen langsam Richtung Küste und bilden dort verbreitete Schelfeise, die auf dem Ozeanwasser aufschwimmen. Trifft warmes Ozeanwasser auf die Unterseite der Schelfeise, wird dort Eis geschmolzen (basales Schmelzen). Verstärkt sich dieses basale Schmelzen, dünnen sich Schelfeise aus und die Übergangszone zum Inlandeis zieht sich zurück. In extremen Fällen, wie bisher an der Antarktischen Halbinsel mehrfach eingetreten, können Schelfeise instabil werden. Verringert sich die Mächtigkeit der Schelfeise oder droht gar der Verlust, dann beschleunigen sich die Bewegungen der Gletscher des Inlandeises, der Masseverlust wird erhöht und der Meeresspiegel steigt schneller. Entscheidend für die Intensität des Schmelzens der Schelfeise und damit für den Anstieg des Meeresspiegels sind die Prozesse, die warme Wassermassen aus den Tiefen des Ozeans über den antarktischen Kontinentalabhang auf die Schelfregionen bringen. Das warme Wasser strömt dann unter die mehrere Hundert Meter dicken Schelfeise und liefert die Wärme für das basale Schmelzen. Die Vorgänge sind komplex und erfordern ein Zusammenwirken von Prozessen im Ozean, auf dem Kontinentalschelf und in der Atmosphäre. Winde treiben das warme Wasser auf die Schelfe, sorgen aber auch dafür, dass sich Barrieren salzreichen, kalten Wassers auf den Kontinentalschelfen aufbauen, die das warme Wasser verdrängen können. Die Polynjen, die durch katabatische Winde auf den Schelfregionen erzeugt werden, sind ein entscheidender Antrieb für die Ozeanströmung insbesondere unter dem Filchner-Ronne-Schelfeis, und sie sorgen unter heutigen Bedingungen für dessen Stabilisierung. Im Gegensatz dazu begünstigen ein Rückzug des Meereises und der damit verbundene erhöhte Salzeintrag ins Ozeanwasser das basale Schmelzen der Schelfeise. Da die kleinskaligen komplexen Prozesse in heutigen Modellen nicht ausreichend präzise simuliert werden können, ist nicht klar, wie schnell sich das Abschmelzen bei einem weiteren Temperaturanstieg beschleunigen wird. Um hier weiterzukommen, sind zum einen Beobachtungen aller Komponenten und Prozesse zum quantifizierten Verständnis und zur Erfassung von Langzeittrends nötig, und zum anderen Anstrengungen in der Modellierung des Ozeans, der Atmosphäre und der Eisschilde mitsamt den Schelfeisen. Es müssen alle relevanten Prozesse realitätsnah modelliert werden, die Auswirkungen auf das Abschmelzen haben.

### Masseverlust des Grönländischen Eisschilds und der arktischen Gletscher

Anders als die Antarktis besitzt Grönland keine großflächigen Schelfeise. Es gibt aber schwimmende Gletscherzungen in

den Fjorden, für deren Stabilität ebenfalls basales Schmelzen den essenziellen Faktor darstellt. Heute existieren nur noch drei schwimmende Gletscherzungen im Norden Grönlands. Im Süden sind sie bereits abgeschmolzen, mit entsprechender Beschleunigung der Gletscher-Fließgeschwindigkeiten Richtung Küste. Inzwischen ist auch der Norden Grönlands von deutlichem Masseverlust betroffen.

Für das gesamte Grönland-Eisschild sind das Schmelzen an der Oberfläche inklusive der Bildung von Schmelzwasserseen und die Drainage von Schmelzwasser zur Gletscherbasis wesentliche Prozesse, da Schmelzprozesse an der Oberfläche und die Beschleunigung der Auslassgletscher jeweils etwa 50 Prozent beitragen. Gezeitengletscher ohne schwimmende Eiszungen verhalten sich extrem sensitiv gegenüber dem Kalben der Eisberge, jedoch ist deren Kalbungsverhalten nicht ansatzweise gut genug verstanden, um es prognostisch in numerischen Modellen zu simulieren – eine bedeutende Voraussetzung für die Vorhersage des zukünftigen Massenverlusts des Grönländischen Eisschildes und der Auswirkungen auf den Meeresspiegel. Folgende Mechanismen müssen besser verstanden werden: das Zusammenspiel von Drainage und Gleitverhalten der Gletscher, der subglaziale Ausstrom und das Aushöhlen der Kalbungsfront von unten, das durch die Bildung von Schmelzwasserfahnen unter Einmischung von Fjordwasser stattfindet. Ähnlich gilt dies für die arktischen Gletscher und Eiskappen, die andere Reaktionszeiten auf Ozean- und Klimasignale aufweisen können. Auch um eine bessere Differenzierung der gravimetrischen Massenänderungen des grönländischen Inlandeises von den umliegenden Eismassen zu erzielen, müssen diese Prozesse separat betrachtet werden. Letztendlich führt eine Kombination von innovativen In-situ-Beobachtungen und Fernerkundung mit Prozessmodellierung und ihrer Implementierung in Klimamodelle zu einer verbesserten Prognose der polaren Beiträge zum Meeresspiegelanstieg.

### **Änderung der regionalen Meeresspiegel durch Masseverlust Grönlands**

Die Masseverluste des Grönlandeises liefern mehr Süßwasser in den nördlichen Nordatlantik. Wenn dieses Süßwasser in die Schlüsselregionen der klimarelevanten atlantikweiten Zirkulation transportiert wird, dann könnte dies das Absinken von Oberflächen- in Tiefenwasser erschweren und zu einer weiteren Verlangsamung der Atlantikzirkulation führen, als dies schon durch die globale Erwärmung geschieht. Eine abgeschwächte Zirkulation lässt den regionalen Meeresspiegel auch in Europa noch mehr ansteigen, als durch Abschmelzen und Erwärmung zu erwarten ist. Es ist noch unklar, welche Rolle das Süßwasser aus Grönland für die Zirkulation spielen wird, und noch sind nicht alle relevanten Prozesse gut in den Klimamodellen repräsentiert. Es besteht ein Bedarf an verbesserten Modellen und an Langzeitbeobachtungen der

Zirkulation und der Tiefenwasserbildung an mehreren Schlüsselstellen. Wichtig in diesem Zusammenhang sind auch die erwartete Zunahme der Süßwassertransporte aus dem Arktischen Ozean und die Frage, wie und ob sie diese Bildungsregionen erreichen. Für die Evaluation muss auch berücksichtigt werden, dass sich die Bildungsregionen in den Modellen nicht immer mit denen im realen Ozean decken.

### **Erfassung von Grundlagendaten und verbessertes Prozessverständnis für die Massenbilanzen der Eisschilde und polaren Gletscher**

Zum Verständnis der Mechanismen, die zum Eisverlust und zum (regionalen wie globalen) Anstieg des Meeresspiegels führen, müssen Grundlagendaten kontinuierlich erhoben werden, um überhaupt Änderungen der Komponenten in der Gesamtbilanz der Eismassen erkennen zu können. Hierunter fallen zum Beispiel die Beobachtung der Eisdynamik, der Höhen- und Massenänderungen von Inlandeis und Schelfeis sowie die Quantifizierung des Oberflächen- und des basalen Schmelzens. Ebenso essenziell sind eine verbesserte Erfassung des geothermalen Wärmeflusses und das dringende Beseitigen von Wissenslücken hinsichtlich der Topografie des Felsbodens unter den eisbedeckten Gebieten, der Geometrie der Schelfeis-Kavernen und der Bathymetrie in Fjorden. Diese Informationen werden benötigt, um die Interaktion zwischen Ozean und Eis sowie die Strömungsbedingungen besser zu verstehen und in Modellen abzubilden. Basale Schmelzraten an den Schelfeisen wurden bisher nur an wenigen Stellen gemessen, sind aber sehr bedeutsam, um aus Fernerkundung und Modellen abgeleitete Raten zu evaluieren und deren Parametrisierung in Klimamodelle zu ermöglichen. Die Lage der Aufsetzlinie (Übergang von gegründetem zu aufschwimmendem Eis) ist ein wesentlicher Indikator für Änderungen. Für verbesserte Bilanzierungen sind exakte Kenntnisse der Firnkompaktion (Firn: Schnee, der mindestens ein Jahr alt ist), der Mächtigkeits- und Dichteverteilung sowie der Eindringtiefe von Messsignalen in den Firnschneekörper von Bedeutung, um von Satelliten gemessene Höhenänderungen korrekt in Massenänderungen überführen zu können. Hierfür sind auch verbesserte physikalische Firnschneemodelle für Verdichtung und Hydrologie notwendig.

### **Kipppunkte und klimawandelinduzierter Temperaturanstieg: Erkenntnisse aus geologischen Warmzeiten**

Für Untersuchungen, ob die Eisschilde teilweise oder ganz am Kipppunkt sind, sind geologische Zeiten, in denen die regionalen Temperaturen höher als heute waren, von erheblicher Relevanz. Diese Perioden reichen von der Eem-Warmzeit (vor circa 125.000 Jahren) bis zu den Warmzeiten des mittleren Pliozäns (vor circa 3–3,5 Millionen Jahren) und mittleren Miozäns (vor circa 14–16 Millionen Jahren). Aus diesen Epochen gibt es erste Hinweise, die einen partiellen oder vollständigen Kollaps der marin basierten Eisschilde vermuten

lassen. Ein Kollaps des westantarktischen Eisschildes könnte während der letzten Interglazial-Periode stattgefunden haben, einer Periode, in der die polare Oberflächentemperatur etwa zwei bis drei Grad Celsius höher war als heute und die damit vergleichbar ist mit den Temperaturen, die im Jahr 2100 Realität sein könnten. Der Meeresspiegel würde dabei um drei bis fünf Meter ansteigen. Um die Unsicherheiten in den Aussagen zu verringern, werden Sediment- und Eisbohrkerne aus Schlüsselregionen sowie eine auf den Beobachtungen basierende Modellierung benötigt. Das Verhalten der Eisschilde in anderen Warmzeiten kann dann genutzt werden, um die kritischen Temperaturgrenzen zu identifizieren, an denen Eismassen irreversibel verloren gehen. Sie liefern damit einen wichtigen Beitrag zur Evaluation der Klimamodelle.

### **Realitätsnahe Simulation der Schmelzprozesse**

Modellrechnungen zufolge schrumpfen die Eismassen in zwei Schritten. Der erste Schritt führt zu einem Rückzug des Schelfeises. Gehen Schelfeismassen in der Antarktis verloren, beschleunigen sich die Eismassen des dahinterliegenden Inlandeises, der Eistransport in den Ozeanen nimmt zu und der Meeresspiegel steigt. Berücksichtigt werden müssen auch die Änderungen in den Niederschlägen über den Eismassen, das Schmelzen an der Eisoberfläche durch wärmere Luft und eine veränderte Strahlungsbilanz durch mehr Schmelzwasserseen an der Eisoberfläche (sogenannte supraglaziale Seen) und nassen Firn. Dabei muss berücksichtigt werden, dass der Temperaturanstieg in der Arktis etwa zwei- bis dreimal höher ausfällt als der globale Mittelwert (siehe 2.1). Die gesamte Folge von Abläufen im gekoppelten Klimasystem sind für den Meeresspiegelanstieg extrem relevant, da beide Eisschilde potenzielle Kippunkte darstellen. Viele der Prozesse sind auch für die arktischen Gletscher und Eiskappen außerhalb Grönlands bedeutsam, und diese polaren Eismassen müssen ebenfalls in die Simulationen einbezogen werden. Zur Simulation dieser komplexen Abläufe müssen hochauflösende Prozessstudien in globale Klimamodelle der nächsten Generation eingebettet werden. Dazu bedarf es effizienter hochauflösender eisdynamischer Modelle und angepasster Kopplungsstrategien. Die Ozeancomponenten müssen das basale Schmelzen und die Atmosphärencomponenten das Oberflächenschmelzen realistisch simulieren können. Neue Herausforderungen bestehen sowohl auf modellierender als auch beobachtender Seite, um zum einen eine hochwertige Datenbasis zu schaffen und zum anderen die Prozesse auf unterschiedlichen Zeitskalen zu erfassen.

### **Nutzbarmachung von Beobachtungen**

Eine weitere Herausforderung ist eine verbesserte effiziente und systematische Nutzbarmachung von Erdbeobachtungen (zum Beispiel Fernerkundung) durch eine Steigerung des Informationsgewinns aus den Rohdaten und des Informationsflusses in die Modellierung. Für beide Bereiche eignen sich

Techniken aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz (KI) oder der angewandten Mathematik, die Rohdaten automatisch analysieren und nützliche Sekundärprodukte effizient ableiten, wie zum Beispiel die Kartierung des Rückzugs der Kalbungsfront oder von Seen an der Eisoberfläche. Um große Datenmengen einbeziehen zu können, werden neueste systematische Methoden zur Datenassimilierung benötigt. Relevante Techniken nutzen maschinelles Lernen sowie Optimierung, Mustererkennung und Signalverarbeitung. Die neuen, zuverlässigen Simulationen verringern die Unsicherheiten in den Zukunftsprojektionen. Als zentraler Aspekt in der Modellierung verbleibt die systematische Abschätzung der verbleibenden Unsicherheiten.

### **Daraus leitet sich folgender Forschungs- und Entwicklungsbedarf ab:**

Die Gesellschaft benötigt dringend zuverlässige Projektionen der polaren Beiträge zum globalen und regionalen Meeresspiegel in den nächsten 100 bis 300 Jahren. Dies ergibt den folgenden Forschungsbedarf:

- Beobachtung und Simulation der komplexen Prozesse zwischen Atmosphäre, Ozean, Meereis, Gletschern und Eisschilden sowie fester Erde. Beispiele sind die Wechselwirkung zwischen Hydrologie von Schmelzwasser und Gletscherdynamik, die Rolle der Auslassgletscher und der Kalbung zusammen mit dem subglazialen Gleiten und den Eigenschaften des Eisuntergrunds. Für den regionalen Meeresspiegel werden zudem vertikale Landbewegungen benötigt und auf längeren Zeitskalen ist die Verteilung des geothermalen Wärmeflusses von großem Interesse.
- Erfassen aller Komponenten der Gletscher- beziehungsweise Eisschild-Massebilanzen: Eisdynamik, Höhen- und Massenänderungen von Schelfeisen, Gletschern und Eisschilden, Schließen von Wissenslücken bei der Eisgeometrie (Schelfeis-Kavernen, Fjorde), Bewegungen der Aufsetzlinie, Kalbung, Mächtigkeits- und Dichteverteilung des Firns sowie die Hydrologie der Gletscher und Eisschilde.
- Quantifizierung der basalen Schmelzraten an den Schelfeisen, Verteilung von Schmelzwasser im Ozean, Einfluss auf lokale, regionale und atlantikweite Ozeanzirkulation und die Auswirkungen auf den regionalen Meeresspiegel.
- Untersuchung der Schlüsselregionen für eine schnelle Reaktion der Eisschilde in vergangenen Warmzeiten durch geologische und geophysikalische Beobachtungen sowie durch Modellierung der relevanten geologischen Zeitabschnitte.



Fluke eines südlichen Glattwals in der Scotia Sea

## 2.3 DAS SÜDPOLARMEER ALS SPEICHER FÜR WÄRME UND KOHLENSTOFF

### Leitfragen:

- Wie beeinflussen Klimawandel und die zunehmende atmosphärische  $\text{CO}_2$ -Konzentration die Aufnahme und Verteilung von Wärme und Kohlenstoff im Südpolarmeer?
- Welche Auswirkungen hat eine veränderte Ozeandynamik auf biogeochemische Prozesse und Stoffkreisläufe und damit auf Versauerung, biologische Produktivität und Kohlenstoffspeicherung?
- Wie sehr beeinflussen erwartete Veränderungen der biologischen Produktivität und Artenzusammensetzung die Kohlenstoffaufnahme im Südpolarmeer?
- Welche globalen Folgen haben Änderungen im Südpolarmeer?

### Gesellschaftliche Relevanz

Der fortdauernde Ausstoß von  $\text{CO}_2$  durch den Gebrauch fossiler Brennstoffe und die Änderung der Landnutzung hat zu einer starken Erhöhung des atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Gehalts geführt. Diese anthropogenen Emissionen ändern das Klima unseres Planeten rasch und mit vielfältigen Risiken für

Gesellschaft und Wirtschaft. Der Ozean dämpft die Erwärmung der Atmosphäre erheblich. Er hat insgesamt mehr als 90 Prozent der zusätzlichen Wärme aufgenommen, die durch die Treibhausgase ins Klimasystem gebracht wurde, sowie mehr als 25 Prozent der anthropogenen  $\text{CO}_2$ -Emissionen. Das Südpolarmeer erstreckt sich um den Antarktischen Kontinent und nimmt etwa 25 Prozent der Ozeanoberfläche ein, hat aber seit 2005 überproportional viel, nämlich etwa 50 Prozent, der überschüssigen Wärme aufgenommen – für den Zeitraum 1970–2017 waren es circa 40 Prozent. Auch bei der Aufnahme des anthropogenen Kohlenstoffs aus der Atmosphäre (40 Prozent) leistet das Südpolarmeer mehr, als sein Flächenanteil erwarten lassen würde.

Die Aufnahme und Speicherung von Wärme und anthropogenem  $\text{CO}_2$  ist eng mit der Ozeanzirkulation verflochten. Ein Großteil des Wärme- und  $\text{CO}_2$ -Austauschs findet im Bereich des Antarktischen Zirkumpolarstroms (ACC) statt – der Hauptmotor der globalen Ozeanzirkulation, der Klimaänderungen integriert, dämpft oder verstärkt und damit das globale Klima signifikant beeinflusst. Diese physikalische Pumpe wird angesichts höherer Temperaturen Effizienz verlieren.



Die anthropogene CO<sub>2</sub>-Aufnahme findet vor dem Hintergrund des natürlichen Kohlenstoffkreislaufs statt, der deutlich größere Mengen CO<sub>2</sub> zwischen Ozean und Atmosphäre austauscht. Dabei spielt die biologische Pumpe eine wichtige Rolle, die von Mikroalgen gebundenes CO<sub>2</sub> in den tiefen Ozean transportiert, wo es von dem Austausch mit der Atmosphäre abgeschottet ist. Aus vergangenen Kalt- und Warmzeiten wissen wir, dass eine Störung dieses empfindlichen Gleichgewichts durch Klima- und Umweltveränderungen (wie zum Beispiel Ozeanversauerung) beträchtliche Auswirkungen auf die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration und damit die globale Erwärmung haben kann.

### Stand der Forschung

Das Südpolarmeer spielt für die globale Ozeanzirkulation und somit für das Klima der Erde eine zentrale Rolle. Der Antarktische Zirkumpolarstrom (ACC) zwischen etwa 45° Süd und 60° Süd bildet die mit Abstand stärkste Meeresströmung der Erde und wird von starken Westwinden und Dichteunterschieden zwischen den warmen Subtropen und der vereisten Antarktis angetrieben. Die Sonderrolle für die Aufnahme von Wärme (50 Prozent) und anthropogenem Kohlenstoff (40 Prozent) erhält er hauptsächlich durch die Verbindung zwischen der Oberflächenschicht und dem tiefen Ozean. Südlich des ACC steigt Tiefenwasser auf, das an der Oberfläche neues CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre aufnimmt und anschließend als Antarktisches Zwischenwasser (AAIW) am nördlichen Rand des ACC abtaucht und so bis in die gemäßigten nördlichen Breiten vordringen kann. Dies stellt einen der Haupttransportwege von anthropogenem CO<sub>2</sub> in das Ozeaninnere dar. Die gleichzeitig mitgeführten Nährstoffe beeinflussen die biogeochemischen Stoffkreisläufe und damit die Nahrungsnetze bis hin zu den Fischereierträgen. Die Ozeanregionen, in denen Zwischenwasser gebildet wird, haben sich in den letzten fünfzig Jahren sehr viel schneller erwärmt als der Weltozean.

Ein anderer Teil des aufquellenden Tiefenwassers erreicht den antarktischen Kontinentalhang. Abkühlung durch Kontakt mit der Atmosphäre, Anreicherung mit Salzlauge durch Meereisbildung und Wechselwirkungen mit dem angrenzenden Schelfeis (siehe Forschungsthema 2) lassen Wassermassen sehr hoher Dichte entstehen. Diese strömen den Kontinentalhang bis zum Boden hinab und reißen dabei auch erhebliche Mengen von Umgebungswasser mit sich. Das auf diese Weise entstandene Antarktische Bodenwasser breitet sich mit dem ACC aus, um anschließend alle tiefen Becken der Weltozeane zu füllen. Durch den vorherigen Kontakt mit der Atmosphäre führt das Bodenwasser ebenfalls anthropogenes CO<sub>2</sub> mit sich.

Unterhalb von etwa 1000 Metern Tiefe haben sich der ACC und die südlicher gelegenen Regionen in den letzten fünfzig Jahren sehr viel schneller erwärmt als der Weltozean und im Antarktischen Bodenwasser lässt sich die Erwärmung über den ACC hinaus nach Norden verfolgen. Tiefe Durchmischung findet auch in der in den letzten Jahren wiederholt aufgetretenen großflächigen Weddell-Polynja statt. Es ist unklar, ob dieses Phänomen im Zuge des Klimawandels regelmäßig oder sogar häufiger auftreten wird.

Aus Paläoklimadaten wissen wir, dass bedeutende Änderungen der Westwinde im Zuge von Erwärmungen stattgefunden haben. Eine Verstärkung der Westwinde ist in den letzten Jahrzehnten bereits beobachtet worden. Diese hat bis jetzt zu keiner Änderung in der Stärke oder der geografischen Lage des ACC geführt, aber zu einem verstärkten Auftrieb kohlenstoffreichen Tiefenwassers, einer verstärkten Bildung von AAIW und einer Zunahme der Wirbel. Es ist eine offene Frage, welche Rolle die Wirbel zukünftig für die Aufnahme, Speicherung und den Abtransport von Wärme und Kohlenstoff spielen werden.

Die CO<sub>2</sub>-Aufnahme im Südpolarmeer kann sich innerhalb weniger Jahre deutlich stärker verändern als noch vor zehn Jahren angenommen. In den 1990ern stagnierte die CO<sub>2</sub>-Aufnahme, nahm aber in den darauffolgenden 2000ern erheblich zu. Es ist noch nicht geklärt, welche Prozesse hier die wichtigste Rolle spielen und ob lückenhafte Beobachtungen zu einer Überschätzung der Schwankungen führen oder die Modelle diese Schwankungen in der CO<sub>2</sub>-Aufnahme unterschätzen. Ebenso dominiert das Südpolarmeer die Unsicherheit in der zukünftigen CO<sub>2</sub>-Aufnahme des Ozeans in Erdsystemmodellen.

Es konnte bis jetzt keine weiträumige Veränderung der Plankton-Zusammensetzung oder biologischen Produktivität beobachtet werden und damit auch keine Veränderung der großskaligen biologischen Pumpe. Experimente zeigen jedoch, dass Plankton empfindlich auf zukünftig erwartete Umweltveränderungen reagiert. Diese Wechselbeziehungen zwischen verschiedenen Planktongruppen und sich verändernden Umweltbedingungen (siehe Forschungsthema 5) sowie deren Rolle für Kohlenstoff- und Nährstoffkreisläufe im Zuge des Klimawandels sind in den Modellen unzureichend dargestellt. Vorhersagen von biologischer Primärproduktivität basieren auf einem stark vereinfachten Prozessverständnis und sind daher sehr unsicher.

Vor Kurzem wurde festgestellt, dass im Weddellmeer eine vorher nicht bekannte biogeochemisch-physikalische „Abkürzung“ existiert, um von Organismen freigesetztes CO<sub>2</sub> in großen Mengen mit der horizontalen Zirkulation in die

Tiefsee zu befördern. Dass dieser klimarelevante Mechanismus eine weltweite Verzahnung hat, ist ebenso eine Erkenntnis jüngerer Zeit. Allerdings ist unklar, inwieweit er eine Rolle für den Transport von anthropogenem CO<sub>2</sub> in die Tiefsee spielt.

Für die letzten 800 000 Jahre veranschaulichen Zeitreihen aus Eis- und Sedimentkernen, dass die atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen eng mit antarktischen Luft- und Wassertemperaturen korrelieren. Die Kopplung erfolgt durch Zirkulationsänderungen im Bereich des ACC, die den Eintrag des Mikronährstoffs Eisen aus atmosphärischem Staub und damit die Effektivität der biologischen Kohlenstoffpumpe wie auch der physikalischen Pumpe beeinflussen. Diese Pumpen haben die natürlichen CO<sub>2</sub>-Schwankungen zwischen Warm- und Eiszeiten maßgeblich gesteuert. Erdsystemmodelle sind noch nicht in der Lage, die Mechanismen beider Kohlenstoffpumpen realitätsnah darzustellen.

## **Forschungsbedarf**

### ***Veränderungen von Wärme- und Kohlenstoffaufnahme***

Um verlässlich durch den Klimawandel hervorgerufene Langzeittrends von natürlichen Schwankungen zu trennen, müssen Paläo-, Langzeit- und Prozessbeobachtungen der physikalischen und biogeochemischen Größen mit einer Weiterentwicklung der Modelle verknüpft werden. Die bereits bestehenden Zeitreihen klimarelevanter Parameter müssen dafür fortgeführt und um fehlende biogeochemische Komponenten erweitert werden. Die Rolle der diversen Prozesse bei der Bildung und Verteilung des Zwischen- und Bodenwassers und dessen Anreicherung mit CO<sub>2</sub> durch physikalische und biologische Prozesse muss auch in einer sich durch den Klimawandel verändernden Umwelt verstanden werden, um globale Folgen abschätzen zu können.

Das Südpolarmeer ist die Region, in der sich modellbasierte Berechnungen der marinen CO<sub>2</sub>-Aufnahme am stärksten von den Schätzungen aus Beobachtungen unterscheiden. Ein sprunghafter Anstieg der Beobachtungskapazitäten unter Einbeziehung aller verfügbaren Beobachtungssysteme (unter anderem autonome Messroboter, Verankerungen, Schiffsexpeditionen) ist notwendig, um diese Diskrepanz zu ergründen, die Unsicherheit zu reduzieren sowie auch eine Grundlage zur Weiterentwicklung und Evaluierung der Modelle zu schaffen. Bedeutsam in diesem Zusammenhang ist – neben den direkten biogeochemischen Beobachtungen, wie pCO<sub>2</sub>, Karbonatsystem, Nährstoffe, Sauerstoff – auch die regelmäßige Vermessung der Verteilung von Spurengasen, die Informationen über die Zeitdauer vertikaler Umwälzbewegungen und horizontaler Ausbreitung von Wassermassen erbringt.

Paläoklimadaten sind notwendig, um langfristige Klimamechanismen besser zu dokumentieren und Modelle zu verbessern. Neben den Eiskernen mit ihren direkten CO<sub>2</sub>-Messungen sind zeitlich noch viel weiter zurückreichende Paläoklimadaten aus Sedimentkernen wichtig, denn sie ermöglichen eine erweiterte Zeitperspektive, unter anderem in Zeitalter, die wärmer als heute waren und somit für unser Verständnis der zukünftigen Klimaentwicklung besonders wertvoll sind.

### ***Rolle der Zirkulation für Wärme und Kohlenstoffaufnahme***

Von zentraler Bedeutung für die marine Aufnahme und Speicherung von Wärme und CO<sub>2</sub> ist die dreidimensionale Zirkulation im Südpolarmeer, die den Transport von Wärme und CO<sub>2</sub> ins Ozeaninnere ermöglicht. In den Erdsystemmodellen noch nicht gut dargestellte bedeutende Prozesse sind unter anderem die Rolle der Wirbel, ihre Wechselwirkungen mit den verstärkten Westwinden und die sehr komplexen Prozesse, die das Antarktische Boden- und Zwischenwasser bilden. Ein Beispiel dafür ist die Bedeutung der sporadisch auftretenden Weddell-Polynja für die Tiefenwasserbildung, die neben anderen Faktoren die nicht ausreichend verstandene horizontale Zirkulation und die damit verbundene Aufnahme und Speicherung von CO<sub>2</sub> beeinflusst.

Erdsystemmodelle zeigen bei einer weiteren globalen Erwärmung eine beschleunigte vertikale Zirkulation im Südpolarmeer und reduzierte Bodenwasserbildung. Diese Ergebnisse sind jedoch mit großen Unsicherheiten behaftet, da die komplexen Wechselwirkungen zwischen stärkeren Winden, Wirbeln und der regionalen und atlantikweiten Umwälzbewegung unzureichend simuliert werden. Das gilt auch für Änderungen in den Süßwasser- und Wärmeflüssen. Um robustere Modellsimulationen der Bodenwasserbildung zu erhalten, müssen Prozesse auf der Skala weniger Kilometer dargestellt werden können. Unerlässlich ist auch die Integration sämtlicher relevanter physikalischer Prozesse in die Erdsystemmodelle, wie zum Beispiel der gestiegene Schmelzwassereintrag durch Eisberge und durch Schelfeis. Da die Prozesse unter dem Schelfeis für das basale Schmelzen mitverantwortlich sind, ist es notwendig, die Mechanismen prinzipiell zu verstehen, zu quantifizieren und ihre Langzeitveränderungen aufzuklären (siehe Forschungsthema 2). Dazu sind neben den physikalischen und technischen Verbesserungen bei den Modellen vor allem Beobachtungen nötig, die von verankerten Sensoren bis zu Messungen vom Schiff aus und unter dem Schelfeis reichen. Um Kohlenstoffaufnahme und -speicherung erfassen zu können, müssen physikalische und biogeochemische Beobachtungen Hand in Hand gehen.

### ***Sensitivität der biologischen Pumpe auf Klima- veränderungen***

Neben den Herausforderungen, die dreidimensionale Zirkulation auf verschiedensten räumlichen Skalen zu simulieren, sind die für den CO<sub>2</sub>-Kreislauf wichtigen physiologischen, ökologischen und biogeochemischen Wechselbeziehungen nicht ausreichend verstanden und in den Modellen beschrieben. Daher bedarf es Forschung hinsichtlich biologischer Produktivität und zu den Prozessen, die bestimmen, wie viel von diesem biologisch gebundenen Kohlenstoff den tiefen Ozean erreicht (siehe auch Forschungsthema 5). Dies umfasst die ganze Bandbreite von Feldbeobachtungen und Rekonstruktionen auf saisonalen bis zu geologischen Zeitskalen, Experimenten mit Schlüsselarten unter kontrollierten Bedingungen, die Synthese von Einzelstudien und die Modellierung.

### ***Die Rolle des Südpolarmeers für das globale Klima***

Veränderungen der Wärme- und Kohlenstoffaufnahme im Südpolarmeer werden auch im globalen Ozean und in der Atmosphäre spürbar sein. Hier bedarf es weiterer Forschung zu den gegenwärtigen und zukünftigen Verbindungswegen zwischen Südpolarmeer und dem restlichen Ozean, insbesondere zu physikalischem Transport und Vermischung. Wo und wann treten im Südpolarmeer aufgenommener Kohlenstoff und aufgenommene Wärme wieder in Kontakt mit der Atmosphäre und wie wird dies von biogeochemischen und ökologischen Rückkopplungen, etwa durch veränderten Nährstofftransport, beeinflusst? Solche Fragen müssen zeitnah beantwortet werden.

Um Auswirkungen regionaler Änderungen im Südozean auf globale Klimaschwankungen zu verstehen, wurden während der letzten Jahrzehnte durch ein die Weltmeere umspannendes Netzwerk von Sedimentkernen zeitgleiche und großräumige vergangene Umweltveränderungen miteinander verknüpft. Dennoch existieren noch immer große Lücken in der räumlichen und zeitlichen Abdeckung im Südozean, die geschlossen werden müssen. Aufbauend auf der paläozeanografischen Erkenntnis, dass die Dynamik des ACC eine Schlüsselrolle auch für globale Klimaschwankungen spielt, werden Rekonstruktionen zur Lage und Stärke des ACC während früherer Erwärmungsphasen als mögliche Analogien für unsere Zukunft weitreichende Einsichten bringen. Dadurch lassen sich Schwellenwerte und Kipppunkte sowie deren Wechselwirkungen mit der Tiefen- und Zwischenwasserbildung, dem Meereis und der Stabilität der antarktischen Eisschilde erforschen (Forschungsthema 2).

Erdsystemmodelle sind heute noch nicht in der Lage, die Kohlenstoffspeicherung im Ozean beim Übergang zwischen vergangenen Kalt- und Warmzeiten zu simulieren. Hier

besteht Forschungsbedarf, um Veränderungen in der vertikalen Vermischung, Tiefen- und Bodenwasserbildung, der Meereisausdehnung und Verschiebung von Fronten im ACC zu verstehen und darzustellen. Des Weiteren bedarf es mehr Forschung zu Veränderungen in der biologischen Pumpe unter Zuhilfenahme von Modellen und Messungen an Sedimentkernen, einer Verbesserung von Staubsimulationen (wichtig für die Verfügbarkeit von Mikronährstoffen) und der Verifizierung durch Paläo-Sedimentdaten sowie weiterer Rekonstruktionen des Alters des Tiefen- und Bodenwassers durch <sup>14</sup>C-Messungen an Sedimentkernen, um ein besseres Verständnis der Kohlenstoffspeicherung in vergangenen Kaltzeiten zu erlangen.

### **Daraus leitet sich folgender Forschungs- und Entwicklungsbedarf ab:**

- Erstellen von Wärme- und Kohlenstoffbudgets anhand von Beobachtungen und Simulationen. Identifizierung durch den Klimawandel hervorgerufener Langzeittrends und Variabilität.
- Identifizierung und Quantifizierung der Faktoren, die Einfluss auf die horizontale und vertikale Zirkulation und damit verbundene Wärme- und CO<sub>2</sub>-Aufnahme haben, einschließlich der Rolle der Wirbel.
- Erkennen und Verstehen der Effekte sich im Klimawandel verändernder Zirkulationsmuster (insbesondere Zwischen- und Bodenwasserbildung, Polynjas, Effekte von Schmelzwassereintrag, horizontale Zirkulation) auf Wärme- und CO<sub>2</sub>-Aufnahme und -Transport sowie verbesserte Darstellung dieser Prozesse in Zukunftsprojektionen.
- Verstehen und Quantifizieren des Einflusses biologischer und biogeochemischer Prozesse auf die CO<sub>2</sub>-Aufnahme und deren Veränderung mit sich ändernden Umweltbedingungen und Abbildung in Erdsystemmodellen.
- Erschließen der globalen Auswirkungen von CO<sub>2</sub>- und Wärmeaufnahme im Südpolarmeer durch Identifizierung von Verbindungspfaden und durch Klimaarchive (Sediment- und Eiskerne).



Lenadelta mit polygonalen Frostmusterböden, Thermokarstseen und Altarmen

## 2.4 DIE ZUKUNFT VON PERMAFROST-ÖKOSYSTEMEN

### Leitfragen:

- Welche Auswirkungen hat der Klimawandel auf den Permafrost, die Dynamik von Permafrostlandschaften und zukünftige Treibhausgasemissionen?
- Wie interagieren Vegetation, Biodiversität, Permafrost und Klima und welche Änderungen der Ökosystemfunktionen ergeben sich?
- Welchen Einfluss haben steigende Meerestemperaturen auf die Stabilität des submarinen Permafrosts und den dazugehörigen Kohlenstoffspeicher?
- Wie beeinflussen Änderungen der Permafrost-Ökosysteme und Rückkopplungen im Erdsystem das Erreichen von UN-Nachhaltigkeitszielen?

### Gesellschaftliche Relevanz

Eine große Herausforderung für die Menschheit in den nächsten drei Jahrzehnten besteht darin, die globale Erwärmung deutlich unter 2 °C über dem vorindustriellen Niveau zu halten (Übereinkommen von Paris) und den Biodiversitätsverlust zu beenden (*EU Biodiversity Strategy 2030* und *EU Green Deal*). Ein entscheidender Beitrag der Wissenschaft zu gesellschaftlichen Diskussionen hinsichtlich

der UN-Nachhaltigkeitsziele 13 beziehungsweise 15 (UN SDGs „Climate Action“ beziehungsweise „Life on Land“) ist die Abschätzung entsprechender Emissionsszenarien: Welche Menge an Treibhausgas darf der Mensch noch emittieren oder wie viel Kohlenstoff muss zusätzlich aus der Atmosphäre gebunden werden (negative Emissionen)? Die der Beantwortung dieser Frage zugrunde liegenden Modelle berücksichtigen nicht die Wechselwirkungen sich verändernder Permafrostlandschaften mit dem zukünftigen Klima. Da in den hohen nördlichen Breiten der Klimawandel beschleunigt ist und Permafrost-Ökosysteme große Mengen gefrorener organischer Substanz enthalten, besteht das Risiko hoher zusätzlicher Treibhausgasemissionen aus tauenden Permafrostböden. Aufgrund ihrer besonderen Anfälligkeit gegenüber dem Klimawandel wurden die Permafrostregionen mittlerweile als eines der wenigen großen Kippelemente im Erdsystem erkannt. Die hohe Unsicherheit hinsichtlich der Stabilität und zukünftigen Entwicklung von Permafrost-Ökosystemen verhindert die Entwicklung verlässlicher Strategien zur Senkung anthropogener Treibhausgasemissionen und erschwert den Erhalt der Biodiversität. Gleichzeitig stellen die Unsicherheiten und Risiken von tauendem Permafrost sowie Biodiversitätsverlust für die lokale Bevölkerung große Herausforderungen dar. Andererseits hätten intelligente

Landnutzungskonzepte das Potenzial, Permafrostdegradation, Treibhausgasemissionen und Artenverlust zu mindern und damit das Erreichen der Nachhaltigkeitsziele zu erleichtern.

### Stand der Forschung

Arktische Permafrostlandschaften mit hohen Grundeisgehalten in ihren Böden und Sedimenten sind besonders anfällig für Veränderungen durch tauenden Permafrost. Das Grundeis führt beim Schmelzen zu schnellen Landschaftsprozessen, wie Thermokarst und Thermoerosion, was sich auch in Permafrost-Sedimentarchiven für vergangene Erwärmungsphasen belegen lässt. Externe Störungen des Permafrost-Temperaturregimes, zum Beispiel durch Thermokarstseen, Feuer und Erosion, sowie die beobachtete schnelle Erwärmung können zu deutlichen topografischen, hydrologischen, biogeochemischen und ökologischen Veränderungen innerhalb von Jahren bis Jahrzehnten führen. Feld- und Fernerkundungsstudien sowie numerische Modellierungen belegen die hohe Landschaftsdynamik über weite Regionen hinweg und einen tiefgehenden, größtenteils unumkehrbaren Wandel hydrologischer und biogeochemischer Abläufe. Zukünftige Treibhausgasbilanzen sind immer noch höchst unsicher, da Kohlenstoff-Stabilisierungsprozesse und Interaktionen mit Nährstoffen, Mikroorganismen und Pflanzen insbesondere bei tauendem Permafrost nicht verstanden und quantifiziert sind. Große Unsicherheiten bestehen bei der Abschätzung der Methanemissionen aus den zahlreichen Seen und Feuchtgebieten der Permafrostregionen und aus angrenzenden Schelfmeeren. Primäre Gründe dafür sind die unvollständige Erfassung der heterogenen raum-zeitlichen Muster der Methanemissionen und mangelndes Prozessverständnis. Zudem deuten erste Studien auf die Bedeutung von Treibhausgasemissionen in den kalten Jahreszeiten von Oktober bis Mai hin, die möglicherweise bereits dazu geführt haben, dass Permafrostgebiete schon jetzt zu einer Kohlenstoffquelle geworden sind.

Die hohen Erwärmungsraten führen zu einer Änderung der Vegetation und Biodiversität auf allen trophischen Ebenen einschließlich der mikrobiellen Diversität. Dies wirkt sich wiederum auf Ökosystemfunktionen aus, mit Konsequenzen für die Nährstoff- und Wasserkreisläufe, die biologische Stabilisierung von Permafrost, die biogene Verwitterung, die Häufigkeit von Feuern und die Nahrungsnetze. Viele dieser Funktionen sind unverstanden, da sie biologische Prozesse unterschiedlicher Zeitskalen integrieren, unter anderem genetische Anpassung, Arealverschiebungen und phänotypische Reaktionen, die jeweils noch für verschiedene taxonomische und funktionelle Gruppen spezifisch sind. Zunehmend wird

erkannt, dass biotische Rückkopplungsmechanismen zur Stabilisierung von Ökosystemen führen können. So wird diskutiert, dass einmal etablierte sibirische Lärchenwälder eine hohe Feuerwiederholrate haben und Permafrost stabilisieren können und somit eine verzögerte Einwanderung konkurrenzfähiger immergrüner Koniferen bewirken. Ebenfalls stellt die rapide Änderung von Permafrost-Ökosystemen Tiere in ihrer Anpassungsfähigkeit vor große Herausforderungen.

Submariner Permafrost konnte in großen Gebieten der flachen sibirischen Schelfmeere durch geophysikalische Messungen und Bohrungen nachgewiesen werden. Gebildet hat er sich während der letzten Eiszeiten, als der Meeresspiegel circa 120 Meter tiefer als heute lag und der nicht eisbedeckte Kontinentalschelf der glazialen Atmosphäre ausgesetzt war. Die Mächtigkeit, die vor allem durch den geothermischen Gradienten gesteuert wird, reicht von wenigen zehn bis zu circa 800 Metern Tiefe. Inwieweit die tiefgreifenden Umweltveränderungen infolge des Klimawandels Auswirkungen auf die Stabilität des submarinen Permafrosts haben, kann bisher nur abgeschätzt werden. So zeigen ozeanografische Langzeitmessungen in der zentralen Laptevsee seit 2005 einen deutlichen Anstieg der Oberflächenwassertemperatur um durchschnittlich 4 °C im Sommer, wobei die durchschnittliche Bodenwassertemperatur aufgrund der starken Dichteschichtung bei etwa -1,3 °C liegt. Bemerkenswert sind jedoch immer wieder auftretende wärmere Perioden mit bis zu 0 °C im Bodenwasser. Die Erwärmungs- und Abkühlungsphasen verlaufen dabei episodisch und die wärmsten Perioden wurden in den Wintermonaten aufgezeichnet. Ozeanografische Langzeitmessungen deuten darauf hin, dass diese Perioden in den letzten Jahren länger und wärmer wurden. Ein Trend kann mit den vorliegenden wenigen Datensätzen nicht sicher abgeleitet werden und es ist auch nicht bekannt, wie sich die zunehmenden Maxima der Oberflächenwassertemperatur im Sommer auf die Bodenwassertemperaturen auswirken, das heißt wie und warum die im Wasserkörper gespeicherte Sommerwärme im Winter den Meeresboden erreicht. Unklar ist auch, welche Rolle Mikroorganismen bei der Bildung, Stabilisierung und Degradation von Gashydraten spielen. Vermutet wird, dass ganzjährig ungefrorene Zonen (Taliks) im submarinen Permafrost eine große Bedeutung als Transportwege für Degradationsprodukte von Gashydraten, wie Methan, haben. Eine Freisetzung dieser Methanvorkommen, die im submarinen Permafrost über Tausende Jahre fixiert waren, hätte wesentlichen Einfluss auf den jährlichen Methanhaushalt mit globalen Auswirkungen auf das Klima.

Veränderungen der Permafrost-Ökosysteme können den vom Menschen verursachten Klimawandel durch

biogeochemische und biogeophysikalische Rückkopplungen verstärken. Je nach Szenario berechnen globale Modelle zusätzliche Kohlenstoffemissionen aus Permafrostbeeinflussten Böden in Höhe von 20 bis 130 PgC bis zum Jahr 2100. Diese Emissionen werden teilweise durch eine erhöhte Pflanzenproduktivität kompensiert, die emissionspfadabhängig und besonders wichtig für Low-End-Stabilisierungs- und Abschwächungsszenarien ist. Das Eindringen von Büschen und Wald in die Tundra führt auch zu einer zusätzlichen Erwärmung aufgrund einer verringerten Albedo der Landoberfläche. Ein zusätzlicher Effekt auf das Klima entsteht durch Treibhausgasemissionen aus Feuchtgebieten und Seen. Die Permafrost-Klima-Rückkopplung ist eine potenzielle Bedrohung für die Stabilisierung des Klimas aufgrund von Effekten, die auch viele Hundert Jahre nach dem Ende anthropogener Kohlenstoffemissionen weiterwirken. Die potenziellen Kosten der Verringerung des Klimawandels können für sogenannte Überschreitungsszenarien besonders hoch sein, da bestimmte einmal initiierte Tauprozesse und hydrologische Änderungen nicht reversibel sind.

## Forschungsbedarf

Während viele der Änderungen in Permafrostlandschaften lokal und regional auf verschiedenen Zeitskalen beobachtet und quantifiziert wurden, fehlt eine Gesamtbetrachtung der panarktischen Permafrostregionen zur Bodeneisverteilung, der Anfälligkeit für schnelle Tauprozesse und der gegenwärtigen und zukünftigen topografischen, hydrologischen, biogeochemischen und ökologischen Veränderungen. Beispielsweise wurden viele als besonders anfällig erkannte Regionen nur unzureichend untersucht. Fernerkundungsdaten bilden in diesem Zusammenhang eine hervorragende Datengrundlage, um panarktische Änderungen der Landschaft (Thermokarst, Thermoerosion, Brände, Vegetationsverschiebung) zu quantifizieren und lokale Feldstudien zu skalieren. Gleichzeitig bedarf es der konsequenten Fortschreibung der wertvollen langfristigen Beobachtungszeitreihen zum Zustand von Permafrost, Auftauschicht und Kohlenstoffflüssen, welche die Grundlage für belastbare Kohlenstoff- und Nährstoffbilanzen, aber auch für Untersuchungen der Auswirkungen von Extremereignissen sowie unterrepräsentierter Zeiträume, wie der Winterhalbjahre, bilden. Für modellbasierte Projektionen zukünftiger Treibhausgasbilanzen bedarf es eines besseren Verständnisses mikrobieller Prozesse, insbesondere hinsichtlich des Verhältnisses von Methan- zu Kohlenstoffdioxid-Emissionen. Bisher gehen globale Modelle von einem konstanten Verhältnis aus, Beobachtungen zeigen jedoch eine hohe Variabilität und Saisonalität. Eine wichtige Rolle spielt auch die bessere Untersuchung der räumlichen Verteilung, Herkunft und Reaktivität von Bodenkohlenstoff

und seiner Reaktivität mit der Mineralphase im Boden. Darüber hinaus ist die Bedeutung von Nährstoffen aus tauendem Permafrost ungeklärt und Effekte von Pflanzen-Boden-Mikroorganismen-Interaktionen auf die künftige Treibhausgasbilanz, einschließlich von Lachgas, bei Vegetationsänderungen blieben bisher unberücksichtigt. Zum Verständnis der zugrunde liegenden Prozesse sind Laborexperimente, Feldbeobachtungen und innovative Modellansätze notwendig.

Permafrost-Ökosysteme sind durch komplexe Interaktionen zwischen Klima, Wasser, Organismen und Boden gekennzeichnet, von denen viele bisher nicht verstanden und quantifiziert wurden. Forschungsbedarf besteht bezüglich der verzögerten Verschiebung der Baumgrenze nach Norden und der Ausbreitung von Büschen in der Sub-Arktis. Die hierzu aus Fernerkundungsdaten gewonnenen Informationen sollten panarktisch mit Felddaten untermauert werden. Dies bildet die Grundlage einer Verbesserung von (individuenbasierten) Vegetationsmodellen. Die Auswirkungen von Vegetationsdynamik auf Permafrost, Feueraktivität, Treibhausgasbilanz, Verwitterung, Erosion und Klima sollten intensiver berücksichtigt werden. Die Prozesse und zeitlichen Abhängigkeiten, die zu neuen terrestrischen und limnischen Organismengemeinschaften in den hohen Breiten führen, sind immer noch weitgehend unerforscht, insbesondere auch im Hinblick auf phänotypische Plastizität und genetische Anpassung. Diese Wissenslücke könnte durch lange Biodiversitätszeitreihen geschlossen werden. Solche Zeitreihen könnten mit aus Seesedimenten gewonnenen Proxy-Zeitreihen ergänzt werden, um rückwirkend dekadische Ökosystemdynamik abzubilden. Klassische morphologische Biodiversitätsanalysen sollten durch Analysen der funktionellen und phylogenetischen Eigenschaften von Organismen ergänzt werden, um auch aquatische und terrestrische Gruppen betrachten zu können, deren Diversität in Permafrost-Ökosystemen wenig erforscht ist, zum Beispiel Pilze, Algen, Bakterien und Viren. Andererseits besteht Forschungsbedarf zur Auswirkung von Veränderungen der Saisonalität und der Ausbreitung von Krankheitserregern auf den Bruterfolg und das Migrationsverhalten von Tieren. Durch ein besseres Verständnis von Vegetations- und Biodiversitätsänderungen kann die zukünftige Entwicklung von Ökosystemfunktionen besser abgeschätzt und Regionen für Schutzgebiete identifiziert werden.

Notwendig sind ozeanografische Langzeitmessungen mit Meeresbodenverankerungen, drahtlose kontinuierliche Temperaturmessungen im Meeresboden und geotechnische, mikrobiologische sowie geochemische Studien an Sedimentkernen und Schelfbohrungen, damit der Einfluss der steigenden Meerwassertemperaturen auf die Stabilität des

submarinen Permafrosts modelliert und erfasst werden kann. Wichtig in diesem Zusammenhang ist auch die Ermittlung von Methan-Emissionen aus auftauendem submarinen Permafrost. Solche Messungen sind bisher nur punktuell und zeitlich eng begrenzt auf wenige Tage gelungen. Auf diese Weise können schließlich die globalen jährlichen Zuwachsraten der atmosphärischen Methankonzentration zutreffend erfasst werden.

Die Einbeziehung von Permafrost-Rückkopplungen in Erdsystemmodelle steht noch am Anfang. Das betrifft Rückkopplungen zwischen Atmosphäre und Landoberfläche genauso wie Interaktionen zwischen Biosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre. Zuverlässige Modelle zur Abschätzung der Auswirkungen des Auftauens von Permafrost auf i) geomorphologische und hydrologische Prozesse, ii) die Emission von Treibhausgasen und iii) die Resilienz der Ökosysteme sind zu erstellen. Dazu müssen Grundeis, Bodenkohlenstoff-Transport- und -Stabilisierungsprozesse, Boden-Pflanze-Mikroorganismen-Interaktionen sowie biogeochemische Elementkopplungen stärker berücksichtigt werden. Die hochgradige Heterogenität der Landoberfläche und der Einfluss lokaler Störungen (Thermokarst, Thermoerosion, Brände) erfordern eine hohe räumliche Auflösung der Prozesse. Mithilfe erweiterter Erdsystemmodelle können Permafrost-Klima-Rückkopplungen studiert werden. Zu klären wäre beispielsweise, bis zu welcher Erwärmung der Atmosphäre Permafrost großflächig bis zum Jahr 2050 oder 2300 erhalten bleiben kann. Auch das Risiko einer Erwärmung über das von der UN vorgeschlagene Klimastabilisierungsziel hinaus könnte damit glaubwürdig bewertet werden. Durch Integration von Fernerkundungsbeobachtungen und Landoberflächenmodellierung sollte ein Frühwarnsystem für abrupte Veränderungen in Permafrost-Ökosystemen auf dekadischer Skala entwickelt werden, das auch infrastrukturelle Herausforderungen durch tauenden Permafrost und daraus entstehende Umweltrisiken in diesen Regionen frühzeitig erkennen kann.

## **Daraus leitet sich folgender Forschungs- und Entwicklungsbedarf ab:**

Eine verlässliche Projektion der zukünftigen Änderungen von Permafrost-Ökosystemen und des Klimas erfordert ein vertieftes Verständnis der gekoppelten hydrologischen, biogeochemischen und ökologischen Prozesse und deren Rückkopplungen mit dem Klima. Dazu ist eine stärkere Integration von Beobachtungen und Modellen nötig, insbesondere zu den Themen:

- langfristige Beobachtung von Permafrosttemperaturen, Bodeneigenschaften und Treibhausgasemissionen,
- hydrologische und geomorphologische Änderungen der Landschaft und Folgen für Permafrost-Ökosystemfunktionen,
- Einfluss der Kopplung von biogeochemischen und hydrologischen Kreisläufen, Pflanze-Boden-Mikroorganismen-Interaktionen und Stabilisierung von organischer Bodensubstanz auf die derzeitige und zukünftige Netto-Treibhausgasbilanz,
- Einfluss extremer Wetterereignisse und von Klimavariabilität auf Permafrostlandschaften,
- Interaktionen von Vegetationsdynamik, Permafrostdynamik, Biodiversität und Feuer,
- Eintrag und Umsatz von organischem Material, Nährstoffen und Schadstoffen in aquatische(n) Systeme(n),
- zeitliche und räumliche Variabilität der Biodiversität einschließlich Mikroorganismen in Permafrost-Ökosystemen,
- Chancen genetischer Anpassung und phänotypischer Reaktion von Schlüsselarten,
- Destabilisierung von submarinem Permafrost und daraus resultierende Treibhausgasemissionen.

Mittels solcher erweiterter Erdsystemmodelle können verlässliche Szenarien notwendiger, zukünftiger, anthropogener (negativer) CO<sub>2</sub>-Emissionen ermittelt werden. Darüber hinaus besteht die Frage, inwieweit das Landmanagement zur Stabilisierung der Permafrost-Ökosysteme angepasst werden kann.



Antarktischer Eisfisch (*Pagetopsis macropterus*), umgeben von Schlangensterne

## 2.5 ÖKOSYSTEME IN DEN POLARMEEREN UNTER KLIMASTRESS

### Leitfragen:

- Wie und wo gefährdet der Klimawandel die polaren marinen Ökosysteme mit ihren speziellen Lebewesen, Gemeinschaften, Funktionen und für den Menschen nutzbaren Gütern und Dienstleistungen? Gibt es Kippunkte mit unumkehrbaren Konsequenzen für diese Ökosysteme?
- Wie beeinflusst der Klimawandel Nahrungsnetze in den Polarmeeren, deren Produktivität und Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf?
- Welche Arten und Ökosystemfunktionen eignen sich als Indikatoren für den „Gesundheitszustand“ der Ökosysteme in den Polarmeeren?
- Wie gut können sich polare Meeresorganismen an die zum Teil rasanten Umweltveränderungen anpassen? Welche Prozesse sind hier entscheidend?
- Wie lassen sich aus den Forschungserkenntnissen mithilfe von Modellierungsansätzen belastbare Zukunftsszenarien entwickeln?

### Gesellschaftliche Relevanz

Das Nord- und das Südpolarmeer haben für die Menschheit einen hohen ökologischen, kulturellen und ästhetischen

Wert. Die Existenzbedrohung ikonischer Lebewesen, wie Eisbären und Pinguine, hat wesentlich dazu beigetragen, die Öffentlichkeit für die Konsequenzen und Risiken des globalen Klimawandels zu sensibilisieren. Gleichzeitig beherbergen die Meere der Arktis und Antarktis wichtige biologische Ressourcen, die unter anderem zur menschlichen Ernährung genutzt werden können. Sie liefern damit global bedeutsame Ökosystemdienstleistungen, von denen regionale Bevölkerungsgruppen (Arktis), aber auch Europa und die Welt profitieren können (siehe *EU Blue Growth Strategy*, UN-Dekade für Ozeanforschung und nachhaltige Entwicklung 2021–30).

Die im Vergleich zu anderen Regionen große Kapazität der Polarmeere zur Aufnahme von Kohlendioxid reduziert die globalen Konzentrationen von Klimagasen in der Atmosphäre und puffert so deren negative Auswirkungen weltweit ab (siehe Forschungsthema 3). Bei der CO<sub>2</sub>-Aufnahme spielen Mikroalgen (Phytoplankton) eine zentrale Rolle, da sie CO<sub>2</sub> für die Fotosynthese aufnehmen (und dabei Sauerstoff produzieren). Mit dem Absinken von Algenbiomasse wird ein Teil des so gebundenen Kohlenstoffs in große Wassertiefen transportiert und dem globalen Kreislauf damit langfristig entzogen. Die Effizienz dieser biologischen Kohlenstoffpumpe hängt jedoch entscheidend



von Räuber-Beute-Beziehungen und Remineralisationsprozessen in der Wassersäule und auch am Meeresboden ab, die bisher nur ansatzweise quantifiziert sind (siehe Forschungsthema 3).

Neben ihren Beiträgen zu globalen biogeochemischen Kreisläufen und weltweit relevanten Ökosystemdienstleistungen repräsentieren die Polargebiete ein riesiges Freiluftlabor für Studien zum grundsätzlichen Verständnis mariner Ökosystemfunktionen sowie zur Erforschung der physiologischen und ökologischen Lebensstrategien polarer Organismen. Viele dieser speziell angepassten, hochempfindlichen Lebewesen existieren nur im Süd- oder Nordpolarmeer und machen diese Regionen zu weltweit schätzenswerten Lebensräumen (siehe Forschungsthema 6). Die gegenwärtigen und künftigen klimabedingten Umweltveränderungen haben bisher kaum vorhersagbare Konsequenzen für die marinen Ökosysteme in den Polarmeeren und deren Nutzen für die indigene, regionale und globale Bevölkerung.

## Stand der Forschung

Die Ökosysteme der Arktis und der Antarktis geraten durch den Klimawandel zunehmend unter Druck. In der Arktis haben sich die marinen Habitate bereits stark verändert. Auch das Südpolarmeer, insbesondere im Bereich der Antarktischen Halbinsel, ist vom Klimawandel betroffen; die Ostantarktis einschließlich des Weddellmeers steht möglicherweise am Beginn einer solchen großräumigen Entwicklung. Polare Meerespflanzen und -tiere reagieren deutlich sensibler auf Temperaturerhöhung und andere Stressfaktoren (zum Beispiel Versauerung) als marine Arten aus gemäßigten Breiten. Die spezielle Anpassung an konstant niedrige Umwelttemperaturen verschafft diesen Organismen zwar den Vorteil einer Energieersparnis, als Folge dessen reagieren polare Lebewesen jedoch bereits auf geringe Temperaturerhöhungen mit deutlichen Veränderungen ihrer Stoffwechselprozesse und Fortpflanzungsraten. Empfindliche Arten verlagern – falls möglich – ihre Verbreitung oder sterben aus, während robustere Arten expandieren, mit nachhaltigen Konsequenzen für Zusammensetzung, Produktivität und Energiefluss polarer Lebensgemeinschaften. Indikatorarten, die Veränderungen im Zustand polarer Ökosysteme widerspiegeln können, sind zum Beispiel im Südpolarmeer der Antarktische Krill und Pinguinarten, in der Arktis dominante Ruderfußkrebse (*Calanus-Arten*) und der Eisbär. Sie reagieren – neben den Mikroalgen an der Basis der Nahrungsnetze – besonders empfindlich auf die Folgen der Erwärmung und des Meereisschwunds.

Die verstärkte Aufnahme von atmosphärischem CO<sub>2</sub> in den Polarmeeren führt besonders in diesen kälteren

Gewässern zu einer kontinuierlichen Absenkung des pH-Werts (siehe Forschungsthema 3). Diese Ozeanversauerung ist vor allem, aber nicht ausschließlich, für Kalkschalen bildende Organismen problematisch und kann den Lebensraum diverser Pflanzen und Tiere (zum Beispiel Krustenalgen, Muscheln, Schnecken, Krebse), darunter auch ökologische Schlüsselarten, erheblich einengen.

Die Steuerung wichtiger Lebensprozesse (zum Beispiel Nahrungsaufnahme, Fortpflanzung, Fettspeicherung) erfolgt oft tageslängenabhängig über innere Uhren. Bei polwärtigen Verlagerungen der Verbreitungsgebiete ändert sich jedoch das Lichtregime und damit der saisonale Rhythmus. Gerade in den stark saisonal geprägten Polargebieten kann dies die Synchronisation wichtiger Lebensprozesse mit der sich ändernden Tageslänge oder anderen Umweltfaktoren (Dynamik des Meereises, Beginn der Phytoplanktonblüte, Veränderung der Nahrungsqualität und -quantität) aus dem Takt bringen, mit noch weitgehend ungewissen Konsequenzen.

Große methodische Fortschritte in der Molekularbiologie und Ökophysiologie haben in den letzten Jahren erheblich zu einem besseren Verständnis von Anpassungsprozessen und -kapazitäten beigetragen, wenngleich diese Studien bisher auf wenige Arten beschränkt sind. Um die vielfältigen Auswirkungen des Klimawandels realistisch abzuschätzen und klimatische Kippunkte zu identifizieren, muss auch die Wirkung multipler Stressoren in den Polarmeeren in die Forschung einbezogen werden. Zur Stärkung prognostischer Kapazitäten gibt es inzwischen vielversprechende Ansätze, ökologische Schlüsselparameter und -prozesse bei der Weiterentwicklung von Klimamodellen zu berücksichtigen (siehe Forschungsthema 3). Die ausgeprägte Komplexität biologischer Phänomene stellt die Modellierung jedoch vor große Herausforderungen.

## Forschungsbedarf

Die Forschung zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Ökosysteme in den Polarmeeren zielt darauf ab, Anpassungsmechanismen und -strategien der Lebewesen an die diversen Stressfaktoren sowie multiple Effekte und Risiken zu erfassen und die damit verbundenen ökologischen, biologischen, physiologischen und genetischen Prozesse zu verstehen. Wie sich dieser Wandel auf Biodiversität, Nahrungsnetze, Energieflüsse, Produktivität und damit auch auf die vom Menschen nutzbaren Güter und Ökosystemdienstleistungen in den Polarmeeren auswirkt, ist ebenfalls Gegenstand der Forschung. Diese Veränderungen und ihre Ursachen gilt es zu dokumentieren, zu verstehen und mit realistischen Ansätzen zu modellieren, die belastbare

Vorhersagen künftiger Entwicklungen in verschiedenen Klimaszenarien ermöglichen.

## **Ökosystemfunktionen**

Die diversen Stressfaktoren, in erster Linie die Temperaturerhöhung, führen zu Anpassungs- beziehungsweise Vermeidungsreaktionen der betroffenen Lebewesen. Es ist zu erwarten, dass mobile Arten ihre Verbreitungsgebiete polwärts in kühlere Regionen verlagern, soweit dies unter den geografischen Gegebenheiten möglich ist. Eine solche regionale Verlagerung wurde zum Beispiel beim Antarktischen Krill festgestellt (bei gleichzeitigem Populationsrückgang), aber auch bei bestimmten Seevogel- und Meeressäugerarten. In die Arktis dringen Einwanderer, zum Beispiel Plankton- und Fischarten oder Schwertwale, aus borealen Gebieten vor. Langfristige Untersuchungen an repräsentativen Standorten sind notwendig, um die Verschiebung von Verbreitungsgrenzen inklusive saisonaler Wanderungen zeitlich und räumlich zu dokumentieren sowie die Veränderung von Produktivität und Populationszuständen zu erfassen. Das Verschwinden oder Abwandern von Schlüsselarten und die damit verbundenen Änderungen in der Zusammensetzung von Lebensgemeinschaften und Nahrungsnetzen können wichtige Ökosystemfunktionen und -dienstleistungen in den Polarmeeren nachhaltig beeinflussen, eine Quantifizierung dieser Veränderungen steht aber noch weitgehend aus.

Als Folge der Erwärmung der Polarmeere wird ein Wechsel von großen einzelligen Kieselalgen (Diatomeen) hin zu kleineren Phytoplanktern (Flagellaten) vorhergesagt. Die damit verbundenen weitreichenden Konsequenzen für Produktivität, Wechselwirkungen zwischen Schlüsselarten im Nahrungsgefüge sowie für biogeochemische Kreisläufe und Ökosystemleistungen müssen auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen erforscht werden. So gilt es auch, die Hypothese zu testen, ob und wie stark der Klimawandel die biologische Pumpe und damit den organischen Partikelregen zum Meeresboden (*marine snow*) beeinflusst. Verändert dies die Zusammensetzung der Bodenfauna, indem zum Beispiel spezielle Filtrierergemeinschaften (Schwämme, Korallen) in der Antarktis durch opportunistische Substratfresser mit geringerer Artenvielfalt ersetzt werden? Ein daraus resultierendes Ökosystemverständnis ist in ähnlicher Weise sowohl für die Erforschung biologischer Reaktionen auf den Klimawandel als auch für die Wissenschaft im Rahmen von Schutzmaßnahmen erforderlich (siehe Forschungsthema 6).

Während das arktische Meereis seit Jahrzehnten in Ausdehnung und Dicke abnimmt, wird ein Meereisrückgang in großen Teilen des Südozeans erst seit Kurzem beobachtet und ist in seiner Kausalität noch nicht verstanden.

Hier ergibt sich die einmalige Gelegenheit, in vom Klimawandel regional bisher wenig beeinflussten Ökosystemen klimabedingte Veränderungen von Anfang an zu analysieren, mit bekannten Prozessen im Nordpolarmeer zu vergleichen und damit besser zu verstehen. Die Erforschung der Lebensgemeinschaften im und unter dem Meereis der Polarmeere ist notwendig, um zum Beispiel den Beitrag der Eisalgen zur Primärproduktion im Frühjahr und ihre Bedeutung für den Fortpflanzungserfolg von Algen fressenden Zooplanktern zu bestimmen. Eine klimabedingt immer früher im Jahr einsetzende Eisschmelze kann diesen Prozess entkoppeln und zu zeitlichen Verschiebungen (*Mismatch*) zwischen Nahrungsangebot und Präsenz von Konsumenten sowie zu Kaskadeneffekten innerhalb des Nahrungsnetzes führen. Weitere Forschungen zu den Lebenszyklen pelagischer oder benthischer Lebewesen, deren Jugendstadien saisonal mit dem Meereis assoziiert sind, können dazu beitragen, die jahreszeitliche Entwicklung der Gemeinschaften im Meereis, im Pelagial und im Benthos vom Schelf bis in die Tiefsee besser zu verstehen und Veränderungen vorherzusagen.

## **Anpassungsmechanismen**

Die meisten polaren Meeresbewohner sind durch vergleichsweise niedrige Stoffwechsel- und Wachstumsraten sowie lange Lebenszyklen und Generationszeiten gekennzeichnet, häufig auch durch eine geringe Nachkommenzahl. Das kann sich nachteilig auswirken, wenn konkurrierende Arten aus gemäßigten Gebieten in die Polarmeere einwandern. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob beziehungsweise inwieweit die begrenzte evolutive Dynamik (Mutationsrate, Gendrift) in einem möglichen Wettlauf mit rapiden Klimaveränderungen durch genetische Anpassungen mithalten kann. Es fehlen experimentelle Labor- und Freiland-Untersuchungen zur Anpassungsfähigkeit von Schlüsselarten an einzelne beziehungsweise multiple Stressoren sowie zu Veränderungen der Nahrungsnetze auf verschiedenen Ebenen. Dazu gehören Studien zur Anpassungsfähigkeit von Lebewesen im Verhalten und in der Physiologie innerhalb ihrer genetisch festgelegten Grenzen (phänotypische Plastizität), zu Veränderungen in der genetischen Vielfalt von Populationen sowie Untersuchungen zur Genregulation (Epigenetik). Zum Verständnis dieser Prozesse können Untersuchungen beitragen, die die Aktivierung von Genen unter bestimmten Umweltbedingungen erforschen. Häufig fehlen Ganzjahresstudien (insbesondere aus der dunklen Winterzeit), die die extreme Saisonalität von Meereisbedeckung, Lichtregime und Produktivität in den Polarmeeren berücksichtigen. Diese saisonalen Phänomene und Rhythmen gilt es, in die Forschung einzubeziehen, denn sie prägen die Anpassungsprozesse und Lebensstrategien vieler polarer Organismen.

Die diversen klimabedingten Umweltveränderungen wirken in Kombination miteinander und können multiplen Stress für polare Lebewesen und deren Gemeinschaften darstellen. Experimentelle Anpassungsstudien zu multiplem Stress sind jedoch aufwendig und gerade in den Polarmeeren eine große Herausforderung. Sie wurden bisher nur vereinzelt durchgeführt, zum Beispiel zum Zusammenwirken von Temperaturerhöhung und Ozeanversauerung bei Algen und Fischen.

Durch Untersuchungen auf verschiedenen Ebenen (vom Gen bis zur Lebensgemeinschaft) müssen Fragen beantwortet werden, wie: Welche Auswirkungen haben Klimaänderungen auf die genetische Vielfalt polarer Organismen? Wie läuft erfolgreiche Anpassung an relevante Klimafaktoren auf physiologischer und (epi)genetischer Ebene ab und wodurch werden die Anpassungsgrenzen auf diesen Ebenen bestimmt? Zeigen biologische Arten innerhalb kurzer Zeiträume evolutionäre Entwicklungen (Mikroevolution)? Innerhalb welcher Toleranzgrenzen können die diversen Arten (Spezialisten bis Opportunisten) wie schnell reagieren? Welche sind die empfindlichsten Entwicklungsstadien? Wer sind die Verlierer und wer die Gewinner in den jeweiligen Habitaten, und welche Faktoren sind dafür ursächlich?

### **Zukunftsszenarien**

Die Komplexität und Heterogenität der Reaktionen polarer Organismen und Lebensgemeinschaften auf den Klimawandel und die daraus resultierende veränderte Dynamik der Ökosysteme stellen eine große Herausforderung für wissenschaftliche Untersuchungen dar. Bei Ökosystemmodellierungen sollte es zunächst darum gehen, ergänzend zu Felduntersuchungen, Laboranalysen sowie Labor- und In-situ-Experimenten diese Vielschichtigkeit besser zu verstehen sowie die Schlüsselarten und -prozesse zu identifizieren. Darauf aufbauend können in umfassenden multidisziplinären Forschungsansätzen realistische Zukunftsszenarien für die biologische Bindung überschüssigen Kohlenstoffs – und die Rolle der Biodiversität dabei – sowie für weitere Ökosystemdienstleistungen entwickelt werden. Kritische Prozesse für Klimarückkopplungen, die in Projektionen für den Klimawandel und in Erdsystemmodellen derzeit unterrepräsentiert sind, müssen besser berücksichtigt werden. Dies gilt auch für Wechselwirkungen zwischen marinen und terrestrischen beziehungsweise polaren und angrenzenden borealen Ökosystemen.

### **Daraus leitet sich folgender Forschungs- und Entwicklungsbedarf ab:**

- Langzeituntersuchungen (möglichst ganzjährig) an repräsentativen Standorten zur Bestandserhebung und Dokumentation räumlicher und zeitlicher Veränderungen (Phänologie) in den Lebensgemeinschaften und Nahrungsnetzen der Polarmeere (inklusive der sie begleitenden Umweltbedingungen).
- Identifikation und Nutzung von Indikatorarten zur Erfassung der Auswirkungen des Klimawandels auf Ökosystemfunktionen und -dienstleistungen.
- Experimentelle und Freiland-Untersuchungen zur Toleranz und Anpassungsfähigkeit wichtiger Arten an (multiple) Stressoren auf verschiedenen Ebenen (zum Beispiel phänotypische Plastizität, Genregulation, Mikroevolution).
- Modellierung der Veränderungen von Lebensgemeinschaften, Nahrungsnetzen und Energieflüssen als Reaktion auf den Klimawandel. Integration wesentlicher ökologischer Prozesse in den Polarmeeren in globale Modelle.
- Untersuchungen zur Konnektivität und zu Austauschprozessen zwischen polaren Ökosystemen und niederen Breiten sowie zu Land-Ozean-Wechselwirkungen für ein konzeptionelles Gesamtverständnis.



Kaiserpinguine sind ein Beispiel für speziell an die Antarktis angepasste Tiere, die deshalb besonders schützenswert sind

## 2.6 SCHUTZKONZEPTE FÜR DIE ANTARKTIS

### Leitfragen:

- Welche Organismengruppen und Lebensräume haben für die antarktische und weltweite Biosphäre große Bedeutung, sind aber gegenüber menschlichen Eingriffen empfindlich und damit besonders schutzbedürftig?
- Wie lässt sich die Wirksamkeit von Schutzgebieten sowie gebietsunabhängigen Schutzmaßnahmen unter den speziellen antarktischen Bedingungen optimieren?
- Welchen Einfluss haben Umweltverschmutzungen, nicht heimische Arten und eingeschleppte Krankheiten auf das Wohlergehen der Lebewesen in einer bisher vom Rest der Welt weitgehend abgeschirmten Antarktis?
- Wie kann der „menschliche Fußabdruck“, insbesondere von Fischerei und Tourismus, auf die sensible antarktische Biosphäre und ihre Umwelt verringert werden?
- Wie kann aus ökologisch-strategischer Sicht ein effizientes Netzwerk von Schutzgebieten aufgebaut werden?

### Gesellschaftliche Relevanz

Das Leben in der Antarktis trägt wesentlich zur weltweiten Lebensvielfalt und zu globalen Ökosystemdienstleistungen bei. Daher sind gute Kenntnisse über die Lebensgemeinschaften unverzichtbar, wenn globale Berichte mit Politikberatung erstellt werden, zum Beispiel im Rahmen der *Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services* (IPBES) und der *Decade of Ocean Science* sowie des *Global Ocean Assessment* der Vereinten Nationen. Ein Verständnis ökologischer Prozesse ist auch für antarktisspezifische Handlungsempfehlungen im Rahmen des Antarktis-Vertragssystems mit seinem Umweltschutzprotokoll und der Kommission zur Erhaltung der lebenden Meeresschätze in der Antarktis (CCAMLR) von Bedeutung.

Die Antarktis gilt als ein vom Menschen überwiegend unbeeinflusstes Ökosystem von großem wissenschaftlichen und ästhetischen Wert, das in jüngerer Zeit zunehmend anthropogenen – also von Menschen verursachten – Veränderungen ausgesetzt ist. Deshalb besteht weitgehend Konsens darüber, dass zusätzliche Anstrengungen nötig sind, um den „menschliche Fußabdruck“ so gering wie möglich zu halten.

Schutzmaßnahmen müssen bestmöglich wissenschaftlich begründet werden. Sie dienen dem Ziel, die Lebensvielfalt und Ökosystemdienstleistungen, die Atmosphäre sowie Land-, Süßwasser-, Gletscher- und Meeresumwelt der Südpolarregion vor nachteiligen anthropogenen Einflüssen und Eingriffen zu bewahren. Dies ergibt sich insbesondere aus der Einmaligkeit und hohen Empfindlichkeit vieler Organismen gegenüber Umweltveränderungen. Direkte Gefährdungen gehen dabei im Wesentlichen von einer zunehmenden Nutzung durch Fischerei und Tourismus aus, die zur Zerstörung von Lebensräumen, zu Umweltverschmutzung und zum Einschleppen nicht heimischer Arten einschließlich Krankheitsserregern führen kann.

Unter den global relevanten Ökosystemdienstleistungen kommt der Sauerstoffproduktion, der Aufnahme von Kohlendioxid, dem Nährstoffrecycling und der Produktion von Nahrung auch für weltweit wandernde Wal- und Vogelarten eine besondere Bedeutung zu. Aus diesen Gründen gebührt Gebieten mit hoher biologischer Aktivität und Lebensvielfalt bei der wissenschaftlichen Überwachung bestehender und neuer Schutzkonzepte besondere Aufmerksamkeit. Der menschlichen Ernährung dienen unmittelbar natürliche Ressourcen, wie Krill und Seehecht, nur in begrenztem Umfang. Diese werden ansonsten für die Tierfutterherstellung und bei der Produktion gesundheitsbezogener Lifestyleprodukte eingesetzt. Für die Nutzbarkeit genetischer Ressourcen, zum Beispiel im Zusammenhang mit Kälteresistenz oder im pharmazeutisch-medizinischen Bereich, gibt es bisher nur wenige Beispiele.

Vor diesem Hintergrund ist das international vereinbarte Ziel, 30 Prozent der Weltmeere bis 2030 unter Schutz zu stellen, auch in der Antarktis umzusetzen. Das ist für den Südlichen Ozean erst zu weniger als einem Drittel erreicht. Trotzdem dient der Artenschutz, der nach dem Raubbau an einigen antarktischen Säugetierbeständen beschlossen wurde, als Musterbeispiel für Regelungen in anderen Weltmeeren. Für die Atmosphäre zeichnen sich erste Erfolge der Erforschung der Ozonschicht in der Antarktis und des Abkommens zu ihrem Schutz aus dem Jahr 1987 ab.

### Stand der Forschung

Viele antarktische Arten kommen nur auf dem Kontinent oder im Südlichen Ozean vor und sind durch ihre Anpassung an die polaren Bedingungen neben dem Klimawandel empfindlich gegenüber menschlichen Eingriffen. Beispiele für die Anpassung an sehr niedrige Temperaturen sind die Eisfische, der Kaiserpinguin, endemische Flechten und im Gestein lebende Cyanobakterien. Ausdruck der Anpassung an eine hohe Umweltstabilität ist die Langsamwüchsigkeit von Landpflanzen, wirbellosen Tieren und Nutzfischen

im Meer. Im Gegensatz dazu müssen Organismen, die nicht nur oder nicht ständig in der Antarktis vorkommen, eine hohe Umwelttoleranz haben, wie Wale und einige Seevögel sowie bipolar verbreitete Algen und Bakterien in biologischen Bodenkrusten.

Kenntnisse über die Lage von Gebieten mit einzigartiger und damit besonders schützenswerter Biodiversität sind noch recht lückenhaft. Teilweise gute Informationen gibt es zum Vorkommen von Arten an der Spitze des Nahrungsgefüges, wie Robben und Seevögel, sowie zu ihren Nahrungs-, Paarungs- sowie Aufzuchtgebieten. Sie erlauben Projektionen für eine Verschiebung ihrer geografischen Verbreitung als Folge des Klimawandels, was für die Ausweisung zukünftiger Schutzgebiete wesentlich ist. Intensives Wachstum von Mikroalgen, das die biologische Kohlendioxidaufnahme und Sauerstoffproduktion bestimmt, kann durch Satellitenbeobachtungen identifiziert und so zielgenau geschützt werden.

Nicht heimische Arten sind bisher überwiegend auf subantarktische Inseln und die Antarktische Halbinsel eingewandert, wie Flechten, Blütenpflanzen und Insekten. Es gibt aber nur wenige Studien darüber, wie solche Arten die Ökosystemfunktionen in Zukunft verändern könnten. Erste vorbeugende Maßnahmen sollen ihr Einschleppen und ihre Ausbreitung verhindern. Im Südlichen Ozean bewahrt der große Temperaturunterschied zu den nördlich angrenzenden wärmeren Wassermassen das marine Ökosystem vor Einwanderungen, nicht aber die Strömungsdynamik.

Das Vorkommen langlebiger organischer Schadstoffe (POPs), auch in antarktischen Organismen, ist relativ gut bekannt. Graukopf- und Schwarzbraunalbatrosse verschlucken Makroplastikpartikel (> 5 Millimeter) und Pinguine nehmen mit der Nahrung Mikroplastik auf. Über die Wirkung gelöster Kohlenwasserstoffverbindungen, einschließlich per- und polyfluorierter Verbindungen (PFAS), und fester Stoffe auf die Lebensprozesse einzelner Organismen, zum Beispiel ihrer Fortpflanzungsfähigkeit, und die Konsequenzen für Nahrungsgefüge wissen wir nur wenig. Luftverschmutzung wird bisher als lokales Problem betrachtet, es besteht jedoch die Gefahr, dass Spurenstoffe die Antarktis auf Dauer kontaminieren.

Wirbeltierbestände erholen sich als Folge von Nutzungsbeschränkungen, wie der Konvention zum Schutz der Antarktischen Robben von 1972, dem Moratorium der Internationalen Walfangkommission von 1982 und dem Verbot der Grundschleppnetzfisherei seit 2008, allerdings meistens nur langsam. Positive Beispiele sind Pelzrobber und Buckelwale, deren Populationen nach dem an ihnen

betriebenen Raubbau beträchtlich angewachsen sind beziehungsweise sich heute noch gut zu erholen scheinen. Langzeitstudien zur Abschätzung der Folgen der Nutzung natürlicher Ressourcen sind bisher nur sehr selten.

## Forschungsbedarf

### *Langfristige Entwicklungen*

Für die Abschätzung des Erfolgs von Schutzmaßnahmen in der Antarktis ist ein systematisches Umweltmonitoring unverzichtbar. So kann nicht nur die artenreiche Lebensvielfalt mit ihren Ökosystemdienstleistungen, sondern auch die physikalische Umwelt einschließlich anthropogener Einflüsse und Eingriffe analysiert werden, wie zum Beispiel Fischerei und Verschmutzung. Solche Langzeitbeobachtungen müssen auf großer räumlicher Skala auch mit Unterstützung von Fernerkundung (Luftaufnahmen, Satellitensensorik, ferngesteuerte Unterwassertechnik) durchgeführt werden, eine hohe zeitliche Auflösung haben und über etliche Jahre bis Jahrzehnte erfolgen, um gesicherte Aussagekraft zu erreichen. Nur so lassen sich hohe Variabilitäten in der Lebensvielfalt und ihrer unbelebten Umwelt erfassen und damit für das jeweilige Ökosystem repräsentative Aussagen treffen. Die Archivierung und Analyse historischer wissenschaftlicher Daten kann im Vergleich zu heutigen Messungen wertvolle Erkenntnisse über die seit mehr als hundert Jahren erfolgenden Veränderungen liefern. Zusätzlich sollten seltene sowie ökologische Indikatorarten und komplexe, außergewöhnlich verletzbare oder einzigartige Lebensgemeinschaften berücksichtigt werden, ggf. auch mithilfe der Analyse von Umwelt-DNA. Besonders schätzenswerte Situationen gibt es zum Beispiel unter dem Inlandeis, dem mehrjährigen Meereis und dem Schelfeis, auf Seebergen und bei dichten Schwamm- oder Korallenkonzentrationen am Meeresboden sowie in eng begrenzten Gebieten mit großer Häufigkeit von Arten an der Spitze des Nahrungsgefüges.

### *Ökologisches Systemverständnis*

Im Zusammenhang mit Schutzkonzepten ist ein umfassendes Verständnis des Funktionierens antarktischer Ökosysteme nötig, ähnlich wie für Untersuchungen zum Klimastress (siehe 2.5). Bei der Erforschung der Wirksamkeit gebietsunabhängiger Maßnahmen und Schutzgebiete betrifft dies insbesondere Kenntnisse über die vielen artspezifischen Merkmale (*traits*) und antarktistypischen Wechselwirkungen, die ökologische Dienstleistungen steuern. Diese sind oft Ausdruck einer ausgeprägten Anpassung an die speziellen Umweltbedingungen und spielen für die Empfindlichkeit der Organismen und begrenzte Erholungsfähigkeit ihrer Populationen eine entscheidende Rolle. Dies betrifft zum Beispiel die Langsamwüchsigkeit vieler Arten, die

den Meeresboden besiedeln, sowie ein „empfindliches“ Fortpflanzungsverhalten von Bodenfischen. Ein weiteres Beispiel sind zeitliche und räumliche Schwankungen in der Populationsdynamik des Antarktischen Krills, der wesentlichen Nahrung der an das klimaempfindliche Meereis angepassten Fische, Seevögel, Robben und Wale. Präzise Kenntnisse darüber sind für ein fortschrittliches und vorsorgendes Fischereimanagement wichtig. Ein gutes Systemverständnis erfordert aber nicht nur Kenntnisse von der Spitze des Nahrungsgefüges, sondern auch von biologischen Interaktionen auf allen ökologischen Ebenen, auch innerhalb von Mikrobiomen, und vom Nährstoffrecycling.

### *Zukunftsszenarien*

Die Entwicklung von Zukunftsszenarien für den Schutz einzelner Populationen, besonderer Lebensgemeinschaften sowie ihrer belebten und unbelebten Umwelt erfordert Erkenntnisse aus den oben genannten Langzeitanalysen und ein angemessenes Verständnis ökologischer Funktionen. Entsprechende Simulationen können zum Beispiel eine fischereiliche Nutzung von unterschiedlicher Intensität bis hin zu einem völligen Fischereiverbot südlich von 60° Süd umfassen, wie auch verschiedene Regulierungsszenarien des Tourismus und eine umweltschonende Forschungslogistik sowie veränderte ozeanografische und atmosphärische Dynamik. Entsprechende analytische Modelle und dynamische räumlich explizite Simulationen zur Verbreitung von Organismen sollten nicht nur die genutzten Arten, sondern auch ihre Anpassungskapazitäten, Wechselwirkungen mit ihrer Begleitfauna (Beifang), Nahrung, Fressfeinde, eingeschleppte Arten, Krankheitserreger und Parasiten einbeziehen. Auf diese Weise können zukünftige Ökosystemfunktionen und -dienstleistungen sowie Biodiversitätsveränderungen abgeschätzt werden. Solche vielschichtigen Projektionen erfordern zwar ständig aktualisierte biogeografische und gezielte ökologische Kartierungen, ermöglichen aber auch eine Reduzierung von Bestandserhebungen und Feldexperimenten. Wegen der schweren Erreichbarkeit vieler antarktischer Meeres- und Landgebiete erscheint ein ressourcenschonender Vergleich verschiedener Schutzstrategien besonders lohnend. Darauf aufbauend können Handlungsempfehlungen für ein auf Nachhaltigkeit zielendes Ökosystem- und Fischereimanagement entwickelt werden, das auch Umwelt- und Klimaveränderungen berücksichtigt.

### *Nicht einheimische Arten und Verschmutzung*

Nur eine qualitative und quantitative Erfassung eingeschleppter Arten und ihrer Schädlichkeit kann eine Abschätzung der Wirksamkeit von Abwehrmaßnahmen ermöglichen, zum Beispiel ein umweltschonendes Anti-fouling an Schiffsrümpfen. Für Landökosysteme gilt es,

Konzepte zum Entfernen bereits eingeschleppter Organismen zu entwickeln, oder, wenn dies nicht aussichtsreich erscheint, deren nachteilige Einflüsse zu minimieren. Dringend erforderlich erscheint es, die Menge und Schädlichkeit bereits bekannter und erst neuerdings in den Fokus der Öffentlichkeit geratener Verschmutzungen abzuschätzen. Dies umfasst zum Beispiel Spurenstoffe in der Atmosphäre, gelöste Kohlenwasserstoffverbindungen und Mikroplastikpartikel im Meer; aber auch Unterwasserlärm. Solche Untersuchungen können durch Gewebsanalysen, mittels ökophysiologischer Experimente im Labor und in der natürlichen Umgebung, auch unter Berücksichtigung von Umweltveränderungen, durchgeführt werden. Insbesondere für die Erforschung mariner und atmosphärischer Umweltverschmutzung als Grundlage für Handlungsempfehlungen ist dabei zwischen regionaler Herkunft und dem Eintrag aus anderen Weltregionen zu unterscheiden.

#### **Effiziente Netzwerke von Schutzgebieten**

Auf dem antarktischen Kontinent und im Südlichen Ozean erscheint es zukunftsweisend, nicht nur Schutzmaßnahmen in ihrer Wirksamkeit separat zu betrachten, sondern Vorschläge für entsprechende Netzwerke auszuarbeiten. Dies betrifft eine spezielle geografische Anordnung von Schutzgebieten, wodurch eine gute Repräsentanz und Wirksamkeit gewährleistet sowie synergistische Effekte gebietsunabhängiger Maßnahmen initiiert werden. Einzubeziehen sind Habitate, die durch den Eisrückgang neu entstanden sind, wie die Vegetation und Flachwasserfauna in Gletschervorfeldern, Meeresgebiete, in denen Schelfeis weggebrochen ist, Klimarefugien, zum Beispiel für den Kaiserpinguin, sowie sensible Tiefsee-Lebensräume. Weitere Schutzgebiete im Ozean beziehungsweise an Land (*Marine Protected Areas* beziehungsweise *Antarctic Specially Protected Areas*) sollten auf der Ebene des antarktischen Vertragssystems etabliert und ihre Wirksamkeit regelmäßig überprüft werden. Die Forschung im Zusammenhang mit Schutzkonzepten koordiniert international unter anderem das Forschungsprojekt Ant-ICON (*Integrated Science to inform Antarctic and Southern Ocean Conservation*) des Wissenschaftlichen Ausschusses für Polarforschung (SCAR).

#### **Gesellschaftliche Integration**

Forschung zur Interaktion zwischen Gesellschaft, Wissenschaft, Gesetzgebung und Interessentenvereinigungen, zum Beispiel zu Antarktis-Vertragssystem, Umweltschutzorganisationen und Nutzern lebender Ressourcen könnte den Diskurs über einen nachhaltigen Umgang mit der antarktischen Umwelt erheblich verbessern. Dazu gehört vor allem der Grundgedanke des antarktischen Vertragssystems, dass die Antarktis als dem Frieden und der Wissenschaft gewidmetes Naturreservat für künftige Generationen erhalten wird.

#### **Daraus leitet sich folgender Forschungs- und Entwicklungsbedarf ab:**

- Der Erfolg internationaler Regelungen zum Schutz der antarktischen Umwelt und Biosphäre lässt sich nur durch ein gesteigertes ökologisches Systemverständnis abschätzen. Als Grundlage dafür müssen Langzeitbeobachtungen eine Analyse der Wirkungen menschlicher Einflüsse und Eingriffe auf Schlüsselorganismen und ökologische Funktionen gewährleisten.
- Für eine Ausweisung neuer und Überprüfung bestehender Schutzgebiete sind beständig verbesserte Kenntnisse über geografische Schwerpunkte in Lebensvielfalt, speziellen Umweltbedingungen, Ökosystemdienstleistungen sowie dem Vorkommen seltener Lebensgemeinschaften nötig.
- Die wissenschaftliche Relevanz und Wirksamkeit verschiedener Schutzmaßnahmen lässt sich neben allgemeinen Studien zur Biodiversität durch die Entwicklung von Zukunftsszenarien in ökologischen und physikalischen Modellierungsansätzen demonstrieren und überprüfen.
- Gesellschaftswissenschaftliche Forschung könnte die Akzeptanz wissenschaftsbasierter politischer Entscheidungen zum Schutz der Antarktis verbessern.



Kleines Fischerboot vor Wohnhäusern in Westgrönland

## 2.7 WISSENSCHAFT FÜR NACHHALTIGE ENTWICKLUNG IN DER ARKTIS

### Leitfragen:

- Wo existieren gegenwärtig wesentliche Chancen und Barrieren in den Bereichen der nachhaltigen Entwicklung (soziale und kulturelle Gerechtigkeit, wirtschaftliche Entwicklung und Umweltschutz)?
- Wie kann Wissenschaft dazu beitragen, dass Governance-Strukturen für nachhaltige Entwicklung gestärkt und Lücken adressiert werden?
- Wie bedingen sich nachhaltige Entwicklung in der Arktis und globale Entwicklungen gegenseitig und welchen Beitrag kann die Wissenschaft hier leisten?
- Wie können Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften auf angemessene Weise zu nachhaltiger Entwicklung in einer von starkem Wandel und Diversität geprägten Arktis beitragen und zusammen mit Stakeholdern und Stakeholderinnen sowie indigenen Rechteinhabern und Rechteinhaberinnen sozial relevante Ergebnisse für Gegenwart und Zukunft erarbeiten?

### Gesellschaftliche Relevanz

Die Arktis ist von schnell ablaufenden und tiefgreifenden soziokulturellen, politischen, ökonomischen und ökologischen

Veränderungen geprägt. Insbesondere der Wandel der arktischen Umwelt wirkt sich global aus, stellt aber in besonderem Maße die Bevölkerung in der Arktis vor komplexe und sich überlagernde Herausforderungen. Diese erfordern eine enge Zusammenarbeit zwischen Lokalbevölkerung, Wissenschaft, Politik, NGOs und Wirtschaft. Dabei spielen Partizipation und Selbstbestimmung der indigenen Bevölkerung eine besonders wichtige Rolle. Verschiedene internationale Konventionen, Instrumente und Leitlinien bekräftigen das Recht indigener Gemeinschaften, über Projekte zu entscheiden, die ihren Lebensraum betreffen. Dies schließt Forschungsprojekte in den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften ein. Auch die Arktisleitlinien der Bundesregierung unterstreichen das Recht der indigenen Bevölkerung in der Arktis auf Selbstbestimmung. Eine enge Zusammenarbeit und ko-kreativ Forschungsansätze können zu verbesserten wissenschaftlichen Ergebnissen führen und Vertrauen schaffen. Um gegenseitigen Wissensaustausch zu ermöglichen und die gesellschaftliche Relevanz eines Forschungsvorhabens sicherzustellen, sollte sich die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und der lokalen und indigenen Bevölkerung durch alle Projektphasen ziehen, angefangen bei der Definition der Forschungsfragen und -methoden. Der in diesem Unterkapitel vorgestellte Forschungsbedarf



basiert auf bereits bestehenden Bedarfsanalysen, die in Zusammenarbeit mit Stakeholdern und Stakeholderinnen sowie indigenen Rechteinhabern und Rechteinhaberinnen oder von indigenen Organisationen erarbeitet wurden (insbesondere EU-PolarNet 2020, ICARP III, Saami Arctic Strategy, SDWG Strategic Framework), sowie Beiträgen von verschiedenen Experten und Expertinnen.

### Stand der Forschung

Die Arktis ist von kultureller, linguistischer, politischer, sozioökonomischer, historischer und ökologischer Diversität gezeichnet. Wachsendes globales Interesse an der Arktis, zunehmende menschliche Aktivitäten und die Folgen der globalen Erwärmung wirken sich deshalb sowohl regional als auch lokal unterschiedlich aus. Dieser Komplexität muss in der Forschung Rechnung getragen werden.

Gleichzeitig lassen sich in einigen Bereichen überregionale Gemeinsamkeiten in gegenwärtigen gesellschaftlichen Entwicklungen feststellen (AHDR-II). So haben Klimawandel und sozioökologische Veränderungen zum Teil drastische gesellschaftliche Konsequenzen in allen Regionen der Arktis. Dies gilt in besonderem Maße für die indigene Bevölkerung, die außerdem bereits mit den Auswirkungen kolonialer und wirtschaftlicher Ausbeutung konfrontiert ist. Die komplexen Verknüpfungen zwischen Veränderungen in den untrennbar miteinander verbundenen ökologischen und soziokulturellen Systemen können darüber hinaus nur unter Berücksichtigung weiterer Faktoren, wie zum Beispiel Gender-Aspekten, verstanden werden (siehe auch AHDR-II, EPRP).

Der Anteil der in Städten lebenden Bevölkerung in der Arktis nimmt weiter zu. Zur Urbanisierung kommen weitere Migrationstrends hinzu, ausgelöst zum Beispiel durch wirtschaftliche Entwicklungen und den Zugang zu Bildungsmöglichkeiten, aber auch durch Auswirkungen des Klimawandels. Tendenziell verlassen mehr Frauen als Männer die ländlichen Regionen der Arktis, die in besonderem Maße auch von einer älter werdenden Bevölkerung gekennzeichnet sind. Gleichzeitig ergeben sich auch durch Immigration und zeitlich begrenzte Arbeitsaufenthalte in der Arktis soziokulturelle Herausforderungen, die es besser zu verstehen gilt (AHDR-II).

Während die Wirtschaft in weiten Teilen der Arktis von Ressourcennutzung und -abbau geprägt ist, bestehen Bemühungen zur wirtschaftlichen Diversifizierung, beispielsweise im Technologiesektor oder Kunstgewerbe (Econor III). Dies lenkt die Aufmerksamkeit auch auf Bildungsmöglichkeiten, die Notwendigkeit des Kapazitätsaufbaus zum Nutzen der indigenen und lokalen Bevölkerung

und die Auswirkungen der digitalen Kluft. In Bezug auf den Ressourcenabbau erhalten Instrumente zur Sicherstellung der lokalen und indigenen Teilhabe an Entscheidungsprozessen wachsende Aufmerksamkeit. Subsistenzaktivitäten, wie Jagd, Fischerei, Herdenhaltung und Beerensammlung, sind weiterhin von hoher Relevanz für die Lebensgrundlage vieler in der Arktis lebender Menschen sowie für die kulturelle Identität und Überlebensfähigkeit, die (mentale) Gesundheit und den sozialen Zusammenhalt.

In vielen Teilen der Arktis nimmt die Selbstbestimmung und politische Repräsentation der indigenen Bevölkerung zu. Dies geht mit politischen Dezentralisierungsprozessen und innovativen Governance-Strukturen einher (AHDR-II). Der Wert indigenen Wissens wird zunehmend auch über die Arktis hinaus anerkannt. Konzepte wie *Community-based Management* oder *Indigenous-led Management* im Bereich der erneuerbaren Ressourcen und die Kokreation von Wissen finden wachsende Beachtung. Gleichzeitig wird das Recht der indigenen Bevölkerung, über Projekte zu entscheiden, die sich auf ihr Lebensumfeld auswirken, weiterhin oft nicht (ausreichend) gewährt. Auch in der Forschung gilt es, die Zusammenarbeit mit verschiedenen Stakeholdern und Stakeholderinnen sowie indigenen Rechteinhabern und Rechteinhaberinnen ernst zu nehmen und zu stärken (siehe auch EU-PolarNet White Paper).

Das globale Interesse und die zunehmende internationale Vernetzung der Arktis bergen soziokulturelle, wirtschaftliche und politische Chancen und Risiken, für die ein besseres Verständnis vonnöten ist. Die rapide ablaufenden Veränderungsprozesse unterstreichen die hohe Relevanz transdisziplinärer und transformativer Forschungsvorhaben, die in Zusammenarbeit mit den jeweils betroffenen Akteuren und Akteurinnen zu nachhaltigen Lösungen beitragen und ein enormes Entwicklungs- und Erkenntnispotenzial bieten.

### Forschungsbedarf

Die folgenden Themenbereiche sollen der Orientierung für zukünftige Forschungsprogramme dienen. Darauf aufbauend ist es Aufgabe der Wissenschaft, den jeweils kontextbezogenen Forschungsbedarf in Zusammenarbeit mit Stakeholdern und Stakeholderinnen sowie Rechteinhabern und Rechteinhaberinnen zu erarbeiten und anzupassen. Aus Gründen der Übersicht folgt die Gliederung zum Teil dem Drei-Säulen-Modell der nachhaltigen Entwicklung, das auch in Dokumenten der Arbeitsgruppe zur nachhaltigen Entwicklung des Arktischen Rats Verwendung findet (zum Beispiel SDWG Strategic Framework). Es ist jedoch zu unterstreichen, dass insbesondere im Kontext indigener Kulturen eine solche Trennung der

Themenbereiche in Praxis und Theorie unmöglich ist. Auch das Konzept der Nachhaltigkeit selbst lässt sich nicht in jeden kulturellen Kontext sinnvoll übersetzen.

## **Umweltschutz**

Die Arktis erwärmt sich schneller als andere Teile der Erde. Dies stellt ihre Bewohner und Bewohnerinnen vor besondere Herausforderungen. So wirkt sich zum Beispiel das schwindende und dünner werdende Meereis negativ auf die Sicherheit bei der Jagd aus und das Schmelzen des Permafrosts bedroht arktische Infrastruktur. Gleichzeitig hat die indigene Bevölkerung über Jahrtausende hinweg enormes Wissen zu den ökologischen Systemen, ihrem Erhalt und auch dem Umgang mit Umweltveränderungen aufgebaut, das zunehmend auch über die Arktis hinweg Aufmerksamkeit erfährt. Forschungsbedarf besteht insbesondere in den folgenden Bereichen:

Das Zusammenwirken von sozioökologischen Systemen sowie den soziokulturellen Konsequenzen von globaler Erwärmung und ökologischen Veränderungen (inklusive Extremwetterereignissen) in den unterschiedlichen Teilen der Arktis und in den verschiedenen Bevölkerungsgruppen sollte besser verstanden werden. Hierzu gehört insbesondere die Forschung zu den kumulativen Auswirkungen der globalen Erwärmung und anderen Veränderungen.

Für den Schutz und die nachhaltige Nutzung arktischer Ökosysteme sowie für den Umgang mit Klimaveränderungen bedarf es entsprechender Forschung. Ein besonderer Fokus sollte auf indigenem Management, *Community-based Management* und der kokreativen Erarbeitung von Monitoring-, Mitigations- und Anpassungsstrategien sowie auf dem Zusammenwirken von indigenem und nicht indigenem Wissen liegen.

Ein Schwerpunkt sollte auf die Verknüpfungen von Umweltschutz, Wohlergehen, Resilienz und Anpassungsfähigkeit gelegt werden (SDWG Strategic Framework, S. 10).

## **Soziale und kulturelle Gerechtigkeit**

Die in der Arktis lebenden Menschen sehen sich nicht nur mit den Auswirkungen des Klimawandels konfrontiert, sondern gleichzeitig mit den Folgen kolonialer Ausbeutung, wirtschaftlicher Aktivitäten und den Konsequenzen anderer gesellschaftlicher Entwicklungen, wie zum Beispiel Urbanisierung, Sedentarisierung und demografische Veränderungen. Dies führt zu komplexen Herausforderungen, die sich oft gegenseitig bedingen und verstärken und sich regional und innerhalb der Bevölkerung unterschiedlich auswirken. Unter anderem zu den folgenden Themenbereichen kann durch Forschung ein Beitrag geleistet werden:

Es sollte analysiert werden, wie sich Globalisierung, demografischer Wandel, Urbanisierung, Sedentisierung, Migrationstrends, wachsendes geopolitisches Interesse und die zunehmenden menschlichen Aktivitäten in verschiedenen Teilen der Arktis sozial auswirken. Forschungsaktivitäten sollten dabei sozialen Dimensionen wie Alter, Gender oder Indigenität Rechnung tragen.

Erforscht werden sollten die Ursachen sozialer und kultureller Ungleichheit und ihre Veränderungen. Dazu zählt Forschung zu ungleich verteilten materiellen Ressourcen, nicht verwirklichter Selbstbestimmung und Souveränität indigener Gemeinschaften sowie schrumpfender Autonomie und Rückbau von Infrastruktur und sozialer Sicherheit in manchen Teilen der Arktis. Dies umfasst die Auseinandersetzung mit historischen, anhaltenden und neuen politischen, wirtschaftlichen und sozialen Faktoren.

Benötigt wird Forschung auch für ein verbessertes globales Verständnis von Geschichte, Kulturen und Sprachen in den verschiedenen Regionen der Arktis, zur Förderung von indigenem und lokalem Wissen, Kunst und Handwerk, kultureller Selbstbestimmung sowie für die Identifizierung und den Erhalt materiellen und immateriellen kulturellen Erbes (SDWG Strategic Framework, S. 10). Dies schließt Forschung zu den Voraussetzungen für kulturelle Diversität und ihrem Verschwinden ein.

Gefördert werden sollte außerdem transdisziplinäre Forschung zu erwünschten Entwicklungen in der Arktis in Bezug auf jetzt oder in Zukunft ablaufende Transformationsprozesse und soziale Gerechtigkeit im Kontext der nachhaltigen Entwicklung. Zu berücksichtigen sind dabei auch verschiedene Interessenkonflikte innerhalb der Gesellschaft und die Rolle von Akteuren und Akteurinnen außerhalb der Arktis, deren Aktivitäten sich in der Arktis auswirken (siehe auch EPRP, S. 61).

Benötigt wird zudem Forschung im Gesundheitsbereich. Dies umfasst Fragen zu Dekolonialisierung und Zugang sowie Forschung für ein ganzheitliches Verständnis von Wohlergehen und Lebensqualität. Es muss dabei um die kulturell angemessene Erfüllung von Bedürfnissen der Bevölkerung in der Arktis gehen. Ein besseres Verständnis der Verknüpfungen zwischen kolonialer und wirtschaftlicher Ausbeutung, rapiden soziokulturellen Veränderungen, Klimawandel sowie mentaler und physischer Gesundheit wird benötigt.

Analysebedarf besteht ebenfalls hinsichtlich der Herausforderungen und Lösungen im Bildungswesen, einschließlich indigener Bildung, sowie des Zugangs der lokalen Bevölkerung zu Bildung (auch durch Kommunikationstechnologien).

Ebenfalls ist innovative Forschung zu verbesserter Wissensmobilisierung und Wissenstransfer gefragt.

Es bedarf auch einer tieferen Analyse indigener Rechte und ihrer Durchsetzung auch auf überregionaler und internationaler Ebene sowie politischer und institutioneller Bedingungen; Forschung zu indigenen Rechtssystemen, legalem Pluralismus und den Wechselwirkungen verschiedener Rechtssysteme und -ebenen.

## **Wirtschaft**

Viele Regionen in der Arktis hängen wirtschaftlich vom Ressourcen-Export ab. Hieraus ergibt sich eine Anfälligkeit für Fluktuationen in der globalen Nachfrage und bei den Weltmarktpreisen. Überdies nimmt der öffentliche Sektor eine wichtige Funktion für die Schaffung von Arbeitsplätzen und Einkommen ein. In vielen Teilen der Arktis nehmen außerdem andere wirtschaftliche Aktivitäten zu, wie zum Beispiel im Tourismus- oder Technologiesektor. Auch Subsistenzaktivitäten spielen weiter eine essenzielle Rolle für viele in der Arktis lebende Menschen und werden häufig neben der Lohnarbeit fortgeführt. In allen Bereichen bestehen über die Arktis hinweg große regionale Unterschiede (AHDR-II). Es besteht Forschungsbedarf in den folgenden Themenfeldern:

Benötigt wird ein besseres Verständnis wirtschaftlicher Entwicklungen und Aktivitäten, auch in der Subsistenzwirtschaft und in neuen und aufstrebenden Sektoren (wie zum Beispiel IT und neue Technologien). Hierzu zählen auch Forschung zu den sich aus diesen Entwicklungen ergebenden Chancen und Herausforderungen im Hinblick zum Beispiel auf die Schaffung von Arbeitsplätzen oder die Förderung lokaler Kulturen und Produkte (SDWG Strategic Framework, S. 11) sowie eine Analyse der kumulativen Effekte verschiedener wirtschaftlicher Aktivitäten innerhalb einer Region.

Es besteht Forschungsbedarf zu nachhaltigen und langfristigen Investitionen in arktische Infrastruktur und zur Entwicklung nachhaltiger Infrastrukturprojekte in Zusammenarbeit mit der Gesellschaft in der Arktis (SDWG Strategic Framework).

Geforscht werden sollte auch zur nachhaltigen Nutzung von Ressourcen sowie zu den Auswirkungen der kommerziellen Nutzung erneuerbarer und nicht erneuerbarer Ressourcen (ICARP III).

Benötigt werden darüber hinaus Forschung zur Stärkung wirtschaftlicher Aktivitäten auch in abgelegenen Teilen der Arktis und Untersuchungen zu möglichen positiven Auswirkungen auf vor Ort erwünschte Entwicklungen und

das Gemeinwohl. Es besteht auch Bedarf an einem verbesserten Verständnis der Verknüpfungen zwischen Subsistenzwirtschaft und anderen wirtschaftlichen Aktivitäten (siehe auch AHDR-II, EPRP, Saami Arctic Strategy).

## **Governance**

Die schnell ablaufenden Veränderungsprozesse in der Arktis stellen bestehende Governance-Systeme auf lokaler, regionaler, nationaler und internationaler Ebene zum Teil vor erhebliche Herausforderungen. Erschwert wird diese Situation durch die Tatsache, dass die Konsequenzen des Klimawandels oder der Globalisierung international abgestimmter Regulierung bedürfen (AHDR-II). Dabei spielen sowohl formelle als auch informelle Institutionen eine wichtige Rolle. Unter anderem in diesen Bereichen besteht Forschungsbedarf:

Gefördert werden sollte Forschung zu den in verschiedene Aktivitäten und Entwicklungen involvierten Akteuren und Akteurinnen und ihren Interessen sowie potenziellen Wechselwirkungen, Interessenkonflikten und möglichen neuen Konflikten mit internationalen Abkommen, nationalen Gesetzen und regionalen Regulationen. Dies gilt insbesondere für Aktivitäten in von internationalen Abkommen regulierten Regionen und neue Herausforderungen zum Beispiel im Bereich *Search and Rescue* (EPRP, S. 62). Auch durch den Klimawandel ergeben sich neue rechtliche Herausforderungen, die es zu verstehen gilt.

Ein verbessertes Verständnis der Zusammenhänge zwischen indigener Selbstbestimmung, Partizipation in lokalen und regionalen Governance-Strukturen und einer Verbesserung des Gemeinwohls und der Lebensqualität ist vonnöten (EPRP, S. 46).

Geforscht werden sollte auch zur Rolle von Institutionen für nachhaltige Entwicklung und zu Governance-Systemen, die widerstandsfähige sozioökologische Systeme unterstützen können, zu sozial gerechten, kulturell nachhaltigen und sicheren industriellen Aktivitäten in der Arktis beitragen und andere gesellschaftliche Bedürfnisse sichern (siehe auch AHDR-II, ICARP III, Saami Arctic Strategy). Ebenso gilt es zu analysieren, inwiefern global agierende Wirtschaftsunternehmen Governance-Strukturen bestimmen.

Darüber hinaus wird Forschung zu indigenen Governance-Methoden benötigt.

## **Skalare Interdependenzen**

Das zunehmende internationale Interesse an der Arktis und die daraus resultierenden Aktivitäten bewirken diverse Folgen für die Bevölkerung in der Arktis. Auch politische und wirtschaftliche Entwicklungen in anderen

Teilen der Welt haben zum Teil massive Konsequenzen in der Arktis, sei es durch sich in der Arktis auswirkende Umweltverschmutzung oder globale Preisschwankungen auf den Rohstoffmärkten. Gleichzeitig wirken sich auch Entwicklungen in der Arktis global aus.

Analysiert werden sollten die Verknüpfungen zwischen den verschiedenen Teilen der Arktis und globalen wirtschaftlichen, sozialen und politischen Systemen und ihre wechselseitigen Beeinflussungsmechanismen (siehe auch AHDR-II).

Benötigt werden auch Untersuchungen der Auswirkungen des wachsenden globalen Interesses an der Arktis (AHDR-II).

Die Arktis hat eine Reihe von Innovationen hervorgebracht, unter anderem in Partizipationsprozessen, Telemedizin oder Distanzunterricht. Es gilt zu erforschen, wie und ob sich diese Innovationen innerhalb der Arktis und darüber hinaus transferieren lassen (AHDR-II, S. 496) und wie den Urhebern beziehungsweise Urheberinnen dabei Gehör und Anerkennung verschafft werden können.

### ***Forschungsethik und Transdisziplinarität auch als Gegenstand der Forschung***

Für nachhaltige, gesellschaftlich relevante und kulturell angemessene Lösungen der komplexen ökologischen, sozialen und ökonomischen Herausforderungen in der Arktis ist eine enge Zusammenarbeit zwischen Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften, indigenen Rechteinhabern und Rechteinhaberinnen sowie anderen Stakeholdern und Stakeholderinnen unabdingbar. Kokreative Ansätze können zu verbesserten Forschungsergebnissen führen und respektieren das Recht der indigenen Bevölkerung auf Selbstbestimmung. In der Praxis zeigt sich hier jedoch fortwährend großes Verbesserungspotenzial (siehe auch EPRP, EU-PolarNet White Paper, ICARP III). Es gilt deshalb zu erforschen, wie exzellente transdisziplinäre Forschung methodologisch, theoretisch und praktisch gestärkt werden kann:

Es besteht Bedarf an einem verbesserten Verständnis der Entwicklung und Durchführung kokreativer Forschungsprojekte inklusive angemessener Methoden und Technologien. Eine enge Zusammenarbeit benötigt Zeit für Vertrauensaufbau und ein gegenseitiges Verständnis der jeweiligen Werte und Bedürfnisse. Auch strukturelle Voraussetzungen für die (finanzielle) Förderung und Evaluierung kokreativer Forschungsprojekte müssen besser verstanden werden (siehe auch EPRP).

Es besteht Bedarf an Forschung, die sich mit relevanten ethischen Aspekten der Arktisforschung auseinandersetzt.

Dies beinhaltet auch Fragen zum Umgang mit Daten, Wissen und Forschungsergebnissen. Dabei sind kontextspezifische und kulturelle Unterschiede in verschiedenen Teilen der Arktis zu berücksichtigen. Essenziell ist eine Auseinandersetzung mit verschiedenen Vorstellungen von Ethik und indigenen Ethikkonzeptionen.

Es sollte erforscht werden, inwiefern koloniale Kontinuitäten noch heute strukturell in der Forschung fortwirken und wie diese reflektiert und verändert werden können.

## **Daraus leitet sich folgender Forschungs- und Entwicklungsbedarf ab:**

- Analyse des Zusammenwirkens sozioökologischer Systeme sowie der kumulativen, soziokulturellen Auswirkungen der globalen Erwärmung und anderer Veränderungen; Forschung für den Schutz und die nachhaltige Nutzung arktischer Ökosysteme mit Fokus auf indigenem und *Community-based Management* und kokreativer Erarbeitung von Monitoring-, Mitigations- und Anpassungsstrategien.
  - Analyse der soziokulturellen Auswirkungen verschiedener Veränderungsprozesse unter Berücksichtigung sozialer Dimensionen wie Alter, Gender oder Indigenität; Erforschung der Ursachen sozialer und kultureller Ungleichheit sowie ihrer Wurzeln und Veränderungen; Forschung zu Geschichte, Kulturen und Sprachen und zur Förderung von indigenem und lokalem Wissen, Kunst und Handwerk sowie Erhalt kulturellen Erbes; transdisziplinäre Forschung zu erwünschten Entwicklungen in der Arktis; zur Erfüllung von Bedürfnissen der indigenen und lokalen Bevölkerung im Bereich Gesundheit und Bildung; Forschung zu indigenen Rechten, zu Rechtssystemen und legalem Pluralismus.
  - Analyse wirtschaftlicher Entwicklungen, auch in der Subsistenzwirtschaft und aufstrebenden Sektoren; Erhebungen zu nachhaltigen Investitionen in Infrastruktur; Forschung zu den Auswirkungen des kommerziellen Ressourcenabbaus sowie der nachhaltigen Nutzung von Ressourcenforschung; Forschung zur Stärkung wirtschaftlicher Aktivitäten auch in abgelegenen Teilen der Arktis; zu den Verknüpfungen zwischen Subsistenzwirtschaft und anderen wirtschaftlichen Aktivitäten.
  - Analyse der in die verschiedenen Entwicklungen involvierten Stakeholder und Stakeholderinnen sowie Rechteinhaber und Rechteinhaberinnen und ihrer Interessen, potenzieller Interessenkonflikte und möglicher Konflikte mit internationalen, nationalen und regionalen Abkommen, Gesetzen und Regulationen; Forschung zu Governance-Systemen; zu den Zusammenhängen zwischen indigener Selbstbestimmung, Partizipation in Governance-Strukturen, Gemeinwohl und Lebensqualität; Forschung zur Rolle von Institutionen und Wirtschaftsunternehmen, Forschung zu indigenen Governance-Methoden.
- Analyse lokaler, regionaler und internationaler Interdependenzen; Untersuchung der Auswirkungen des wachsenden globalen Interesses an der Arktis; Forschung zu arktischen Innovationen und ihrem Transfer.
  - Untersuchungen zu transdisziplinärer und transformativer Forschung in der Arktis; Forschung zur Entwicklung, Durchführung und Evaluation kokreativer und kooperativer Forschungsprojekte zwischen indigenen und nicht indigenen Partnern und Partnerinnen unter Berücksichtigung verschiedener Vorstellungen von Ethikkonzeptionen; Erhebungen zu kolonialen Kontinuitäten in der Forschung.



Fischerboote im Hafen von Tórshavn (Färöer-Inseln)

## 2.8 AUSWIRKUNGEN MENSCHLICHER AKTIVITÄTEN AUF DIE ÖKOSYSTEME IN DER ARKTIS

### Leitfragen:

- Welche Organismen und Ökosysteme der Arktis haben für die Region und weltweit eine besondere Bedeutung und sind in besonderem Ausmaß gefährdet und damit besonders schutzbedürftig?
- Wie kann Wissenschaft dazu beitragen, die Auswirkungen menschlicher Aktivitäten auf die Ökosysteme in der Arktis besser zu quantifizieren?
- Wie kann Wissenschaft dazu beitragen, künftige negative Auswirkungen auf die Arktis dauerhaft zu vermeiden und bestehende Auswirkungen nachhaltig zu verringern beziehungsweise positive Auswirkungen herbeizuführen?
- Wie können eine stärkere Verknüpfung von natur-, sozial- und geisteswissenschaftlicher Forschung und die Zusammenarbeit mit der indigenen und lokalen Bevölkerung (Transdisziplinarität) zur Beantwortung dieser Fragen beitragen?

### Gesellschaftliche Relevanz

Die Arktis bietet die Lebensgrundlage für einzigartige marine und terrestrische Ökosysteme, die hochgradig an die extremen Lebensbedingungen, wie die sehr niedrigen Temperaturen und lange Dunkelheit im arktischen Winter, angepasst sind. Das Meereis im Arktischen Ozean schafft zudem einen besonderen Lebensraum. Die einzigartigen Lebensbedingungen in der Arktis tragen zur Artenvielfalt und weltweit relevanten Ökosystemleistungen bei.

Neben den klimatischen Veränderungen, die sich auf den arktischen Ozean und die Landgebiete auswirken (Unterkapitel 2.1 und 2.5), hat auch eine Vielzahl weiterer menschlicher Aktivitäten außerhalb und innerhalb der Region Konsequenzen für die Ökosysteme: Luft- und Meeresströmungen sowie Flüsse tragen Schadstoffe, wie beispielsweise Chemikalien und Kunststoffpartikel ein, die sich im Permafrostboden, im Meereis und auf dem Meeresboden ablagern. Menschliche Aktivitäten wie Schifffahrt, Fischerei, Tourismus (insbesondere Kreuzfahrtschiffe) und der Abbau und Transport von mineralischen und Energie-Rohstoffen erhöhen den Druck auf die Ökosysteme. Dazu kommen Abfälle und Abwässer

von Städten und Siedlungen in der Arktis, die diesen Druck zusätzlich erhöhen. Neben den Umweltänderungen können Menschen in der Arktis auch durch Schadstoffe in der Nahrungskette bedroht werden. Forschungsprojekte müssen die Rechte der indigenen Bevölkerung auf freie, vorherige und informierte Zustimmung (*free, prior and informed consent*) wahren. Dafür ist bereits in der Planungsphase der Austausch zu suchen, sodass die Forschungsfragen zusammen mit den Betroffenen vor Ort entwickelt werden (siehe Unterkapitel 2.7).

### Stand der Forschung

Um in der Arktis zu forschen, ist eine internationale Zusammenarbeit unerlässlich. Die Beteiligung Deutschlands als Beobachterstaat im Arktischen Rat und seinen Arbeitsgruppen, darunter dem *Arctic Monitoring and Assessment Programme* (AMAP), und die Beteiligung an der Konferenz der arktischen Wissenschaftsminister (*Arctic Science Ministerial*) bieten eine konkrete Grundlage. Im Rahmen von Initiativen wie dem *Circumpolar Biodiversity Monitoring Programme* (CBMP) und dem *Sustaining Arctic Observing Network* (SAON) gibt es zahlreiche Kooperationen, um die in vielen Bereichen immer noch lückenhafte und regional spezifische Datenlage zu verbessern und zu harmonisieren. Zusätzlich zu wissenschaftlichen Einrichtungen sind auch zahlreiche Gemeinschaften auf lokaler Ebene aktiv, die eine wichtige Rolle in Datenerhebung und -management spielen und auf Unterstützung angewiesen sind.

Der Klimawandel in der Arktis verläuft schneller als auf globaler Ebene (Unterkapitel 2.1). Aktuelle Studien deuten darauf hin, dass auch in der Arktis produzierte kurzlebige „Klimaschädlinge“ (SLCF), wie *Black Carbon* (BC), signifikant zur beobachteten Erwärmung beitragen. Atmosphärisches BC absorbiert nicht nur die Sonnenstrahlung, sondern beeinflusst auch die Strahlungseigenschaften von Wolken und verringert die Schnee-Albedo, wenn sich BC auf Schneeoberflächen ablagert. Durch ihre komplexen Wechselwirkungen mit dem arktischen Klimasystem ist ihr Klimateffekt mit starken Unsicherheiten behaftet. Zum Verringern der Unsicherheit fehlen weitere Informationen über die chemischen und physikalischen Eigenschaften, zum Beispiel Größe, Häufigkeit, Zusammensetzung und Mischungszustand, über die vertikale Verteilung sowie die Transportprozesse aus den Quellregionen.

Die Lebensbedingungen in der Arktis ändern sich aufgrund steigender Temperaturen in Atmosphäre und im Ozean rasch. Dies führt bereits dazu, dass sich Arten aus angrenzenden Lebensräumen in arktischen Regionen ausbreiten. Auch zunehmende menschliche Aktivitäten, insbesondere Schifffahrt, Rohstofferkundung und -abbau,

können zum Beispiel durch bewachsene Schiffsrümpfe und Ballastwasser neue Arten in die Region bringen oder Arten innerhalb der Arktis transportieren. Sensible Ökosysteme in der Arktis können dadurch aus dem Gleichgewicht geraten und heimische durch konkurrierende Arten verdrängt werden. Die größte Gefahr für die Meeresumwelt und die davon abhängige Bevölkerung in der Arktis stellen Unfälle mit Freisetzung von Öl dar, da die harschen Umweltbedingungen und die gewaltigen Distanzen mögliche Gegenmaßnahmen erheblich erschweren.

Öl- und Gasexploration, Forschungstätigkeiten, Bau und Betrieb von Offshore-Installationen, Einsatz verschiedener Arten von Sonaren und die Zunahme des Schiffsverkehrs verstärken die Unterwasserschallbelastung im Arktischen Ozean. Die Belastung ist noch größer als in gemäßigteren Meeresregionen, da tieffrequenter Schall im kalten, eisbedeckten Wasser längere Distanzen überwindet und näher an der Oberfläche bleibt als in gemäßigten Breiten. Einheimische Arten, darunter Meeressäuger, können von steigendem Unterwasserlärm verdrängt werden und auch langfristige Schädigungen sind möglich.

Die Exploration von mineralischen und Energie-Rohstoffen in der Arktis kann weitere erhebliche Umweltauswirkungen mit sich bringen und ganze Lebensräume zerstören. Dies gilt für Erdöl- und Erdgasvorkommen an Land und offshore ebenso wie für Vorkommen von Gold, Eisenerz, Kupfer, Nickel, Zink, Seltenen Erden und Uran. Beim Abbau von Rohstoffen werden zum Teil erhebliche Frischwassermengen benötigt. Freiwerdende Schadstoffe sowie die Entsorgung von Abraum und Abwässern können regionale Ökosysteme und Migrationsrouten stark beeinträchtigen und Konflikte zwischen Tierwelt und menschlichen Siedlungen verschärfen. Auch der zunehmende Transport von Rohstoffen erhöht die Risiken für die Umwelt durch die dafür erforderliche zusätzliche Infrastruktur an Land beziehungsweise eine intensivere Nutzung von Schifffahrtsrouten. Weitere potenzielle Umweltrisiken in der Arktis sind nuklearbetriebene Eisbrecher, der Transport von radioaktivem Material/Abfällen und die Ausweitung der Nutzung von Kernenergie.

Fischfang, Jagd und Aquakultur basierend auf heimischen Fischarten spielen für die arktischen Küstenstaaten und ihre Bewohner und Bewohnerinnen eine bedeutende Rolle als Nahrungs- und Erwerbsquelle und haben teilweise besondere soziokulturelle Relevanz. In einigen Regionen führte die industrielle Fischerei bereits zur drastischen Überfischung von Fischbeständen. Die Abnahme des Meereises im zentralen Arktischen Ozean sowie eine Wanderung von Fischbeständen in wärmer werdende arktische Gewässer verändern die Bedingungen dort. Der

Polardorsch, die Lebensgrundlage arktischer Robben- und Walpopulationen, wird beispielsweise durch den Meereisrückgang bedroht. Das Übereinkommen zur Verhinderung der unregulierten Hochseefischerei im zentralen Nordpolarmeer wird nach seinem Inkrafttreten die gewerbliche Fischerei zunächst für 16 Jahre erheblich beschränken und sieht ein gemeinsames Programm der unterzeichnenden Staaten und der Europäischen Union für Forschung und Monitoring vor.

Müll und Mikroplastik sowie schlecht abbaubare Schadstoffe (POPs) und viele weitere Verbindungen gelangen durch Luft- und Meeresströmungen sowie Flüsse in die arktischen Lebensräume. Lokale Quellen sind zum Beispiel abhandengekommene Netze in der Fischerei oder eine unsachgemäße Müllentsorgung von Schiffen. Seevögel und Meeressäuger können sich in Abfällen verfangen und daran ersticken. Die mögliche Weitergabe kleinster Bestandteile in der Nahrungskette und die Anreicherung im Gewebe bergen gesundheitliche Risiken für die arktische Tierwelt und über die Nahrungskette auch für Menschen.

## **Forschungsbedarf**

Die Auswirkungen menschlicher Aktivitäten auf arktische Ökosysteme sind zahlreich und, abhängig von der jeweiligen Region, addieren sich mehrere Stressoren auf und überlagern sich. Eine zentrale Komponente des Forschungsbedarfs ist daher – neben der Schließung erheblicher Datenlücken durch systematisches Monitoring – die Untersuchung der Wechselwirkungen mehrerer Stressoren und deren Einfluss auf die Ökosysteme. Die Identifizierung besonders gefährdeter Gebiete und der Schutz der Ökosystemleistungen erfordern weitere Verbesserungen der Datengrundlagen. In der UN-Dekade für Ozeanforschung (2021–2030) kann dafür an zahlreiche Initiativen und Arbeiten angeknüpft werden.

Der Schwerpunkt konkreten Forschungsbedarfs liegt darauf, schädliche Auswirkungen menschlicher Aktivitäten zu identifizieren und zu minimieren. Künftige Untersuchungen sollten allerdings ebenfalls erforschen, welche nachhaltigen Methoden geschädigte Ökosysteme wiederherstellen oder ihren Zustand zumindest wieder verbessern können.

## **Monitoring und Kooperation**

Die erfolgreiche internationale Zusammenarbeit muss insbesondere durch Standardisierung und Interoperabilität von Datensystemen weiter unterstützt und der Austausch, auch bereits vorhandener Daten, mit globalen Beobachtungssystemen weiter verbessert werden. In vielen Fällen fehlt es noch an einer Kooperation mit

lokalen Stakeholdern und Stakeholderinnen und indigenen Rechteinhabern und Rechteinhaberinnen, einer Einbeziehung indigenen und lokalen Wissens und gemeinsam entwickelten Forschungsprogrammen. Dies ist jedoch erforderlich, um den Bedürfnissen der Menschen vor Ort gerecht zu werden. Die Kooperation kann auch insgesamt zu einem umfassenderen Monitoring beitragen, zum Beispiel in Forschungsprogrammen zum Küstenmonitoring sowie in der Reaktion auf nachteilige Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit.

## **Kurzlebige Klimatreiber**

Weitere intensive Messaktivitäten und die Aufrechterhaltung der existierenden Messprogramme an den arktischen Forschungsstationen sind notwendig, um die Datenbasis für die Beantwortung der offenen Fragen zu erhalten. Dies kann aber nur einhergehen mit intensiver modellierender Aktivität. Dabei ist auch zu untersuchen, ob die Modelle die aktuelle und zukünftige Häufigkeit und Verteilung von SLCF (zum Beispiel BC) in der arktischen Atmosphäre abbilden. Daraus ließen sich die Trends und die interannuelle Variabilität sowie deren primäre Treiber der simulierten SLCF-Konzentrationen in der arktischen Atmosphäre zeigen.

Der Forschungsbedarf beinhaltet unter anderem, wie sich das Ausmaß der SLCF-Emissionen, einschließlich durch die arktische Schifffahrt, in der Zukunft verändern wird und welche Möglichkeiten der Minderung es gibt. Auch die Höhe und die räumliche Verteilung dieser menschlichen Emissionen sind noch mit Unsicherheiten behaftet. Dies gilt gleichsam für die Häufigkeit von SLCF in der arktischen Atmosphäre und den Anteil der natürlichen Quellen daran. Weitere offene Fragen beziehen sich auf den Einfluss von BC auf Verteilung, Lebensdauer und mikrophysikalische Eigenschaften von Wolken unter Berücksichtigung des Mischungszustands und der Lebenszeit in der arktischen Atmosphäre. Mit Blick auf die darüber hinausgehenden Klimareaktionen ist außerdem zu untersuchen, wie groß die SLCF-Beiträge in Bezug auf Änderungen der Kohlendioxid- und anderer Treibhausgasemissionen sind.

## **Schiffsverkehr**

Die Quellen und Auswirkungen von Verschmutzungen durch Schiffsverkehr müssen regional und nach jeweiliger Nutzung analysiert und quantifiziert werden. Es fehlt noch immer an grundlegenden Informationen, zum Beispiel über die Nutzung von Treibstoffarten in der Arktis, aber auch über ihr Verhalten bei Freiwerden in arktischen Gewässern. Die möglichen Auswirkungen von Ölunfällen auf arktisspezifische Arten und Ökosysteme sind bislang kaum untersucht worden. Bisher fehlen regional spezifische



Erkenntnisse, welche Auswirkungen ein Unfall auf die Versorgung der indigenen und lokalen Bevölkerung haben könnte, und Konzepte für den Schutz der Umwelt bei Unfällen. Wie in den anderen Forschungsbereichen ist auch hier die Kooperation mit der lokalen und indigenen Bevölkerung von essenzieller Bedeutung.

Die Identifizierung besonders empfindlicher und somit schützenswerter arktischer Ökosysteme stellt eine Grundlage dafür dar, die Nutzung arktischer Gewässer durch gebietsbezogene Schutzmaßnahmen vor nachteiligen Auswirkungen zu schützen.

Die Auswirkungen von Tourismus auf arktische Ökosysteme zu Wasser und zu Land fallen regional sehr unterschiedlich aus und sind bislang nur teilweise untersucht. Die für größere Besucherzahlen erforderliche Infrastruktur, der Bedarf an Versorgungsgütern und die damit einhergehende höhere Müllproduktion können ganze Lebensräume beeinträchtigen.

#### *Invasive Arten*

Da die Bedeutung invasiver Arten in der Arktis erst in jüngerer Zeit zugenommen hat, gibt es bislang nur sehr wenige Daten zu deren Verbreitung und deren Auswirkungen. Das bestehende Monitoring muss hinsichtlich der Arten, Häufigkeit, Jahreszeiten und Methoden weiter ausgedehnt und harmonisiert werden. Mehrere Regionen (in Russland, Fennoskandia und Alaska) sowie einige invasive und wandernde Arten sind beim Monitoring der Belastungen und Auswirkungen von Schadstoffen unterrepräsentiert.

#### *Unterwasserschall*

Hinsichtlich des Unterwasserschalls fehlt es sowohl an ausreichenden Daten für alle regionalen Gewässer als auch an der Analyse und Quantifizierung der Auswirkungen des Unterwasserschalls aus den oben genannten Quellen auf Meeressäuger, Fische und Invertebraten. Insbesondere wurden die Auswirkungen, wie zum Beispiel Störung, Verletzung oder Verhaltensänderungen, auf Fischarten und wirbellose Tiere bislang nur in sehr geringem Ausmaß (zwei von über 630 Fischarten) untersucht. Hinsichtlich der Erhebung und Auswirkungen von Unterwasserlärm sind einige arktische Regionen, darunter die ostsibirische See, die Laptevsee, die Karasee, aber auch die Barentssee, Baffin Bay und der kanadisch-arktische Archipel durch bisherige Studien noch nicht oder kaum abgedeckt.

#### **Arktische Ressourcen**

##### *Mineralische und energetische Rohstoffe*

Neben den Auswirkungen von Ölfällen (siehe oben)

sind auch die Auswirkungen der Rohstofferkundung, der für den Abbau erforderlichen Infrastruktur und des regulären Betriebs von Installationen zu beachten. Untersuchungen konzentrieren sich insbesondere auf Folgenabschätzungen im Rahmen von Genehmigungsverfahren sowie ein begleitendes Monitoring. Nachträgliche Untersuchungen könnten weitere Ansatzpunkte zur Minimierung der Auswirkungen verschiedener Industrien auf die regionalen arktischen Ökosysteme sowie auf die dort lebenden Gemeinschaften liefern.

#### *Fischfang und Aquakultur*

Bei der Untersuchung der lebenden Ressourcen in der Arktis und der davon abhängigen lokalen Fischereien sind die Auswirkungen des Klimawandels auf einzelne Arten und arktische Ökosysteme weiterhin zu beobachten. Meereisrückgang, wärmere Wassertemperaturen, die Ozeanversauerung und ein sich veränderndes Nährstoffangebot könnten dazu führen, dass sich heimische Arten wie der Polardorsch zurückziehen, während sich neue Arten in arktischen Gewässern stärker ausbreiten und in Verbindung mit weiteren Stressoren erheblichen Druck auf bestehende Ökosysteme ausüben.

Insbesondere im zentralen Arktischen Ozean ist systematisches Monitoring erforderlich, um die begrenzten Kenntnisse über die Größe von Fischpopulationen, ihre Bewegungen und die klimatisch bedingten Veränderungen in den Ökosystemen zu verbessern. Dies gilt für durch den Klimawandel gefährdete heimische Schlüsselarten und für möglicherweise einwandernde Arten mit Potenzial für die Fischerei.

#### **Weitere industrielle Quellen**

##### *Meeresmüll inklusive Mikroplastik*

Hinsichtlich des in den Arktischen Ozean gelangenden Meeresmülls (einschließlich Mikroplastik) bestehen ein Mangel an Daten sowie erheblicher Forschungsbedarf sowohl zu dessen Quellen und Eintragungswegen in die Arktis als auch zu dessen Auswirkungen und Beseitigung. Das Wissen über die Verbreitung der Verschmutzung ist bislang regional beschränkt: Für weite Gebiete des zentralen Arktischen Ozeans und der Küstenregionen vor Sibirien, Alaska und Kanada liegen kaum Daten vor. Der Eintrag aus landseitigen Quellen ist aufgrund der großen Einzugsgebiete von Flüssen bislang kaum untersucht und es fehlt an Untersuchungen des Beitrags wirtschaftlicher Aktivitäten, darunter von Ressourcenerkundung und -abbau sowie von Schifffahrt, Fischerei und Aquakulturen. Das Wissen über die Wechselwirkungen ist bislang auf wenige Arten und insbesondere auf Vögel beschränkt. Die Aufnahme von Mikroplastik durch Fische und Zooplankton zum Beispiel ist dagegen kaum untersucht.

## *Eintrag von Chemikalien*

Angesichts der großen Vielfalt chemischer Verbindungen und ihrer unterschiedlichen Eigenschaften ist es erforderlich, das Vorkommen neuer Schadstoffe in der Arktis weiter zu erfassen und ihre Quellen zu identifizieren. Darüber hinaus fehlt es an Wissen über die biologischen und toxikologischen Auswirkungen halogenorganischer Verbindungen, Quecksilber und weiterer Stoffe, die bereits in der Arktis nachgewiesen werden konnten. Dies gilt zum Beispiel hinsichtlich der relevanten Konzentrationsschwellen, um Risikoquotienten zu entwickeln und hinsichtlich der Auswirkungen der Verbindungen in Kombination untereinander und mit natürlichen Stressoren bewerten zu können. Darüber hinaus ist die Ausweitung von Methoden und Ansätzen erforderlich, um die Auswirkungen auf Populationen und Ökosysteme zu modellieren. Die Konsequenzen für indigene und lokale Gemeinschaften durch die Anreicherung von Schadstoffen in der Nahrungskette bedürfen weiterhin besonderer Beachtung und entsprechende Forschungsfragen müssen zusammen mit diesen Gemeinschaften erarbeitet werden. Ein Beispiel für stärker multidisziplinär und transdisziplinär ausgerichtete Arbeiten wäre die Integration der Informationen auch aus Studien zu Tieren und menschlicher Gesundheit im Rahmen eines „One Health“-Ansatzes.

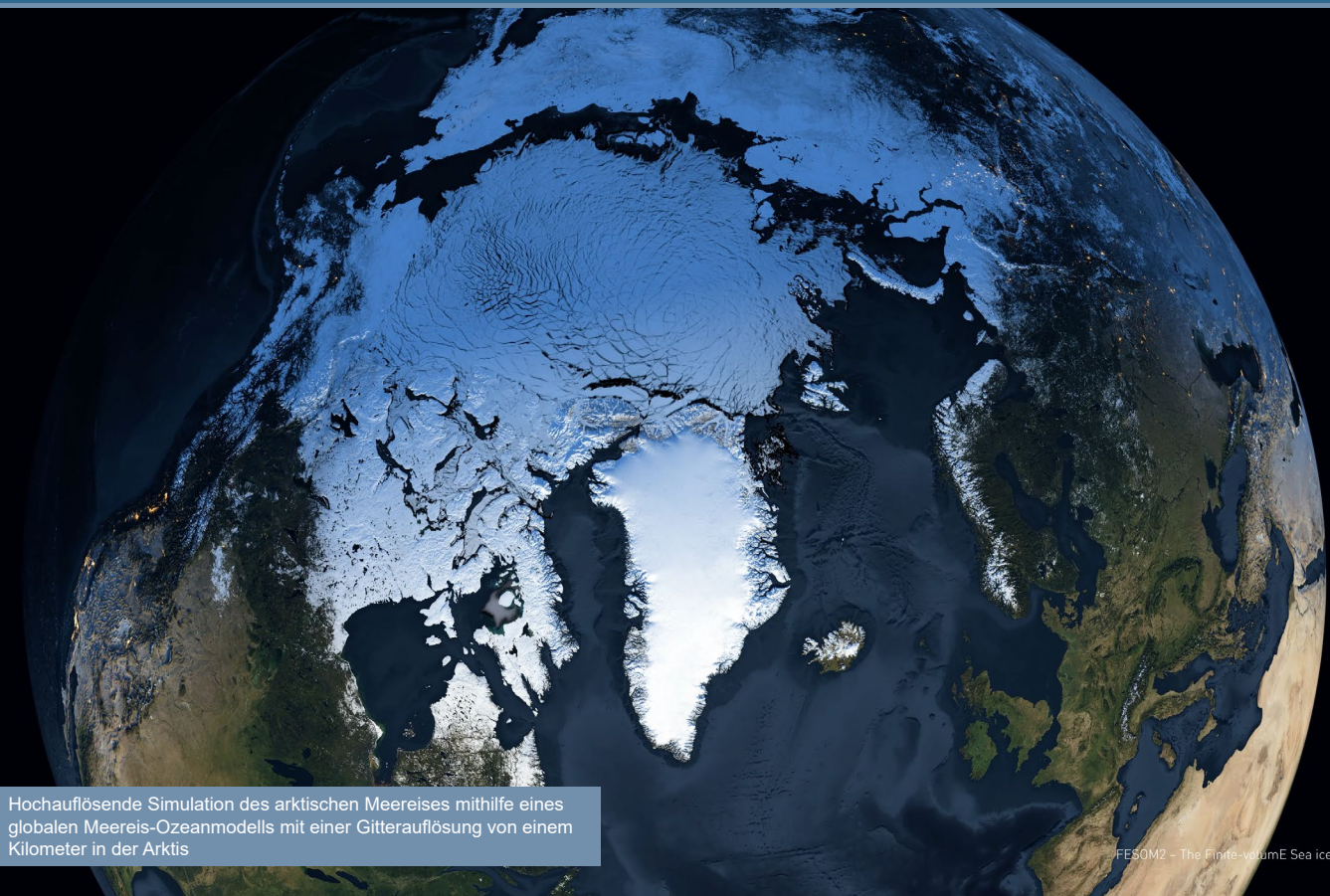
## *Nutzung nuklearer Energie*

Die Auswirkungen potenziell freiwerdender radioaktiver Strahlung auf arktische Ökosysteme und die Möglichkeiten der Eindämmung im möglichen Schadensfall sind bisher nicht systematisch erforscht. Dabei ist zu beachten, dass die Forschung nicht den weiteren Ausbau der Nutzung fördert, sondern allenfalls Beiträge zur Prävention schädlicher Auswirkungen leistet

## **Daraus leitet sich folgender Forschungs- und Entwicklungsbedarf ab:**

- Wechselwirkungen multipler Stressoren und ihre Auswirkungen auf arktische Ökosysteme sollten untersucht werden, um besonders gefährdete Arten und Gebiete zu identifizieren.
- Regional differenziertere Untersuchungen sind erforderlich, um die konkreten lokalen Auswirkungen zu identifizieren und geeignete Vorgehensweisen zu entwickeln, sie zu vermeiden und zu minimieren. Dafür sind Beobachtungen, die über eine saisonale Erhebung hinausgehen, und mehrjährige Datenreihen erforderlich.
- Vorhandene Daten und Studien, die bereits klare Trends erkennen lassen, müssen als Grundlage für wissenschaftlich gestützte Schutzmaßnahmen genutzt werden, um negative Auswirkungen auf die arktischen Ökosysteme zu vermeiden.
- Die Definition von Forschungsfragen und Methoden sowie Erarbeitung, Management und Verbreitung von Wissen und Ergebnissen zu den Auswirkungen menschlicher Aktivitäten auf die arktischen Ökosysteme müssen mit Zustimmung beziehungsweise in Zusammenarbeit mit indigenen und lokalen Gemeinschaften erfolgen.





Hochauflösende Simulation des arktischen Meereises mithilfe eines globalen Meereis-Ozeanmodells mit einer Gitterauflösung von einem Kilometer in der Arktis

FESOM2 – The Finite-volume Sea Ice–Ocean Model – AWI  
Visualization – DLR

## 3 Querschnittsthemen

### 3.1 MODELLENTWICKLUNG

#### Leitfragen:

- Wie können Wetter-, Klima- und Erdsystemmodelle in ihrer Darstellung zentraler Prozesse in den Polarregionen entscheidend verbessert werden?
- Wie können Modelle und Beobachtungen in den Polarregionen optimal mithilfe von Datenassimilations- und Inversverfahren kombiniert werden?
- Wie können wir die Qualität von Modellen in den Polarregionen objektiv messen (Metriken) und den Ursprung von Modellfehlern effizient diagnostizieren?
- Wie können wir die Modelle und dazugehörigen Workflows für eine neue Generation von Computern der höchsten Leistungsklasse (Exaskala) mit stark heterogenen Rechnerarchitekturen zukunftsfähig machen?
- Wie können wir die Datenanalyse-Kapazitäten so weiterentwickeln, dass auch große und komplexe Datensätze zukünftig effizient analysiert und visualisiert werden können?

#### Gesellschaftliche Relevanz

Numerische Modelle und Datenassimilation bilden heutzutage die Grundlage für operationelle Wetter- und Klimavorhersagen (von Stunden und Tagen über Monate bis hin zu Jahren). Diese Vorhersagen werden täglich von zahlreichen Nutzern und Nutzerinnen (zum Beispiel Wirtschaft, Behörden und Öffentlichkeit) verwendet, um teils wichtige Entscheidungen zu treffen. Dazu gehört auch die Warnung vor Extremereignissen.

Numerische Modelle stellen darüber hinaus die Grundlage für Klimaprojektionen dar, mithilfe derer die Auswirkungen menschlicher Aktivitäten auf das Klima abgeschätzt werden. Modelle sind damit für Stakeholder und Stakeholderinnen (zum Beispiel Politik, Wirtschaft und die breite Öffentlichkeit) von zentraler Bedeutung, was die Entwicklung konkreter evidenzbasierter Anpassungs- und Mitigations-Strategien betrifft. Unsicherheiten in den Projektionen betreffen dabei die Verlässlichkeit von Aussagen zur Kohlenstoffspeicherungsfähigkeit der polaren Ozeane, der Lebensbedingungen für polare Ökosysteme, des globalen und regionalen Meeresspiegels, des Risikos von Klimaextremen und der Gefahr abrupter Klimaübergänge in den Polarregionen.

Die Datenassimilation erlaubt es Modellen, Beobachtungen und Satellitendaten optimal zu kombinieren. Somit lassen sich die Zustände des Klimasystems und dessen Änderungen effizient überwachen (Monitoring). Sogenannte Analysen und Reanalysen werden heutzutage weithin verwendet, um bisherige Klimaänderungen zu quantifizieren (zum Beispiel Versicherungsindustrie und Geschäftsmodelle im Bereich erneuerbarer Energien).

Schließlich lässt sich mithilfe von Modellen (numerische „Laboratorien“) ein vertieftes Verständnis der Funktionsweise des Klima- und Erdsystems und dessen Änderungen von erdgeschichtlichen Zeitskalen (zum Beispiel Eiszeiten) hin zu zukünftigen Entwicklungen gewinnen. Gerade hochauflösende Modelle der nächsten Generation (Digitale Zwillinge) verfügen über das Potenzial, verschiedene Klimazustände zu veranschaulichen und damit auch für den Laien greifbarer zu machen. Modelle tragen somit auch dazu bei, dass die Menschheit die Welt mit ihren Veränderungen besser begreift.

## Stand der Forschung und Entwicklung

Die Modellierung hat in den vergangenen Jahrzehnten erhebliche Fortschritte realisiert, die auf höhere Auflösungen, bessere Darstellungen kleinskaliger Prozesse und das Einbinden neuer Erdsystemkomponenten zurückzuführen sind. Auch die Entwicklung von Datenassimilationsverfahren hat sich beträchtlich weiterentwickelt. Es ist heutzutage mit Modellen möglich, durchaus vertrauenswürdige Vorhersagen durchzuführen. Klimamodelle sind zudem in der Lage, wichtige Aspekte des Klimawandels in den Polarregionen zu simulieren. Prominente Beispiele sind die arktische Verstärkung, die ozeanische Tiefenwasserbildung und der schnelle Rückgang des arktischen Meereises.

Trotz des Fortschritts in der Modellierung bestehen noch wesentliche Herausforderungen – insbesondere in den Polarregionen. Im kurzfristigeren Bereich der Wettervorhersagen wird bislang meistens noch mit Atmosphärenmodellen gearbeitet (bei vorgeschriebenem Meereis und Ozean), obwohl das Klimasystem in den Polarregionen bekanntermaßen auch auf kurzen Zeitskalen stark gekoppelt ist und viele Nutzer und Nutzerinnen von Vorhersagen auch Informationen zur Entwicklung von Größen wie Meereis benötigen. Zudem offenbaren Klimamodelle in den Polarregionen teilweise noch erhebliche systematische Fehler, darunter auch Modelle, die zu den Sachstandsberichten des IPCC beitragen. Die Fehler können regional so groß oder sogar größer sein als die Änderungen, die die Modelle simulieren sollen. In nicht-linearen Systemen, wie dem Klima- und Erdsystem, ist das problematisch und

reduziert das Vertrauen, das wir in projizierte Änderungen haben können. Der Ursprung dieser Fehler ist bisher nur wenig verstanden.

In Modellen, die für aktuelle Zukunftsprojektionen und die Vergangenheit verwendet werden (CMIP/PMIP), fehlen bisher einige für die Polarregionen wesentliche Prozesse nahezu gänzlich (zum Beispiel realistische Wechselwirkungen zwischen dem Ozean und den Eisschelfen). Dazu gehören auch solche Prozesse, die sogenannte Kippunkte im System bedingen können (zum Beispiel Permafrost).

Die zentrale Methode der Datenassimilation wird heutzutage hauptsächlich für bestimmte Modellkomponenten angewendet (zum Beispiel Atmosphäre und Meereis). Die Entwicklung gekoppelter Datenassimilationsverfahren, insbesondere unter Berücksichtigung der Kryosphäre, befindet sich noch in der Anfangsphase. Das gilt ebenfalls für die Entwicklung nicht-linearer Formulierungen, die im Bereich der hochauflösenden gekoppelten Modellierung von zentraler Bedeutung sind (zum Beispiel Aufbrechen von Meereis).

Noch bis vor Kurzem hat die Modellierung von der rasanten Entwicklung von Computer-Prozessoren profitiert. Modellfortschritte waren damit leicht erreichbar, ohne wesentliche Änderungen an Modellcodes vornehmen zu müssen. Mit dem Ende des Mooreschen Gesetzes und der Dennard-Skalierung (das heißt keine Verdopplung mehr der Prozessorleistung alle 18 Monate bei gleichbleibendem Energieverbrauch) ändert sich das grundlegend. Höchstleistungsrechner werden zunehmend parallel und die Architekturen heterogen (zum Beispiel CPUs mit GPU-Boostern). Die meisten Wetter- und Klimamodelle sowie Datenassimilationsverfahren sind bisher nicht darauf ausgelegt, die Rechnersysteme der nächsten Generation effizient zu nutzen.

Mit zunehmender Auflösung und Komplexität der Modelle wird es zudem immer schwieriger, die Daten zu analysieren und Produkte/Services zu generieren. Existierende Workflows sind bisher noch nicht an diese Entwicklungen angepasst worden.

## Forschungs- und Entwicklungsbedarf Komponenten-Modelle

Die Weiterentwicklung von Komponenten (zum Beispiel Atmosphäre, Landeis und ozeanische Biogeochemie, Permafrost), die die Module für gekoppelte Klima- und Erdsystemmodelle darstellen, sollte einen Schwerpunkt zukünftiger Forschungsaktivitäten bilden. Dies beinhaltet beispielsweise die Verbesserung deterministischer und

stochastischer Parametrisierungen, mithilfe derer nicht explizit aufgelöste Prozesse möglichst realistisch abgebildet werden. Der Nutzung der während der MOSAiC-Expedition gewonnenen Beobachtungsdaten wird dabei eine bedeutende Rolle zukommen. Überdies gilt es, die Numerik und die dynamischen Kerne der Modelle weiterzuentwickeln. Verbesserungen der Gitterflexibilität, numerischen Genauigkeit und Effizienz sind in diesem Zusammenhang wichtige Zielsetzungen. Zudem sollten Nutzungsmöglichkeiten maschinellen Lernens für verschiedene Komponenten geprüft und versucht werden, Teile oder gegebenenfalls auch ganze Komponenten durch schnelle Algorithmen zu ersetzen.

Neben der Weiterentwicklung von polaren Aspekten der Atmosphäre- und Ozeanmodelle sollte insbesondere die Weiterentwicklung von Modellen für die Kryosphäre stehen. Für das Meereis sollte die Grenze der klassischen „Hibler-Modelle“ ausgelotet und alternative Formulierungen für die Meereisdynamik entwickelt werden (zum Beispiel explizite Simulation von Schollen). Die Meereisthermodynamik ist ebenfalls zu verbessern (zum Beispiel komplexe Schneeprozesse). Ein weiterer Schwerpunkt sollte auf Modellen der Eisschilde und Schelfeise liegen (Unterkapitel 2.2). Hier werden insbesondere neue Formulierungen für die Oberflächenmassebilanz sowie Wechselwirkungen von Ozean, Schelfeis und Lithosphäre benötigt. Ferner rücken zunehmend die Simulation der Hydrologie der Eisschilde, eine realistische Repräsentation der Dynamik der Eisaufsetzlinie (*grounding line migration*) sowie das Kalben in den Vordergrund (Unterkapitel 2.2). Es gilt darüber hinaus, eine neue Generation von Eisbergmodellen zu entwickeln und schließlich zuverlässige Modelle zur Abschätzung der Auswirkungen des Auftauens von Permafrost auf geomorphologische und hydrologische Prozesse, die Emission von Treibhausgasen und die Resilienz der Ökosysteme zu erstellen. Dazu müssen Eiskeile, Kohlenstofftransport und -stabilisierungsprozesse, Boden-Pflanze-Mikroorganismen-Interaktionen sowie biogeochemische Kopplungen stärker berücksichtigt werden (Unterkapitel 2.4).

Die Vorhersage der zukünftigen Verbreitung polarer Klimazonen, der Kohlenstoffspeicherfähigkeit der polaren Ozeane (Unterkapitel 2.3), des Risikos von Klimaextremen (Unterkapitel 2.1) und der Gefahr rascher Klimaübergänge ist von hoher gesellschaftlicher Relevanz. Die Vergangenheit liefert Belege für abrupte Klimaänderungen in den Polarregionen und eine Änderung der Häufigkeit von Klimaextremen. Diese Änderungen sind Teil der Dynamik in Polarregionen, unter anderem ausgelöst durch Veränderungen der Menge des im Ozean gespeicherten Kohlenstoffs. Erdsystemmodelle, die sowohl auf vergangene Klimazustände

als auch auf zukünftige Szenarien angewandt werden, verbessern unsere Fähigkeit, Regimeverschiebungen in polaren Breiten zu beschreiben. Diese sind notwendig, um Klimaextreme, -übergänge und Veränderungen von Ökosystemen potenziell vorherzusagen. Bislang bilden grob aufgelöste Ozean- und Klimamodelle die wichtigen Prozesse in Arktis und Antarktis nur mangelhaft ab. Viele dieser Prozesse sind entweder nicht berücksichtigt oder hochgradig parametrisiert. Mithilfe vollständigerer Physik und Biogeochemie können wir die Rückkopplungen, die zu abrupten Umweltveränderungen sowie Wetter- und Klimaextremen führen, diagnostizieren und die Prognosefähigkeit der Modellsysteme auf allen Zeitskalen insgesamt erhöhen. Nur mit einer verbesserten und detaillierteren Beschreibung biologischer Prozesse in Erdsystemmodellen wird es möglich sein, die Effekte des sich ändernden Klimas und Ozeans auf Ökosysteme verlässlich zu beschreiben. Eine Weiterentwicklung von Artenverbreitungsmodellen unter Einbeziehung ökologischer und genetischer Dynamik sowie zukünftiger Umweltentwicklungen kann überdies eine verbesserte Grundlage für die Ausweisung von Schutzgebieten und für organismische Klimaforschung liefern.

### ***Hochauflösende Klimamodelle***

Eine wichtige Aufgabe wird in der Entwicklung von Klimamodell-Konfigurationen mit hoher Auflösung in den Polarregionen (bis zu einem Kilometer in einigen Schlüsselregionen) liegen, um einige zentrale Prozesse (zum Beispiel Ozeanwirbel, Meereis-Leads) explizit mithilfe der physikalischen Grundgesetze anstelle von Parametrisierungen zu simulieren. Diese Modellkonfigurationen sollten nahtlos aus der Vergangenheit für Vorhersagen sowie ambitionierte Klimaprojektionen unter Verwendung spezieller CMIP-Protokolle verwendet werden.

Diese Modelle stellen auch die Grundlage für eine Generation sogenannter Digitaler Zwillinge für die Polarregionen dar. Dies sind Informationssysteme, die Nutzern Zugriff auf digitale Replikate des Zustands und der Entwicklung des Klima- und Erdsystems erlauben, die konsistent mit Beobachtungen und den physikalischen Grundgesetzen sind. Insbesondere besteht die Ambition darin, Replikate zu entwickeln, die ununterscheidbar von Beobachtungs- und Satellitendaten werden. Der Erfolg dieser Entwicklung hängt auch von der effizienten Nutzung der Möglichkeiten ab, die die Digitalisierung und modernen Computerwissenschaften bieten, insbesondere auch im Hinblick auf die nächste Generation von Höchstleistungsrechnern im ExaFLOPS-Bereich.

### ***Erdsystemmodelle***

Bei der Weiterentwicklung von Erdsystemmodellen wird es ganz entscheidend darum gehen, zentrale Prozesse,

Rückkopplungen und Kippelemente des Erdsystems in den Polarregionen in den Modellen zu verbessern beziehungsweise erstmals zu integrieren. Dazu gehören Kippelemente in den Eisschilden, Wechselwirkungen zwischen Schelfeis und dem Ozean, Wechselwirkungen des Landeises mit der festen Erde, die Berücksichtigung von Eisbergen sowie auch ganz entscheidend der Permafrost, aber auch die Einbindung der biologischen Kohlenstoffpumpe sowie Simulationen der biologischen Produktivität.

Für die Erdsystemmodellierung ist es wichtig, zwei Kernkonfigurationen zu entwickeln. Die erste, hochauflösende Konfiguration sollte zentrale Prozesse in den Polarregionen bestmöglich abbilden können (zum Beispiel Ozeanwirbel, Eisschelf-Kavernen, Dynamik der Eisaufsatzlinie, Kalben). Diese Konfiguration sollte aber gleichzeitig hinreichend schnell sein, sodass mit ihr auch Klimaprojektionen in Unterstützung zukünftiger IPCC-Reports durchgeführt werden können. Die erfordert gleichsam, Möglichkeiten der Beschleunigung einzelner Komponenten zu eruieren (zum Beispiel durch Nutzung von Verfahren maschinellen Lernens, das gleichzeitig die physikalischen Gesetze berücksichtigt). Die zweite Konfiguration ähnelt der ersten, wird aber eine reduzierte Auflösung verwenden, um beispielsweise paläoklimatologische Fragestellungen und Fragen zur langzeitlichen Entwicklung der Polargebiete zu beantworten.

### **Datenassimilation**

Datenassimilation ist ein wichtiger Bestandteil der Modellierung, der es erlaubt, Modelle, Beobachtungen und Satellitendaten optimal zu kombinieren. Die Entwicklung von Datenassimilations-Verfahren für gekoppelte Modelle ist ein wichtiges Zukunftsthema. Insbesondere die Einbindung der Kryosphäre spielt dabei für die Polarregionen eine zentrale Rolle. Neben der Kopplung ist zunehmend die Berücksichtigung von Nichtlinearitäten in der Assimilation, insbesondere in der hochauflösenden (zum Beispiel Ozeanwirbel und *Leads*) und gekoppelten Modellierung von wesentlicher Bedeutung. Bei der Entwicklung neuer Assimilationsverfahren sollte unter anderem auch die Anwendung von Methoden des maschinellen Lernens in Betracht gezogen werden.

### **Modellevaluierung und -diagnose**

Es ist zudem wichtig, Kapazitäten zur Evaluierung von Klima- und Erdsystemmodellen weiterzuentwickeln. Diese Metriken helfen dabei, die Güte existierender Modelle zu bestimmen und den Einfluss zukünftiger Modellentwicklungen zu quantifizieren. Dabei ist es bedeutsam, die Modelle auch auf der Prozessebene zu evaluieren (zum Beispiel mithilfe von MOSAiC-Beobachtungen). Zudem müssen die Modelle mit Paläodaten konfrontiert

werden, um abzuschätzen, wie gut sie in den Polarregionen für andere Klimazustände funktionieren. In diesem Zusammenhang ist es wegweisend, nicht nur den mittleren Zustand zu betrachten, sondern auch Klimavariabilität und Extremereignisse zu evaluieren. Im Bereich des Paläoklimas könnten neuartige Ansätze zur Datenassimilation die räumlich-zeitlichen Strukturen abrupten Klimawechsel insbesondere in hohen Breiten herausarbeiten.

Die Modelldiagnose hilft dabei, den Ursprung von Modellfehlern zu bestimmen und somit eine Grundlage für die weitere Modellentwicklung zu schaffen. Hier sind Datenassimilationsverfahren besonders vielversprechend, da sie es erlauben, fehlerhaft simulierte Prozesse zu identifizieren, bevor diese mit anderen Prozessen wechselwirken können. Die Analyse von Datenassimilations-Inkrementen erlaubt es zudem, fehlerhafte Prozesse räumlich zu lokalisieren. Neben komplexeren Ensemble-, Variations- und Inversverfahren bieten sich hier auch effiziente Methoden wie das *Nudging* an.

### **Zukunftsfähige Modellierungsinfrastrukturen: Software und Hardware**

Komplexe Modelle und Datenassimilationssysteme sind integrale Bestandteile der Forschungsinfrastruktur. Die neue Generation zunehmend paralleler Höchstleistungsrechner mit inhomogener Architektur wird es erfordern, die Modelle derart umzuschreiben, dass sie diese neuen Systeme effizient nutzen können. Dazu gehört auch die Implementierung moderner Softwarekonzepte wie Skalierbarkeit, Performance, Portabilität, *separation of concerns* und *computational dwarfs*.

Die Notwendigkeit der Software-Anpassung bezieht sich auch auf andere Aspekte der Modellierung, wie allgemeine Workflows (zum Beispiel eSM-Tools) und die Datenanalyse. Auch diese gilt es, auf modernen Höchstleistungsrechnern lauffähig zu machen. In diesem Zusammenhang wird es wichtig sein, eine effiziente Parallelisierung der Software sicherzustellen.

Ambitionierte Modellsimulationen generieren zunehmend große Datenmengen, die schnell im zweistelligen PByte-Bereich liegen können. Wesentlich ist, dass diese Daten in passenden Archiven effizient zugänglich gemacht werden. Es gilt zudem, Verfahren zu entwickeln, mithilfe derer schon während der Laufzeit wichtige abgeleitete Größen berechnet werden können. Weitere vielversprechende Verfahren sind virtuelle Feldkampagnen (Ausgabe von Modelldaten entlang von Expeditionspositionen) und neue Formate für die gleichzeitige Archivierung höchstauflösender Modell- und Beobachtungsdaten (YOPPSiteMIP).

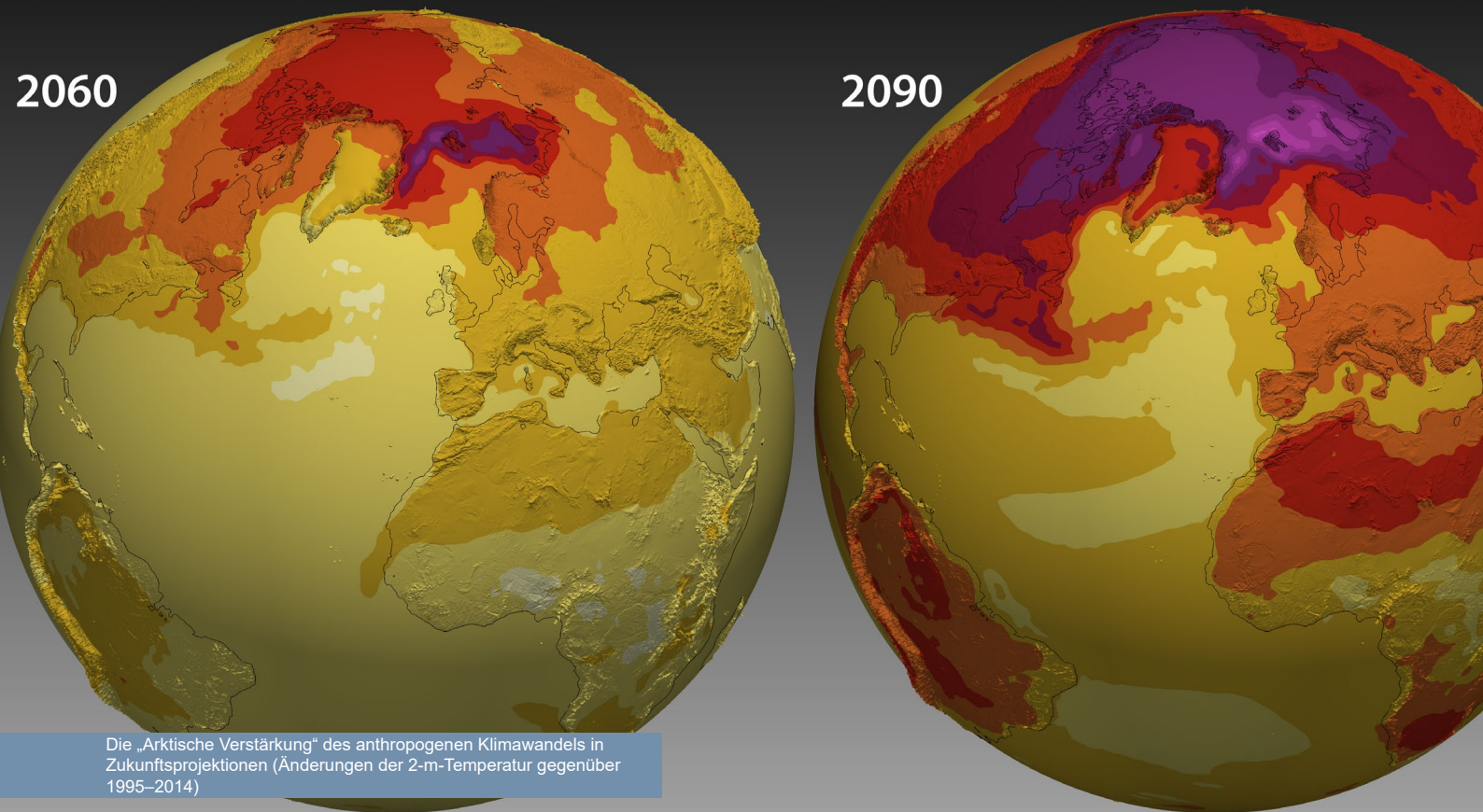
Höchstleistungsrechner und Datenspeicher sollten für Hochschulen und Forschungsinstitute zugänglich bleiben.

## **Daraus leitet sich folgender Forschungs- und Entwicklungsbedarf ab:**

- Weiterentwicklung der Darstellung von Erdsystemprozessen in den Polarregionen für Wetter-, Klima- und Erdsystemmodelle und deren Evaluierung mithilfe von Beobachtungen und Klimarekonstruktionen.
- Entwicklung von Erdsystemmodellen, die kritische Rückkopplungen und Kippunkte in hohen Breiten darstellen können. Dazu gehören Eisschilde und deren Wechselwirkung mit der Lithosphäre, Eisberge, Schelfeis-Ozean-Wechselwirkungen und Permafrost.
- Entwicklung von Modellen mit hoher räumlicher Auflösung (bis zur Kilometer-Skala) in den Polarregionen (Digitaler Zwilling), mithilfe derer zentrale Prozesse (zum Beispiel Ozeanwirbel und Land- und Meereisdeformation) durch physikalische Gesetzmäßigkeiten anstelle von Parametrisierungen simuliert werden können. Dazu gehört auch die bessere Darstellung der Bathymetrie und Topografie (zum Beispiel der Meeresspassagen und Schelfeis-Kavernen in Ozeanmodellen).
- Entwicklung von Erdsystemmodellen mit einer realistischen Darstellung biogeochemischer Prozesse sowie mariner und terrestrischer Ökosysteme. Berücksichtigt werden sollten auch neue Ansätze, die den Rechenaufwand stark minimieren und somit eine Einbindung in höchstauflösende Simulationen erlauben.
- Entwicklung von Datenassimilations- und Inversverfahren für Komponentenmodelle (zum Beispiel Atmosphäre, Landeis, Biogeochemie, Permafrost) sowie voll gekoppelte Klima- und Erdsystemmodelle.
- Entwicklung diagnostischer Kapazitäten, die es erlauben, den Ursprung von Modellfehlern auf Prozessebene zu bestimmen und auf diese Weise Modellentwicklungen zu priorisieren. Dazu gehören auch die Entwicklung geeigneter Metriken zur Quantifizierung der Modellgüte in den Polarregionen sowie die Nutzung von Datenassimilationskapazitäten.
- Entwicklung skalierbarer hochauflösender Modellsysteme und dazugehöriger Workflows (zum Beispiel eSM-Tools, Datenanalyse, virtuelle Feldkampagnen), die effektiv auf Höchstleistungsrechnern der nächsten Generation mit heterogenen Rechnerarchitekturen genutzt werden können. Der Schwerpunkt sollte dabei auf der Beseitigung existierender Engpässe liegen (zum Beispiel Skalierbarkeit, Performance Portabilität, Nutzung von Grafikprozessoren und weiteren Methoden des wissenschaftlichen Rechnens).







## 3.2 ZUKUNFTSPROJEKTIONEN UND VORHERSAGEN

### Leitfragen:

- Wie können wir Entscheidungsträgern und Entscheidungsträgerinnen sowie der Gesellschaft die bestmöglichen Zukunftsprojektionen bis zum Jahr 2100 und darüber hinaus unter Berücksichtigung zentraler Prozesse, Rückkopplungen und Kippunkte in den Polarregionen liefern?
- Wie können wir sicherstellen, dass Prozesse in den Polarregionen nicht zu „Klimaüberraschungen“ beitragen, die tatsächliche Entwicklung des zukünftigen Klimas also außerhalb dessen liegt, was nach heutigem Wissen erwartet wird?
- Wie vorhersagbar ist das Klimasystem in den Polarregionen auf Zeitskalen von Tagen bis hin zu Jahren und wie zuverlässig sind Vorhersagen heute?
- Wie können wir die Vorhersagekapazitäten auf Grundlage der Bedarfe von Nutzerinnen und Nutzern am effektivsten verbessern?
- Wie können wir Zukunftsprojektionen und Vorhersagen sowie deren Unsicherheiten am besten kommunizieren?

### Gesellschaftliche Relevanz

Der Klimawandel in den Polarregionen bewirkt eine umfassende Transformation. Prominente Beispiele dafür sind der rapide Rückgang des Meereises in der Arktis, die starke Erosion der arktischen Küsten, das Tauen von Permafrost und das Schmelzen der Eisschilde in der Arktis und Antarktis. Diese Änderungen führen zu erheblichen Herausforderungen für die Menschheit – in den Polarregionen und weltweit (zum Beispiel Meeresspiegelanstieg und Extremereignisse). Der Verfügbarkeit zuverlässiger Zukunftsprojektionen – unter Berücksichtigung kritischer Prozesse, Rückkopplungen und Kippunkte in den Polarregionen – kommt somit eine zentrale Rolle zu, um faktenbasierte Entscheidungen im Bereich der Anpassung und Mitigation zu treffen.

Der Klimawandel in den Polarregionen führt voraussichtlich zu einer stark zunehmenden wirtschaftlichen Nutzung (zum Beispiel Schiffsverkehr und Tourismus). Um die damit einhergehenden Risiken zu minimieren, sind zuverlässige Vorhersagen von Wetter, Klima und Umweltbedingungen unerlässlich. Zudem hat sich gezeigt, dass Verbesserungen der Vorhersagegüte in den Polarregionen durch Fernwirkungen auch die Qualität und damit den Nutzen von Vorhersagen in mittleren Breiten potenziell

verbessern, insbesondere für Wettersituationen mit starken Wechselwirkungen zwischen den Polarregionen und mittleren Breiten (mäandrierender Jetstream).

## Stand der Forschung und Entwicklung

Trotz erheblicher Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in den vergangenen Jahren sind aktuelle Zukunftsprojektionen (CMIP6) für die Polarregionen im Vergleich zu anderen Regionen der Welt noch mit relativ großen Unsicherheiten behaftet. Verbesserungen während der letzten Jahre sind bestenfalls als inkrementell zu beschreiben. So simulieren beispielsweise auch die aktuellsten Klimamodelle einen Rückgang der antarktischen Meereisausdehnung für den Zeitraum 1979 bis heute. Dieser Rückgang steht im Widerspruch zu einer bislang stabilen Meereisausdehnung, wie sie mithilfe von Satellitendaten beobachtet wird. Dieses „antarktische Meereis-Paradoxon“ führt dazu, dass das Vertrauen in Zukunftsprojektionen für das Meereis (SROCC) – aber auch für andere Aspekte des antarktischen Klimasystems – aktuell sehr limitiert ist. Ein weiteres prominentes Beispiel ist die durch den vermehrten arktischen Frischwassereintrag projizierte Abnahme der meridionalen Umwälzbewegung im Nordatlantik: Obwohl ein deutlich verstärkter Eintrag von Frischwasser in den letzten zehn bis zwanzig Jahren beobachtet wurde, zeigen die ozeanischen Beobachtungssysteme bisher keine Abschwächung der Umwälzbewegung.

Mit dem Rückgang des arktischen Meereises ist auch das Interesse an zuverlässigen Wetter-, Klima- und Umweltvorhersagen beträchtlich gestiegen, insbesondere seit dem Meereisminimum im Sommer 2007. Dieser Aspekt spiegelt sich auch in großen internationalen Programmen wider, die in der vergangenen Dekade initiiert wurden (zum Beispiel das *Polar Prediction Project* und das *Year of Polar Prediction* der Weltorganisation für Meteorologie). Trotz einiger Fortschritte beim Verständnis der Vorhersagbarkeit in Polarregionen bestehen aber noch wesentliche Wissenslücken fort. Diese Lücken betreffen alle Komponenten der Vorhersagesysteme. Dazu gehören gekoppelte Modelle, die Datenassimilation, das Beobachtungssystem und dessen Optimierung sowie die Entwicklung von Ensemble-Verfahren zur Prognose der Unsicherheit von Vorhersagen.

## Forschungs- und Entwicklungsbedarf Zukunftsprojektionen

In der Polarforschung lassen sich die Unsicherheiten von Projektionen sehr effektiv quantifizieren und entsprechend verringern, wenn verschiedene Forschungsmethoden kombiniert werden. Dies gilt gleichermaßen

für Unsicherheiten durch Modellformulierungen, interne Variabilität und Szenarien. So können wir zum Beispiel mit hoher Sicherheit sagen, dass der Arktische Ozean in jedem realistischen Klimaszenario vor 2050 im Sommer zum ersten Mal nahezu eisfrei sein wird, weil sich dieses Ergebnis sowohl aus komplexen CMIP6-Modellen als auch aus konzeptionellen Studien mittels Extrapolation der vorhandenen Beobachtungsdaten ergibt. Andererseits sind zum Beispiel Projektionen zur marinen Eisschildinstabilität in der Antarktis mit großen Unsicherheiten behaftet, weil sich je nach verwendetem Modellierungsansatz mitunter deutliche Unterschiede in den zugrunde liegenden Schwellenwerten ergeben. Vielversprechend wären beispielsweise Studien zur zukünftigen Entwicklung der Ozeanzirkulation in Polargebieten, die Erkenntnisse aus neuen, hochaufgelösten Klimamodellen mit Paläostudien und beobachtungsbasierten Prozessstudien kombinieren, um die Robustheit der Simulationen abzuschätzen. *Emergent constraints*, also Zusammenhänge zwischen einer heute beobachtbaren Größe und der zukünftigen Entwicklung einer zweiten Größe, lassen sich aus großen Modell-Ensembles gewinnen und anschließend mit Beobachtungsdaten zur Verbesserung von Prognosen, zum Beispiel hinsichtlich der Schneeverteilung in den Polargebieten, kombinieren. Gemein ist all diesen Beispielen, dass durch die vergleichende Kombination unterschiedlicher Methoden die Robustheit der jeweils erzielten Ergebnisse unmittelbar abgeschätzt werden kann. Aufbauend auf dieser Information lassen sich anschließend die identifizierten Lücken in unserem grundlegenden Verständnis gezielt adressieren und idealerweise schließen.

Aktuelle Beobachtungen und Paläo-Rekonstruktionen zeigen, dass die Polargebiete besonders sensitiv auf Klimaänderungen reagieren. Durch die Vielzahl selbstverstärkender Mechanismen kann es zu teils abrupten und irreversiblen Veränderungen oder „Klimaüberraschungen“ in Eis, Ozean, Atmosphäre, Kohlenstoffkreislauf und Ökosystemen kommen. Die Eisschilde auf Grönland und in der Antarktis sowie der Permafrost in der Arktis sind prominente Kippelemente im Klimasystem. Die zugrunde liegenden Prozesse besser verstehen und dadurch potenzielle Schwellenwerte und Kippunkte besser quantifizieren zu können, würde einen Meilenstein für zukünftige Projektionen bedeuten. Dabei ist es von wesentlicher Bedeutung, auch die langfristigen Veränderungen und sogenannten Commitments zu erforschen, denn durch die besonders langen Antwortzeiten in Eis und Ozean können sich heutige Treibhausgasemissionen und die daraus resultierende globale Erwärmung noch über Jahrhunderte oder sogar Jahrtausende hinweg beispielsweise auf die Eis- und Ozeandynamik und den Meeresspiegelanstieg auswirken.

Um den Einfluss des Klimawandels auf die Polarregionen besser quantifizieren und greifbarer machen zu können, bieten sogenannte Storyline-Szenarien völlig neue Perspektiven. Mithilfe dieser Methode lässt sich beispielsweise die Frage beantworten, wie sich aktuelle Extremereignisse (zum Beispiel die Meereis-Polynja nördlich von Grönland im April 2018 oder das Oberflächenschmelzen des Grönländischen Eisschildes Anfang Juni 2019) in 2 °C und 4 °C wärmeren Klimaten entwickeln würden und wie diese Ereignisse in vorindustriellen Zeiten ausgesehen hätten. Storyline-Szenarien lassen sich beispielsweise implementieren, indem in Klimamodellen die beobachtete Entwicklung des Jetstreams mithilfe von spektralen Nudging-Verfahren aufgeprägt wird, wobei alle anderen Größen vom Modell frei berechnet werden. Erste vielversprechende Anwendungen für Extremereignisse in Europa verdeutlichen, dass sich mithilfe der Storyline-Methode der Einfluss auf Extremereignisse sehr anschaulich darstellen lässt. Zudem können mit dieser Methode Änderungen von Extremereignissen auf der Prozessebene deutlich besser verstanden werden (zum Beispiel dynamisch gegenüber thermodynamisch bedingten Änderungen). Durch das Vorschreiben der Dynamik lässt sich zudem ein wesentlicher Unsicherheitsfaktor in Zukunftsszenarien ausklammern: mögliche Änderungen der atmosphärischen Zirkulation und damit der Statistik von Extremereignissen.

Neben der Storyline-Methode gibt es andere vielversprechende Ansätze, um den Klimawandel in den Polarregionen greifbarer zu machen und somit Entscheidungen zum Thema Anpassung und Mitigation zu unterstützen. Die Entwicklung einer neuen Generation hochauflösender Klimamodelle, die zunehmend ununterscheidbar von Beobachtungsdaten werden (sogenannte Digitale Zwillinge), erlauben beispielsweise die Erstellung virtueller Bilder der Welt von heute, aus der Vergangenheit und möglicher wärmerer Welten der Zukunft (zum Beispiel virtuelle Satellitenbilder). Ein anderes Beispiel sind Science-meets-Art-Projekte.

Insgesamt sollte die Kommunikation mit der Gesellschaft und Entscheidungsträgern sowie Entscheidungsträgerinnen zum Thema Klimawandel zunehmend dialogischer gestaltet werden. Dazu gehört beispielsweise eine gemeinsame Entwicklung von Szenarien (zum Beispiel *best estimate* gegenüber *upper range*). Bedeutsam wird es dabei ebenfalls sein, auf bestehenden Empfehlungen (zum Beispiel „Factory Wisskomm“ des BMBF) und Gremien (zum Beispiel IPCC, *Earth Commission*) aufzubauen.

## **Vorhersagen**

In den vergangenen Jahren sind wichtige Schritte zur Verbesserung der Vorhersagekapazitäten in den

Polarregionen getätigt worden. So stehen mittlerweile beispielsweise satellitenbasierte Beobachtungsprodukte der Meereis- und Schneedicke für die Initialisierung von Vorhersagen mittels Datenassimilation zur Verfügung. Zudem verwenden immer mehr operationelle Vorhersagezentren dynamische Meereismodelle in ihren Vorhersagesystemen – auf Zeitskalen von Tagen bis hin zu Jahren. Die Evaluierung der resultierenden Vorhersagen polarspezifischer Parameter (zum Beispiel Lage der Eiskante) steht jedoch noch am Anfang und oft nicht im Fokus operationeller Vorhersagezentren. Unser Wissen darüber, wie „gut“ aktuelle Vorhersagesysteme bereits sind, ist daher sehr limitiert. Es bestehen somit Bedarfe für die Entwicklung polarspezifischer Verifikationsmetriken und von Methoden zur Kalibrierung polarer Vorhersagen. Zudem bedarf es breit angelegter Studien zur Evaluierung existierender Systeme und zur Dokumentation zukünftiger Fortschritte.

Die Forschung zu den Grenzen der Vorhersagbarkeit und die Quantifizierung der „Lücke“ zwischen realisierter und theoretisch möglicher Vorhersagegüte sollten Hinweise auf die zur Verbesserung von Vorhersagen besonders vielversprechenden Komponenten von Vorhersagesystemen (zum Beispiel Datenassimilation und Modelle) liefern können. Somit ließen sich zukünftige Entwicklungsaktivitäten priorisieren. In diesem Zusammenhang gilt es auch zu verstehen, inwieweit die mit Modellen bestimmte Vorhersagbarkeit in den Polarregionen der tatsächlichen Vorhersagbarkeit entspricht oder ob es Grund zur Annahme von Abweichungen gibt (siehe das aktuell diskutierte „Vorhersage-Paradoxon“ der Nordatlantischen Oszillation).

Um den Wert von Vorhersagen zu steigern, ist ein enger Austausch mit (potenziellen) Nutzern und Nutzerinnen von Vorhersageprodukten von zentraler Bedeutung. Heutige Vorhersagen (zum Beispiel des Meereiszustands) werden bei der Entscheidungsfindung bisher kaum berücksichtigt, unter anderem wegen der großen Lücke zwischen tatsächlich verfügbaren (einige Kilometer) und benötigten Auflösungen (einige Hundert Meter) (siehe zum Beispiel <https://kepler-polar.eu/deliverables/>). Auch sind Vorhersageprodukte für zentrale Aspekte, wie Presseisverteilung und offene Wasserflächen im Meereis, zurzeit noch gar nicht verfügbar. Um Vorhersagen für nutzungsrelevante Parameter auf den gewünschten Skalen und von zunehmender Qualität zu liefern, sind erhebliche Anstrengungen notwendig, die die Modellentwicklung (zum Beispiel perspektivisch eine ganz andere Klasse von Meereismodellen, die einzelne Schollen simulieren), verbesserte Beobachtungsdaten (einschließlich direkter Nutzung von Beobachtungen niedrigerer Prozessierungslevel mithilfe geeigneter Beobachtungsoperatoren, zum Beispiel „Freibord“,

beziehungsweise die Helligkeitstemperatur auf Satellitenbahnen direkt anstelle abgeleiteter Eisdicke auf einem vollständigen Gitter), verbesserte beziehungsweise sogar ganz neue Datenassimilationsmethoden (gekoppelte Datenassimilation, Lagrangesche Datenassimilation), die Nutzung von Methoden zur Optimierung von Beobachtungssystemen, aber auch die Weiterentwicklung von Metriken zur Bestimmung der Vorhersagegüte betreffen.

## **Daraus leitet sich folgender Forschungs- und Entwicklungsbedarf ab:**

- Kombination verschiedener Forschungsmethoden, um die Robustheit von Klimaprojektionen in den Polarregionen zu quantifizieren und gezielt zu verbessern. Notwendig hierfür sind methodenoffene Ausschreibungen, die es Forscherinnen und Forschern erlauben, beispielsweise existierende Simulationen, Projektionen hochauflösender Klimamodelle, Erdsystemmodelle mit verbesserter Darstellung kritischer Interaktionen, Modellhierarchien, Emulatoren, KI-Methoden, *Emergent Constraints* und Paläowissen zu kombinieren. Ziel wäre dabei auch die Quantifizierung von Modell- und Szenarienunsicherheit sowie interner Variabilität.
- Verständnis möglicher „Klimaüberraschungen“, bei denen die zukünftige Entwicklung außerhalb der derzeitigen Projektionen liegen würde. Dazu gehört die Quantifizierung der entsprechenden Schwellenwerte oder Kippunkte in Eis, Ozean, Atmosphäre, Kohlenstoffkreislauf und Ökosystemen, sowie die Abschätzung langfristiger Veränderungen und sogenannter Commitments sowie von Worst-Case-Szenarien (zum Beispiel unter welchen Bedingungen es bis 2100 zu einem Meeresspiegelanstieg von 1,5 Metern kommen kann).
- Durchführung und Analyse sogenannter Storyline-Szenarien (zum Beispiel durch *Nudging* des Jetstreams) zur Quantifizierung des Einflusses des Klimawandels auf aktuelle Extremereignisse in den Polarregionen (Attribution) sowie zur Abschätzung möglicher Entwicklungen analoger Extremereignisse in einer 1,5 °C, 2 °C und 4 °C wärmeren Welt (Anpassung).
- Verbesserung der Kommunikation projizierter Klimaänderungen und deren Unsicherheiten unter Verwendung einer starken Visualisierungskomponente – „Bilder der Zukunft“ (zum Beispiel virtuelle Satellitenbilder, Digitale Zwillinge, Storyline-Szenarien) – sowie der Nutzung etablierter und neuer Kommunikationsformate (zum Beispiel #FactoryWisskomm).

- Bestimmung der Grenzen der Vorhersagbarkeit des Wetters, Klimas und der Umwelt in den Polarregionen und Evaluierung der Entwicklung tatsächlicher Vorhersagegüte unter Verwendung geeigneter (auch neu zu entwickelnder) polar-spezifischer Verifikationsmethoden.
- Verbesserung zentraler Komponenten von Vorhersagesystemen unter Berücksichtigung der Nutzungsbedarfe (dialogisch). Dazu gehören beispielsweise die Entwicklung gekoppelter Datenassimilationsverfahren, die Optimierung von Beobachtungssystemen sowie die Weiterentwicklung von Modellen (zum Beispiel Meereisdeformation inklusive Presseisrücken).

## 4 Forschungsumfeld

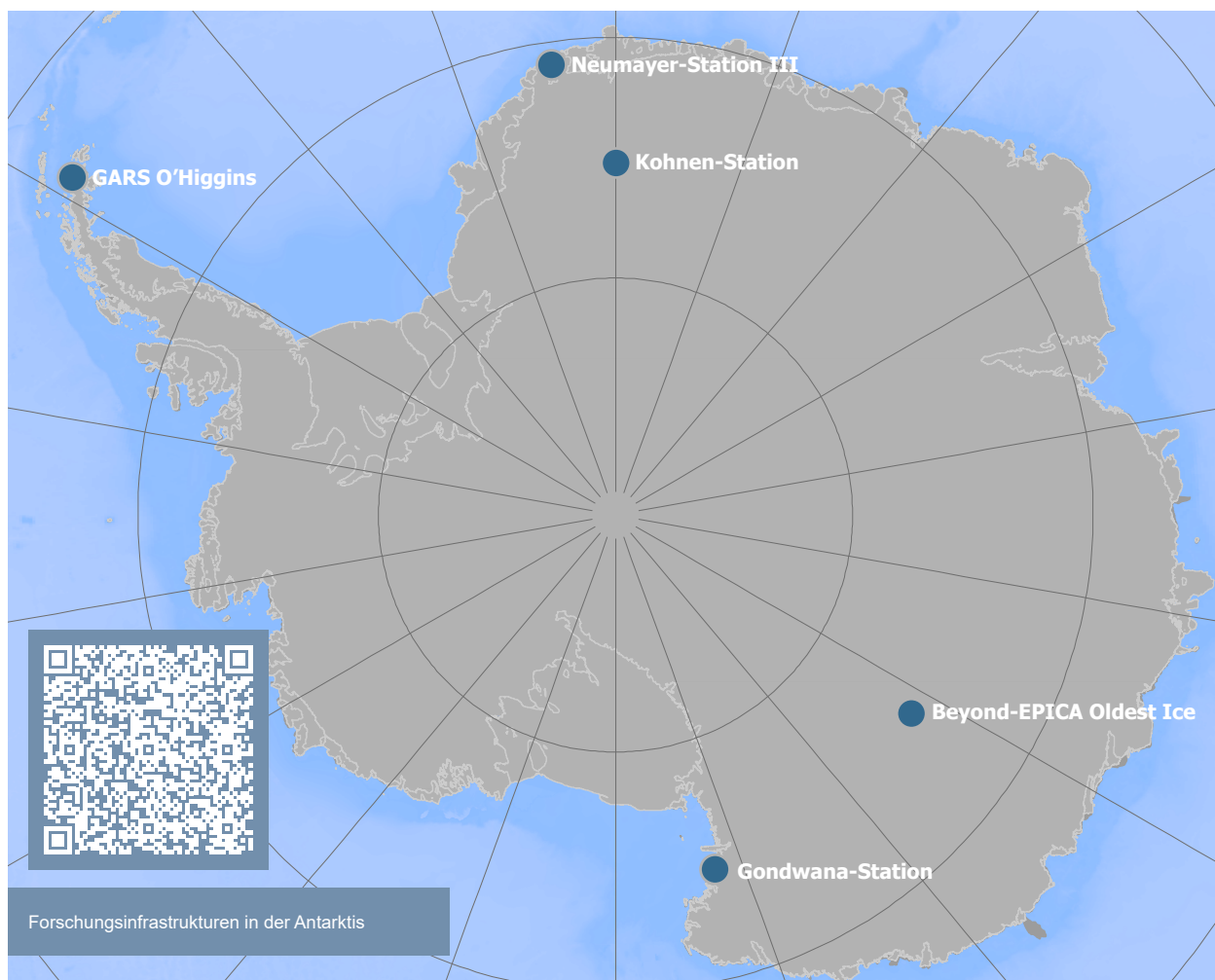
### 4.1 INFRASTRUKTUR

#### Herausforderungen für die Infrastrukturen

Die Forschungs- und Querschnittsthemen der Polarforschung erfordern in den kommenden Jahrzehnten erhebliche Mittel zum Betrieb der nationalen Infrastruktur. Nur durch die Bereitstellung dieser Investitionen kann die bestehende Forschungsinfrastruktur kontinuierlich erhalten und erneuert werden, um zukünftigen Herausforderungen gewachsen zu sein. Für den Zugang zu und für die Erforschung der marinen und der terrestrischen Regionen hoher Breiten im Norden und Süden sind leistungsfähige Instrumentarien und Werkzeuge, die den spezifischen Bedürfnissen und modernen Anforderungen entsprechen, unerlässlich. Dazu gehören eisbrechende Forschungsschiffe, ganzjährig betriebene Stationen als logistische Stützpunkte, Spezialflugzeuge und Fahrzeuge für polare Missionen an Land und in der Luft. Unverzichtbar sind in diesem Zusammenhang Satellitenmissionen mit deutscher Beteiligung, hoch

entwickelte Informations- und Kommunikationseinrichtungen sowie leistungsstarke Datennetze. Für die Modellierung bedarf es zusätzlich entsprechender Ressourcen im Bereich des Höchstleistungsrechnens sowie der Speicherung großvolumiger Daten. Die ständige Verfügbarkeit solcher Infrastruktureinrichtungen ist Voraussetzung für die Durchführung von notwendigerweise langfristig ausgelegten Programmen in den schwierig zugänglichen Polarregionen. Vor allem die Großforschungseinrichtungen haben solche Infrastrukturen aufgebaut und kontinuierlich an neue Anforderungen angepasst.

Eine Übersicht über die durch deutsche Institutionen oder unter deren Beteiligung betriebenen Infrastrukturen ist in den folgenden beiden Karten dargestellt. Das Scannen des QR-Codes verweist auf die jeweilige Homepage, wo weitere Informationen zur Verfügung stehen.





## Entwicklungsbedarf und Herausforderungen der Infrastrukturen

Die bestehenden Infrastrukturen müssen kontinuierlich weiterentwickelt werden, um weiterhin die drängenden Fragen insbesondere der Klima- und Umweltforschung beantworten zu können und sich den sich stetig verändernden Ansprüchen der Wissenschaft anzupassen. Nur so bleibt die führende Rolle der deutschen Polarforschung im internationalen Rahmen gewährleistet. In den folgenden Absätzen werden die Herausforderungen und der Entwicklungsbedarf der jeweiligen Infrastrukturen dargestellt.

### Schiffe

#### **FS Polarstern II**

Von essenzieller Bedeutung für die deutsche Polarforschung ist der Neubau eines Nachfolgeschiffs für den

nationalen Eisbrecher FS Polarstern. Zu den Bedingungen für vorausschauendes politisches Handeln mit Bezug zu Klimaschutz und -anpassung sowie Nachhaltigkeit gehören verlässliche Beobachtungen und daraus abgeleitetes, begründetes Wissen. Zur Erfüllung dieser forschungspolitischen Ziele des Bundes durch eigene Forschung und Ableitung entsprechender Handlungsoptionen beziehungsweise -empfehlungen wird ein modernes Polarforschungs- und Versorgungsschiff benötigt.

Darüber hinaus basieren die Planungen auf den Erfahrungen aus dem Betrieb insbesondere der letzten Jahre über geänderte Eisverhältnisse in den Polarregionen, auf neuen technischen Entwicklungen, der Möglichkeit eines umweltfreundlichen Betriebs wie auch der Berücksichtigung der Entwicklung neuer wissenschaftlicher Technologien. Insbesondere im Bereich der Unterwasser-Robotik und der

Umweltsensorik müssen umfangreiche Systeme bedacht werden. Auch der Bereich nicht invasiver und umwelt-schonender maritimer Technologien ist ein Zukunftsfeld und ein essenzieller Bestandteil der Anforderungen. Beide Felder maritimer Technik befinden sich in höchst dynamischer Entwicklung. Für den sicheren Einsatz von Bord sind abgestimmte schiffsfeste Vorrichtungen und Systeme erforderlich. Der umweltfreundliche und nachhaltige Betrieb der Polarstern II muss einem vorausschauenden Qualitätsstandard genügen, um für die nächsten dreißig Jahre einen entsprechenden Betrieb zu ermöglichen. Dabei sind technische Innovationen, vor allem im Bereich der Nutzung regenerativer Energien zur Senkung von CO<sub>2</sub>-Emissionen, von Ruß-, Müll-, Brauch- und Ballastwasser-Abgaben zu berücksichtigen, ebenso Innovationen in Bezug auf möglichst wenig invasive Forschungsmethoden, zum Beispiel mit robotischen Instrumenten.

Die Neuplanung soll auch die Voraussetzungen schaffen, mit den künftigen sich verändernden Wetter- und Eisbedingungen in Arktis und Antarktis umgehen zu können sowie für den Einsatz neuer wissenschaftlicher und künftiger forschungspolitischer Ziele befähigt zu sein.

### **FS Polarstern**

Das FS Polarstern hat eine gültige Klasse bis 2022 und ist bis 2027 verlässlich betriebsbereit zu halten. Bis zur Indienststellung eines Nachfolgebaus ist die Sicherstellung dieses verlässlichen Betriebs sowie einer fortgesetzten Erneuerung in die wissenschaftliche Messausrüstung von herausragender Bedeutung. Schwerpunkte sind Arbeiten in der zentralen Arktis sowie in der Antarktis im Weddellmeer und die regelmäßige Versorgung der Überwinterungsstation Neumayer-Station III.

### **Das Eisrandforschungsschiff FS Maria S. Merian**

Das FS Maria S. Merian ist ein leistungsfähiges, modernes Forschungsschiff mit dem Heimathafen Rostock/Warnemünde am Leibnitz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW), das mit seiner Eisklassifizierung (PC7/E3) seit Indienststellung im Jahr 2006 auch in arktischen Eisrandbereichen eingesetzt wird. Es gehört damit zu den drei europäischen Forschungsschiffen mit Eisklasse. Das 95 Meter lange Mehrzweck-Forschungsschiff bietet Platz für 22 Forscher und Forscherinnen sowie 24 Besatzungsmitglieder und ist mit zahlreichen Labor- und Arbeitsräumen sowie einer Kläranlage ausgestattet. Betrieben wird die Maria S. Merian (Heimathafen in Rostock-Warnemünde) gemeinsam von der DFG und dem BMBF.

### **S/Y Eugen Seibold**

Ziel des Projekts S/Y Eugen Seibold bis 2030 ist es, mit einer jährlich wiederkehrenden Aufnahme des offenen

Ozeans und überlagernder Atmosphäre von polaren bis in tropische Breiten eine detaillierte Beschreibung chemischer, physikalischer und biologischer Parameter zu leisten und deren Veränderlichkeit systematisch zu erfassen. Eigner des Schiffes ist das Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz. Bei der großen Anzahl der eingesetzten Expertensysteme sind deren Betrieb und Instandhaltung wie auch das Datenmanagement von einer kontinuierlichen Finanzierung abhängig, die gleichermaßen Personalkosten für die beteiligten Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen sowie Techniker und Technikerinnen einschließt.

### **Stationen**

#### **Neumayer-Station III/Kohnen-Station**

Seit Februar 2009 steht die Neumayer-Station III Wissenschaftlern und Wissenschaftlerinnen für ihre Projekte im Dronning Maud Land (DML), Antarktis, zur Verfügung und soll für mindestens dreizehn weitere Jahre als logistische Plattform nationalen und internationalen Nutzern und Nutzerinnen zur Verfügung stehen. Eine stetig steigende Nachfrage, die Neumayer-Station III als Basis für Feldkampagnen im DML zu nutzen, führen zu einer nahezu hundertprozentigen Auslastung in den Sommermonaten. Die Langzeitobservatorien liefern ganzjährig unverzichtbare und zum Teil einzigartige Informationen über meteorologische, luftchemische und geophysikalische Veränderungen in der Region. Schließlich gewinnen aufgrund der beobachteten klimatischen Veränderungen die Forschung an der nahegelegenen Kaiserpinguinkolonie und die Meereisforschung in der Atka-Bucht ebenfalls an Bedeutung.

Um diese und zukünftige Forschung optimal unterstützen zu können, müssen die Neumayer-Station III sowie die vor Ort vorhandenen Ressourcen (Fahrzeuge, Ausstattung) kontinuierlich modernisiert werden. Zusätzlich wird die schrittweise Umstellung auf einen Betrieb mit erneuerbaren Energien angestrebt. Für die Identifikation der idealen Kombination verschiedener Energiequellen finden derzeit Pilotstudien statt. Die Versorgung der Neumayer-Station III ist eine logistische Herausforderung. Da die Station nur in den Sommermonaten zugänglich ist, müssen während dieser Zeit sämtliche Versorgungsgüter auf verschiedenen Wegen zur Station transportiert werden. Der Forschungseisbrecher FS Polarstern spielt bei der Versorgung eine essenzielle Rolle, da die schwierigen Meereisbedingungen vor der Neumayer-Station III eine Nutzung anderer Schiffe erschweren und die Versorgung somit nur eingeschränkt möglich ist. Darüber hinaus sind für die Versorgung die internationalen Netzwerke innerhalb des DML hilfreich, um den Betrieb der Station unter allen Umständen sicherzustellen.



Seit 2001 dient die Kohnen-Station in den Sommermonaten nationalen und internationalen wissenschaftlichen Projekten als logistische Basis. Der Graben sowie das Bohrloch der Eiskern-Tiefbohrung im Rahmen des *European Project for Ice Coring in Antarctica* (EPICA) und der Umkreis der Station bieten geophysikalischen/glaziologischen, meteorologischen und luftchemischen Untersuchungen einzigartige, wenn auch – mit Temperaturen bis  $-50\text{ °C}$  im Winter – harsche Bedingungen. Um die regelmäßige, aufwendige Versorgung zu vereinfachen und den  $\text{CO}_2$ -Footprint zu verringern, wird nach Möglichkeiten gesucht, die zwanzig Jahre alte Station vermehrt mit erneuerbaren Energien zu betreiben.

### **Gondwana-Station**

Die Gondwana-Station der BGR liegt bei  $74^\circ 38' \text{ S}$  und  $164^\circ 13' \text{ O}$  am Gerlache Inlet der Terra-Nova-Bucht des Rossmeers in direkter Nachbarschaft zur Mario-Zucchelli-Station (Italien) und Jang-Bogo-Station (Südkorea). Sie ist per Schiff oder Flugzeug zu erreichen und dient der BGR als Hauptbasis für geowissenschaftliche Forschungsarbeiten im Rahmen des GANOVEX-Programms. Die Gondwana-Station wurde 1982/83 als Schutzhütte erbaut und 1988/89 zu einem Mehrcontainerbau erweitert. Das Hauptgebäude beinhaltet Werkstatt und Lager, Küche, Kantine, Vorratsraum, Funkstation, Aufenthalts- und Arbeitsräume sowie sanitäre Anlagen. In den Jahren 2015 bis 2017 wurden umfangreiche Renovierungs- und Modernisierungsarbeiten durchgeführt. Mit neuer Haustechnik, verbesserten sanitären Einrichtungen, Solarpanelen, neuer Seewasser-Aufbereitungsanlage und einer biologischen Abwasserreinigung ist die Gondwana-Station umwelttechnisch und energetisch auf dem neuesten Stand. Damit steht sie der Wissenschaft auch in Zukunft als Forschungs- und Logistikbasis zur Verfügung.

### **GARS O'Higgins**

Die *German Antarctic Receiving Station* (GARS) O'Higgins des DLR ist seit 1991 in direkter Nachbarschaft zu der chilenischen Antarktisstation General Bernardo O'Higgins ( $63^\circ 19' \text{ S}$ ,  $57^\circ 54' \text{ W}$ ) in Betrieb. Standen zu Beginn des Datenempfangs die europäischen Missionen ERS-1 und ERS-2 im Vordergrund, wird die Station seit dem Start der TanDEM-X-Mission im Jahr 2010 ganzjährig mit einem erweiterten Nutzungsportfolio betrieben. Das 9-Meter-Antennensystem dient nunmehr dem Empfang von Satellitendaten verschiedener deutscher und europäischer Satellitenmissionen und wird darüber hinaus auch zur Unterstützung im Bereich des *Telemetry, Tracking and Control* (TT&C) von Erdbeobachtungssatelliten eingesetzt. Nach wie vor liegt der Schwerpunkt der Datenerhebung bei Satellitendaten über der Antarktis. Überdies werden Datensätze von zum Beispiel TerraSAR-X in nahe Echtzeit

an andere Forschungsaktivitäten ausgeliefert, um deren Forschung zu unterstützen, zum Beispiel Daten zur Erfassung der Meereis-Situation an Forschungsschiffe.

Mit demselben 9-Meter-Antennensystem führt das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) Messungen nach dem Prinzip der *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI) durch und erhebt damit Daten zur Bestimmung der Kontinentaldrift, Erdrotation und anderer geodätischer Parameter. GARS O'Higgins ist somit auch Teil des *International VLBI Services* (IVS).

Gemäß dem Alter der Station ist eine umfassende und umfangreiche Sanierung und Modernisierung erforderlich, um die Erhebung der wissenschaftlichen Datensätze kontinuierlich fortsetzen zu können. Die Stationsmodernisierung wurde seit 2017 geplant und initiiert und wird in den kommenden Südsommern vor Ort umgesetzt werden. Sie bedeutet eine erhebliche Investition des DLR, um die Zukunft der Station zu sichern. Ein Ziel dieser Modernisierung besteht natürlich auch in der deutlichen Reduktion des *environmental footprint* der Station.

### **AWIPEV**

Die deutsch-französische Forschungsbasis AWIPEV wird international und gegenüber Norwegen als eine einheitliche Forschungseinrichtung vertreten und so auch bei der Planung und Koordination im Rahmen internationaler Organisationen und Netzwerke eingebracht. Der technische Stationsbetrieb ist vertraglich mit Kings Bay AS geregelt. Das internationale Umfeld und die Lage auf dem norwegisch verwalteten Spitzbergen erfordern teilweise umfangreiche Koordinierungsarbeiten und -absprachen.

Die Aktivitäten von AWIPEV sind im Forschungsdorf auf sechs verschiedene Gebäude verteilt und die Kapazitäten begrenzt. Der steigende wissenschaftliche Bedarf führt zu einem erhöhten logistischen Transportaufwand. Außerdem muss die Infrastruktur nach teilweise dreißigjährigem Betrieb dringend an die gestiegenen wissenschaftlichen Anforderungen angepasst beziehungsweise erweitert werden.

### **Forschungsstation Insel Samoylov**

Das AWI und die weiteren deutschen und internationalen Teilnehmer der LENA-Expeditionen sind Gäste in Sibirien und auf der Samoylov-Station, die sich in einem staatlichen Naturschutzgebiet (Lena-Delta-Reservat) sowie im russischen Grenzgebiet befindet. Alle Aktivitäten unterliegen nationalen, regionalen und örtlichen Bestimmungen, die das Durchlaufen teilweise zeitintensiver und komplexer Genehmigungsprozesse erfordern. Dazu sind ein entsprechender Planungshorizont sowie kompetente und

verlässliche logistische Unterstützung auf deutscher und russischer Seite von wesentlicher Bedeutung. Die Konstellation aus mehreren verantwortlichen Partnerinstitutionen, die teils voneinander abweichenden internen Abläufen und administrativen Vorgaben folgen, erfordern komplexe Abstimmungsprozesse, die unter Einbeziehung aller Partner koordiniert werden müssen.

Die jahrzehntelange vertrauensvolle Zusammenarbeit mit den russischen Partnern war und ist die Basis für die gemeinsame Bewältigung administrativer Herausforderungen als Voraussetzung für die erfolgreiche Bearbeitung wissenschaftlicher Fragestellungen von globaler Bedeutung an der Forschungsstation Insel Samoylov.

### **Satellitendaten-Empfangsstation des DLR in Inuvik**

Die Bodenstation Inuvik des DLR ist Teil der in internationaler Kooperation entwickelten und errichteten *Inuvik Satellite Station Facility* (ISSF) in den Nordwest-Territorien in Kanada. Sie ist wesentlicher Bestandteil der deutsch-kanadischen Zusammenarbeit in der Erdbeobachtung mit dem *Canada Center for Mapping and Earth Observation* (CCMEO) als wesentlichem Partner. Die Initiative für die Entwicklung der ISSF kam aus dem DFD. Anlass war die Notwendigkeit, für die TanDEM-X-Mission einen weiteren polaren Empfangsstandort zu finden, um die entstehenden enormen Datenmengen zum Boden übertragen zu können. Das Ergebnis war die erste Satellitenempfangsstation in der kanadischen Arktis überhaupt. Heute empfangen dort auch die *Swedish Space Corporation* (SSC) und natürlich Kanada selbst Daten einer Reihe von Satelliten. Die Bodenstation besteht im Kern aus einer 13-Meter-Reflektor-Antenne mit Auto-Tracking-Funktion für X- und S-Band. Zusammen mit GARS O'Higgins in der Antarktis sichert sie die bipolare Kontaktlösung zu Satelliten. Der Betrieb und die weitere Entwicklung der Station sind auch mit lokalen Einrichtungen in Inuvik, wie dem *Aurora Research Institute*, und anderen Institutionen vernetzt. Weitere Investitionen für einen zukunftsorientierten Betrieb sind hier notwendig.

### **Otto-Schmidt-Labor für Polar- und Meeresforschung (OSL)**

Das Otto-Schmidt-Labor für Polar- und Meeresforschung am Staatlichen Institut für Arktis- und Antarktisforschung in St. Petersburg wird gemeinsam mit dem AWI und GEOMAR betrieben. Es dient als Plattform für die Durchführung bilateraler Forschungsprojekte, insbesondere im Rahmen der WTZ-Fachvereinbarung zur Meeres- und Polarforschung. Im Mittelpunkt steht die wissenschaftliche Qualifizierung und Förderung von Nachwuchswissenschaftlern und Nachwuchswissenschaftlerinnen. Insgesamt arbeiten mehr als vierzig Universitäten und Forschungseinrichtungen aus Russland und Deutschland mit dem OSL zusammen.

## **Forschungscamps**

### **EastGRIP**

Das Camp besteht aus mobilen Infrastrukturkomponenten, die geführt von den dänischen Kollegen und Kolleginnen des NBI/UCPH gemeinsam mit Partnern seit den 1990ern (GRIP) für mehrere Eiskerntiefbohrungen genutzt und instand gehalten wurden. Allerdings ist die weitere Finanzierung des EastGRIP-Camps ungeklärt. Das gegenwärtige EastGRIP-Projekt läuft voraussichtlich noch bis Herbst 2022. Der aktuelle Standort ist wertvoll für glaziologische und geophysikalische Untersuchungen des östlichen Grönländischen Eisschildes und des einzigen großen Eisstroms (*North-East Greenland Ice Stream*), der Eiskappe sowie des Untergrunds und der basalen Verhältnisse zwischen Eis und Fels. Darüber hinaus ist das Camp Ausgangspunkt für Traversen und für flugzeuggestützte Feldarbeiten auf dem Eis.

### **Herschel Island**

Das Küstenobservatorium auf der kanadischen Arktisinsel Herschel Island – Qikiqtaruk ist seit 2006 zu einem Schwerpunkt der Küstenforschung am AWI gewachsen. Das AWI ist Gast im Schutzgebiet des Herschel Island – Qikiqtaruk Territorial Park, der neben den kanadischen Behörden durch die regionalen indigenen Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen gemanagt wird. Voraussetzung für die weitere nachhaltige Einbindung des Küstenobservatoriums in bilaterale und internationale wissenschaftliche Netzwerke und Forschungsprogramme (WTZ, EU) sind Investitionen insbesondere in die Vertiefung und Pflege des Vertrauensverhältnisses mit der lokalen indigenen Bevölkerung (Inuvialuit), mit dem Ziel, Wissen auszutauschen und zu erweitern.

### **Beyond EPICA – Oldest Ice**

Tiefe Eisbohrprojekte, wie aktuell Beyond EPICA – Oldest Ice (BE-OI), sind eine Herausforderung bezüglich der Identifizierung geeigneter Bohrstellen und der nachfolgenden Bohrung eines mehrere Kilometer tiefen Eiskerns in hoher Qualität. Die wissenschaftliche Führung solcher Projekte setzt die Verfügbarkeit der mobilen Plattformen voraus, um die Vorerkundung und die eigentliche Bohrung entsprechend vor Ort logistisch umzusetzen und zu unterstützen.

Die Identifizierung der Bohrstelle benötigt die Unterstützung boden- und luftgestützter geophysikalischer Erkundungen der Dicke, der inneren Struktur und des Liegenden der Eiskappe sowie eine glaziologische Charakterisierung der Oberfläche über große Gebiete der zentralen, logistisch schwierig zugänglichen Antarktis. Solche Vorerkundungen erfordern daher eine mobile Infrastruktur für Feldlager, die Flugoperationen, leichte Traversen und Analysen der

Eisproben sowie geophysikalische Erkundungen vor Ort unterstützen.

Neben der Reduktion des zu transportierenden Treibstoffs arbeitet die angestrebte Optimierung auch im Sinne der Nachhaltigkeitsstrategie auf einen CO<sub>2</sub>-neutralen Betrieb hin. Zur Optimierung der verfügbaren Zeit für die Wissenschaft vor Ort können die Einheiten hinsichtlich einer leichten Inbetriebnahme und Einwinterung verbessert werden.

### Polarflugzeuge Polar 5 und Polar 6

Die sich ständig weiterentwickelnden wissenschaftlichen Fragestellungen erfordern eine permanente Entwicklung und Erweiterung der vorhandenen Messtechnik sowie den Ausbau der verfügbaren Fernerkundungsmethoden. Flugzeuggestützte Messungen sind das Bindeglied zwischen Detailstudien am Boden und satellitengestützter Fernerkundung und tragen damit wesentlich zum wissenschaftlichen Austausch zwischen unterschiedlichsten wissenschaftlichen Gruppen und Einrichtungen im In- und Ausland bei. Die fortlaufende Pflege und Instandhaltung der Flugzeuge selbst wie auch die ständige Zulassung neuer wissenschaftlicher Systeme für den Flugbetrieb sind mit hohem Aufwand verbunden.

### Tiefseetechnologien

Die Polargebiete sind von Klimaveränderungen besonders betroffen und haben ihrerseits einen erheblichen Einfluss auf das globale Klima. Allerdings bestehen gerade hier erhebliche Lücken in der Beobachtung und Datenerhebung: Extrem niedrige Temperaturen, starke Stürme und dauernde Dunkelheit im Winter erschweren den Zugang und den Einsatz bestimmter Messtechnologien. Der Aufbau und die (Weiter-)Entwicklung von Infrastrukturen im Bereich Tiefseetechnologie werden vom AWI mit Hochdruck verfolgt: Modulare Messplattformen werden mit modernster Sensorik ausgestattet und zur Datenerhebung auf und unter dem Eis, in der eisbedeckten Wassersäule und am Meeresboden eingesetzt (zum Beispiel in der Helmholtz-Infrastruktur FRAM – FRontiers in Arctic Marine Monitoring – <https://www.awi.de/forschung/biowissenschaften/tiefsee-oekologie-und-technologie/observatorien/fram-ocean-observing-system.html>).

Durch die Entwicklung und Anwendung robotischer Systeme mit standardisierter Sensorik und neuen Verfahren in Telemetrie, Hydroakustik, Navigation, Signalerkennung und künstlicher Intelligenz, die sowohl untereinander als auch mit dem Beobachter beziehungsweise der Beobachterin interagieren, können Geschwindigkeit, Ökonomie und

Nachhaltigkeit von Messungen im tiefen Ozean erheblich verbessert werden. Die erhobenen Messdatenreihen entsprechen den Standards der globalen Beobachtungs-Initiative *Global Ocean Observing Systems* (GOOS) und tragen zu einer erheblichen Erweiterung des Wissens und des Verständnisses der polaren Ökosysteme und ihres Einflusses auf das globale Klimasystem bei. Diese Zeitreihen zukünftig erfolgreich weiterzuführen, ist im Hinblick auf den fortschreitenden Klimawandel für die internationale Forschungsgemeinde von großer Bedeutung und eine gesellschaftlich geforderte Aufgabe – vor allem auch für die beginnende UN-Dekade der Ozean-Beobachtung.

### Großrechner, Datenbanken, Archive

#### Großrechner

Die numerische Simulation polarer Prozesse in Wetter-, Klima- und Erdsystemmodellen sowie die großflächige Prozessierung von Satellitendaten erfordern Rechenleistung in erheblichem und – angesichts der zunehmenden Anzahl und Komplexität der berücksichtigten Teilkomponenten beziehungsweise prozesse – wachsendem Umfang. Dabei stehen Methoden zur Verknüpfung numerischer Modellierungsansätze mit umfangreichen Erdbeobachtungsdaten (*Earth Observation*, EO) in der Weiterentwicklung, zum Beispiel zur statistischen Verifizierung klimarelevanter Trends oder Abschätzung von Kipppunkten. Eine Optimierung der numerischen Teilmodelle und deren Kopplung im Hinblick auf Speicher- und Rechenzeitanforderungen stellen vorrangige Entwicklungsbedarfe dar. Zugleich sind eine technologisch mögliche Kapazitätssteigerung der *High Performance Computing Cluster* des AWI und anderer Standorte (HLRN, DKRZ, FZJ und perspektivisch NHR) sowie die Anbindung an die IT-Kapazitäten des DLR bei Wiederbeschaffung beziehungsweise Kopplung an die Datenhaltung (EO, siehe oben) relevant. Zunehmend heterogene Rechnerinfrastrukturen (zum Beispiel die Einführung von GPU-Boostern) stellen neue Herausforderungen für die effektive Nutzung dieser Systeme dar. Dies bedarf einer Implementierung neuer Software-Paradigmen, wie *separation of concerns* und *computational dwarfs*. Zudem erfordert diese Entwicklung Innovation in der Algorithmik, beispielsweise durch den Einsatz von Methoden der künstlichen Intelligenz und des maschinellen Lernens. Die Implementierung neu entwickelter KI-Methoden in Großrechnern für operationelle Services sollte vorangebracht werden und erfordert umfangreiche Tests der Anforderungen und der Performance.

#### Archive und Datenbanken

Der kontinuierliche, operationelle Strom an Erdbeobachtungsdaten der verschiedenen nationalen und europäischen Missionen stellt – neben der Integration

hochkomplexer Modelldaten – eine weitere Herausforderung dar. Derzeit existiert kein nationales Archiv für die deutsche Polarforschung für Erdbeobachtungsdaten. Mit der zunehmenden Bedeutung von Satellitenzeitreihen für ein effizientes Monitoring, aber auch für eine effiziente Modellintegration stellt dies ein zunehmendes Hindernis dar. Die Anwendung neuer oder verbesserter Algorithmen auf ganze Datenbestände einer Mission respektive großflächig für ganze Eisschilde wird durch den Zugang beziehungsweise die Erfordernisse der Datenvorhaltung derzeit extrem erschwert beziehungsweise ist fast unmöglich – sowohl für die universitäre als auch für die Forschung der Großforschungseinrichtungen. Diese Fähigkeiten wären aber gerade in Anbetracht der Entwicklungen im KI-Bereich (siehe oben) von zentraler Bedeutung. Die Schaffung eines entsprechenden nationalen Datenarchivs mit breitbandiger Anbindung an das DFN-Netz sowie direkter Verbindung zu Hochleistungsrechenkapazitäten sollte daher hohe Priorität erhalten. Die Kompetenzen und Erfahrungen des Deutschen Satellitendatenarchivs beim DLR und dessen Anbindung an eine *High Performance Data Analytics Platform* sollen hier einbezogen werden.

Es ist absehbar, dass in den kommenden Jahren die Größe von Modelldaten exponentiell ansteigen wird (viele PBytes). Dieser Prozess wird durch die Entwicklung einer neuen Generation von höchstauflösenden Wetter- und Klimamodellen, den sogenannten Digitalen Zwillingen (Querschnittsthema 1), noch weiter beschleunigt. Archive für Modelldaten müssen entsprechend angepasst und ForschungsCommunities zur Verfügung gestellt werden. Zudem wird es aber auch darum gehen, ganz neue Konzepte für die Sicherung von und den interaktiven Zugang zu Modelldaten zu entwickeln (zum Beispiel hochauflösende Daten nur für ausgewählte Orte, komplexe gekoppelte Analysen von Beobachtung und Simulation).

## Finanzielle Infrastruktur

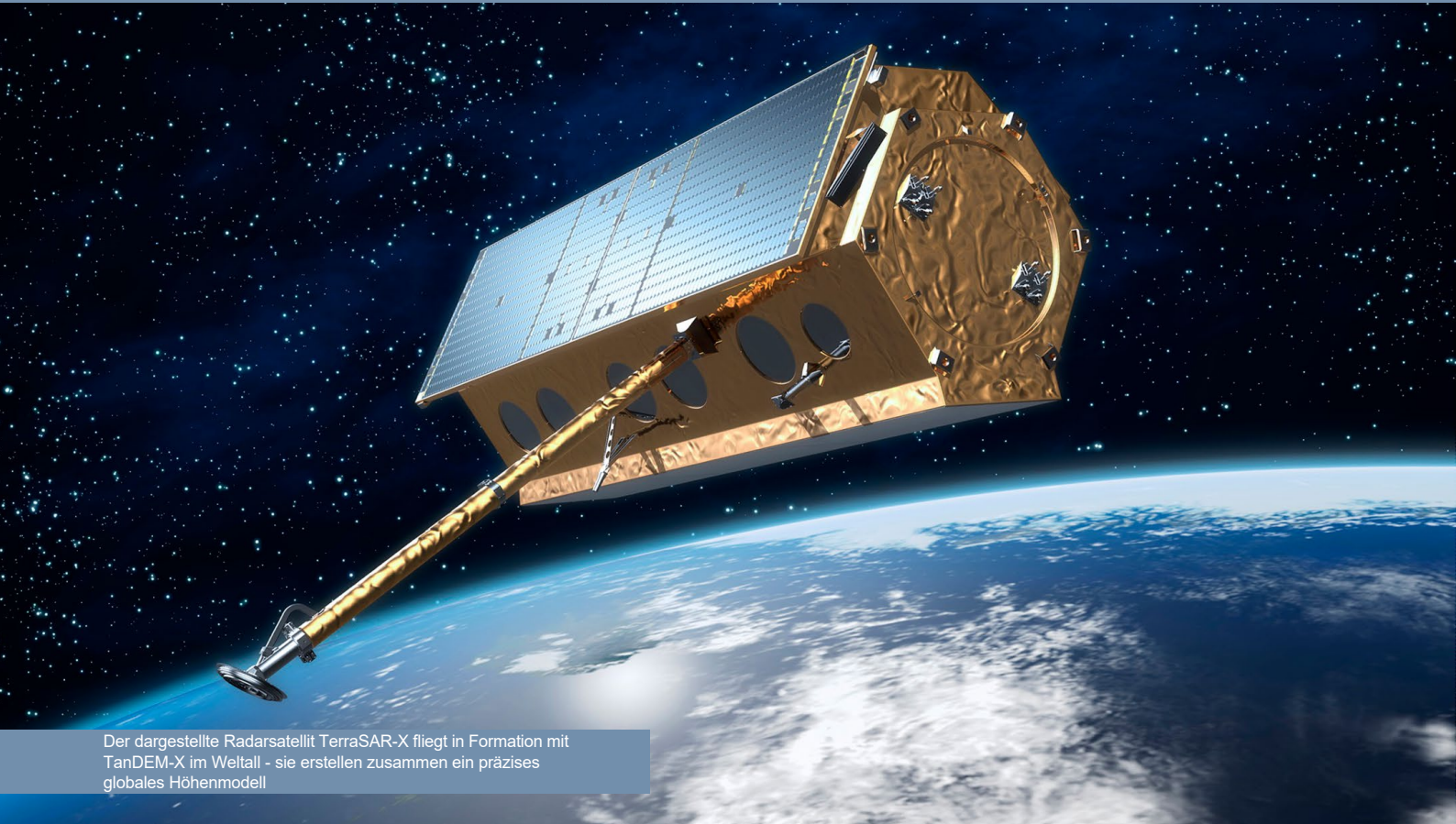
Universitäre Gruppen steuern einen essenziellen Beitrag zur Polarforschung bei und nutzen auch die vom AWI und anderen bereitgestellte Infrastruktur. Das Alfred-Wegener-Institut unterstützt die Hochschulgruppen durch Bereitstellung von Platz für Fracht in den AWI-Containern, durch Ausstattung mit Polarkleidung sowie durch die Bereitstellung der Schiffsausstattung. Im Unterschied zu den Forschungsreisen mit FS Sonne, FS Meteor und FS Maria S. Merian gibt es jedoch für Fahrten mit FS Polarstern keine Möglichkeit für universitäre Gruppen, Mittel zu beantragen. Dies erschwert und behindert die universitäre Forschung in Arktis und Antarktis. Hier besteht dringender Handlungsbedarf, eine Finanzierung

für die Durchführung der Fahrt und für die erste Auswertung für universitäre Gruppen zu ermöglichen. Es muss darüber hinaus sichergestellt werden, dass auch außeruniversitären Instituten genügend Mittel für seegehende Forschung zur Verfügung gestellt werden.

Für die mittelgroßen Forschungsschiffe Heincke und Alkor liegen die Herausforderung in der Sicherstellung der stetigen Erneuerung, im Erhalt der Klasse und in tragfähigen Konzeptionen für Nachfolgeschiffe.

Zur Durchführung ihrer Forschungsprogramme und Gewährleistung des Betriebs ihrer Einrichtungen sind die deutschen Polarforschungsinstitutionen außerdem darauf angewiesen, zusätzliche Schiffs- und Fluglogistik zu chartern beziehungsweise „einzukaufen“. Dies muss im Rahmen von Drittmittelanträgen beachtet werden.





Der dargestellte Radarsatellit TerraSAR-X fliegt in Formation mit TanDEM-X im Weltall - sie erstellen zusammen ein präzises globales Höhenmodell

## 4.2 INSTRUMENTE UND BEOBACHTUNGSSYSTEME

### Leitfragen:

- Welche Bedarfe an Instrumenten und Beobachtungssystemen hat die Wissenschaft in den Polarregionen?
- Welche Lücken bei Instrumenten und Beobachtungssystemen existieren für die Wissenschaft?
- Welche zukünftigen wissenschaftlichen Anwendungsfelder sind jetzt schon klar zu identifizieren?

### Einleitung

Der wissenschaftliche Fortschritt in den Polarregionen ist stark von der Entwicklung und Anwendung moderner Mess-, Beobachtungs- und Beprobungssysteme für lokale, regionale und Fernerkundungs-Messungen abhängig. Sie erfassen gegenwärtige und vergangene Veränderungen in den Polarregionen und fundieren die Untersuchung lokaler, regionaler und globaler Folgen. Dafür sind langfristige, nachhaltige und flächendeckende Beobachtungen in hoher zeitlicher Auflösung unerlässlich. Die große Vielzahl autonom oder interaktiv betriebener, ortsfester oder mobiler Mess- und Beprobungsplattformen gewinnt

immer mehr Bedeutung und eröffnet wissenschaftliche Einsichten, wie sie vorher nicht möglich waren. Regionale und lokale Zeitreihen sind zudem äußerst wichtig für die Validierung der Fernerkundungsdaten.

In den letzten Jahrzehnten vollzogen sich beträchtliche technische Fortschritte bei der Entwicklung von Instrumenten, die unter schwierigen Bedingungen in den Polargebieten eingesetzt werden. Das große Potenzial steht dabei den Herausforderungen eines langfristigen operationellen Betriebs, der Übertragung (in *near real time*, nahe Echtzeit) und der Vergleichbarkeit der Daten sowie dem Anspruch an Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Systeme gegenüber.

Beispiele für wichtige regionale und lokale Beobachtungssysteme sind Beprobungen und Messungen der dreidimensionalen Zirkulation im polaren Ozean, die Erfassung wesentlicher Änderungen in den polaren Ökosystemen, Eismassen, Kohlenstoffaufnahme, Nährstoffkonzentrationen und -kreisläufe sowie die Messungen gelöster und partikulärer Schadstoffe, die inzwischen auch die polaren Lebensgemeinschaften bedrohen.

Aufgrund der großen Bedeutung der Polarregionen für Klima, Meeresspiegel, Kohlenstoffkreislauf und

Ökosystemdienstleistungen müssen die bereits vorhandenen Beobachtungssysteme erhalten beziehungsweise technisch erneuert und für zukünftige Herausforderungen ausgebaut und dabei eine Balance zwischen Prozessstudien, In-situ-Experimenten und operationellen Messsystemen beachtet werden. Daraus werden konkrete Bedarfe der Zukunft entwickelt.

## Vor Ort

Der Ozean ist unterhalb einer dünnen Oberflächenschicht nicht für Satelliten messbar. Vor Ort eingesetzte Sensoren haben die beste Genauigkeit und Auflösung. Solche Sensoren sind unverzichtbar, um autonome Plattformen zu kalibrieren. Letztere können zusätzlich zu Schiffsexpeditionen die räumliche und zeitliche Abdeckung deutlich verbessern. Um die Änderungen in der polaren Ozeanzirkulation quantitativ zu bestimmen, sind verankerte Instrumente und Sensoren nötig, die den ungünstigen Bedingungen im Ozean (hoher Druck, Korrosion, Biofouling, Kälte, Meereis und Eisberge) standhalten und deren Betrieb mit geringem Aufwand aufrechterhalten werden kann. In Polargebieten sind Verankerungen und *Argo Floats* häufig die einzige Möglichkeit, Daten über einen kompletten Jahresgang zu erheben. Viele ökologische und biogeochemische (BGC) Fragen lassen sich nur mittels dieser Methodik beantworten.

Teile der Untersuchungen der polaren Eisschilde erfolgen durch Feldmessungen und temporäre Stationen. Das Spektrum einzelner Kampagnen, die mittels geophysikalischer und geodätischer Verfahren oder Beprobungen Daten erheben, reicht von Projekten mit einzelnen Fragestellungen bis hin zur Erstellung von Zeitreihen. Um Kenntnisse über die Beschaffenheit und die physikalischen Eigenschaften des geologischen Untergrunds (Sediment, Festgestein, Hydrologie, geothermaler Wärmestrom), aber auch über andere glaziologische und meteorologische Variablen (zum Beispiel Niederschlagsraten, Schnee- und Firndichte, Eisstruktur, Kalbungsprozesse, basale Schmelzraten) zu erlangen, sind geophysikalische Messungen und Bohrungen erforderlich. Ebenso sind Beobachtungen und Messungen von Vegetationsveränderungen notwendig. Sediment- und Eiskerne sind Klimaarchive und bilden die Basis für eine erfolgreiche Paläoklimaforschung. Für das Aufspüren geeigneter Archive werden räumlich hochauflösende geophysikalische Messsysteme wie Fächersonare, Sedimentechografie und seismische Methoden benötigt.

## Instrumente und Beobachtungssysteme in der regionalen Umgebung

Geräte in der Polarforschung erfordern spezielle Driftkörper und Sensoren, die in dieser Umgebung hochwertige

Messungen liefern können. Autonome Oberflächen- oder Tiefendrifter, Segeldrohnen und im Eis verankerte Bojen sind notwendig, da Schiffsexpeditionen keine ausreichende räumliche und zeitliche Abdeckung von Beobachtungen liefern können. Im internationalen Argo-Programm, dem auch Deutschland angehört, sind bereits die ersten Tiefendrifter im Einsatz, die unterhalb von 2000 Metern Tiefe messen. Zur Verfügung stehen auch polartaugliche AUVs (autonome Unterwasserfahrzeuge) und ROVs (ferngesteuerte Unterwasserfahrzeuge).

Der wiederholte Einsatz regionaler Drohnensysteme kann die Veränderungen des Permafrosts gut erfassen. Kartierungsprozesse können mithilfe von KI und *Citizen Science* durchgeführt werden. Damit kann die regionale Bevölkerung, aber auch Menschen weltweit, gemeinsam dazu beitragen, den aktuellen Zustand des Permafrosts zu erkennen und die Auswirkungen des Klimawandels wahrzunehmen.

Die Atmosphäre der polaren Breiten ist durch besondere Bedingungen gekennzeichnet und viele Aspekte der Dynamik sind bis jetzt unzureichend verstanden. Die Kombination von verschiedenen Messungen (zum Beispiel bodengebunden oder auf Plattformen wie Schiffen oder Flugzeugen) erlauben Prozessstudien zu Phänomenen, wie Kaltluftausbrüchen oder Warmluftadvektionen. Neben diesen vornehmlich troposphärischen Beobachtungen ist auch die Analyse von Prozessen in der mittleren Atmosphäre (10–100 Kilometer) entscheidend, da die verschiedenen Schichten der Atmosphäre in Zeit und Raum miteinander gekoppelt sind. Speziell die Höhenregion ab circa 40 Kilometer ist aber für Messsysteme schlecht zugänglich. Eine sehr gute Möglichkeit zur Erfassung des Zustands der Atmosphäre in 80 bis 100 Kilometern Höhe stellt die Beobachtung des sogenannten OH-Luftleuchtens (*Airglow*) mittels Infrarotspektrometern dar.

## Beobachtung der polaren Gebiete durch Fernerkundung

Satelliten ermöglichen eine flächendeckende Beobachtung und liefern wertvolle Einblicke in die Veränderungen der letzten Jahrzehnte. Äußerst wichtig dabei ist eine Datenkontinuität, denn sie ermöglicht die Erfassung von Veränderungen, den weiteren Ausbau bestehender Algorithmen und automatisierter Auswerteroutinen und die sinnvolle Assimilation der Datenströme in Modellen. Die Auflösungen sind weiterhin begrenzt. Die deutsch-US-amerikanischen GRACE- und GRACE-FO-Missionen ermöglichen eine direkte Bestimmung der Massenänderungen in hoher zeitlicher Auflösung. Die deutsche TanDEM-X-Mission hat ein einmaliges, hochauflösendes Geländemodell beider

Pole erzeugt und die beiden Satelliten liefern weiterhin hochaufgelöste Radaraufnahmen für Fragestellungen in der Glaziologie (zum Beispiel Eisbewegung oder Höhenänderungen), zur Erforschung der Meereisbedeckung, Erfassung von Schmelzwassertümpeln und für die Schiffsnavigation. Die enorme Ausdehnung der Permafrostgebiete erfordert den Einsatz moderner Flugzeug- und Satellitentechnologie. Hierunter fallen sowohl optische als auch SAR-Systeme zur Erfassung der Veränderungen auf der Landoberfläche, aber auch Instrumente der Atmosphärenphysik, um zum Beispiel großräumig Messungen des Treibhausgases Methan durchzuführen, wie dies zum Beispiel mit der deutsch-französischen MERLIN-Mission avisiert wird.

Hochaufgelöste multispektrale Satellitendaten und Luftbilder konnten erfolgreich im Bereich des Monitorings beziehungsweise der Zählung von Vogelkolonien sowie bei einer verbesserten Abschätzung der Robbenbestände eingesetzt werden.

Satellitendaten des atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehalts und zur Primärproduktion im Ozean haben das Potenzial, große räumliche Lücken in der Beobachtung der Biogeochemie im Südozean zu füllen. Mittels atmosphärischer Inversionen kann so zum Beispiel die mit großen Unsicherheiten behaftete polare CO<sub>2</sub>-Aufnahme taxiert werden. Die vergleichsweise kleinen Signale natürlicher CO<sub>2</sub>-Quellen und -Senken erfordern jedoch eine noch nicht erreichte Präzision der Messungen. Intensive Änderungen der Primärproduktion im Südpolarmeer sind zu erwarten und können aufgrund der hohen Hintergrundvariabilität nur großskalig beobachtet werden. Dafür ist zukünftig auch eine Optimierung der ursprünglich breitbandigen „Ocean Color“-Sensoren notwendig.

## Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Zur Erfassung und zum Verständnis der Folgen des Klimawandels für Ökosystemdienstleistungen, Lebensgemeinschaften und deren Schutz müssen Lücken in synoptischen und langfristigen Beobachtungssystemen geschlossen werden. Die aktuelle lokale und regionale Datenabdeckung ist nicht ausreichend, um sämtliche polaren Systeme in hoher zeitlicher Auflösung zu untersuchen. Um die Unsicherheiten im Bereich der marinen Aufnahme und Speicherung von Kohlenstoff zu verringern, müssen die physikalische und die biologische Pumpe im polaren Ozean besser mit kontinuierlich betriebenen Beobachtungen der Ozeandynamik und der biogeochemischen Änderungen erfasst werden. Besonders wichtig ist dies für das Nordpolarmeer, den subpolaren Nordatlantik sowie den atlantischen Sektor des Südpolarmeers. Eine Herausforderung ist die Weiterentwicklung der BGC-Sensoren um

Einsatzmöglichkeiten auf Tiefendriftern und anderen polaren Plattformen, wie AUVs, ROVs, *Bottom Lander* und *Benthic Crawler*, die mit weiterentwickelten hochauflösenden bildgebende Verfahren ausgerüstet werden müssen. Meistens stehen für die Entwicklung von BGC-Sensoren nur Projektmittel zur Verfügung – und der dringend benötigte Fortschritt und flächendeckende Einsatz ist durch die damit einhergehende fehlende Langzeitperspektive unsicher. Noch weiter zu verkleinernde Sensoren, auch Kameras, mit denen marine Säugetiere und Seevögel bestückt werden, erbringen nicht nur wertvolle ökologische Informationen zu Tierverhalten und Klimawandel, sondern auch physikalische und chemische Daten in schwierig zugänglichen Gebieten. Die Entwicklung von Verfahren zur operationellen Verknüpfung der kontinuierlichen optischen Messungen ist notwendig, um hochwertige Beobachtungsdatensätze zu den wichtigsten BGC-Parametern (Primärproduktion, Partikelfluss etc.) mit bester räumlicher und zeitlicher Abdeckung zu generieren.

Beobachtung auf den Gletschern und Eisschilden sind logistisch äußerst herausfordernd und Messungen vom Schiff aus sollten durch autonome Messstationen ergänzt werden. Um Prozessstudien durchführen zu können, braucht es zusätzlich Messungen von Flugzeugen und Drohnensystemen aus – das verbessert die räumliche und zeitliche Auflösung. Analysen im operationellen Betrieb erfordern Entwicklung: Für Permafrost-Anwendungen ist es sinnvoll, neue Sensorik-Kombinationen, zum Beispiel für den spektralen Bereich des *Short Wave Infrared* (SWIR), zu entwickeln. Als Referenz für Satellitendaten in den eisbedeckten Flächen sind Laseraltimeter für Tiefenmessungen von Schmelzwasserseen, im Küstenbereich und für Meereis wichtig. Hinzu kommen zum Beispiel Messungen zu Schneeakkumulation, Schnee- und Firnstruktur sowie Referenzstationen zur Positionierung mit den verfügbaren Navigationssatellitensignalen. Um räumliche Schwankungen besser gegenüber den satellitenbasierten Abschätzungen zu verifizieren, werden Installationen und systematische Messungen benötigt. Gerade die Messungen mit Satelliten sind mit Unsicherheiten bezüglich der Eindringtiefe von Mikrowellensignalen, der räumlichen Interpolation, der Umrechnung von Volumen in Masse, bei der Berücksichtigung des glazial-isostatischen Ausgleichs in den Schwerefeldmessungen und bei Meereis der Schneeaufgabe und des Freibords zur Eisdickenkonvertierung behaftet.

Für die notwendige Paläoklimaforschung wird der Zugang zu den Sedimentarchiven tief unter dem Meeresgrund benötigt. Zukünftig wichtig sind weiterzuentwickelnde, flexibel auf Mehrzweck-Forschungsschiffen einzusetzende Bohrgeräte, die Sedimentkerne aus Bohrtiefen von mehreren Hundert Metern gewinnen können.



Drohensysteme haben in den vergangenen Jahren erhebliche Fortschritte gemacht. Neben den gängigen kommerziellen Systemen sollte an die Entwicklung und den Betrieb von Systemen mit größerer Tragkraft für wissenschaftliche Instrumentierung sowie größerer Reichweite in polaren Regionen gedacht werden (HALE: *High Altitude Long Endurance*). Systeme zur Erfassung der Atmosphäre in 80–100 Kilometern Höhe müssen durch Infrarotkameras, Windmessungen und Tomografie erweitert werden. Die Messung der Turbulenz, zum Beispiel durch Techniken des *Distributed Temperature Sensing* (DTS), sind ebenfalls wünschenswert. Zudem könnte die Installation eines solchen Messpakets (Spektrometer, Kamera und Windmesssystem) auf Polarforschungsstationen oder -schiffen zukünftig eine bessere Vorhersage des Wetters auch in den mittleren Breiten bedeuten.

Zukünftige Satellitenentwicklungen sollten die zeitlichen und räumliche Abtastraten und die Genauigkeit der Datenprodukte weiter erhöhen, aber auch die Auswertung neuer, zusätzlicher Variablen ermöglichen. Die mögliche Instabilität des westantarktischen Eisschildes und die Erfassung extremer Veränderungen von Auslassgletschern in Grönland und Antarktis erfordern das schnelle Reagieren auf Ereignisse und einen raschen Einsatz weiterer Sensoren. Hierzu kann das Konzept für eine nationale TanDEM-L-Mission einen erheblichen Beitrag liefern, das erstmalig auch tomografische Studien ermöglicht. Eine erste Kontinuität bei der nationalen X-Band-Radarsensorik ist durch die Nachfolgemission HRWS MirrorSAR gegeben. Das multistatische Aufnahme-konzept von HRWS MirrorSAR ermöglicht erhebliche Qualitätssteigerungen, insbesondere für die stärker reliefierten Randbereiche der Antarktis, wo die Messungen der Satellitenaltimetrie limitiert sind, andererseits aber die Massenänderungen stattfinden. Zusätzlich sollten innovative Konzepte zum Ableiten neuer geophysikalischer Parameter, wie Schneedicke, implementiert werden. Außerdem zeichnet sich eine Lücke der Datenerhebungen durch Altimetriemissionen ab 2025 ab. Es ist notwendig, flugzeuggestützte Missionen mit Ku- und Ka-Band-SAR-Systemen zu etablieren, bis die ESA-Mission CRISTAL operativ ist. Für alle Satellitendaten sollte neben regelmäßigen Akquisitionen der europäischen Missionen auch ein kostengünstigerer Zugang zu höchst aufgelösten Satellitendaten ermöglicht werden.

Eine kontinuierlich zu modernisierende Laboranalytik, die im Labor und falls möglich auf Forschungsschiffen und -stationen eingesetzt werden kann, ist unerlässlich. Diese Laboranalytik – auch im Hinblick auf sogenannte Lab-on-a-Chip-Technologien – ist teilweise in den Polarforschung betreibenden Universitäten beheimatet, die zukünftig mit mehr Möglichkeiten zur Weiterentwicklung und Modernisierung ihrer Analytik ausgestattet werden sollten.

Um den nationalen Beitrag nicht nur in der Wissenschaft, sondern auch in der Bereitstellung und Weiterentwicklung anspruchsvoller Technologien für die Polarforschung im europäischen Raum sichtbar zu machen, sind zusätzliche Mittel sowie eine verstärkte Koordination der Akteure und Akteurinnen untereinander nötig. Auch die vielen aktiven universitären Forschungsgruppen werden auf die Bereitstellung dieser Technologien angewiesen sein. Effizienz und Logistik von Feldmessungen werden erst durch ein koordiniertes Vorgehen und eine Zusammenarbeit der Partner und Partnerinnen möglich gemacht und müssen zukünftig noch verstärkt werden. Bei der Standortwahl der Beobachtungen sollten zukünftig auch die Anforderungen aus Sicht der Modelle berücksichtigt werden, welche die Beobachtungsdaten als Input nutzen. Außerdem würde die Auswertung der Datensätze von einer Big-Data-Infrastruktur und KI-Algorithmen profitieren.



Ein Eiskern des arktischen Meereises wird vermessen

## 4.3 NACHWUCHSFÖRDERUNG

Deutschland bietet jungen Polarforschern und Polarforscherinnen einerseits eigene nationale Förderstrukturen (zum Beispiel Graduiertenschulen) und andererseits Zugang zur Mitarbeit in internationalen Strukturen.

### Koordinierte Programme und Leuchtturmprojekte

Das deutsche Nationalkomitee der APECS (im Juli 2016 gegründet) vertritt Master- und PhD-Studenten und -Studentinnen, Postdocs, frisch berufene Dozenten und Dozentinnen und andere mit Interesse an den Polarregionen in der *Association of Polar Early Career Scientists* (APECS). Die Ziele von APECS Germany sind die Vernetzung von und Unterstützung für Nachwuchs-Polarforscher und -Polarforscherinnen, Bildung und Aufklärung in Bezug auf polare Themen für junge Menschen und die allgemeine Öffentlichkeit, Verbreitung von Informationen über Newsletter, soziale Medien und Website (<https://apecsgermany.wixsite.com/apecsde>). Dafür organisiert APECS Germany Veranstaltungen zur Karriereentwicklung für Nachwuchswissenschaftler und Nachwuchswissenschaftlerinnen sowie Bildungs- und Outreach-Aktivitäten, um junge Menschen für die Polarregionen zu begeistern und zu inspirieren.

Seit 1981 besteht in Deutschland eine koordinierte Förderung der Antarktisforschung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft, die insbesondere auch der Nachwuchsförderung, wie der Ausbildung von Doktoranden und Doktorandinnen, dient. Das DFG-Schwerpunktprogramm 1158 „Antarktisforschung mit vergleichenden Untersuchungen in arktischen Eisgebieten“ (<https://www.spp-antarktisforschung.de/>) unterstützt vor allem universitäre Forschungsgruppen dabei, die für die Forschungsarbeiten erforderliche Logistik zu nutzen und damit den akademischen Nachwuchs in Deutschland für die Polargebiete zu interessieren und kommende Polarforschungsgenerationen auszubilden. Die Koordinationstreffen und Topic-Workshops innerhalb des Schwerpunktprogramms dienen ebenfalls der Vernetzung junger und erfahrener Polarforscher und Polarforscherinnen.

In Zusammenarbeit mit Universitäten unterstützt die Helmholtz-Gemeinschaft mit den Helmholtz-Nachwuchsgruppen über die programmorientierte Förderung hinaus junge Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen in ihrer wissenschaftlichen Selbstständigkeit und bietet ihnen damit eine verlässliche Karriereperspektive. Ebenso offerieren die DFG-Nachwuchsförderprogramme (zum Beispiel Walter-Benjamin-Programm, Emmy-Noether-Programm,

Heisenberg-Programm) die Gelegenheit, ein eigenständiges Forschungsprofil aufzubauen.

Die Universitäten Hamburg (UHH) und Sankt Petersburg (SPbU) bieten gemeinsam den deutsch-russischen Masterstudiengang für Polar- und Meereswissenschaften POMOR an (<https://pomor.spbu.ru/en>). Der Studiengang wird seit 2002 in enger Zusammenarbeit mit den Universitäten Bremen, Kiel und Potsdam, der Technischen Universität Hamburg, AWI, GEOMAR, dem Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde und dem Otto-Schmidt-Labor für Polar- und Meeresforschung in St. Petersburg (OSL) durchgeführt. POMOR ist ein englischsprachiges, forschungsorientiertes Masterprogramm. Erstes und zweites Semester finden an der SPbU und am OSL statt, das dritte an einer der deutschen Partneruniversitäten. Obligatorisch ist ein in deutsch-russische Forschungsprojekte eingebundenes Feldpraktikum. Den Unterricht und die Betreuung der Masterarbeiten führen deutsche und russische Dozenten und Dozentinnen gemeinsam durch. Der international bis 2025 akkreditierte M. Sc. POMOR schließt mit einem „Dual degree“ an der UHH und an der SPbU ab. Verschiedene weitere Universitäten bieten Masterstudiengänge mit polarem Bezug an (zum Beispiel im Rahmen von Abschlussarbeiten), der jedoch meist nicht explizit in den Studienplänen verortet ist.

Der Arbeitskreis Polarlehrer in der Deutschen Gesellschaft für Polarforschung e. V. (<https://www.polarforschung.de/arbeitskreise/ak-polarlehrer/>) ist ein bundesweites Netzwerk von Lehrkräften der Fächer Geografie, Biologie, Physik, Chemie und Sozialkunde aus allen Klassenstufen und Schulformen. Seine Mitglieder engagieren sich im Unterricht mit besonderer Aufmerksamkeit für die Implementierung polarer Themen.

## Weitere Programme und Einrichtungen

Weitere Programme umfassen unter anderem Graduiertenschulen, wie POLMAR (<https://polmar.awi.de>) und Arc-Train (<https://arctrain.de>) sowie internationale Programme mit deutscher Beteiligung, wie die *University of the Arctic* (<https://www.uarctic.org>), die *Fellowship Programmes* von SCAR (<https://scar.org/awards/fellowships>) und IASC (<https://iasc.info/capacity-building/fellowship>), das internationale *Master program CORELIS – Cold Region Landscapes Integrated Sciences* (<https://corelis.spbu.ru/en/>) und das *Permafrost Young Researchers Network* (<https://pyrn.arcticportal.org/national-representatives>).

## Zukünftiger Bedarf

Eine wichtige und nachhaltige Säule für die Umsetzung der Forschungs- und Querschnittsthemen ist die Ausbildung von Studierenden, Promovierenden, Postdocs und jungen Wissenschaftlern und Wissenschaftlerinnen. Neben der Weiterführung der derzeit vorhandenen Schlüsselprogramme muss daher die Nachwuchsförderung bei neuen Programmen einen hohen Stellenwert erhalten, um junge Forscher und Forscherinnen zu fördern und ihnen Zugang zur Mitarbeit in internationalen Strukturen zu ermöglichen. Dazu sind die Einrichtung und der Ausbau von internationalen Sommer-schulen, Masterprogrammen und Graduiertenschulen sowie ein Tenure-Track-Programm angedacht. Eine nachhaltige Wirkung dieser Förderprogramme könnte über den Aufbau und die Stärkung von Alumni-Netzwerken erzielt werden. Langfristig können die Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen der nächsten Generation so Brücken in der internationalen Polarforschung bauen. Angestrebt wird zudem eine bessere Vernetzung des Nachwuchses zwischen Hochschulen und außeruniversitären Forschungseinrichtungen.

## 4.4 INTERNATIONALE ORGANISATION UND ZUSAMMENARBEIT

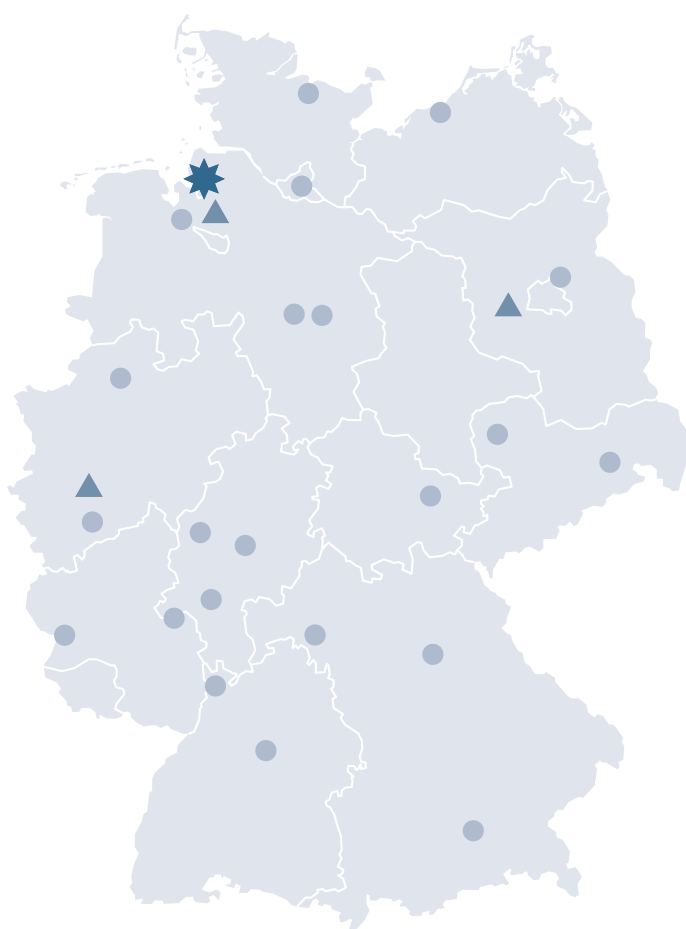
Die deutsche Polarforschung wird durch ein Netz von Forschungseinrichtungen getragen, die aktiv an der Gestaltung internationaler Forschungsprogramme mitwirken. Das Nationalkomitee SCAR/IASC ist nationale Schnittstelle zum *Scientific Committee on Antarctic Research* (SCAR) und zum *International Arctic Science Committee* (IASC). Es plant und koordiniert die Aktivitäten der deutschen polaren Hochschulforschung zusammen mit dem AWI sowie anderen Bundeseinrichtungen. Die Räte der Manager der nationalen Arktis- und Antarktisprogramme (FARO und COMNAP) organisieren die internationale Forschungslogistik. Die Deutsche Gesellschaft für Polarforschung berät und fördert die Erforschung der Polar- und Eisgebiete und den wissenschaftlichen Nachwuchs. Das Deutsche Arktisbüro am AWI und der Arktisdialog sind Informations- und Kooperationsplattformen für Wissenschaft, Politik und Wirtschaft.

Der Arktische Rat ist das führende zwischenstaatliche Forum für die Kooperation zwischen den Arktis-Anrainern und den indigenen Völkern im Hinblick auf nachhaltige Entwicklung und Umweltschutz in der Region. Deutschland zählt seit Gründung des Rats zu den Beobachterstaaten. Das in der Antarktis bestehende Vertragssystem beruht auf dem Antarktis-Vertrag und darauf aufbauenden internationalen Übereinkommen. Deutschland zählt zu den Konsultativstaaten und ist in der Antarktis-Vertragsstaatenkonferenz und dem zugehörigen Umweltausschuss daher stimmberechtigt.

Die europäische Polarforschung wird hauptsächlich im EU-Rahmenprogramm für Forschung und Innovation „Horizont Europa“ durchgeführt. Grundlage bildet das im Zuge des EU-PolarNet-Projekts entwickelte „Europäische Polarforschungsprogramm“. Das Programm verfolgt einen transdisziplinären Ansatz und soll Wissenslücken in und zwischen Natur- und Sozialwissenschaften, Wirtschaft und Gesellschaft in den Polarregionen schließen. Deutsche Polarforscher und Polarforscherinnen waren und sind maßgeblich an den Sachstandsberichten des zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen beteiligt und engagieren sich im Rahmen der UN-Dekade für Ozeanforschung.

Polarforschung ist eine Gemeinschaftsaufgabe, die vom Zusammenwirken aller Disziplinen lebt und in der Forschende aus vielen Ländern zusammenarbeiten. Forschung in den extremen Polarregionen ist jedoch nur mit hohem logistischen Aufwand realisierbar. Alternativlos ist es daher, das internationale Engagement der deutschen Polarforschung zu stärken und den Ausbau internationaler Programme und Projekte über weltweite Forschungsallianzen, die durch langfristige Zielsetzungen getragen werden, zu fördern.

Mit der Bündelung von Kräften auf internationaler Ebene wird es gelingen, komplexe oder kostenintensive Infrastrukturen zu errichten und zu betreiben sowie auf globale Herausforderungen zu reagieren. Ein transdisziplinäres Forschungsnetzwerk „Polar“ würde die internationale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Polarforschung deutlich steigern und langfristig den Forschungsstandort Deutschland sichern.



★ AWI   ▲ mittlere Standorte   ● kleine Standorte

## Nationale Förderung

### Bundesministerium für Bildung und Forschung

- Institutionelle Förderung
- Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren
- HGF-Forschungsprogramm: Changing Earth – Sustaining our Future
- Forschungsprogramm Mare:N

### Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

- Institutionelle Förderung

### Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

- Ressortforschungsplan

### Deutsche Forschungsgemeinschaft

- Schwerpunktprogramm Antarktischforschung
- SFB/Transregio Arktische Verstärkung
- Projektförderung im Normalverfahren

## Akteure

- Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI)
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
- Universität Bremen
- Bayerische Akademie der Wissenschaften
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
- Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU)
- Eberhard Karls Universität Tübingen
- Ecologic Institut Berlin
- Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
- Friedrich-Schiller-Universität Jena
- GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel
- Goethe-Universität Frankfurt
- Helmholtz-Institut für Funktionelle Marine Biodiversität (HIFMB)
- Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ)
- Institut für transformative Nachhaltigkeitsforschung Potsdam (IASS)
- Julius-Maximilians-Universität Würzburg
- Justus-Liebig-Universität Gießen
- Leibniz Universität Hannover
- Leibniz-Institut für Troposphärenforschung Leipzig (TROPOS)
- Ludwig-Maximilians-Universität München
- Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Jena
- Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg
- Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)
- Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
- Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg
- Technische Universität Dresden
- Universität Hamburg
- Universität Leipzig
- Universität Potsdam
- Universität Rostock
- Universität Trier
- Universität zu Köln
- Westfälische Wilhelms-Universität Münster

## Internationale Kooperation (Organisationen)

- Association of Polar Early Career Scientists (APECS)
- European Consortium for Ocean Research Drilling (ECORD)
- European Polar Board (EPB)
- Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC)
- International Permafrost Association (IPA)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
- International Ocean Discovery Program (IODP)
- Past Global Changes (PAGES)
- Scientific Committee on Oceanic Research (SCOR)
- World Climate Research Programme (WCRP/CLIVAR/CLIC)
- World Meteorological Organization (WMO)

### Antarktis

- Antarctic Treaty Consultative Meeting (ATCM)
- Convention on the Conservation of Antarctic Seals (CCAS)
- Convention on the Conservation of Antarctic Marine Living Resources (CCAMLR)
- Council of Managers of National Antarctic Programs (COMNAP)
- Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR)
- Southern Ocean Observing System (SOOS)

### Arktis

- Arctic Council (AC)
- Arctic Science Ministerial (ASM)
- International Arctic Science Committee (IASC)
- International Arctic Social Sciences Association (IASSA)
- Forum of Arctic Research Operators (FARO)
- Sustaining Arctic Observing Networks (SAON)
- University of the Arctic (UArctic)
- Pacific Arctic Group (PAG)



Ministerkonferenz des Arktischen Rats, Kiruna (Schweden) 2013

## 4.5 WISSENSTRANSFER UND KOMMUNIKATION

### Leitfragen:

#### Übergeordnete Frage:

Wie können Wissenstransfer und Kommunikation in der Polarforschung wesentlich vorangetrieben werden?

- Welche Erfolgsgeschichten beruhen auf dem Beitrag der Polarforschung?
- Wie werden gesellschaftlich relevante Themen definiert, die sich für den Wissenstransfer eignen?
- Welche Maßnahmen sind geeignet, um die jeweilige Zielgruppe zu erreichen?
- Wie können Wissenstransfer und Kommunikation in zukünftigen Forschungsprojekten verankert werden?
- Welche Art von Wissenstransfer und Kommunikation brauchen wir in Zukunft im Hinblick auf Klima- und Umweltschutz, Adaptionsstrategien und nachhaltige Entwicklung?

### Hintergrund

Fundierte wissenschaftliche Erkenntnisse sind die Grundvoraussetzung für die Beantwortung gesellschaftsrelevanter Fragen und die Entwicklung von Handlungsempfehlungen zur nachhaltigen Entwicklung. Der Transfer wissenschaftlicher Ergebnisse in die Gesellschaft und die damit verbundene

Handlungskompetenz sowie der Dialog mit Akteuren und Akteurinnen aus Gesellschaft, Politik und Wirtschaft ist daher von essenzieller Bedeutung. Gleichzeitig liefert dieser Dialog wichtige Impulse für die Wissenschaft, indem er gesellschaftsrelevante Fragen zu identifizieren und zu schärfen hilft, die damit auch auf die Forschungsagenda zurückwirken können. In dem Grundsatzpapier zur Wissenschaftskommunikation unterstreicht das BMBF deshalb, dass Wissenstransfer und Wissenschaftskommunikation grundlegend in der Wissenschaft verankert werden sollen.

Die Wissenschaftskommunikation hat in Bezug auf die Polarregionen zu einigen Erfolgsgeschichten beigetragen, aus denen Lehren für zukünftige Aktivitäten gezogen werden können. Exemplarisch können die Sachberichte des mit dem Friedensnobelpreis ausgezeichneten Weltklimarats IPCC genannt werden, insbesondere der im Jahr 2019 veröffentlichte Sonderbericht über Ozean und Kryosphäre (SROCC). Ein weiteres internationales Beispiel sind die Forschungsarbeiten zur Ausdünnung der Ozonschicht über der Antarktis, die zu konsequenten politischen Maßnahmen im Umgang mit FCKW und so zur Lösung des Problems geführt haben. Auf deutscher Ebene können die 2019 von der Bundesregierung verabschiedeten Leitlinien

der deutschen Arktispolitik genannt werden, zu deren Entwicklung der über den Arktisdialog organisierte Austausch zwischen Bundesministerien und Forschungseinrichtungen maßgeblich beigetragen hat.

### Status quo

Der Begriff ‚Wissenstransfer‘ steht für den Austausch von Wissen zwischen Forschung und Gesellschaft und zielt primär auf nicht wissenschaftliche Zielgruppen ab. Wissenschaftliche Ergebnisse werden genutzt, um konkrete Lösungsbeiträge für gesellschaftliche Herausforderungen zu entwickeln. Die wissenschaftliche Bearbeitung gesellschaftlicher Herausforderung erfordert einen Dialog mit nicht wissenschaftlichen Akteuren und Akteurinnen, folgt also einer transdisziplinären Forschungsstrategie. Wissenstransfer ist daher keine Einbahnstraße, sondern beinhaltet den Dialog mit Zielgruppen und Multiplikatoren sowie Multiplikatorinnen und die Vermittlung von Kompetenzen, sodass sich die Zielgruppen eigenverantwortlich zu der damit verbundenen Veränderung verhalten können. Dementsprechend bedeutet Wissenstransfer nicht nur die Vermittlung von wissenschaftlichen Ergebnissen, sondern insbesondere eine Übersetzungsleistung, indem wissenschaftliche Erkenntnisse für einen nicht wissenschaftlichen Kontext zieladäquat, bedarfsgerecht und zielgruppenspezifisch aufbereitet werden und gesellschaftliches Wissen in den Forschungsprozess eingebracht wird.

Der allgemeine Begriff ‚Wissenschaftskommunikation‘ ist wesentlich breiter definiert und beinhaltet neben dialogischen Formaten auch die Vermittlung allgemein verständlichen Wissens an ein breites Publikum. Die ebenfalls in diesen Bereich einzuordnende institutionelle Öffentlichkeitsarbeit ist nicht Thema dieses Kapitels. Im Gegensatz zur allgemeinen Kommunikation und Öffentlichkeitsarbeit, die Wissenschaft in einer Form präsentieren, die sie für ein allgemeines Publikum verständlich und greifbar macht, beinhaltet Wissenstransfer den Dialog mit einer vorab definierten Zielgruppe und vermittelt nicht nur allgemeinverständlich Wissen, sondern wissenschaftsbasierte, kontextadäquate Lösungen sowie kontextualisierte Handlungsempfehlungen für ein gemeinsam mit der Zielgruppe identifiziertes Problem.

Nicht jede wissenschaftliche Aktivität eignet sich für den Wissenstransfer – und muss es auch nicht. Der erste Schritt besteht daher in der Identifizierung gesellschaftlich relevanter Themen und der Formulierung der wissenschaftlich und anwendungsorientiert aus der Wissenschaft heraus zu beantwortenden Fragen. Bereits dieser erste Schritt beinhaltet den Dialog mit der Zielgruppe, wobei die Ergebnisse bereits bestehender Dialogformate

berücksichtigt werden sollten. Zielgruppen können sämtliche Gruppen der Gesellschaft, also Vertreter und Vertreterinnen aus Politik, Verwaltung, Wirtschaft, Zivilgesellschaft, Bildung etc. sowohl auf lokaler, regionaler, nationaler als auch auf internationaler Ebene sein. Der Wissenstransfer beginnt daher mit einem Stakeholderdialog zu Fragestellungen, Zielen und Kontexten sowie denkbaren Synergien, möglichen Interessengegensätzen und Berührungspunkten. Multiplikatoren und Multiplikatorinnen, mit denen gemeinsame Anknüpfungspunkte für die zu kommunizierenden Inhalte gefunden werden können, nehmen in diesem Zusammenhang eine wesentliche Funktion ein. Die Leitlinien der deutschen Arktispolitik betonen, dass die Bundesregierung für die Bewahrung der Rechte der indigenen und lokalen Bevölkerung in ihrem Lebensraum steht und sich für eine verantwortungsvolle Forschung einsetzt. Für die deutsche Arktisforschung sind daher arktisspezifische Foren und Gruppen wichtige Zielgruppen.

In Abhängigkeit von der jeweiligen Zielgruppe haben sich diverse Maßnahmen, Formate und Kanäle des Wissenstransfers als geeignet herausgestellt. Diese reichen in der Polarforschung von fest etablierten Dialogforen zwischen Politik und Wissenschaft, wie zum Beispiel dem Arktisdialog, über Onlineportale (zum Beispiel [meereisportal.de](http://meereisportal.de)) und allgemeinverständliche Publikationen zu gesellschaftlich relevanten Themen (*Fact Sheets*) bis hin zu Konsultationen zu aktuellen Themen (zum Beispiel EU-Arktispolitik und Umweltschutz im Rahmen des Antarktistratagssystems) etc., da Maßnahmen, Formate und Kanäle je nach Projektziel und gesellschaftlichem Kontext individuell zugeschnitten werden müssen.

Tabelle 1 gibt eine Übersicht über Formen zielgruppenspezifischer Wissenschaftskommunikation und dialogischen Wissenstransfers. Der Begriff ‚Stakeholder‘ bezeichnet diejenigen gesellschaftlichen Akteure und Akteurinnen, die potenziell von Forschung betroffen sind, sich für sie interessieren, daran interessiert sind, Einfluss auf Forschung zu nehmen, oder Einfluss darauf haben oder Forschungsergebnisse nutzen. Zu den Interessengruppen zählt eine Vielzahl öffentlicher und privater Sektoren, einschließlich politischer, wirtschaftlicher, staatlicher und nicht staatlicher Organisationen (NGOs) und der Gesellschaft insgesamt, einschließlich lokaler und indigener Völker (Rechteinhaber).

Methode	Zielgruppen und Multiplikatoren bzw. Multiplikatorinnen	Ziele
<b>Zielgerichtete Wissenschaftskommunikation</b>		
Website, soziale Medien	Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen, Stakeholder, Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen, interessierte Öffentlichkeit, Medienvertreter und Medienvertreterinnen, Lehrkräfte	Regelmäßig aktualisierte Plattformen, auf denen die Zielgruppen alle relevanten Informationen zum Projekt finden und lernen können, wie sie sich beteiligen und mit wem sie in Kontakt treten können
Pressemitteilungen	Medienvertreter und Medienvertreterinnen	Gezielte Informationen, um Aufmerksamkeit für das Projekt und seine Ergebnisse zu erzielen
Newsletter	Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen, Studierende, Stakeholder, Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen, Medienvertreter und Medienvertreterinnen, Lehrkräfte	Allgemeine Informationen über den Fortschritt des Projekts und wichtige Ereignisse
Fact Sheets, Publikationen, Medienbeiträge	Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen, Studierende, Stakeholder, Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen, Medienvertreter und Medienvertreterinnen, Lehrkräfte	Gezielte Informationen zu spezifischen Themen
E-Learning, Massive Open Online Course (MOOC), Blended-Learning-Formate	Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen, Studierende, Stakeholder, Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen, Medienvertreter und Medienvertreterinnen, Lehrkräfte, Zivilgesellschaft	Vertiefende Informationen zu spezifischen Themen
<b>Dialogischer Wissenstransfer</b>		
Veranstaltungen auf Konferenzen oder Workshops	Konferenzteilnehmer und Konferenzteilnehmerinnen, je nach Veranstaltung alle Zielgruppen	Gezielte Informationen zu spezifischen Themen, Möglichkeit, in einen Dialog einzutreten
Webinare	Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen, Studierende, Stakeholder, Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen, Medienvertreter und Medienvertreterinnen, Lehrkräfte	Gezielte Informationen zu spezifischen Themen, Möglichkeit, in einen Dialog einzutreten
Politik-Briefings	Politiker und Politikerinnen, Stakeholder, Medienvertreter und Medienvertreterinnen	Gezielte Informationen zu spezifischen Themen mit dem Ziel einer informierten politischen Handlung, Möglichkeit, in einen Dialog einzutreten
Online-Plattformen	Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen, Studierende, Stakeholder, Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen, Medienvertreter und Medienvertreterinnen, Lehrkräfte, Multiplikatoren und Multiplikatorinnen	Gezielt aufbereitetes Hintergrund- und Datenmaterial zu spezifischen Themen, Möglichkeit, in einen Dialog einzutreten
Bereitstellung von Daten, Modellen und operationellen Vorhersagen	Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen, Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen, Stakeholder, Behörden	Gezielte Informationen zu spezifischen Themen, insbesondere Beiträge zu IPCC, Verbesserung operationeller Modelle, Möglichkeit, in einen Dialog einzutreten

## Entwicklungsbedarf

Im Hinblick auf das übergeordnete Ziel, Wissenstransfer und Kommunikation in der Polarforschung voranzutreiben, ergibt sich auf den folgenden Gebieten Entwicklungsbedarf:

- Wissenstransfer als integraler Bestandteil von Forschungsaktivitäten:** Zur Verankerung des Wissenstransfers in der Polarforschung ist es notwendig, dass BMBF-geförderte Forschungsprojekte eine integrierte Transfer- und Kommunikationsstrategie beinhalten, in der Ziele, Zielgruppen und Maßnahmen des Wissenstransfers erörtert werden. Diese sollte von Anbeginn und gemeinsam mit dem Forschungsdesign von entsprechendem Fachpersonal gegebenenfalls zusammen mit lokalen Partnern und Partnerinnen ausgearbeitet und realistisch mit Ressourcen hinterlegt werden. Dabei sollte auch gewährleistet werden, dass Ergebnisse aus dem Stakeholder-Dialog kontinuierlich und fortlaufend in den Forschungsprozess zurückfließen.

Zusätzlich zur wissenschaftlichen Qualität sollte die Transfer- und Kommunikationsstrategie bei der Begutachtung von Forschungsanträgen berücksichtigt und Gutachterpanels mit entsprechendem fachlichen, ggf. wissenschaftsexternem Know-how besetzt werden. Aus- und Weiterbildungsangebote würden helfen, Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen besser für Wissenstransfer- und Kommunikationsaktivitäten zu qualifizieren. Gleichzeitig sollte Sorge dafür getragen werden, dass im Personaltableau der Projektteams neben der wissenschaftlichen Expertise auch eine dem Projektkontext und den Projektzielen entsprechende Transfer- und Kommunikationsexpertise vorhanden sowie im Projektbudget abgesichert ist. Dieser übergeordnete Bedarf entspricht dem Ziel des BMBF, Wissenschaftskommunikation als integralen Bestandteil der BMBF-Förderung zu etablieren.



- **Neue Formate des Wissenstransfers entwickeln und nutzen, um neben dem Wissenstransfer auch die Kompetenzvermittlung in die bisherige Kommunikation einzubinden:** Neben den etablierten Maßnahmen des Wissenstransfers müssen neue Formate inter- und transdisziplinärer Zusammenarbeit und kulturell angemessene und kontextspezifische Kommunikationsformen erarbeitet werden. Digitale, interaktive Formate und Visualisierungen, wie *Augmented and Virtual Reality*, *Massive Open Online Course (MOOC)*, *E-Learning* etc., bieten ein erhebliches Potenzial, um Inhalte bedarfsgerecht an verschiedene Gruppen zu kommunizieren, mit ihnen in einen Dialog zu treten und so Erfahrungsräume für die Zielgruppe zu schaffen. Der eröffnete Erfahrungsraum bietet somit Gelegenheit, ein tiefes Verständnis für neue Forschungsergebnisse und Akzeptanz für damit verbundene Maßnahmen zu schaffen. Diese Interaktion mit „Lernenden“ bietet aber auch die Möglichkeit, Rückmeldungen in die Weiterentwicklung der Forschung einzubeziehen, und liefert einen weitreichenden Erkenntnisgewinn für die Wissenschaft. Im Sinne eines transdisziplinären Forschungsansatzes kann auf diese Weise das gegenseitige Verständnis verstärkt und ein Perspektivenwechsel ermöglicht werden.
- **Transferaktivitäten als weiteres Kriterium für die Qualität der wissenschaftlichen Leistung:** Ein Hemmnis für den Wissenstransfer besteht darin, dass die wissenschaftliche Leistung nahezu ausschließlich über den Output in Form von wissenschaftlichen Publikationen bewertet wird. Um die Bedeutung des Wissenstransfers zu stärken, ist eine Anerkennung von Transfer- und Kommunikationsleistungen notwendig, die über die klassische Bewertung der wissenschaftlichen Leistung hinausgeht. Dies bedarf einer speziellen Indikatorik für Transferleistungen, die eine Evaluierung und eine Wirkungsmessung ermöglicht, aber auch über Narrative erfolgen kann. Die darüber hinausgehende Beurteilung der Wirkungsentfaltung in der Gesellschaft kann nur durch entsprechende Begleitforschung ermöglicht werden, für die explizit Zusatzmittel vorgesehen sein müssen.
- **Antarktisspezifische Kommunikation – Bewusstsein in der Gesellschaft stärken:** Die Antarktis und der sie umgebende Südliche Ozean sind gemäß Antarktisvertrag ein Gebiet, in dem das ökologische Gleichgewicht zu wahren ist, in dem Gebietsansprüche ruhen, in dem es keine militärischen Operationen und keinen Abbau von Bodenschätzen gibt und das der friedlichen Forschung und internationalen Kooperation gewidmet ist. Unter diesen günstigen und einzigartigen Voraussetzungen

kann bei entsprechend ausgeprägtem gesellschaftlichen und politischen Willen die Bedeutung der Antarktis auch für das Leben in anderen Kontinenten und auch auf der Nordhalbkugel, insbesondere im Hinblick auf Klimawandel, Biodiversität und Ökosystemdienstleistungen, untersucht werden und die Antarktis als Beispielregion für Schutzmaßnahmen dienen. Transfer- und Kommunikationsmaßnahmen, die dazu beitragen, dieses Verständnis in der Bevölkerung und bei Entscheidungsträgern wie Entscheidungsträgerinnen zu verbessern, sollten gestärkt werden.

- **Arktisspezifische Kommunikation – Dialog mit der lokalen und indigenen Bevölkerung:** Neben Zielgruppen innerhalb der deutschen und internationalen Gesellschaft sollten Transfer- und Kommunikationsaktivitäten der Arktisforschung insbesondere die diversen gesellschaftlichen Gruppen in der Arktis berücksichtigen. Falls angebracht sollten Kommunikations- und Transferaktivitäten im Dialog mit der indigenen und lokalen Bevölkerung und ihren politischen, administrativen und wirtschaftlichen Vertretungen erarbeitet werden, insbesondere wenn Forschungsarbeiten auf indigenem Land durchgeführt werden. Derartige Aktivitäten unterstützen die Umsetzung der deutschen Arktisleitlinien, fördern die Einbeziehung lokalen und indigenen Wissens als gleichwertige Wissensform und ermöglichen transdisziplinäre Forschungsansätze.

Angesichts der rasanten Veränderungen in den Polargebieten kommt dem Wissenstransfer und der Kommunikation von Forschungsergebnissen in die Gesellschaft eine immer bedeutendere Stellung zu. Wissensbasierte Entscheidungen zu Klima- und Umweltschutz, Anpassungsstrategien und nachhaltiger Entwicklung bedürfen eines intensiven Dialogs zwischen Wissenschaft und Gesellschaft und damit auch innovativer Maßnahmen des Wissenstransfers und der Kommunikation.

## Beteiligte Autorinnen und Autoren

### Wissenschaftlicher Begleitkreis MARE:N

#### Polarforschung

- Christian Beer (Universität Hamburg)
- Nicole Biebow (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Matthias Braun (Universität Erlangen-Nürnberg)
- Nina Döring (IASS Potsdam – Institute for Advanced Sustainability Studies e. V.)
- Christoph Gaedicke (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe – BGR)
- Julian Gutt (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Wilhelm Hagen (Universität Bremen)
- Judith Hauck (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Günther Heinemann (Universität Trier)
- Heike Herata (Umweltbundesamt – UBA)
- Jürgen Holfort (Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie – BSH)
- Thomas Jung (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Heidi Kassens (GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel)
- Sybille Klenzendorf (WWF)
- Andreas Läufer (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe – BGR)
- Gerrit Lohmann (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Uwe Nixdorf (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Simon Plass (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – DLR)
- Petra Quillfeldt (Universität Gießen)
- Monika Rhein (IUP/MARUM, Universität Bremen, Vorsitzende NK SCAR/IASC)
- Volker Rachold (Deutsches Arktisbüro am Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Arne Riedel (Ecologic Institut)
- Torsten Sachs (Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum – GFZ)
- Manfred Wendisch (Universität Leipzig)

#### Mit Kapitelbeiträgen von:

- Holger Auel (Universität Bremen)
- Kai Bischof (Universität Bremen)
- Michael Bittner (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – DLR)
- Angelika Brandt (Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum)

- Antje Boetius (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Victor Brovkin (Max-Planck-Institut für Meteorologie Hamburg)
- Erhard Diedrich (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – DLR)
- Andreas Dietz (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – DLR)
- Stephan Dudeck (University of Lapland)
- Olaf Eisen (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Hauke Flores (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Stephan Frickenhaus (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Michael Fritz (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Johannes Fürst (Universität Erlangen-Nürnberg)
- Helge Goessling (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Klaus Grosfeld (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Guido Grosse (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Georg Guggenberger (Universität Hannover)
- Stefan Hain (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Martin Heimann (Max-Planck-Institut für Biogeochemie Jena)
- Andreas Herber (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Helena Herr (Universität Hamburg)
- Thora Herrmann (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ)
- Ulrike Herzschuh (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Mario Hoppema (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Martin Howarth (Technische Universität Dresden)
- Angelika Humbert (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Torsten Kanzow (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Michael Karcher (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Ulf Karsten (Universität Rostock)
- Frank Kauker (OASYS GmbH)
- Peter Köhler (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Lisa Küchelbacher (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – DLR)

- Frank Lamy (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Moritz Langer (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Gisela Lannig (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Hugues Lantuit (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Lester Lembke-Jene (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Susanne Liebner (Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum – GFZ)
- Heike Link (Universität Rostock)
- Martina Löbl (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Cornelia Lüdecke (München)
- Andreas Macke (Leibniz-Institut für Troposphärenforschung e. V.)
- Felix Mark (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Dirk Mengedoht (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Bettina Meyer (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Heinrich Miller (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Anne Morgenstern (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Juliane Müller (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Bettina Münch-Epple (WWF)
- Marcel Nicolaus (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Eva-Maria Nöthing (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Dirk Notz (Universität Hamburg)
- Elle Merete Omma (Saami Council)
- Mustafa Osama (ThINK – Thüringer Institut für Nachhaltigkeit und Klimaschutz)
- Lavinia Patara (GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel)
- Dieter Piepenburg (GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel)
- Hans-Otto Pörtner (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Christian Printzen (Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum)
- Johannes Quaas (Universität Leipzig)
- Thomas Rackow (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Lutz Reinhardt (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe – BGR)
- Annette Rinke (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Ralf Röchert (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Gertrude Saxinger (Austrian Polar Research Institute)
- Barbara Schellhammer (Hochschule für Philosophie München)
- Ingo Schewe (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Ralf Schiebel (Max-Planck-Institut für Chemie Mainz)
- Daniel Scholz (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Thomas Soltwedel (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Gunnar Spreen (Universität Bremen)
- Rüdiger Stein (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Daniel Steinhage (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Lars Stemmler (Bremenports)
- Katharina Teschke (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Ralf Tiedemann (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Vilena Valeeva (IASS Potsdam – Institute for Advanced Sustainability Studies e. V.)
- Christine Wesche (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Ilka Weikusat (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Martin Werner (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Thomas Westerhold (MARUM - Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen)
- Nicole Wienrich (IASS Potsdam – Institute for Advanced Sustainability Studies e. V.)
- Ricarda Winkelmann (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung – PIK)
- Karsten Wurr (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)
- Sabine Wüst (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – DLR)
- Ying Ye (Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung – AWI)

## Quellen und Literatur

- ACIA (2004): Impacts of a Warming Arctic. Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge University Press, 140 Seiten, erhältlich unter <https://www.amap.no/documents/doc/impacts-of-a-warming-arctic-2004/786>
- AMAP (2018): AMAP Assessment 2018: Arctic Ocean Acidification. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Tromsø, 193 Seiten
- AMAP (2018): AMAP Assessment 2018: Biological Effects of Contaminants on Arctic Wildlife and Fish. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Tromsø, 91 Seiten
- AMAP CEC (2016): AMAP Assessment 2016: Chemicals of Emerging Arctic Concern. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, 369 Seiten
- AMAP (2015): AMAP Assessment 2015: Black carbon and ozone as Arctic climate forcers. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, 123 Seiten
- AMAP (2013): AMAP Assessment 2013: Arctic Ocean Acidification. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, 107 Seiten
- AMAP SLCF (in Druck): AMAP Assessment 2021
- AMAP/EU-PolarNet (2020): AMAP/EU-PolarNet International Stakeholder Workshops on Research Needs. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Tromsø
- Arctic Council Emergency Prevention, Preparedness and Response (EPPR) Working Group (2019): EPPR ARCSAFE: Summary Status Report, 16 Seiten
- AWI (2016): Fact sheet. Weddellmeer – 8 gute Gründe für ein Meeresschutzgebiet, erhältlich unter [https://www.awi.de/fileadmin/user\\_upload/AWI/Im\\_Fokus/Meereis/Downloads\\_FactSheets/WEB\\_DE\\_Factsheet\\_Weddellmeer.pdf](https://www.awi.de/fileadmin/user_upload/AWI/Im_Fokus/Meereis/Downloads_FactSheets/WEB_DE_Factsheet_Weddellmeer.pdf)
- Beszteri, B.; Havermans, C.; Auel, H.; Hagen, W. & Trimborn, S. (2020): Planktisches Leben im Südpolarmeer, in: Biologie in unserer Zeit, Jg. 50, S. 28–35
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (2018): Co-operation in Arctic Science – Challenges and Joint Actions. Report of the 2<sup>nd</sup> Arctic Science Ministerial. Berlin, 25.–26. Oktober 2018
- Bundesregierung (2019): Leitlinien deutscher Arktispolitik – Verantwortung übernehmen, Vertrauen schaffen, Zukunft gestalten, erhältlich unter <https://www.auswaertiges-amt.de/blob/2239806/0c93a2823fcff8ce9f6bce5b6c87c171/arktisleitlinien-data.pdf>
- CAFF & PAME (2017): Arctic Invasive Alien Species: Strategy and Action Plan, Conservation of Arctic Flora and Fauna and Protection of the Arctic Marine Environment Akureyri, Iceland. ISBN: 978-9935-431-65-3
- CAFF (2017): State of the Arctic Marine Biodiversity Report. Conservation of Arctic Flora and Fauna International Secretariat, Akureyri, Iceland. ISBN 978-9935-431-63-9
- De Broyer, C.; Koubbi, P.; Griffiths, H. J.; Raymond, B.; d’Udekem d’Acoz, C.; Van de Putte, A. P.; Danis, B.; David, B.; Grant, S.; Gutt, J.; Held, C.; Hosie, G.; Huettmann, F.; Post, A. & Ropert-Coudert, Y. (2014): Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Cambridge: SCAR, erhältlich unter <https://www.environments.aq/>
- Deutsches Klima Konsortium (DKK) und Konsortium Deutscher Meeresforschung (KDM) (Hrsg.) (2019): Zukunft der Meeresspiegel: Fakten und Hintergründe aus der Forschung, 31 Seiten, erhältlich unter [https://www.deutsches-klima-konsortium.de/fileadmin/user\\_upload/pdfs/Publikationen\\_DKK/dkk-kdm-meeresspiegelbroschuere-web.pdf](https://www.deutsches-klima-konsortium.de/fileadmin/user_upload/pdfs/Publikationen_DKK/dkk-kdm-meeresspiegelbroschuere-web.pdf)
- EU-PolarNet (2020): Integrated European Polar Research Programme (EPRP) (hrsg. v. Velázquez, D.; Houssais, M. N. & Biebow, N.). Bremerhaven: Alfred-Wegener-Institut
- Gutt J. et al. (2020): Antarctic ecosystems in transition – life between stresses and opportunities, in: Biological Reviews, erhältlich unter <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/brv.12679>
- Haddaway, N. R.; Cooke, S. J.; Lesser, P.; Macura, B.; Nilsson, A. E.; Taylor, J. J. & Raito, K. (2019): Evidence of the impacts of metal mining and the effectiveness of mining mitigation measures on social-ecological systems in Arctic and boreal regions: a systematic map protocol, in: Environmental Evidence, Nr. 8, S. 9 ff.
- Heinemann, G.; Braun, M.; Brey, T.; Damaske, D.; Melles, M.; Rhein, M. & Willmes, S. (Hrsg.) (2017): Polarforschungsagenda 2030: Status und Perspektiven der deutschen Polarforschung, DFG-Statusbericht des deutschen Nationalkomitees SCAR/IASC. Universität Trier, 160 Seiten, ISBN 978-3-00-057243-2

Hempel, G. & Piepenburg, D. (2010): Nord- und Südpolarmeer im Klimawandel. Ein biologischer Vergleich, in: *Biologie in unserer Zeit*, Jg. 40, S. 386–395, DOI: 10.1002/biuz.201010437

Herr, H. (2020): Rückkehr der Finnwale in die Antarktis: 30 Jahre nach Beendigung des kommerziellen Walfangs. *Biologie in unserer Zeit*, 50, 338–345.

IASC (2016): Integrating Arctic Research – A Roadmap for the Future. 3<sup>rd</sup> International Conference on Arctic Research Planning ICARP III, erhältlich unter [https://icarp.iasc.info/images/articles/downloads/ICARPIII\\_Final\\_Report.pdf](https://icarp.iasc.info/images/articles/downloads/ICARPIII_Final_Report.pdf)

IASC (2020): The International Arctic Science Committee's 2020 State of Arctic Science Report, erhältlich unter [https://iasc.info/images/media/print/SAS2020\\_web.pdf](https://iasc.info/images/media/print/SAS2020_web.pdf)

Johnson, N.; Behe, C.; Danielsen, F.; Krümmel, E. M.; Nickels, S. & Pulsifer, P. L. (2016): Community-Based Monitoring and Indigenous Knowledge in a Changing Arctic: A Review for the Sustaining Arctic Observing Networks. Final report to Sustaining Arctic Observing Networks. March 2016. Ottawa: Inuit Circumpolar Council

Kanz, B.; Büdel, B.; Jund, P.; Karsten, U. & Printzen, C. (2020): Antarktische Vegetation – Leben zwischen Eis und Felsen, in: *Biologie in unserer Zeit*, Jg. 50, S. 122–133

Larsen, J. & Fondahl, G. (Hrsg.) (2014): Arctic Human Development Report. Regional Processes and Global Linkages (AHDR-II), erhältlich unter <http://norden.diva-portal.org/smash/get/diva2:788965/FULLTEXT03.pdf>

Latola, K.; Scheepstra, A.; Pawlak, J. & Saxinger, G. (Hrsg.) (2020): White Paper on status of stakeholder engagement in polar research (EU-PolarNet White Paper), erhältlich unter [https://eu-polarnet.eu/wp-content/uploads/2020/11/EU\\_PolarNet\\_Stakeholder\\_final.pdf](https://eu-polarnet.eu/wp-content/uploads/2020/11/EU_PolarNet_Stakeholder_final.pdf)

maribus (Hrsg.) (2019): World Ocean Review 6: Arktis und Antarktis – extrem, klimarelevant, gefährdet. Kapitel 5: Politik und Wirtschaft in den Polarregionen (S. 240–296). Hamburg: maribus

PAME (2020): Arctic Shipping Status Report (ASSR), 2020. Teil 1: „The increase in Arctic Shipping“; Teil 2: „Heavy Fuel Oil (HFO) Use by ships in the Arctic 2019“

PAME (2019): Desktop Study on Marine Litter including Microplastics in the Arctic (May 2019)

PAME (2019): Underwater Noise in the Arctic: A State of Knowledge Report, Rovaniemi, May 2019. Akureyri: Protection of the Arctic Marine Environment (PAME) Sekretariat

PAME (2009): Arctic Marine Shipping Assessment 2009 Report.

Peeken, I.; Primpke, S.; Beyer, B.; Gütermann, J.; Katlein, C.; Krumpfen, T.; Bergmann, M.; Hehemann, L. & Gerdtts, G. (2018): Arctic sea ice is an important temporal sink and means of transport for microplastic, in: *Nature Communications*, Nr. 9, Artikel 1505

Poppel, B. (Hrsg.) (2015): SLiCA: Arctic living conditions – Living conditions and quality of life among Inuit, Saami and indigenous peoples of Chukotka and the Kola Peninsula, erhältlich unter <http://norden.diva-portal.org/smash/get/diva2:790312/FULLTEXT02.pdf>

Pörtner, H.-O.; Roberts, D. C.; Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Tignor, M.; Poloczanska, E.; Mintenbeck, K.; Alegría, A.; Nicolai, M.; Okem, A.; Petzold, J.; Rama, B. & Weyer N. M. (Hrsg.) (2019): Der Ozean und die Kryosphäre in einem sich wandelnden Klima: Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. Ein Sonderbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC), deutsche Übersetzung, 44 Seiten, erhältlich unter <https://www.de-ipcc.de/252.php> (englisches Original: IPCC Special report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Summary for Policymakers, erhältlich unter <https://www.ipcc.ch/srocc/>)

Quillfeldt, P., & Masello, J. F. (2019): Seevögel im Südpolarmeer: Flexibel in einer Umwelt voller Herausforderungen. *Biologie in unserer Zeit*, 49, 282–289.

Röhler, L.; Schlabach, M.; Haglund, P.; Breivik, K.; Kallenborn, R. & Bohlin-Nizzetto, P. (2020): Non-target and suspect characterisation of organic contaminants in Arctic air – Part 2: Application of a new tool for identification and prioritisation of chemicals of emerging Arctic concern in air, in: *Atmos. Chemistry and Physics*, Nr. 20, S. 9031–9049

Saami Council (2019): The Sámi Arctic Strategy/Sámi Árkttalas Áigumusat/Samisk Strategi For Arktiske Saker, erhältlich unter <https://static1.squarespace.com/static/5dfb35a66f00d54ab0729b75/t/5e71ebcc8554fb16d61009bc/1584524293838/Sameradet+arctic+strategies+Web.pdf>

SDWG (2017): SDWG Strategic Framework 2017, erhältlich unter <https://oaarchive.arctic-council.org/bitstream/handle/11374/1940/SDWG-Framework-2017-Final-Print-version.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Snoeijs-Leijonmalm, P.; Flores, H.; Volckaert, F.; Niehoff, B.; Schaafsma, F. L.; Hjelm, J.; Hentati-Sundberg, J.; Niiranen, S.; Crépin, A.-S. & Österblom, H. (2020): Review of the research knowledge and gaps on fish populations, fisheries and linked ecosystems in the Central Arctic Ocean (CAO). European Commission Study

Solveig Glomsrød, S.; Duhaime, G. & Aslaksen, J. (Hrsg.) (2017): The Economy of the North 2015 (ECONOR III), erhältlich unter [https://www.ssb.no/en/natur-og-miljo/artikler-og-publikasjoner/\\_attachment/299576?ts=15aea97d740](https://www.ssb.no/en/natur-og-miljo/artikler-og-publikasjoner/_attachment/299576?ts=15aea97d740)

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2013): Das Antarktisvertragsystem, erhältlich unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/nachhaltigkeit-strategien-internationales/antarktis/das-antarktisvertragssystem>

Van Pelt, T. I.; Huntington, H. P.; Romanenko, O. V. & Mueter, F. J. (2017): The missing middle: Central Arctic Ocean gaps in fishery research and science coordination, in: Marine Policy, Jg. 85, S. 79–86

Virkkala, A.-M.; Abdi, A. M.; Luoto, M. & Metcalfe, D. B. (2019): Identifying multidisciplinary research gaps across Arctic terrestrial gradients, in: Environmental Research Letters, Jg. 14, Nr. 12, erhältlich unter <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab4291/pdf>

Wong, F.; Hung, H.; Dryfhout-Clark, H.; Aas, W.; Bohlin-Nizzetto, P.; Breivik K.; Nerentorp Mastromonaco, M.; Brorström Lundén, E.; Ólafsdóttir, K.; Sigurðsson, Á.; Vorkamp, K.; Bossi, R.; Skov, H.; Hakola, H.; Barresi, E.; Sverko, E.; Fellin P.; Li, H.; Vlasenko, A.; Zapevalovk, M.; Samsonov, D. & Wilson, S. (2021): Time trends of persistent organic pollutants (POPs) and Chemicals of Emerging Arctic Concern (CEAC) in Arctic air from 25 years of monitoring, in: Science of the Total Environment, Nr. 775, erhältlich unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721001753>

Zacher, K.; Bischof, K. & Wiencke, C. (2019): Die Wälder der Antarktis, in: Biologie in unserer Zeit, Jg. 49, S. 436–442

***Der Projektträger Jülich hat die Arbeit des Begleitkreises insbesondere durch Lydia Gustavs und Susanne Fretzdorff tatkräftig unterstützt. Die Entstehung des Dokuments wurde durch folgenden Prozess ermöglicht:***

- Juni 2020 – Konsultationsprozesse im Rahmen des Arktisdialogs bzw. des SCAR/ IASC Jahrestreffen
- August 2020 – Berufung der Vorsitzenden und Auswahl des Begleitkreises
- September 2020 – Konstituierende Sitzung des Begleitkreises
- Dezember 2020, Januar, Februar, März und April 2021 – Arbeitstreffen des Begleitkreises
- Mai 2021 – Übergabe des Konzeptpapiers an das BMBF

## **Impressum**

### **Herausgeber:**

Wissenschaftlicher Begleitkreis MARE:N „Forschungsagenda Polarregionen im Wandel“

### **Satz und Layout:**

Projektträger Jülich, Forschungszentrum Jülich GmbH

### **Lektorat:**

Wissenschaftslektorat Zimmermann – lektorat-zimmermann.de

### **Bildnachweis:**

Titel: Stefanie Arndt (AWI) | S. 5, 68: Projektträger Jülich | S. 6: Michael Fischer (AWI) | S. 12, 16: Thomas Ronge (AWI) | S. 20: Torsten Sachs (GFZ) | S. 24: AWI/MARUM, Julian Gutt | S. 28: Julian Gutt (AWI) | S. 32: Nina Döring (IASS Potsdam) | S. 38, 70: Volker Rachold (AWI) | S. 44: Nils Sparwasser (DLR) und Nikolay Koldunov (AWI) | S. 50: DKRZ/AWI | S. 54: @Alfred-Wegener-Institut/Christine Wesche, Projektträger Jülich | S. 62: © DLR (CC-BY 3.0) | S. 66: Josefine Lenz (AWI)

### **Druck:**

WEISS-Druck GmbH & Co. KG, Monschau

### **Stand:**

Mai 2021

