

Der „World Ocean Review“ ist eine Kooperation der Partner:



Im Kieler Netzwerk Future Ocean untersuchen mehr als 250 Forschende aus den Natur-, Wirtschafts-, Rechts-, Sozial- und Gesellschaftswissenschaften gemeinsam den Ozean- und Klimawandel mit dem Ziel, Handlungsoptionen zu entwickeln für einen nachhaltigen Schutz und Nutzen des Ozeans. Partner sind die Christian-Albrechts-Universität, das GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung, das Institut für Weltwirtschaft und die Muthesius Kunsthochschule.



Das International Ocean Institute wurde 1972 als gemeinnützige Nichtregierungsorganisation von Elisabeth Mann Borgese gegründet. Es besteht aus einem Netzwerk von verschiedenen Niederlassungen, die über die ganze Welt verteilt sind, und hat seinen Hauptsitz in Malta. Das IOI setzt sich für eine friedliche und nachhaltige Nutzung des Ozeans ein.

mare

Die Zeitschrift der Meere wurde 1997 von Nikolaus Gelpke in Hamburg gegründet und erscheint alle zwei Monate in deutscher Sprache. Mare rückt den Stellenwert, den das Meer als Lebens-, Wirtschafts- und Kulturraum für den Menschen bietet, in das Bewusstsein der Öffentlichkeit. Neben dem Magazin bringt der mareverlag zweimal im Jahr ein Buchprogramm heraus.



Das Konsortium Deutsche Meeresforschung bündelt die Expertise der deutschen Meeresforschung. Seine Mitglieder setzen sich aus allen Forschungseinrichtungen zusammen, die in Meeres-, Polar- und Küstenforschung aktiv sind. Ein Hauptanliegen des KDM ist, die Interessen der Meeresforschung gegenüber nationalen Entscheidungsträgern und der EU sowie gegenüber der Öffentlichkeit gemeinsam zu vertreten.

6

Arktis und Antarktis – extrem, klimarelevant, gefährdet

Herausgegeben von
maribus in Kooperation mit



future ocean
KIEL MARINE SCIENCES



mare



6
**Arktis und Antarktis –
extrem, klimarelevant,
gefährdet**

Vorwort

„Warum das Meer?“, lautete vor 30 Jahren oft die Frage nach meiner beruflichen Ausrichtung. Die gängigen Assoziationen mit den Ozeanen waren damals die TV-Serie „Geheimnisse des Meeres“ von Jacques Cousteau, Folklore in Hafenvierteln, die Badestrände Spaniens und Italiens oder auch maritime Sportarten. Ein bekannter deutscher Autor sagte mir gegenüber einmal: „Das Meer interessiert mich überhaupt nicht.“ Das Meer als Ökosystem wurde genauso wenig wahrgenommen, wie man seinen Einfluss auf unser Leben erkannte.

Das hat sich wesentlich und nachhaltig verändert. Heute verstehen wir immer noch nur einen Bruchteil der chemischen, physikalischen und biologischen Vorgänge und Zusammenhänge im Meer, aber immerhin reicht das Wissen mittlerweile, um die Komplexität des Ökosystems zu erkennen, seine Fragilität und somit den Schutzbedarf. Wir wissen zum Beispiel um die Bedeutung und den Einfluss von Nährstoffen, die sensiblen Reaktionen der Lebewesen auf Veränderungen des pH-Wertes oder der Temperatur. Solches Wissen zeigt uns inzwischen deutlich, wie verletzlich das Ökosystem der Ozeane ist – und wie groß die Verantwortung, die wir gegenüber diesem riesigen Reich tragen.

Aber auch der Einfluss der Meere auf unseren Alltag wird zunehmend deutlich und wirkt sich immer mehr auf unser Denken aus. Nicht nur die grundlegenden Prozesse wie Wolken- oder Sturmbildung auf hoher See oder der klimatische Einfluss des Golfstroms auf Westeuropa, sondern auch die Folgen unseres Handelns werden zunehmend spürbar: häufigere Stürme an den Küsten, Überflutungen durch den sich erwärmenden Ozean, Fischarten, die in kühlere Gewässer wandern – das Meer ist sichtbarer geworden.

War es vor 30 Jahren unter Meeresökologen noch verpönt, sich an die Presse zu wenden, ist das Konsortium Deutsche Meeresforschung heute sogar Partner des „World Ocean Review“. Die Fortschritte in der Forschung, die öffentliche Positionierung von Wissenschaftlern und dass man anfängt zu begreifen, welchen immensen Einfluss die Meere auf unseren Alltag haben, sind Zeichen, die Hoffnung machen.

Insbesondere die so fernen Gebiete der Pole, Antarktis und Arktis, sind gute Beispiele für das oben Beschriebene. Bis vor wenigen Jahren waren dies die Reiche historischer Expeditionen, wie jenen von Scott oder Amundsen, und die Heimat exotischer Pinguine oder Eisbären. Jetzt wissen wir um die herausragende Bedeutung der Polargebiete für unsere Klimazukunft, sind sie Sinnbilder für die Folgen unserer Industrieentwicklung, steht das Abschmelzen des ehemals ewigen Eises für den Kontrollverlust unseres Handelns.

Im vorliegenden sechsten „World Ocean Review“ zeigen wir nicht nur viele Fakten und Daten zu den Polargebieten, wir verdeutlichen nicht nur die erschreckende Bedrohung dieser sensiblen Ökosysteme, sondern wir veranschaulichen auch ihre maßgebliche Rolle für die Lebensfähigkeit unseres Planeten in der Zukunft. Niemand wird jetzt noch behaupten können, dass ihn die Meere nicht interessierten. Sie sind die Zukunft eines jeden Einzelnen.



Nikolaus Gelpke

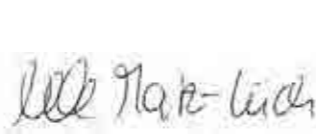
Initiator des „World Ocean Review“, Verleger des mareverlags und Präsident des IOI

Die Polarregionen sind besonders kalt, rau, dünn besiedelt. Durch ihre Rolle für das Erdklima und den globalen Ozean sind sie aber mit dem Leben aller Menschen verbunden. Zudem sind sie höchst sensibel für klimatische Änderungen, und die Polarregionen haben sich in den letzten Jahrzehnten besonders stark erwärmt. Dadurch schmelzen Meer- und Festlandeis. Das Schmelzwasser von Landeis erhöht den Meeresspiegel im selben Maße wie die Erwärmung des restlichen Ozeans. Weiterhin werden abbaubare Ressourcen in vormals unzugänglichen Regionen zugänglich, neue Fischfanggebiete sowie kürzere Schifffahrtswege erschlossen, deren Nutzungsrechte am und unter dem Meeresboden insbesondere im arktischen Polarmeer noch nicht abschließend geklärt sind. Aufgrund von Unstimmigkeiten der Anrainerstaaten hinsichtlich der geografischen Reichweite ihrer Rechte an Erdöl- und Erdgasvorkommen sowie der völkerrechtlichen Regelung des Zugangs zu Fischbeständen oder Seewegen wie der Nordwestpassage ist die Arktispolitik Gegenstand wachsender außenpolitischer Spannungen. In der Antarktis ist die geografische und rechtliche Lage grundsätzlich anders, weil es auf Grundlage des Antarktisvertrags derzeit keine Ausübung souveräner Rechte einzelner Staaten an diesem Kontinent gibt. Der Südpol liegt unterm Gletschereis, und der Antarktisvertrag erlaubt nur die wissenschaftliche Exploration – aber außer Fischfang keinen Ressourcenabbau oder eine militärische Nutzung. Allerdings machen wärmere Ozeantemperaturen unter den Eisschelfen uns Sorge, denn die könnten eine Instabilität der Eispanzer und damit massive Meeresspiegelanstiege ermöglichen. Die Forschung ist hier aktiv, aber noch nicht in der Lage, die Risiken abschließend zu bewerten.

Die Entwicklungen in den Polarregionen verdeutlichen eine der Herausforderungen für die Ozeanforschung, über Disziplinen hinweg Lösungswege zu erarbeiten. Nutzen wir Forschungsergebnisse bestmöglich? Global sind die Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen ein guter, leider zu wenig bekannter Kompass. Hoffnungsvoll stimmt uns die kommende Dekade der Meereswissenschaften für nachhaltige Entwicklung (United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development, 2021–2030), die zum Ziel hat, Wissen zu verbinden, zu vergrößern und verfügbar zu machen, um kluge Entwicklungspfade in der Mensch-Ozean-Beziehung zu ermöglichen. Sie erfordert mehr Engagement im Bereich der globalen und lösungsorientierten Erforschung des Ozeans. In Kiel arbeiten wir im Future-Ocean-Netzwerk gemeinsam über Disziplinen hinweg für einen verbindenden Informationsfluss mit Akteuren aus Politik, Wirtschaft und Gesellschaft. Gemeinsam und über nationale, disziplinäre und institutionelle Grenzen hinweg sollten wir einen gerechteren und nachhaltigeren Umgang mit dem Ozean einfordern und damit seine ökosystemaren Leistungen auch für nachkommende Generationen sichern. Zunächst wünschen wir Ihnen mit der vorliegenden Lektüre einen spannenden und erhellenden Einblick in die Polarregionen der Erde!



Prof. Dr. Martin Visbeck
GEOMAR Helmholtz-Zentrum
für Ozeanforschung Kiel
Co-Sprecher Future Ocean



Prof. Dr. Nele Matz-Lück
Christian-Albrechts-
Universität zu Kiel
Co-Sprecherin Future Ocean

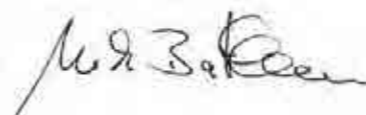


Prof. Dr. Ralph Schneider
Christian-Albrechts-
Universität zu Kiel
Co-Sprecher Future Ocean

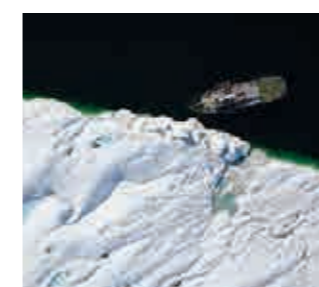
Auch 2019 belegen die Satellitenbeobachtungen den fortschreitenden Verlust großer Meer eisgebiete in der Arktis und die fortschreitende Dynamisierung antarktischer und grönländischer Kontinentaleismassen. Die vorliegende sechste Ausgabe des „World Ocean Review“ setzt diese und andere aktuelle Forschungsthemen in den geologisch-historischen Kontext, der die Geschwindigkeit und die Ausmaße derzeitiger Veränderungen unterstreicht.

Immer mehr Forschungsergebnisse zeigen, wie intensiv das Klima und damit das Leben, wie wir es in Mitteleuropa schätzen, auf unserem Planeten auch von den Veränderungen in den Polregionen beeinflusst wird. Besonders deutlich wird dies bei den Veränderungen des Meeresspiegels, in der Vergangenheit wie vermutlich bald in der Zukunft. Schwindende Meereisflächen im Sommer in der Arktis öffnen nicht nur neue Schiffrouten, zum ökonomischen Nutzen für den Seetransport zwischen den Kontinenten. Dies könnte aber auch eine zunehmende Gefahr für das arktische Ökosystem werden. Dieses Ökosystem ist an eine halbjährige Dunkelphase, an tiefe Temperaturen und eine lebenserhaltende Eis- und Schneedecke angepasst. Wie genau die Stabilität des Systems von den physikochemischen Rahmenbedingungen abhängt und welche biologischen Prozesse sich im und unter dem Eis im Winter abspielen, soll erstmals die im September 2019 begonnene winterliche und international besetzte Transpolardrift MOSAiC mit dem deutschen Forschungseisbrecher „Polarstern“ erkunden. Wieder einmal erweist sich die deutsche Polar-, Meeres- und Küstenforschung als Wegweiser im internationalen Kontext. Ein Fundament der Innovationskraft unserer Forschung ist in meinen Augen der Zusammenschluss der 19 größten Meeresforschungsorganisationen der Bundesrepublik im Konsortium Deutsche Meeresforschung – KDM. KDM ist seit Langem der Garant einer aktiven nationalen Forschungskoordination und für einen intensiven internationalen Austausch. Durch die Gründung der Deutschen Allianz Meeresforschung – DAM – im Juli 2019 ist ein zusätzliches Element deutscher Meeresforschung geschaffen, das große, globale Fragestellungen im Verbund vieler Forschungseinrichtungen bearbeitet, dabei Handlungswissen erarbeitet – und so die Kommunikation und den Transfer des aktuellen Wissens in zahlreiche Bereiche unserer Gesellschaft umsetzt. Deutschland verfügt mit KDM und DAM über weltweit einzigartige Organisationsstrukturen in der Meeresforschung. Dies sind ideale Voraussetzungen, um die forschungspolitischen Ziele der Bundesregierung, wie sie im MARE:N-Programm skizziert sind, tatkräftig umzusetzen.

Der vorliegende Band des „World Ocean Review“ beleuchtet aus der Sicht unterschiedlichster Forschungsdisziplinen die Vielfalt unserer polaren Ökosysteme und deren Effekte auf unsere Erde in der Vergangenheit, heute und vermutlich auch in der Zukunft, und damit auf unser aller Wohl.



Prof. Dr. Ulrich Bathmann
Direktor des Leibniz-Instituts für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) und
Vorsitzender des Konsortiums Deutsche Meeresforschung (KDM)



Vorwort 5

Arktis und Antarktis – Naturräume in Poleposition **Kapitel 1**

Eine kurze Geschichte der Polarregionen 12
 Der Mensch erobert die Polargebiete 34
 CONCLUSIO: Arktis und Antarktis – zwei grundverschiedene Polargebiete 57

Die Polargebiete als Teil des globalen Klimasystems **Kapitel 2**

Warum es in den Polarregionen so kalt wird 60
 Eisschollen, Eisschilde und das Meer 78
 CONCLUSIO: Eine Kettenreaktion mit frostigem Ende 107

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Polarregionen **Kapitel 3**

Die Pfade der Wärme 110
 Der Rückzug des Eises 130
 CONCLUSIO: Mehr Wärme – viel weniger Eis 175

Die Flora und Fauna der Polarregionen **Kapitel 4**

Ein Leben in der Kälte 178
 Das Leben im Meer 204
 Polare Ökosysteme auf dem Rückzug 218
 CONCLUSIO: Hochspezialisiert und extrem gefährdet 237

Politik und Wirtschaft in den Polarregionen **Kapitel 5**

Die Arktis und die Antarktis als politische Arenen 240
 Ein Wirtschaftsaufschwung mit Nebenwirkungen 258
 CONCLUSIO: Wachsendes Interesse an den Polarregionen 295

Gesamt-Conclusio 296

Glossar 303
 Abkürzungen 304
 Quellenverzeichnis 306
 Mitwirkende 314
 Index 320
 Partner und Danksagung 327
 Abbildungsverzeichnis 328
 Impressum 330

1 Arktis und Antarktis – Naturräume in Poleposition

> Die heutigen Polargebiete der Erde haben auf den ersten Blick vieles gemeinsam: Eis und Schnee prägen ihre Landschaften und Meeresgebiete, die Hälfte des Jahres herrscht Dunkelheit, und überleben kann nur, wer sich an die extremen Lebensbedingungen anpasst. Trotz aller augenfälligen Parallelen aber unterscheiden sich die Arktis und die Antarktis grundlegend – angefangen von ihrer Geografie und ihrer Vereisungsgeschichte bis hin zur Eroberung durch den Menschen.



Eine kurze Geschichte der Polarregionen

> Die Polargebiete der Erde faszinieren den Menschen heutzutage mehr denn je. Zum einen gelten weite Teile der Arktis und Antarktis noch immer als unerforscht und damit als Neuland. Zum anderen verfügen beide Regionen über eine ganz besonders abwechslungsreiche Entstehungs- und Vereisungsgeschichte. Deren zahlreiche Facetten stellen die Wissenschaft bis heute vor so manches Rätsel.

Die Faszination der hohen Breiten

Das 21. Jahrhundert ist das Jahrhundert der Polargebiete. Kaum ein Naturraum der Erde fasziniert die Menschheit gegenwärtig so sehr wie die fernen Meeres- und Landgebiete der Arktis und Antarktis. Ein immer noch großer Teil der bislang schwer zugänglichen Regionen aus Eis und Schnee gilt bis heute als unerforscht. Auf viele grundlegende wissenschaftliche Fragen gibt es noch keine Antworten – etwa auf jene, was genau sich unter den kilometerdicken Eisschilden Grönlands und der Antarktis verbirgt oder wie der Arktische Ozean entstanden ist.

Gleichzeitig schaut die Welt mit Sorge auf die Polarregionen, denn sie nehmen als Kühlkammern der Erde eine Schlüsselrolle im Klimasystem des Planeten ein und tragen maßgeblich zur globalen Luftmassen- und Ozeanzirkulation bei. Kleine Veränderungen in ihrem komplexen Gefüge können weitreichende Auswirkungen haben. Das gilt vor allem in Bezug auf die großen Eisschilde Grönlands und der Antarktis. Gemeinsam speichern sie 99 Pro-

zent des Eisvorkommens auf der Erde. Schmelzen sie, steigt der globale Meeresspiegel. Ein Abschmelzen beider Eispanzer würde die Pegel weltweit um rund 70 Meter anheben und weite Küstenbereiche der Erde überfluten.

Die Auswirkungen des globalen Klimawandels zeigen sich in den Polargebieten heute schon deutlicher als anderswo, vor allem in der Arktis. Sie erwärmt sich seit der Mitte des 20. Jahrhunderts mehr als doppelt so schnell wie die restliche Erde und gilt deshalb auch als Frühwarnsystem für den Klimawandel. Wetterdienste und Wissenschaftler verfolgen das Geschehen in den hohen Breiten deshalb in Echtzeit – zumindest dort, wo Satelliten und Messnetze Beobachtungen ermöglichen.

Die Faszination der Polargebiete beruht aber auch darauf, dass nirgendwo sonst auf der Welt Eis, Schnee, klirrende Kälte und die Dunkelheit der Polarnacht das Leben vor solche riesigen Herausforderungen stellen. Sowohl in der Arktis als auch in der Antarktis haben Tiere und Pflanzen ausgeklügelte Überlebensstrategien und eine beeindruckende Artenvielfalt entwickelt, die immer



1.1 > Ein Kreuzfahrtschiff an der Küste der Antarktischen Halbinsel. Im antarktischen Sommer 2017/2018 besuchten 42 000 Kreuzfahrttouristen die Antarktis. Das waren 16 Prozent mehr als im Sommer zuvor.

Die wandernden Pole der Erde

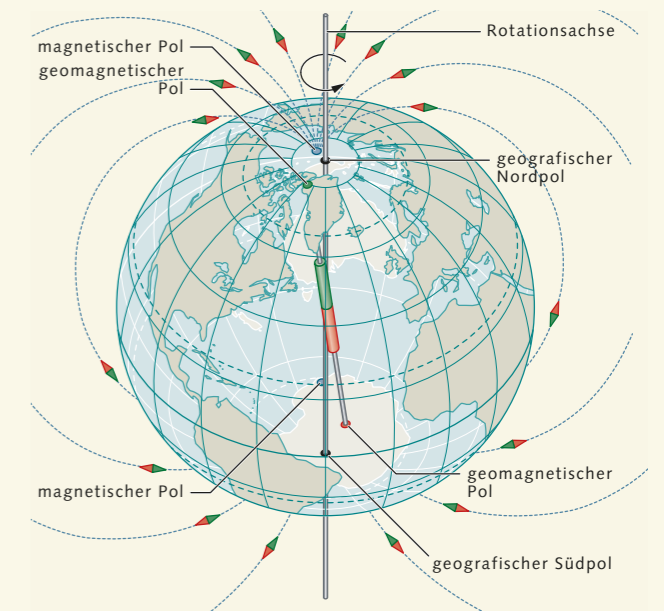
Der geografische Nordpol hat eine feste Position. Er entspricht dem Schnittpunkt der Erdachse mit der nördlichen Erdoberfläche. Seine Koordinaten lauten daher: 90 Grad Nord. Mit einem einfachen Taschenkompass ließe er sich allerdings nur schwer finden. Die Kompassnadel richtet sich nämlich am Magnetfeld der Erde aus. Dieses entsteht, weil im äußeren Kern der Erde befindliches flüssiges Eisen aufgrund von Temperaturunterschieden innerhalb der Erde und durch die Erdrotation umgewälzt und verwirbelt wird. Das Magnetfeld reicht mehrere Erdradien weit in den Weltraum. Es schirmt den Planeten vor gefährlicher Strahlung und Teilchen aus dem All ab und besitzt ebenfalls einen Nord- und einen Südpol. Als solche werden jene zwei Punkte bezeichnet, an denen die magnetischen Feldlinien senkrecht zur Erdoberfläche in die Erde eindringen. Einer dieser Punkte befindet sich auf der Nordhalbkugel der Erde, der andere auf der Südhalbkugel, wobei ihre Position zueinander nicht genau entgegengesetzt ist. Für beide lässt sich auch keine feste geografische Position angeben, denn infolge magnetischer Stürme und einer sich ändernden Umwälzung des flüssigen Eisens im äußeren Erdkern verändert sich ihre Lage ständig. Die Pole wandern, wie unregelmäßige Messungen ergeben haben. Als der magnetische Nordpol im Jahr 1831 entdeckt wurde, befand sich dieser gerade in der Nähe der Boothiahalbinsel im hohen Nor-

den Kanadas. Von dort ist er dann nordwestwärts gewandert. Gegenwärtig bewegt er sich mit einer Geschwindigkeit von rund 55 Kilometern pro Jahr. Er liegt derzeit nördlich des 85. Breitengrads, mitten im Arktischen Ozean, und nähert sich Russland.

Interessanterweise kehrt sich das Magnetfeld der Erde in unregelmäßigen Zeitabständen um. Aus dem magnetischen Norden wird dann Süden und umgekehrt. Der Verständlichkeit halber sprechen Experten deshalb auch stets vom arktischen Magnetpol – eine Bezeichnung, die immer den magnetischen Pol auf der Nordhalbkugel meint, auch wenn dieser wie gegenwärtig im physikalischen Sinn ein magnetischer Südpol ist. Warum es zu dieser Polumkehr kommt, ist unbekannt, man weiß aber, dass sie sich über einen Zeitraum von einigen Tausend Jahren vollzieht. Wissenschaftler definieren zusätzlich noch die geomagnetischen Pole, die allerdings nicht gemessen, sondern nur theoretisch berechnet werden können. Ihnen liegt die Annahme zugrunde, dass sich im Erdmittelpunkt ein unendlich kleiner Stabmagnet befindet. Im Schnittpunkt der Achse des Stabmagneten mit der Erdoberfläche liegen die geomagnetischen Pole. Ihnen wird eine große Bedeutung beigemessen, da sie die Grundlage des geomagnetischen Koordinatensystems bilden. Dieses wird für die Navigation unter Wasser, im Erdreich sowie für jede Handy-Kompass-App gebraucht.



1.2 > Der arktische Magnetpol bewegt sich ständig. Wissenschaftler ermitteln seine Position durch Messungen und Berechnungen.



1.3 > In der Nord- und Südhemisphäre der Erde gibt es jeweils drei Pole: einen geografischen, einen magnetischen und einen geomagnetischen.

mehr Menschen mit eigenen Augen sehen wollen. Die Zahl der Touristen in beiden Polargebieten steigt deshalb ebenso wie das Interesse der Wirtschaft an einer Nutzung der polaren Ressourcen. Südlich des 60. Breitengrads Süd setzt der Antarktisvertrag den Akteuren enge Grenzen. In der Arktis dagegen bestimmen die fünf Anrainerstaaten das Geschehen. Dort hat der Wettstreit um Rohstoffe und Schifffahrtsrouten längst begonnen.

So ähnlich und doch so verschieden

Als Polargebiete werden jene Regionen der Erde bezeichnet, die sich zwischen dem Nord- oder Südpol und dem dazugehörigen Polarkreis befinden. Das Nordpolargebiet, die sogenannte Arktis, umfasst den Arktischen Ozean und einen Teil der ihn umschließenden Landmassen. Das Südpolargebiet, auch Antarktis genannt, enthält den antarktischen Kontinent und Gebiete des ihn umgebenden Südlichen Ozeans. Der Durchmesser beider Regionen beträgt jeweils 5204 Kilometer, denn beide Polarkreise verlaufen in einem Abstand von 2602 Kilometer um ihre geographischen Pole, die jedoch nicht gleichzusetzen sind mit den wandernden magnetischen Polen der Erde.

Auf Weltkarten werden die Polarkreise stets mit gestrichelten Linien in Höhe von 66° 33' nördlicher und südlicher Breite markiert. Für diese Grenzziehung hat man sich einst am Stand der Sonne orientiert. Die Linie des nördlichen Polarkreises definiert nämlich jene geografische Breite, auf der die Sonne zur Sommersonnenwende am 21. Juni eines Jahres genau 24 Stunden lang nicht untergeht. In der südlichen Hemisphäre findet zeitgleich die Wintersonnenwende statt. Die Position des südlichen Polarkreises wird demzufolge durch jenen Breitengrad definiert, auf dem die Sonne 24 Stunden lang vollständig hinter dem Horizont verborgen bleibt.

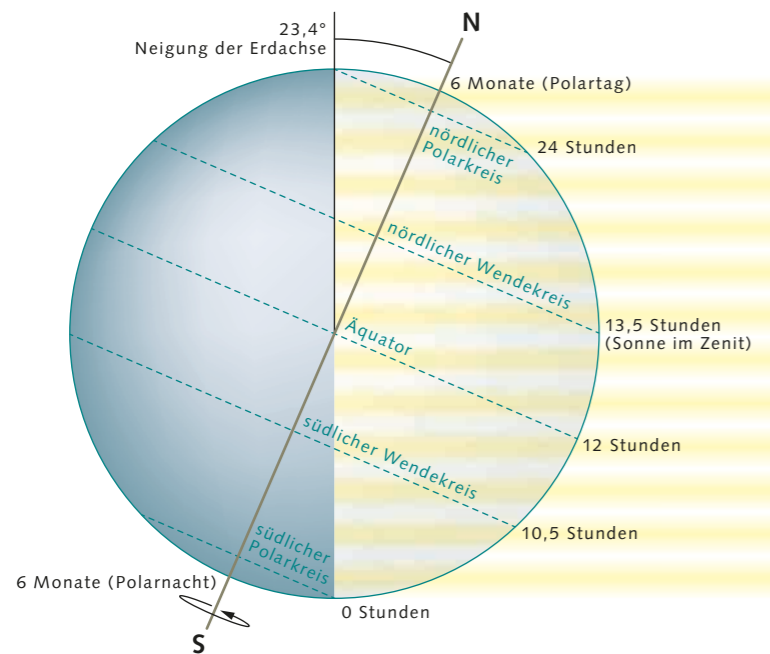
Die vielen Parallelen zwischen Arktis und Antarktis dürfen nicht darüber hinwegtäuschen, dass sich die zwei Polargebiete fundamental voneinander unterscheiden. Im äußersten Süden erstreckt sich mit Antarktika eine gewaltige Landmasse – ein abgelegener Kontinent, der mit einer Fläche von 14,2 Millionen Quadratkilometern fast zweimal so groß ist wie Australien. 98 Prozent dieser Fläche sind mit bis zu 4700 Meter dickem Eis bedeckt. Der Kontinent ist vollständig vom Südlichen Ozean, auch Südpolarmeer

genannt, umgeben, welchen Forscher deshalb auch als Ringozean bezeichnen. Er ermöglicht einen regen Austausch der Wassermassen aus dem Atlantischen, Pazifischen und Indischen Ozean und friert im Winter großflächig zu (saisonale Meereisdecke). Dieser Ozean trennt die Antarktis nicht nur räumlich vom Rest der Welt. Seine im Uhrzeigersinn strömenden Wassermassen isolieren die Antarktis auch klimatisch und sind somit ein Grund, weshalb es hier in großen Teilen deutlich kälter wird als in der Arktis. Ein kurzer Vergleich: Die Jahresdurchschnittstemperatur am Südpol beträgt minus 49,3 Grad Celsius, jene am Nordpol minus 18 Grad Celsius. Darüber hinaus gilt die Antarktis als windigste und trockenste Region der Erde. Das extreme Klima hier sowie die Abgeschiedenheit sind auch der Grund, warum es bis heute nur wenige Tier- und Pflanzenarten geschafft haben, auf dem vereisten Kontinent heimisch zu werden. Der Mensch hingegen kommt immer nur für kurze Zeit zu Besuch. Abgesehen von Forschungsstationen gibt es auf dem antarktischen Kontinent heute keine auf Dauer angelegten Siedlungen.

Im Nordpolargebiet dagegen verhält es sich in mehreren Belangen genau umgekehrt. Hier umzingeln Landmassen einen Ozean in zentraler Lage. Der Arktische Ozean, auch als Nordpolarmeer bezeichnet, ist nur über wenige Wasserstraßen mit den Weltmeeren verbunden und gilt mit einer Fläche von 14 Millionen Quadratkilometern als kleinster Ozean der Welt. Im Gegensatz zum Südpolarmeer verfügt der Arktische Ozean über eine dauerhafte Meereisdecke, deren Fläche allerdings saisonal schwankt. Ihre größte Ausdehnung erreicht sie zum Ende des Winters, ihre kleinste zum Ende des Sommers, wobei Wissenschaftler einen steten Rückgang des Sommereises beobachten. Seit Beginn der Satellitenmessungen im Jahr 1979 ist die Eisfläche des Arktischen Ozeans im Sommer um rund drei Millionen Quadratkilometer geschrumpft. Diese Fläche entspricht in etwa der achtfachen Größe Deutschlands. Da die Kontinente Europa, Asien und Amerika bis weit in das Nordpolargebiet hineinreichen, ist die Arktis schneller von Pflanzen, Tieren und vom Menschen besiedelt worden als die Antarktis. Historische Spuren lassen vermuten, dass die ersten Ureinwohner bereits vor 45 000 Jahren in den Küstenregionen des Arktischen Ozeans auf die Jagd gingen. Heute leben etwas mehr als vier Millionen Menschen im Nordpolargebiet.



1.4 > Winter im arktischen Fischerdorf Reine auf den westlichen Lofoten, Norwegen. Wegen der Ausläufer des warmen Golfstroms sinkt die Lufttemperatur in diesem Teil der Arktis nicht weit unter den Gefrierpunkt.



1.5 > Am 21. Juni, dem Tag der Sommersonnenwende, erreicht die Sonne ihren höchsten Stand auf der Nordhalbkugel. Am nördlichen Polarkreis geht sie dann 24 Stunden lang nicht unter, am südlichen Polarkreis 24 Stunden lang nicht auf.

Wo beginnen die Arktis und die Antarktis?

Die Bezeichnung „Arktis“ geht auf das griechische Wort *árktos* zurück, was so viel wie „Bär“ bedeutet. Als „Land unter dem Sternbild des Großen Bären“ bezeichneten griechische Seefahrer das Nordpolargebiet, in welches sie vermutlich bereits um das Jahr 325 vor Christus erstmals vorgestoßen waren. Die Seeleute nutzten damals die Sternbilder des Nordhimmels, hier vor allem den Großen Bären und den Kleinen Bären, um sich auf ihren Entdeckungsfahrten zu orientieren.

Ein weiterer Himmelskörper, in diesem Fall die Sonne, gab den Ausschlag, einen nördlichen und später einen südlichen Polarkreis als Grenzen der Polargebiete zu definieren. Beide Linien markieren jene geografische Breite, auf der die Sonne am Tag der jeweiligen Sommersonnenwende gerade nicht mehr untergeht. Auf der Nordhalbkugel fällt die Sommersonnenwende meist auf den 21. Juni; auf der Südhalbkugel auf den 21. oder 22. Dezember. Die genaue Position der Polarkreise wird durch den Neigungswinkel der Erdachse bestimmt. Da das Ausmaß der Erdneigung (Obliquität) in einem Rhythmus von rund 41 000 Jahren leicht schwankt, verlagert sich auch die Position

der Polarkreise stetig. Gegenwärtig nähern sie sich den geografischen Polen um etwa 14,4 Meter pro Jahr an.

Als eindeutige Südgrenze der Arktis hat sich der nördliche Polarkreis jedoch nie durchgesetzt. Das liegt vor allem daran, dass es kein Naturmerkmal gibt, welches seine astronomisch bestimmte Linienführung erdumspannend unterstützt und den arktischen Raum klar gegen südliche Gefilde abgrenzt. Im Gegenteil: Wäre die Arktis nur auf die Regionen nördlich des Polarkreises begrenzt, würden die Südspitze Grönlands sowie weite Teile der kanadischen Arktis nicht dazugehören.

Aus diesem Grund definieren Wissenschaftler den Naturraum der Arktis heutzutage meist über Klima- oder Vegetationsmerkmale. Eine häufig verwendete Südgrenze ist die sogenannte 10° C-Juli-Isotherme. Nördlich dieser imaginären Linie liegt die langjährige Mitteltemperatur für den Monat Juli unter zehn Grad Celsius. Zum arktischen Raum gehören demzufolge der Arktische Ozean, Grönland, Spitzbergen, große Teile Islands sowie die nördlichen Küsten und Inseln Russlands, Kanadas und Alaskas. Über dem Europäischen Nordmeer verlagert sich die 10° C-Juli-Isotherme aufgrund der Wärme des **Nordatlantikstroms** Richtung Norden, sodass auf Basis dieser Definition nur die nördlichen Regionen Skandinaviens zur Arktis dazugezählt werden. In Sibirien und Nordamerika hingegen ist kalte arktische Luft dafür verantwortlich, dass die Temperaturgrenze relativ weit südlich verläuft und Regionen wie der nordöstliche Teil Labradors, die kanadische Hudson Bay und große Teile des Beringmeers zur Arktis dazugezählt werden.

Eine zweite natürliche Südgrenze des Nordpolargebietes ist die sogenannte Baumgrenze. Wie der Name schon vermuten lässt, sind die heutigen klimatischen Bedingungen nördlich dieser Linie so harsch, dass Bäume keine Überlebenschance mehr haben. Da jedoch der Übergang von zusammenhängenden Wäldern zu den baumlosen Gras- und Moorlandschaften der Arktis, der Tundra, in Wirklichkeit oft fließend ist, sprechen Forscher im Zusammenhang mit der Baumgrenze eher von einer Zone als von einer klaren Grenzlinie. In Nordamerika beispielsweise ist diese Übergangszone ein schmales Band. Im Norden Europas und Asiens dagegen kann sie bis zu 300 Kilometer breit sein. Der Verlauf der nördlichen Baumgrenze stimmt in großen Teilen mit der 10° C-Juli-

Isotherme überein. In manchen Gegenden jedoch liegt sie bis zu 200 Kilometer südlicher als die Temperaturgrenze, sodass dieser Definition zufolge auch Westalaska und die Aleuten zur Arktis dazugehören. Das Nordpolargebiet wäre demnach etwa 20 Millionen Quadratkilometer groß.

Eine dritte natürliche Grenze kann mithilfe der Meeresströmungen definiert werden. Demnach beginnen die arktischen Gewässer dort, wo an der Meeresoberfläche kalte, relativ salzarme Wassermassen aus dem Arktischen Ozean auf wärmeres, salzhaltiges Wasser aus dem Atlantischen oder dem Pazifischen Ozean treffen. Im Gebiet des kanadisch-arktischen Archipels, der Inselgruppe zwischen Nordamerika und Grönland, erstreckt sich diese sogenannte Konvergenzzone auf 63 Grad Nord. Im weiteren Verlauf Richtung Osten zweigt sie dann zwischen der Baffininsel und Grönland Richtung Norden ab. In der Framstraße, dem Meeresgebiet zwischen Ostgrönland und Spitzbergen, verläuft sie sogar auf 80 Grad Nord – also deutlich nördlicher als etwa der Polarkreis. Auf der anderen Seite des Arktischen Ozeans, im Beringmeer, ist die Definition einer Konvergenzzone etwas schwieriger, weil sich hier die Wassermassen aus dem Pazifischen und dem Arktischen Ozean großflächig miteinander vermischen anstatt übereinander hinwegzuströmen. Auf Karten verläuft diese vage Grenzlinie deshalb einmal quer über die schmale Beringstraße.

Neben diesen drei von Naturmerkmalen geprägten Grenzen der Arktis gibt es verschiedene anderweitig definierte Grenzen, deren Verlaufskriterien variieren. So ziehen unter anderem die verschiedenen Arbeitsgruppen des Arktischen Rates zum Teil unterschiedliche Grenzen. Für die Expertengruppe des Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP) zum Beispiel gehören in Asien alle Landflächen nördlich des 62. Breitengrads zur Arktis dazu. Auf dem nordamerikanischen Kontinent ziehen sie die Grenze entlang des 60. Breitengrads. Das betrachtete Territorium ist demzufolge deutlich größer als der durch die Baumgrenze definierte Naturraum. Die größte Ausdehnung hat die Arktis im Rahmen des Arctic Human Development Report (AHDR): Hier wurden bei der Gebietsdefinition auch politisch und statistisch relevante Aspekte beachtet, weshalb die Grenze vor allem in Sibirien weiter südlich verläuft als jede andere. Demnach umfasst die Arktis eine Fläche von über 40 Millionen Quadratkilo-

metern, was in etwa insgesamt acht Prozent der Erdoberfläche ausmacht.

In diesem „World Ocean Review“ bezieht sich die Bezeichnung „Arktis“ stets auf jenen Naturraum, der an Land durch die Baumgrenze und über dem Meer durch die Konvergenzzone definiert wird. Sollten im Ausnahmefall andere Definitionen der Arktis von Relevanz sein, so wird dies durch einen Hinweis gekennzeichnet.

Auf der Südhalbkugel fällt die Grenzziehung nicht ganz so schwer, denn die Insellage des antarktischen Kontinents sowie markante Meeresströmungen ermöglichen eine relativ klare Abgrenzung des Südpolargebietes. Dessen Synonym „Antarktis“ geht übrigens auf das griechische Wort *antarktiké* zurück und bedeutet so viel wie „dem Norden entgegengesetzt“. Die Antarktis erstreckt sich über den Kontinent Antarktika und den ihn umgebenden Südlichen Ozean, wobei die Spitze der Antarktischen Halbinsel sowie Küstengebiete der Ostantarktis über den südlichen Polarkreis hinausragen. Als Nordgrenze wird deshalb häufiger der 60. Breitengrad Süd verwendet, auf welchen sich im Jahr 1959 die Unterzeichnerstaaten des Antarktisvertrags geeinigt haben.

Etwas größer noch fällt das Gebiet der Antarktis aus, wenn als dessen Nordgrenze die Zone der antarktischen Konvergenz angegeben wird. Dabei handelt es sich um jene ringförmige Meereszone, in der kaltes, nordwärts strömendes Oberflächenwasser aus der Antarktis auf wärmere, südwärts fließende Wassermassen aus dem Norden trifft. Das kalte, salzhaltige Wasser sinkt infolgedessen ab und schiebt sich unter die wärmeren Wassermassen. Für Polarforscher stellt die 32 bis 48 Kilometer breite Zone der antarktischen Konvergenz den nördlichen Rand des Südlichen Ozeans dar, weil sie sowohl die Wassermassen der Antarktis und der gemäßigten Breiten als auch die Lebensgemeinschaften beider Meereszonen klar voneinander trennt. Im Allgemeinen liegt die Konvergenzzone auf Höhe des 50. südlichen Breitengrads, sodass, folgt man dieser Grenzbestimmung, auch subantarktische Inseln wie Südgeorgien und die Südlichen Sandwichinseln zum antarktischen Naturraum dazugezählt werden. Die genaue Position der Konvergenzzone hängt allerdings vom Längengrad, dem Wetter und der Jahreszeit ab und kann sich dementsprechend regional bis etwa 150 Kilometer nach Norden oder Süden verschieben.

Dieser „World Ocean Review“ folgt der 1959 im Antarktisvertrag festgelegten Definition des Südpolaregebiets, soweit nicht anders vermerkt. Es erstreckt sich demnach über alle Land- und Meeresgebiete südlich des 60. Breitengrads Süd.

Die Wanderung der Kontinente

Dass heute zur selben Zeit beide Polregionen der Erde vereist sind, ist eine seltene Ausnahmesituation in der 4,6 Milliarden Jahre alten Geschichte unseres Planeten. Nur wenige Mal zuvor hatten sich die Kontinente der Erde so zueinander angeordnet, dass sowohl im Norden als auch im Süden entsprechend kalte Klimabedingungen herrschten. Die Wanderung der Kontinente gab also die Initialzündung für die Vereisung beider Polargebiete.

Dass sich die Kontinente bewegen, wurde erstmals vom deutschen Polarforscher Alfred Wegener wissenschaftlich postuliert. Im Jahr 1912 veröffentlichte er seine Hypothese von der Kontinentalverschiebung, die Geologen bis heute nur ergänzen und verfeinern konnten – so genau waren Wegeners Rekonstruktionen von der Wanderung der Kontinente. Seiner Theorie zufolge ist die bis zu 60 Kilometer dicke äußere Hülle der Erde, die Erdkruste, vor etwa drei bis vier Milliarden Jahren in große Platten zerbrochen. Diese bewegen sich seitdem unabhängig voneinander auf dem Erdmantel, der unter der Kruste liegt und aus geschmolzenem Gestein, dem Magma, besteht. Die Platten legen dabei bis zu zehn Zentimeter pro Jahr zurück. Sie kollidieren miteinander, schieben sich an ihren Rändern übereinander oder driften auseinander, wodurch Gräben und Brüche entstehen, durch die wiederum flüssiges Magma aus dem Erdinnern aufsteigen kann.

Auf diese Weise entsteht an diesen Bruchstellen neuer Erd- oder Meeresboden.

Klimaforscher bezeichnen die Kontinentalverschiebung als einen der einflussreichsten Faktoren in der Vereisungsgeschichte der Polregionen. Denn die Lage der Kontinente und Ozeane zueinander bestimmt die Pfade der Luft- und Meeresströmungen und somit die Wärmeverteilung auf dem Planeten. Das gilt vor allem für die zwei Polargebiete, deren geologischer Bau und Untergrund durch ganz unterschiedliche **plattentektonische Prozesse** geprägt wurde.

Antarktika – ein uralter Kontinent

Um die Entstehungsgeschichte des Südpolaregebiets zu verstehen, muss man wissen, dass der antarktische Kontinent eigentlich aus zwei Teilen besteht: zum einen aus der relativ großen, soliden Landmasse der Ostantarktis, die aus bis zu 3,8 Milliarden Jahre alter und bis zu 40 Kilometer dicker Erdkruste besteht; zum anderen aus der Westantarktis, die sich wiederum aus vier deutlich kleineren und dünneren Krustenblöcken zusammensetzt. Diese vier Krustenfragmente sind bis heute nicht fest miteinander verbunden. Sie verschieben sich stetig.

Obwohl die Landmasse der Ostantarktis und die Krustenblöcke der Westantarktis auf einer Kontinentalplatte liegen, trennt ein breiter Graben beide Teile voneinander. Am ostantarktischen Rand dieses Grabens erhebt sich das weit über 4000 Meter hohe und 3500 Kilometer lange Transantarktische Gebirge.

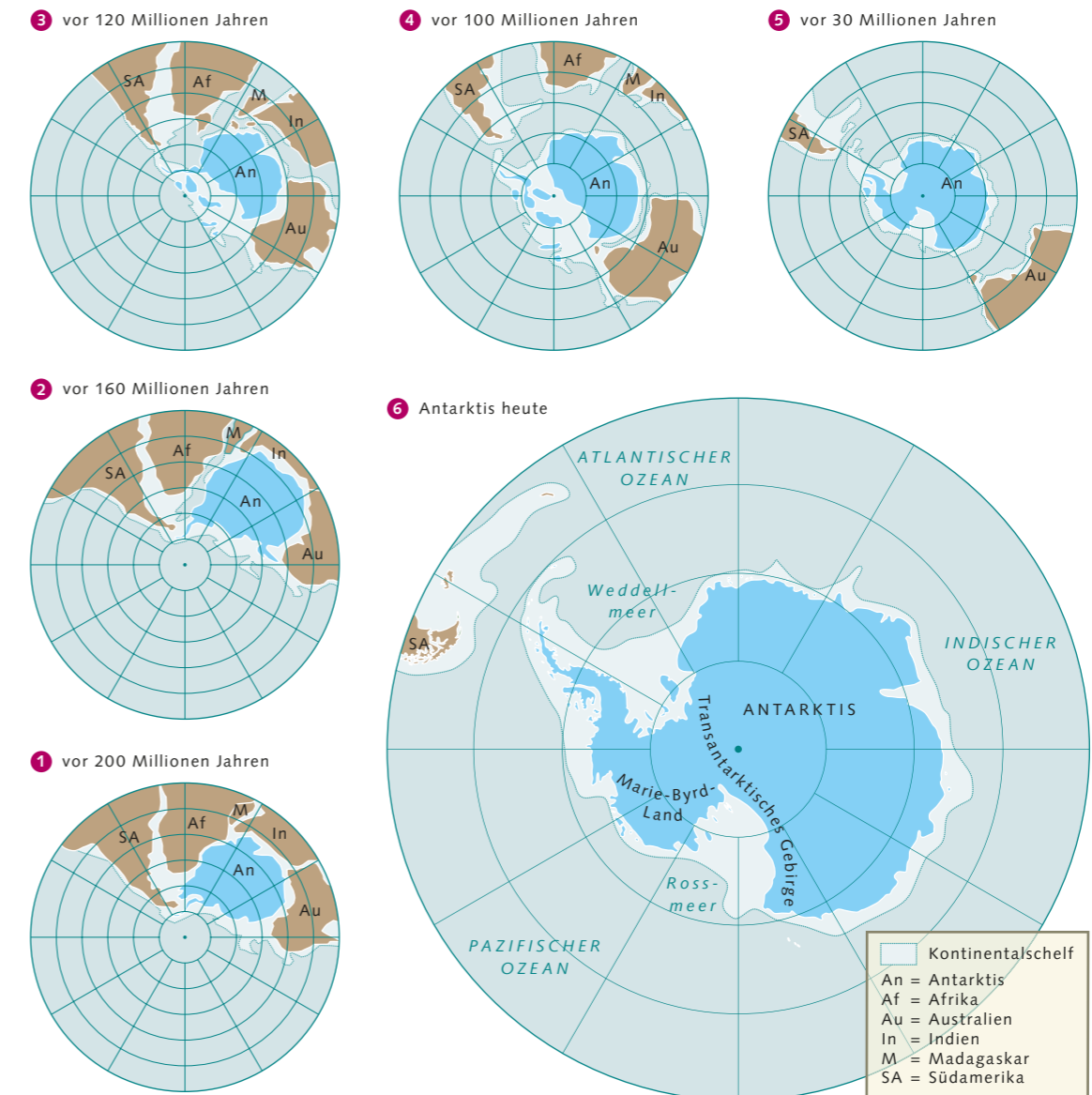
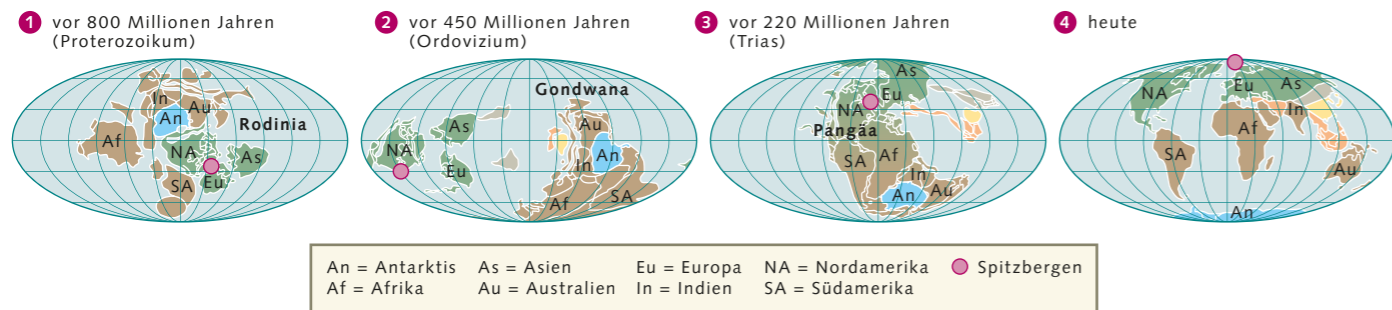
Die geografische Lage und Abgeschiedenheit des antarktischen Kontinents sind erdgeschichtlich betrachtet relativ junge Phänomene. Den größten Teil der Erdgeschichte grenzte die antarktische Kontinentalplatte näm-

lich unmittelbar an andere Kontinente. Mindestens zweimal befand sie sich sogar fernab des Südpols im Zentrum sogenannter Superkontinente. Das erste Mal vor etwa einer Milliarde Jahre: In diesem Zeitraum hatten sich infolge weltweiter Gebirgsbildungen alle damaligen Kontinente zum Superkontinent Rodinia zusammengeschlossen. Die Landmasse der heutigen Ostantarktis bildete damals dessen Herzstück und lag nördlich des Äquators vermutlich in unmittelbarer Nachbarschaft zur Laurentischen Platte, dem Ur-Nordamerika. Andere Rekonstruk-

tionen platzieren Australien oder Mexiko daneben. Welcher Erklärungsansatz nun der richtige ist, wird bis heute sehr kontrovers diskutiert.

Ungefähr 550 Millionen Jahre später, im Erdzeitalter des Ordoviziums, war die antarktische Kontinentalplatte zum zweiten Mal in das Zentrum eines Großkontinents gerückt. Diesmal formte sie das Kerngebiet des riesigen Gondwana-Kontinents. Dieser vereinte alle heutigen Südkontinente sowie den indischen Subkontinent in sich und lag so, dass sich Antarktika zwischen dem

1.6 > Erdgeschichtlich betrachtet ist die aktuelle Lage der Antarktis und Spitzbergens nur eine Momentaufnahme. Zuvor haben Teile beider Regionen auch schon auf der jeweils entgegengesetzten Erdhalbkugel gelegen.

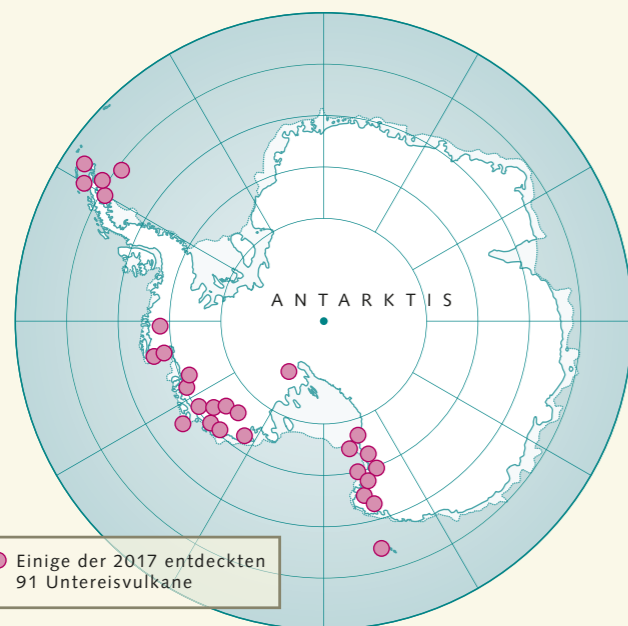


1.7 > Als der Superkontinent Gondwana vor 200 Millionen Jahren zu zerfallen begann, löste sich die Antarktis allmählich aus dem Plattenverband und wanderte Richtung Südpol.

Eine Vulkanlandschaft verborgen unter dem Eis

Die Westantarktis gilt seit Kurzem als Region mit der höchsten Vulkandichte der Welt. 138 Vulkane haben Forscher bislang gezählt. Das Besondere daran ist jedoch, dass 91 davon bis zu 2000 Meter tief unter dem Eispanser verborgen liegen und erst im Jahr 2017 von Wissenschaftlern der Universität Edinburgh entdeckt wurden. Diese Untereisvulkane sind 100 bis 3850 Meter hoch und haben am Fuß ihres Kegels einen Durchmesser von 4,5 bis 58,5 Kilometern. Besonders häufig ist ihre Zahl in der Nähe des Marie-Byrd-Landes sowie entlang einer Achse, die parallel zum Transantarktischen Gebirge durch das Zentrum des Westantarktischen Riftsystems verläuft.

Die Nachricht von der Entdeckung der Untereisvulkane hat weltweit großes Interesse geweckt. Wissenschaftler befürchten nämlich, dass der Ausbruch eines oder mehrerer Untereisvulkane zu einem schnellen Abschmelzen des Westantarktischen Eisschildes führen könnte. Die unmittelbare Folge wäre ein abrupter Anstieg des globalen Meeresspiegels um mehrere Meter. Beobachtungen aus anderen Teilen der Welt lassen darauf schließen, dass Vulkane aktiv werden, wenn der auf ihnen lastende Eispanser abschmilzt. Beispiele für Untereisvulkane gibt es unter anderem auf Island, wo Eruptionen dazu geführt haben, dass Gletscher an ihrer Unterseite schmolzen und infolgedessen ihre Eisfließgeschwindigkeit deutlich zunahm. Ob die Vulkane unter dem Eispanser der Westantarktis gegenwärtig aktiv sind, lässt sich bislang nicht eindeutig sagen.



1.8 > Die meisten Vulkane der Westantarktis liegen unter dem Eis.

Äquator und dem südlichen Wendekreis befand. Indien und Australien grenzten diesmal im Westen an, Südamerika im Süden.

Gondwana existierte mehr als 300 Millionen Jahre. Seine Landschaften waren geprägt durch weitverzweigte Flusssysteme, Seen, dichte Wälder und zwischenzeitlich sogar durch einen dicken Eispanser, der den Kontinent am Ende des Erdaltertums vor 300 Millionen Jahren bedeckte. Vor etwa 180 Millionen Jahren begann Gondwana wieder zu zerfallen – begleitet und angetrieben von vielen Vulkanausbrüchen, tiefen Rissen in der Erdkruste und starken Driftbewegungen. Sie gaben der antarktischen Kontinentalplatte den Startschuss für die Wanderung Richtung Süden, die nun möglich wurde, weil sich nach und nach alle Nachbarkontinente abspalteten.

Den Anfang machte vor etwa 160 Millionen Jahren Afrika, dessen Südspitze sich an jener Stelle vom antarktischen Kontinent löste, wo sich heute das Weddellmeer befindet. Anschließend trieben die Landmassen Indiens und Madagaskars Zentimeter für Zentimeter Richtung Norden davon. Als sich dann vor 90 bis 80 Millionen Jahren Neuseeland von der Antarktis trennte, sortierten sich die Krustenblöcke in der Westantarktis neu. Heiße Magmaströme im Erdinnern begannen die Blöcke an ihrer Grenze zur Ostantarktis anzuheben. Infolgedessen entstanden nicht nur das Transantarktische Gebirge und die Bergkette auf dem Marie-Byrd-Land. Es bildete sich auch ein Riss in der Erdkruste, welcher sich bis heute als gewaltiger, von Verwerfungen durchsetzter Graben vom Rossmeer bis zum Weddellmeer zieht. Geologen nennen diesen Grabenbruch entlang des Transantarktischen Gebirges Westantarktisches Riftsystem. Es ist 800 bis 1000 Kilometer breit, mehr als 2500 Kilometer lang und gehört damit zu den größten kontinentalen Grabenbruchsystemen der Erde – in seiner Dimension vergleichbar mit dem ostafrikanischen Great Rift Valley, welches Afrika vom Roten Meer bis nach Mosambik durchzieht.

Entlang dieser aktiven Bruchzone könnte der antarktische Kontinent eines Tages weiter auseinanderbrechen, doch bisher weitert sich der Graben nur um zwei Millimeter pro Jahr oder umgerechnet um einen Meter alle 500 Jahre. Die Bewegungen der beteiligten Platten zueinander sowie das Auseinanderdriften der West- und der Ostantarktis hatten in der jüngeren Erdgeschichte aber zur

Folge, dass sich die Erdkruste entlang der Bruchzone stark ausdünnte und tief liegende Becken im Rossmeer entstanden. Auf diese Weise erklärt sich auch, warum in der Westantarktis heutzutage große Teile des Untergrunds ein bis zwei Kilometer unter dem Meeresspiegel liegen und sie ohne ihren verbindenden Eisschild nicht wie eine geschlossene Fläche aussähe, sondern wie eine Ansammlung größerer und kleinerer Inseln.

Die Entstehung der westantarktischen Bruchzone vor rund 80 Millionen Jahren sollte jedoch nicht der letzte tektonische Schlüsselmoment in der Driftgeschichte der antarktischen Kontinentalplatte bleiben. Zwei weitere folgten nahezu zeitgleich, erneut angetrieben von Spreizungsprozessen in der Erdkruste. Die eine Region, in der diese vor 50 Millionen Jahren deutlich zunahm, war die Grenze zwischen Südamerika und der Antarktischen Halbinsel. Hier öffnete sich vor rund 41 Millionen Jahren die Drake Passage, eine Meeresstraße, die heute rund 800 Kilometer breit ist und den Pazifischen Ozean mit dem Atlantischen Ozean verbindet.

Der zweite entscheidende Spreizungsprozess vollzog sich auf der anderen Seite, in der Ostantarktis. Hier löste

sich Australien von der antarktischen Platte. Diese Abspaltung versetzt Forscher bis heute in Erstaunen, denn sie verlief zum Teil in einem geologisch betrachtet atemberaubenden Tempo.

Soweit man heute weiß, trennte sich die australische Platte in zwei Schritten von der Antarktis. Vor 95 bis 60 Millionen Jahren löste sich zunächst nur die Südküste Australiens von der Ostantarktis, während der Teil des heutigen Tasmaniens über eine zeitweise von Flachwasser überflutete Landverbindung noch Kontakt zum antarktischen Viktorialand hielt. Diese Landbrücke begrenzte jedoch bereits einen lang gezogenen flachen Golf, der zwischen beiden Platten entstanden war. Vor etwa 34 Millionen Jahren sackte der Meeresboden im Bereich dieser Landbrücke innerhalb von nur ein bis zwei Millionen Jahren ab – vermutlich, weil sich die Bewegungsrichtung der pazifischen Kontinentalplatte geändert hatte. Eine Meeresstraße entstand daraufhin und machte den Weg frei für kaltes, ozeanisches Tiefenwasser aus dem Südlichen Ozean, welches jetzt ungehindert zwischen Australien und der Antarktis hindurchströmen konnte. Der Wasserring um die Antarktis war geschlossen und damit jener Ring-

Golf

Als „Golf“ werden große Meeresbuchten, Binnen- oder Randmeere bezeichnet, die zum Großteil von Landmassen umgeben sind. Bekannte Beispiele sind der Golf von Mexiko, der als Randmeer des Atlantischen Ozeans von den Küsten der USA, Mexikos und Kubas begrenzt wird, sowie der Persische Golf – ein tausend Kilometer langes und bis zu 300 Kilometer breites Binnenmeer zwischen dem Persischen Plateau und der Arabischen Halbinsel.



1.9 > Der Berg Skanen am Eingang zum Billefjord, Spitzbergen. Er weist klar voneinander getrennte Sedimentschichten auf, anhand derer Geowissenschaftler die Entstehungsgeschichte der Inselgruppe nachvollziehen können. Die hier sichtbaren Kalksteinschichten sind 320 bis 290 Millionen Jahre alt und stammen demzufolge aus den Epochen Mittleres Karbon bis Unterperm.

ozean entstanden, dessen Strömungsband den südlichen Kontinent bis heute klimatisch vom Rest der Welt isoliert und maßgeblich dazu beitrug, dass die Antarktis vor 34 Millionen Jahren zu vereisen begann.

Arktis: ein Ozean öffnet sich

Eine noch viel weitere Wanderung als der antarktische Kontinent haben die Landmassen der heutigen Arktis hinter sich. Die Inselgruppe Spitzbergen zum Beispiel lag vor 650 Millionen Jahren noch als Teil einer großen Landmasse in Südpolnähe – dafür sprechen mächtige Eiszeitablagerungen, die Wissenschaftler heute noch auf den Inseln finden. Seitdem ist Spitzbergen 12 000 Kilometer Richtung Norden gewandert – mit einem Durchschnittstempo von weniger als zwei Zentimetern pro Jahr. Belege für diese Wanderung gibt es in den verschiedenen Gesteinsschichten der Inselgruppe.

Rostrote Felshänge sind die Überreste einer Zeit vor 390 Millionen Jahren, als Spitzbergen zu einer großen Wüste gehörte und in der Nähe des Äquators lag. 50 Millionen Jahre später, zum Auftakt des Erdzeitalters Karbon, befand sich die Region in den nördlichen Subtropen. Das Klima war feucht-heiß und auf Spitzbergen wuchsen dichte Regenwälder.

Als vor 225 Millionen Jahren das Zeitalter der Dinosaurier begann, wurde die Landmasse Spitzbergens von



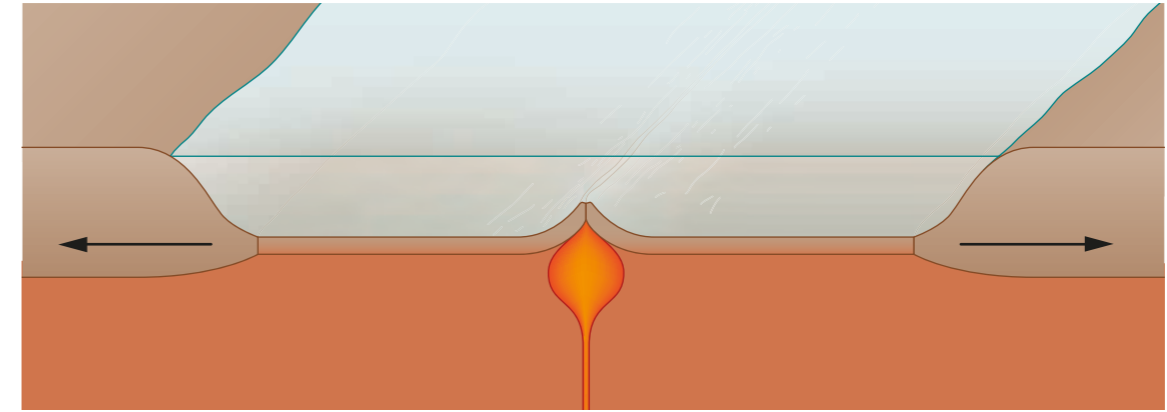
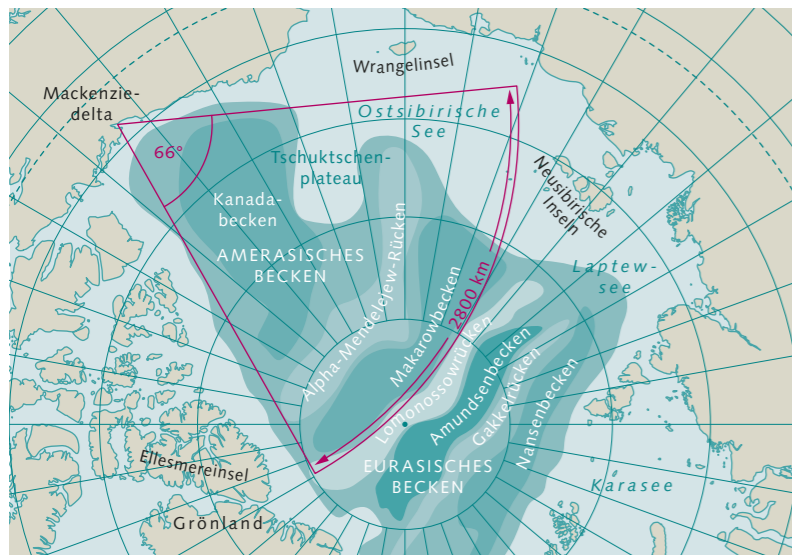
1.11 > Paläontologen auf Spitzbergen vor versteinerten Überresten mariner Reptilien

einem Meer bedeckt, in dem zunächst Ichthyosaurier und einige Millionen Jahre später die bis zu 20 Meter langen Plesiosaurier schwimmend auf die Jagd gingen. Skelette beider Arten haben Forscher inzwischen schon häufiger auf der Insel gefunden.

Zur selben Zeit müssen Flüsse, die damals existierten, große Mengen Sedimente und organisches Material in das Meer eingetragen haben. Diese sanken zu Boden und lagerten sich in großen Becken kilometerdick ab. Diese Sedimentschichten spielen heutzutage bei der Suche nach Erdgas- und Erdöllagerstätten eine entscheidende Rolle.

Im Zeitalter des Oberjuras, vor 150 Millionen Jahren, begannen plattentektonische Prozesse, welche zur Bildung des Arktischen Ozeans und zur heutigen Konstellation der Kontinente führten. Der Superkontinent Pangäa brach zu diesem Zeitpunkt in den Südkontinent Gondwana und den Nordkontinent Laurasia auseinander. Letzterer setzte sich aus den Kontinentalplatten des heutigen Nordamerikas, Europas und Asiens zusammen – ein Verbund, der ebenfalls vor 145 Millionen Jahren zu zerfallen begann. Geologen nehmen an, dass sich damals ein kleines Ozeanbecken zwischen Nordamerika und Sibirien bildete, infolgedessen die beiden Platten auseinanderbrachen und scherenförmig auseinanderdrifteten. Welche Verschiebungen dabei genau stattgefunden haben, können die Wissenschaftler bisher nur vermuten. Fest steht, zwischen Kanada und Alaska auf der einen sowie Sibirien auf der anderen Seite öffnete sich mit dem dreiecksfö-

1.10 > Die Entstehungsgeschichte des Arktischen Ozeans ist noch nicht ganz erschlossen. Ein Erklärungsansatz ist, dass die Kontinentalplatten Nordamerikas und Sibiriens scherenartig auseinanderdrifteten und auf diese Weise Platz für das Amerasische Becken schufen.



1.12 > Weil sich zwei Kontinentalplatten voneinander entfernen, ist der Meeresboden aufgerissen. An der Bruchstelle hat sich ein Mittel-ozeanischer Rücken gebildet, an dem nun Magma aus dem Erdinnern aufsteigt und neuen Meeresboden bildet.

migen Amerasischen Becken der erste und damit ältere Teil des heutigen Arktischen Ozeans.

Am Rand dieses Beckens kam es vor allem auf Franz-Josef-Land, auf Spitzbergen, in Nordgrönland sowie in der kanadischen Arktis zu starken vulkanischen Aktivitäten. Flüssiges Magma drang von unten in die Erdkruste und bildete vulkanische Gänge. Teilweise drangen Lavamassen auch bis an die Erdoberfläche und formten Vulkane.

Vor etwa 110 Millionen Jahren kam die Öffnung des Amerasischen Beckens zu einem abrupten Ende, nachdem ein Teilstück Alaskas, der sogenannte Alaska-Tschuktschen-Mikrokontinent, an seinem Westrand mit Sibirien kollidiert war. Spitzbergen hatte zu diesem Zeitpunkt bereits seine Position in den hohen Breiten erreicht, gehörte aber noch zur großen Landmasse Laurasia, welche wie eigentlich alle Gebiete rund um das neue arktische Becken von dichten Wäldern aus Mammutbäumen bewachsen war. Das Klima muss sehr warm, die Vegetation sehr üppig gewesen sein, denn überall bildeten sich mächtige Steinkohleablagerungen. Auf der Ellesmereinsel in der kanadischen Arktis haben Wissenschaftler versteinerte Überreste von Schildkröten und Krokodilen aus dieser Zeit gefunden. Auch sie deuten auf tropische Verhältnisse im hohen Norden hin.

Laurasia begann vollständig zu zerfallen, als vor 95 Millionen Jahren die Erdkruste zwischen Kanada und Grönland aufriss und die Labradorsee sowie die Baffinbucht entstanden. 40 Millionen Jahre später setzte eine neue Phase der Umstrukturierung der Kontinentalplatten ein, in welcher der Nordatlantik entstand. Zur gleichen Zeit, vor 55 Millionen Jahren, löste sich im hohen Norden

ein 1800 Kilometer langes Unterwassergebirge, benannt nach dem russischen Naturwissenschaftler Michail Wasiljewitsch Lomonossow, vom eurasischen Kontinentalrand und driftete in seine heutige Position am Nordpol.

Im Zuge dieser Abspaltung öffnete sich zwischen dem Kontinentalrand Eurasiens und dem Lomonossow-Rücken das Eurasische Becken des Arktischen Ozeans. In seinem Zentrum befindet sich heute noch ein aktiver Mittel-ozeanischer Rücken, der Gakkelerücken – benannt nach dem russischen Ozeanografen Jakow Jakowlewitsch Gakkel. Dieser Rücken verläuft als Fortsetzung des Nordatlantischen Rückens von der Nordküste Grönlands bis in die Nähe des Mündungsdeltas der Lena und teilt das Eurasische Becken in das nördliche Amundsenbecken und das südliche und damit küstennähere Nansenbecken.

Wie für Mittel-ozeanische Rücken typisch stellt auch der Gakkelerücken eine tektonische Dehnungszone dar. Das heißt, entlang des 1800 Kilometer langen Rückens spreizt sich der Meeresboden. Magma strömt aus dem Erdinnern empor und lässt im Grabenbruch des Rückens neue Erdkruste entstehen. Am Gakkelerücken laufen diese tektonischen Prozesse langsamer ab als an jedem anderen Mittel-ozeanischen Rücken der Welt. Der Meeresboden spreizt sich hier mit einem Tempo von gerade mal einem Zentimeter pro Jahr. Dennoch erklärt sich so, warum am Meeresboden heiße Quellen brodeln und das Eurasische Becken bis heute stetig größer wird.

Der Zerfall Laurasias und die Öffnung des Eurasischen Meeresbeckens seit 55 Millionen Jahren lösten sehr komplizierte Plattenbewegungen zwischen Spitzbergen und

1.13 > Um die Öffnung des Arktischen Ozeans und die dazugehörigen Plattenverschiebungen besser zu verstehen, führen Geologen regelmäßige Expeditionen in den hohen Norden Kanadas durch. Hier haben sie ihr Expeditionscamp in einem entlegenen Teil der Ellesmereinsel errichtet.



dem Nordrand Nordamerikas aus. Dort, wo Platten kollidieren, entstehen große Deformations- und Knautschzonen. Gebirge falten sich auf – so zum Beispiel an der Westküste Spitzbergens, im Norden Grönlands und in der kanadischen Arktis. Dort, wo Platten aneinander vorbeigleiten, bilden sich in Küstennähe kilometerlange, kastenförmige Täler, anhand derer Geowissenschaftler seitliche Kontinentalverschiebungen identifizieren. Solche sogenannten Störungszonen gibt es heutzutage unter anderem auf der Banksinsel und der Ellesmereinsel. Forscher nehmen sogar an, dass Plattenverschiebungen den gesamten Kontinentalrand Nordamerikas nachhaltig geformt haben. Dafür spricht auch die Tatsache, dass der Kontinentalrand vom Mackenziedelta im Südwesten bis nach Nordgrönland erstaunlich gerade ist.

Die Ozeanbildung in der Baffinbucht und der Labradorsee endete vor etwa 35 Millionen Jahren. Grönland, das zwischenzeitlich als eigene Kontinentalplatte existiert hatte, wurde nun wieder Teil der nordamerikanischen Platte. Nur zehn Millionen Jahre später aber löste sich Spitzbergen von Nordgrönland und driftete mit dem Rest Eurasiens in seine heutige Lage.

Im Zuge dieser Abspaltung entstand vor 17 bis 15 Millionen Jahren ein bis zu 5600 Meter tiefer Graben zwischen der Inselgruppe und der Ostküste Grönlands. Dieser als Framstraße bezeichnete Tiefseegraben, benannt nach dem Expeditionsschiff „Fram“ des norwegischen Polarforschers Fridtjof Nansen, ist bis heute die einzige Tiefenwasser Verbindung des Arktischen Ozeans mit den Weltmeeren und von großer Bedeutung für den Austausch der Wassermassen.

Trotz all dieser geologischen Anhaltspunkte stellt die Entstehungsgeschichte des Arktischen Ozeans noch immer ein plattentektonisches Rätsel dar. Viele Details sind bis heute nicht richtig verstanden. Geologen wissen zum Beispiel nicht, welchen Ursprung der Alpha-Mendelejew-Rücken hat. Der untermeerische Gebirgszug teilt das Amerasische Becken in das nördliche Makarowbecken und das südlich gelegene Kanadabecken. Schiffs Expeditionen in dieses riesige Meeresgebiet sind selten und teuer, weil dieser Teil des Arktischen Ozeans trotz des Klimawandels auch im Sommer noch mit Meereis bedeckt ist und geologische Bohrungen deshalb besonders aufwendig und riskant sind.

Vereisungen in der Erdgeschichte

Klimageschichtlich betrachtet leben wir derzeit in einer Ausnahmesituation. Seit ihrer Entstehung vor etwa 4,6 Milliarden Jahren war es auf der Erde nämlich die meiste Zeit viel zu warm, als dass am Nordpol oder am Südpol große eisbedeckte Gebiete hätten entstehen können. Der Planet war überwiegend eisfrei. Weiträumige Vergletscherungen in den hohen Breiten traten immer nur in sogenannten Eiszeiten auf. Als solche werden jene Zeiträume bezeichnet, in denen Gletscher und Inlandeismassen große Teile der Nord- und Südhalbkugel bedecken. Die Voraussetzungen für dauerhaft eisbedeckte Polarregionen sind nur in sogenannten Eiszeitaltern gegeben.

Das gegenwärtige Eiszeitalter begann mit der Vereisung der Antarktis vor etwa 40 bis 35 Millionen Jahren. Seit etwa einer Million Jahre wechseln sich Kalt- und Warmzeiten in einem Rhythmus von circa 100 000 Jahren ab. Klimaforscher bezeichnen diese Phasen als Glaziale (Eiszeiten) und Interglaziale (Warmzeiten).

Gegenwärtig befindet sich die Erde in einem solchen Interglazial. Das heißt, wir erleben ein Klima mit milden Wintern, gemäßigten Sommertemperaturen und Vergletscherungen in beiden Polargebieten sowie in den Hochgebirgen.

Über die Frage, welche Faktoren eine Eiszeit auslösen, wird viel diskutiert. Fest steht, dass starke Klimaveränderungen immer von Änderungen der Energiebilanz des Planeten begleitet werden. Dafür gibt es in der Regel vier mögliche Auslöser:

- zyklisch ablaufende Schwankungen der Sonnenaktivität;
- Änderungen in der Umlaufbahn der Erde um die Sonne;
- Änderungen der planetarischen Albedo, das heißt des von der Erde in den Weltraum zurückgespiegelten Teils der Sonnenenergie. Dieser Wert hängt im Wesentlichen von der Bewölkung und der Helligkeit der Erdoberfläche ab;
- Änderungen in der Zusammensetzung der Atmosphäre, vor allem der Konzentration von Treibhausgasen wie Wasserdampf, Kohlendioxid, Methan und Lachgas oder der Menge an Feinstaub in der Luft.

Treten eine oder mehrere dieser Veränderungen ein, verstärken sich die Prozesse teilweise gegenseitig. Ein gutes Beispiel dafür ist die sogenannte Eis-Albedo-Rückkopplung: Entstehen infolge einer Abkühlung des Klimas Eisschilde, Gletscher und Meereis, so vergrößern die weißen Eisflächen die Rückstrahlkraft der Erde, die Albedo. Das bedeutet, ein wachsender Anteil der einfallenden Sonnenenergie wird ins Weltall zurückgestrahlt, wodurch die Lufttemperatur weiter abkühlt und noch mehr Eis entsteht.

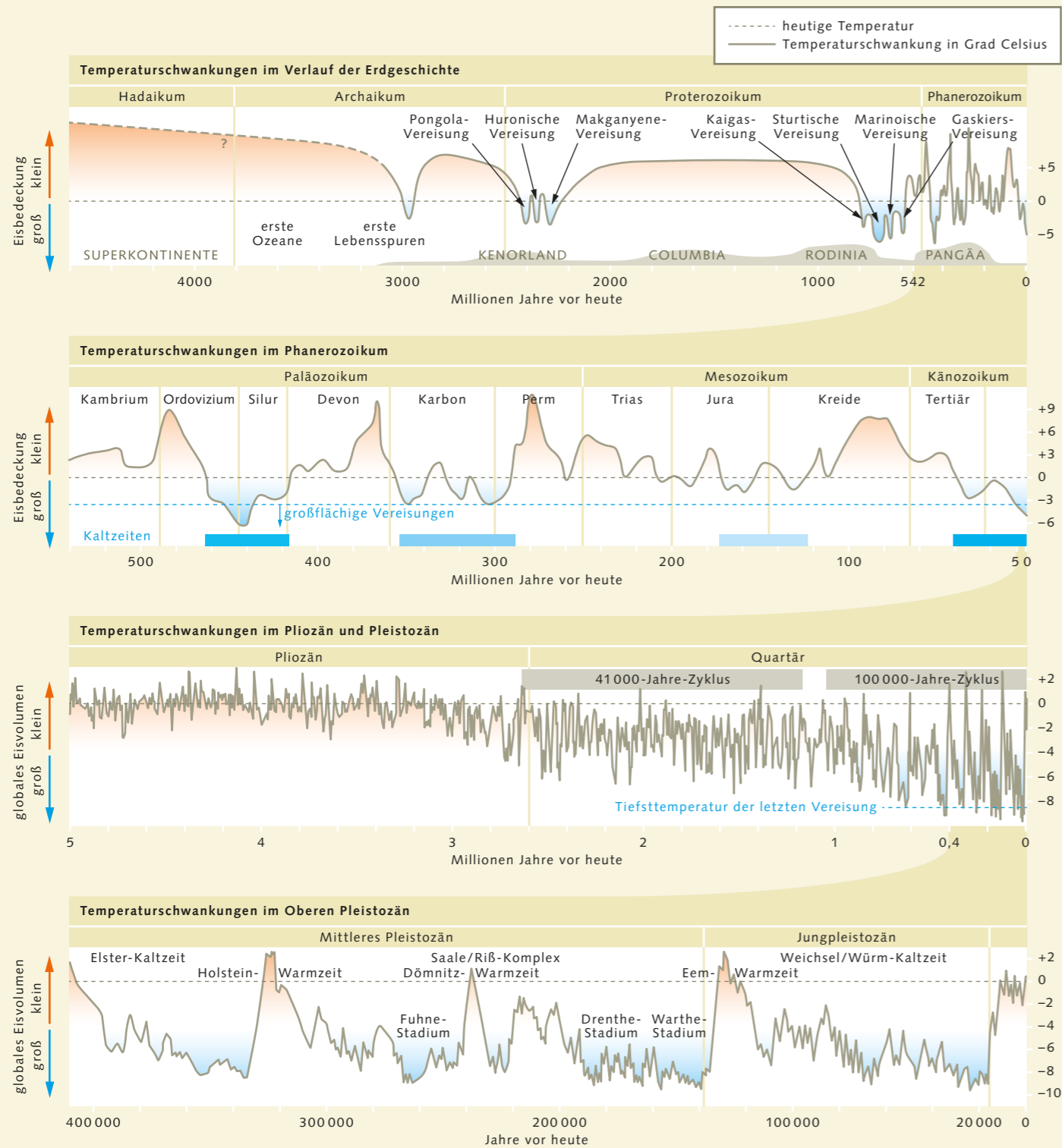
Neben diesen vier Hauptursachen für Klimaveränderungen gibt es allerdings weitere Faktoren, die das Wetter und Klima der Erde und somit auch das Ausmaß der Vereisungen kurz- bis längerfristig beeinflussen. Dazu gehören:

- Meteoriteneinschläge, kurze Vulkanausbrüche und regelmäßig wiederkehrende Meeresströmungsschwankungen wie das El-Niño-Phänomen;
- Jahrzehnte andauernde Vulkanausbrüche sowie Änderungen in der Ozeanzirkulation;
- hunderttausend bis hundert Millionen Jahre andauernde Klimaschwankungen, die vor allem durch plattentektonische Prozesse gesteuert werden – und in deren Folge sich die Ozeanzirkulation und der Kohlenstoffkreislauf verändern.

Alle diese Einflüsse gilt es zu bedenken, wenn man versucht zu ergründen, weshalb es im Lauf der Geschichte wiederholt zu teilweise extremen Vergletscherungen auf der Erde kam und warum die Eismassen zwischendurch auch immer wieder verschwanden.

Klima extrem: die Schneeball-Erde

Die größten Eisflächen bedeckten die Erde im Zeitraum vor 2,5 Milliarden bis 541 Millionen Jahre. In dieser Epoche kam es über Jahrtausende wiederholt zu anhaltenden Extremvereisungen mit Eisschilden und Gletschern, die so groß waren, dass sie von den Polarregionen bis zum Äquator reichten. Dafür sprechen verschiedene Gesteinsfunde, auf deren Basis Forscher in den 1960er-Jahren erstmals die Vermutung äußerten, dass die Erde einst unter einer geschlossenen Eisdecke gelegen haben muss. Der US-amerikanische Geologe Joseph L. Kirschvink formulierte dann im Jahr 1992 die Hypothese von der „Schnee-



1.14 > Im Lauf der Erdgeschichte kühlte sich das Erdklima wiederholt so weit ab, dass sich ausgedehnte Eismassen bildeten, die, ausgehend von den Landmassen der höheren Breiten, zu einer Vergletscherung großer Teile des Planeten führten. Hauptgründe für die Klimaumschwünge waren vermutlich eine Ab- oder Zunahme der Treibhausgaskonzentration sowie Plattenverschiebungen.

ball-Erde“, der zufolge der Planet damals aus dem Weltall betrachtet wie ein Schneeball ausgesehen haben muss – so großflächig und nahezu vollständig waren Kontinente und Meere mit Eis bedeckt. Nach dieser Theorie betrug die globale Durchschnittstemperatur in diesen extremen Eiszeiten minus 50 Grad Celsius. Am Äquator war es mit einer Jahresmitteltemperatur von minus 20 Grad Celsius so kalt wie heutzutage in der Antarktis.

Kirschvinks Hypothese ist bis heute umstritten. Kritiker werfen zum einen die Frage auf, wie damals bereits existierende Lebewesen unter einer komplett geschlossenen Eisdecke überlebt haben sollen. Zum anderen gibt es noch keine befriedigende Erklärung dafür, welche Prozesse am Ende der Eiszeiten stark genug waren, das Klima von extrem kalt wieder auf normal zu drehen. Dennoch spricht mittlerweile die Mehrzahl der geologischen Hinweise für wenigstens drei solcher Schneeballzustände. Der erste ereignete sich vor 2,3 Milliarden Jahren im Zuge der Makganyene-Vereisung; der zweite, die Sturtische Eiszeit, vor 760 bis 640 Millionen Jahren sowie der dritte, die Marinoische Eiszeit, vor etwa 635 Millionen Jahren.

Als Auslöser dieser extremen Zustände wird eine Kombination aus tektonischen Plattenbewegungen, sinkenden Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre sowie starken Eis-Albedo-Rückkopplungen vermutet. So befanden sich sowohl im Vorfeld der ersten Schneeball-eiszeit als auch vor den späteren Schneeballereignissen große Landmassen in den tropischen Breiten. Eine solche Plattenkonzentration um den Äquator herum setzte zwei Prozesse in Gang, die zu einer unmittelbaren Abkühlung führten. Erstens führten in Regionen mit feuchtem Klima Regenfälle dazu, dass junge Felsen und Gebirge, die durch die Plattenbewegungen an die Erdoberfläche gehoben worden waren, verwitterten. Das heißt, wann immer Regenwasser auf das nackte Kalk- oder Silikatgestein fiel, reagierte es mit dem Kohlendioxid aus der Luft zu Kohlensäure, die dann in der Lage war, Minerale aus dem Gestein zu lösen und den Fels auf diese Weise zu zersetzen. Das Treibhausgas Kohlendioxid wurde bei diesem Vorgang gebunden und damit der Atmosphäre entzogen – und zwar für lange Zeit. In Klimamodellierungen konnten Wissenschaftler inzwischen nachweisen, dass eine globale Vergletscherung bei einer Kohlendioxidkonzentration von unter 40 ppm (parts per million, Millionstel) einsetzt.

Zweitens ließ die dichte Ansammlung der Kontinente am Äquator den tropischen Ozean weniger Wärme aufnehmen, weil durch diese Landkonstellation weniger Wasserfläche als Wärmespeicher zur Verfügung stand. Die Meeresströmungen konnten also weniger Wärme auf dem Erdball verteilen. Astrophysiker gehen außerdem davon aus, dass die Sonne seit ihrer Entstehung bis heute immer leuchtstärker geworden ist. Vor 800 Millionen Jahren empfing die Erde beispielsweise etwa sechs Prozent weniger Sonneneinstrahlung als heute.

Unter diesen Voraussetzungen genügte vermutlich ein großer Vulkanausbruch, der Millionen Tonnen Aschepartikel in die Atmosphäre katapultierte und die Sonneneinstrahlung zusätzlich reduzierte, um den Übergang in einen Schneeballzustand auslösen. Dazu mussten nur die ersten Gletscher entstehen. Je größer deren Fläche wurde, desto mehr der einfallenden Sonnenenergie wurde vom Eis reflektiert – und die Erde kühlte sich weiter ab.

Wer oder was diese Spirale der Eiseskälte irgendwann stoppte, können die Wissenschaftler bislang nur vermuten. Wahrscheinlich waren es erneut plattentektonische Verschiebungen und Vulkanausbrüche, welche die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre über einen Zeitraum von fünf bis zehn Millionen Jahre wieder ansteigen ließen und damit die Rückkehr zu einer Phase mit wärmerem Klima einläuteten. Die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre erreichte am Ende der dritten globalen Vereisung sogar die Zehn-Prozent-Marke und lag damit um ein Vielfaches höher als die heutige Kohlendioxidkonzentration von 0,041 Prozent (entspricht 410 ppm). Die Welt kippte infolgedessen von einem Schneeballklima in ein Supertreibhausklima, dessen Wärme den wahrscheinlich bis zu 4000 Meter dicken Eispanzer der Erde innerhalb weniger Tausend Jahre schmelzen ließ. Für diese These sprechen unter anderem charakteristische Gesteinsablagerungen, die zum Beispiel im Oman oder auch in Australien gefunden wurden, sowie die Ergebnisse verschiedener Klimamodellierungen.

Die Polkappen vereisen

Das Bild der jüngeren Klimageschichte der Polargebiete gleicht noch einem Puzzle, in dem viele Teile fehlen. Ziemlich sicher weiß man, dass die gegenwärtige Verei-

Wasserisotope: Einblicke in das Klima der Vergangenheit

Unserer Erde die Geheimnisse ihrer Klimageschichte zu entlocken, gehört zu den schwierigsten Aufgaben der Forschung. Verlässliche Thermometer gibt es nämlich erst seit rund 300 Jahren. Forscher nutzen deshalb Wasserisotope als Klimaanzeiger. Ihr Vorkommen erlaubt Rückschlüsse auf Temperatur, Niederschlag und Eisvolumen für viele Millionen Jahre.

Was sind Wasserisotope?

Als Wasserisotope bezeichnet man Moleküle des Wassers, deren Atome die gleiche Anzahl an Protonen, aber eine unterschiedliche Anzahl an Neutronen besitzen. Klimaforscher messen unter anderem die Menge derjenigen Wasserisotope, welche im Vergleich zum normalen „leichten“ Wasserisotop ($H_2^{16}O$) entweder zwei Extra-Neutronen im Kern des Sauerstoffatoms ($H_2^{18}O$) oder ein weiteres Neutron im Wasserstoffatom ($HD^{16}O$) aufweisen. Diese beiden „schweren“ Wasserisotope kommen in der Natur jedoch nur sehr selten vor.

leichtes Wasser $H_2^{16}O$
 8 Neutronen
 8 Protonen
 Sauerstoff = ^{16}O
 Wasserstoff = H
 1 Proton, 0 Neutronen

schweres Wasser $HD^{16}O$
 Deuterium = D
 +1 Neutron

schweres Wasser $H_2^{18}O$
 +2 Neutronen

Niederschlag
Schwere Isotope gehen eher in den Niederschlag, mehr leichte Isotope verbleiben im Dampf.

Wasser verdunstet
Leichte Isotope verdampfen eher, mehr schwere Isotope verbleiben im Ozean.

Wasser wird ausgeschwitzt

Wenn Wasser verdunstet oder kondensiert, verändert sich das Verhältnis der Wasserisotope. So enthält zum Beispiel Niederschlag bei kälteren Temperaturen mehr schwere Wasserisotope als bei wärmeren Temperaturen. Dieser Temperatureffekt bleibt in Klimaarchiven wie Eiskernen erhalten und kann dort auch nach Jahrtausenden nachgewiesen werden.

Erkenntnisse aus Eiskernen

Eiskerne bestehen aus Schnee, welcher in der Vergangenheit gefallen ist. Für einzelne Eisschichten bestimmen Forscher aus den Isotopen die Temperaturen und können so zum Beispiel in der Antarktis den Wechsel von Warm- und Kaltzeiten in den letzten 800 000 Jahren erkennen.

Alter in Jahren: 0, 200 000, 400 000, 600 000, 800 000

Erkenntnisse aus Bodeneis

Bodeneis bildet sich in Permafrostgebieten zum Beispiel in Form von Eiskeilen. Ihr Eis ist gefrorenes Schneeschmelzwasser. Die Wasserisotope der Eiskeile zeigen daher die Wintertemperaturen zur Zeit ihres Gefrierens – hier eine Temperaturkurve der letzten 8 000 Jahre in Sibirien.

Alter in Jahren: 0, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000, 8000

Erkenntnisse aus dem Meer

Mikrofossilien wie Foraminiferen und Kieselalgen speichern das Isotopensignal in ihren Kalk- und Siliziumschalen. Geoforscher suchen in Ablagerungen am Meeresgrund nach diesen Schalen und können so Wassertemperaturen oder das Eisvolumen der Erde rekonstruieren.

Alter in Millionen Jahren: 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70

Erkenntnisse aus Modellen

Einige Klimamodelle können nicht nur Temperatur und Niederschlag, sondern auch das Isotopenverhältnis im Niederschlag simulieren. Vergleiche von Modellresultaten und Messungen helfen, die Isotopensignale in Eiskernen, Bodeneis und Meer besser zu verstehen.

sung der Antarktis vor circa 40 bis 35 Millionen Jahren einsetzte. In dieser Zeit veränderte sich das Klima der Erde grundlegend. Zum einen nahm die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre deutlich ab, wodurch auch die Luft- und Wassertemperaturen sanken. Zum anderen öffneten sich auf der Südhalbkugel zunächst die Tasmanian Passage, der Seeweg zwischen Tasmanien und der Ostantarktis, später die Drake Passage. Der antarktische Kontinent ist seitdem vollständig von einer tiefen Meeresstraße umgeben, auf der die Wassermassen des Zirkumpolarstroms fließen. Sie verhindern bis heute, dass warme Meeresströmungen aus dem Norden die Antarktis erreichen.

Die ersten Gletscher bildeten sich vermutlich in den Gebirgslagen der Ostantarktis – genauer gesagt in den Bergen der Region Königin-Maud-Land, im Transantarktischen Gebirge sowie im heute völlig unter dem Eispanzer verborgenen Gamburzewgebirge, benannt nach dem sowjetischen Geophysiker Grigori Alexandrowitsch Gamburzew. Weil es damals kalt genug war und ausreichend Schnee fiel, müssen diese Gletscher sehr schnell gewachsen sein. Darauf lassen Klimadaten aus Tiefseesedimenten schließen, denen zufolge die Antarktis bereits vor 34 Millionen Jahren einen oder mehrere Eisschilde besaß, die etwa halb so viel Eis speicherten wie zum gegenwärtigen Zeitpunkt.

In der Folgezeit wuchsen und schrumpften die Eismassen der Antarktis, je nachdem, wie sich das globale Klima entwickelte und wie viel Sonnenenergie das Südpolaregebiet erreichte. Sie verschwanden allerdings nie vollständig. Ihre größte Ausdehnung erreichten die beiden heute noch existierenden Eisschilde der Ost- und Westantarktis zum Höhepunkt des Letzten Glazialen Maximums vor etwa 19 000 Jahren. Ihre Eiszungen erstreckten sich damals bis zum äußeren Rand des Kontinentalsockels, was zu einer Absenkung des Meeresspiegels um etwa fünf bis 15 Meter führte. Zum Vergleich: Die westantarktischen Gletscher ragten damals etwa 450 Kilometer weiter auf das Südpolarmeer hinaus als heutzutage und transportierten so viel Eis, dass die Eiszungen nicht mehr schwammen (Schelfeis), sondern auf dem Meeresboden auflagen (Eisschild). Gleiches galt für die Gletscher in der Rossmeer- und Weddellmeerregion. Insgesamt lag der globale Meeresspiegel zum Höhepunkt der letzten Eiszeit etwa 120 Meter niedriger als heute.

Die Frage nach der ersten Vergletscherung in der Arktis ist seit dem Jahr 2004 nicht mehr so klar zu beantworten. Bis dahin hatte man angenommen, dass die großflächige Gletscherbildung im Nordpolargebiet erst vor 2,7 Millionen Jahren einsetzte – das heißt mehr als 30 Millionen Jahre später als in der Antarktis. Im Sommer 2004 aber fanden Wissenschaftler bei Bohrungen im Sedimentkern am Lomonossowrücken in mehr als 44 Millionen Jahre alten Ablagerungen grobe Gesteinspartikel, die weder vom Wind noch vom Wasser in den Ozean eingetragen worden sein konnten. Einige Forscher schlussfolgerten daraufhin, dass schon damals Eisberge auf dem Arktischen Ozean getrieben sein müssen, welche dieses Geröll mit sich trugen. Diese Annahme wiederum würde bedeuten, dass es auch damals schon Gletscher in Meeresnähe gab, von denen diese Eisberge gekalbt waren.

Ob diese Interpretation stimmt und die Arktis wirklich früher vergletscherte als die Antarktis, wird seitdem kontrovers diskutiert. Gegen die Eisbergthese sprechen unter anderem Überreste von Wäldern, die zu dieser Zeit in der Arktis wuchsen und auf ein Klima hinweisen, das für Gletscher deutlich zu warm war. Andere Forscher argumentieren, dass auch Meerereis die Gesteinspartikel transportiert haben könnte. Wie weiterführende Analysen der Bohrkerne vom Lomonossowrücken ergaben, könnte der Arktische Ozean von einer ersten dauerhaften Meerereisdecke überzogen worden sein, lange bevor sich in der Ostantarktis die ersten Eisschilde bildeten.

Die ersten Gletscher auf der Nordhalbkugel entstanden im Zuge einer deutlichen Abkühlung des Klimas vor 3,2 bis 2,5 Millionen Jahren. Damals sank die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre von etwa 400 auf rund 300 ppm. Gleichzeitig schloss sich aufgrund plattentektonischer Verschiebungen die Meeresstraße von Panama, sodass der bis dahin stete Wasseraustausch zwischen dem Pazifischen und dem Atlantischen Ozean gestoppt wurde.

Welchen Einfluss diese Veränderung auf das Klima in der Arktis hatte, wird in der Wissenschaft kontrovers diskutiert. Mehr und mehr Studien deuten jedoch darauf hin, dass sich infolge des unterbrochenen Wasseraustauschs zwischen Pazifik und Atlantik die Meeresströmungen in beiden Ozeanen veränderten. Im Atlantischen Ozean verstärkte sich der Golfstrom. Er und

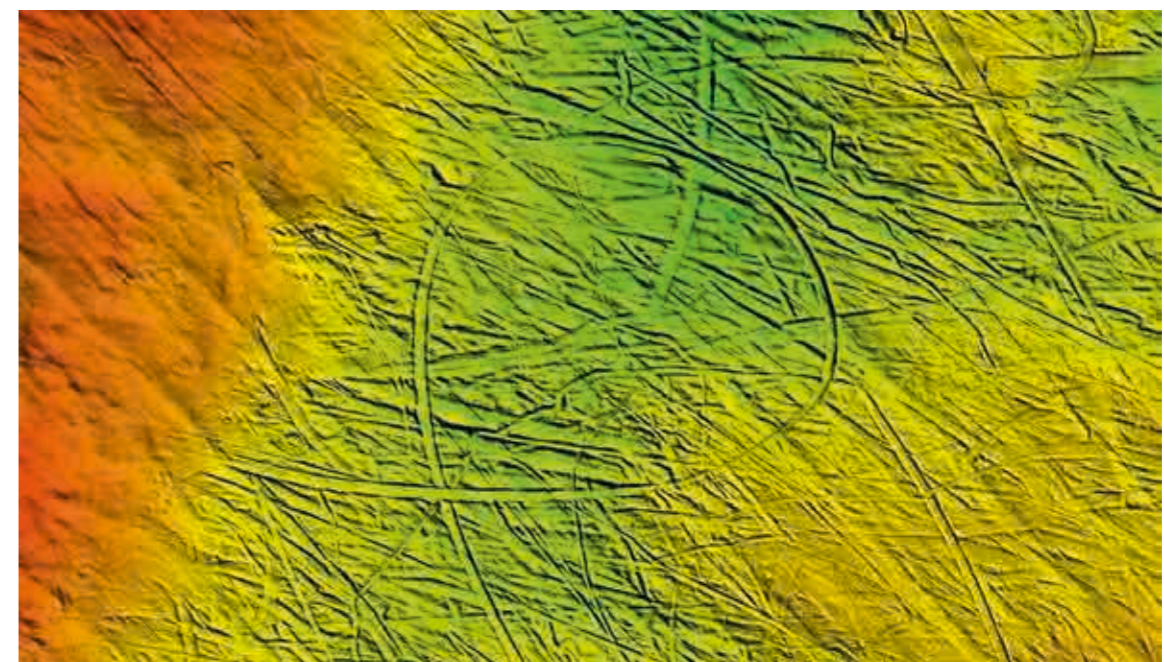
seine Ausläufer transportierten nun mehr salzhaltiges Wasser, Wärme und Feuchtigkeit in den hohen Norden. Das Wasser kühlte in der Framstraße an der Meeresoberfläche ab und sank kalt und schwer Richtung Meeresboden. Dort angekommen, wanderte es dem globalen Förderband der Meeresströmungen folgend Richtung Süden. Die Wärme und Feuchtigkeit über dem Meer dagegen wurden von den Westwinden Richtung Europa und Sibirien getragen. Dort regnete und schneite es nun häufiger, sodass die Flüsse deutlich mehr Süßwasser in den Arktischen Ozean transportierten. Meerwasser mit einem hohen Süßwasseranteil wiederum gefriert im Winter schneller zu Meerereis.

Die Klimaforscher gehen nun davon aus, dass sich damals mehr Eisschollen auf dem Arktischen Ozean bildeten. Die wachsende Eisdecke wiederum reflektierte einen zunehmenden Teil der einfallenden Sonnenstrahlung ins Weltall und verhinderte so, dass der Ozean die Wärme speicherte. Gleichzeitig veränderte sich vor 3,1 bis 2,5 Millionen Jahren der Neigungswinkel der Erde zur Sonne. Der Planet neigte sich ein Stück von der Sonne weg, sodass die Nordhalbkugel deutlich weniger Sonneneinstrahlung abbekam, als dies heutzutage der Fall ist. Die Jahreszeiten wurden kälter, im Sommer schmolz vor allem

in den Hochlagen weniger Schnee. Die übrig gebliebenen Schneemassen verdichteten sich mit der Zeit zu Firn. Später entstand daraus das Eis der ersten Gletscher.

Während der anschließenden Eiszeiten bedeckten zeitweise kilometerdicke Eispanzer große Teile Nordamerikas, Europas und Sibiriens. Tiefe, parallel verlaufende Furchen am Meeresboden der Ostsibirischen See deuten sogar darauf hin, dass sich innerhalb der vergangenen 800 000 Jahre selbst direkt im Arktischen Ozean Eisschilde gebildet haben, die im Gegensatz zum Packeis nicht auf der Wasseroberfläche schwammen, sondern auf dem Meeresboden auflagen. Diese Eismassen waren mindestens 1200 Meter mächtig und erstreckten sich vermutlich über eine Fläche so groß wie Skandinavien.

Das Wissen von der Existenz solcher marinen Eisschilde stellt viele der bisherigen Vorstellungen zur Vereisungsgeschichte der Arktis infrage. Belegen die Furchen doch, dass Großvereisungen nicht nur von Hochlagen auf den Kontinenten ausgehen, wie dies etwa in Grönland, Nordamerika und im Norden Europas und Asiens der Fall war. Eisschilde können auch im Meer entstehen. Eine Antwort auf die Frage, welche Umweltbedingungen dazu jedoch erforderlich sind, gehört zu den vielen fehlenden Teilen im Vereisungspuzzle der Polargebiete.



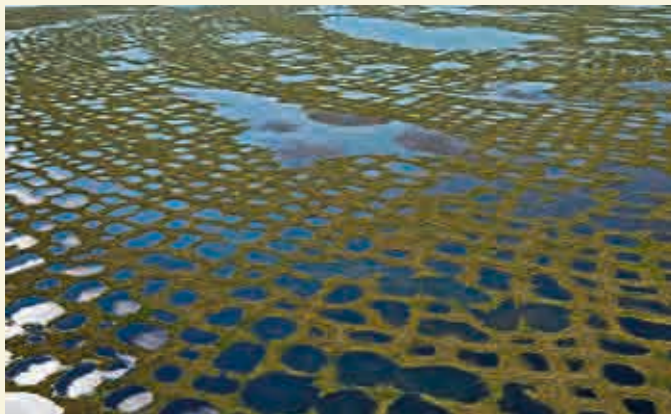
1.15 > Wo Eisberge oder Schelfeise auf dem Meeresboden aufliegen, hinterlassen sie bei ihrer Wanderung Spuren. Diese nahezu kreisrunde Furche hat ein Eisberg vor der Küste Spitzbergens in den Untergrund gezogen.

Die vielen Gesichter des Eises

Eis entsteht, wenn Wasser gefriert. Es bildet sich in den Polargebieten auf ganz unterschiedliche Weise. Aufgrund der verschiedenen Ausprägungen lassen sich folgende Eisformen voneinander unterscheiden:

Permafrost

Von Permafrost, Dauerfrostboden oder Bodeneis sprechen Forscher, sobald die Temperatur des Bodens in mindestens zwei aufeinanderfolgenden Jahren unter null Grad Celsius liegt und das im Boden enthaltene Wasser gefroren ist. Der Untergrund kann dabei aus Gestein, Sedimenten oder Erde bestehen und unterschiedlich große Eismengen enthalten. In der Arktis gibt es Gebiete, in denen 70 Prozent des Untergrunds aus Eis bestehen – beispielsweise im nordöstlichen Sibirien. Das Bodeneis kann bis in eine Tiefe von 1,5 Kilometern reichen. Zurzeit findet man Permafrost in bis zu 25 Prozent der freiliegenden Landoberflächen der nördlichen Hemisphäre.



1.16 > Die meisten Permafrostgebiete sind an der polygonalen Musterung zu erkennen. Sie entsteht durch wiederholtes Gefrieren des Bodens.

Gletscher

Ein Gletscher ist eine große, aus Schnee gebildete Eismasse, die aufgrund ihres großen Gewichts eigenständig und langsam talwärts strömt und in ihrem unteren Bereich durch Abschmelzen des Eises aufgezehrt wird. Manche Gletscher sind kaum größer als ein Fußballfeld, andere wiederum können Hunderte Kilometer lang sein. Gegenwärtig sind die meisten Gletscher in der Antarktis, Grönland und der kanadischen Arktis zu finden – es gibt sie aber auch in Hochgebirgen wie den Alpen, den Anden oder dem Himalaja, wo sie eine wichtige Trinkwasserquelle für die umliegenden Regionen darstellen. Der größte Gletscher der Welt ist der Lambertgletscher in der Ostantarktis. Er ist 400 Kilometer lang, hundert Kilometer breit und transportiert allein acht Prozent der Eismassen des antarktischen Eisschildes Richtung Meer. Ein Gletscher kann wie ein Eis-

schild wachsen oder schrumpfen, abhängig davon, wie viel Schnee im Winter auf seine Oberfläche fällt und wie viel Schnee und Eis im Sommer schmelzen.



1.17 > Eisbildung im Weddellmeer. Die weißen Schlieren entstehen, wenn lose Eiskristalle verweht werden.

Meereis

Meereis entsteht durch das Gefrieren von Meerwasser, wobei sich dieses aufgrund seines Salzgehalts auf minus 1,8 Grad Celsius abgekühlt haben muss, damit es gefrieren kann. Süßwasser dagegen gefriert schon bei null Grad Celsius. Junges Meereis enthält noch jede Menge Salzlake, die sich in Tropfenform zwischen den Eiskristallen oder in kleinen Solekanälen ansammelt. Im Lauf der Zeit sickert diese Lake zur Eisunterseite und geht dort ins Wasser über. Auf diese Weise erklärt sich auch, warum mehrjähriges Meereis kaum noch Salz enthält.

Wenn Meereis gefriert, formen sich zunächst drei bis vier Millimeter große Eiskristalle, die sogenannten Eisnadeln. Diese sammeln sich an der Wasseroberfläche und bleiben mit zunehmender Dichte aneinanderhaften. Bei Windstille entsteht so eine dünne, zusammenhängende Eisfläche, die Nilas genannt wird. Bei Wellengang dagegen formen die Eisnadeln nach einiger Zeit pfannkuchenförmige Eisplättchen, die ständig aneinanderstoßen und deshalb an ihren Rändern etwas hochgebogen sind. Diese typische Form des Meereises wird Pfannkucheneis genannt.

Sowohl Nilas als auch Pfannkucheneis werden im Lauf der Zeit dicker und bilden Eisschollen, die im ersten Jahr bis auf 90 Zentimeter Dicke anwachsen können. Wind und Wellen türmen diese Schollen häufig übereinander, sodass sogenannte Packeisrücken mit einer Mächtigkeit von zehn bis 20 Metern entstehen. Sie stellen auch für Eisbrecher ein unüberwindbares Hindernis dar und sind nur kaum oder gar nicht zu durchbrechen.

Meereis entsteht vor allem in den Polarregionen. Es gefriert im Winter und schmilzt zu großen Teilen im Sommer. Das Südpolarmeer verliert im Sommer bis zu 80 Prozent seines Meereises. Die Eisfläche schrumpft dann von 18,5 Millionen Quadratkilometern (September, Winterende) auf 3,1 Millionen Quadratkilometer (Februar, Sommerende). Im Vergleich dazu büßt der Arktische Ozean nur rund die Hälfte seiner Eismassen ein. Seine Meereisfläche beträgt im Winter durchschnittlich 14 bis 16 Millionen Quadratkilometer, im Sommer sind es sieben bis neun Millionen Quadratkilometer, Trend stark abnehmend.



1.18 > Pfannkucheneis vor der Küste Spitzbergens. Die Eisplättchen mit den aufgebogenen Rändern bilden sich durch Wellenbewegungen.

Eisschild

Als Eisschild, Eiskalotte oder auch Inlandeis bezeichnet man einen ausgedehnten, aus Schnee hervorgegangenen Eispanzer, der auf einer Landfläche aufliegt, dabei das gesamte Terrain bis auf wenige Gipfel bedeckt und eine Fläche von mehr als 50 000 Quadratkilometern aufweist. Derzeit gibt es auf der Erde zwei Eisschilde – das Antarktische Inlandeis mit einer Fläche von 11,9 Millionen Quadratkilometern (ohne Schelfeis) und das Grönländische Inlandeis mit einer Ausdehnung von 1,71 Millionen Quadratkilometern. Der Antarktische Eisschild ist bis zu 4897 Meter dick und speichert so viel Wasser, dass der globale Meeresspiegel im Fall des vollständigen Abschmelzens des Eisschildes um rund 60 Meter steigen würde. Der Grönländische Eisschild weist eine Mächtigkeit von bis zu 3200 Metern auf und könnte den Meeresspiegel global um etwa sieben Meter ansteigen lassen.

Eisschilde entstehen in Regionen, in denen der im Winter gefallene Schnee im Sommer nicht vollständig schmilzt. Im Lauf der Zeit wächst die verbleibende Schneemenge Schicht für Schicht und verdichtet sich zunächst zu Firn und dann zu Eis, da das Gewicht der aufliegenden Massen mit jedem neuen Schneefall steigt. Ein Eisschild hat die Form einer

Kuppel, das heißt, er ist im Zentrum dicker als an seinen Rändern. Seine Eismassen muss man sich wie einen zähflüssigen, ungebackenen Kuchenteig vorstellen. Sie fließen aufgrund ihres Eigengewichts aus der Mitte des Eispanzers zu den Rändern – wie es auch der Kuchenteig macht, wenn man diesen als Klumpen aus der Backschüssel nimmt und auf eine Arbeitsplatte legt.

An den Rändern des Eisschildes münden die Eismassen in der Regel in Gletscher, Eisströme oder Schelfeis und werden Richtung Meer abtransportiert. Es gibt allerdings auch Randbereiche, in denen sich das Eis nicht bewegt und der Eisschild abrupt endet.

Solange sich auf der Oberfläche eines Eisschildes mehr oder gleich viel Schnee ablagert, als an seinen Rändern verloren geht, gilt ein Eisschild als stabil. Bleibt weniger Schnee liegen, als der Eisschild an Eis an das Meer verliert, schrumpft der Eispanzer.

Schelfeis

Schelfeis nennt man den auf dem Meer schwimmenden Fortsatz eines Eisschildes oder Gletschers – also jenen Teil, der nicht mehr auf dem Land oder dem Meeresgrund aufliegt. Die weltweit bekanntesten Schelfeise gibt es in der Antarktis, wo mit dem Filchner-Ronne-Schelfeis (rund 422 000 Quadratkilometer Fläche) und dem Rossschelfeis (rund 473 000 Quadratkilometer Fläche) auch die zwei größten ihrer Art zu finden sind.

Die Dicke der Eisplatten kann sich von Schelfeis zu Schelfeis unterscheiden – die Spanne reicht von 50 Metern im Kantenbereich bis zu 1500 Metern im Übergangsbereich vom Inlandeis zum Schelfeis, Aufsetzlinie (grounding line) genannt. Am äußersten Rand eines Schelfeises brechen immer wieder Eisberge ab. Dieser Prozess wird als Kalben bezeichnet.



1.19 > Blick auf die Kalbungsfront des Rossschelfeises in der Antarktis. Es ist das größte Schelfeis der Welt.

Der Mensch erobert die Polargebiete

> Angesichts des extremen Klimas bedurfte es seit jeher guter Gründe, sich in die Polarregionen vorzuwagen. Vor 45 000 Jahren lockte die Aussicht auf Beute die ersten Jäger in die Arktis. Später folgten Abenteurer und Entdecker auf der Suche nach neuen Handelswegen, dann war die Hoffnung auf Ruhm und Ehre der Haupttreiber. Heute sind – trotz handfester wirtschaftlicher und politischer Interessen – Forscherdrang und Wissensdurst ein wichtiges Motiv und entfalten eine friedensstiftende Wirkung. Denn selbst in politisch schwierigen Zeiten arbeiten in Polargebieten Wissenschaftler aus verschiedenen Nationen Hand in Hand.

Die große Wanderung

Die ältesten Spuren des Menschen in den Polarregionen wurden in der Arktis gefunden – eine Tatsache, die kaum jemanden überraschen dürfte, ist die Arktis doch bis heute aufgrund ihrer Lage und Landverbindung deutlich leichter für Mensch und Tier zu erreichen als die vom Südpolarmeer umgebene Antarktis.

Russische Experten waren dennoch verblüfft, als sie im Sommer 2012 am Steilufer der sibirischen Taimyrhalbinsel zwischen Kara- und Laptewsee den im Permafrost konservierten Kadaver eines jungen Mammutbullen fanden und feststellten, dass dieses Tier schon vor rund 45 000 Jahren von Menschenhand erlegt worden war, 10 000 Jahre früher, als bis zu diesem Zeitpunkt angenommen. Den Rekonstruktionen zufolge hatten die Urzeitjäger das Mammut mit Speerstichen an der Schulter, in der Magengegend, im Bereich des Brustkorbs und am Rüsselansatz so schwer verletzt, dass es gestorben war. Die Technik, mit dem Speer auf den Rüsselansatz zu zielen, benutzen noch heute Elefantenjäger in einigen Teilen Afrikas. Sie erweist sich als besonders wirkungsvoll, weil an dieser Stelle des Kopfes wichtige Arterien und Venen verlaufen. Sind diese verletzt, verbluten die Tiere.

Die arktischen Urzeitjäger stellten damals jedoch nicht nur Mammuts nach. Am Fluss Jana rund 1700 Kilometer weiter östlich fanden die Wissenschaftler Überreste mehrerer Bisons und Wollnashörner. Darüber hinaus entdeckten sie die Knochen eines Wolfes. Diese Tiere waren vor etwa 29 000 Jahren von Menschen erlegt worden. Beide Ausgrabungen belegen somit, dass moderne Menschen die sibirische Arktis schon lange vor der letzten Eiszeit weiträumig durchstreift haben müssen.

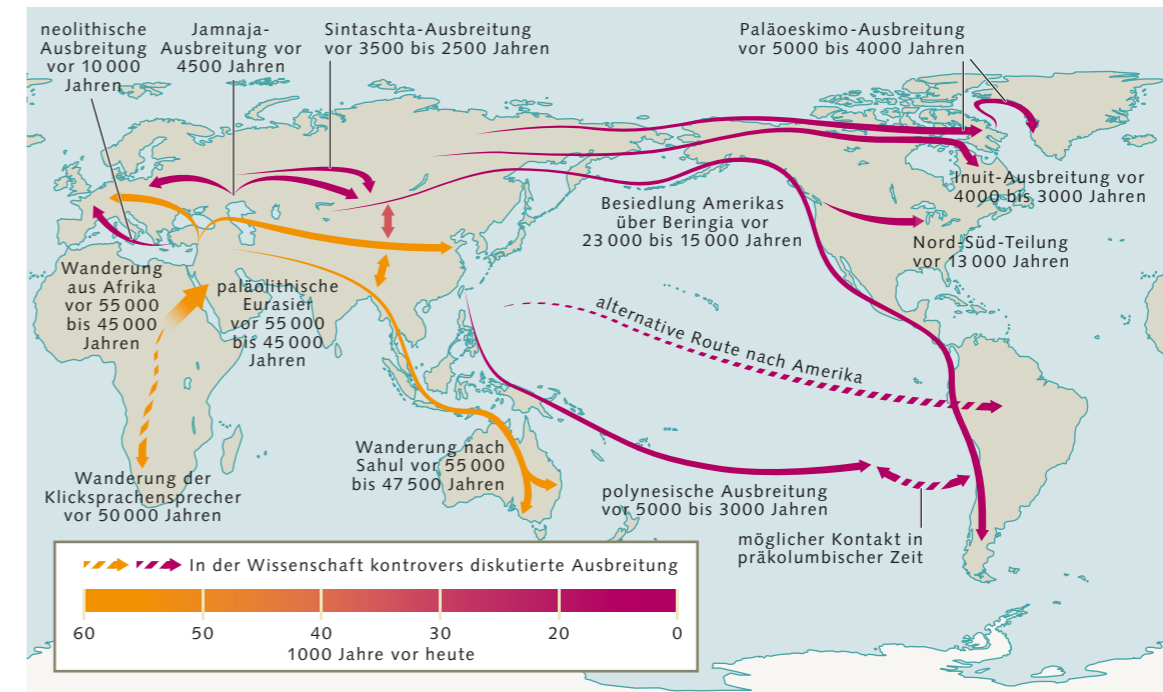
Diese Erkenntnis rückt auch das Wissen über die Evolution und Ausbreitung des modernen Menschen *Homo*

sapiens in ein neues Licht: Wenn man davon ausgeht, wie es einige Forscher tun, dass er erst vor 65 000 bis 50 000 Jahren seinen Ursprungskontinent Afrika verlassen hat, blieben ihm nur wenige Tausend Jahre für den langen Weg Richtung Norden. Eine beachtliche Leistung.

Wie groß die ersten Jagdgemeinschaften in der sibirischen Arktis waren, können die Forscher heute nicht mit Sicherheit sagen. Vermutlich lebten die Jäger damals in kleinen, beweglichen Gruppen, die im Sommer in Gebiete nördlich des Polarkreises vorstießen, sich dann mit Einbruch der kalten Jahreszeit aber wieder Richtung Süden zurückzogen. Klimadaten aus jener Zeit deuten darauf hin, dass die Durchschnittstemperaturen in der Arktis damals weniger harsch waren als heute. Dennoch müssen die Menschen in der Lage gewesen sein, sich warme Kleidung zu nähen, schützende Unterstände zu errichten und in der Gruppe zusammenzuarbeiten. Andernfalls hätten sie unter den klimatischen Bedingungen kaum überlebt.

Auf ihren Streifzügen orientierten sich die Urzeitjäger vermutlich an den Flussläufen, denen auch die Steppentiere auf ihren Wanderungen Richtung Norden folgten. In den Flusstälern fanden die Tiere ausreichend Weideflächen und Wasser. Lieblingsbeutetiere der ersten Arktisbewohner waren Mammuts, Rentiere und Pferde. Experten gehen davon aus, dass die Fähigkeit der Jäger, den großen Säugern nachzustellen, den Vorstoß der Menschen in die sibirische Arktis überhaupt erst möglich machte.

Nach dem Ende der letzten Eiszeit lernten die Bewohner der sibirischen Arktisregion dann, ausgefeiltere Werkzeuge und Waffen herzustellen. Sie begannen, in den Seen und Flüssen zu fischen, Vögel zu fangen sowie vor der Küste nach Walen und Robben zu jagen. Auf diese Weise mit ausreichend Nahrung versorgt, konnten sie sesshaft werden, Siedlungen anlegen und ihre Familienverbände vergrößern.



Die ersten Amerikaner

Wer die heutige Küste Sibiriens mit der Küstenlinie aus der Zeit der ersten Arktisjäger vergleicht, wird deutliche Unterschiede feststellen. Zum Höhepunkt der letzten Eiszeit vor rund 21 000 Jahren lag der globale Meeresspiegel nämlich 123 Meter niedriger als heute. Infolgedessen waren damals sowohl weite Teile der sibirischen Schelfmeere als auch das Gebiet des heutigen Beringmeers trockengefallen. Die arktische Küstenlinie Sibiriens und Nordamerikas verlief also nördlicher, als dies heutzutage der Fall ist. Außerdem verband ein breiter Streifen Land, die sogenannte Beringbrücke, Ostsibirien und Alaska miteinander.

Diese Landbrücke besaß eine Fläche etwa doppelt so groß wie der US-Bundesstaat Texas. Sie erstreckte sich vom Lenadelta im Westen bis zum Delta des Mackenzie Rivers im Osten und ging damit weit über das Gebiet der heute bekannten Meerenge zwischen Sibirien und Alaska hinaus. Die Region war vermutlich kalt, trocken und eisfrei – ganz im Gegensatz zu Nordamerika und Nordeuropa, die zu dieser Zeit von zwei bis vier Kilometer dicken Eispansern bedeckt wurden.

Von Sedimentkernbohrungen im Beringmeer weiß man, dass die Vegetation der Beringbrücke eine überraschend hohe Vielfalt aufwies. In der Region wuchsen damals Sträucher, wie man sie heute in der Tundra Alaskas findet, sowie nahrhafte, an kühle Temperaturen angepasste Gräser und Wildblumen – ideale Bedingungen für Weidetiere wie Mammuts, Bisons, arktische Kamele oder Rentiere. Die Frage, was auf der Landbrücke wuchs und welche Wildtiere dort heimisch waren, ist vor allem aus einem Grund von Interesse: Die Brücke diente Tieren und Menschen als Transitroute nach Nordamerika.

Wann und wie genau die ersten Menschen über die Landbrücke nach Nordamerika einwanderten, wird in der Wissenschaft kontrovers diskutiert und auf verschiedene Weise erforscht. Archäologen suchen nach Siedlungsspuren; Paläogenetiker rekonstruieren die Wanderung der Menschen anhand ihres Erbguts; Biologen, Geologen und Klimaforscher untersuchen die damaligen Umweltbedingungen und Landschaftsformen. Umstritten ist beispielsweise die These, dass die ersten Jäger und Sammler nicht in einem Zug über die Landbrücke wanderten, sondern zunächst für mehrere Tausend Jahre auf der Beringbrücke verweilten, weil ihnen Gletscher und Eisschilde den

1.20 > Die Hauptmigrationsrouten des modernen Menschen, als er von Nordafrika aus die Erde besiedelte. Die Wanderungen hinterließen Spuren im Erbgut des Menschen, anhand derer Forscher heute die Bewegungen rekonstruieren. Demnach wurde Nordamerika von Sibirien aus in drei Wellen besiedelt – das erste Mal vor 23 000 Jahren.

1.21 > Das Foto einer Inuitfamilie, abgedruckt in der Zeitschrift „National Geographic“, Juni 1917. Der Begleittext lobt „die Zärtlichkeit und das Verantwortungsbewusstsein“, die die Ureinwohner der Arktis im Umgang mit ihren Kindern hätten.



Weg in die neue Welt versperrten. Ungeklärt ist auch, ob sich die ersten Einwanderer ihren Weg entlang der Küste bahnten oder aber einen eisfreien Korridor zwischen den Eisschilden nutzten. Dieser Landweg soll sich aktuellen Studien zufolge bereits vor 15 000 Jahren geöffnet haben.

Konsens herrscht darüber, dass die ersten Nordamerikaner sibirische Vorfahren hatten, die wahrscheinlich – und hier beginnt die Diskussion erneut – vor etwa 24 900 bis 18 400 Jahren in das Gebiet der Beringbrücke vorstießen. Vor etwa 16 000 Jahren begannen die Einwanderer dann, den nordamerikanischen Kontinent nach und nach zu besiedeln. Ein Teil von ihnen wanderte entlang der Westküste Richtung Süden und begründete unter anderem die berühmte Cloviskultur. Der andere Teil besiedelte die eisfreien Regionen weiter landeinwärts. Keiner dieser ersten Amerikaner aber wagte es, sich nördlich des Polarkreises niederzulassen.

Die ersten Bewohner der nordamerikanischen Arktis wanderten erst vor 5000 Jahren im Zuge einer zweiten Migrationswelle über die Beringbrücke ein – also lange nachdem die großen nordamerikanischen Eisschilde ge-

schmolzen waren. Die sogenannten Paläoeskimos breiteten sich innerhalb weniger Hundert Jahre bis nach Grönland aus. Sie lebten in kleinen Zeltcamps, jagten Rentiere, Moschusochsen, Robben und Walrosse mit Speeren oder -messern und hatten gelernt, einen Teil ihrer Jagdbeute gefrieren zu lassen und in Vorratskellern oder -gruben einzulagern.

Vor etwa 700 Jahren aber verlieren sich die Spuren der Paläoeskimos. Die Bevölkerungsgruppe stirbt flächendeckend aus. Neue Einwanderer aus Sibirien, die sogenannten Neoeskimos und Vorfahren der modernen Inuit, waren vor etwa 1000 Jahren im Zuge einer dritten Migrationswelle mit dem Boot nach Nordamerika gekommen und hatten die alteingesessenen Rentierjäger allmählich verdrängt. Die Neulinge lebten in großen, gut organisierten Dorfgemeinschaften. Sie nutzten Hundeschlitten, Pfeil und Bogen und wussten, wie man Boote aus Walknochen und Robbenfellen baute. In diesen fuhren sie dann auf den Arktischen Ozean hinaus und stellten Walen nach – eine Jagdmethode, die ihnen neue, reichhaltige Nahrungsgründe erschloss und ihr Überleben im hohen Norden garantierte.

Den Moschusochsen hinterher

Vermutlich war es die Aussicht auf bessere Jagdausbeute, die die Paläoeskimos vor etwa 4500 Jahren motivierte, die 30 Kilometer breite Naresstraße, eine Wasserstraße zwischen der kanadischen Ellesmereinsel und Grönland, zu überqueren. Der Grönländische Eisschild war zum damaligen Zeitpunkt etwas kleiner als heute, sodass es an seinen Nord- und Osträndern ausreichend eisfreie Weideflächen für Moschusochsen und Rentiere gab. Außerdem lebten in den Fjorden an der grönländischen Küste viele Ringel- und Sattelrobben. Paläoeskimos standen aber nach ihrer Landung an der wenig einladenden Nordwestküste Grönlands zunächst einmal vor einer schwierigen Entscheidung. Entweder wanderten sie die Küste entlang Richtung Süden, wo in der Melvillebucht ein 300 Kilometer langer, von einem Gletscher bedeckter Küstenabschnitt überwunden werden musste, bevor die klimatisch milderen, begrünten Gebiete Westgrönlands begannen. Oder aber sie folgten den Moschusochsen Richtung Norden – in eine Region, so kalt, dass das Meer eis vor der Küste das ganze Jahr hindurch nicht geschmolz, und in der fünf Monate lang die Sonne hinter dem Horizont verborgen blieb.

Die Einwanderer entschieden sich für beide Optionen: Ein Teil von ihnen zog Richtung Süden und begründete in der Diskobucht das Volk der Saqqaq. Dessen Population wuchs in den ersten Jahrhunderten schnell. Die Saqqaq lebten in vergleichsweise großen Familienverbänden, besiedelten zügig alle größeren Fjordssysteme und Inseln Westgrönlands und stellten in erster Linie den Karibus, Sattelrobben, Ringelrobben und Vögeln der Westküste nach. Bei archäologischen Grabungen in ehemaligen Saqqaqsiedlungen fanden Forscher die Knochen von 42 verschiedenen Tierarten. Überdies steht fest, dass das Volk der Saqqaq Fleisch oder Fisch trocknete, um Vorräte anzulegen.

Der zweite Teil der Einwanderer wählte den Weg in den Norden. Diese als Independence 1 bezeichnete Gruppe der Paläoeskimos besiedelte die Halbinsel Pearyland und stieß dort auf deutlich schwierigere Lebensbedingungen als ihre Verwandten in Westgrönland. Zeitgleich mit dem Eintreffen der ersten Einwanderer begann sich nämlich das Klima Grönlands abzukühlen. Die tundrenhaften

Küstengebiete im Norden verwandelten sich nach und nach in polare Wüsten. In den Sommermonaten lebten die 100 bis 200 Pioniere in kleinen Familienclans und errichteten ihre Zeltcamps weit verstreut, um die wenigen Nahrungsquellen, welche die karge Landschaft und das Meer eis boten, nicht innerhalb kürzester Zeit auszubeuten. Sie jagten hauptsächlich Moschusochsen, Karibus, Robben und Polarfüchse. Im Winter dagegen zogen die Menschen zusammen und überwinterten in einem gemeinsamen Camp.

Die Zelte der Paläoeskimos waren rund oder oval und maßen drei bis vier Meter im Durchmesser. Etwa jedes dritte Zelt verfügte über eine Feuerstelle, gebaut aus aufgeschichteten Steinen. Dieser „Herd“ in der Mitte des Zeltes diente vor allem in den kalten und dunklen Wintermonaten als Kochstelle, wärmender Ofen und einzige Lichtquelle. Die Bewohner des hohen Nordens heizten mit dem wenigen Treibholz, das angespült wurde, sowie mit Knochen und dem Fett erlegter Land- und Meeresäuger. Die Saqqaq im Westen dagegen verfügten über ausreichend Treibholz, was sie in die Lage versetzte, deutlich öfter und ausgiebiger Feuer zu machen und darin faustgroße Steine zu erhitzen. Mit den heißen Steinen heizten sie nicht nur Räume abseits der Feuerstelle. Auf ihnen garten die Jäger auch ihr Fleisch und ihren Fisch, denn Töpfe oder anderes Kochgeschirr kannten die Paläoeskimos noch nicht.

Die Saqqaq besiedelten Westgrönland über einen Zeitraum von nahezu 2000 Jahren (etwa 2400 bis 800 Jahre vor Christus). Ihre Nachbarn auf der Halbinsel Pearyland dagegen müssen schon nach wenigen Generationen aufgegeben haben. Ihre Spuren verlieren sich vor etwa 3750 Jahren.

Die Wikinger kommen

Den Startpunkt für die Besiedelung Nordeuropas gab vermutlich das Ende der letzten Eiszeit. Erst nachdem die großen Eisschilde vor 13 000 bis 14 000 Jahren abgeschmolzen waren, konnte der Mensch Richtung Norden vorstoßen. So wanderten die Jäger und Sammler vor etwa 10 000 Jahren aus Mitteleuropa kommend entlang der Küstenlinie Skandinaviens in die Arktis ein. Weiter im Landesinnern siedelten die Steinzeitmenschen jedoch erst, nachdem dort

Cloviskultur

Als Cloviskultur wird die älteste bekannte Kultur Nordamerikas bezeichnet. Sie existierte vor etwa 13 000 bis 12 600 Jahren in weiten Teilen Nordamerikas. Ihre Mitglieder nutzten steinerne Werkzeuge, darunter Speerspitzen aus Feuerstein mit doppelseitigen Schneiden. Einige dieser Spitzen wurden erstmals bei einer Ausgrabung in Clovis im US-Bundesstaat New Mexico gefunden. Von dieser Fundstelle leitet sich auch der Name ab.

Wälder gewachsen waren, die ausreichend Holz und Nahrung boten. Im heutigen Finnland waren dies die Birkenwälder; in Norwegen vor allem Nadelwälder.

Von Skandinavien und den Britischen Inseln aus eroberten nordische Seefahrer Tausende Jahre später auch Island. Historischen Quellen zufolge landeten die Wikinger im Zeitraum zwischen 870 und 930 auf der nordischen Insel und veränderten ihr Antlitz nachhaltig: zum einen durch Pflanzen und Tiere, welche die Seefahrer aus ihrer alten Heimat mitbrachten; zum anderen indem sie nach nur wenigen Jahrzehnten begannen, die Wälder Islands abzuholzen und Schafe auf den Hochlandflächen weiden zu lassen.

Von Island aus erkundete Anfang der 980er-Jahre der Wikinger Erik der Rote die Südküste Grönlands. Im Jahr 985 stach er mit einer Flotte von 25 Schiffen in See, diesmal mit dem Ziel, sich in Grönland niederzulassen. Die Seefahrer gingen im südlichen Westgrönland an Land und errichteten drei Siedlungen, in denen sie hauptsächlich

Vieh- und Milchwirtschaft betrieben. Das Klima Grönlands hatte zu dieser Zeit sein mittelalterliches Wärmeoptimum erreicht. Die Temperaturen entsprachen den Bedingungen von heute, sodass Landwirtschaft in einem gewissen Rahmen möglich war. Die Siedler verließen sich aber nicht nur auf ihre Rinder. Im Frühsommer fischten sie Kabeljau, den sie als Stockfisch konservierten; im Herbst jagten sie Rentiere und Vögel. Außerdem handelten die Wikinger mit Walross- und Narwalelfenbein und führten Erkundungsfahrten Richtung Nordamerika durch – mit dem Ziel, dort Holz zu beschaffen, das es in Grönland nicht in ausreichendem Maß gab.

Zur Hochzeit der wikingsisch-grönländischen Besiedlung (1300–1350 nach Christus) lebten auf schätzungsweise 200 Bauernhöfen insgesamt rund 5000 Menschen, wobei diese Zahl umstritten ist. Es können durchaus auch weniger Siedler gewesen sein.

Ab Beginn des 14. Jahrhunderts verschlechterten sich die Klimabedingungen. Die Durchschnittstemperatur sank um ein Grad Celsius. Meereis und Stürme erschwerten fortan die Schiffsreisen nach Island und über den Nordatlantik. Die sommerliche Wachstumsphase verkürzte sich und Wärme liebende Tierarten wanderten in den Süden ab. Anstelle von Rindern hielten die grönländischen Bauern nun Schafe und Ziegen. Da sie jedoch nicht ausreichend Fleisch abwarfen, machten die Wikinger verstärkt Jagd auf Meeressäuger. Im offenen Wasser stellten sie Bart- und Sattelrobben, Klappmützen und dem Gemeinen Seehund nach. Sie waren dabei jedoch weit weniger erfolgreich, als die Inuit der Thule-Kultur, die seit etwa 900 nach Christus die Ellesmereinsel und Nordgrönland bevölkerten und gelernt hatten, Ringelrobben auf dem Packeis aufzulauern und mit einer ausgefeilten Harpunentechnik zu erlegen. Als wenig später noch der Elfenbeinhandel mit Europa einbrach, gaben die Nachkommen der Wikinger auf. Die letzte Familie verließ Grönland im Jahr 1411.

Das Zeitalter der Entdeckungen

Kurz nachdem sich die Wikinger aus Grönland zurückgezogen hatten, begann in Europa das Zeitalter der Entdeckungsreisen in den hohen Norden. Einige dieser Expeditionen verfolgten das Ziel, neue Gebiete für den Walfang und die Robbenjagd zu erschließen. Die meisten Fahrten

aber dienten nur einem Zweck: der Suche nach einem freien Seeweg nach Asien. Gegen Ende des 15. Jahrhunderts durfte nämlich kein Handelsschiff ohne spanische oder portugiesische Erlaubnis den südlichen Seeweg nach Indien oder China benutzen. Die beiden Großmächte hatten 1494 im Vertrag von Tordesillas die Welt unter sich aufgeteilt und kontrollierten die Schifffahrtsrouten über den Atlantischen und Indischen Ozean. Anderen aufstrebenden Seefahrernationen wie England und Holland blieb nur der Seeweg durch die Arktis, wenn sie unbehelligt Handel mit China und Indien treiben wollten. Die Ausgangssituation für die Suche nach einer schiffbaren Route durch die Nordostpassage oder aber die Nordwestpassage hätte ungünstiger jedoch kaum sein können – denn die wenigen Karten, die es von der Arktis gab, enthielten grobe Fehler.

Erste Karten der Polargebiete

Viele Küstengebiete der Nordpolarregion waren zwar seit Jahrtausenden bekannt und besiedelt. Darüber hinaus aber wusste man um das Jahr 1450 in Europa kaum etwas über die Landschaften nördlich Skandinaviens – Spitzbergen beispielsweise war zu diesem Zeitpunkt noch unentdeckt. Welche Überraschungen aber hielt der hohe Norden bereit? Warteten dort vielleicht noch unbekannte Kontinente auf ihre Entdeckung? Reichte das Packeis wirklich bis über den Horizont hinaus oder gab es, wie hier und da spekuliert, doch ein eisfreies Nordpolarmeer?

Eine der ersten Kartendarstellungen des Nordpolargebiets, gezeichnet vom Kartografen Gerhard Mercator (1512–1594) und nach seinem Tod im Jahr 1595 veröffentlicht, zeigt vier große, nur durch schmale Wasserstraßen voneinander getrennte Inseln im arktischen Becken. Ihre Existenz wurde bereits zwei Jahre später vom holländischen Seefahrer und Spitzbergen-Entdecker Willem Barents angezweifelt. Die Vorstellung von einem eisfreien Polarmeer aber hielt sich deutlich länger. Noch im Jahr 1773 versuchten zwei britische Schiffe unter der Leitung von Constantine J. Phipps und Skeffington Lutwidge, über Spitzbergen zum Nordpol zu segeln – in der festen Überzeugung, dass das Nordpolarmeer schiffbar sein müsste. Packeis stoppte die Entdecker auf Höhe des 81. Breitengrads Nord.



1.23 > Der Kartograf Gerhard Mercator zeichnete kurz vor seinem Tod den Arktischen Ozean als Meer, in dessen Mitte vier große Inseln liegen. Die Richtigkeit dieser Darstellung wurde jedoch schon kurz nach der Veröffentlichung der Karte im Jahr 1595 angezweifelt.

Im Gegensatz zur Arktis stellte die Antarktis im Altertum nur eine Idee, ein theoretisches Gebilde dar, von dessen Existenz die Griechen überzeugt waren, weil sich ihrer Vorstellung nach die Welt anderenfalls in einem Ungleichgewicht befände. In ihrem klassischen Klimazonenmodell gingen sie nämlich davon aus, dass es nicht nur im Norden eine kalte, unbewohnbare Zone geben könne, sondern sich wegen des Massengleichgewichts auf der Erde eine solche auch im Süden befinden müsse.

Im Mittelalter verbot die christliche Kirche die Vorstellung einer kugelförmigen Erde und eines vereisten Gegengewichts am Südpol. Stattdessen wurde die Erde nun als Scheibe angesehen. Eine kreisrunde Karte aus der damaligen Zeit zeigt die bekannten Kontinente Asien, Europa und Afrika umgeben von einem ringförmigen Ozean. Außerhalb dieses Ozeans führte der spanische Benediktinermönch Beatus von Liébana (um 730–798) im Süden einen weiteren unbekanntem Kontinent auf – mit dem Vermerk: „Desertta terra ... incognita nobis“.

Auf einer Weltkarte tauchte der südliche Kontinent erstmals im Jahr 1508 auf. Der Italiener Francesco Rosselli hatte ihn in seine Darstellung der Erde gezeichnet. Erste

1.22 > Der Wikinger Erik Thorvaldsson, genannt Erik der Rote, segelte im Jahr 982 mit einem kleinen Gefolge von Island nach Grönland und gründete drei Jahre später als erster Europäer eine Siedlung auf der Insel. Er nannte das Land „Grönland“ (grünes Land), in der Hoffnung, die attraktive Bezeichnung würde Siedler anlocken.





1.24 > Die Seekarte des türkischen Admirals Piri Reis aus dem Jahr 1513. Umstritten ist, ob sie die Küstenlinie Südamerikas oder auch Teile der Antarktis zeigt.

geografische Informationen über die Antarktis könnte außerdem die berühmte osmanische Piri-Reis-Karte aus dem Jahr 1513 enthalten, auch wenn bislang unbekannt ist, woher diese Informationen stammen. Die Karte zeigt nach Meinung einiger Experten unter anderem die subantarktischen Inseln südlich Feuerlands und Inseln eines eisfreien westlichen Teils des Königin-Maud-Landes.

In den folgenden zwei Jahrhunderten wurde das immer noch hypothetische Südländ fester Bestandteil von Karten – größtenteils unter dem Namen Terra Australis Incognita, der damals bei vielen Europäern den Traum von Reichtum und Glückseligkeit weckte. Legenden zufolge versprach der geheimnisvolle Südkontinent seinen Entdeckern nämlich Gold und andere Gewinne. Dieser Mythos verblasste erst, als der englische Entdecker und Seefahrer James Cook (1728–1779) auf seiner zweiten Weltreise (1772–1775) die Antarktis erstmals umsegelte und dabei den Südpolarkreis an drei Stellen überquerte, ohne dass Land gesichtet wurde. Auf Höhe des 71. Breitengrads Süd musste er wegen starken Eisgangs umkehren. Der Entdecker schlussfolgerte, dass der angenommene Kontinent noch weiter südlich liegen musste und vermutlich menschenfeindlich und nutzlos war. Mit seinem lateinischen Ausspruch „nec plus ultra“ (bis hierher und nicht weiter) zerstörte Cook die Saga vom reichen Südländ.

Neue Wege nach Indien und China

In der Arktis war derweil der Wettlauf um die Durchquerung der Nordost- und Nordwestpassage in vollem Gange. Die erste Erkundungsreise auf der Suche nach einem Weg entlang der Nordküste Amerikas leitete der Italiener Giovanni Caboto (englischer Name: John Cabot). Er war überzeugt davon, dass die kürzeste Verbindung zwischen Indien und Europa im hohen Norden zu finden ist, und entdeckte auf seiner von England finanzierten Expedition im Jahr 1497 den nordamerikanischen Kontinent auf der Höhe Labradors. Sein Sohn Sebastiano Caboto gründete im Jahr 1551 gemeinsam mit seinen zwei Weggefährten Hugh Willoughby und Richard Chancellor die englische Aktiengesellschaft Company of Merchant Adventurers to New Lands, um Gelder für die Suche nach einer Nordostpassage zu generieren. Dabei interessierte die drei Unternehmer jedoch in erster Linie die Aussicht auf neue Handelsbe-

ziehungen mit Russland und China, weniger die mögliche Entdeckung bis dato unbekannter Regionen.

Auf der ersten Arktisexpedition 1553 mit drei Schiffen erfroren Hugh Willoughby und seine Mannschaft, Richard Chancellor dagegen erreichte das Weiße Meer und wurde vom russischen Zaren zu einer Audienz nach Moskau geladen. Dort erhielt der Brite besondere Handelsprivilegien. Alle weiteren Versuche der Handelsgesellschaft, über den Seeweg weiter Richtung Osten vorzustoßen, endeten aber stets an der arktischen Insel Nowaja Semlja, welche eine Expedition der Gesellschaft im Jahr 1553 erstmals betrat. Über diesen geografischen Punkt hinaus gelangen später erst der Niederländer Willem Barents, nach dem heute die Barentssee benannt ist.

Bering, der „Kolumbus des Zaren“

Vitus Bering (1681–1741) war schon acht Jahre lang als Schiffsjunge zur See gefahren, bevor er im Jahr 1703 als Unterleutnant in den Dienst der russischen Kriegsflotte trat. Dort machte er schnell Karriere und erhielt Ende des Jahres 1724 von Peter dem Großen den Auftrag, den Osten des russischen Reiches zu erkunden. Sibirien war zum damaligen Zeitpunkt noch nahezu unerschlossen, und der Zar wollte wissen, welche Bodenschätze es in der Region gab, welche Ureinwohner dort lebten, wo die Grenzen des russischen Reiches verliefen und ob eine Landverbindung zwischen Sibirien und Nordamerika existierte. Außerdem waren Gerüchte aufgetaucht, wonach der Kosakenführer Semjon Iwanowitsch Deschnjow bereits im Jahr 1648 die sibirische Ostspitze umschiffte und somit als Erster die später nach Bering benannte Seestraße durchfahren hatte. Ob diese Berichte jedoch stimmten, war damals zweifelhaft. Deshalb wollte der Zar Gewissheit.

Vitus Bering und sein 33 Mann starkes Expeditionsteam brachen im Jahr 1725 zur Ersten Kamtschatkaexpedition auf, die sie jedoch nicht über das Meer, sondern über Land führte. Der strapaziöse Marsch über Berge und Flüsse, durch endlose Steppen und Sumpfgebiete endete nach zwei Jahren in Ochotsk, wo die Männer ein kleines Schiff bauten. Mit diesem setzte Bering nach Kamtschatka über. Er durchquerte die Halbinsel, um zur Ostküste zu gelangen, und ließ dort im Jahr 1728 ein weiteres Schiff bauen. Damit stach er am 14. Juli 1728 in See und segelte

die sibirische Ostküste entlang Richtung Norden. Fast vier Wochen später, am 13. August 1728, durchfuhr er die heute nach ihm benannte Meerenge zwischen Amerika und Asien. Von einer Landverbindung zwischen Asien und Amerika fand sich dagegen keine Spur. Als das Schiff bei 67 Grad Nord über den Polarkreis hinaus war, gab Bering den Befehl zur Rückkehr. Für ihn stand fest, dass Amerika und Asien zwei voneinander getrennte Kontinente waren.

Da Bering die amerikanische Küste jedoch wegen dichten Nebels nicht mit eigenen Augen gesehen hatte, bezweifelte man in Sankt Petersburg seine Berichte. Das Zarenhaus wollte mehr wissenschaftliche Fakten und gab Bering eine zweite Chance. Die Zweite Kamtschatkaexpedition (Große Nordische Expedition, 1733–1743), deren Leitung man ihm übertrug, sollte alle vorhergehenden Entdeckungsreisen in den Schatten stellen. Bering befahl einen Expeditionstrupp von 10 000 Mann, der in eine Reihe von Einzelexpeditionen unterteilt war, die die nördlichen Küsten Sibiriens und des Pazifiks vermessen sowie die Weiten Sibiriens wissenschaftlich untersuchen sollten. Bering selbst erhielt den Auftrag, die Westküste Nordamerikas zu finden und zu kartieren.

Nach jahrelangen Forschungsarbeiten auf dem Weg durch Sibirien, stach Bering im Jahr 1741 mit zwei Schiffen von Kamtschatka aus Richtung Südosten in See. Er hielt Kurs bis zum 46. Breitengrad, weil dort das sagenumwobene Gamaland mit Straßen aus Gold vermutet wurde, das er finden wollte.

Bering und Alexej Iljitsch Tschirikow, der Kapitän des zweiten Schiffes, bewiesen jetzt, dass die Insel nur in der Fantasie von Seefahrern existierte. Anschließend änderten die Schiffe den Kurs auf Nordost, um Nordamerika zu erreichen. Während eines Sturmes verloren sie allerdings den Kontakt zueinander. Während Tschirikow in der Folgezeit mehrere Aleuteninseln entdeckte und anschließend wegen Trinkwassermangels den Heimweg antrat, segelte Vitus Bering mit seiner „St. Peter“ in den Golf von Alaska. Dort traf er im Juli 1741 auf Land. Er hatte Nordamerika gefunden, was ihm den Beinamen „Kolumbus des Zaren“ eintrug, und blieb in Küstennähe, um ihren Verlauf zu kartieren.

Danach trat das Schiff die Rückreise nach Kamtschatka an. Diese verlief aufgrund schlechten Wetters, feh-

lender Nahrung und Navigationsfehlern jedoch anders als geplant. Das Schiff strandete auf einer unbewohnten Insel, der heutigen Beringinsel, wo der an Skorbut erkrankte und völlig geschwächte Expeditionsleiter am 19. Dezember 1741 im Alter von 60 Jahren starb. 46 Mitglieder seiner Mannschaft überlebten den Winter. Sie bauten im Frühling aus den Wrackteilen der „St. Peter“ ein kleines Segelschiff und schafften es zurück nach Kamtschatka, wo in der Zwischenzeit schon ein Suchtrupp, angeführt von Alexej Tschirikow, losgesegelt war.

Die Erkundung der Nordwestküste Nordamerikas schloss 1778 der englische Weltumsegler James Cook ab. Auf seiner dritten und letzten großen Reise erreichte er die Beringstraße und kartierte die Küsten Alaskas bis 70 Grad Nord sowie die Tschuktschenhalbinsel. Die letzten großen weißen Flecken auf der Karte der sibirischen Arktisküste füllte der baltendeutsche Offizier der russischen Marine Ferdinand von Wrangel. Im Jahr 1820 begannen er und seine Begleiter von Land aus, die Nordküste Ostsibiriens mit Hundeschlitten zu erkunden und alle Küstenmerkmale zu kartieren. Auf diese Weise schloss Wrangel im Lauf seiner vierjährigen Expedition die noch verbleibende kartografische Lücke zwischen der Mündung der Kolyma, einem Fluss in Ostsibirien, und der Beringstraße.

Die erste Durchfahrt der Nordostpassage aber gelang erst dem Schweden Adolf Erik Nordenskiöld (1832–1901) in den Jahren 1878 bis 1879. Der Polarforscher hatte sich zuvor durch die Erkundung Spitzbergens und Grönlands einen Namen gemacht und brauchte insgesamt drei Anläufe, um seinen Traum von der erfolgreichen Durchfahrt zu verwirklichen. Bei den ersten zwei Versuchen schaffte er es immerhin bis zur Mündung des Jenisseiflusses und transportierte auf dem Rückweg der zweiten Reise als erster Reisender Handelsgüter aus Asien über den nördlichen Seeweg nach Europa. Bei seiner dritten Reise, die am 4. Juli 1878 in Göteborg begann, steuerte er den Jenissei mit vier Schiffen an. An der Mündung angekommen, fuhr er mit zwei Schiffen weiter Richtung Osten und kartierte die Küste bis zum Kap Tscheljuskin auf der Halbinsel Taimyr, dem nördlichsten Festlandpunkt Asiens. Anschließend schickte er das Begleitschiff „Lena“ mit der Erfolgsmeldung zurück, hielt aber selbst mit seinem Dampfschiff „Vega“ weiter Kurs Richtung Osten und pas-



sierte noch vor dem Wintereinbruch die Nordküste Sibiriens. Nur 115 Seemeilen vor seinem Ziel, der Beringstraße, aber fror das Schiff ein. Nordenskiöld und seine Mannschaft saßen an der Tschuktschenhalbinsel im Eis fest und mussten dort überwintern. Erst rund 300 Tage später, am 18. Juli 1879, gab das Eis die „Vega“ wieder frei.

Nordenskiöld segelte durch die Beringstraße nach Japan und trat anschließend eine triumphale Heimreise über den damals erst zehn Jahre alten Sueskanal an, denn die Nachricht von der erfolgreichen Reise hatte sich wie ein Lauffeuer über die ganze Welt verbreitet.

Ein kürzerer Weg nach Australien?

Das Gegenstück der Nordostpassage, die rund 5780 Kilometer lange Nordwestpassage, wurde erst 26 Jahre nach Nordenskiölds Triumph vollständig durchfahren. Nach den ersten Erkundungsfahrten von Engländern und Portugiesen im 16. und 17. Jahrhundert gingen nämlich fast 200 Jahre lang keine Schiffsexpeditionen mehr in dieses Gebiet. Das mangelnde Interesse lag unter anderem daran, dass bei vorhergehenden Fahrten der Lancaster Sound und die Hudsonbucht entdeckt wurden – Regionen, die aufgrund ihres Artenreichtums enorme Profite im Pelztierhandel versprachen. Andere Entdecker brach-

te der Goldrausch in Nordamerika von ihren Expeditionsplänen ab.

Der Wunsch, einen Seeweg entlang der nordamerikanischen Arktisküste zu finden, lebte erst wieder auf, nachdem bekannt wurde, dass sich der Arktische Ozean tatsächlich im Norden des Kontinents fortsetzte. Jäger und Pelztierhändler hatten diese Gewissheit gewonnen, als sie dem Mackenzie River und dem Coppermine River bis zur Mündung gefolgt waren. Bevor ein Schiff jedoch die gefährliche Reise antreten konnte, mussten drei Dinge geklärt werden. Erstens kannte man noch keinen Ausgang aus der Baffinbucht, der Richtung Westen führte. Zweitens war noch unbekannt, ob und wie man vom Pazifik aus in die Nordwestpassage einfahren konnte. Der Engländer James Cook war auf seiner dritten Weltreise im Jahr 1778 in der Beringstraße bis auf 70° 44' Nord vorgestoßen, bevor ihm nördlich des Eisigen Kaps (Icy Cape) nach eigenen Worten „eine 12 Fuß hohe Wand aus Eis“ den Weg versperrte. Wie der Küstenverlauf darüber hinaus aber weiterging, war völlig unklar. Drittens wusste niemand, ob es überhaupt einen befahrbaren Seeweg durch das Insellabyrinth des kanadisch-arktischen Archipels im Osten geben würde.

Um diese weißen Flecken auf der Landkarte mit Inhalt zu füllen, fanden in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts

1.25 > Der dänische Entdecker Vitus Bering zeichnete diese Karte auf seiner Ersten Kamtschatkaexpedition (1725–1730). Nach seiner Rückkehr forderte der russische Zarenhof von Bering weitere wissenschaftliche Fakten, die belegen, dass Asien und Nordamerika getrennte Kontinente sind. Deshalb unternahm Bering die Zweite Kamtschatkaexpedition (1733–1743).



1.26 > Der englische Seefahrer James Clark Ross entdeckte im Alter von 31 Jahren den magnetischen Pol auf der Nordhalbkugel. Zehn Jahre später erkundete er die Antarktis und stieß als erster Mensch in jene Region vor, die heute als Rossmeer seinen Namen trägt.

verschiedene Schiffs- und Landexpeditionen in die nordamerikanische Arktis statt. Der britische Kapitän Frederick William Beechey erforschte die Nordküste Alaskas von Icy Cape bis Point Barrow; der Brite John Franklin (1786–1847) kartierte während seiner ersten Expedition (1825–1827) von Land aus die Küste des Mackenzie- und des Coppermine-River-Deltas.

Die Expedition unter der Leitung von John Ross wollte das noch fehlende Stück zwischen der Melvilleinsel im Osten und Franklins Kartierungen im Westen erkunden. Dabei entdeckte Ross' Neffe James Clark Ross 1831 den Magnetpol der Nordhemisphäre.

Tod im Insellabyrinth

Für die dritte und letzte Teilaufgabe, die Suche nach einem Weg durch die Inselwelt des kanadisch-arktischen Archipels, setzte die britische Admiralität auf einen arktiserfahrenen Mann. Im Februar 1845 beauftragte sie den inzwischen zum Konteradmiral aufgestiegenen Polarforscher John Franklin, die Nordwestpassage zu finden. Er sollte mit zwei Schiffen an Grönland vorbei durch die bekannte Baffinbucht fahren und einen Abzweig Richtung Westen finden, von dem man damals überzeugt war, dass es ihn gäbe. Die Armee stattete den Expeditionsleiter mit den zwei eistauglichsten Schiffen ihrer Zeit aus: die HMS „Erebus“ und die HMS „Terror“, zwei umgerüstete Kriegsschiffe, deren Buge mit Kupfer und Eisen verstärkt wurden, um die hölzernen Rümpfe zu schützen. Beide Dreimaster wurden außerdem jeweils mit einer Dampfmaschine mit einer Leistung von 25 PS ausgestattet, die eine Schiffsschraube antrieb, sodass die Expedition auch in windarmen Zeiten vorankommen konnte. Außerdem wurden in beiden Schiffen Rohre verlegt, durch die warmes Wasser geleitet werden konnte, um Räume an Bord zu beheizen. Bestückt mit insgesamt 134 Mann Besatzung und Proviant für drei Jahre, stachen die Schiffe am 19. Mai 1845 von London aus in See.

In der westgrönländischen Diskobucht verteilten die Besatzungen die Vorräte eines dritten Begleitschiffs auf die beiden Expeditionsschiffe und nahmen Kurs Richtung Lancaster Sound, eine Meerenge zwischen der Baffininsel und der Devoninsel. Zweimal wurden sie noch von Walfängern gesichtet. Danach verschwanden John Franklin

und seine Männer in dem menschenfeindlichen, damals noch weitgehend unbekanntem Labyrinth aus Inseln, Packeis und Felsküsten.

Mehr als 40 Suchexpeditionen wurden in den Folgejahren ausgesandt, um das Schicksal der zwei Expeditionsschiffe und ihrer Besatzungen zu ergründen. Die Suchmannschaften machten dabei wichtige geografische Entdeckungen und vollendeten Franklins Auftrag. Im April 1853 schließlich trafen zwei aus unterschiedlicher Richtung kommende Suchexpeditionen – die eine unter Leitung von Robert McClure, die andere unter Henry Kellett – in der Mercy Bay, im Norden der Banksinsel, aufeinander und bewiesen erstmals, dass es die Nordwestpassage überhaupt gibt.

Erste Spuren der Franklin-Expedition fanden die Suchtrupps aber schon im August 1850. Es waren Kleiderfetzen, die auf der Devoninsel entdeckt wurden, sowie drei Gräber auf der Beecheyinsel. Vier Jahre später berichteten Inuit dem Arktisforscher und Arzt John Rae in Pelly Bay auf der Boothiahalbinsel von weißen Seefahrern, die in einiger Entfernung westwärts verhungert seien. Im Mai 1859 entdeckte eine weitere Suchmannschaft an der Westküste der King-William-Insel ein Steinmal und darin versteckt einen Bericht der Schiffsmannschaft zum Expeditionsverlauf.

Die Wracks der beiden Schiffe wurden in den Jahren 2014 und 2016 entdeckt. Die HMS „Terror“ lag in 24 Meter Tiefe in einer Bucht der King-William-Insel. Berichten zufolge ist der Dreimaster so gut erhalten, dass er schwimmfähig wäre, würde man ihn heben und leer pumpen.

Nach Franklins Verschwinden vergingen mehr als 50 Jahre, bis es dem Norweger Roald Amundsen (1872 geboren, 1928 verschollen) als Erstem gelang, die Nordwestpassage vollständig mit einem Schiff zu durchfahren. Doch auch er schaffte die Passage nicht in einem Jahr. Amundsen benötigte insgesamt drei Jahre für die Fahrt auf seiner Yacht „Gjøa“ (1903–1906) und war aufgrund der Eisverhältnisse gezwungen, mehrfach zu überwintern. Die starke Wintervereisung der Nordwestpassage war auch der Grund, warum diese Schifffahrtsroute nicht als zeitsparende Alternative zum Seeweg über den Sueskanal und den Indischen Ozean betrachtet wurde. Beim damaligen Stand der Schiffstechnik konnte die Route durch das Eis nämlich nicht ohne Überwinterung befahren werden.

Wissensdrang statt Handelsinteressen

Nachdem bewiesen war, dass es wenig Sinn machte, Handelsschiffe über die Nordost- oder die Nordwestpassage nach Asien und Australien zu schicken, schwand die Motivation der Wirtschaft an einer weiteren Exploration des Nordpolargebiets. Stattdessen stieg jedoch das Interesse der Wissenschaft. Getrieben vom Wunsch einer vollständigen Kenntnis aller irdischen Räume, verstärkten die Nationen ihre Forschungsbemühungen in den Polargebieten.

In Deutschland forcierte der Geograf und Kartograf August Heinrich Petermann (1822–1878) die Forschung, indem er zum einen im Jahr 1855 die Zeitschrift „Petermanns Geographische Mitteilungen“ gründete. In ihr veröffentlichte er viele Artikel und Karten zur Polarforschung und verlieh den Wissenschaftlern somit ein Sprachrohr. Zum anderen vertrat Petermann Hypothesen, die der damaligen Nordpolarforschung eine neue Richtung gaben. Er argumentierte, dass das Nordpolarmeer aufgrund einer warmen Meeresströmung aus dem Süden, einem Ausläufer des Golfstroms, auch im Winter nicht vollständig zufrieren könnte und man nördlich des Treibeisgürtels auf ein eisfreies und somit schiffbares Nordpolarmeer stoßen würde. Außerdem postulierte er, dass das damals noch weitestgehend unerforschte Grönland über den Pol hinaus bis hin zur Wrangelinsel reichen würde.

Petermann gelang es 1868, die erste deutsche Nordpolar-Expedition unter der Leitung von Carl Christian Koldewey (1837–1908) zu initiieren. An Bord des Schiffes „Grönland“ sollte das Expeditionsteam die Ostküste Grönlands bis 75 Grad nördliche Breite vermessen. Der Plan aber ging nicht auf. Packeis versperrte dem Schiff den Weg, sodass Koldewey und seine Mannschaft nach Spitzbergen auswichen. Dort führten sie meteorologische und hydrografische Messungen durch, die bestätigten, dass ein Ausläufer des Golfstroms atlantische Wassermassen entlang der Westküste Spitzbergens Richtung Arktis führte.

Eine zweite, von Petermann geplante deutsche Nordpolar-Expedition (1869–1870) scheiterte teilweise – unter anderem, weil eines der Schiffe vom Eis zerdrückt wurde. Und es sollte nicht die einzige Entdeckungsfahrt bleiben, die ihr Ziel nicht ganz erreichte. Außerplanmäßig überwinterten und später das Schiff aufgeben musste zum Bei-

spiel die Österreichisch-Ungarische Nordpolarexpedition (1872–1874) unter der Leitung von Carl Weyprecht (1838–1881), welche das Arktische Meer nördlich Sibiriens untersuchen wollte und dabei Franz-Josef-Land entdeckte. Weyprecht allerdings zog seine Lehren aus der Fahrt und entwickelte auf Basis dieser Erfahrungen seine Grundprinzipien der arktischen Forschung. Polarforschung war nach seiner Auffassung nur dann sinnvoll, wenn sie sich an seinen sechs Thesen orientierte:

1. Die arktische Forschung ist für die Kenntnis von Naturgesetzen von höchster Wichtigkeit.
2. Die geografische Entdeckung in jenen Gegenden ist nur insofern von höherem Wert, als durch sie das Feld für die wissenschaftliche Forschung in engerem Sinne vorbereitet wird.
3. Die arktische Detailtopografie ist nebensächlich.
4. Der geografische Pol besitzt für die Wissenschaft keinen höheren Wert als jeder andere in höheren Breiten gelegene Punkt.
5. Die Beobachtungsstationen sind, abgesehen von der Breite, um so günstiger, je intensiver die Erscheinungen, deren Studium angestrebt wird, auf ihnen auftreten.
6. Vereinzelte Beobachtungsreihen haben mehr relativen Wert.

Weyprechts Denkansatz fand auf Anhieb großen Anklang in der Forschergemeinde. Weitere kostspielige und wenig Erfolg versprechende Expeditionen konnten so vermieden werden. Auch setzte er sich gemeinsam mit Georg von Neumayer (1826–1909), dem Leiter der Deutschen Seewarte in Hamburg, für eine erste internationale Messkampagne in der Arktis ein. Deren Grundidee „Forschungswarten statt Forschungsfahrten“ gehört auch heute noch zu den Pfeilern der modernen Polarforschung – betont sie doch die Wichtigkeit kontinuierlicher Langzeitmessungen im Vergleich zu kurzen Detailstudien.

Der Werbefeldzug Neumayers und Weyprechts mündete in die Gründung einer ersten Internationalen Polar-kommission im Jahr 1879, deren Vorsitz Neumayer übernahm. Die Kommission organisierte das Erste Internationale Polarjahr (Sommer 1882 bis Sommer 1883), in dessen Zuge elf Nationen ein meteorologisches und erd-



1.27 > Während des Ersten Internationalen Polarjahrs (August 1882 bis August 1883) führten Wissenschaftler an zwölf Forschungsstationen in der Arktis regelmäßige Wetterbeobachtungen und Messungen des Erdmagnetfelds durch. Insgesamt beteiligten sich elf Nationen.

magnetisches Messnetz aus zwölf Stationen in der Arktis errichteten – Russland betrieb zwei Stationen. Zwei weitere Stationen wurden in der Antarktis erbaut. Zum Leidwesen der Wissenschaft veröffentlichten alle beteiligten Nationen jedoch nur ihre Einzelergebnisse. Eine Gesamt-schau, in der alle Wetterdaten in Monatskarten des Luftdrucks und der Lufttemperatur zusammengefasst wurden, erschien erst im Jahr 1902 – dann jedoch nur als wenig beachtete Dissertation und nicht als Fachartikel in einer viel gelesenen wissenschaftlichen Zeitschrift.

Drift Richtung Nordpol

Im Anschluss an das Erste Internationale Polarjahr begann eine neue Ära der Polarforschung, in der Eigeninitiative

und Wissensdrang zum treibenden Motiv für wissenschaftliche Erkundungen wurden. Der norwegische Zoologe Fridtjof Nansen (1861–1930) durchquerte im Jahr 1888 als Erster Grönland und bewies auf diese Weise, dass es von der Ost- bis zur Westküste von einem durchgängigen Eisschild bedeckt war. Der deutsche Geograf und Gletscherforscher Erich von Drygalski (1865–1949) überwinterte kurz darauf an der grönländischen Westküste, um dort neben meteorologischen Messungen und biologischen Sammlungen vor allem die Bewegung kleiner lokaler Gletscher und der großen Inlandeisabflüsse zu untersuchen.

Um den nächsten wissenschaftlichen Meilenstein zu erreichen, erforderte es dann detektivischen Spürsinn und jede Menge Abenteuerlust. Im Jahr 1884 hatte Grönland-

Zwei Leben im Bann des Eises

Ehrgeizig, akribisch, polarversessen: Mit diesen Charaktereigenschaften lassen sich sowohl der Norweger Roald Amundsen als auch der Deutsche Erich von Drygalski beschreiben – beides Pioniere der Polarforschung, die trotzdem unterschiedlicher kaum sein konnten. Denn während der eine Rekorde jagte, versuchte der andere das große Ganze zu verstehen.



Roald Amundsen (1872–1928) – der Titeljäger

Der Südpolbezwiner Roald Amundsen kannte seit seinem 15. Lebensjahr nur ein Ziel – das Wissen über die Polarregionen der Welt zu erweitern. Mit dem Wort „Wissen“ verband er dabei in erster Linie jedoch geografische Kenntnisse und weniger ein tiefergehendes Verständnis für Natur und Klima der Polarregionen. Wissenschaftliche Beobachtungen überließ der Norweger auf seinen Expeditionen meist Spezialisten, obwohl er bestimmte Messmethoden selbst beherrschte. Vor seiner Expedition in die Nordwestpassage etwa war Amundsen mehrere Monate beim damaligen Experten für Erdmagnetik, dem Deutschen Georg von Neumayer, in die Lehre gegangen. Er wollte lernen, wie man

das Magnetfeld der Erde misst. Bei einer Testfahrt für dieselbe Expedition sammelte er außerdem ozeanografische Daten für seinen Mentor Fridtjof Nansen.

Die Wissenschaft aber fesselte ihn nicht. Amundsen interessierte sich vielmehr dafür, welche Techniken und Methoden zum Erfolg seiner Expeditionspläne beitragen konnten. Wie entscheidend Details bei der Planung einer Entdeckungsfahrt sein konnten, hatte Amundsen als Zweiter Offizier auf der „Belgica“-Expedition (1897–1899) in die Antarktis gelernt. Die Mannschaft hatte damals die Vitamin-C-Mangelkrankheit Skorbut überlebt, weil sie, dem Rat des Schiffsarztes Frederick A. Cook folgend, während der Überwinterung frisches Pinguinfleisch gegessen hatte anstelle der gebunkerten Konserven.

Pragmatische Lösungen begeisterten Amundsen. Während seiner Fahrt durch die Nordwestpassage (1903–1906) ließ er sich von Eskimos zeigen, wie sie Iglus bauten und Hunde vor den Schlitten spannten. Er schwärmte von ihrer winddichten Kleidung aus Rentierfell und trug sie fortan selbst. Für seinen Marsch zum Südpol setzte er erfolgreich auf Hundeschlitten und Skier als Fortbewegungsmittel, und für seinen Luftschiffflug Richtung Nordpol ließ er in Berlin einen Sonnenkompass bauen, mit dessen Hilfe der Pilot punktgenau nordwärts navigieren konnte.

Amundsen war ein geborener Anführer und legte auch bei der Auswahl seiner Mannschaft höchste Maßstäbe an. Seine Besatzung war stets durchtrainiert und handverlesen und zählte nur so viele Mitglieder, wie für das Gelingen wirklich notwendig war. Jedermann an Bord hatte mehrere Aufgaben. Auf diese Weise verhinderte Amundsen, dass Langeweile aufkam, und stärkte das Verantwortungsgefühl seines Teams.

Wenn es um seinen Ruf und seine Ehre als Entdecker ging, traf der Expeditionsleiter aber auch Entscheidungen über die Köpfe seiner Begleiter hinweg – so etwa im Jahr 1910, als er den Großteil der Besatzung seines Forschungsschiffs „Fram“ erst einige Zeit nach dem Auslaufen in Oslo darüber informierte, dass er nicht, wie alle Welt glaubte, Richtung Nordpol segeln wolle, sondern stattdessen Kurs Richtung Antarktis nehmen würde, um dort als erster Mensch den Südpol zu erreichen. Nachdem angeblich bereits Frederick A. Cook im Jahr 1908 und Robert Peary im Jahr 1909 am Nordpol gewesen waren – zwei Meldungen, die sich später als falsch herausstellten, weil beide nur in Nordpolnähe gelangten –, wollte Amundsen zumindest den Erfolg im Süden für sich verbuchen. Nur seinen Bruder Leon, der die geschäftliche Seite seiner Expeditionen betreute, den Kapitän Thorvald Nilsen und die beiden Steuermänner hatte er vor der Abreise in das wahre Ziel eingeweiht.

Grenzen überschreiten und als erster Mensch, das Undenkbare zu schaffen, war zeitlebens Amundsens Antrieb. Für diesen Traum verschuldete er sich nicht nur hoch. Er trainierte auch wie ein Besessener, nahm

persönliche Einsamkeit in Kauf und verstand es wie kein anderer, seine Projekte medial zu inszenieren. Seine größte Stärke sei sein fester Glaube an sich selbst gewesen, schreiben Historiker. Mit dieser Einstellung erweiterte Roald Amundsen nicht nur das Wissen über die Polarregionen, er ging auch wie seine Vorbilder Nansen und Franklin in die Geschichtsbücher ein.



Erich von Drygalski (1865–1949) – der Datenjäger

Erich von Drygalski konnte dem Medienhype um den Wettlauf zum Südpol nicht viel abgewinnen. „Für die Polarforschung ist es unerheblich, wer als Erster am Pol steht“, kommentierte der Ostpreuße und wissenschaftliche Senkrechtstarter das Rennen zwischen Amundsen und Scott. Drygalski hatte im Jahr 1882 im Alter von 17 Jahren begonnen, Mathematik und Physik zu studieren. Wenig später entdeckte er seine Leidenschaft für die Geografie und das Eis, wanderte acht Wochen lang durch die größten Gletschergebiete der Alpen und schrieb bereits im Alter von 22 Jahren seine Doktorarbeit über die Verformung der Erdkugel durch die Eisbedeckung. Eis war nun zum Leitmotiv seines Lebens geworden.

Er wollte die Vereisung der Norddeutschen Tiefebene erklären und dafür die Struktur, Bewegung und Wirkung des Eises verstehen sowie die Bewegung großer Eismassen mathematisch beschreiben. Eine Aufgabe, für deren Lösung er die Gletscherbewegung in der Natur messen wollte, im Idealfall an einem großen Eisschild.

Die größte, nächstgelegene Eismasse war das Grönländische Inlandeis. Die Gesellschaft für Erdkunde in Berlin finanzierte ihm eine Vor- und eine Hauptexpedition (1890, 1892–93) zum Uummannaqfjord am Westrand dieses Eispanzers. Dort errichtete Drygalski nicht nur eine Forschungsstation, in der er und seine zwei Begleiter auf Grönland überwinterten. Er trug dem Team auch ein modern anmutendes Forschungsprogramm auf, dessen umfangreiche Aufgaben die Tage füllten.

Zwölf Monate lang kartierten und vermaßen die Wissenschaftler verschiedene Gletscher der Region. Anhand von Markierungen verfolgte Drygalski das Fließen, Heben und Senken des Eises. Auf Schlittentouren untersuchte er, wie sich das Eis bildete. Gleichzeitig sammelten die Forscher über die gesamte Zeit meteorologische Daten wie Temperatur, Sonnenscheindauer, Luftdruck, Feuchte und Wind, um die Wirkung des Eises auf das Klima zu verstehen. Der Biologe im Team dokumentierte Flora und Fauna, um nachzuvollziehen, wie die Eismassen die Tier- und Pflanzenwelt des Fjordes prägten. Hinzu kamen außerdem erdmagnetische Messungen sowie Versuche zur Schwerkraft. Der gesammelte Datensatz war am Ende so groß, dass Drygalski vier Jahre für seine Auswertung benötigte. Er veröffentlichte die Ergebnisse in zwei Bänden, erweiterte einen grundlegenden Denkansatz zur Eisbewegung und stieg als Professor in die erste Riege der Polarforscher auf.

Aufgrund seiner großen Erfahrung wurde er drei Tage nach seiner Habilitation zum Leiter der ersten deutschen Antarktisexpedition (1901–1903) gewählt. Dass er dabei keine Rekorde für sich verbuchen konnte, enttäuschte zwar den deutschen Kaiser und die Öffentlichkeit, aber die gesammelten wissenschaftlichen Daten waren von allerhöchster Qualität, und Drygalski vergrub sich aufs Neue in die Analyse dieses riesigen Zahlenwerks. Persönliche Angelegenheiten wie beispielsweise seine Familienplanung mussten zurückstehen und konnten erst in Angriff genommen werden, als die Auswertung unter den Wissenschaftlern aufgeteilt war und er sich nur noch um die geografischen und ozeanografischen Ergebnisse kümmern musste. Ein einmal angefangenes Projekt nicht zu vollenden, war für ihn undenkbar. Geradlinig und zielstrebig trug er die Expeditionsergebnisse zusammen und gab sie Stück für Stück heraus – eine Arbeit, die am Ende insgesamt 30 Jahre in Anspruch nahm. Was ihre Wertigkeit betraf, so sollte Roald Amundsen recht behalten. Er hatte noch zu Lebzeiten sinngemäß gesagt: Deutschland habe allen Grund, auf die grundlegenden wissenschaftlichen Ergebnisse der Antarktisexpedition stolz zu sein.

Transpolardrift

Als Transpolardrift wird eine vom Wind angetriebene Eisdrift und Oberflächenströmung im eurasischen Teil des Arktischen Ozeans bezeichnet. Sie transportiert große Mengen arktischen Meereises aus den Schelfmeeren vor der sibirischen Küste über den Nordpol Richtung grönländische Ostküste, wo die Eisschollen in der Regel nach ein bis zwei Jahren den Nordatlantik erreichen und schmelzen.

Durchquerer Fridtjof Nansen aus der Zeitung erfahren, dass Inuit an der Südwestküste Grönlands Gegenstände eines Schiffes gefunden hatten, welches drei Jahre zuvor nördlich der sibirischen Inseln, also in 2900 Seemeilen Entfernung, untergegangen war. Dieser Fund gab Nansen zu denken. Er ließ ein Forschungsschiff bauen, welches eine Rumpfform besaß, die vom Packeis nicht zerdrückt werden konnte, nannte es „Fram“ und ließ sich an Bord dieses Schiffes am 22. September 1893 vor den Neusibirischen Inseln vom Meereis gefangen nehmen. Eingeschlossen im Eis trieben Schiff und Besatzung monatelang und über Hunderte Seemeilen zwischen der sibirischen Küste und dem Nordpol. Das Eis änderte immer wieder seine Richtung, bewegte sich mal nach Norden, dann wieder nach Süden, sodass die Männer, die viele Tiefenmessungen des Arktischen Ozeans vornahmen, zwischenzeitlich befürchteten, nicht vorwärts zu kommen. Außerdem trug das Eis sie nicht so weit nördlich, wie Nansen gehofft hatte. Dicke Packeistrücken blockierten ihnen den Weg.

Ihre nördlichste Position (85° 57' Nord) erreichte die „Fram“ am 16. Oktober 1895. Nansen und sein Begleiter Hjalmar Johansen hatten das Schiff zu dieser Zeit jedoch schon verlassen und waren mit Schlitten, Skiern und Kajaks Richtung Nordpol aufgebrochen. Weit kamen sie bei diesem Alleingang nicht. Das sich stetig bewegende Packeis zwang die beiden schließlich zur Rückkehr nach Franz-Josef-Land, wo sie in einer aus Steinen errichteten Hütte überwinterten. Im darauffolgenden Frühjahr sahen die beiden Entdecker keinen anderen Ausweg aus ihrer misslichen Lage, als im Kajak den Heimweg Richtung Spitzbergen anzutreten. Ihre Paddeltour endete glücklicherweise jedoch schon an der ebenfalls zum Franz-Josef-Land gehörenden Northbrookinsel. Dort trafen Nansen und Johansen zufällig auf eine Expedition des Briten Frederick George Jackson, der die beiden aufnahm und nach Norwegen zurückbrachte. Zeitgleich gab das Meereis Nansens Schiff nordwestlich Spitzbergens wieder frei. Am 9. September 1886 steuerte Kapitän Otto Sverdrup die „Fram“ in ihren Heimathafen Oslo – im Gepäck wertvolle Messergebnisse aus einer Region, die vor ihnen kein Mensch betreten hatte.

Auch wenn Nansen sein Ziel, den Nordpol, verfehlt hatte, so waren seine wissenschaftlichen Erkenntnisse umso bedeutender. Erstens setzte Nansens Expedition der

lange verfochtenen These eines eisfreien Polarmeers ein Ende. Zweitens bestätigten seine Driftdaten die Existenz der Transpolardrift. Drittens belegten die Messdaten, wie tief das arktische Becken war und dass die vorgelagerten Inseln jeweils zu den Kontinenten gehörten. Außerdem hatte der Norweger festgestellt, dass die Driftrichtung des Eises nie parallel zur Windrichtung verlief, sondern die Schollen in ihrer Bewegung leicht nach rechts abgelenkt werden – ein Phänomen, welches seiner Meinung nach auf die Rotationsbewegung der Erde (Corioliskraft) zurückzuführen war. Wie man heute weiß, lag er auch mit dieser Annahme richtig.

Auf zur Robbenjagd in den Süden

Während das Nordpolargebiet zum Ende des 19. Jahrhunderts weitestgehend entdeckt war, blieb das Südpolargebiet lange Zeit noch ein weißer Fleck auf der Landkarte. Der Grund dafür war mangelndes Interesse. Nachdem James Cook frustriert umgekehrt war, vergingen 40 Jahre bis sich wieder eine Expedition weit nach Süden vorwagte. Der baltendeutsche Kapitän Fabian Gottlieb von Bellingshausen umfuhr in den Jahren 1819 bis 1821 auf einer von Russland ausgesandten wissenschaftlichen Antarktisexpedition den südlichen Kontinent und stieß an zwei Stellen auf Land. Er entdeckte die heutige Prinzessin-Martha-Küste, welche an das Weddellmeer grenzt, sowie zwei Inseln in der nach ihm benannten Bellingshausensee.

Seiner Auffassung nach handelte es sich beim sagenumwobenen Südland um einen großen Kontinent, der einzig und allein von Walen, Seehunden und Pinguinen bewohnt und deshalb geostrategisch nutzlos ist. Britische Wal- und Robbenfänger, die von den Berichten Bellingshausens hörten, witterten dagegen gute Geschäfte und starteten in den 20er- und 30er-Jahren des 19. Jahrhunderts erste Fangexpeditionen Richtung Süden. Berichten zufolge löschten sie innerhalb weniger Jahre große Robbenbestände aus. Einer dieser Männer war der Seefahrer und Robbenjäger James Weddell, der insgesamt dreimal in das Südpolargebiet segelte. Auf seiner dritten Reise hatte er zwar wenig Jagderfolg, dafür waren die Eisverhältnisse so gut, dass sein Schiff bis auf 74° 15' Süd und 34° 17' West in eben jenes Meeresgebiet vordringen konnte, das heute seinen Namen trägt: das Weddellmeer.

Die Besatzungen der Fangschiffe wussten aber nicht nur zu jagen und zu fischen, sie betrieben auch geographische Studien und kartierten neu entdeckte Inseln oder Küstenabschnitte. Ab Anfang der 1890er-Jahre begleiteten Wundärzte die Walfänger und führten zusätzlich biologische und hydrografische Untersuchungen durch. Alle diese Kartierungen und Beobachtungen lieferten allerdings nur Einzelergebnisse, denn solange die Walfänger und Robbenjäger ihre Schiffsbunker an der Antarktischen Halbinsel und in anderen Regionen nördlich des südlichen Polarkreises mit Pelzen, Speck und Tran füllen konnten, besaßen sie keinen Grund, für Forschungszwecke weiter Richtung Süden zu fahren.

Die Suche nach dem magnetischen Südpol

Im Gegensatz zu den Wal- und Robbenfängern wollte die Wissenschaft schon früh weit über den Polarkreis hinaus. Bereits im Jahr 1836 hatte der deutsche Naturforscher Alexander von Humboldt (1769–1859) der Antarktisforschung einen neuen Impuls gegeben, indem er dem Präsidenten der Royal Society in London vorschlug, gemeinschaftlich mit gleichen Instrumenten simultane Messungen des Erdmagnetfelds auf der Nord- und der Südhalbkugel vorzunehmen – und zwar vom Äquator bis zu den Polen. Humboldt hatte die Gründung des Göttinger Magnetischen Vereins unterstützt, eine Arbeitsgemeinschaft, die sich zum Ziel gesetzt hatte, weltweit gleichzeitige erdmagnetische Beobachtungen durchzuführen, und der schon bald 50 Observatorien angehörten.

Humboldts Vorschlag löste einen internationalen Wettlauf zum magnetischen Südpol aus, der als Magnetischer Kreuzzug in die Geschichtsbücher einging und in dessen Zuge viele neue Landstriche der Ostantarktis entdeckt wurden. Der französische Polarforscher Jules Dumont d'Urville beispielsweise fand unweit des vermuteten Magnetpols das Adélieland, in dem heute die nach ihm benannte französische Forschungsstation Dumont d'Urville steht. Der Amerikaner Charles Wilkes folgte 1840 mit seinem Schiff dem Verlauf der 2000 Kilometer langen Küste des heutigen Wilkeslands. Nur wenige Monate später stellte dann der Engländer James Clark Ross einen neuen Rekord auf, indem er auf seiner Suche nach dem magnetischen Pol in ein unbekanntes Seegebiet

fuhr, das heutige Rossmeer, und dabei den 78. Breitengrad überquerte.

Auf dieser Reise (1839–1843) bestimmte Ross nicht nur die Position des Magnetpols in der Südhemisphäre, der seinen Messungen zufolge auf 75° 05' Süd und 154° 08' Ost lag. Der Engländer entdeckte außerdem die Abbruchkante des riesigen, später nach ihm benannten Rossschelfeises, das Viktorialand sowie eine Insel mit zwei majestätischen Vulkanen, denen er die Namen seiner zwei Schiffe gab: Erebus und Terror. Die Insel heißt heute übrigens – wen überrascht es – Rossinsel.

Eine nationale Angelegenheit

Nach Ross' Erfolgsfahrten sank das Interesse der Wissenschaft an der Antarktis. Es mangelte an Motivation und finanziellen Mitteln, weitere der teuren Forschungsreisen in das Südpolargebiet zu organisieren. Zwei Ausnahmen gibt es allerdings. Als sich für das Jahr 1874 der Durchgang der Venus vor der Sonne ankündigte und sich somit die Gelegenheit bot, den Abstand von der Erde zur Sonne (astronomische Einheit) zu bestimmen, richteten England, Deutschland und die USA auf den Kerguelen, einer Inselgruppe im südlichen Indischen Ozean, astronomische Observatorien ein. Acht Jahre später ließ Georg von Neumayer aus Anlass des Ersten Internationalen Polarjahrs auch auf Südgeorgien ein Observatorium bauen, um den zweiten Venustransit des 19. Jahrhunderts zu beobachten. In erster Linie aber diente die Station der Wetterbeobachtung und der Messung des Erdmagnetfelds.

Der Ehrgeiz der Polarforscher erwachte erst wieder kurz vor der Jahrhundertwende. Die Initialzündung gab im Jahr 1895 der sechste Internationale Geografenkongress, der in London stattfand. Dort empfahlen führende Wissenschaftler die Erforschung der noch unbekanntenen Antarktis als letzte Herausforderung des ausgehenden 19. Jahrhunderts. Bis zu diesem Zeitpunkt konnte nämlich noch niemand mit Gewissheit sagen, ob die Antarktis nun ein zusammenhängender eisbedeckter Kontinent war oder nicht doch ein gigantisches Atoll, in dessen Zentrum sich ein mit Eis bedecktes Meer befand, welches man – wie in der Arktis – sogar befahren könnte.

Bei der dadurch motivierten „Belgica“-Expedition (1897–1899) unter Leitung des noch unerfahrenen bel-

gischen Polarforschers Adrien de Gerlache de Gomery überwinterten erstmals Menschen im Packeis der Antarktis, wenn auch unfreiwillig, weil das Schiff nicht rechtzeitig wieder freikam. Englische und deutsche Polarforscher planten derweil mehrere große Expeditionen und teilten die Antarktis in vier gleich große Quadranten ein. Das deutsche Arbeitsgebiet lag im Weddellmeer und in der Enderby-Region; die Engländer wollten sich auf die Viktoria- und die Ross-Quadranten konzentrieren. Außerdem verabredeten die Polarforscher, zeitgleiche meteorologische und magnetische Messungen vorzunehmen, um die Daten vergleichen und die Antarktis somit im Sinn Weyprechts systematisch erforschen zu können.

Diese enge wissenschaftliche Kooperation zwischen Deutschland und England war zu diesem Zeitpunkt bemerkenswert, befanden sich doch beide Länder in großer wirtschaftspolitischer Konkurrenz zueinander. Die Ära des kolonialen Imperialismus hatte begonnen, der internationale Wettbewerb um Märkte und Rohstoffe zuge-

nommen. Deutschland, als aufstrebende Seemacht, gierte geradezu nach mehr Einfluss und Bedeutung; das Vereinigte Königreich wollte beides auf keinen Fall verlieren. Aus diesem Grund unterstützten beide Regierungen die jeweiligen Pläne ihrer Wissenschaftler. Die Antarktisforschung wurde als nationale Pflicht und Kulturaufgabe betrachtet, deren Erfüllung Ehre und Vorteile versprach. Deshalb stellten beide Staaten unabhängig voneinander nach langem Bitten und Betteln der Wissenschaftler auch Steuergelder bereit – allerdings nur für die jeweils eigene Expedition.

Die wissenschaftlichen Ergebnisse der fünf Forschungsfahrten, an denen sich am Ende auch Schiffe aus Schweden, Schottland und Frankreich beteiligten, konnten sich sehen lassen: Alle Expeditionen stießen auf Neuland. Zudem stand nun fest, dass die Antarktis ein Kontinent ist – und kein Atoll. Anhand von Luftdruckmessungen konnten die Forscher nun auch Rückschlüsse auf die Höhe der eisbedeckten Landmasse ziehen. Dem-

nach ragt Antarktika im Durchschnitt 2000 ± 200 Meter in die Höhe.

Ruhm und Ehre wurden nach Rückkehr der Wissenschaftler allerdings nur den Engländern zuteil. In Deutschland beurteilten Kaiser und Öffentlichkeit die Ergebnisse der ersten deutschen Antarktisexpedition (1901–1903) als schmähhliches Abschneiden, weil das Schiff unter wissenschaftlicher Leitung Erich von Drygalskis schon am Südpolarkreis vom Eis festgesetzt worden war und die Wissenschaftler nicht so weit in den Süden vorgestoßen waren wie die britische Expedition unter Robert Falcon Scott. Im politischen Berlin herrschte damals noch die altmodische Auffassung, dass der Sinn geografischer Forschung einzig und allein darin bestand, weiße Flecken von der Landkarte zu entfernen oder den Pol zu erreichen. Welche wertvollen meteorologischen, magnetischen, ozeanografischen und biologischen Daten Drygalski während seiner Expedition gesammelt hatte, konnte man zu diesem Zeitpunkt noch nicht absehen. Zwar zog sich ihre Auswertung über drei Jahrzehnte hin, lieferte aber weitreichende Erkenntnisse. Allein die Ergebnisse der biologischen Sammlungen füllten am Schluss statt der vorgesehenen drei insgesamt 13 Bände, die heutzutage im Rahmen der modernen Biodiversitätsforschung immer mehr an Bedeutung gewinnen.

Der tragische Wettlauf zu den Polen

Mit der Jahrhundertwende begann auch jene Phase der Polarforschung, über die bislang wohl die meisten Bücher geschrieben worden sind – die Zeit der Helden und tragischen Verlierer im sportlichen Wettkampf um die schlagzeilenträchtigste Expedition oder aber den Titel „Erster Mensch am Nord- oder Südpol“. Im Gegensatz zu den national organisierten Antarktisreisen der Jahre 1901 bis 1905, spielten nun wieder Individualisten die Hauptrolle. Diese Generation der Entdecker, Forscher und Abenteurer verlangte sich und ihren Begleitern höchsten körperlichen Einsatz ab, war nicht immer bestens auf ihre Reisen vorbereitet, dafür aber bereit, für Ruhm und Ehre enorme Risiken einzugehen. Eine heroische Einstellung, die am Ende zum Tod vieler Menschen führte und erfahrene Polarforscher an der Sinnhaftigkeit solcher Unternehmungen zweifeln ließ.

Fridtjof Nansen beispielsweise bedauerte nach der gescheiterten Spitzbergenexpedition des deutschen Offiziers Herbert Schröder-Stranz im Jahr 1912 zutiefst, dass er die Tragödie nicht hatte verhindern können. Er wird mit den Worten zitiert: „Hätten diese Leute ein klein wenig Erfahrung in Eis und Schnee gehabt, so hätte sich all dieses Elend leicht vermeiden lassen! Reisen in jene Gegenden können wahrhaftig genug Schwierigkeiten bieten, ohne dass man diese durch leichtsinnige Ausrüstung und Überfluss an Unkenntnis noch zu vergrößern braucht.“

Der Ostpreuße Herbert Schröder-Stranz war im August 1912 nach Spitzbergen gesegelt, um dort Polarerfahrung für eine von ihm geplante Durchquerung der Nordostpassage zu sammeln. Auf Spitzbergen, genauer gesagt auf Nordostland, der zweitgrößten Insel im Nordosten des Archipels, aber verschwanden er und drei seiner Begleiter, als sie versuchten, die Insel mit dem Hundeschlitten zu durchqueren. Schröder-Stranz' Schiff wurde wenige Tage später in der Sorgebai vom Packeis umschlossen, sodass sich Teile der Besatzung entschlossen, zu Fuß zur nächsten Siedlung aufzubrechen. Auch diese Entscheidung erwies sich als Fehler. Am Ende überlebten nur sieben von 15 Expeditionsmitgliedern.

Ebenso tragisch endete der Wettlauf zum Südpol, den der Norweger Roald Amundsen und der Brite Robert Falcon Scott austrugen. Amundsen, der auf Fridtjof Nansens Schiff „Fram“ in die Antarktis gesegelt war, gewann das Rennen. Er und vier seiner Männer, allesamt trainierte Skiläufer, stießen auf Hundeschlitten in das Innere des eisigen Kontinents vor und erreichten am 14. Dezember 1911 als Erste den Südpol – 34 Tage vor ihren Rivalen. Im Anschluss kehrten sie unversehrt in ihre Heimat zurück. Ihre Konkurrenten dagegen hatten nicht so viel Glück. Wegen schlechten Wetters erreichten Scott und seine vier Begleiter auf ihrem Rückweg über das Rossschelfeis das rettende Lebensmitteldot nicht mehr. Der antarktische Winter hatte sie eingeholt, die Männer starben an Erfrierungen und Erschöpfung.

In Deutschland wurden der Erfolg beziehungsweise der Misserfolg deutscher Polarexpeditionen in Wissenschaftskreisen ausführlich analysiert. Die Experten kamen zu dem Schluss, dass künftige Forschungsreisen in das Nord- oder Südpolargebiet grundlegende Anforderungen

1.28 > Das deutsche Polarforschungsschiff „Gauß“ blieb im März 1902 bei der ersten deutschen Südpolarexpedition im Meereis stecken. Expeditionsleiter Erich von Drygalski ließ daraufhin Zelte und Messinstrumente auf dem Eis aufbauen, sodass täglich Forschung betrieben werden konnte.



erfüllen müssten. So sollten sie eine feste Organisation haben, die gemeinsam mit Institutionen und Behörden die notwendigen Geldmittel einwerben und Richtlinien für die Expeditionsausrüstung aufstellen würde. Außerdem forderten die Wissenschaftler eine regelmäßig erscheinende Fachzeitschrift für die Polarforschung. Bis dato waren die meisten Publikationen zum Thema Arktis- und Antarktischforschung in verschiedenen Periodika erschienen, sodass es für viele interessierte Leser schwierig war, Zugang zu den verstreuten Artikeln und Berichten zu erhalten.

Einigen dieser Wünsche kamen neue Vereinigungen nach, die sich nach dem Ersten Weltkrieg gründeten. Dazu gehörten unter anderem die „Internationale Studiengesellschaft zur Erforschung der Arktis mit dem Luftschiff“, später Aeroarctic genannt, sowie das Archiv für Polarforschung, der heutigen Deutschen Gesellschaft für Polarforschung. Beide Institutionen gaben Fachzeitschriften heraus. Im Archiv wurde zudem auch Material für die Vorbereitung von Expeditionen gesammelt.

1.29 > Ein Propellerschlitten, hergestellt von der Staatlichen Finnischen Flugzeugfabrik. Der deutsche Polarforscher Alfred Wegener ließ sich zwei Exemplare für seine Grönlandexpedition fertigen. Doch die beiden Mobile „Schneespatz“ und „Eisbär“ versagten im Einsatz.



Mit Zeppelin und Flugzeug ins Eis

Nach dem Ersten Weltkrieg hielten moderne Technologien, Kommunikations- und Transportmittel wie Radiosonden, Funkgeräte, Luftschiffe, Flugzeuge und Motorschlitten Einzug in die Polarforschung. Einer der Ersten, der sich diese Neuerungen zunutze machte, war Südpolentdecker Roald Amundsen. Er ließ sich bereits im Jahr 1914 in Norwegen zum Flugzeugpiloten ausbilden und hob mit seiner Crew im Mai 1925 mit zwei Dornier-Flugbooten auf Spitzbergen Richtung Nordpol ab. Sein Ziel erreichte der Abenteurer jedoch nicht. Als beide Maschinen bei 88 Grad Nord auf dem Meereis landeten, weil Amundsen eine genaue Ortsbestimmung mit einem Sextanten durchführen wollte, kam eines der Flugzeuge zu Schaden. Die verbleibende Maschine wieder abheben zu lassen, wurde für die sechs Expeditionsteilnehmer zum Überlebenskampf. Rund drei Wochen vergingen, bis es ihnen gelang, auf einer großen, stabilen Eisscholle eine Startbahn anzulegen. Am Ende mussten sie den Neuschnee darauf vier Tage lang mit den Füßen festtreten. Als schließlich der sechste Startversuch glückte, konnte das Expeditionsteam nach Spitzbergen zurückkehren.

Diese Beinahekatastrophe war für Amundsen jedoch kein Grund, seinen Plan vom Flug zum Nordpol aufzugeben. Bereits ein Jahr später gelang ihm gemeinsam mit seinem Geldgeber Lincoln Ellsworth und dem italienischen General und Luftfahrtpionier Umberto Nobile die Sensation. Im Luftschiff „Norge“ flogen sie nicht nur bis zum Nordpol, sondern überquerten als erste Menschen den Arktischen Ozean gleich ganz, und landeten nach 70 Stunden Flugzeit in Alaska.

Zwei Jahre später steuerte Umberto Nobile erneut ein von ihm selbst konstruiertes Luftschiff Richtung Nordpol, um während des Fluges umfangreiche wissenschaftliche Untersuchungen durchzuführen. Die „Italia“ aber stürzte ab – ein Unfall mit weitreichenden Folgen. Bei der anschließenden Suchaktion nach Überlebenden des Absturzes fand unter anderem auch Roald Amundsen den Tod.

Nicht alle technischen Neuentwicklungen dieser Zeit erwiesen sich als polartauglich, so zum Beispiel die Propellerschlitten, die der deutsche Polarforscher Alfred Wegener (1880–1930) für den Lastentransport auf seiner Grönlandexpedition (1930–1931) eingeplant hatte. Im frisch gefal-



1.30 > Das Luftschiff „Norge“, mit dem Roald Amundsen und sein Gefolge im Mai 1926 von Spitzbergen aus den Nordpol überflogen. Es war 109 Meter lang und erreichte eine Höchstgeschwindigkeit von 85 Kilometern pro Stunde.

lenen Neuschnee versagten die schweren Gefährte, was durch eine Verkettung unglücklicher Umstände zu Wegeners Tod auf dem Grönländischen Inlandeis führte.

Allerdings wurde in dieser Periode der technischen Neuerungen auch ein weiterer Grundstock für die moderne Polarforschung gelegt. Als Beispiel dafür kann ebenfalls Wegeners Grönlandexpedition gelten. Für sie hatten die Wissenschaftler drei Expeditionspläne zu einem übergeordneten Plan zusammengefasst, sodass die Teilnehmer der Expedition ein Thema – in diesem Fall das Inlandeis beziehungsweise das Wetter auf dem Grönländischen Eisschild – aus jeweils unterschiedlichen wissenschaftlichen Perspektiven bearbeiteten.

Je häufiger Luftschiffe nun lange Strecken zurücklegten, desto offensichtlicher wurde, dass man beispielsweise für Transatlantikflüge von Europa nach Nordamerika zuverlässige Wetterdaten aus dem Nordpolargebiet benötigte. Diese wurden damals aber nur an einigen wenigen Stationen gesammelt und konnten lokale Wetterphänomene über den großen arktischen Inseln und über dem Grönländischen Inlandeis nicht ausreichend vorhersehen. Wissenschaftler und Industrie forderten deshalb den Ausbau des Wetterbeobachtungsnetzwerks sowie Messungen in höheren Luftschichten der Arktis.

Dieser Forderung kam man im Zuge des Zweiten Internationalen Polarjahres (August 1932 bis August 1933) nach, als ein dichtes Messnetz über die Arktis gelegt wurde. Die Wissenschaftler ließen Wetterballone mit Radiosonden im Schlepptau steigen. Parallel dazu gab es Flugzeugmessungen in den oberen Luftschichten, deren Ergebnisse helfen sollten, den Einfluss des Polarweters auf die Wetterabläufe in den mittleren Breiten besser zu verstehen.

Die neuen technischen Möglichkeiten sowie die verbesserten Wettervorhersagen ermöglichten im Lauf der Zeit eine zunehmend erfolgreichere Polarforschung. Expeditionen in beide Polargebiete wurden fortan gut ausgerüstet, Technik und Teilnehmer auf Vorexpeditionen getestet und auf den Einsatz im Polargebiet gründlich vorbereitet. Die Verwendung von Flugzeugen erlaubte es, die Eis- oder Landoberfläche zu verlassen und große Gebiete aus der Luft zu erkunden. Die Expeditionsergebnisse, so die Erfahrung, sollten möglichst von staatlichen Stellen oder ähnlich übergeordneten Institutionen veröffentlicht werden. Außerdem begann man, von einer oder mehreren Basisstationen aus, Feldforschung in den Polargebieten zu betreiben, so zum Beispiel auf Spitzbergen und auf der Antarktischen Halbinsel.

Ein Kontinent für die Forschung

Mit der Zahl der Forschungsstationen und Überwinterungen in der Antarktis wuchsen nach dem Zweiten Weltkrieg allerdings auch die Besitzansprüche auf Gebiete in der Südpolarregion. Anrainer- und Nachbarstaaten wie Argentinien, Chile, Australien und Neuseeland meldeten Forderungen auf bestimmte Regionen an; Norwegen, Großbritannien und Frankreich wollten ebenfalls ein Stück vom Kuchen für sich.

In dieser durch den Kalten Krieg politisch sehr angespannten Situation führten norwegische, britische und schwedische Wissenschaftler im Zeitraum von 1949 bis 1952 gemeinsam seismische Messungen im Königin-Maud-Land östlich des Weddellmeers durch, um die Dicke des Antarktischen Eisschildes in diesem Randgebiet zu vermessen. Diese Expedition gilt bis heute als Vorbild für die internationale Zusammenarbeit in der Polarforschung.

Nur wenig später, von 1957 bis 1958, gelang es der internationalen Wissenschaftsgemeinde, das Internationale Geophysikalische Jahr durchzuführen, welches als Drittes Internationales Polarjahr in die Geschichte einging. Es war zum damaligen Zeitpunkt das größte meteorologische und geophysikalische Experiment, das durchgeführt wurde. Erstmals errichteten zwölf Staaten insgesamt 55 Stationen in der Antarktis – und das nicht nur am Rand des arktischen Kontinents, sondern auch am Südpol selbst und an anderen Stellen des Eisplateaus. Mithilfe damals modernster Methoden, darunter dem Einsatz der ersten russischen und amerikanischen Satelliten, wurden nun die Antarktis und die Atmosphäre darüber umfassend erforscht.

Auf diese Weise gaben die Wissenschaftler den Anstoß für eine friedliche und rein wissenschaftliche Nutzung des Kontinents und legten den Grundstein für den Antarktisvertrag, der im Jahr 1959 von zwölf Staaten unterzeichnet wurde und 1961 in Kraft trat. Darin stellten alle Unterzeichner nicht nur ihre Besitzansprüche zurück. Sie stimmten außerdem zu, dass:

- die Antarktis nur friedlich genutzt werden darf;
- sie eine internationale Zusammenarbeit in der Forschung mit ungehindertem Informationsaustausch unterstützen;

- militärische Aktivitäten in der Antarktis untersagt sind;
- radioaktive Abfälle hier weder eingeführt noch entsorgt werden dürfen.

Bis heute haben 54 Staaten den Antarktisvertrag unterschrieben und sich dazu verpflichtet, die Antarktis dauerhaft zu schützen und das Gebiet südlich des 60. Breitengrads ausschließlich friedlich zu nutzen. Unter den Unterzeichnerstaaten befinden sich 29 sogenannte Konsultativstaaten. Diese führen Forschungen in der Antarktis durch und sind bei ihren Treffen (Antarctic Treaty Consultative Meetings), zu denen auch die anderen Unterzeichner eingeladen sind, stimmberechtigt. Auf den jährlichen Konferenzen werden Grundsätze und Ziele des Vertrags nach dem Einstimmigkeitsprinzip überarbeitet und ergänzt.

Die Forschungsaktivitäten im Südpolargebiet werden seit dem Inkrafttreten des Antarktisvertrags durch das damals gegründete Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR) koordiniert. Eine ähnliche Rolle nimmt das International Arctic Science Committee (IASC) im Nordpolargebiet ein. Dabei setzt es jedoch auf die freiwillige Mitarbeit aller in der Arktis forschenden Nationen. Ein Regelwerk wie den Antarktisvertrag gibt es für die Arktis nicht. Dazu liegen die politischen und wirtschaftlichen Interessen zu weit auseinander.

Im Gegensatz zu den Anfängen der Polarforschung sind wissenschaftliche Expeditionen heutzutage keine Abenteuerreisen ins Ungewisse mehr. Satellitendaten legen das Ausmaß der Meereisbedeckung offen und ermöglichen eine Routenplanung mit Weitsicht. Wetterdienste warnen in der Regel rechtzeitig vor aufziehenden Unwettern, und aus so mancher wissenschaftlich spannenden Region senden automatisierte Messsysteme wie ARGO-Gleiter, Untereisverankerungen, Wetterstationen und Meereisbojen via Funk die Daten direkt an die Forschungsinstitutionen.

Allen technischen Errungenschaften zum Trotz aber erschweren nach wie vor die Eisbedeckung, das extreme Klima und die geografische Abgeschiedenheit vieler polarer Gebiete die wissenschaftliche Arbeit, sodass Polarforschung auch heute nur dank internationaler Zusammenarbeit gelingen kann.

Conclusio

Arktis und Antarktis – zwei grundverschiedene Polargebiete

Die Nord- und Südpolargebiete gehören zu den entlegensten und extremsten Lebensräumen der Erde. In beiden Regionen erschweren Kälte, Eis, Schnee und die lang anhaltende Dunkelheit der Polarnacht das Überleben von Pflanzen, Tieren und Menschen. Beide Polargebiete unterscheiden sich aber auch grundsätzlich voneinander.

Die Antarktis im Süden besteht aus einem riesigen Kontinent, der vollständig vom Südpolarmeer umgeben wird. In der Arktis, dem Nordpolargebiet, dagegen verhält es sich genau umgekehrt: Hier umschließen die Landmassen dreier Kontinente einen Ozean in zentraler Lage. Der einzige Eisschild der Arktis bedeckt große Teile Grönlands, ist aber trotzdem deutlich kleiner als die Inlandeismassen der Antarktis, die 98 Prozent des Kontinents bedecken. Im Gegenzug verfügt der Arktische Ozean über eine dauerhafte Meereisdecke. Deren Fläche wächst und schrumpft zwar im Rhythmus der Jahreszeiten, nimmt bislang aber nie so weit ab wie die Meereisfläche des Südpolarmees, welche im Sommer nahezu vollständig schmilzt.

Die weiträumige, gleichzeitige Vereisung beider Polargebiete stellt erdgeschichtlich betrachtet fast schon eine Ausnahmesituation dar. Nur wenige Mal zuvor hatten sich die wandernden Kontinente der Erde derart angeordnet, dass sowohl im Norden als auch im Süden polare Klimabedingungen entstehen und beide Gebiete vereisen konnten. Während die Klimageschichte der Antarktis inzwischen ziemlich gut verstanden ist, gibt es in Bezug auf die Vereisungsgeschichte der arktischen Land- und Meeresgebiete noch immer viele offenen Fragen.

Die geografischen Gegensätze der Polargebiete erklären auch ihre unterschiedliche Besiedlungsgeschichte. Die meisten Gebiete der Arktis konnte sich der Mensch zu Fuß erschließen. Er besiedelte aus

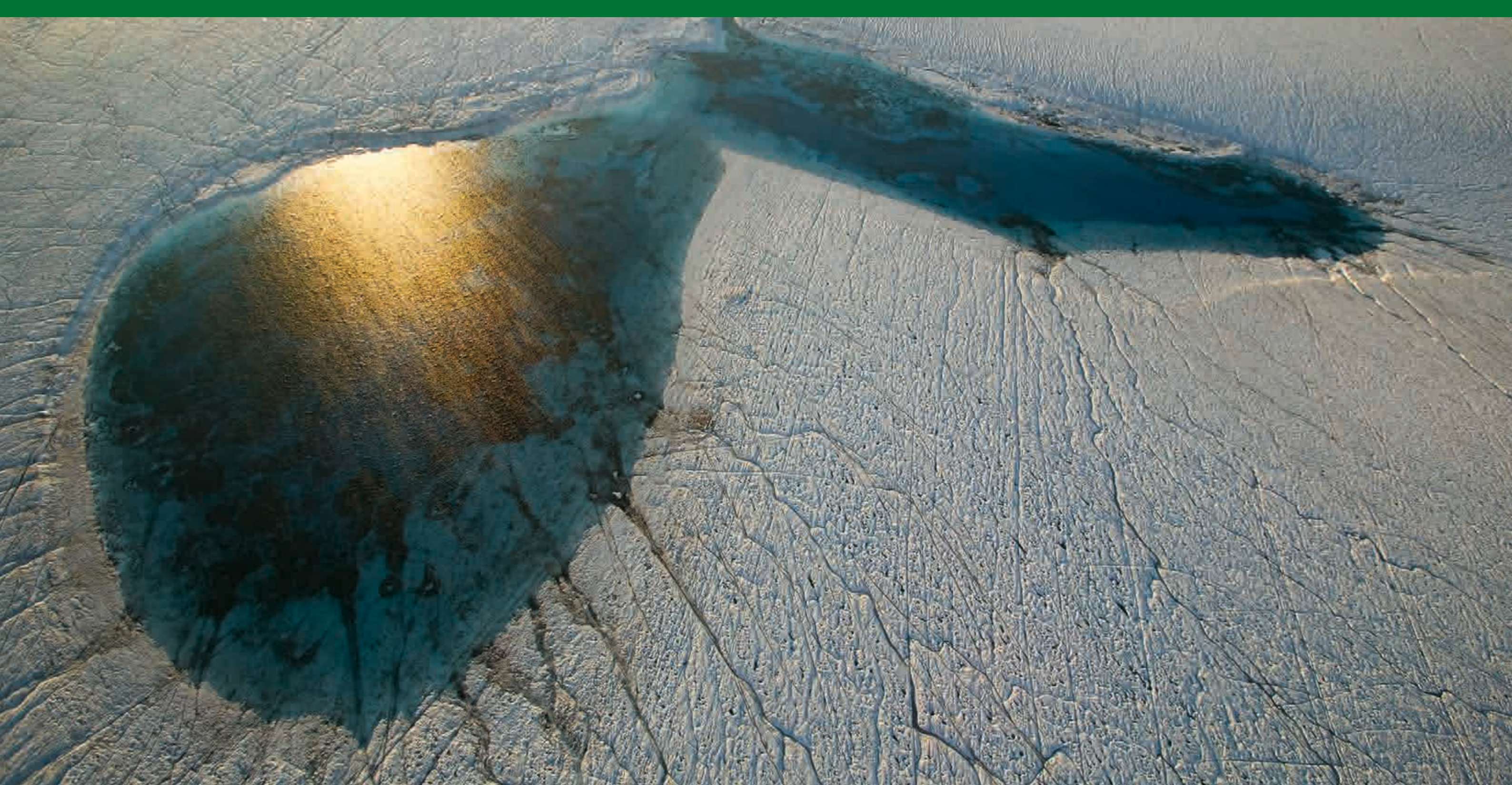
Nordafrika kommend vor etwa 45 000 Jahren Sibirien und wanderte später von dort über eine Landbrücke nach Nordamerika ein. In Grönland und dem hohen Norden Europas konnten Menschen allerdings erst heimisch werden, nachdem die großen Eisschilde der jüngsten Eiszeit geschmolzen waren. Sie hatten den Jägern und Sammlern bis dato in Nordamerika und Europa den Weg Richtung Norden versperrt. Heute leben rund vier Millionen Menschen in der Arktis.

Um die entlegene Antarktis zu erreichen, brauchte der Mensch hochseetaugliche Schiffe und furchtlose Seefahrer, die sich weit Richtung Süden vorwagten. Der südliche Kontinent wurde deshalb erst im 19. Jahrhundert entdeckt und diente zunächst den Robben- und Walfängern als Jagdgebiet. Ab dem 20. Jahrhundert erkundeten Abenteurer und Polarforscher den eisigen Kontinent, wobei in der öffentlichen Wahrnehmung Vorstöße in unbekanntere Regionen oft mehr zählten als wissenschaftlich wertvolle Daten und Beobachtungen.

Nach dem Ersten Weltkrieg hielt moderne Technik Einzug in die Polarforschung. Sowohl das Nord- als auch das Südpolargebiet wurden fortan auch aus der Luft erkundet. Forschungsstationen ermöglichten Langzeitbeobachtungen, wodurch sich die Wettervorhersage für die Polarregionen verbesserte. Außerdem erkannte man die Bedeutung beider Gebiete für das Klima der Erde. Internationale wissenschaftliche Zusammenarbeit legte dann den Grundstein für den Antarktisvertrag, welcher im Jahr 1961 in Kraft trat und bis heute den Schutz sowie eine friedliche, rein wissenschaftliche Nutzung des Kontinents vorschreibt. Für die Arktis gibt es kein vergleichbares Vertragswerk. Trotz teilweise unterschiedlicher politischer Interessen arbeiten in beiden Polarregionen Forschende verschiedener Nationen Hand in Hand. Das extreme Klima und die Abgeschiedenheit der Arktis und Antarktis stellen den Menschen vor besondere logistische und technische Herausforderungen, die sich oft nur gemeinsam meistern lassen.

2 Die Polargebiete als Teil des globalen Klimasystems

> Die Arktis und Antarktis sind die Kältekammern unseres Planeten. Mit Sonnenstrahlung unterversorgt, ziehen sie warme Luft- und Meeresströmungen aus den Tropen an, kühlen diese ab und schicken sie als Eispackung zurück Richtung Äquator. Auf diese Weise regulieren die Polargebiete die Wärmeverteilung auf der Erde – ein Mechanismus, der allerdings nur dann reibungslos funktioniert, wenn sich das Zusammenspiel von Meereis, Gletscher, Ozean und Atmosphäre nicht verändert.



Warum es in den Polarregionen so kalt wird

> Das Klima der Polargebiete ist das Ergebnis eines sich selbst verstärkenden Prozesses. Wo wenig Sonnenwärme ankommt, gefriert Wasser zu Eis, das wie ein Spiegel jede weitere Einstrahlung reflektiert. Ein vielschichtiges, komplexes Windsystem, das maßgeblich mitverantwortlich ist für das Wetter- und Klimageschehen auf unserer Erde, wird von Temperatur- und Druckunterschieden angetrieben, die zwischen warmen und eisigen Regionen herrschen.

Kälter wird es nicht

Als kältester Ort der Erde gilt laut Definition der Weltorganisation für Meteorologie (World Meteorological Organization, WMO) die russische Antarktischforschungstation Wostok. Sie wurde im Jahr 1957 mitten auf dem Ostantarktischen Eisplateau errichtet, in einer Höhe von 3488 Metern über dem Meeresspiegel. Bis zum geographischen Südpol sind es vom Stationsgebäude aus nur rund 1300 Kilometer. Am 21. Juli 1983 notierte der Stationsmeteorologe hier in der Standardmesshöhe von zwei Metern über dem Boden eine Tiefsttemperatur von minus 89,2 Grad Celsius – die offiziell kälteste je gemessene Temperatur auf der Erde.

Wenige Zentimeter über der Oberfläche des Ostantarktischen Eisschildes aber sinkt die Lufttemperatur noch weiter. Wie Satellitendaten aus den Jahren 2004 bis 2016 zeigen, kann sich die bodennahe Luft in einer südlicher und

höher gelegenen Region des Eisschildes auf bis zu minus 98 Grad Celsius abkühlen.

Der Wärmemotor des Erdklimas

Ausschlaggebend für die extreme Kälte in den Polargebieten ist das besondere Zusammenspiel von Sonne, Eis, Luftfeuchtigkeit und Wind. Die Sonne ist die treibende Kraft des Wetters und des Klimas auf der Erde. Mit ihrer Strahlung erwärmt sie die Kontinente, die Ozeane und die Atmosphäre. Die Intensität, mit der die Sonnenstrahlen auf den äußeren Rand der Erdatmosphäre treffen, ist seit Beginn der Satellitenmessungen im Jahr 2000 annähernd konstant geblieben. Aufgrund der Kugelform der Erde ist die Menge der einfallenden Sonnenstrahlung oder Lichtenergie jedoch nicht an allen Stellen gleich. Dort, wo die Strahlung senkrecht auf die Atmosphäre trifft, fällt eine Lichtenergie von 1361 Watt pro Quadratmeter (Solarkonstante) ein. In Regionen, wo die Sonnenstrahlen in einem viel flacheren Winkel auf die Erdatmosphäre treffen, dazu zählen auch die Polargebiete, ist dieser Wert deutlich kleiner. Außerdem erreicht die Sonnenstrahlung stets nur den der Sonne zugewandten Teil der Erde. Errechnet man also den globalen Durchschnitt der Sonneneinstrahlung am oberen Rand der Atmosphäre, so beträgt dieser ungefähr 340 Watt pro Quadratmeter. Wie viel weniger Wärme die Polarregionen erreicht, verdeutlicht ein kleines Rechenbeispiel: Fällt das Sonnenlicht an einem wolkenlosen Sommertag in einem Winkel von 30 Grad auf Teile des antarktischen Kontinents, so kommt dort die Hälfte jener Energie an, die im selben Augenblick in Äquatornähe im Winkel von 90 Grad auf die Erdoberfläche trifft.

Ein wesentlicher Grund dafür, dass es Unterschiede im Wärmeeintrag über das Jahr gesehen gibt, ist die Tatsache, dass sich die Erde wie ein Kreisel im Weltall dreht und ihre Drehachse bei ihrer Wanderung um die Sonne

2.1 > Lang gezogene Schneewellen auf dem Ostantarktischen Eisschild. Sie heißen Sastrugi und entstehen, wenn der Wind über den Boden fegt, die losen Schneekristalle mit sich reißt und aus der vorher höheren Schneedecke an Stellen mit etwas härterem Schnee stromlinienförmige Erhebungen oder Rillen herausfräst.



Die Stockwerke der Atmosphäre

Die Erde wird von einer Gashölle umgeben, welche von der Oberfläche des Planeten bis in eine Höhe von etwa 500 Kilometern reicht und die von der Schwerkraft der Erde festgehalten wird. Ihre Bezeichnung „Atmosphäre“ leitet sich von den griechischen Wörtern *atmós* und *sfaira* (übersetzt: Dampf und Kugel) ab. Die Erdatmosphäre besteht im Wesentlichen aus den Gasen Stickstoff (78,1 Prozent), Sauerstoff (20,9 Prozent) und Argon (0,93 Prozent). Von entscheidender Bedeutung für ein lebensfreundliches Klima auf der Erde sind allerdings auch die sogenannten Spurengas- oder Treibhausgase wie Wasserdampf, Kohlendioxid, Methan und Ozon, deren Anteil zusammen weit unter einem Prozent liegt. Sie absorbieren einen Teil der einfallenden Sonnenstrahlung sowie einen Großteil der ausgehenden Wärmestrahlung der Erde und tragen so zur Erwärmung der Atmosphäre bei. Ohne Spurengase wäre es auf der Erde im Mittel minus 18 Grad Celsius kalt und der blaue Planet Erde ein Schneeball.

Die Erdatmosphäre besteht aus mehreren Schichten, die sich hinsichtlich ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften unterscheiden. Von unten nach oben gliedert sie sich in die Troposphäre, Stratosphäre, Mesosphäre, Thermosphäre und Exosphäre.

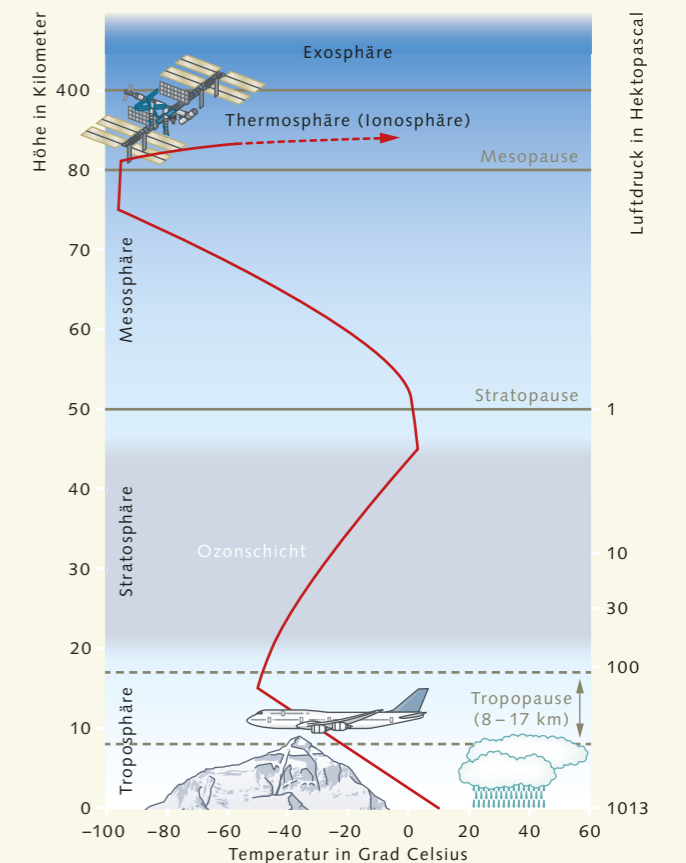
Wichtig für das Wetter und Klima auf der Erde sind allerdings nur die beiden unteren Schichten. In ihnen, vor allem in der Troposphäre, findet das Wettergeschehen statt, wobei die Temperatur in der Troposphäre mit zunehmender Höhe im Mittel abnimmt – pro 1000 Höhenmeter um etwa 6,5 Grad Celsius. Über dem Äquator reicht die Troposphäre bis in eine Höhe von circa 17 Kilometern. In den Polarregionen dagegen ist sie mit acht Kilometern nur etwa halb so hoch.

Darüber beginnt die Stratosphäre, welche bis in eine Höhe von etwa 50 Kilometern hinaufragt. In dieser Schicht steigt die Temperatur langsam an, weil in der Ozonschicht, die sich über den mittleren Breiten in 20 bis 45 Kilometer Höhe befindet, die ultraviolette Strahlung aus dem Sonnenlicht absorbiert und dabei Wärme erzeugt wird. Obwohl die Stratosphäre im Gegensatz zur Troposphäre fast keinen Wasserdampf enthält, kann es vor allem in den Polarregionen unter extrem kalten Bedingungen zur Bildung perlmuttartig schimmernder Stratosphärenwolken kommen.

Auf die Stratosphäre folgt die kälteste Schicht der Erdatmosphäre – die Mesosphäre. Sie reicht bis in eine Höhe von etwa 85 Kilometern. Mit zunehmender Höhe sinken hier Temperatur und Luftdruck deutlich, sodass am oberen Rand der Schicht eine durchschnittliche Temperatur von minus 90 Grad Celsius herrscht.

In der anschließenden Thermosphäre ist die Luftdichte so gering, dass der Abstand zwischen den einzelnen Gasteilchen bis zu

mehrere Tausend Meter betragen kann und Zusammenstöße sowie der damit verbundene Energieaustausch kaum noch stattfinden. In der Thermosphäre umkreist die Internationale Raumstation (ISS) in einer Höhe von ungefähr 400 Kilometern die Erde. In einer Höhe von 500 Kilometern geht die Thermosphäre in den interplanetaren Raum über. Dieser Übergangsbereich wird als Exosphäre bezeichnet. Hier kreist in etwa 640 Kilometer Höhe auch der US-amerikanische SORCE-Satellit. Er misst seit dem Jahr 2003, wie viel Sonnenstrahlung den äußeren Rand der Atmosphäre erreicht.



2.2 > Die Erdatmosphäre gliedert sich in mehrere Stockwerke, von denen nur die zwei unteren für die Wetterabläufe von Bedeutung sind. In der Troposphäre bilden sich Wolken und Niederschlag. In der Stratosphäre absorbiert Ozon einfallendes ultraviolettes Licht und von der Erde abgestrahlte Wärmeenergie.

2.3 > Die Eis- und Schneeflächen der Polarregionen strahlen bis zu 90 Prozent der einfallenden Sonnenstrahlung zurück ins Weltall und kühlen auf diese Weise die Erde.



Wetter + Klima

Unter „Wetter“ verstehen Meteorologen den augenblicklichen Zustand der unteren Atmosphäre (Troposphäre) sowie dessen kurzfristige Veränderung zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort. Um diesen Zustand zu beschreiben, messen sie die Temperatur, den Niederschlag, die Windrichtung und andere Wetterparameter. Der Begriff „Klima“ dagegen steht für die Statistik des Wetters. Er beschreibt mithilfe statistischer Mittel- und Extremwerte den Wetterverlauf an einem Ort über einen Zeitraum von 30 Jahren.

nicht vollkommen senkrecht zur Umlaufbahn steht. Stattdessen neigt sich die Erdachse in einem Winkel von derzeit 23,4 Grad zur Seite. Stünde die Erdachse im rechten Winkel zur Umlaufbahn, gäbe es auf der Erde keine Jahreszeiten. Aufgrund der Neigung aber ist die Nordhalbkugel der Erde im Nordsummer der Sonne zugewandt und erhält viel Sonnenlicht, im Nordwinter jedoch neigt sie sich von der Sonne weg und wird dementsprechend weniger stark bestrahlt – auf der Südhalbkugel ist es immer genau umgekehrt.

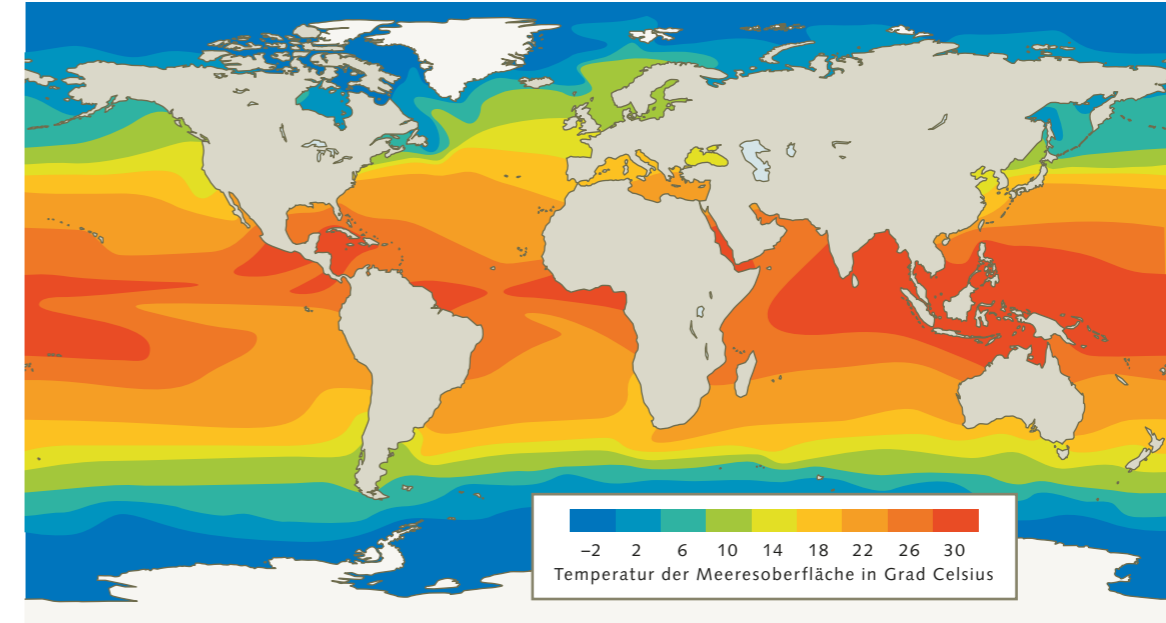
Der Erdneigung verdanken wir aber nicht nur die Jahreszeiten, welche umso ausgeprägter sind, je weiter man sich vom Äquator entfernt. Sie ist auch der Grund, warum die Sonne in den Polarregionen zu bestimmten Zeiten des Jahres entweder gar nicht untergeht (Polartag) oder aber hinter dem Horizont verborgen bleibt (Polarnacht). Am geografischen Nord- und Südpol dauert die Polarnacht fast ein halbes Jahr. Verlässt man den Pol Richtung Polarkreis, nimmt der Zeitraum, in dem es die Sonne nicht über den Horizont schafft, so lange ab, bis er am Polarkreis selbst nur noch 24 Stunden beträgt.

Während der Polarnacht ist das entsprechende Polargebiet demzufolge vollständig vom Wärmestrahler Sonne abgekoppelt. Doch auch während des Polartags, der Phase dauerhafter Einstrahlung, erreicht aufgrund des flachen

Einfallswinkels nur relativ wenig Sonnenenergie die Arktis oder Antarktis. Beide Phänomene bilden also das Fundament für eine anhaltende Kälte im Nord- und im Südpolargebiet. Es gibt allerdings noch zwei weitere wichtige Faktoren: die Albedo und den Wasserdampf.

Weiß reflektiert

Einer dieser verstärkenden Faktoren ist das Rückstrahlvermögen der Erdoberfläche, die sogenannte Albedo. Sie besagt, wie viel der einfallenden Sonnenstrahlung von der Erdoberfläche reflektiert wird. Ganz grundsätzlich gilt dabei: Je dunkler oder rauer eine Fläche ist, desto weniger Strahlung reflektiert sie. Ein frisch gepflügter Acker vermag etwa zehn Prozent der Sonnenenergie wieder abzustrahlen; grüne Wiesen und Weiden kommen auf rund 25 Prozent. Helle Flächen wie Wüstensand besitzen eine Albedo von rund 40 Prozent, erreichen aber bei Weitem nicht jene Rückstrahlwerte, wie sie Schnee- und Eisflächen haben. Frisch gefallener Schnee beispielsweise reflektiert bis zu 90 Prozent der einfallenden Sonnenenergie. Das Meereis erreicht je nach Alter und Oberflächenstruktur eine Albedo von 50 bis 70 Prozent. Diese ziemlich große Spanne entsteht unter anderem dadurch, dass sich vor allem in der Arktis mit der Zeit Staub- und Ruß-



2.4 > Die Oberflächentemperaturen der Meere verdeutlichen den starken Gegensatz zwischen der warmen Äquatorregion und den kalten Polarregionen. Wo Meer und Luft warm sind, verdunstet viel Wasser – Wolken entstehen. In den kalten Gebieten dagegen ist die Verdunstung gering.

partikel auf der Eisoberfläche ablagern und ihren Farbton somit verändern. Eisschollen, denen der Wind die Schneeschicht davongeweht hat, besitzen außerdem eine andere Oberflächenrauigkeit als Schollen, auf denen der Schnee verharrt ist. Schneefreies Gletschereis beispielsweise reflektiert bis zu 60 Prozent der Strahlungsenergie – mit frischer Schneedecke wäre die Albedo größer.

Für die Arktis und die Antarktis stellt sich die Situation also wie folgt dar: In beiden Regionen erreicht aufgrund der Kugelform der Erde und ihrer Neigung über einen langen Zeitraum nur relativ wenig Sonnenenergie die Erdoberfläche. Energie, die jedoch ankommt, trifft auf vorwiegend weiße Eis- oder Schneeflächen und wird von diesen großflächig reflektiert. Das heißt, die abgestrahlte Energiemenge wird nicht als Wärmeenergie im Erdboden oder Ozean gespeichert und kann demzufolge auch nicht zur Erwärmung der boden- oder meeresnahen Luftschichten beitragen. Das hohe Rückstreuvermögen der Schnee- und Eisflächen verstärkt auf diese Weise die Auskühlung der Polarregionen. Diese trägt außerdem dazu bei, dass im Zuge der zunehmenden Kälte noch mehr Meereis entsteht, welches dann wiederum die Gesamtalbedo erhöht. Es wird am Ende also noch mehr Sonnenstrahlung reflektiert. Klimaforscher bezeichnen einen solchen sich selbst verstärkenden Prozess als positive Rückkopplung.

Wasserdampf – der unsichtbare Wärmeregulator

Ein dritter Faktor, der bei der Frage nach der Herkunft der polaren Kälte eine Rolle spielt, ist Wasserdampf. Wasser ist ein ausgesprochen wandlungsfähiges Element unseres Klimasystems. Es kann verdampfen, kondensieren und gefrieren und kommt in der Natur in drei verschiedenen Aggregatzuständen vor: in flüssigem Zustand (Wasser), in gefrorenem Zustand (Eis) und in gasförmigem Zustand – dem Wasserdampf.

Das geruchlose und unsichtbare Gas entsteht, wenn flüssiges Wasser verdunstet. Die Erdatmosphäre enthält etwa 13 Billionen Kubikmeter Wasser. Diese Menge entspricht in etwa 0,001 Prozent des auf der Erde verfügbaren Wassers, wobei sich der größte Teil des Wassers in der Atmosphäre im gasförmigen Zustand befindet. Würde der gesamte Wasserdampf der Atmosphäre kondensieren, als Regen fallen und an der Erdoberfläche verweilen, wäre der gesamte Globus von einer etwa 25 Millimeter dicken Wasserschicht überzogen. Dennoch macht der Massenanteil des Wasserdampfs an der Zusammensetzung der Luft im Mittel nur 0,25 Prozent aus.

Dieser Durchschnittswert täuscht allerdings darüber hinweg, dass der Wasserdampf sehr ungleichmäßig in der Lufthülle verteilt ist. Seine Konzentration nimmt in der

Der Wärme- und Strahlungshaushalt der Erde

Die Erde bezieht ihre Energie nahezu ausschließlich von der Sonne. Diese gibt mit ihrer Oberflächentemperatur von rund 5500 Grad Celsius hunderttausendmal mehr Energie ab als die Erde, deren Durchschnittstemperatur ungefähr 15 Grad Celsius beträgt. Die Sonnenenergie trifft als extraterrestrische Strahlung auf die Erdatmosphäre. Unter dieser Strahlung versteht man dabei die Energieübertragung in Form von elektromagnetischen Wellen. Um die Strahlungsbilanz der Erde zu verstehen, muss man sich drei physikalische Gesetzmäßigkeiten bewusst machen: Erstens gibt jeder Körper, egal ob fest, flüssig oder gasförmig, elektromagnetische Strahlung entsprechend seiner Oberflächentemperatur ab. Das gilt für den glühenden Stern Sonne ebenso wie für die Erde. Unser Heimatplanet ist 288 Kelvin warm (entspricht 14,58 Grad Celsius) und strahlt deshalb auch ganz ohne Hilfe der Sonne.

Zweitens hängen die Wellenlängen der abgegebenen Strahlung von der Temperatur des Körpers ab. Je heißer dieser ist, desto kurzwelliger ist die von ihm abgegebene Strahlung. Der Glühfaden in einer Glühlampe beispielsweise wird so heiß, dass er weiß glüht und dabei vor allem weißes Licht – also sichtbare Strahlung – abgibt. Schaltet man dann das Licht aus, kühlt der Faden ab und glimmt nur noch für einen kurzen Moment leicht rötlich. Das bedeutet, sein Strahlungsmaximum verschiebt sich vom kurzwelligen in den langwelligen Bereich. Anfassen sollte man die Glühbirne zu diesem Zeitpunkt aber noch nicht, denn selbst wenn der Metallfaden nicht mehr glimmt und damit keine sichtbare Strahlung mehr abgibt, emittiert er noch unsichtbare Wärmestrahlung im Infrarotbereich. Man kann sich also noch immer die Finger verbrennen. Unsere Erde als ziemlich kühler Körper gibt ausschließlich langwellige Wärmestrahlen im Infrarotbereich ab.

Drittens kann die von einem Körper abgegebene Strahlung von anderen Körpern zurückgeworfen oder aber aufgenommen werden. Das gilt auch für die Erde und die Sonne. Die am äußeren Rand der Erdatmosphäre eintreffende Sonnenstrahlung beträgt im globalen Mittel 340 Watt pro Quadratmeter. Etwa sieben Prozent der eintreffenden Strahlung ist UV-Strahlung, 46 Prozent der Strahlung liegen im Bereich des sichtbaren Lichtes und die restlichen 47 Prozent im infraroten Spektrum.

Etwa 30 Prozent der eintreffenden Strahlung von 340 Watt pro Quadratmeter werden von der Atmosphäre und der Erdoberfläche direkt in den Weltraum zurückgestrahlt. Diesen Anteil in Höhe von 100 Watt pro Quadratmeter nennt man auch planetare Albedo. Nur 240 Watt pro Quadratmeter verbleiben im Klimasystem und stehen für die Erwärmung der Erde zur Verfügung. Etwa ein Drittel davon (79 Watt pro Quadratmeter)

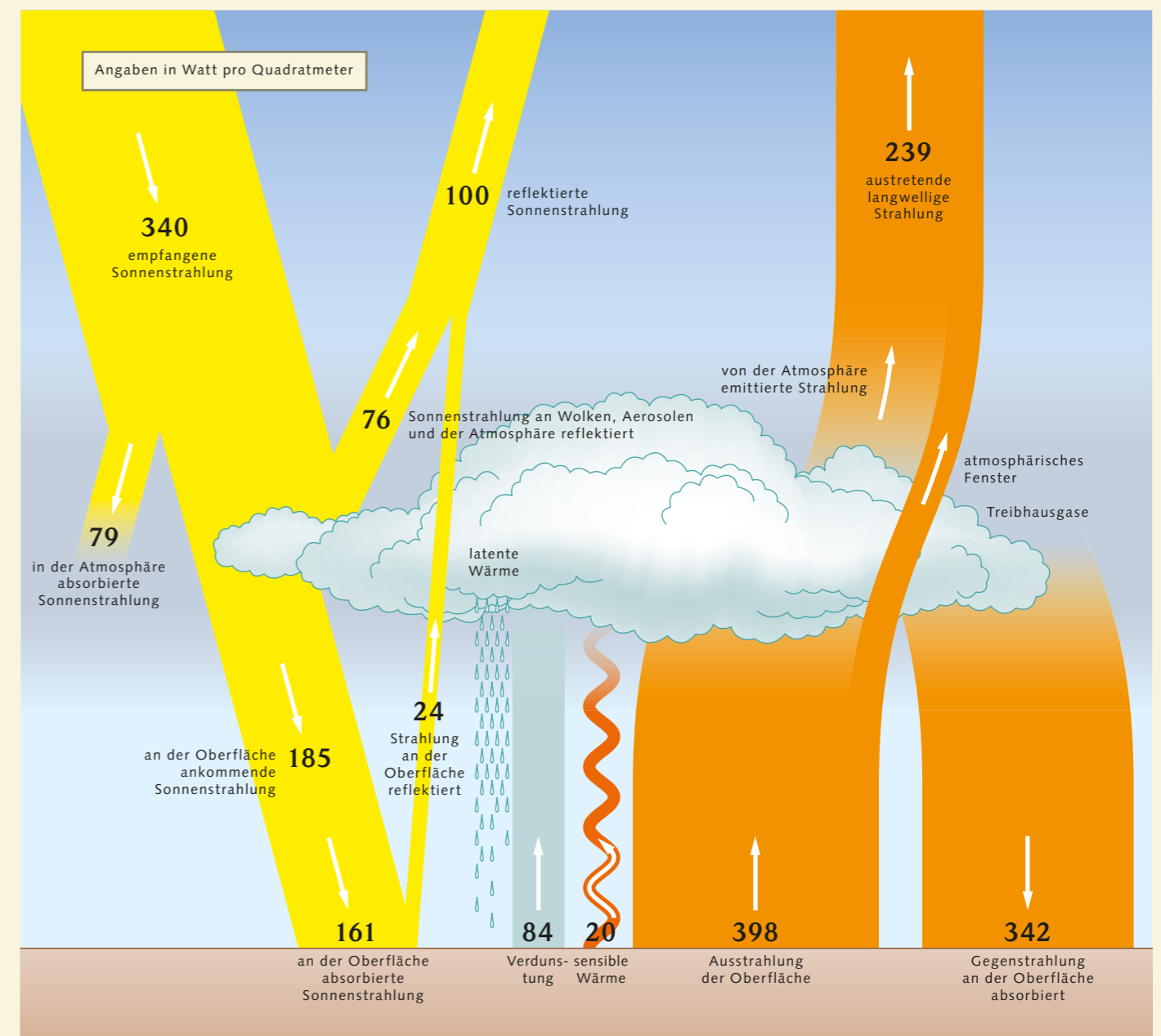
absorbieren die Wolken, der Wasserdampf, die Staubpartikel und das Ozon in der Atmosphäre. Das heißt, dieser Anteil erwärmt die Atmosphäre über uns. Dabei filtern vor allem Gase in ganz bestimmten Wellenbereichen. Ozon beispielsweise absorbiert nahezu vollständig die einfallende ultraviolette Strahlung und ist damit ein wirksamer UV-Schutzfilter.

Wichtig an dieser Stelle ist, dass die in der Atmosphäre enthaltenen Luftmoleküle, Wassertröpfchen, Staubpartikel und Eiskristalle die einfallende Strahlung in alle Richtungen zurückwerfen. Die nach oben abgelenkten Anteile gehen in das Weltall zurück, die nach unten abgelenkten Strahlen erreichen die Erde als diffuse Himmelsstrahlung. An der Erdoberfläche kommen somit zwei Formen der Einstrahlung an – die direkte Sonnenstrahlung, welche die Erdoberfläche nur bei wolkenfreiem Himmel erreicht, und die diffuse Himmelsstrahlung.

Fast 60 Prozent der einfallenden Sonnenstrahlung (185 Watt pro Quadratmeter) erreichen tatsächlich die Erdoberfläche. Davon werden circa 13 Prozent (24 Watt pro Quadratmeter) direkt ins All zurückreflektiert. Sie sind Teil der planetaren Albedo. Die restlichen 161 Watt pro Quadratmeter werden von der Erdoberfläche absorbiert und erwärmen sie.

Die Erdoberfläche gibt ihre Wärme auf dreierlei Weise ab: erstens in Form von Verdunstung – latente Wärme genannt (84 Watt pro Quadratmeter) –, zweitens durch warme aufsteigende Luftmassen – sensible Wärme genannt (20 Watt pro Quadratmeter) – sowie drittens durch das Abstrahlen langwelliger Wärmestrahlen (398 Watt pro Quadratmeter). Allerdings schafft es nur ein sehr kleiner Teil der Wärmestrahlung, auf direktem Weg im Weltall zu verschwinden. Auf ihrem Weg durch die Atmosphäre stößt sie nämlich auf die gleichen Hindernisse wie zuvor die einfallende kurzwellige Sonnenstrahlung. Diesmal sind es jedoch vor allem die Moleküle der sogenannten Spuren- oder Treibhausgase, welche die langwellige Strahlung absorbieren und anschließend als Wärmestrahlung in alle Richtungen wieder abgeben. Sie halten somit einen Teil der Wärme in der unteren Atmosphäre fest und erzeugen eine sogenannte Gegenstrahlung (342 Watt pro Quadratmeter). Das heißt, die Erde bekommt einen großen Teil ihrer Abstrahlung wieder zurück.

Diese Tatsache wird oft auch als Treibhauseffekt bezeichnet. Gleichzeitig strahlt die Atmosphäre Wärme in das Weltall ab. Vergleicht man die solare Einstrahlung und die gesamte langwellige Ausstrahlung am äußeren Rand der Atmosphäre miteinander, wird deutlich, dass die Erde ein kleines bisschen mehr Energie aufnimmt, als sie abgibt. Eine Tatsache, die von entscheidender Bedeutung ist, wie an späterer Stelle noch erläutert wird.



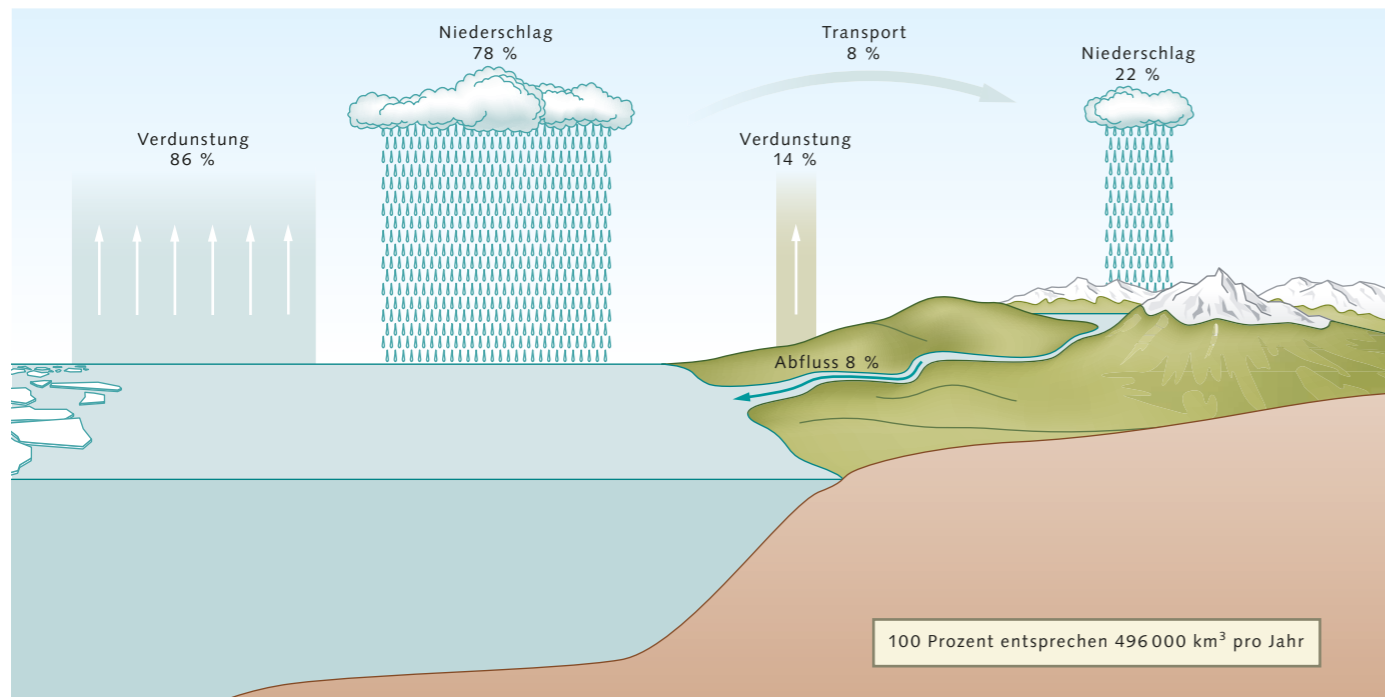
Höhe stark ab, was unter anderem daran liegt, dass warme Luft viel mehr Wasserdampf enthalten kann als kalte Luft. Dementsprechend kann in warmen Regionen viel Wasser in Wasserdampf umgewandelt werden, in kalten Regionen weniger. In den Polarregionen ist aufgrund der niedrigen Temperaturen die Verdunstung sowie der Wasserdampfanteil in der Atmosphäre im Winter minimal. Ein Beispiel: Der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre steigt mit jedem Grad Celsius Lufttemperatur. Ein Kubikmeter Luft kann bei einer Temperatur von minus 20 Grad Celsius bis zu 1,1 Gramm Wasserdampf speichern. Erwärmt sich dasselbe Volumen dagegen auf plus 20 Grad Celsius, kann es bis zu maximal 17,2 Gramm Wasserdampf enthalten.

2.5 > Über den Ozeanen verdunstet ständig eine große Menge Wasser, vor allem in den warmen Meeresregionen. Diese Feuchtigkeit verbleibt jedoch nicht lang in der Atmosphäre. Sie fällt innerhalb von zehn Tagen wieder als Niederschlag zur Erde.

Die Menge des in der Atmosphäre enthaltenen Wasserdampfs wird auch mit dem Begriff „Luftfeuchtigkeit“ oder „Luftfeuchte“ beschrieben. Berichten Meteorologen von einer hohen Luftfeuchte, bedeutet dies, dass die Luft viel Wasserdampf enthält. Die gebräuchlichste Maßzahl ist die relative Luftfeuchtigkeit in Prozent. Da bei gegebenen Temperaturen und Drücken ein bestimmtes Luftvolumen nur eine bestimmte Höchstmenge an Wasserdampf aufnehmen kann, spricht man bei Erreichen dieser Höchstmenge von 100 Prozent relativer Luftfeuchtigkeit.

Wenn Wasser über dem Meer oder auf dem Land verdunstet, vergehen in der Regel nicht mehr als zehn Tage, bis der Wasserdampf die Atmosphäre als Niederschlag wieder verlässt. Im Gegensatz zu Kohlendioxid, welches mehrere Jahrhunderte lang in der Atmosphäre verweilen kann, verschwindet Wasserdampf also recht schnell wieder aus der Luft und wird deshalb als kurzlebig bezeichnet. Nichtsdestotrotz gilt Wasserdampf als das wichtigste natürliche Treibhausgas: zum einen, weil er in höherer Konzentration in der Atmosphäre vorkommt als Kohlendioxid, Methan oder Distickstoffmonoxid (Lachgas), zum anderen, weil er im Vergleich zu Kohlendioxid zwei- bis dreimal so stark zum natürlichen Treibhauseffekt beiträgt.

Das Klima der Erde – und hier vor allem das Klima der Polarregionen – ist stark geprägt vom Vorhandensein oder Fehlen des Wasserdampfs. Die Atmosphäre muss Wasserdampf enthalten, damit sich daraus Nebel oder Wolken bilden können. Der Wasserdampf **kondensiert** allerdings erst, wenn die Luft mit dem Gas übersättigt ist – also mehr Wasserdampf enthält, als sie eigentlich aufnehmen kann. Zu einer solchen Übersättigung kommt es, wenn warme, feuchte Luftmassen aufsteigen, sich dabei abkühlen und ihre Fähigkeit, Wasserdampf aufzunehmen, sinkt. Das Gas



kondensiert zu kleinen Tröpfchen oder unter bestimmten Umständen auch zu kleinen Eispartikeln, die frei in der Luft schweben und vom Erdboden aus in der Regel als Wolken oder Nebel sichtbar werden.

Wolken spielen auf zweierlei Weise eine wichtige Rolle im globalen Klima. An ihren Abermillionen Wassertropfchen bricht sich zum einen das von oben einfallende Sonnenlicht, wodurch verhindert wird, dass diese Strahlen direkt auf die Erdoberfläche treffen. Stattdessen werden sie in viele verschiedene Richtungen abgelenkt. Ein Teil entweicht sogar wieder in das Weltall. Am Ende kommt also weniger Sonnenstrahlung am Erdboden an, als dies ohne Wolkendecke der Fall gewesen wäre. Die Wolkendecke kühlt demzufolge die Erde. Zum anderen lassen Wolken aber auch die vom Erdboden kommende langwellige Wärmestrahlung der Erde nicht durch. Sie absorbieren einen Großteil der Wärmestrahlung und geben die aufgenommene Wärme in alle Richtungen wieder ab. Auf diese Weise können Wolken zur Erwärmung der Atmosphäre beitragen. Welche der beiden Eigenschaften überwiegt, hängt davon ab, um welchen Wolkentypus es sich handelt. Meist werden Wolken nach der Höhe ihres Vorkommens und nach ihrer Gestalt voneinander unterschieden. Optisch dicke, tief hängende Wolken reflektieren vor allem das einfallende Sonnenlicht und kühlen die Erde. Hohe, dünne Wolken dagegen lassen die Sonnenstrahlung passieren. Stattdessen blockieren sie der ausgehenden Wärmestrahlung der Erde den Weg und absorbieren einen Großteil der Wärmeenergie. Hinzu kommt der Tag-Nacht-Effekt. Bekanntlich garantiert ein wolkenfreier Himmel tagsüber in der Regel wärmere Temperaturen, weil die Sonne ungehindert scheinen kann. Nachts aber wird es ohne Wolken eher kalt, weil die Erde die absorbierte Wärmeenergie dann ungehindert wieder abstrahlen kann.

Gefriergetrocknete Luft

Die Arktis und die Antarktis unterscheiden sich hinsichtlich des Einflusses von Wolken grundlegend. Während dichter Nebel und Bewölkung in der Arktis oft beobachtete Sommerphänomene sind – sehr zum Leidwesen der Polarforscher, die meist im Sommer auf Expedition gehen –, kommen sie in der Antarktis in der Regel nur im

Küstenbereich vor. Die Luft über der zentralen Antarktis ist aufgrund der minimalen Sonneneinstrahlung einfach zu kalt und enthält deswegen zu wenig Wasserdampf, als dass dieser flächendeckend kondensieren und eine dicke Wolkendecke bilden könnte. Stattdessen kondensiert mit zunehmender Kälte alle Restfeuchtigkeit in Eiskristalle und rieselt als sogenannter Diamond Dust (Diamantstaub) zu Boden. Die Luft wird also quasi gefriergetrocknet, weshalb die Antarktis auch als trockenster Kontinent der Erde gilt.

Zum Vergleich: In Deutschland fallen pro Jahr rund 700 Liter Niederschlag pro Quadratmeter. Dieselbe Menge verzeichnen auch die Wetterstationen an der Antarktischen Halbinsel. Im Küstenbereich des Weddellmeers, also auf Höhe der deutschen Antarktis-Forschungsstation Neumayer III, sind es nur noch 300 Liter Niederschlag pro Quadratmeter, was umgerechnet einer Schneeschicht von etwa einem Meter Höhe entspricht. In der zentralen Antarktis hingegen liegen die Jahresniederschlagsraten großflächig unter 50 Liter pro Quadratmeter – so trocken ist die Luft. Nur in Ausnahmefällen berichten Meteorologen von einer dünnen Schleierbewölkung über dem Antarktischen Eisschild. Sie kann allerdings nicht verhindern, dass die Eisoberfläche die wenige einfallende Wärme wieder in das Weltall abstrahlt, was zu einer weiteren Abkühlung der Luft über der Antarktis führt.

In der Arktis dagegen tragen Wasserdampf, Wolken und Nebel vor allem im Sommer zur Erwärmung bei. Eine Ursache dafür ist das sommerliche Schrumpfen der Meereisdecke auf dem Arktischen Ozean. Wo im Winter und Frühjahr weiße Eisschollen treiben, welche die Sonnenstrahlung zu großen Teilen reflektieren, befindet sich im Sommer die dunkle Meeresoberfläche. Sie absorbiert bis zu 90 Prozent der Sonnenenergie, sodass die Oberflächentemperatur des Meeres steigt. Weil sich gleichzeitig auch die Luft erwärmt, kann die Atmosphäre mehr Wasserdampf aufnehmen. Die Luftfeuchtigkeit steigt, weshalb es jetzt nur noch kleiner Ruß-, Staub- oder Salzpartikel in der Luft bedarf, damit der Wasserdampf kondensieren kann und Wolken oder Nebel entstehen.

Neben der Eigenschaft, dass sich aus Wasserdampf Wolken bilden können, ist noch eine zweite Eigenschaft des Wasserdampfs prägend für den Wärmehaushalt und das Wettergeschehen: Er speichert Wärmeenergie. Sie ist

weder für ein Thermometer noch für uns Menschen fühlbar. Meteorologen sprechen deshalb von latenter Wärme. Mancherorts wird sie auch als Verdampfungswärme bezeichnet, denn ihre Menge entspricht genau jener Wärme, die zuvor für das Verdampfen des Wassers benötigt wurde. Das Besondere am Wärmespeicher Wasserdampf aber ist: Sowie der Dampf in der Atmosphäre wieder zu Wassertröpfchen kondensiert, wird die gespeicherte Verdampfungswärme als Kondensationsenergie wieder freigesetzt und erwärmt die umgebende Luft. Für Regionen mit hohem Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre bedingt dieser Effekt eine zusätzliche Erwärmung. In Gebieten mit geringer Luftfeuchte oder wenig Wasserdampf in der Atmosphäre stellt sich der Effekt in weitaus geringerem Maß ein.

Der Mangel an Wasserdampf ist einer der Gründe, warum es in kleinen Senken am Südhang des Ostantarktischen Eisschildes noch kälter wird als an der Forschungsstation Wostok. Im Juli und August kühlt sich die Luftschicht direkt über dem Eisschild so weit ab, dass es nach Erkenntnis der Wissenschaftler nicht mehr kälter werden kann. Minus 98 Grad Celsius scheint die größte Kälte zu sein, die unter natürlichen Umständen auf der Erde möglich ist.

Damit die Luft in den Senken so weit abkühlt, müssen mehrere Voraussetzungen erfüllt sein. Die Sonneneinstrahlung muss wochenlang ausbleiben, was nur im Zuge der Polarnacht gegeben ist. Die Luft über dem schneebedeckten Eisschild darf zudem keinen Wasserdampf enthalten, der im Fall von Kondensation Wärme abgeben oder vom Schnee reflektierte Strahlungsenergie absorbieren und somit in der Atmosphäre halten würde. Den Forschern zufolge enthält die Luft in der Region im Winter so wenig Wasserdampf, dass die Menge, als Wassersäule gedacht, gerade mal 0,04 bis 0,2 Millimeter hoch wäre. Perfekt ist ein Wasserdampfgehalt von weniger als 0,1 Millimetern. Ferner darf der Wind nur äußerst schwach wehen und der Himmel muss mehrere Tage lang frei von Wolken sein.

Unter diesen Bedingungen kühlt die Luftschicht direkt über dem Schnee Stück für Stück aus. Sie wird immer dichter und schwerer, fließt langsam den Hang hinab und sammelt sich in den Senken, wo Forscher sie dann via Satellit detektieren konnten.

Winde – die Triebkräfte des Wetters

Wenn man mit den Augen eines Physikers auf die Polarregionen schaut, dann stellen die Arktis und Antarktis Regionen dar, in denen die fehlende Sonneneinstrahlung und die hohe Wärmeabstrahlung aufgrund der Albedo zu weitaus niedrigeren Temperaturen führen als in anderen Regionen der Welt. Mit den Temperaturunterschieden gehen Dichteunterschiede einher, denn kalte Luftmassen sind dichter und schwerer als wärmere. Kalte Luft sinkt herab, während warme Luft aufsteigt. Diese Dichteunterschiede und Bewegungen der Luft werden durch unterschiedlich hohe Luftdrücke an unterschiedlichen Orten erzeugt. Wo Luft sich abkühlt und absinkt, entsteht in Bodennähe ein Hochdruckgebiet, wie man es als Polar- oder Kältehoch sowohl aus der zentralen Arktis als auch aus der Antarktis kennt. In einem Tiefdruckgebiet wie den Tropen dagegen steigt warme Luft auf.

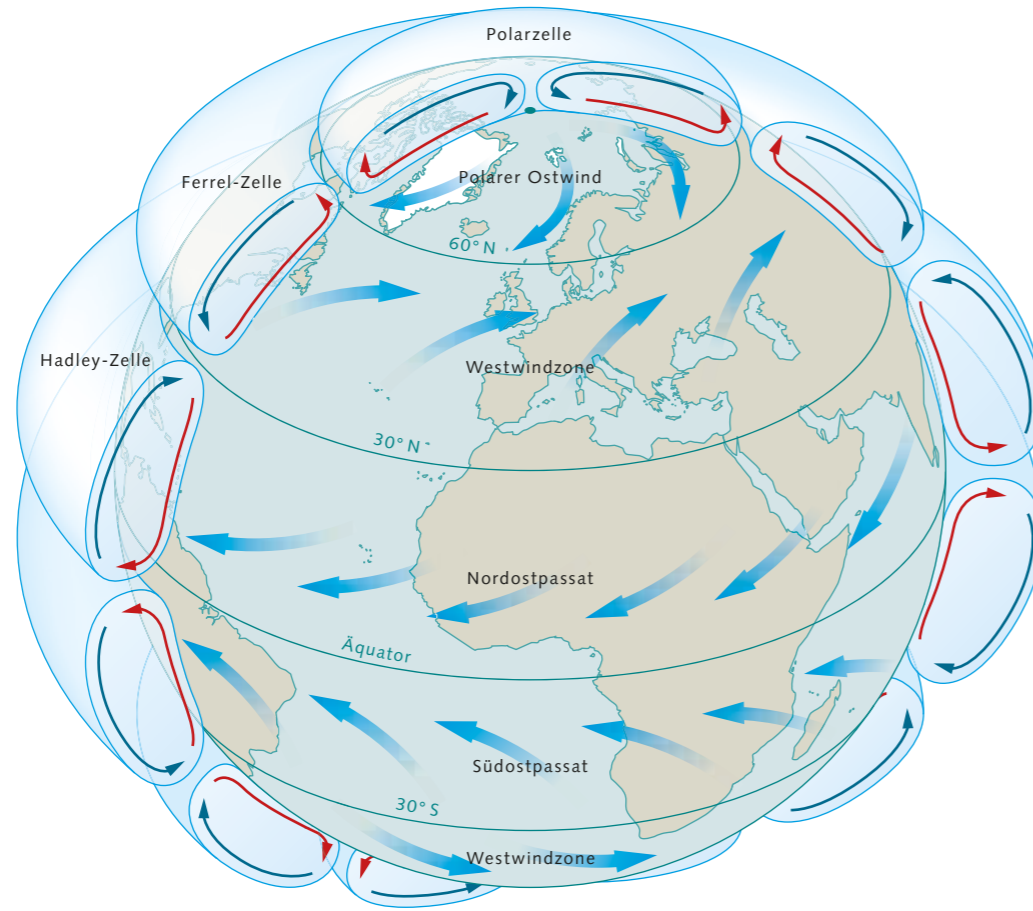
Diese Temperatur- und Luftdruckunterschiede zwischen den warmen Tropen und den kalten Polargebieten sind die eigentlichen „Wettermacher“ auf der Erde. Sie treiben die großen Wind- und Strömungssysteme der Erde und damit die globale Luftzirkulation an. Alle Abläufe in der Atmosphäre sind nämlich darauf ausgerichtet, diese Temperaturunterschiede und Luftdruckgegensätze auszugleichen. Das heißt, die warmen Luftmassen aus den Tropen wandern in der Höhe polwärts, während die kalten Luftmassen aus den Polargebieten in Bodennähe Richtung Äquator strömen.

Würde die Erde sich nicht um ihre eigene Achse drehen, könnte man sich die Wanderpfade der verschiedenen Luftmassen sowohl in Bodennähe als auch in der Höhe auf einer Karte als gerade Linien vorstellen. Weil sich die Erde aber dreht, wird jeder Luftstrom auf seinem Weg vom Hochdruck- zum Tiefdruckgebiet auf der Nordhalbkugel jeweils nach rechts abgelenkt, auf der Südhalbkugel nach links. Dieser Effekt wird durch die Corioliskraft verursacht – eine Scheinkraft, die durch die Erddrehung entsteht. Sie wirkt auf Luft- und Meeresströmungen gleichermaßen, nimmt mit jedem Breitengrad zu und ist der Grund, warum zum Beispiel der Passat auf der Nordhalbkugel nicht auf direktem Weg vom Hochdruckgebiet auf 30 Grad Nord zum Äquator strömt. Stattdessen wird er in Strömungsrichtung nach rechts abgelenkt und fegt



2.6 > Im antarktischen Spätfrühling steigt die Sonne wieder über den Horizont und läutet das Ende der Polarnacht in der Antarktis ein. Diese dauert in den meisten Küstenregionen des Südkontinents nur etwa zwei Monate. Je weiter man sich jedoch dem Südpol nähert, desto länger hält die Zeit der Dunkelheit an.

2.7 > Die atmosphärische Zirkulation der Luftmassen um den Erdball ist so komplex, dass sich Forscher mit diesem stark vereinfachten Modell behelfen. Es zeigt die sechs Zirkulationszellen und Windsysteme, die durch abgelenkte Luftmassenströme entstehen und in beiden Hemisphären nahezu identisch sind.



demzufolge als Nordostwind über Afrika und auch den Atlantik hinweg.

Die Corioliskraft ist auch der Grund, warum die Luft hoch über dem Äquator auf ihrem Weg zu den Polen mit jedem Meter Entfernung stärker nach rechts abgelenkt wird. Ungefähr auf Höhe des 30. Breitengrads ist diese Ablenkung so groß, dass der Luftstrom als Höhenwestwindband oder Subtropen-Jetstream parallel zum Breitengrad verläuft und er seine eigentliche Aufgabe, den Wärmeausgleich zwischen Äquator und Pol, nicht mehr erfüllen kann. Stattdessen sinkt die inzwischen kühler gewordene Luft ab und strömt über der Erdoberfläche als Passatwind zurück Richtung Äquator. Auf diese Weise entsteht zwischen dem Äquator und dem 30. Breitengrad der Nord- und Südhalbkugel die sogenannte Passatzirkulation oder auch Hadley-Zirkulation, deren Name auf den britischen Hobbymeteorologen George Hadley (1685–1768)

zurückgeht. Sie wird in einfachen, idealisierten Beschreibungen als eine geschlossene Zelle dargestellt.

Eine ganz ähnliche Zirkulation, die sogenannte Polarzelle, bildet sich über dem Nord- und Südpolargebiet. Hier sinkt aufgrund der Auskühlung kalte, schwere Luft im Zentrum ab (Hochdruckgebiet) und strömt anschließend in Bodennähe Richtung Polarkreis (Tiefdruckgebiet). Dabei wirkt abermals die Corioliskraft, sodass die Luftströme zu polaren Ostwinden werden. Auf ihrem Weg zum Polarkreis aber erwärmt sich die Luft so weit, dass sie aufsteigen kann und in der Höhe als Gegenstrom Richtung Pol zurückkehrt.

Zwischen den beiden gleichläufigen Systemen Hadley- und Polarzelle ist Platz für ein drittes System, die sogenannte Ferrel-Zelle, benannt nach dem amerikanischen Meteorologen William Ferrel (1817–1891). In ihr wandern die Luftmassen in entgegengesetzter Richtung. Das heißt,

hier wird Luft in Bodennähe polwärts verlagert und nach rechts abgelenkt, sodass der Wind von Westen her weht. Die Zone wird daher auch Westwindzone genannt. Durch Verwirbelungen der Luftmassen in dieser Zone entstehen jedoch anders als in der Polarzelle oder der Hadley-Zelle sogenannte Tiefdruckzellen, die als Wellen hin und herwandern und für eine gewisse Instabilität der Zirkulation sorgen. Diese Instabilität ist auf die hohen Temperaturgegensätze zwischen den Tropen und den Polarregionen zurückzuführen, welche aber aufgrund der stark wirkenden Corioliskraft nicht auf direktem Wege ausgeglichen werden können. Stattdessen bedient sich die Natur der Hoch- und Tiefdruckgebiete, die wie Schaufelräder warme Luft nach Norden und auf der Rückseite der Tiefs Polarluft nach Süden schaufeln. Aus diesem Grund gibt es nur im Bereich der Ferrel-Zelle das, was Meteorologen typischerweise als Wetter bezeichnen. In den anderen Zellen bestimmen eher die Jahreszeiten das meteorologische Geschehen, nicht so sehr das Wetter.

Wissenschaftler haben in Laborversuchen einmal getestet, wie sich die atmosphärische Zirkulation der Erde verändern würde, wenn sich unser Planet schneller um seine eigene Achse drehen würde. Ihr Ergebnis: Die Corioliskraft würde derart zunehmen, dass auf jeder Erdhalbkugel fünf Zellen entstünden. Würde sich die Erde deutlich langsamer drehen, gäbe es zwischen Pol und Äquator nur eine Zelle, in welcher die Luftmassen dann direkt aus den Tropen zum Pol und zurück strömen würden. Eine solche Ein-Zellen-Zirkulation gibt es beispielsweise auf der Venus.

Die schützenden Wirbel

Die Wind- und Strömungsmuster der atmosphärischen Zirkulation sind für die Polargebiete von großer Bedeutung. Bislang verhindern sie ziemlich zuverlässig, dass warme Luftmassen das Zentrum der Arktis oder Antarktis erreichen. Um zu verstehen, wie Winde die Polargebiete schützen, muss man sich die Atmosphäre der Polarregionen etwas genauer ansehen.

Die Luft über den Polargebieten kühlt sich im Herbst und im Winter (Polarnacht) stark ab und sinkt zur Erdoberfläche. Während in Bodennähe nun ein Hochdruckgebiet, das Kältehoch, entsteht, bildet sich darüber in einer Höhe von etwa acht bis zehn Kilometern ein Tiefdruck-

gebiet. Dieses kann bis in eine Höhe von 50 Kilometern reichen und wird als stratosphärischer Polarwirbel bezeichnet. Die Luftmassen dieses Wirbels werden durch einen starken Westwind zusammengehalten, den sogenannten Polar Night Jet. Er entsteht, weil in der Stratosphäre dieselben Strömungsgesetze gelten wie in der darunterliegenden Troposphäre.

Das heißt, Luft strömt immer vom Hochdruckgebiet – in diesem Fall das Höhen-Hochdruckgebiet über dem Äquator – zum Tiefdruckgebiet, hier das Höhen-Tiefdruckgebiet über den Polarregionen. Der Luftstrom wird auf seinem Weg Richtung Pol jedoch durch die Erdrotation nach rechts abgelenkt, was die Luftströmung auf der Nordhalbkugel zu einem Westwind macht. Der Polar Night Jet weht also ab einer Höhe von zehn Kilometern aufwärts aus Westen kommend Richtung Osten und umkreist dabei den Nordpol vollständig. Seine Maximalgeschwindigkeit erreicht der Wind auf Höhe des 60. Breitengrads. Dort stellt er auch eine Art Barriere dar, die das polare Höhen-Tiefdruckgebiet von den Luftmassen aus dem Äquatorgebiet trennt und auf diese Weise verhindert, dass in der Höhe wärmere Luftmassen von dort Richtung Pol vorstoßen können.

Im Lauf des Winters gewinnt der Polar Night Jet an Kraft, weil mit zunehmender Abkühlung der Stratosphäre die Luftmassen des Tiefdruckgebiets in sich zusammensinken und mehr Luft nachströmen kann, was den Wind anfaucht. Sowie jedoch im Frühling die ersten Sonnenstrahlen die Polarregion erreichen, erwärmt sich die Luft innerhalb des Tiefdruckgebiets. Die Dichte- und Druckunterschiede relativieren sich – und der Wind schwächt sich wieder ab.

Vergleicht man den stratosphärischen Polarwirbel über der Arktis mit jenem über der Antarktis, so weht der Wind im Süden auf kreisförmigeren Bahnen und deutlich stärker als im hohen Norden. Der Polar Night Jet in der Antarktis erreicht an einem normalen Wintertag eine Geschwindigkeit von bis zu 80 Meter pro Sekunde. Das sind umgerechnet 288 Kilometer pro Stunde. Auf der Nordhalbkugel hingegen weht er durchschnittlich mit nur 180 Kilometer pro Stunde. Hinzu kommt: Der stratosphärische Polarwirbel über der Antarktis ist deutlich größer und die Temperaturen in seinem Innern kälter als jene im Norden.

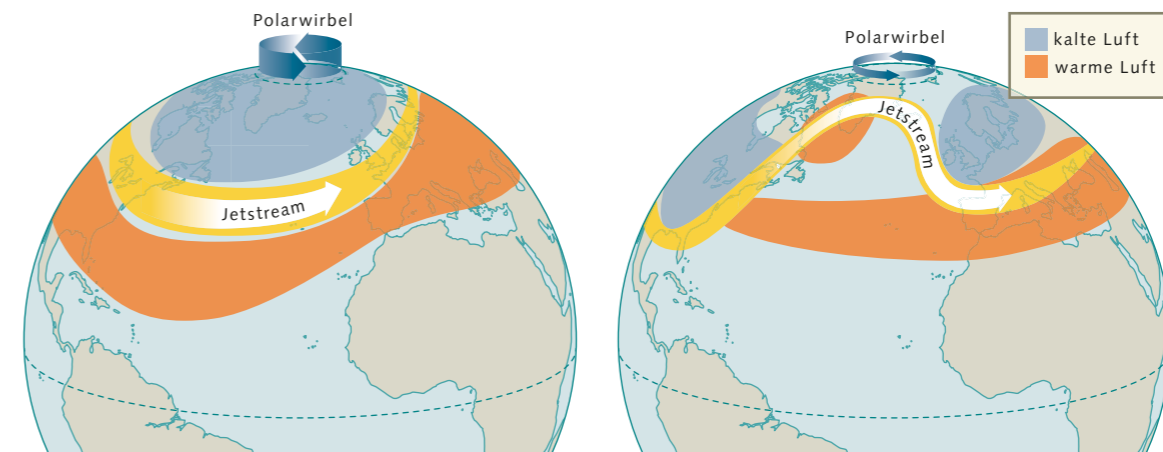
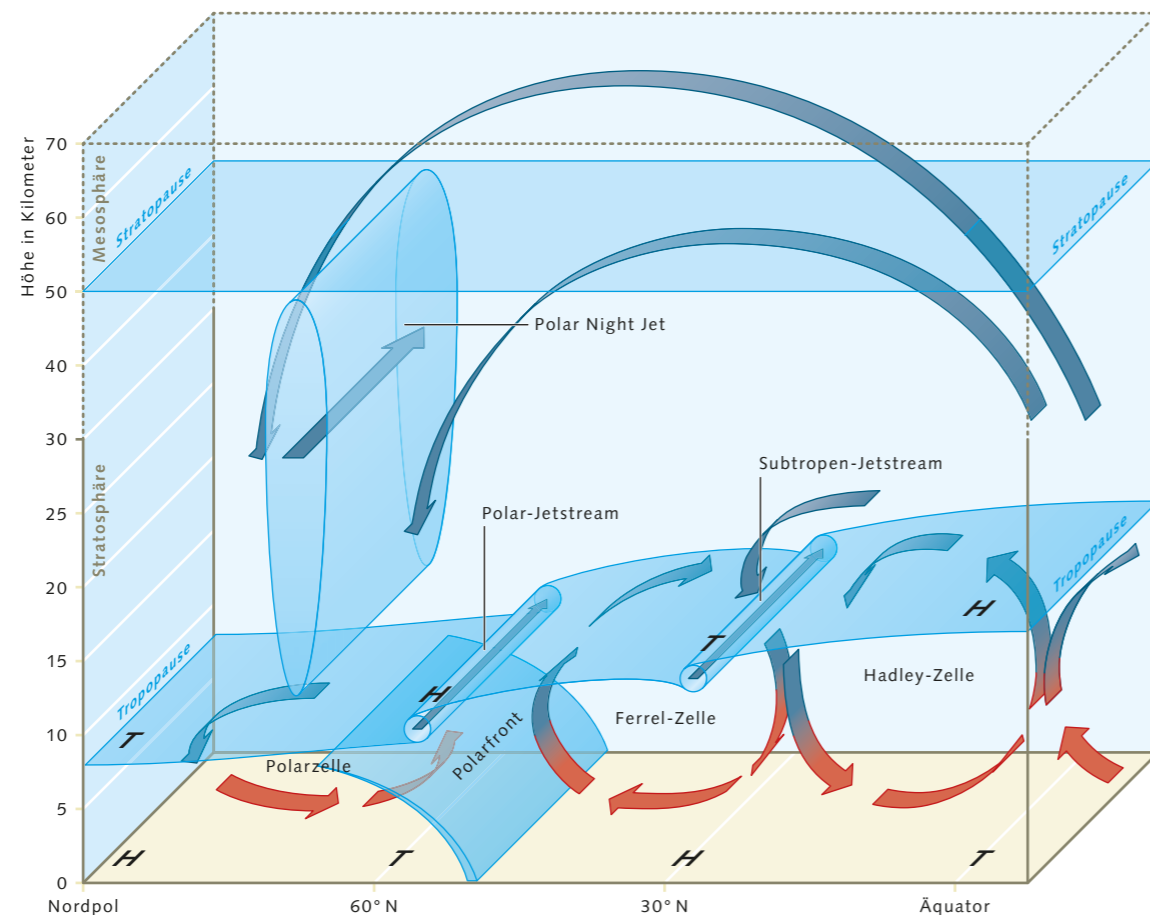
Dass die beiden stratosphärischen Polarwirbel so unterschiedlich in ihren Ausprägungen sind, ist unter anderem auf sogenannte Rossby-Wellen zurückzuführen, die in der Fachliteratur auch als planetare Wellen bezeichnet werden. Gemeint sind große Luftpakete, die in der Troposphäre mit dem Westwind über den Globus wandern. Ein solches Luftpaket trägt aufgrund der Corioliskraft eine bestimmte Wirbelstärke (Vortizität) mit sich, was einer Eigendrehung entspricht. Wie schnell sich das Luftpaket dreht, hängt von der geografischen Breite ab, auf der es wandert, denn die Corioliskraft nimmt mit zunehmender Entfernung vom Äquator zu. Luftpakete, die in höheren Breiten entstanden sind, drehen sich grundsätzlich schneller als jene aus niedrigeren Breiten.

Stößt ein solches sich drehendes Luftpaket im Zuge seiner Wanderung nun auf ein Gebirge oder ein Hoch-

plateau wie zum Beispiel die Rocky Mountains in den USA, den Ural in Russland oder den hohen Eispanzer Grönlands, muss es dem Hindernis nach oben hin ausweichen. Das heißt, das Luftpaket steigt auf und schiebt alle Luftmassen über sich mit in die Höhe. Bei diesem Aufstieg ändert sich die Wirbelstärke des Luftpakets und es wird zum Äquator hin abgelenkt. Hier ist der Abstand zur Erdachse größer als auf der ursprünglichen Wanderoute des Luftpakets. Die Wirbelstärke des Luftpakets passt nicht mehr zur breitenabhängigen Wirbelstärke an diesem Ort. Infolgedessen dreht sich die Bewegungsrichtung des Luftpakets zurück in Richtung Pol. Es überschreitet seine ursprüngliche geografische Breite in umgekehrter Richtung und dreht nun durch die umgekehrten Effekte wiederum zurück – es beginnt zu pendeln.

Ein Luftpaket, welches ursprünglich auf 50 Grad nördlicher Breite unterwegs war, pendelt dann in der

2.8 > Der Polar Night Jet ist ein Windband in der Stratosphäre, welches sich aus Luftmassen speist, die in großer Höhe aus der Äquatorregion in den hohen Norden strömen. Der Polar-Jetstream dagegen mäandriert in der Troposphäre – also ein atmosphärisches Stockwerk tiefer.



2.9 > Die zwei Gesichter des Polar-Jetstreams: Rotiert der Polarwirbel in der Stratosphäre in voller Stärke, weht der Wind in der Troposphäre parallel zum Äquator und versperrt warmen Luftmassen den Weg in die Arktis. Schwächt sich der Polarwirbel dagegen ab, verfolgt der Jetstream einen Schlingenkurs. Infolgedessen dringt über Nordamerika und Sibirien kalte Polarluft nach Süden vor, während über dem Nordatlantik feucht-milde Luft in die Arktis einwandert.

Troposphäre beispielhaft zwischen 40 und 60 Grad Nord hin und her und erscheint in der Draufsicht wie eine Welle, die sich um den gesamten Erdball schlängelt, die Rossby-Welle, benannt nach dem US-amerikanischen Meteorologen Carl-Gustaf Arvid Rossby (1898–1957).

Weil sich die Rossby-Welle auch in die Höhe ausbreitet, kann es nun unter Umständen passieren, dass ihre Wirkung bis in die Stratosphäre hinaufreicht und dort den Polarwirbel so stark stört, dass er geschwächt wird oder gar völlig zusammenbricht. Fällt diese natürliche Barriere nun weg, kann warme Luft aus den mittleren Breiten einströmen, sodass es innerhalb kurzer Zeit zu einer plötzlichen Erwärmung des stratosphärischen Polargebiets kommt. In der Arktis beobachten Wissenschaftler einen solchen Welleneinschlag und den damit verbundenen sprunghaften Temperaturanstieg in der Stratosphäre etwa alle zwei Jahre. Die Gebirge sowie die deutlichen Temperaturunterschiede zwischen den Land- und Meeresflächen auf der Nordhalbkugel lassen starke planetare Wellen entstehen.

Bislang gelingt es den Forschern aber nicht vorherzusagen, welche Wellen dem stratosphärischen Polarwirbel gefährlich werden können und wann mit einem Einschlag zu rechnen ist. In der südlichen Hemisphäre dagegen gibt es bis auf die Anden keine bedeutsamen Hochgebirge. Auch sind Großteile der Südhalbkugel von Meer bedeckt, was die Bildung planetarer Wellen erschwert. Seit Beginn der Beobachtungen wurde erst einmal eine sprunghafte Erwärmung der antarktischen Winter-Stratosphäre beobachtet – das war im September 2002.

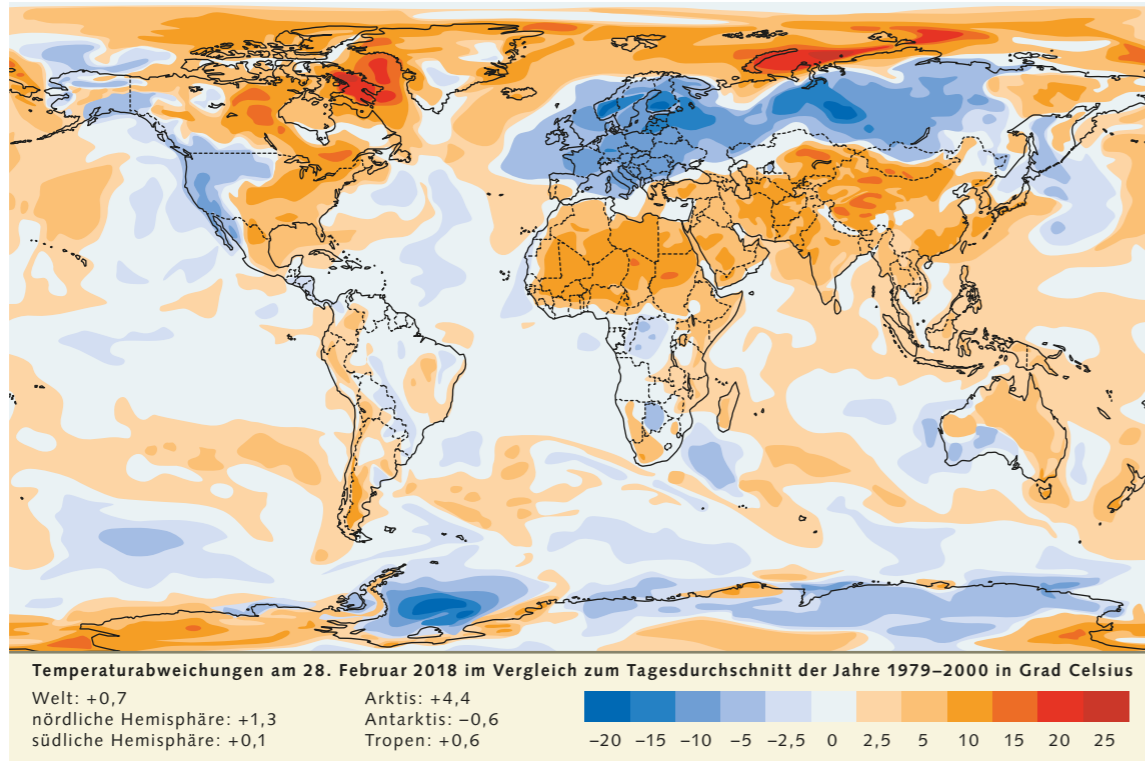
Eine Mauer aus Wind

Neben dem stratosphärischen Polarwirbel und seinem Polar Night Jet besitzen die Polargebiete noch einen zweiten atmosphärischen Schutzschild, den sogenannten troposphärischen Polarwirbel mit dem dazugehörigen Starkwind, welcher auch als Polarfront-Jetstream, Polarjet oder einfach nur als Jetstream bezeichnet wird. Dieses Windband verläuft in etwa acht Kilometer Höhe je nach Wetterlage zwischen dem 40. und 60. Breitengrad, also über der Westwindzone. Der Wind erreicht auf der Nordhalbkugel Geschwindigkeiten von 200 bis 500 Stundenkilometern und weht das ganze Jahr hindurch.

Solange der nördliche Jetstream mit voller Kraft parallel zum Äquator um die Arktis weht, verhindert er auf gleiche Weise wie der Polar Night Jet in der Stratosphäre, dass feucht-warme Luftmassen aus dem Süden in das Nordpolargebiet wandern. Gleichzeitig blockiert er kalte Polarluft den Weg aus der Arktis in die mittleren Breiten. Der Jetstream ist zudem immer den Rossby-Wellen ausgesetzt. Diese tragen letztendlich dazu bei, dass wir wöchentlich wechselnde Witterung haben, da sie mal stärker oder mal schwächer sind oder auch ihre Lage verändern. In den Bergen oder Tälern der Welle bilden sich nämlich Hochdruckgebiete und Tiefdruckgebiete, die unser Wetter an und für sich ausmachen.

Die Kraft und Ausdauer des Jetstreams in der Troposphäre hängen im Winter unter anderem von der Beständigkeit des Polarwirbels in der darüberliegenden Stratosphäre ab. Rossby-Wellen, welche den stratosphärischen

2.10 > Atmosphärische Ausnahmesituation: Ende Februar 2018 kam zu einem ungewöhnlichen Wärmeeinbruch in der Arktis. Der Polarwirbel hatte sich geteilt, weshalb der Jetstream an Kraft verlor und warme Luft weit in die Arktis vordringen konnte. In der Labradorsee und im sibirischen Teil des Arktischen Ozeans stieg die Lufttemperatur bis zu 15 Grad Celsius über normal. Mitteleuropa litt derweil unter extremer Kälte.



Polarwirbel zerstören und zu einer plötzlichen Erwärmung der polaren Stratosphäre führen, verändern somit auch den Jetstream in der Troposphäre. Der Wind in der Troposphäre schwächt sich ab und verfolgt nun einen Schlangenkurs über die Nordhalbkugel. Das heißt, über Nordamerika und Nordeuropa reicht der troposphärische Wirbel dann weiter Richtung Süden, sodass kalte Polarluft weit nach Nordamerika und Mitteleuropa vordringen kann. Über Ostgrönland zieht er sich hoch in den Norden zurück und erlaubt auf diese Weise, dass feucht-warme Luft in die Arktis wandern kann.

Eine solche atmosphärische Ausnahmesituation erlebte die Nordhalbkugel zum Beispiel im Februar 2018. Damals gelang es Rossby-Wellen, den stratosphärischen Polarwirbel zu teilen, weshalb sich die Stratosphäre über der Arktis innerhalb kurzer Zeit um bis zu 50 Grad Celsius erwärmte. Infolgedessen schwächte sich in der darunterliegenden Troposphäre der Polarfront-Jetstream ab – mit weitreichenden Folgen: Während Mitteleuropa im Februar unter großer Kälte litt, selbst in Rom fiel Schnee, herrschten in der Arktis trotz der Polarnacht milde Frühlings-

temperaturen. In Sibirien lag die Temperatur zeitweise sogar bis zu 35 Grad Celsius über dem normalen Mittelwert für den Monat Februar. Die Wetterstation am Kap Morris Jesup, dem nördlichsten Punkt Grönlands, verzeichnete zehn Wintertage in Folge, an denen das Thermometer nicht unter den Gefrierpunkt sank. Und vor der Westküste Alaskas schmolz innerhalb von acht Tagen ein Drittel des Meereises, welches zu dieser Jahreszeit normalerweise vorhanden ist.

Die Heimat der Blizzards

Die Antarktis gilt nicht nur als kältester Kontinent der Welt, sie führt auch die Liste der windigsten Regionen an. An der französischen Forschungsstation Dumont d'Urville beispielsweise dokumentierten Wissenschaftler im Juli 1972 eine Spitzenwindgeschwindigkeit von 327 Kilometern pro Stunde. Das entspricht mehr als der doppelten Orkanstärke. Als Orkan werden Winde bezeichnet, die eine mittlere Windgeschwindigkeit von 120 Kilometern pro Stunde und mehr aufweisen.



2.11 > Die französische Forschungsstation Dumont d'Urville auf der Pétrelinsel im Adélieland gilt als einer der windigsten Orte der Antarktis. Vor allem im Winter rasen hier Luftmassen, die über dem Ostantarktischen Eisschild abgekühlt sind, als Fallwind auf das Meer hinaus.

Dass solche Spitzenwerte ausgerechnet in der Küstenregion der Antarktis verzeichnet werden, ist kein Zufall. Abgesehen von den globalen Windsystemen produziert der vereiste Kontinent genauer gesagt sein eigenes lokales Windsystem, welches Forscher vor allem im Winter in ihren Stationen gefangen hält und das maßgeblich für die Entstehung des Meereises im Südpolarmeer verantwortlich ist.

Normalerweise entstehen Winde, wenn Luftmassen von einem Hochdruckgebiet in ein Tiefdruckgebiet strömen, um einen vorhandenen Druckunterschied auszugleichen. Ein Luftpaket kann allerdings auch aufgrund seines Eigengewichts in Bewegung geraten – zum Beispiel, wenn es kälter und damit schwerer wird als alle umgebenden Luftmassen und aus diesem Grund herabsinkt. Die bodennahe Luftschicht über dem Antarktischen Eisschild ist wegen der Höhe, der geringen Sonneneinstrahlung und der großen Abstrahlung durch das Eis ganz besonders dicht und schwer. Die ausgekühlten Luftmassen liegen wie ein 300 Meter dicker, bleierner Mantel auf dem zentralen Eispanzer. Weil der Eisschild aber keine ebene

Oberfläche besitzt, sondern an seinen Rändern hin abfällt, beginnt diese extrem kalte, schwere Luft aus der zentralen Antarktis irgendwann die Hänge Richtung Küste hinunterzurutschen. Geschwindigkeit erlangt sie dabei nur durch ihr Eigengewicht und den Grad der Hangneigung.

So richtig an Fahrt gewinnt die rutschende Kaltluft allerdings erst, wenn ihr auf dem Weg Richtung Küste Berge den Weg versperren. In diesem Fall muss sich die gesamte Luft durch schmale Täler quetschen, was den Luftstrom enorm beschleunigt. An der Küste angekommen, haben diese sogenannten katabatischen Winde in extremen Fällen dann Sturm- oder Orkanstärke. Der Fachbegriff beinhaltet das griechische Präfix *kata*, das soviel heißt wie „herab“ oder „abwärts“.

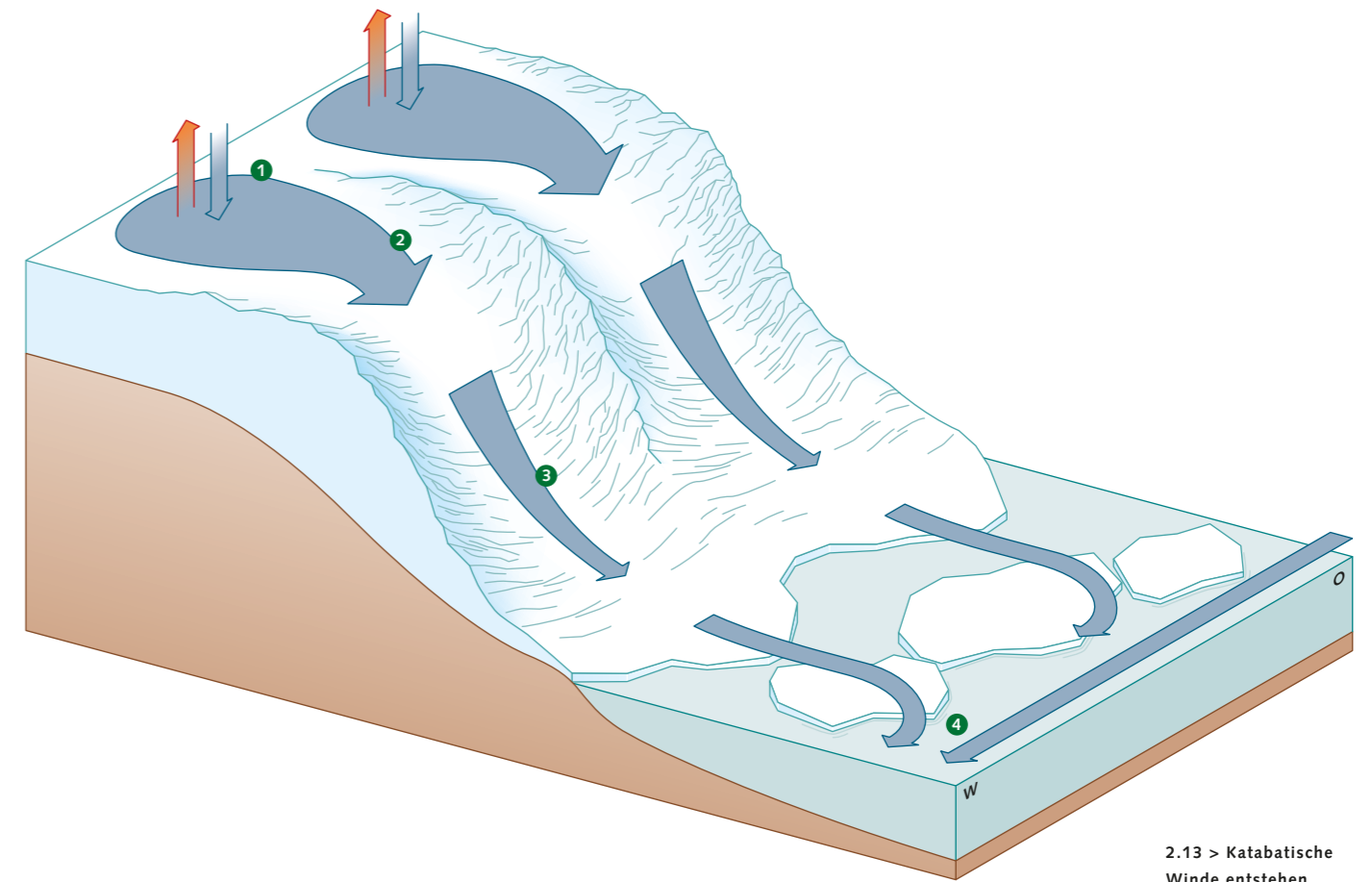
Polarforscher berichten, dass katabatische Winde wie aus dem Nichts auftreten können. Waren die Arbeitsbedingungen auf dem Gletscher oder Schelfeis eben noch windstill, kann fünf Minuten später ohne Vorankündigung ein Orkan über das Eis fegen und zu einem sogenannten Whiteout führen.

Whiteout

Als „Whiteout“ bezeichnen Polarforscher jenen Moment, in dem Nebel, Wolken oder aber ein Schneesturm die Sicht so einschränkt, dass ringsherum weder Konturen noch der Horizont mehr zu erkennen sind.



2.12 > Ein Piteraq weht durch die grönländische Siedlung Tiniteqilaq. Dieser katabatische Wind kann in Sturmböen Geschwindigkeiten von bis zu 300 Stundenkilometern aufweisen.



2.13 > Katabatische Winde entstehen, wenn bodennahe Luft über einem Eisschild auskühlt und dabei dichter und schwerer wird (1). Rutscht das Luftpaket dann aufgrund seines Eigengewichts einen Abhang hinab (2), gewinnt es auf seinem Weg durch schmale Täler an Fahrt (3) und schiebt lose Eisschollen vor der Küste auf das Meer hinaus, bevor es dann durch Küstenwinde abgelenkt und ausgebremst wird (4).

Ebenso schnell aber flaut der Wind dann auch wieder ab – je nachdem, wie groß die Eisfläche war, über der die kalte Luft entstanden ist. In Ausnahmefällen kann ein solcher Wind allerdings auch mehrere Tage lang mit anhaltender Spitzengeschwindigkeit wehen.

Solche außergewöhnlichen Winde treten vor allem in der Küstenregion des Adélielands auf, dem windigsten Gebiet der Antarktis und Standort der französischen Forschungsstation Dumont d'Urville. Verantwortlich dafür ist die Topografie der Region. Hier gleitet die Kaltluft aus einem großen Gebiet der Ostantarktis den Eisschild hinab, was bedeutet, dass vor allem im Winter jederzeit neue Kaltluftmassen nachrutschen. Außerdem lenken Berge die Luftströme durch schmale Täler, wodurch diese jedes Mal an Kraft gewinnen.

Katabatische Winde entstehen übrigens auch in anderen Regionen außerhalb der Antarktis – so zum Beispiel

an den Rändern des riesigen Grönländischen Eisschilds, über dessen hochgelegenen Plateaus die bodennahe Luftschicht im Winter auf eine Temperatur zwischen minus 20 bis minus 40 Grad Celsius abkühlt. Die stärksten katabatischen Winde Grönlands wehen an der Südküste, in der Region rund um die Stadt Tasiilaq. Sie können in Sturmböen eine Geschwindigkeit von bis zu 300 Stundenkilometern erreichen und werden ihrer Gefährlichkeit wegen von den Einheimischen als „Piteraq“ bezeichnet, was im Grönländischen so viel wie „Der, der dich angreift!“ bedeutet.

Am 27. April 2013 wehte ein solcher Wind nicht nur den Schnee großflächig vom Eisschild. Auf seinem Weg durch den 85 Kilometer langen Fjord Sermilik drückte der Piteraq auch alles im Fjord treibende Meer- und Gletschereis hinaus auf das Meer, sodass der Fjord nach dem Sturm quasi eisfrei war.

Eisschollen, Eisschilde und das Meer

> Wasser kommt in großen Teilen der Polarregionen vor allem in seiner gefrorenen Form vor. Es fällt entweder als Schnee und lässt Eisschilde und Gletscher wachsen – oder aber es treibt in Form von Eisschollen über das Meer. In beiden Fällen hängt das Schicksal des polaren Eises maßgeblich vom Ozean und seinen Strömungen ab. Die Wassermassen bieten nämlich Schutz oder führen zur Schmelze – je nachdem, welchen Weg die Wärme nimmt.

In der Kinderstube des Meereises

2.14 > Die Terra Nova Bay im antarktischen Rossmeer weist eine sogenannte Küstenpolynia auf. Dort entsteht Meereis. Die hellen Schlieren verraten, dass der Wind kalt und ablandig vom Rosschelfeis über das Wasser weht und sich an der Oberfläche Eisschlamm bildet. Dieser gefriert anschließend zu Dünneis, welches der Wind auf das Meer hinausdrückt, wo es dann zu Packeis heranwächst.

Wo die starken Winde in der Arktis und Antarktis Eisberge und Meereis von der Küste weg auf das Meer hinauschieben, entstehen freie Wasserflächen, an denen Luft und Wasser unmittelbar miteinander in Kontakt kommen. Diese sogenannten Küstenpolynien sind die Geburtsstätten des Meereises. Wissenschaftler bezeichnen sie auch als Eisfabriken. Denn gerade im Winter, wenn die Lufttemperatur weit im Minusbereich liegt und die ablandigen Winde anhaltend wehen, wird in den Polynien der Arktis und Antarktis Meereis wie am Fließband gebildet.

Die Eisproduktion läuft überall gleich ab: Zunächst kühlen die kalten Winde die offenen Wasserflächen innerhalb kurzer Zeit so weit aus, dass sie an der Oberfläche gefrieren. Weil Meerwasser Salz enthält, liegt sein Gefrierpunkt unterhalb von null Grad Celsius. In der Arktis und Antarktis muss sich das Meerwasser bis auf minus

1,9 Grad Celsius abkühlen, bevor sich die ersten Eiskristalle bilden. Zum Vergleich: In der salzärmeren Ostsee gefriert Meerwasser schon bei einer Wassertemperatur von minus 0,5 Grad Celsius.

Die ersten Meereiskristalle sehen aus wie kleine, filigrane Eisnadeln oder -plättchen. Ihre Zahl steigt, je mehr Wärme dem Wasser entzogen wird. Zwischendurch erinnert das junge Eis an einen Brei aus Nadeln und Plättchen. Aus diesem noch relativ durchsichtigen Eisschlamm gefriert bei ruhigen Windverhältnissen eine geschlossene Dünneisdecke. Wehen dagegen starke Winde, bildet sich im Zuge des Wellenspiels zunächst das typische Pfannkucheneis. Gemeint sind runde, oftmals tellergroße Eisplatten, deren Rand aufgrund des Wellenschlags leicht hochgebogen ist. Das Eis sieht daher tatsächlich aus wie ein frisch gebackener Pfannkuchen, bevor es zu einer Dünneisdecke zusammenfriert.

Dieses junge Meereis weist im Gegensatz zu Eiswürfeln oder überfrorenen Süßwasserseen eine entscheidende Besonderheit auf. Es bildet keinen kompakten Eisblock, sondern wird von kleinen Kanälen und Kammern durchzogen. In diesen sammelt sich das im Meerwasser enthaltene Salz, weil es im Zuge des Gefrierens nicht in das Kristallgitter des Eises eingebaut werden kann. Stattdessen läuft das Salz in einer hochkonzentrierten Lake in die kleinen Hohlräume und sickert später an der Eisunterseite ins Meer.

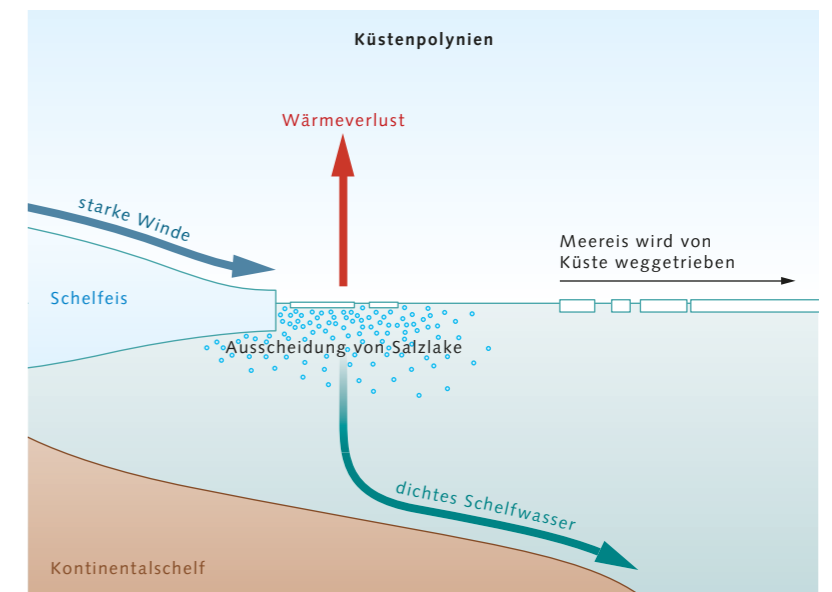
Da die Dichte gefrorenen Wassers niedriger ist als die Dichte flüssigen Wassers, schwimmt Eis immer an der Wasseroberfläche. In den Polynien bietet es somit stets eine gute Angriffsfläche für den Wind. Er drückt das junge, dünne Eis auf das Meer hinaus und presst es gegen das ältere, dickere Packeis, welches bereits vor der Küste treibt. Auf diese Weise verdichtet sich das junge Eis. Es wird dicker, zerbricht unter Umständen in einzelne Schollen und wird vom Wind immer weiter hinausge-

drückt. Im küstennahen Bereich der Polynien beginnt derweil die Eisproduktion wieder von vorn.

Die Küstenpolynien der Antarktis können zehn bis hundert Kilometer breit sein, wobei sich Wissenschaftler nicht ganz einig sind, ob mit der Bezeichnung „Polynia“ nur die eisfreie Wasserfläche gemeint sein soll oder ob auch die Dünneiszone dazugehört. Satellitenmessungen haben ergeben, dass antarktische Polynien im Winter nahezu vollkommen überfroren sind. Die einzige Ausnahme bildet, je nach Lage der Polynia, ein etwa ein Kilometer breiter Wasserstreifen direkt vor der Küste oder Schelfeiskante, den der ablandige Wind eisfrei hält. Ähnliche Beobachtungen gibt es aus der Arktis. Wenn dort im Winter die Lufttemperatur auf bis zu minus 40 Grad Celsius sinkt, frieren die Flachwasserpolynien (Wassertiefe bis 50 Meter) vor der Küste Sibiriens so schnell zu, dass nur ein mehrere Hundert Meter breiter Wasserstreifen eisfrei bleibt, den der Wind immer wieder freischiebt. Je näher allerdings der Frühling rückt, desto wärmer wird die Luft. Das Oberflächenwasser kühlt nun weniger aus und gefriert nun langsamer. Da der Wind das Eis weiterhin auf das Meer hinauschiebt, vergrößert sich die Polynia jetzt wieder auf eine Breite von mehreren Kilometern.

Die produktivsten Meereisfabriken des Südpolarmeers sind die Polynia vor dem Rosschelfeis (253 Kubikkilometer Meereis pro Jahr), die Kap-Darnley-Polynia in der Ostantarktis (127 Kubikkilometer Meereis pro Jahr) sowie die Polynia vor dem Mertzgletscher (125 Kubikkilometer Meereis pro Jahr). Das Meereis des Arktischen Ozeans wird vor allem in Polynien vor der sibirischen Küste gebildet. Als Hauptlieferanten des jungen Eises gelten die russischen Schelfmeere, hier insbesondere die Kara- und die Laptewsee. Ihr Neueis wird vom Wind und der Transpolar drift in Richtung Framstraße transportiert. Aber auch vor den Küsten Grönlands und Nordamerikas entsteht Meereis. Da hier der Wind jedoch an vielen Küstenabschnitten aufländig und nicht ablandig weht, schiebt er das Meereis vor der Küste zusammen, sodass es besonders dick wird.

Meereis wird auch dicker, indem an seiner Unterseite weiterhin Meerwasser gefriert. Das geschieht jedoch nur so lange, wie ausreichend Meereswärme von der Eisunterseite Richtung Atmosphäre abgeführt werden kann. Dieser Prozess wird als thermodynamisches Wachsen

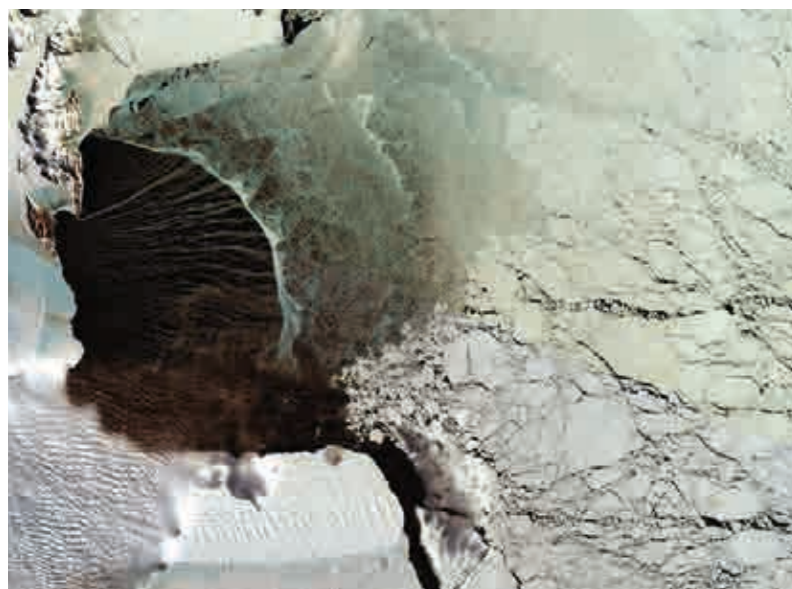


bezeichnet. Die vom Wasser abgegebene Wärme muss also von der Eisunterseite durch das Eis hindurch zur kalten Atmosphäre transportiert werden. Diese Wärmeleitung funktioniert am Anfang sehr gut – wenn das Eis noch dünn ist. Arktisches Meereis beispielsweise kann innerhalb eines Winters auf eine Dicke von ein bis zwei Metern anwachsen. Je dicker das Eis jedoch wird, desto schlechter leitet es die Wärme und desto langsamer wachsen die Eisschollen. Dickes, mehrjähriges Packeis wirkt deshalb auch wie der Deckel auf einem Kochtopf: Es verhindert, dass Wärme aus dem Meer in die Atmosphäre entweicht.

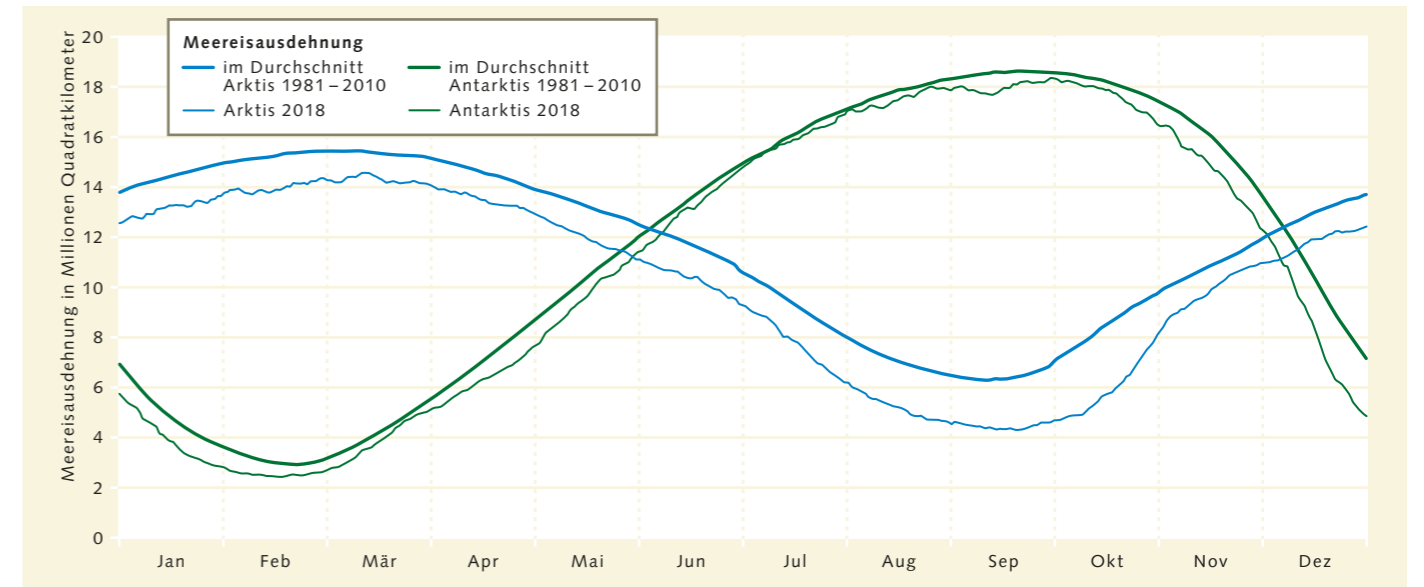
Die Lage macht den Unterschied

Addiert man die Meereisflächen der Welt, kommt man im Jahresdurchschnitt auf eine Fläche von rund 25 Millionen Quadratkilometern – das entspricht in etwa der zweieinhalbfachen Fläche Kanadas. Die Verbreitung des Meereises ist dabei nicht auf die Arktis und Antarktis beschränkt. In kalten Wintern gefriert auch das Meer vor der Küste Chinas, beispielsweise im Golf von Bohai, sodass dünne Eisschollen dann zumindest für eine kurze Zeit bis auf Höhe des 38. Breitengrads auf dem Meer treiben. Für sie ist der Weg zum Äquator kürzer als jener zum Nordpol. Auf der Südhalbkugel gefriert Meerwasser nur in den Regionen südlich des 55. Breitengrads. Auf-

2.15 > Wenn in den Küstenpolynien der Antarktis Meereis entsteht, wird Wärme an die Atmosphäre abgegeben und Salzlake freigesetzt, sodass sich kalte, schwere Wassermassen bilden. Diese sinken in die Tiefe ab und füllen als Antarktisches Bodenwasser oder Zirkumpolares Tiefenwasser das unterste Stockwerk des Weltmeers.



2.16 > Die Kalbungsfront des Lamplughgletschers im US-Bundesstaat Alaska. Wenn tonnenschwere Eismassen abbrechen und ins Meer stürzen, schießen Wasserfontänen empor. Schmelzen die Brocken, vermischt sich das entstehende Schmelzwasser mit dem Oberflächenwasser des Meeres und reduziert dessen Salzgehalt und Dichte.



grund der geografischen Gegebenheiten (ein großes Meer umgibt einen Kontinent) unterscheidet sich antarktisches Meereis deutlich vom Meereis des Arktischen Ozeans (Kontinente umgeben ein kleines Meer). Es verdriftet zum Beispiel schneller, unter anderem weil das weite Südpolarmeer dem Eis einfach mehr Platz bietet und es sich somit freier bewegen kann als das Meereis der Arktis. Aus demselben Grund aber türmt sich das Meereis des Südpolarmees auch seltener zu meterhohen Presseisrücken auf. Diese oft kilometerlangen Wälle aus Eis sind in der Arktis häufig zu finden, weil der Wind die dicht gedrängten Eisschollen übereinanderschiebt und vor allem in Küstennähe bis zu einer Höhe von 25 Metern und mehr stapelt. Diese dicken Barrikaden aus Eis stellen auch für moderne Eisbrecher ein unbezwingbares Hindernis dar.

Die Weite des Südpolarmees führt außerdem dazu, dass die aus nordwestlicher Richtung kommenden Luftmassen auf ihrem Weg in die Antarktis viel Feuchtigkeit aufnehmen. Sie fällt anschließend entlang der Küste des antarktischen Kontinents als Schnee, weshalb das antarktische Meereis oft mit einer dicken Schneedecke bedeckt ist. In der Arktis dagegen müssen die einströmenden Luftmassen zunächst große Landflächen überqueren, bevor sie den Ozean im Zentrum erreichen. Die Luft ist demzufolge relativ trocken; es schneit bis auf wenige Ausnahmen nur selten.

Da im Südpolarmeer die Eisschollen den Platz haben, in Gebiete mit wärmerem Wasser zu treiben, schmilzt im Sommer nahezu das gesamte bewegliche Meereis der Antarktis. Ausgenommen davon sind lediglich jene Meereisflächen, die an der Küstenlinie festgefroren sind oder denen auf Grund gelaufene Eisberge den Weg auf das offene Meer versperren, sodass sie der Wind nicht hinauschieben kann. Dieses feststehende Meereis, welches es in der Arktis und der Antarktis gibt, bezeichnet man auch als Bucht- oder Festeis. Es dient unter anderem Robben und Pinguinen als Rastplatz und Kinderstube.

Die Abwanderung des antarktischen Meereises in nördlichere, wärmere Gefilde hat zur Folge, dass es kaum älter als ein Jahr wird und deshalb im Durchschnitt auch dünner ist als das arktische Meereis. Die Eisdecke des Südpolarmees ist in der Regel ein bis zwei Meter dick. In der Arktis dagegen messen Wissenschaftler vor allem in Regionen mit mehrjährigem Eis eine Dicke von bis zu vier oder fünf Metern.

Neues Meereis entsteht in erster Linie in den Wintermonaten. Die Meereisfläche des Arktischen Ozeans erreicht im März ihre größte Ausdehnung. Sie betrug zum Anfang der Satellitenmessungen im Jahr 1979 etwas mehr als 16 Millionen Quadratkilometer – eine Fläche rund ein- einhalbmal so groß wie die USA. Inzwischen ist dieser Wert auf etwa 14,5 Millionen Quadratkilometer gesun-

2.17 > Die Ausdehnung des Meereises in der Arktis und Antarktis wächst und schrumpft im Rhythmus der Jahreszeiten, wobei die Meereisfläche des Südpolarmees stets zu einem größeren Teil schmilzt als die Eisdecke des Arktischen Ozeans.

2.18 > Polarforscher haben ein Eiscamp auf einer Scholle errichtet und untersuchen sogenannte Schmelzwassertümpel. Diese bilden sich häufig auf Eisschollen in der Arktis, wenn sich dort Schmelzwasser sammelt. Da ihre dunkle Wasseroberfläche mehr Sonnenstrahlung absorbiert als das Meereis drumherum, schmilzt das Eis unter der Schmelzwasseransammlung besonders schnell.



ken. Das antarktische Meereis gefriert von März bis September. Zum Ende des antarktischen Winters bedeckt es dann eine Fläche von durchschnittlich mehr als 18 Millionen Quadratkilometern.

Wenn der Frühling kommt

In beiden Polargebieten setzt jedoch spätestens der Frühlingsanfang dem Wachstum des Meereises ein Ende. Sobald die Lufttemperatur steigt, verlangsamt sich zunächst die Neueisbildung, ab einem gewissen Punkt hört sie ganz auf. Stattdessen beginnt das Meereis nun zu schmelzen. Verantwortlich dafür sind in der Regel mehrere Prozesse. Steigt die Lufttemperatur über den Gefrierpunkt, schmilzt das Meereis zuerst an seiner Oberfläche – es wird also von oben dünner. Deutsche Meereisforscher untersuchten im Sommer 2018 bei einer Schiffsexpedition im zentralen Arktischen Ozean das Ausmaß der dortigen Oberflächenschmelze. Nach wochenlangem Beobachten stand fest: Die ursprünglich zwei Meter dicken Schollen

hatten bis zum Ende des Sommers allein durch Schmelzvorgänge an der Schollenoberfläche bis zu 60 Zentimeter Eisdicke eingebüßt.

Das bei der Oberflächenschmelze entstehende Schmelzwasser sickert entweder durch das poröse Meereis hindurch oder läuft über den Rand der Schollen hinweg ins Meer. In der Arktis sammelt sich das Schmelzwasser häufig auch auf den Eisschollen und bildet sogenannte Schmelzwassertümpel. Da ihre dunklere Wasseroberfläche mehr Sonnenstrahlung absorbiert als das Meereis am Rand des Tümpels, schmilzt das Eis unter der Schmelzwasseransammlung besonders schnell.

In der Antarktis dagegen beobachten Forscher kaum Schmelzwasseransammlungen auf dem Eis. Dafür gibt es zwei Gründe. Zum einen ist die Schneedecke auf dem antarktischen Meereis deutlich dicker als jene auf den arktischen Schollen. Das Schmelzwasser versickert deshalb tiefer im Schnee und gefriert dort häufig wieder zu sogenanntem Aufeis. Zum anderen führen die kalten, ablandigen Winde im Küstenbereich der Antarktis dazu, dass

das Meereis und seine Schneedecke generell deutlich seltener an ihrer Oberfläche schmelzen als die Eisschollen im hohen Norden. Stattdessen verdunstet in der Antarktis eine gewisse Menge Schnee aufgrund der kalten, trockenen Luft, ohne dass sie zuvor geschmolzen ist. Forscher bezeichnen diesen nahtlosen Übergang eines Stoffes vom festen in den gasförmigen Zustand als Sublimation.

Eisschollen schmelzen allerdings nicht nur an ihrer Oberfläche. Die dort absorbierte Sonnenstrahlung wandert auch durch das Eis. Infolgedessen wird es insgesamt wärmer und beginnt im Innern zu schmelzen. Die kleinen Solekanäle werden größer, das Eis poröser und brüchiger. Meereisforscher sprechen deshalb ab einem gewissen Punkt von „rotten ice“ – also von verrottetem Eis, denn eine solche Eisscholle zerfällt oder zerbröckelt genauso schnell wie ein sehr morscher Holzstamm.

Zu guter Letzt kann Meereis auch von unten schmelzen. Verantwortlich dafür sind meist warme Wassermassen, die direkt unter das Eis gelangen. Im Südpolarmeer steigen diese aus der Tiefe auf – oder nordwärts gerichtete Wind- und Meeresströmungen transportieren das bewegliche Packeis in Gebiete mit vergleichsweise warmem Wasser. Im Arktischen Ozean hingegen erwärmt die Sonne das Oberflächenwasser, sodass es seine Wärme an das Eis abgeben und dessen Schmelztod beschleunigen kann.

In der Arktis war in der Vergangenheit vor allem die Oberflächenschmelze für das sommerliche Schrumpfen der Meereisdecke verantwortlich. Seit einigen Jahren nimmt aber der Anteil der Schmelze an der Eisunterseite deutlich zu, weil der Arktische Ozean aufgrund der insgesamt abnehmenden Meereisdecke mehr Sonnenenergie absorbiert und das Oberflächenwasser damit wärmer wird. Die Wärmezufuhr reicht allerdings noch nicht aus, die Meereisdecke des Arktischen Ozeans ganz verschwinden zu lassen. Bislang schmilzt im Sommer aber schon weit mehr als die Hälfte der Wintereisdecke.

Wer im Winter das antarktische Meereis betritt, könnte meinen, auf einer gigantischen weißen Landmasse zu stehen. So weit das Auge reicht, bedeckt Eis das Südpolarmeer. Meist liegt eine Schicht frisch gefallenen Schnees auf dem Eis und erhöht damit die Rückstrahlkraft der weißen Fläche auf bis zu 90 Prozent. Die Reflexion einfallender Sonnenenergie ist jedoch nicht die ein-

zige wichtige Aufgabe des Meereises im Klimasystem der Erde. Es stellt im gewissen Sinn auch einen Antrieb des Förderbands der weltweiten Meeresströmungen dar, denn die Salzlake, welche beim Gefrieren des Eises in den Ozean sickert, trägt zu einer gigantischen Kettenreaktion bei.

Was die Meeresströmungen antreibt

Die Temperaturunterschiede zwischen den Polarregionen und den Tropen befeuern nicht nur die Luftströme in der Atmosphäre, also das weltumspannende Windsystem, sie treiben auch maßgeblich die globalen Meeresströmungen an. Diese wiederum beeinflussen das Wetter und das Klima der Erde auf zweierlei Weise:

- Die ozeanischen Strömungen transportieren gigantische Mengen Wärmeenergie und verteilen diese auf dem Globus.
- Unterschiedlich warme Luft- und Wasserströmungen regulieren den Wasserkreislauf der Erde, indem Meerwasser verdunstet und Wärme an der Meeresoberfläche aufgenommen oder abgegeben wird – je nachdem, ob die Atmosphäre darüber kälter oder wärmer ist als das Wasser.

Vertikale ozeanische Wasserbewegungen sind dafür verantwortlich, dass in sogenannten Auftriebsgebieten Wasser aus der Tiefe an die Oberfläche gelangt, während anderswo im Gegenzug Oberflächenwasser in die Tiefe sinkt. Dabei nimmt es Wärme, Sauerstoff und gelöste Spurengase von der Meeresoberfläche mit in die Tiefe. Die Weltmeere sind auf diese Weise zum wichtigsten Wärmespeicher unseres Planeten geworden. In den zurückliegenden 50 Jahren haben sie 90 Prozent jener Wärme aufgenommen, die aufgrund der steigenden Treibhausgaskonzentration zusätzlich im Erdsystem verblieben ist.

Im rechten Winkel zum Wind

Jeder kennt Meeresströmungen, die im Zusammenhang mit Ebbe und Flut entstehen. Die großen Meeresströmungen auf der Erde aber werden vor allem durch

Dichteunterschiede zwischen den Wassermassen und durch die Kraft des Windes hervorgerufen. Fegt der Wind über die Wasseroberfläche, erzeugt er dort Reibung. Sein Impuls wird auf die oberflächennahen Wasserteilchen übertragen und versetzt diese in Bewegung. Wellen und Turbulenzen werden hervorgerufen. Der Impuls verteilt sich auf die obersten Meter der Wassersäule – und eine windgetriebene Oberflächenströmung entsteht.

Entgegen aller Erwartungen aber fließt diese Strömung nicht geradlinig in die gleiche Richtung wie der Wind. Weil sich die Erde dreht, wirkt auch hier die Corioliskraft und lenkt die Strömung ab. Die gesamte Ablenkung aber beträgt gerade einmal 45 Grad, denn das vom Wind bewegte Oberflächenwasser reibt auf der darunterliegenden trägeren Wasserschicht und zieht diese gewissermaßen mit. Das heißt, auch die tieferen Wassermassen scheren aus und werden ebenfalls abgelenkt. Mit zunehmender Tiefe vergrößert sich deshalb der Winkel der Fließrichtung zur Windrichtung, gleichzeitig nimmt die Strömungsgeschwindigkeit der jeweiligen Wasserschicht ab.

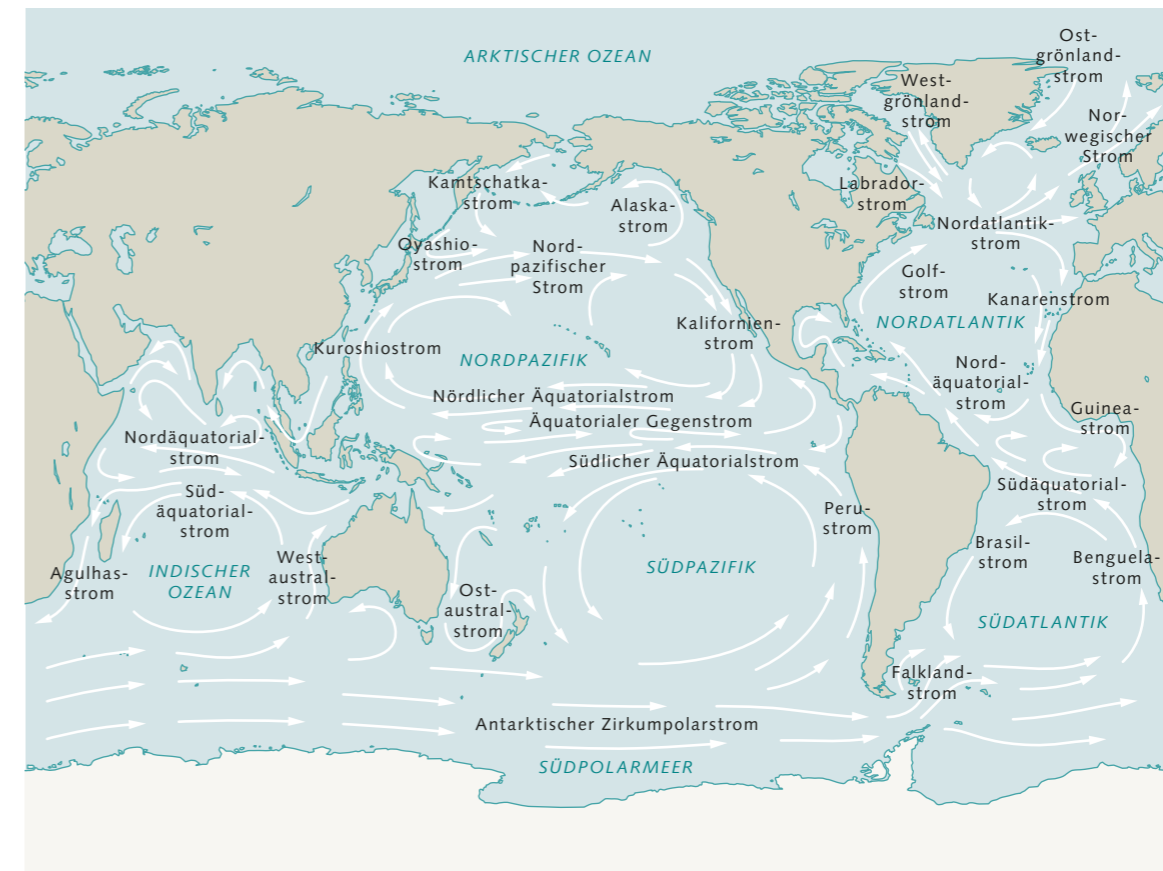
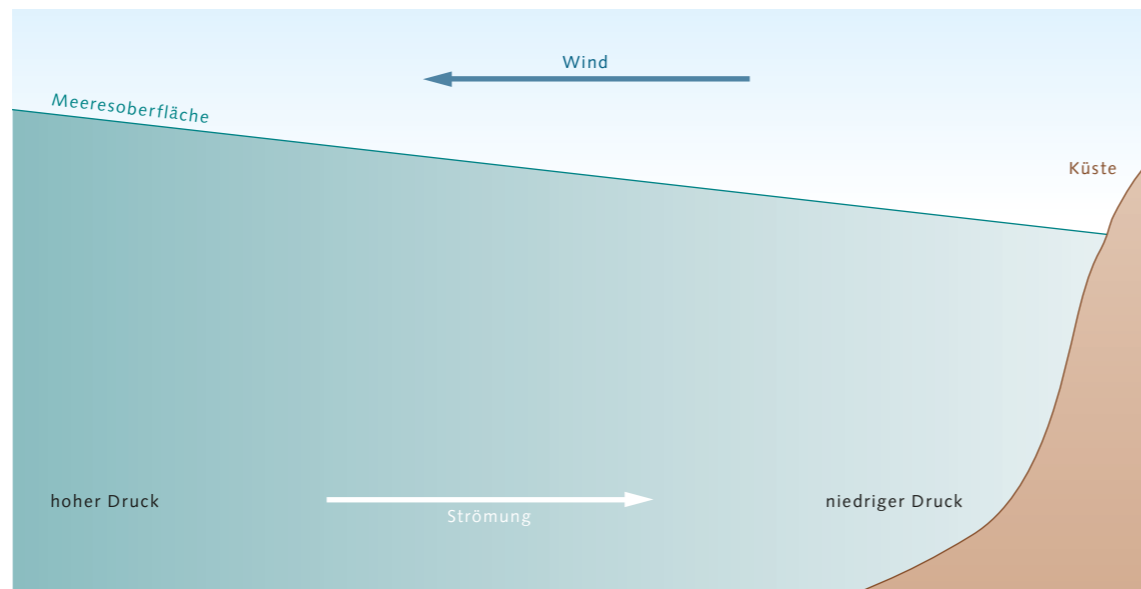
Zeichnet man für jede dieser gedachten Wasserschichten ihre Fließrichtung und die Fließgeschwindigkeit als Pfeil, entsteht ein spiralförmiges, vertikales Geschwindigkeitsprofil, welches als Korkenzieherströmung oder Ekman-Spirale bekannt ist. Sie wurde nach dem schwe-

dischen Ozeanografen Vagn Walfrid Ekman (1874–1954) benannt. Er hatte als Erster erkannt, dass sich windgetriebene oberflächennahe Wasserschichten mit zunehmender Tiefe immer langsamer bewegen und ihre Fließrichtung immer stärker von der Windrichtung abweicht. Fasst man jedoch all diese unterschiedlichen Strömungsrichtungen in der vom Wind bewegten Wassersäule zusammen und berechnet ihren Mittelwert, kommt man zu der Erkenntnis, dass bei windgetriebenen Meeresströmungen der mittlere Wassertransport im rechten Winkel zur Windrichtung erfolgt.

Dieses Phänomen wird als Ekman-Transport bezeichnet und hilft unter anderem zu verstehen, warum in Auftriebsgebieten wie dem Benguelastrom vor der Westküste Südafrikas Wasser aus der Tiefe aufsteigen kann. Zu einem solchen Auftrieb kommt es in Küstengebieten, wo Winde parallel zur Küste wehen und der dadurch generierte Ekman-Transport das Oberflächenwasser im rechten Winkel auf das offene Meer hinaus trägt. Aus der Tiefe strömt dann Wasser nach, um die entstandene Lücke an der Meeresoberfläche wieder aufzufüllen.

Solche Auftriebsströmungen sind von unschätzbare Bedeutung für das Leben im Meer und das Klima in den jeweiligen Küstenregionen. Zum einen lassen die im Tiefenwasser enthaltenen Nährstoffe Algen und Kleinstlebewesen wachsen, von denen sich dann wiederum

2.19 > Wenn der Wind an der Meeresoberfläche Wassermassen in eine Richtung schiebt und auftümt, entsteht in der Tiefe aufgrund sich ändernder Druckverhältnisse eine Gegenströmung.



2.20 > Alle hier eingezeichneten Meeresströmungen und -wirbel gehören zur Oberflächenzirkulation des Weltozeans und werden von Winden angetrieben.

eine Vielzahl größerer Meeresbewohner ernährt; daher liegen die weltweit wichtigsten Fischereigründe stets in Auftriebsgebieten. Zum anderen fließen die kalten Wassermassen an der Oberfläche als östliche Randströme der subtropischen Ozeanwirbel in Richtung des Äquators und beeinflussen die Lufttemperatur und die Niederschlagsmenge in den Küstengebieten. Weltweit gibt es fünf dieser Ströme. Es sind der Kalifornienstrom, der Perustrom, der Kanarenstrom, der Benguelastrom und der Westaustralstrom.

Die fünf subtropischen Ozeanwirbel zählen zu den prominentesten Oberflächenströmungen des Weltozeans. Sie werden jeweils von den Passatwinden und den Westwinden angetrieben und unterscheiden sich im Grunde nur darin, dass die Wassermassen in den Wirbeln der Nordhalbkugel aufgrund der Corioliskraft im Uhrzeigersinn rotieren, während sie südlich des Äquators in die entgegengesetzte Richtung strömen. Aufgestaute Wasser-

massen in der westlichen Hälfte der Ozeanwirbel lassen die sogenannten westlichen Randströme entstehen. Zu ihnen zählen unter anderem der Golfstrom vor der Ostküste der USA sowie der Agulhasstrom im Südindischen Ozean. Die westlichen Randströme sind in der Regel deutlich schmaler als die Randströme im Osten der großen Wirbel, und sie fließen auch schneller.

Dichteänderung – nach oben oder unten?

Neben dem Antrieb durch den Wind gibt es aber noch einen weiteren Mechanismus, der gewaltige Meeresströmungen in Gang setzt: eine weltumspannende Umwälzbewegung, welche die Wassermassen auf einer Art Förderband durch alle Weltmeere transportiert. Dieses Förderband bewegt sich aufgrund von Unterschieden in der Temperatur und im Salzgehalt der Wassermassen, weshalb Fachleute auch von einer thermohalinen Zirkula-

tion sprechen (*thermo* – angetrieben durch Temperaturunterschiede; *halin* – angetrieben durch Salzgehaltsunterschiede). Um das Funktionsgeheimnis zu verstehen, muss man zwei Dinge über die Weltmeere im Allgemeinen und Wasser im Speziellen wissen: Wasser verhält sich anders als die meisten anderen chemischen Stoffe. In fast allen Substanzen rücken Atome und Moleküle dichter zusammen, je kälter es wird – nicht so beim Wasser. Normales Süßwasser besitzt seine höchste Dichte bei einer Temperatur von vier Grad Celsius, weil sich die Wassermoleküle dann am dichtesten zusammenlagern.

Die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Wassers ändern sich jedoch, wenn Salz darin gelöst ist. Die Dichte von Salzwasser steigt Schritt für Schritt mit sinkender Temperatur und erreicht ihr Maximum erst am Gefrierpunkt. Zwei Grad kaltes Salzwasser ist aus diesem Grund ein gutes Stück dichter und schwerer als zwei Grad kaltes Süßwasser.

Es gilt allerdings noch ein weiterer Merksatz: Wasser ist umso schwerer, je salziger es ist. Das heißt, die tatsächliche Dichte von Meerwasser wird durch ein sehr komplexes Zusammenspiel von Temperatur und Salzgehalt bestimmt. Ganz grundsätzlich gilt: Die Wassermassen des Ozeans schichten sich ihrer Dichte gemäß übereinander – das schwerste und oft auch kälteste Wasser ist in der Tiefsee zu finden, das leichteste Wasser hingegen an der Oberfläche.

Wind und Wellen gelingt es in der Regel nur, die oberen 200 Meter der Wassersäule zu durchmischen. Die Wassermassen in größerer Tiefe dagegen vermischen sich so gut wie nicht. Fachleute sprechen deshalb von einer stabilen Schichtung der Weltmeere. Wie in der Atmosphäre die horizontalen Dichteunterschiede zwischen Hoch- und Tiefdruckgebieten die Winde verursachen, so führen die horizontalen Druckunterschiede im Ozean, über einen kleinen Zwischenschritt, zu Strömungen.

Eine Frage des Salzgehalts

Die Temperatur und der Salzgehalt des Wassers – und damit seine Dichte – werden durch Prozesse an der Meeresoberfläche bestimmt. Kühlt Wasser ab, nimmt seine Dichte zu. Es wird schwerer und kann in die Tiefe sinken. Dieser Vorgang wird als thermische Konvektion bezeichnet.

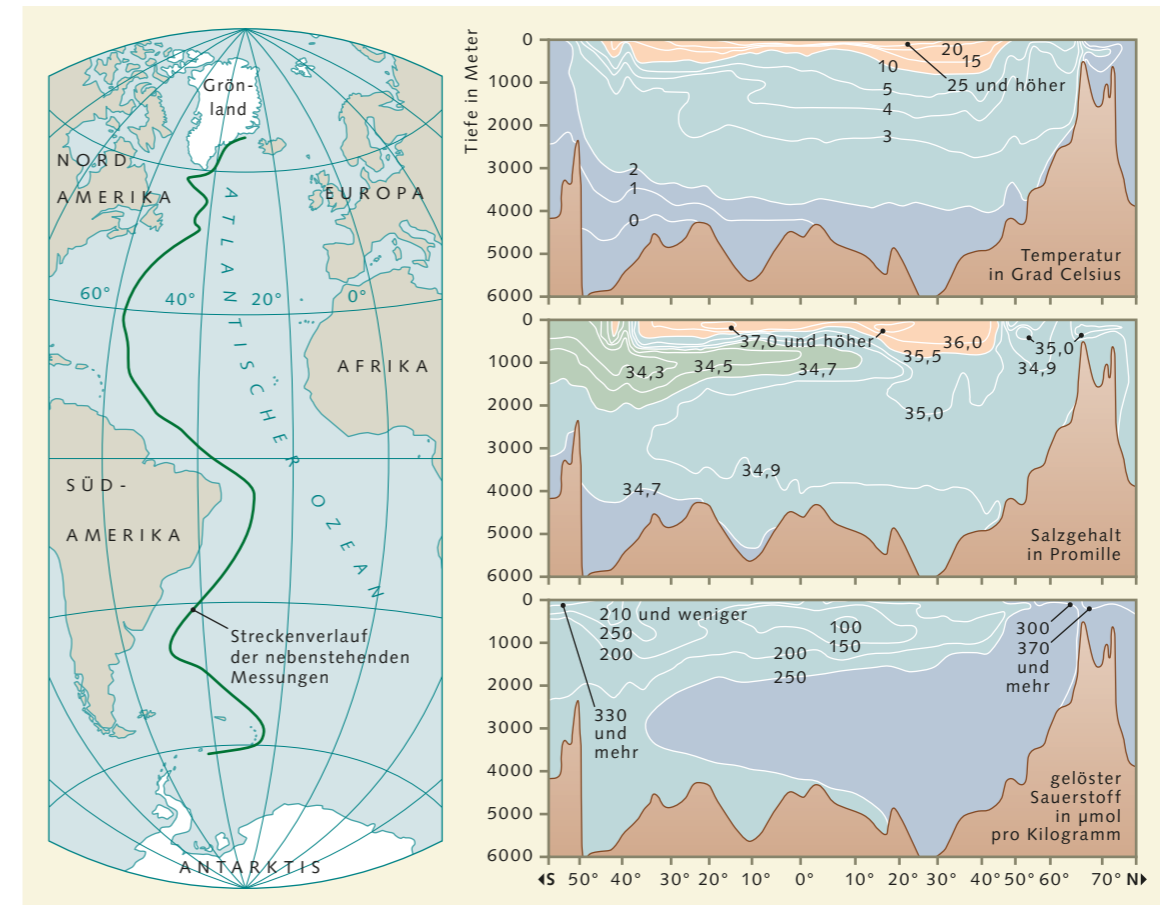
Erwärmt sich dagegen das Oberflächenwasser, nimmt seine Dichte ab. Es wird leichter und der Dichteunterschied zum darunterliegenden Wasser größer. Infolgedessen bleibt das warme, leichte Wasser an der Meeresoberfläche, es sei denn, der Wind regt eine Durchmischung beider Wasserschichten an.

Ähnliches gilt auch für den Salzgehalt. Dieser steigt nämlich, wenn an der Meeresoberfläche Wasser verdunstet. Regnet es dagegen oder tragen Flüsse oder Gletscher Süßwasser in das Meer ein, sinkt der Salzgehalt des Oberflächenwassers und seine Dichte nimmt ab. In diesem Fall gilt erneut: Das leichte Wasser verbleibt an der Meeresoberfläche. Wird eine Wassermasse jedoch salziger und damit schwerer, setzt die sogenannte haline Konvektion ein. Das heißt, schweres Wasser sinkt ab. Auf diese Weise werden riesige Mengen an Wasser bis in mehrere Kilometer Tiefe umgewälzt.

Der Salzgehalt des Oberflächenwassers ändert sich allerdings auch bei der Entstehung von Meereis. Wenn beispielsweise am Anfang des Winters die küstennahen Regionen des Südpolarmeers zufrieren, hat dieser Vorgang in etwa denselben Effekt, als würde jemand großflächig Salz ins Meer streuen. Aus dem porösen Meereis sickert nämlich nach und nach die Salzlake, welche sich in den kleinen Kanälen und Kammern im Eis angesammelt hat.

Wissenschaftler haben herausgefunden, dass 70 bis 90 Prozent des im Oberflächenwasser enthaltenen Salzes im Zuge des Gefrierens in die darunterliegende Wasserschicht entweichen. Je kälter diese Wasserschicht wird oder je weiter ihr Salzgehalt steigt, desto schwerer wird das Wasser unter dem Meereis. Es sinkt zum Meeresboden, sammelt sich dort als dichtes Schelfwasser an, breitet sich aus und fließt ab einem gewissen Punkt den antarktischen Kontinentalschelfhang hinab in die Tiefsee. Dort, in mehreren Kilometer Tiefe, füllt es als Antarktisches Bodenwasser das unterste Stockwerk des Weltmeers. Darüber schiebt sich aus dem Norden kommend das etwas wärmere und daher nicht ganz so schwere Nordatlantische Tiefenwasser.

Bislang kennt man vier Regionen, in denen Antarktisches Bodenwasser entsteht: im Weddellmeer, im Rossmeer, an der Küste des Adélielands sowie in der Kap-Darnley-Polynia, westlich des Ameryschelfeises. Das schwere,



2.21 > Die Wassermassen des Atlantischen Ozeans lassen sich sowohl anhand ihrer Temperatur als auch mithilfe ihres Salz- und Sauerstoffgehalts unterscheiden. Diese Vertikalschnitte zeigen, wie sich die Wassermassen übereinanderschichten, wenn man auf dem links eingezeichneten Kurs aus der Antarktis bis nach Ostgrönland fahren würde.

kalte Wasser ist ein wichtiges Kettenglied im weltumspannenden Förderband der Meeresströmungen. Der Kreislauf funktioniert in einfachen Worten ausgedrückt in etwa so: Warmes Wasser aus den Tropen strömt in die Polargebiete. Dort gibt es seine Wärme an die kalte, polare Atmosphäre ab. Es kühlt sich infolgedessen ab, wird schwerer und sinkt in große Tiefen, wo es dann Richtung Äquator zurückfließt. An der Meeresoberfläche strömt derweil neues, warmes Wasser nach und beginnt sich ebenfalls abzukühlen, sodass die Umwälzbewegung niemals unterbrochen wird.

Schon in dieser Überblicksbeschreibung wird deutlich, dass die Polarmeere eine Schlüsselrolle in der globalen Zirkulation der Wassermassen einnehmen. Sie stellen einen Motor des weltumspannenden Förderbands dar, wobei sich die Umwälzung der Wassermassen in der Arktis und Antarktis durchaus voneinander unterscheidet.

Die Umwälzung im wilden Südpolarmeer

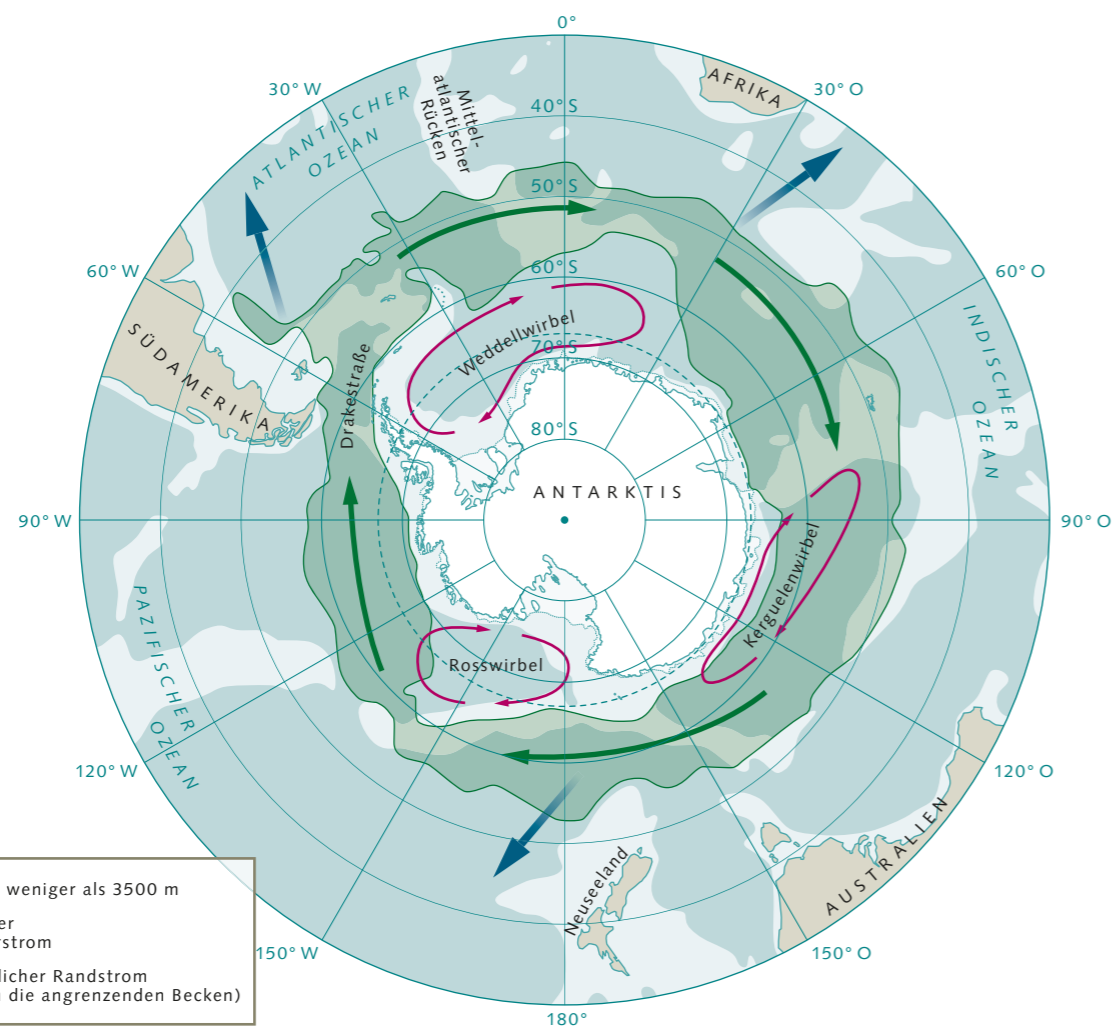
Das Südpolarmeer verbindet als Ringozean die drei großen Ozeanbecken und ermöglicht auf diese Weise überhaupt erst eine weltumspannende Zirkulation der Wassermassen. Hydrografisch betrachtet, gliedert es sich in den Antarktischen Zirkumpolarstrom im Norden, den Küstenstrom am Kontinentalrand im Süden und den drei dazwischen eingebetteten großen subpolaren Wirbeln. Als solche werden im Uhrzeigersinn strömende Wassermassen im Weddellmeer (Weddellwirbel), im Rossmeer (Rosswirbel) und im Australisch-Antarktischen Becken (Kerguelenwirbel) bezeichnet.

Die Eigenschaften der jeweiligen Wassermassen werden an der Meeresoberfläche in erster Linie durch die atmosphärischen Bedingungen bestimmt. Die Lufttemperatur über den Ozeanen auf der südlichen Halbkugel

nimmt von Norden nach Süden stark ab, was sich wiederum auf den Luftdruck auswirkt und somit auf die Windverhältnisse. Über dem küstennahen Teil des Südpolarmeers wehen Ostwinde sowie gebietsweise ablandige Fallwinde, die katabatischen Winde. Weiter nördlich beginnt die Zone der zirkumpolaren Westwinde. Sie sind bekannt als die Brüllenden Vierziger, Wilden Fünfziger und Heulenden Sechziger und stellen den Hauptantrieb der Meeresströmungen im Südpolarmeer dar. Parallel zur Lufttemperatur sinkt auch die Wassertemperatur. In den Subtropen ist das Oberflächenwasser noch 25 Grad Celsius warm. In den antarktischen Küstengewässern dagegen liegt seine Temperatur in der Nähe des Gefrierpunkts von salzigem Meerwasser – also bei minus 1,9 Grad Celsius.

Der Antarktische Zirkumpolarstrom wird durch das großräumige Band der Westwinde angetrieben. Er bewegt Wassermassen, die in ihrer Summe mehr als hundertmal so groß sind wie die Wassermenge aller Flüsse zusammengenommen, und ist das mächtigste Strömungssystem der Erde. Diese riesige Wassermenge kommt zustande, weil der Zirkumpolarstrom bis zu 2000 Kilometer breit ist und weit in die Tiefe reicht. Während andere windgetriebene Strömungen das Wasser nur bis in Tiefen von maximal 1000 Metern in Bewegung versetzen, kann der Zirkumpolarstrom bis in Tiefen von 2000 oder gar 4000 Metern hinabreichen. Dafür beträgt seine Strömungsgeschwindigkeit vielerorts nur 20 Zentimeter pro Sekunde oder weniger. Er ist damit ein vergleichsweise langsamer Meeresstrom.

2.22 > Die Wassermassen in den drei subpolaren Wirbeln des Südpolarmeers zirkulieren im Uhrzeigersinn. Das heißt, im Osten wird jeweils Wasser aus dem Gebiet des Antarktischen Zirkumpolarstroms zur Küste im Süden transportiert, wo es größtenteils abkühlt und absinkt. Anschließend geht es im Tiefen Westlichen Randstrom zurück nach Norden, wo das kalte Wasser dann in die angrenzenden Ozeanbecken fließt.

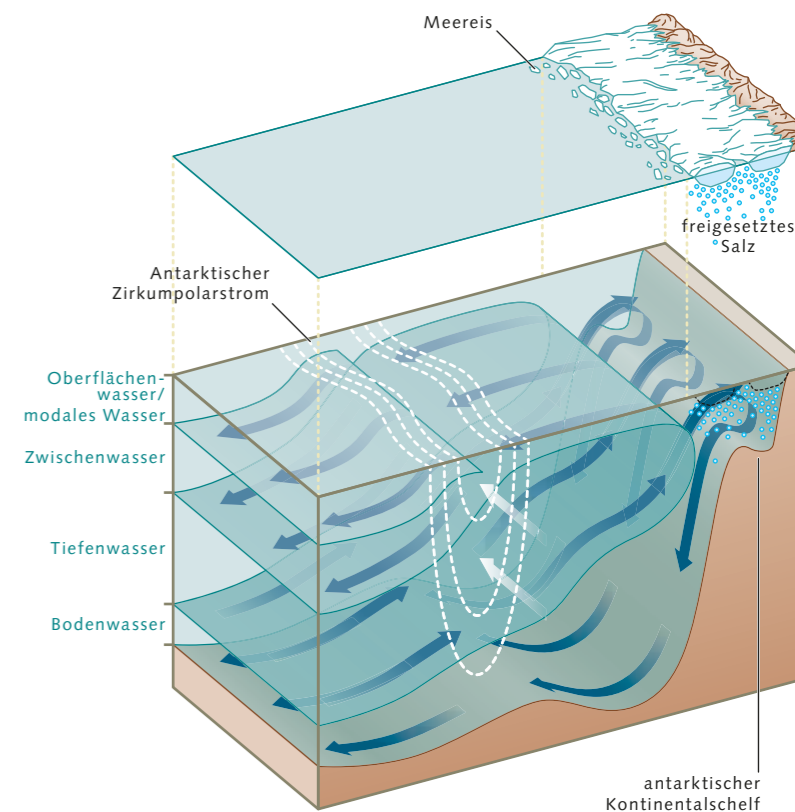


Der Zirkumpolarstrom ist kein in sich geschlossenes Band, sondern in mehrere, durch sogenannte Fronten verbundene Strombänder unterteilt. Er verhindert weitgehend, dass warmes Oberflächenwasser aus den Tropen auf direktem Weg in die Antarktis gelangen kann. Ganz undurchlässig ist diese Barriere jedoch nicht. Aus den Fronten lösen sich immer wieder Wasserwirbel mit Durchmessern von typischerweise 100 Kilometern ab, wandern je nach Drehrichtung ein Stück nach Norden oder Süden, um sich dann nach einigen Wochen wieder aufzulösen. Die Wirbel sorgen somit für eine gewisse horizontale Vermischung von Wassereigenschaften und erlauben, dass aus dem Norden kommendes Tiefenwasser in einer Tiefe von 2000 bis 3000 Metern über den Zirkumpolarstrom hinaus polwärts vordringen kann.

Fachleute unterscheiden hier zwischen dem oberen Zirkumpolaren Tiefenwasser, welches mittlere Werte für Temperatur und Salzgehalt aufweist und wenig Sauerstoff enthält, weil es bereits Jahrhunderte ohne Oberflächenkontakt durch den tiefen Pazifischen Ozean zirkuliert ist. Das salzigere untere Zirkumpolare Tiefenwasser hingegen stammt vom Nordatlantischen Tiefenwasser ab und ist weniger alt.

Beide Tiefenwasser werden zunächst vom Zirkumpolarstrom mitgerissen. Sie drehen ein paar Runden um den antarktischen Kontinent, steigen dabei langsam auf und schaffen es dann, mithilfe der subpolaren Wirbel Richtung Süden auszubrechen. An der Meeresoberfläche geben die Wassermassen ihre Wärme an die Atmosphäre ab. Gleichzeitig reduzieren Schnee, Regen und schmelzende Eisberge ihren Salzgehalt. Ein Teil dieses aufgestiegenen Wassers wandert anschließend Richtung Norden und sinkt als Antarktisches Zwischenwasser an der Nordflanke des Zirkumpolarstroms in mittlere Tiefen ab. Der verbleibende Rest wird von den subpolaren Wirbeln südwärts bis zur Küste transportiert. Dort gefriert das Oberflächenwasser und wird im Zuge der Meereisbildung wieder mit Salz angereichert.

Sein weiterer Weg zurück in die Tiefe ist dann vorprogrammiert. Das kalte, schwere Wasser sinkt ab und löst damit eine konvektive Vermischung aus. Je intensiver die Abkühlung und die Salzanreicherung an der Meeresoberfläche ablaufen, desto tiefer sinkt das schwere Wasser –



unter Umständen sogar bis unter das relativ warme Zirkumpolare Tiefenwasser, welches am Kontinentalhang anliegt.

Während die Westwinde im Norden des Südpolarmeers den Zirkumpolarstrom antreiben, setzen die küstennahen Ostwinde im Süden eine gegenläufige Strömung in Gang, den sogenannten Antarktischen Küstenstrom. Er fließt als Randstrom den antarktischen Kontinentalhang entlang Richtung Westen und schließt den südlichen Teil der subpolaren Wirbel mit ein. Im Küstenstrom treiben die Eisberge der Antarktis. Forscher interessieren sich auch deshalb für ihn, weil an seiner Unterseite warmes, relativ salzreiches Zirkumpolares Tiefenwasser lauert, welches im Zuge des Klimawandels den Eismassen der Antarktis zunehmend gefährlich wird.

Die Umwälzung im Nordpolarmeer

Die Bildung des Tiefenwassers in der Antarktis ist nicht der einzige Motor, der das globale Förderband der Meeres-

2.23 > Bei der Umwälzung im Südpolarmeer steigt aus dem Norden kommendes Tiefenwasser kurz vor der Küste auf, kühlt an der Oberfläche fast bis zum Gefrierpunkt ab und sinkt anschließend mit Salzlake gesättigt als schweres Bodenwasser in das unterste Stockwerk des Ozeans. Weiter nördlich aufsteigendes Wasser dagegen fließt zurück Richtung Äquator, wandelt sich dabei zu leichterem modalem Wasser oder zu Zwischenwasser und schiebt sich unter das Oberflächenwasser.

2.24 > Das Strömungssystem des Arktischen Ozeans wird zum einen durch den Einstrom von warmem, salzreichem Wasser aus dem Nordatlantikstrom bestimmt. Zum anderen bilden sich vor allem im Winter in den sibirischen Randmeeren und im Europäischen Nordmeer verschiedene kalte Wassermassen, die anschließend die Arktis Richtung Atlantik verlassen.



strömungen aufrechterhält. Ein zweiter Antrieb befindet sich im Norden des Atlantischen Ozeans und wird in der Fachliteratur als Atlantische Meridionale Umwälzbewegung (Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC) bezeichnet. Sie sorgt vereinfacht gesagt dafür, dass warmes Oberflächenwasser aus den Tropen in den Nordatlantik gelangt, dort abkühlt, absinkt und im Anschluss in zwei bis drei Kilometern Tiefe als kaltes Nordatlantisches Tiefenwasser wieder Richtung Süden fließt. An der Meeresoberfläche strömt neues Oberflächenwasser kontinuierlich aus den Subtropen nach.

Um zu verstehen, welche entscheidende Rolle die Arktis bei dieser Umwälzung spielt, lohnt es sich, die einzelnen Schritte einmal im Detail zu betrachten. Das warme Oberflächenwasser wird vom nördlichen Zweig des Golfstroms, von Forschern Nordatlantikstrom genannt, bis vor die Westküste Irlands transportiert. Dort

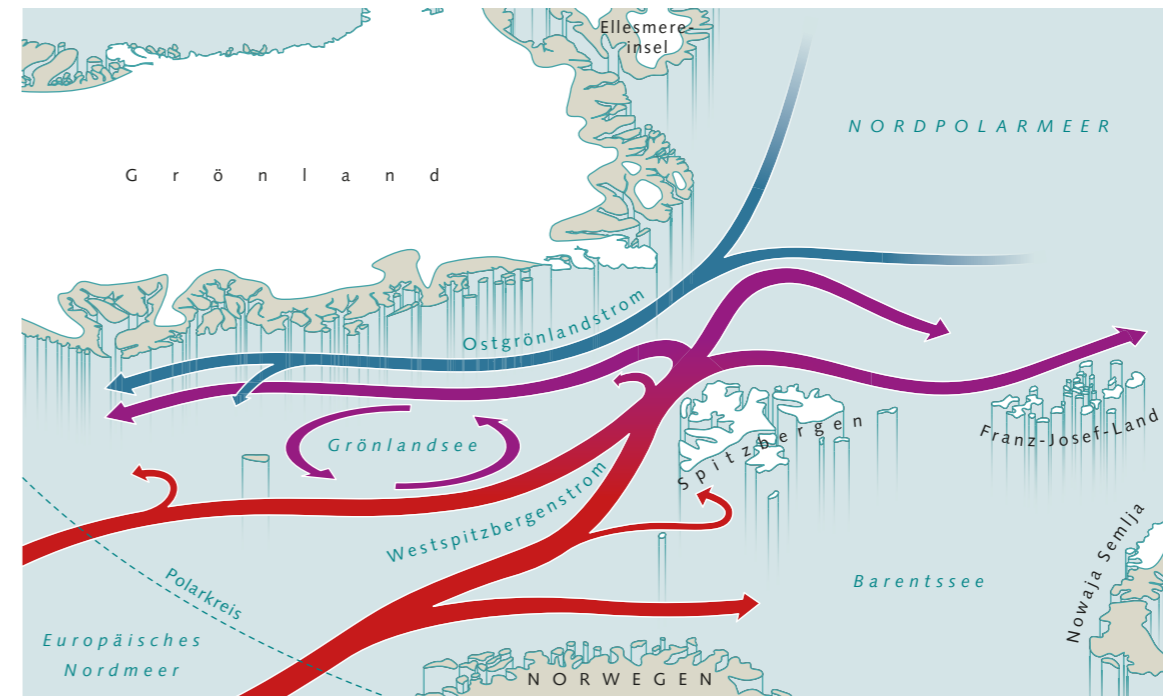
verzweigt sich der Strom. Etwa ein Drittel des Wassers wird vom subpolaren Wirbel mitgerissen. Es fließt als Norwegischer Strom die Westküste Skandinaviens entlang und ergießt sich aus dem Europäischen Nordmeer in die Barentssee, einem Randmeer des Arktischen Ozeans. Das restliche Wasser zweigt Richtung Grönland ab und teilt sich dann nochmals in den Westspitzbergenstrom, der in die Framstraße fließt, sowie in einen Ausläufer, welcher das warme Wasser in die Labradorsee zwischen Grönland und Kanada transportiert.

Alle diese Strömungen kühlen auf ihrem Weg in den Norden ab und werden durch Niederschlag verdünnt. Das heißt, sie geben ihre Wärmeenergie an die Atmosphäre ab und beeinflussen damit maßgeblich das Klima in Nordeuropa. Ohne den Wärmetransport des Golfstroms und seiner Ausläufer wären in Nordeuropa vor allem die Winter deutlich kälter.

Besonders viel Wärme verliert das Wasser in der Barentssee. Sie ist als arktisches Rand- oder Schelfmeer nur 50 bis 400 Meter tief und kühlt daher relativ schnell aus. Gleichzeitig werden die einströmenden Wassermassen hier stark durchmischt. Flüsse wie der russische Kola tragen große Mengen Süßwasser in die Barentssee ein. Ebbe und Flut wälzen die Wassermassen hin und her, sodass vor allem im Winter die gesamte Wassersäule viel Wärmeenergie verliert. Wenn dann auch noch Meereis gefriert und die dabei freigesetzte Salzlake die Dichte des Schelfwassers erhöht, entstehen drei verschiedene Arten von Wasser:

- kaltes, salzarmes Oberflächenwasser, welches sich vom Wind geschoben in die zentrale Arktis ausbreitet;
- kaltes, salzreicheres Wasser, das in mittlere Tiefen absinkt und sich von dort ausbreitet, sowie
- sehr salzige, schwere Wassermassen, die entweder direkt über das Europäische Nordmeer zurück in den Atlantik fließen oder aber als Arktisches Bodenwasser den Umweg über das Arktische Becken und die Framstraße nehmen.

In der Framstraße spielen die Gezeiten zwar eine untergeordnete Rolle, doch auch hier kühlt das drei bis sechs Grad Celsius warme Atlantikwasser in großen Schritten



2.25 > Die Framstraße ist eines von drei Meeresgebieten in der Arktis, in der Wasser umgewälzt wird. Hier transportiert der Westspitzbergenstrom warmes, salzreiches Wasser nordwärts, welches sich zunächst abkühlt und im Anschluss auf eine Tiefe von 200 bis 800 Metern sinkt. Ein Teil des Stroms ergießt sich dann in den Arktischen Ozean. Der andere Teil kehrt um und fließt als Nordatlantisches Tiefenwasser unter dem kalten Ostgrönlandstrom Richtung Süden.

ab. Das Strömungssystem der Framstraße kann man sich wie eine Hauptstraße mit Abbiegespur vorstellen. Auf der rechten, östlichen Spur fließt das warme, salzige Atlantische Wasser zunächst im Westspitzbergenstrom an der Oberfläche Richtung Norden. Je kälter es dabei wird, desto schwerer wird es. Ab einem gewissen Punkt sinkt der Strom auf eine Tiefe von 200 bis 800 Metern ab und gabelt sich. Ein Teilstrom setzt seinen Weg in den Arktischen Ozean fort. Die restlichen Wassermassen drehen nach Westen ab, vollziehen eine 180-Grad-Wende und biegen dabei auf die Gegenseite ein, wo sie als Nordatlantisches Tiefenwasser an der östlichen Schelfkante Grönlands zurück in den Süden strömen. Auf dieser Gegenseite, dem sogenannten Ostgrönlandstrom, fließt eine Etage höher an der Meeresoberfläche allerdings noch ein zweiter Strom. Er kommt aus der Arktis und transportiert minus 1,8 Grad Celsius kaltes und dabei relativ salzarmes Wasser und viele Eisschollen in den Nordatlantik.

Gemeinsam überqueren diese Wassermassen die nur 800 Meter tiefen untermeerischen Schwellen zwischen Grönland, Island und Schottland und strömen dann gigantischen Wasserfällen gleich in die Tiefseebecken des Nordatlantiks hinab. Über sie schiebt sich nun noch ein

dritter Strom – das Tiefenwasser aus der Labradorsee. Es ist im Zuge seiner winterlichen Abkühlung auf eine Tiefe von etwa 2000 Metern gesunken und komplettiert nun den arktischen Kaltwasserstrom, der jetzt als Tiefenwasser entlang der amerikanischen Ostküste Richtung Südatlantik fließt.

Vergleicht man die Umwälzkirkulation im Nordatlantik mit der Tiefenwasserbildung im Südpolarmeer, so fällt ein maßgeblicher Unterschied auf. Die Wassermassen im Norden sinken ab, weil sie in eisfreien Meeresregionen wie der Labradorsee, dem Europäischen Nordmeer und den sibirischen Schelfmeeren ihre Wärme an die Atmosphäre abgeben und dadurch kälter und schwerer werden. Im zentralen Arktischen Ozean findet gleichzeitig kaum Konvektion statt. Hier isoliert die Meereisdecke den Ozean viel zu gut, als dass er viel Wärme an die Atmosphäre verlieren könnte.

In der Antarktis dagegen wird die Tiefenwasserbildung vor allem durch das Gefrieren des Meereises und die damit verbundene Freisetzung von Salzlake angetrieben. Der vorhergehende Wärmeverlust der Wassermassen spielt zwar auch eine Rolle – entscheidender ist hier aber die Meereisbildung.

Eine Schutzschicht für das Meereis

Die Umwälzung des Atlantischen Wassers ist jedoch nicht die einzige Aufgabe des Arktischen Ozeans im globalen Förderband der Meeresströmungen. Er stellt zudem ein wichtiges Verbindungsstück zwischen dem Pazifischen und dem Atlantischen Ozean dar. Durch die gerade einmal 85 Kilometer schmale und nur 50 Meter flache Beringstraße fließt relativ warmes, salzarmes Pazifikwasser in das Nordpolarmeer. Dieser Einstrom entspricht nur einem Zehntel jener Wassermenge, die über die Framstraße und die Barentssee aus dem Nordatlantik in den Arktischen Ozean gelangt. Dennoch prägt er das Geschehen deutlich. Die Wassermassen aus dem Pazifik transportieren Wärme in den hohen Norden, welche die Meereisbildung in der Tschuktschensee nördlich der Beringstraße beeinflusst. Aufgrund seines geringen Salzgehalts verstärkt das Pazifikwasser aber auch die Schichtung des Arktischen Ozeans. Betrachtet man dessen Wassersäule im Profil, so erkennt man von oben nach unten folgende Besonderheiten:

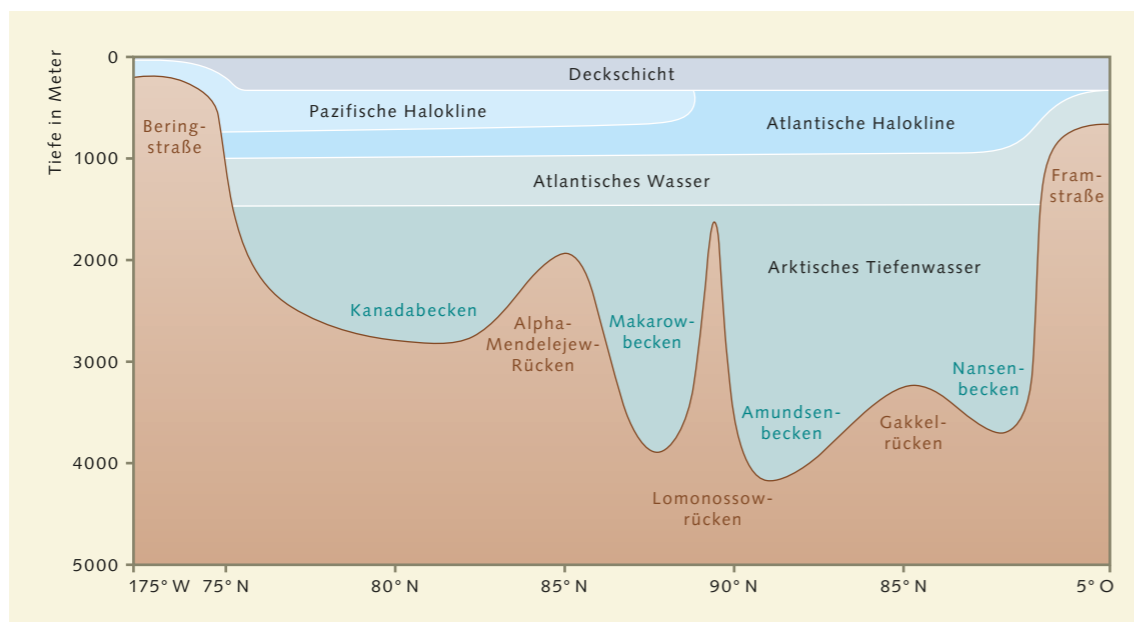
Die Deckschicht

Wo immer Meereis das Nordpolarmeer bedeckt, befindet sich darunter eine fünf bis 50 Meter dicke salzarme

Wasserschicht. Diese Deckschicht speist sich aus Süßwasser, welches in erster Linie aus den vielen Flüssen stammt, die in den Arktischen Ozean münden. Allein die nordeuropäischen, sibirischen und nordamerikanischen Flüsse transportieren pro Jahr circa 3300 Kubikkilometer Wasser in das Nordpolarmeer. Diese Menge entspricht etwa elf Prozent der weltweiten Festlandsabflüsse und erklärt, warum das Wasser des Nordpolarmeers deutlich weniger Salz enthält als zum Beispiel die Wassermassen des Atlantischen Ozeans.

Das von Flüssen eingetragene Süßwasser vermischt sich in den flachen Schelfmeeren mit dem Meerwasser und breitet sich dann vom Wind geschoben in die zentrale Arktis aus. Sowohl in den Schelfmeeren als auch im zentralen Arktischen Ozean kann diese Deckschicht im Sommer recht warm werden, besonders dort, wo die Eisdecke in einzelne Schollen zerfallen oder sogar ganz geschmolzen ist. Wo Meereis fehlt, kann die Sonnenstrahlung das Oberflächenwasser erwärmen, was vielerorts dazu führt, dass die restlichen Schollen verstärkt von unten schmelzen. Infolge der Eisschmelze und des damit verbundenen Süßwassereintrags wird die Deckschicht im Lauf des Sommers immer salzärmer und damit stabiler. Das heißt, ihr Wasser vermischt sich immer weniger mit den darunterliegenden salzigeren Wassermassen. Die eingestrahlte

2.26 > Schematische Darstellung der Wassermassen des Arktischen Ozeans. Über dem Arktischen Tiefenwasser zirkulieren die warmen Wassermassen aus dem Atlantik. Darüber folgen die kalte Atlantische und Pazifische Halokline, die gemeinsam mit der Deckschicht das Meereis vor der Wärme des Atlantikwassers schützen.



2.27 > Auf dem Meereis in der arktischen Beaufortsee haben sich Schmelzwassertümpel gebildet. Ihre türkisfarbenen Wasserflächen reflektieren deutlich weniger Sonnenstrahlung als das weiße Eis.

Wärme bleibt auf diese Weise in der obersten Wasserschicht gefangen. Im Herbst und Winter dagegen kühlt sich die Deckschicht wieder ab und wird durch die dann einsetzende Eisbildung auch wieder salzreicher.

Die Halokline

Unter der Deckschicht findet man vor allem in den tiefen Becken des Arktischen Ozeans eine zweite Trennschicht, die sogenannte kalte Halokline. Der Begriff „Halokline“ kommt aus dem Griechischen und bezeichnet eine Übergangszone zwischen Wasserschichten unterschiedlichen Salzgehalts, weshalb die Halokline auch Salzgehaltssprungschicht genannt wird. Der Salzgehalt des Wassers nimmt unter der Deckschicht über eine Tiefe von circa 200 Metern zu – so lange, bis es genauso salzig ist wie das darunterliegende Atlantikwasser. Eine solche Salzgehaltsschichtung ist im Weltmeer durchaus nicht ungewöhnlich. Das Besondere im Arktischen Ozean ist jedoch, dass in der Arktischen Halokline zwar der Salzgehalt des Wassers mit zunehmender Tiefe steigt, die Wassertemperatur aber durchweg ziemlich nahe am Gefrierpunkt bleibt – ganz ungeachtet dessen, dass das Atlantikwasser unter der Halokline ungefähr ein Grad Celsius misst und damit deutlich wärmer ist.

Die niedrige Temperatur der Halokline rührt daher, dass ihr Wasser aus den Schelfmeeren stammt, wo im Winter das Oberflächenwasser stark auskühlt und in den Küstenpolynien besonders viel Eis gebildet wird. Gleichzeitig verdünnen die vielen Flüsse das Schelfwasser mit Süßwasser, weshalb es sehr salzarm ist. Im Lauf des Winters allerdings steigt sein Salzgehalt durch die ständige Meereisbildung an.

Dieses kalte und am Anfang des Winters noch recht salzarme Wasser fließt von den Schelfmeeren in die

zentrale Arktis. Es breitet sich dort überall aus, schiebt sich seiner Dichte entsprechend unter die noch salzärmere Deckschicht und schirmt das Meereis zusätzlich vor dem tiefer liegenden warmen Atlantikwasser ab.

Gemeinsam stabilisieren die Deckschicht und die Halokline die Schichtung des Nordpolarmeers in einem solchen Ausmaß, dass es weder dem Wind noch der Konvektion gelingt, Wirbel oder auch Turbulenzen zu erzeugen, die genug Kraft hätten, um nennenswerte Mengen wärmeren Atlantikwassers aus der Tiefe an die Meeresoberfläche zu transportieren.

Ähnlich wie dem Schelfwasser ergeht es den Wassermassen aus dem Pazifik, die über die Beringstraße in den Arktischen Ozean strömen. Auch sie sind recht salzarm und durchlaufen in der flachen Tschuktschensee eine ähnliche Entwicklung wie die Wassermassen in den anderen Schelfmeeren. Am Ende schichtet sich das Wasser des Pazifiks in der zentralen Arktis gemäß seiner Dichte als sogenannte Pazifische Halokline ein.

Das Atlantische Wasser

Das Atlantische Wasser, von dem jetzt schon oft die Rede war, ist über die Framstraße und das Europäische Nordmeer in die Arktis gelangt. Es hat seinen Ursprung im Golfstrom weit im Süden, kühlt sich aber auf dem Weg nach Norden enorm ab. In der zentralen Arktis ist es nur noch etwa ein Grad Celsius warm und damit trotzdem bei Weitem das wärmste Wasser dort. Es zirkuliert als schmaler Randstrom entgegen dem Uhrzeigersinn durch die Arktis. Ein Teil dieses Randstroms wandert am Kontinentalhang entlang durch die gesamte Arktis. Ein jeweils anderer Teil zweigt an den drei untermeerischen Rücken ab, welche die zentrale Arktis in das Kanada-, Makarow-, Amundsen- und Nansenbecken unterteilen. Würde dieses

Atlantikwasser an die Meeresoberfläche gelangen, wären die Tage des Meereises gezählt, denn seine Wärme reichte aus, um große Mengen Eis zu schmelzen.

Das Arktische Tiefenwasser

Unter dem Atlantischen Wasser, im tiefsten Stockwerk des Arktischen Ozeans, zirkulieren derweil die kältesten und salzreichsten Wassermassen des Arktischen Ozeans, das sogenannte Arktische Tiefenwasser. Dieses schwere Wasser ist in dünnen, flachen Rinnsalen aus den Schelfmeeren den Kontinentalhang hinabgeflossen und hat sich auf dem Weg mit dem ebenfalls salzreichen Atlantikwasser vermischt. Auch bei den absinkenden Rinnsalen greift die Corioliskraft wieder. Sie lenkt das Wasser nach rechts ab, sodass es auf dem Weg in die Tiefsee am Kontinentalhang entlang durch das gesamte Nordpolarmeer wandert. Der obere Teil dieser Wassermassen wiederum verlässt am Ende den Arktischen Ozean durch die Framstraße.

Die ziemlich starke Schichtung der Wassermassen im Arktischen Ozean hat bislang verhindert, dass die aus dem Atlantik kommende Wärme an die Meeresoberfläche steigen und dem arktischen Meereis gefährlich werden konnte. Im Zuge des Klimawandels erwarten die Forscher hier allerdings weitreichende Veränderungen im Zusammenspiel zwischen Ozean und Meereis.

Eispanzer von kontinentaler Größe

Wie viel Eis die Eisschilde Grönlands und der Antarktis in sich vereinen, kann man sich als Mensch im Grunde kaum vorstellen. Die Eisschilde der Polargebiete sind die größten zusammenhängenden Eismassen der Erde. Um ihre Dimension zu verdeutlichen, wird häufig ihre beein-

druckende Massenstatistik angeführt. Sie vereinen etwa 99 Prozent der auf der Erde vorhandenen Eismassen und bedecken mit einer Gesamtfläche von 15,6 Millionen Quadratkilometern etwa 9,5 Prozent der Landfläche unseres Planeten. Zum Vergleich: Die Fläche Deutschlands würde fast fünfmal unter den grönländischen Eispanzer passen und fast 39-mal unter das antarktische Inlandeis.

Der Eispanzer Grönlands ist bis zu 3300 Meter dick, jener der Antarktis bis zu 4900 Meter. Zusammen speichern sie so viel Wasser, dass ihr vollständiges Abschmelzen zu einem weltweiten Meeresspiegelanstieg von rund 65 Metern führen würde. Die beiden Eisschilde der West- und Ostantarktis bringen es zusammen auf ein Eisvolumen von 26,37 Millionen Kubikkilometern, das grönländische Inlandeis auf rund drei Millionen Kubikkilometer Volumen.

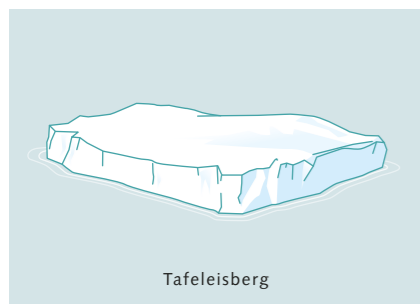
Jeder Eisschild wird von Gletschern gesäumt, über die das im Landesinnern gebildete Eis Richtung Meer abfließt. In Grönland haben Forscher 13 880 Gletscher gezählt. Viele von ihnen münden in Fjorde, sodass an ihrer Spitze, der sogenannten Abbruchkante oder Kalbungsfrent, Eisberge abbrechen können. In der Antarktis dagegen fließen an verschiedenen Küstenabschnitten die Eismassen mehrerer Gletscher zusammen und bilden eine große Eiszunge, die auf das Meer hinausgeschoben wird. Diese schwimmenden Ausläufer der Gletscher werden als Schelfeise bezeichnet. An ihrer Kalbungsfrent lösen sich ebenfalls Eisberge – nur sind sie in der Regel deutlich größer als die Eisberge Grönlands. Antarktische Eisberge werden ihrer Form wegen oft auch als Tafelberg bezeichnet.

Die Bedeutung der Eisschilde für das Klima der Polarregionen resultiert in erster Linie aus dem hohen Albedo-

Tafelberg

Ein frisch gekalberter Tafelberg hat eine flache, ebene Oberfläche und nahezu senkrechte Flanken. In der Antarktis können diese Eisberge bis zu 160 Kilometer lang und zig Kilometer breit sein. Sie sind in der Regel 200 bis 400 Meter dick und ragen 30 bis 50 Meter aus dem Wasser empor. Ähnlich geformte Eisberge in der Arktis sind in der Regel deutlich kleiner.

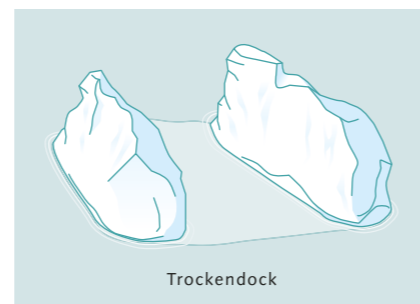
2.28 > Kein Eisberg gleicht dem anderen, nicht zuletzt weil Wellen und Wind den Eismassen stets auf ganz unterschiedliche Weise zusetzen. Dennoch unterscheidet man ganz grundlegend sechs verschiedene Typen von Eisbergen.



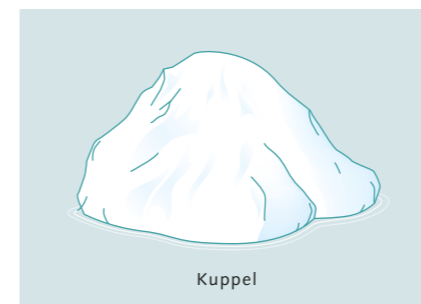
Tafelberg



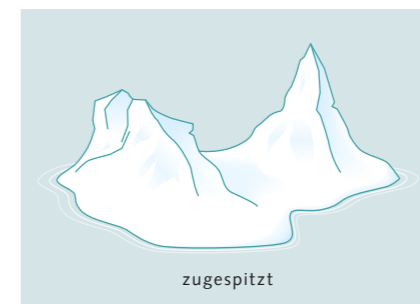
keilförmig



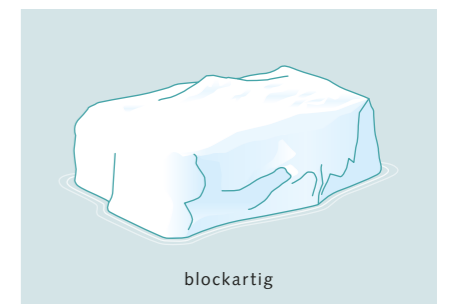
Trockendock



Kuppel



zugespitzt



blockartig

2.29 > Im Zentrum eines jeden Schneekristalls findet sich ein kleiner Staubpartikel, an dem Wasserdampf aus der Luft kondensiert und zu Eis gefroren ist. Schnee jedoch fällt in der Regel nicht in Form einzelner Kristalle, sondern als Schneeflocken, die aus mehreren ineinander verhakten Schneekristallen bestehen.



effekt der schier endlosen weißen Eisflächen. Regionen, in denen frisch gefallener Schnee auf dem Eispanzer liegt, reflektieren bis zu 90 Prozent der einfallenden Sonnenstrahlung. Ohne Schneedecke sind es immerhin noch etwa 55 bis 60 Prozent. Eisschilde beeinflussen über ihre Gletscher und Schelfeise aber auch die Ozeane. Wo Gletscher kalben, Schmelzwasser in das Meer rinnt oder Schelfeise und schwimmende Gletscherzungen an der Unterseite schmelzen, gelangt automatisch Süßwasser in den Ozean. Umgekehrt entziehen wachsende Eisschilde und Gletscher dem Wasserkreislauf auch große Mengen Feuchtigkeit. In der Antarktis beispielsweise fällt in jedem Jahr so viel Schnee auf das Inlandeis, dass diese Menge allein ausreichen würde, den globalen Meeresspiegel um sechs Millimeter ansteigen zu lassen. Im Südpolarmeer spielen die schwimmenden Gletscherzungen und Schelfeise außerdem eine entscheidende Rolle bei der Tiefenwasserbildung und somit beim Antrieb der globalen Meeresströmungen. Zu guter Letzt dient das Wachsen und

Schrumpfen der Eismassen an Land als Indikator für die Entwicklung des Weltklimas. Schrumpfen die Eisschilde und Gletscher, ist das ein ziemlich sicheres Anzeichen für eine globale Erwärmung; nehmen sie an Masse zu, hat sich das Weltklima anscheinend wieder abgekühlt.

In drei Schritten von Schnee zu Eis

Eisschilde und Gletscher entstehen in polaren oder hochgelegenen Gebieten, in denen im Winter mehr Schnee fällt, als im Sommer schmilzt, verdunstet oder auf andere Weise verloren geht, zum Beispiel durch den Abbruch von Eisbergen. Damit sich jedoch aus losem Schneepulver ein kompaktes Gletschereis bilden kann, bedarf es Druck und jeder Menge Zeit, wie die Eisbildung in Grönland zeigt.

Wenn Neuschnee auf das grönländische Inlandeis fällt, besitzt er eine Dichte von 50 bis 70 Kilogramm pro Kubikmeter. Das heißt, Neuschnee ist ein ziemlich leichtes Material, das jede Menge Luft enthält – ganz im

Gegensatz zu Wasser in seiner flüssigen Form. Süßwasser beispielsweise besitzt eine Dichte von 1000 Kilogramm pro Kubikmeter. Sobald der Schnee gefallen ist, beginnt seine Metamorphose, die überall auf der Welt in drei Phasen abläuft:

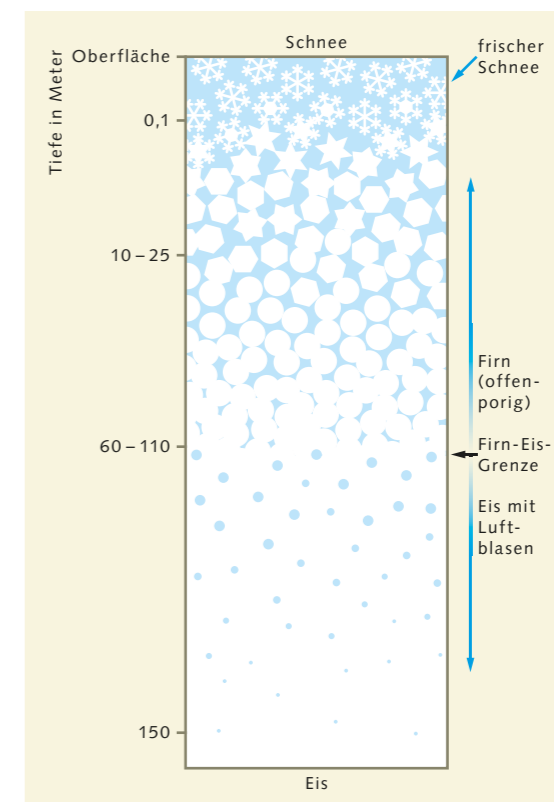
1. Schneeverdichtung

Zunächst werden die Schneekristalle verlagert oder durch den Wind verweht, wobei ihnen die feinen Kristallärmchen abbrechen. Auf diese und andere Weise entsteht aus jeder Schneeflocke und jedem Schneepüttchen ein Schneekorn, dessen Form einer Kugel ähnelt. Dahinter steckt das physikalische Prinzip der Minimierung der Oberflächenenergie. Diese Energie ist für eine kugelförmige Oberfläche am kleinsten, weshalb auch Schneekristalle im Laufe der Zeit die Form einer Kugel annehmen. Aufgrund dieser Kugelform ist der Schnee nun auch in der Lage, sich zu setzen und zu verdichten. Es passen nämlich viel mehr kugelförmige Schneekörner in ein bestimmtes Volumen als feingliedrige Schneekristalle. Die Schneekörner haften zu diesem Zeitpunkt aber noch nicht zusammen. Würde man mit einer Schaufel in diese oberste Schneesicht stechen, würden die einzelnen Schneekörner lose von der Schippe rollen.

2. Firnbildung

Weil die Lufttemperatur im Landesinnern Grönlands auch im Sommer nur selten über die Null-Grad-Grenze steigt, bleibt der Schnee eines Winters in der Regel liegen. Wenn dann im darauffolgenden Winter neuer Schnee auf den Altschnee rieselt, drückt das Gewicht des Neuschnees die darunterliegenden Schichten langsam zusammen. Die eben noch lose über- und nebeneinanderliegenden Schneekörner beginnen nun, sich durch Adhäsion mit ihren Nachbarkörnern zu verbinden. Es scheint fast, als würden die großen Schneekörner die kleineren auffressen, denn sie wachsen im Laufe der Jahre immer weiter. Würde man zu diesem Zeitpunkt einen Schneeschacht graben und den Schaufeltest in etwa einem Meter Tiefe wiederholen, bliebe der Schnee als ziemlich fester Block auf der Schaufel liegen. Fachleute bezeichnen diese festen Schneeschichten als Firn.

Im obersten Bereich des Firnkörpers hat das zusammengedrückte Material eine Dichte von 350 Kilo-



2.30 > Gletschereis bildet sich aus Schnee, der sich im Lauf der Zeit zunächst zu Firn und später zu Eis verdichtet. Wie schnell und in welcher Tiefe dieser Prozess abläuft, hängt unter anderem davon ab, wie viel Neuschnee auf die Gletscheroberfläche fällt und durch sein Gewicht Druck auf die darunterliegenden Schichten ausübt.

gramm pro Kubikmeter. In dieser Phase ist es noch so porös wie ein Schwamm, sodass Luft frei durch den Firn zirkulieren kann. Je mehr Schnee jedoch auf die Oberfläche des Eisschilds fällt, desto größer wird der Druck auf die tiefer liegenden Schichten. Die Eiskristalle im Firn wachsen und rücken noch enger zusammen, die Poren verengen sich.

3. Eisbildung

Die Verdichtung durch Setzungsprozesse und das Wachsen der Eiskristalle erreicht bei einer Dichte von 550 Kilogramm pro Kubikmeter ihr Maximum. Da die Schneelast und damit der Druck von oben jedoch weiter steigt, setzt nun das sogenannte Drucksintern ein. Das heißt, die Eiskristalle verbacken miteinander. Die Poren schließen sich und werden versiegelt, sodass alle Luft, die nicht entweichen konnte, in kleinen Bläschen eingeschlossen wird. Wann und in welcher Tiefe dieser Luftabschluss stattfindet, hängt sowohl vom jährlichen Schneezuwachs als auch von der Temperatur des Firns ab. In Regionen mit

viel Schneefall läuft die Verdichtung in der Regel schneller ab als in Gegenden mit wenig Schneezutrag. Gleiches gilt für Firn, der wärmer ist. Die Eiskörner verbacken dann eher miteinander als bei sehr kaltem Firn. In Grönland erfolgt der Luftabschluss in der Regel in einer Tiefe von 60 bis 110 Metern. Das Material hat dann eine Dichte von etwa 830 Kilogramm pro Kubikmeter.

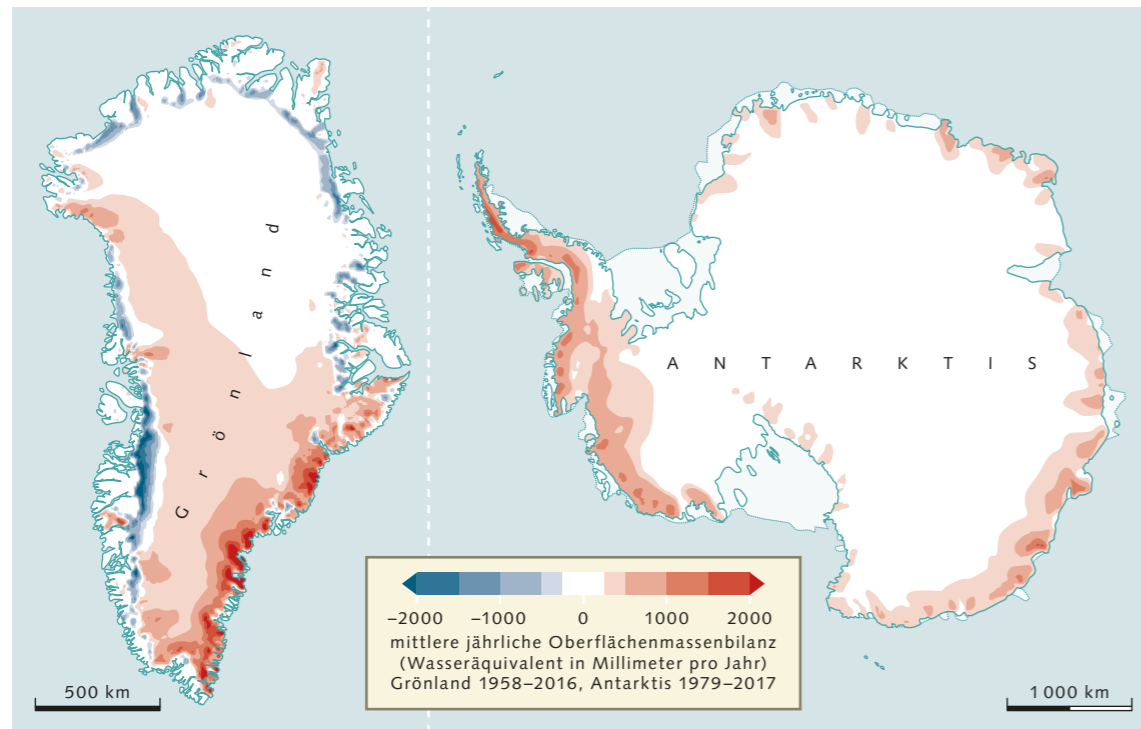
Sowie die Luft nicht mehr entweichen kann, sprechen Fachleute von Eis. Auf den subantarktischen Inseln erkennen Forscher die Zone des Firn-Eis-Übergangs an einer dicken Schicht wiedergefrorenen Schmelzwassers im Eiskörper. Dort schmilzt nämlich im Sommer Schnee an der Gletscheroberfläche, und das Schmelzwasser sickert dann so tief in den Firn ein, wie es die Poren im Material erlauben. Am Firn-Eis-Übergang staut es sich dann und gefriert wieder.

Mit der Versiegelung der Poren ist die Gletschereisbildung aber noch nicht beendet. Wenn der Schnee-Firn-Eispanzer mehrere Hundert Meter dick ist, lastet so viel Gewicht auf den unteren Schichten und insbesondere auf den Luftbläschen, dass die Luft darin auskristallisiert. Das heißt, alle Moleküle, die in den Bläschen enthalten sind,

werden in das Kristallgitter des Eises eingebaut. Das gilt für die Gasmoleküle ebenso wie für Staubpartikel oder sonstige Verunreinigungen, die sich in der Luft befinden. Am Ende entsteht ein extrem dichtes, blasenfreies Eis, welches man an seiner blauen Farbe erkennt. Fällt nämlich Tageslicht auf dieses Eis, absorbiert es einen kleinen Teil des roten Lichtes, sodass der Mensch das Eis in einem leicht bläulichen Farbton wahrnimmt. Erscheint Gletschereis dagegen eher weiß, enthält es in der Regel noch viele Luftblasen.

Wie schnell ein Gletscher oder Eisschild wächst, hängt unter anderem von der Niederschlagsmenge ab. In der Westantarktis fallen pro Jahr bis zu vier Meter Neuschnee, im Norden der Antarktischen Halbinsel sowie an der Küste des Wilkeslands sogar bis zu sechs Meter, wobei diese Zahlen nur Näherungswerte sind. Forscher geben die Niederschlagsmenge stets als Wasseräquivalent (WE) an. Gemeint ist damit die Höhe der Wassersäule, die sich ergäbe, wenn man den Schnee schmelzen würde. In der Westantarktis ergäbe sich ein Wasseräquivalent von bis zu 1200 Millimetern oder ebenso viele Liter pro Quadratmeter; an der Antarktischen Halbinsel und im Wilkesland

2.31 > Ob die Oberflächenmassenbilanz eines Eisschildes positiv oder negativ ist, hängt davon ab, wie viel Schnee gefallen ist und welcher Anteil davon durch Schmelze, Windtransport oder aber Sublimation verloren gegangen ist.



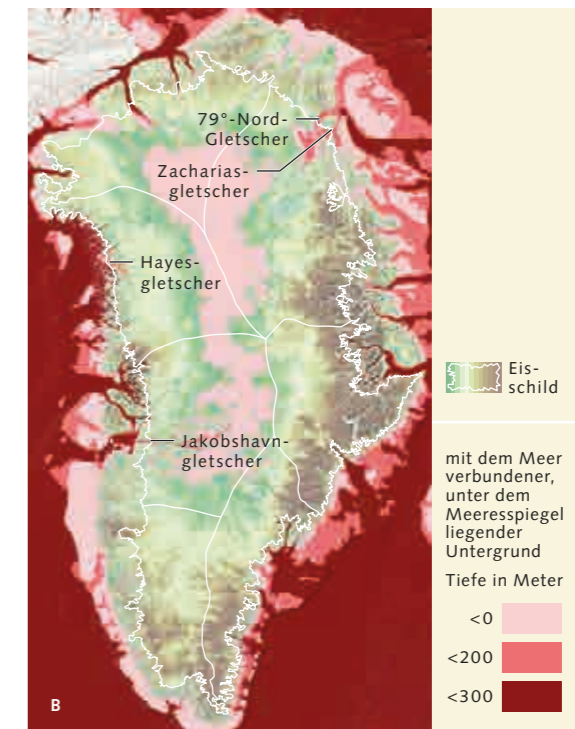
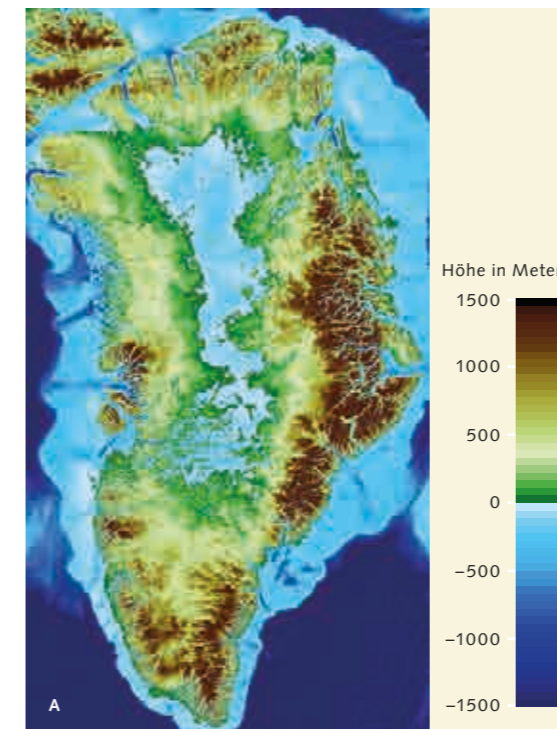
sogar bis zu 1800 Millimetern. Um davon die exakte Schneehöhe ableiten zu können, müsste man die genaue Dichte des Schnees kennen, was für große Flächen jedoch selten der Fall ist. Daher behilft man sich mit einem Schätzwert. Ein Kubikmeter Neuschnee ergibt in etwa eine 300 bis 350 Millimeter hohe Wassersäule. Stellt man diese Rechnung um, ergeben sich für die Küstengebiete der Westantarktis und des Wilkeslands die genannten Schneehöhen. Im Zentrum des Kontinents dagegen fallen nur wenige Zentimeter Neuschnee pro Jahr. An der US-amerikanischen Amundsen-Scott-Südpolstation beispielsweise dokumentierten Meteorologen im Zeitraum von 1983 bis 2010 einen jährlichen Schneezuwachs von 27,4 Zentimetern pro Jahr, wobei dieser Messwert auch Schnee umfasst, den der Wind in das Messfeld geweht hatte.

In Grönland fällt der meiste Schnee an der Südküste. Satellitendaten lassen darauf schließen, dass sich der Neuschnee dort bis zu zehn Meter hoch auftürmt. Im Norden der Insel dagegen ist es sehr trocken. Hier fallen größtenteils weniger als 30 Zentimeter Schnee pro Jahr. Anschließend stellt sich sofort die Frage, wie viel von diesem Neuschnee im Lauf des Sommers schmilzt oder

verdunstet und welche Menge liegen bleibt. In Grönland war das bis vor 30 Jahren noch knapp die Hälfte. Von den 750 Gigatonnen Schnee, die im Winter fielen, überstanden etwa 350 Gigatonnen den Sommer. Heutzutage bleiben nur noch rund 200 Gigatonnen Schnee liegen. Auf dem antarktischen Festland – ohne Schelfeise – fallen pro Winter rund 2236 Gigatonnen Schnee, von denen vor allem auf der Antarktischen Halbinsel etwa 50 Gigatonnen durch Schneeschmelze verloren gehen. Weitere 84 Gigatonnen Schnee verdunsteten durch Sublimation. Der große Rest verdichtet sich zu Eis.

Warum fließt Eis?

Hat ein Gletscher oder ein Eisschild eine bestimmte Größe erreicht, setzen sich seine Eismassen in Bewegung. Hanggletscher, die man etwa in Hochgebirgen wie den Alpen oder den Rocky Mountains findet, bewegen sich immer Richtung Tal – eine Bewegung, die jeder Ski- und Schlittschuhfahrer aus eigener Erfahrung gut nachvollziehen kann. Warum aber bewegen sich auch Eismassen, die auf einer Ebene oder im Tal liegen? Der Grönländische Eisschild



2.32 > Die Topografie der Landfläche unter einem Eisschild beeinflusst maßgeblich, wie die Eismassen fließen und ob ihnen warmes Meerwasser gefährlich werden kann. Diese beiden eisfreien Darstellungen Grönlands verdeutlichen, dass das Zentrum der Insel unterhalb des Meeresspiegels liegt (A) und über Fjorde direkt mit dem Meer verbunden ist (B). Klar zu erkennen sind zudem die tiefen Gräben, durch die warmes Atlantikwasser auf den Schelf und in die Fjorde gelangen kann.

zum Beispiel ruht zu großen Teilen in einer Art Kessel, wie die Karte des Inseluntergrunds zeigt. Trotzdem fließen seine Eismassen zu den Rändern hin.

Die Erklärung dafür ist vielschichtig. Ganz grundsätzlich gilt, große Eismassen bewegen sich, weil sich das Gletschereis entweder aufgrund seines Eigengewichts verformt oder weil es auf einem rutschigen Untergrund gleitet. Meist gehen beide Prozesse Hand in Hand. Ein entscheidender Unterschied ist jedoch, dass für das Gleiten immer ein dünner Schmelzwasserfilm benötigt wird, auf dem das Eis rutscht, während die Verformungen auch im angefrorenen Zustand stattfinden.

Um die Verformungsbewegung zu verstehen, kann man sich einen Eisschild wie einen überdimensionalen Rührteig vorstellen, der als zähflüssiger Teighaufen auf eine Arbeitsfläche gekippt wurde und in dessen Mitte man nun Löffel für Löffel weiteren Kuchenteig hinzugibt. Nach den ersten Zugaben dürfte sich die Form des Haufens noch nicht grundlegend verändern. Mit der Zeit aber wird die Menge im Zentrum so groß, dass der restliche Teig zu den Rändern hin wegfleießt.

Einem Eisschild ergeht es genauso. Mit jeder neuen Schneeschicht wächst die Materialmenge. Der Druck auf die Eismassen darunter nimmt zu, sodass diese sich verformen und zu den Rändern hin wegfleießen. Bei der Verformung entsteht im Innern des Eisschilds Scherwärme, welche das Eis erwärmt und auf diese Weise das Fließen des Eises beschleunigt, denn warmes Eis verformt sich leichter.

Die Verformungsprozesse allein genügen allerdings nicht, um Eisströme und vor allem Gletscher so schnell fließen zu lassen, wie Wissenschaftler es heute beobachten. An Geschwindigkeit gewinnen die Eismassen vor allem, indem sie gleiten. Das heißt, sie rutschen wie ein Schlitten auf einem dünnen Schmelzwasserfilm eine Schräge hinab. Auf Grönland kann dieses Schmelzwasser unter bestimmten Umständen von der Eisschildoberfläche stammen. Dort sammelt es sich im Sommer in großen Schmelzwasserseen. Bei manchen dieser Seen rinnt das Wasser dann durch Risse, Spalten oder Höhlengänge im Eis zur Unterseite des Gletschers und bildet dort den beschleunigenden Gleitfilm. In der Regel aber schmelzen die Eisschilde in erster Linie durch Geothermie, also Erd-

wärme, von unten. Dazu bedarf es nicht einmal einer großen Wärmemenge, denn aufgrund des hohen Lastendrucks an der Unterseite der kilometerdicken Eispanzer reduziert sich der Schmelzpunkt des Eises. Es kann demzufolge schon bei einer Temperatur von etwa minus zwei bis minus 1,5 Grad Celsius schmelzen. Pro Jahr büßen die Eisschilde dennoch nur wenige Millimeter Eis an ihrer Unterseite durch Schmelzen ein.

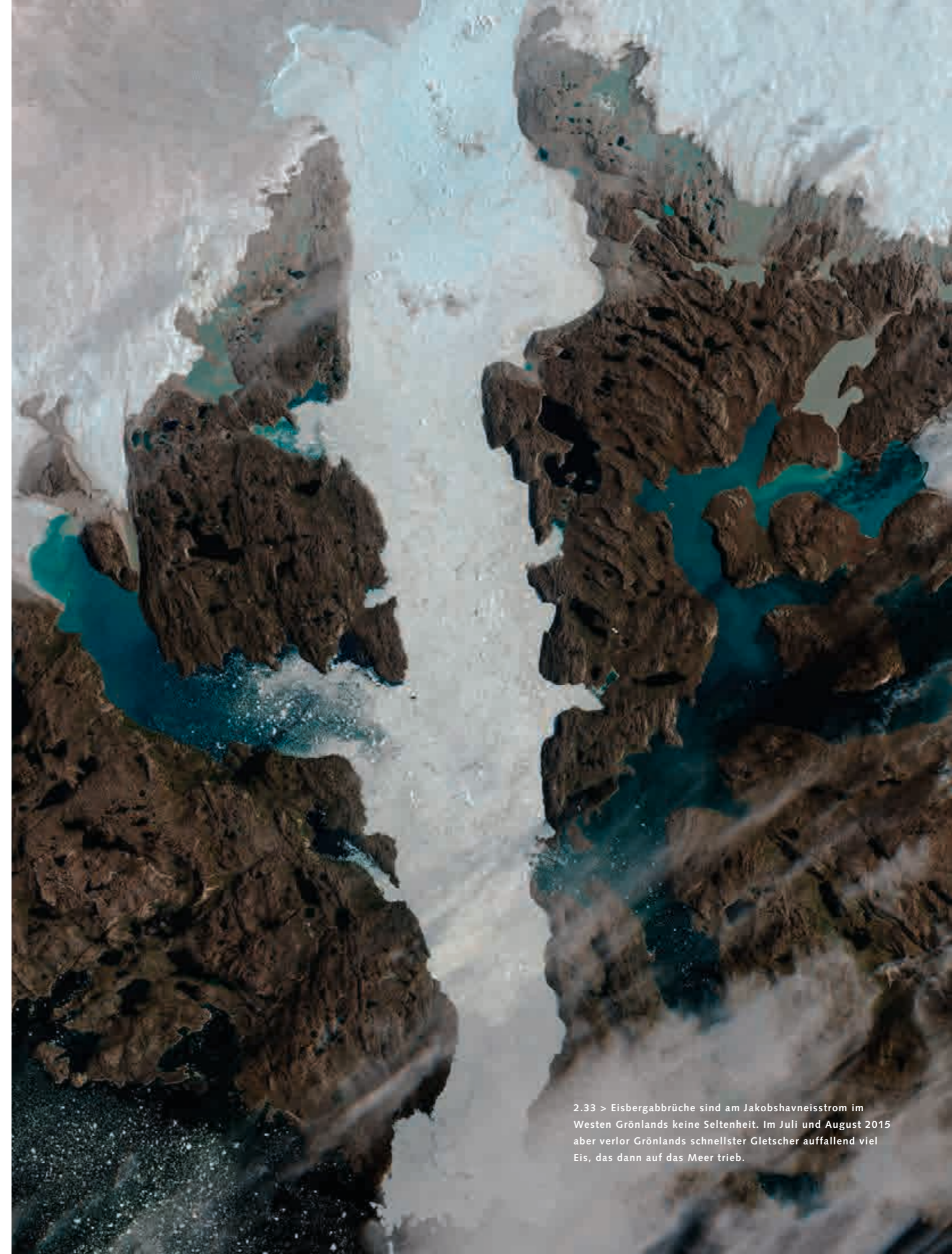
Ströme aus Eis

Bis heute haben Wissenschaftler den Prozess des Gleitens von Gletschereis nur in Ansätzen verstanden. Er hängt zum einen von der Beschaffenheit des Untergrunds ab. Zum anderen entsteht beim Gleiten Reibungswärme, die etwas Eis schmilzt und die unteren Eisschichten erwärmt. Infolgedessen verformen sich diese Eisschichten leichter, was das Fließen des Eises zusätzlich beschleunigen kann.

In der Antarktis transportieren etwa 30 Auslassgletscher und Eisströme das Eis ins Meer. Als Eisstrom bezeichnen Forscher dabei große Bänder fließenden Eises innerhalb eines Eisschildes. Sie grenzen sich meist durch ihre Fließgeschwindigkeit und Fließrichtung vom umliegenden Eis ab und münden in Gletscher, die außerhalb des Eisschildes liegen. Bis heute hat die Wissenschaft noch keine eindeutige Erklärung, warum Eisströme entstehen und welche Mechanismen ihren Eismassentransport regulieren, denn kaum ein Strom gleicht dem anderen. Einige fließen kontinuierlich, andere immer nur phasenweise. Es kommt auch vor, dass Eisströme ihre Fließrichtung ändern, plötzlich an Tempo gewinnen oder sich spürbar verlangsamen. Es muss also mehrere Einflussfaktoren geben. Forscher haben die folgenden sieben Parameter identifiziert:

1. Topografische Verengung

Das Felsbett unter dem Eisschild bildet ein Tal, sodass die Eismassen in der Tiefe eingengt werden. Um mit dem Fließtempo in den höheren Lagen mithalten zu können, müssen die Eismassen in der Tiefe schneller fließen. Außerdem erhöht sich ihre Reibung auf dem Untergrund. Die dabei entstehende Wärme lässt die Eismassen an der Unterseite schmelzen, wodurch sich ihr Fließtempo nochmals erhöht. Das bekannteste Beispiel für einen Eisstrom, des-



2.33 > Eisbergabbrüche sind am Jakobshavn-Eisstrom im Westen Grönlands keine Seltenheit. Im Juli und August 2015 aber verlor Grönlands schnellster Gletscher auffallend viel Eis, das dann auf das Meer trieb.

sen Ursprung auf eine topografische Verengung zurückzuführen ist, ist der Jakobshavnstrom in Westen Grönlands. Seine Eismassen fließen in der Tiefe durch ein bis zu 2000 Meter tiefes Tal, wodurch die Fließgeschwindigkeit des Eisstroms auf bis zu 17 Kilometer pro Jahr beschleunigt wird.

2. Topografische Stufen

Fließen die Eismassen eines Eisschildes über eine Steilklippe oder ähnliche topografische Stufen hinweg, verformt und beschleunigt sich das Eis dabei aufgrund seines Eigengewichts und der Erdanziehung besonders stark. Gleichzeitig erwärmt es sich, wodurch die Verformung noch leichter und damit auch schneller vorstattengeht. Die Fließgeschwindigkeit des Eises insgesamt nimmt also zu. Bekannte Gletscher, die auf diese Weise beschleunigen, sind unter anderem der Byrdgletscher und der Thwaitesgletscher in der Westantarktis.

3. Rauigkeit des Untergrunds

Bislang ist wenig über die Topografie unter den großen Eisschilden bekannt. Forscher gehen jedoch davon aus, dass mögliche Oberflächenmerkmale wie Felsvorsprünge, Hügel und kleine Gräben die Fließgeschwindigkeit und -richtung eines Eisstroms maßgeblich beeinflussen. Je mehr von ihnen vorhanden sind und je rauer der Untergrund demzufolge ist, desto langsamer fließen die Eismassen. Oder anders gesagt: Auf einem glatten Felsbett fließen und gleiten Eismassen besser als auf einem rauen. Beobachtet wird dieser Effekt unter anderem am Möllerisstrom in der Westantarktis.

4. Abbruch von Eisbergen

Wenn an der Kalbungsfront eines schwimmenden Gletschers oder Schelfeises Eisberge abbrechen und somit Eis verloren geht, beginnt ein sich selbst verstärkender Prozess. Zunächst beschleunigen die nachrutschenden Eismassen. Im Zuge dieser Bewegung erwärmt sich das Eis des gesamten Eisstroms – es verformt sich also leichter. An seiner Unterseite entsteht außerdem durch die zunehmende Reibung mehr Schmelzwasser, auf dem die Eismassen gleiten können. Beides zusammen führt dazu, dass der Eisstrom nochmals an Tempo gewinnt. Wie wirkungsvoll diese Selbstverstärkung sein kann, zeigt abermals der

Jakobshavnstrom in Westgrönland. Nachdem im Zeitraum von 1992 bis 2004 an seiner Spitze so viele Eisberge gekalbt waren, dass die Gletscherzunge kaum noch bis in den Fjord reichte, verdreifachte sich seine Fließgeschwindigkeit auf 17 Kilometer pro Jahr.

5. Verformbare Sedimente unter dem Eisschild

Nicht überall besteht der Boden unter einem Eisschild aus hartem, nacktem Fels. An vielen Stellen setzt sich die obere Bodenschicht aus Kies oder anderen feinkörnigen Sedimentablagerungen zusammen. Auf einem solchen weichen Untergrund fließen und gleiten die Eismassen eines Eisschildes aus drei Gründen viel besser als auf einem harten Untergrund:

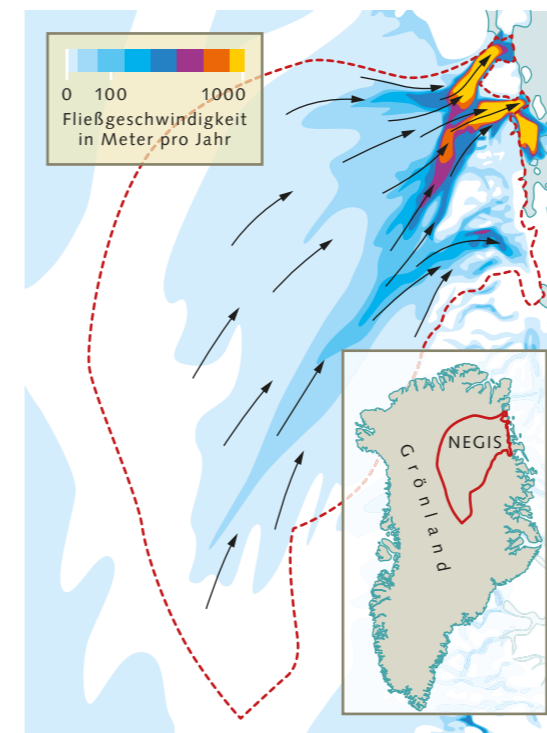
- Erstens gleichen die Sedimente wie eine Deckschicht mögliche Unebenheiten im Untergrund aus und reduzieren auf diese Weise dessen Oberflächenrauigkeit.
- Zweitens bildet eine von Schmelzwasser getränkte Sedimentschicht eine optimale Gleitoberfläche. Jeder, der als Kind im Matsch geschlittert ist, weiß, dass diese Rutschbewegung auf einem trockenen, gepflasterten oder asphaltierten Untergrund nahezu unmöglich ist.
- Und drittens verformen sich Sedimentablagerungen leicht unter der Last des Eises. Unter Umständen geraten sie sogar selbst ins Rutschen und geben auf diese Weise den Weg frei oder beschleunigen den Eisfluss.

Belege für diese drei Erklärungsansätze haben Forscher unter anderem am Whillanseisstrom in der Westantarktis gefunden. Seine Eismassen liegen auf einer fünf Meter dicken, nicht gefrorenen Sedimentschicht, welche den Eisstrom vom felsigen Untergrund trennt und sein Fließtempo auf die oben beschriebene Weise beschleunigt. Die Wissenschaft geht inzwischen sogar davon aus, dass ein weicher Untergrund zu den Grundvoraussetzungen für die Entstehung von Eisströmen zählt. Nur dort, wo sich Sedimentablagerungen unter den Eisschilden befinden – das ist meist in Becken der Fall –, können Eisströme entstehen und ihre Eismassen mit großem Tempo gleiten, lautet eine These. Dagegen spricht die Erkenntnis, dass es auch Eisströme gibt, die auf nacktem Fels aufliegen und trotzdem jede Menge Eis mit sich führen. Die Rolle des

Untergrunds wird demzufolge noch eine Weile Gegenstand der Forschung bleiben.

6. Erdwärme

Gletschereis rutscht umso schneller, je größer der Schmelzwasserfilm an seiner Unterseite ist. Schmelzwasser wiederum entsteht durch Wärme, die auch aus dem Erdinnern stammen kann. Diese sogenannte Geothermie spielt vor allem in jenen Regionen eine maßgebende Rolle, wo es aktive Vulkane unter dem Eisschild gibt oder wo die Erdkruste besonders dünn ist. Hinweise auf beide Phänomene haben Wissenschaftler unter anderem in der Westantarktis gefunden. Erdwärme wird aber auch als eine mögliche Erklärung für die Entstehung des nordostgrönländischen Eisstroms (North East Greenland Ice Stream, NEGIS) herangezogen. Er ist der einzige grönländische Eisstrom. Sein Einzugsgebiet umfasst zwölf Prozent der Fläche des Inlandeises von Grönland und verbindet



2.34 > Das Einzugsgebiet des NEGIS reicht weit ins Landesinnere Grönlands hinein. Von dort transportiert er die Eismassen Richtung Nordosten, wo sie über drei Gletscher das Meer erreichen.

dieses mit dem Ozean. In seinem Entstehungsgebiet gibt die Erdkruste fast 20-mal mehr Wärme ab als im grönländischen Durchschnitt.

7. Schmelzwasserseen und -flüsse

Je mehr Details über die Topografie des Bodens unter den Eisschilden der Antarktis und Grönlands bekannt werden, desto klarer wird auch, dass manche Eisströme in Regionen entstehen, in denen das Gefälle des Untergrundes allein nicht ausreicht, um Eis fließen zu lassen. Das Entstehungsgebiet des Recovereisstroms in der Ostantarktis ist hier ein Beispiel von vielen. Theoretisch dürfte sich das Eis in diesem Teil der Ostantarktis kaum bewegen. In Wirklichkeit aber transportiert der Strom seine Eismassen mit einem Tempo von zehn bis 400 Metern pro Jahr vom Hochplateau des Eisschildes in der Ostantarktis hinab Richtung Weddellmeer. Sein Einzugsgebiet reicht dabei vom Filchner-Ronne-Schelfeis an der Küste rund 1000 Kilometer weit in das Landesinnere und erstreckt sich über eine Fläche, die fast dreimal so groß wie Deutschland ist. Ein mächtiger Eisstrom, von dem Forscher bislang dachten, dass überlaufende Schmelzwasserseen unter dem Eisschild den entscheidenden Impuls für seine Entstehung geben. Die Vorstellung war, dass diese Seen gelegentlich überlaufen und dabei einen Gleitfilm entstehen lassen, auf dem das Inlandeis rutscht wie ein Auto beim Aquaplaning.

Dass es tatsächlich Seen unter dem Eis der Antarktis gibt, weiß man von russischen und britischen Forschungsprojekten am Wostoksee und Ellsworthsee. Beide Gewässer sind in Senken unter dem Eisschild entstanden. In ihnen hat sich im Lauf von vielen Jahrtausenden so viel Schmelzwasser angesammelt, dass sie in der Regel größer sind als der Bodensee. Die Annahme aber, dass sich derart riesige Seen zuhauf unter dem Eisschild der Antarktis befänden und die Eisströme initiierten, konnten deutsche Polarforscher in einer Feldstudie am Recovereisstrom wiederum nicht bestätigen. Überall dort, wo die Forscher Wasser unter dem Eis vermutet hatten, konnten sie keines nachweisen.

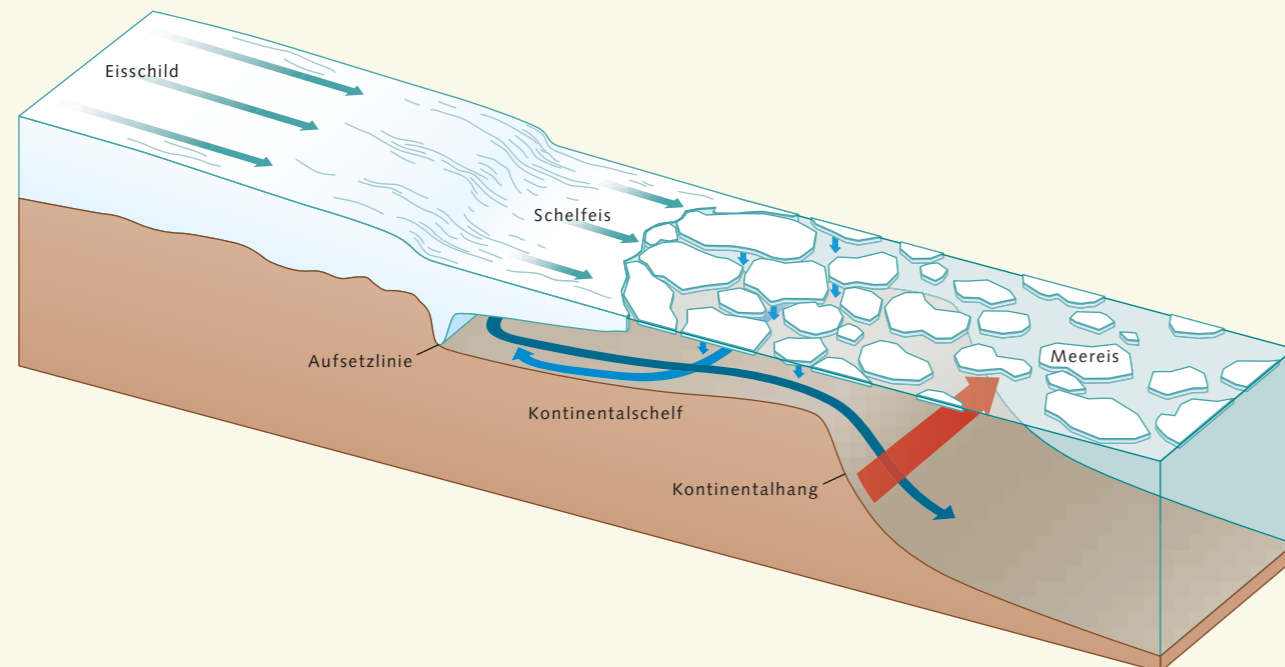
Die genaue Rolle der subglazialen Seen ist also nach wie vor ungeklärt – ebenso wie die Frage, auf welche Weise sich das Schmelzwasser unter den Eisschilden verteilt. Die Pfade möglicher Bäche und Flüsse unter dem Eis kön-

Schelfeis und Ozean – eine Beziehung von Geben und Nehmen

Schelfeise kommen per Definition großflächig mit dem Meer in Berührung. Die Wassermassen des Südpolarmeers üben dabei einen entscheidenden Einfluss auf die Stabilität und Massenbilanz der Eisplatten aus. Ein Beispiel: Auf dem Kontinentalschelf des südlichen Weddellmeers, dessen Meeresboden sich landeinwärts neigt, fließt salzreiches, etwa minus 1,9 Grad Celsius kaltes Schelfwasser knapp über Grund bis zu tausend Kilometer weit unter das Filchner-Ronne-Schelfeis. Je weiter die Wassermassen dabei unter die Eisplatte gelangen, desto gefährlicher werden sie für das Eis. Denn mit jedem Meter, den das Wasser Richtung Küste zurücklegt, sinkt es tiefer hinab. Das heißt: Der Wasserdruck unter dem Schelfeis steigt, sodass der Gefrierpunkt des Wassers von minus 1,9 Grad Celsius auf minus 2,5 Grad Celsius sinkt. Diese Veränderung hat zur Folge, dass das kalte Schelfwasser tief unter der Eisplatte nicht gefriert, sondern seine Restwärme an das Eis abgibt und noch weiter abkühlt. Aus diesem Wärmeverlust resultieren zwei Dinge: Zum einen entstehen unter dem Schelfeis die kältesten Wassermassen der Welt – das sogenannte Eisschelfwasser. Seine Temperatur beträgt am Anfang minus 2,5 Grad Celsius. Zum anderen schmilzt

durch die Wärme des einströmenden Wassers das Schelfeis von unten (basales Schmelzen). Wo Eis schmilzt, wird wiederum Süßwasser freigesetzt, welches das superkalte Eisschelfwasser nun verdünnt. Seine Dichte nimmt ab. Es beginnt, an der Unterseite des Schelfeises entlang aufzusteigen. Das heißt, es wandert zurück zur Schelfeiskante.

Auf dem Weg dorthin steigt der Gefrierpunkt des Eisschelfwassers durch den abnehmenden Druck kontinuierlich an. Infolgedessen bilden sich im superkalten Eisschelfwasser salzfreie Eiskristalle, die aufsteigen, sich an der Schelfeisunterseite anlagern und dort festfrieren. Forscher bezeichnen dieses neue Eis als marines Schelfeis. Die restlichen Wassermassen wandern weiter. Messungen an der Schelfeiskante haben ergeben, dass das Eisschelfwasser mit einer Temperatur von weniger als minus 2,2 Grad Celsius unter dem Schelfeis hervorströmt und anschließend Teil des Antarktischen Tiefenwassers wird. Schelfeis und Ozean verbindet demzufolge eine starke Wechselwirkung. Während der Ozean die Dicke des Schelfeises reguliert, kühlt das Schelfeis die wandernden Wassermassen der Schelfmeere und treibt die thermohaline Zirkulation mit an.



2.35 > Wenn im Weddellmeer Meereis gebildet wird, entsteht kaltes, salzreiches Schelfwasser, welches unter das Filchner-Ronne-Schelfeis gelangt und sich dort noch weiter abkühlt. Anschließend fließt es als superkaltes Eisschelfwasser den Kontinentalhang hinab.

nen bislang nur in Computersimulationen dargestellt werden. Es wurden auch erste Versuche unternommen, entsprechende Informationen aus Satellitendaten abzuleiten. Messmethoden, mit denen sich Seenketten oder Flussnetze großflächig nachweisen und abbilden ließen, existieren bislang jedoch noch nicht.

Wie Schelfeis den Gletscherfluss bremsen

Mehr als die Hälfte der Antarktisküste ist von Schelfeisen gesäumt. Die mehr als 300 schwimmenden Gletscherzungen sind die Ausläufer eines oder mehrerer Gletscher, die ihre zusammenhängenden Eismassen langsam auf das Südpolarmeer hinauschieben. Die Kante des Larsen-C-Schelfeises im westlichen Weddellmeer beispielsweise bewegt sich pro Jahr etwa 700 Meter. Die Eisplatte wird in ihrer Ausdehnung nur dadurch begrenzt, dass sich in regelmäßigen Abständen Eisberge von der Abbruchkante lösen und das Schelfeis auf diese Weise Eis verliert. Bei großen Schelfeisen kann es mehr als tausend Jahre dauern, bis ein Eiskristall einmal durch das gesamte Schelfeis gewandert ist und an Bord eines Eisbergs den letzten Abschnitt seiner Reise antritt.

Die Schelfeise der Antarktis sind in der Regel zwischen 300 und 2500 Meter dick, wobei die Eisplatten dünner werden, je weiter sie auf das Meer hinausreichen. Am mächtigsten sind sie an der sogenannten Gründungslinie – also dort, wo das Eis auf seinem Weg vom Land auf das Meer den Kontakt zum Untergrund verliert und aufschwimmt. In der Südpolarregion bedecken Schelfeise eine Gesamtfläche von 1,3 Millionen Quadratkilometern. Das größte Schelfeis, das Rossschelfeis im Rossmeer, ist fast so groß wie Spanien.

Schelfeise speisen sich in erster Linie aus dem Eis der dahinterliegenden Gletscher und Eisströme. Ihr Volumen nimmt aber auch zu, indem Schnee auf das Schelfeis oder das vorgelagerte Meereis fällt und sich mancherorts zu Firn und Eis verdichtet. Anderenorts gefriert Meerwasser an der Schelfeisunterseite und lässt die Eiszungen wachsen. Schelfeise verlieren Eis zum einen durch das Kalben von Eisbergen, zum anderen schmelzen warme Wassermassen die Eiszungen von unten an. Diesen Prozess bezeichnen Forscher als basales Schmelzen der Schelfeise.

Verliert das Schelfeis weniger oder genauso viel Eis, wie über die Gletscher nachfließt, befindet es sich im Gleichgewicht. In diesem Zustand überdauern die schwimmenden Eiszungen mehrere Jahrtausende. Nehmen die Verluste jedoch abrupt zu, besteht Grund zur Sorge, denn Schelfeise erfüllen eine elementare Aufgabe im Klimasystem der Erde. Sie bremsen das Nachrutschen weiterer Eismassen aus dem Inland und somit den Anstieg des Meeresspiegels.

Um diese Rolle genau zu verstehen, muss man sich ihre Entstehung nochmals vor Augen führen. Als schwimmende Ausläufer eines oder mehrerer Gletscher haben die Eismassen der Schelfeise eine lange Reise hinter sich – vom Hochplateau im Landesinnern der Antarktis über Eisströme und Gletscher hinunter bis zum Meer. Wenn sie dann an der Küste als große Eisplatte aufschwimmen und auf das Meer hinausgeschoben werden, bleibt das Eis hier und da an Inseln oder Felsen hängen. Manchmal schieben sich Schelfeise auch über flache Hindernisse hinweg oder laufen gegen eine Insel, die dann wie ein Bremsklotz den Eisfluss stoppt. Je dicker ein Schelfeis ist, desto mehr Rückhaltekraft kann es auf die Eismassen im Inland ausüben.

Wie groß der Druck ist, dem die Schelfeise standhalten müssen, wird vielleicht deutlich, wenn man sich vorstellt, dass 74 Prozent des Inlandeises der Antarktis über Gletscher und Schelfeise ins Meer gelangt. Als im Jahr 2002 das Larsen-B-Schelfeis an der Antarktischen Halbinsel in Abertausende Eisberge zerbrach und somit seine Bremsfunktion einbüßte, nahm das Fließtempo der dahinterliegenden Gletscher in den 18 Folgemonaten um das Drei- bis Achtfache zu.

Schwimmende Gletscherzungen gibt es natürlich auch in der Arktis – vor allem in Grönland und an der Küste der kanadischen Ellesmereinsel. Diese fest mit dem Land verbundenen Eisflächen werden jedoch größtenteils nicht als Schelfeise bezeichnet, weil sie vor allem in Fjorden vorkommen und somit durch Land in ihrer Breitenausdehnung begrenzt werden. Aus diesem Grund nennen Fachleute dieses schwimmende Landeis einfach Eiszunge. Eine Ausnahme bildet das sogenannte Ward-Hunt-Eisschelf vor der Küste der Ellesmereinsel. Es ist aus zusammengedrücktem Meereis entstanden, auf welches dann Schnee gefallen ist, der sich zu Eis verdichtet hat. Diese

Eisfläche ist demzufolge kein Landeis und unterscheidet sich damit grundlegend von den großen Eisschilden der Antarktis.

Die Wanderrouten der Eisberge

Das Kalben von Eisbergen an der Abbruchkante eines Gletschers oder Schelfeises ist ein ganz natürlicher Prozess. Schelfeise in der Antarktis produzieren in regelmäßigen Abständen Tafelberge mit einer Grundfläche, die so groß ist, dass Metropolen wie Hamburg oder Berlin darauf Platz finden könnten. Die Größe eines Eisbergs entscheidet zumindest in der Antarktis auch über sein weiteres Schicksal. Eisberge, die nicht länger und breiter als zwei Kilometer sind, treiben innerhalb weniger Monate von der Schelfeis- oder Gletscherkante weg und aus dem Küstenbereich heraus. Der ablandige Wind drückt sie auf das offene Meer hinaus, wo sie dann im Lauf von ein bis zwei Jahren in kleinere Stücke zerbrechen und schmelzen.

Bei Eisbergen mit einem Durchmesser von mehr als zwei Kilometern spielt der ablandige Wind dagegen nur eine Nebenrolle. Ihre Bewegung wird vor allem durch das Eigengewicht angetrieben. Dazu muss man wissen, dass das Südpolarmeer keine ebene Fläche ist. Seine Oberfläche steigt aufgrund der vorherrschenden Winde zur Küste hin um bis zu 50 Zentimeter an. Große, frisch gekalbt Eisberge rutschen also zunächst diese schräge Meeresoberfläche hinunter. Ihre Rutschbahn verläuft dabei jedoch nicht als gerade Linie, sondern schlägt aufgrund der Corioliskraft einen Bogen nach links. Die Eisberge werden also zur Küste hin abgelenkt. Das bedeutet, sie wandern eine lange Zeit im kalten Küstenstrom und erreichen oft erst Jahre später wärmere, nördlich gelegene Gewässer, in denen sie dann zerfallen und schmelzen.

Wie schnell die Eisberge auf ihrer Wanderung unterwegs sind, hängt auch von der Topografie des Meeresbodens ab. Große Eisberge laufen regelmäßig auf Grund und bleiben dann eine unbestimmte Zeit lang stecken. Außerdem frieren die Giganten im Winter oft im Meereis ein, sodass die Wellen nicht mehr gegen ihre Flanken schlagen können und die Erosion gedämpft wird. Wissenschaftler haben die Wanderpfade der großen antarktischen Eisberge nachverfolgt und in Computermodellen berech-

net. Je nachdem, in welchem Meeresgebiet die Riesen gekalbt sind, nehmen sie eine von vier „Autobahnen“, die alles treibende Eis – also Meereis und Eisberge – in wärmere Gefilde führen. GPS-Daten belegen, dass es einem großen Eisberg sogar schon gelungen ist, die Antarktis einmal zu umrunden. Er war im Weddellmeer gestartet, an der Ostküste der Antarktischen Halbinsel Richtung Norden getrieben, dann aber Richtung Osten abgelenkt und einmal um den Südkontinent gewandert, bevor er nördlich der Antarktischen Halbinsel dann endgültig schmolz.

Von den Gletscherzungen der Arktis kalbt anstelle weniger großer Eisberge oft eine Anzahl vieler kleinerer. Der Wind drückt sie aus den Fjorden auf das offene Meer hinaus, wo sie dann meist im Küstenstrom Richtung Süden treiben. Viele Eisberge, welche die Schifffahrtslinien vor der Südküste Neufundlands erreichen, stammen vom Jakobshavn-Eisstrom in Westgrönland. Allein im Jahr 2018 trieben mehr als 500 Eisberge von der Westküste Grönlands bis vor die Küste Neufundlands und Labradors. Im Rekordjahr 1984 waren es 2002. Die meisten benötigen ein bis drei Jahre für diese Wanderung.

Forscher vermuten einen Zusammenhang zwischen den vorherrschenden atmosphärischen Strömungsverhältnissen über dem Nordatlantik und der Zahl jener Eisberge, die so weit nach Süden treiben. Wehen im Winter auflandige Winde entlang der Küste Labradors, gelangt wärmere Meeresluft in diese Region. Sie verhindert die Bildung von Meereis, weshalb die Eisberge auch im Winter der zerstörerischen Kraft der Wellen ausgesetzt sind. Gleichzeitig drückt sie der auflandige Wind in flachere Gewässer, wo die Eismassen dann auf Grund laufen.

Kehren sich die großen Strömungsmuster um, weht ein starker kalter Westwind über Labrador hinweg. In seinem Schlepptau gelangt eisige Luft in die Region. Das Meerwasser gefriert zu Meereis, welches die Eisberge vor einem weiteren Zerfall bewahrt. Im darauffolgenden Sommer treten sie dann unbehelligt und in großer Zahl ihre Wanderung Richtung Süden an. Doch auch an der Ostküste Grönlands kalben Eisberge. Der Helheimgletscher beispielsweise verlor am 22. Juni 2018 auf einen Schlag einen sechs Kilometer langen Streifen Eis. Es war der grönländweit größte Eisbergabbruch in den zurückliegenden zehn Jahren.

Conclusio

Eine Kettenreaktion mit frostigem Ende

Dass es in den Polargebieten so kalt ist, ist das Resultat eines sich selbst verstärkenden Prozesses, in dem verschiedene Faktoren ineinandergreifen. Ausgangsbasis ist, dass in den Polarregionen deutlich weniger Sonnenenergie die Erdoberfläche erreicht als beispielsweise in Mitteleuropa oder am Äquator. Gründe dafür sind der flache Einfallswinkel des Sonnenlichts, die Neigung der Erdachse sowie die Rotation unseres Planeten um die Sonne. Zusammengenommen führen die Faktoren dazu, dass beide Polarregionen im Vergleich zur restlichen Welt energetisch unterversorgt sind und in der Zeit der Polarnacht ganz von der Wärmequelle Sonne abgeschnitten werden.

Während die Polargebiete wenig Sonnenstrahlung abbekommen, erhalten die Tropen viel, was zu einem deutlichen Temperaturgegensatz zwischen den Regionen führt. Um diese Divergenz auszugleichen, entstehen die uns heute bekannten großen Luft- und Meeresströmungen. Sie verteilen die Wärme aus den Tropen über den Globus und bestimmen auf diese Weise die Wetterabläufe rund um den Erdball. Ohne die Kühlkammern im hohen Norden und tiefen Süden gäbe es die globalen Kreisläufe von Luft und Wassermassen nicht. Außerdem fällt auf, dass sich in beiden Hemisphären starke Windbänder bilden, die wie Schutzwälle verhindern, dass Wärme aus den Tropen bis weit in die Polargebiete vorstoßen kann.

Die Eiseskälte in der Arktis und Antarktis hat allerdings auch zur Folge, dass der Niederschlag in beiden Regionen vor allem in Form von Schnee fällt und das Oberflächenwasser der Polarmeere im Winter großflächig zu Eis gefriert. Da die hellen Schnee- und Eisdecken ein hohes Rückstrahlvermögen besitzen, die sogenannte Albedo, spiegeln sie einen Großteil der Strahlung der Sonne zurück, sodass diese nicht in der Lage ist, die Erdoberfläche zu erwärmen.

Auf diese Weise verstärken die Schnee- und Eisflächen die Auskühlung der Polargebiete. Wissenschaftler nennen diesen Effekt eine positive Rückkopplung.

Ein weiterer Grund für die niedrigen Temperaturen ist die Tatsache, dass kalte Luft nur wenig Wasserdampf aufnehmen kann. Vor allem den Luftmassen über der zentralen Antarktis fehlen deshalb ein wichtiger Wärmespeicher und die Möglichkeit, eine dicke Wolkendecke auszubilden. Diese könnte die Auskühlung begrenzen. Stattdessen aber verstärkt die trockene Luft den Kälteeffekt und schafft im Zusammenspiel mit den anderen Faktoren beste Voraussetzungen für die Entstehung riesiger Eisschilde, Gletscher und Meereisflächen.

Die verschiedenen Formen des polaren Eises und ihre hohe Albedo sind elementare Komponenten im Kühl- und Klimasystem unserer Erde. Sie regulieren chemische und biologische Kreisläufe und stehen in enger Wechselwirkung mit dem Ozean, der Atmosphäre und dem Land, wobei es vielerlei geografisch bedingte Unterschiede zwischen Arktis und Antarktis gibt. Im Arktischen Ozean mit seinen flachen Schelfmeeren zum Beispiel zirkulieren die Wassermassen auf ganz andere Weise als im Südpolarmeer, welches als Ringozean einen großen Kontinent umgibt. Solche regionalen Besonderheiten wirken sich auch auf die polaren Eismassen aus. In der Antarktis führen sie unter anderem dazu, dass die Meer eisdecke des Südpolarmeers im Sommer großflächig schmilzt. In der Arktis dagegen übersteht etwas weniger als die Hälfte des Meereises den Sommer, sodass Forscher von einer dauerhaften Meereisdecke sprechen. Verschieden sind auch die Niederschlagsmengen in der Arktis und Antarktis, sodass die Eisschilde Grönlands und der Antarktis in unterschiedlichem Tempo wachsen. Eines aber haben die Eismassen beider Regionen auf jeden Fall gemein: Sie reagieren ausgesprochen empfindlich auf steigende Temperaturen.

3 Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Polarregionen

> Die globale Erwärmung trifft die Polarregionen bislang in unterschiedlichem Maß. Während die Arktis einen fundamentalen Wandel durchläuft und ihre polaren Alleinstellungsmerkmale Stück für Stück verliert, konzentrieren sich die sichtbaren Veränderungen in der Antarktis vor allem auf zwei Regionen: die Westantarktis und die Antarktische Halbinsel. Doch auch die Ostantarktis reagiert auf die zunehmende Wärme.



Die Pfade der Wärme

> Der Klimawandel hinterlässt in den Polargebieten auffälligere Spuren als im restlichen Teil der Erde. Das liegt zum einen an der besonderen Sensibilität der Eiswelten für Wärme. Zum anderen wird die durch Treibhausgase angestoßene Erwärmung unseres Planeten vor allem in der Arktis durch so viele positive Rückkopplungen verstärkt, dass die Temperaturen im Nordpolargebiet doppelt so schnell steigen wie in der übrigen Welt.

Das neue Gesicht der Polarregionen

Die Polarregionen verändern im Zuge des Klimawandels ihr Antlitz – und das schneller und zum Teil deutlich spürbarer als in vielen anderen Gebieten der Welt. Die Folgen der Erwärmung zeigen sich bislang vor allem in der Arktis, wo das Meereis und die Schneedecke großflächig schwinden, das Meerwasser in vielen Gebieten wärmer wird, der dauergefrorene Boden immer häufiger und länger anhaltend auftaut und die Gletscher in Alaska, Kanada, Grönland, Island und Norwegen allesamt viel Eis verlieren. In der Antarktis dagegen unterscheiden sich die Trends von Region zu Region deutlich. Während Forscher zum Beispiel an der Antarktischen Halbinsel seit Jahrzehnten einen Rückzug der Schelfeise und Gletscher, abneh-

mendes Meereis und steigende Lufttemperaturen beobachten – Entwicklungen, auf die auch die Entstehung des Ozonlochs einen Einfluss hatte –, häufen sich in der Ostantarktis dagegen erst seit Kurzem die Anzeichen eines Wandels. Im Zentrum des Kontinents gibt es dagegen noch keine Hinweise auf eine Erwärmung. Hier sind die Temperaturen gleich geblieben oder infolge des Ozonabbaus sogar minimal gesunken.

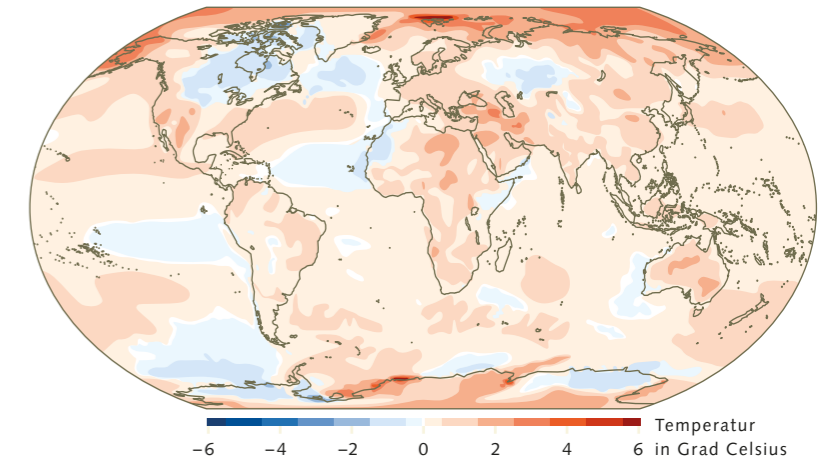
Erschwerend kommt für beide Polargebiete hinzu, dass Schnee, Eis, Meer, Land und Atmosphäre so mannigfaltig aufeinander einwirken, dass sich häufig nicht genau sagen lässt, was Ursache und was Wirkung ist. So stellt sich in der Arktis zum Beispiel die Frage: Schmilzt das Meereis, weil der Ozean wärmer geworden ist – oder nimmt das Meer mehr Wärme auf, weil die Isolation durch

das Meereis fehlt? Beides spielt vermutlich eine Rolle, denn die Veränderungen in den Polargebieten verstärken sich gegenseitig, vor allem in der Arktis. Auslöser all dessen – und da besteht kein Zweifel – ist jedoch eine grundsätzliche Erwärmung der Erde, hervorgerufen durch den massiven Ausstoß von Treibhausgasen.

Tauwetter am Nordpol

Das Jahr 2015 endete mit einem meteorologischen Paukenschlag in der Arktis: Am 29. Dezember stieg die Oberflächentemperatur am Nordpol binnen eines Tages von minus 26,8 Grad Celsius auf minus 0,8 Grad Celsius, und das mitten im arktischen Winter. Vermutlich regnete es am Silvestervortag sogar am nördlichsten Punkt der Erde, denn meteorologische Messungen in Ny-Ålesund, Spitzbergen, ergaben, dass ein Sturm warme, feuchte Luft aus dem Nordatlantik Richtung Nordpol transportiert hatte. Meereisbojen, die zur selben Zeit auf Höhe des 85. Breitengrads im Arktischen Ozean trieben, bestätigten diese Beobachtung. Sie registrierten eine Durchschnittstemperatur von 0,7 Grad Celsius. Demzufolge war es am 30. Dezember 2015 am Nordpol wärmer als zur gleichen Zeit in einigen Teilen Mitteleuropas.

Vor zwei Jahrzehnten noch wäre ein solch bemerkenswerter Wärmeeinbruch in der Arktis eine Ausnahmeerscheinung gewesen. Heutzutage aber häufen sich die Meldungen über außergewöhnliche Wetterereignisse im hohen Norden – vor allem im Winter. Im Februar 2017 beispielsweise regnete es in Spitzbergens nördlichster Siedlung Ny-Ålesund bei einer Tagestemperatur von zwei Grad plus. Anstelle polarer Eiseskälte erlebten die Bewohner des Wissenschaftsdorfs also ein typisch norddeutsches Schmuddelwetter. Ein Jahr später, im Februar 2018, führten starke ablandige Winde sowie überdurchschnittlich warme Lufttemperaturen vor der Nordküste Grönlands zu einer Premiere. Das alte, an der Küste festgefrorene Meereis brach auf, sodass eine große Polynia entstand. Am 24. Februar 2018, als die Polynia ihre größte Ausdehnung erreichte, verzeichnete Grönlands nördlichste Wetterstation am Kap Morris Jesup eine Tageshöchsttemperatur von plus 6,1 Grad Celsius. Am Berliner Flughafen Tegel lag die Höchsttemperatur am selben Tag nur knapp über dem Gefrierpunkt.



All diese Wetterkapriolen passen in ein Muster, welches die Meteorologen an der Polarforschungsstation AWIPEV (Deutsch-französische Arktisforschungsstation, betrieben vom Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung [AWI] und dem Polarinstitut Paul-Émile Victor [IPEV]) in Ny-Ålesund in ihren Langzeitbeobachtungen gefunden haben. Die Luft über Spitzbergen hat sich in den zurückliegenden 35 Jahren deutlich erwärmt, und das nicht nur am Boden, sondern auch in der Höhe. Besonders stark fiel die Erwärmung des atlantischen Teils der Arktis in den Wintermonaten aus: In der kalten Jahreszeit ist es auf Spitzbergen heute im Durchschnitt 3,1 Grad Celsius wärmer als noch vor zehn Jahren. Die Sommer dagegen erwärmten sich in einem geringeren Maß, sodass die Lufttemperatur in Ny-Ålesund auf das ganze Jahr gerechnet um 1,4 Grad Celsius pro Dekade gestiegen ist.

Ähnlich lautende Berichte gibt es aus nahezu allen anderen Teilen der Arktis – und ihre Kernaussage ist eindeutig: Das Nordpolargebiet hat sich in den zurückliegenden 50 Jahren mehr als doppelt so schnell erwärmt wie die restliche Welt – Trend anhaltend. Den höchsten Temperaturanstieg beobachteten Forscher dabei im Winter. Im Januar und Februar 2016 beispielsweise lag die Temperatur nördlich des 66. Breitengrads fünf Grad Celsius über dem Monatsdurchschnittswert der Jahre 1981 bis 2010. Von Oktober 2017 bis September 2018 war es arktisweit 1,7 Grad Celsius wärmer als im Vergleichszeitraum 1981 bis 2010.

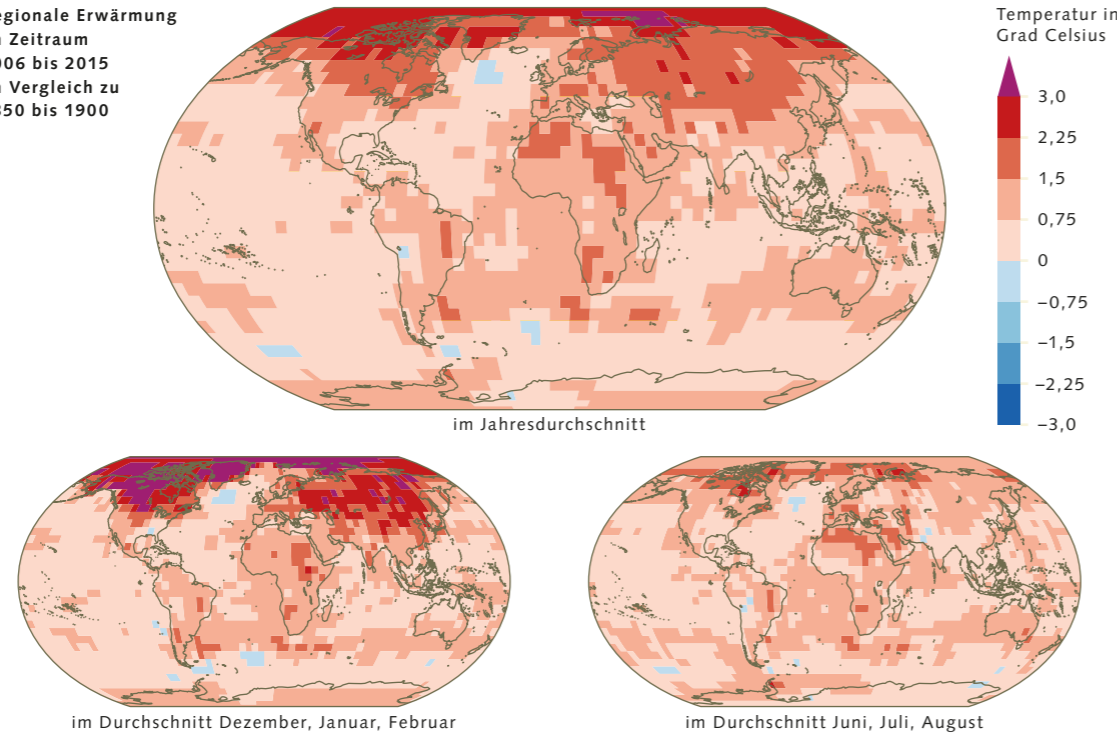
3.2 > Die überdurchschnittliche Erwärmung der Arktis setzte sich auch im Jahr 2018 fort. Von Februar 2018 bis Januar 2019 lag die gemittelte Oberflächentemperatur in großen Teilen des Nordpolargebietes um bis zu fünf Grad Celsius über den Durchschnittswerten von 1981 bis 2010.

3.1 > Wenn Eisberge an ihrer Oberfläche schmelzen, bilden sie untrügliche Merkmale aus. Eines sind Eiszapfen, die aus wiedergefrorenem Schmelzwasser bestehen; ein anderes sind Pfützen oder Tümpel, in denen sich Schmelzwasser sammelt.



3.3 > Die Erde erwärmt sich im Zuge des Klimawandels nicht gleichmäßig. Im Zeitraum von 2006 bis 2015 beispielsweise stiegen die Temperaturen in der Arktis doppelt so schnell wie in der restlichen Welt, wobei vor allem die Winter im Nordpolargebiet wärmer wurden. Ihre Durchschnittstemperatur lag bis zu mehr als drei Grad Celsius über den Vergleichswerten der Jahre 1850 bis 1900.

Regionale Erwärmung im Zeitraum 2006 bis 2015 im Vergleich zu 1850 bis 1900



Treibhausgase heizen dem Planeten Erde ein

Die Erwärmung der Erde ist menschengemacht und auf den ungebremsten Ausstoß von Treibhausgasen wie Kohlendioxid, Methan und Lachgas zurückzuführen. Seit Beginn der Industrialisierung hat die Menschheit schätzungsweise 2220 Milliarden Tonnen Kohlendioxid in die Atmosphäre entsorgt (Zeitraum 1876 bis Ende 2017). Das langlebige Treibhausgas entsteht in erster Linie bei der Verbrennung fossiler Rohstoffe wie Kohle, Erdöl und Erdgas. Es wird allerdings auch freigesetzt, wenn Zement hergestellt wird, Feuchtgebiete trockengelegt oder Waldgebiete abgeholzt und als Landflächen für die Landwirtschaft und die Tierhaltung genutzt werden. Die Konzentration des Gases in der Erdatmosphäre ist auf diese Weise in den zurückliegenden Jahrhunderten um das 1,5-fache gestiegen. Im Jahr 1750 lag sie bei einem Wert von 277 parts per million (ppm), aktuelle Messungen ergeben eine Konzentration von rund 410 ppm.

Durch die Anreicherung von Kohlendioxid, Methan und Lachgas in der Atmosphäre werden die Selbstkühlungsmechanismen des Planeten ausgebremst. Das heißt,

die Erdoberfläche kann große Anteile der einfallenden Sonnenenergie nicht mehr so einfach als langwellige Wärmestrahlung in das Weltall zurückstrahlen – und es kommt zu einer Art Wärmestau in Bodennähe. Dieser bringt das Klimasystem der Erde spätestens seit dem Jahr 1970 aus dem Gleichgewicht, denn der Planet nimmt seitdem mehr Strahlung auf, als er abstrahlen kann. Berechnungen zufolge beträgt das Strahlungsplus an Sonnenenergie seitdem im Mittel rund 0,4 Watt pro Quadratmeter.

Rund 93 Prozent dieser zusätzlichen Strahlungsenergie haben in den zurückliegenden Jahrzehnten die Ozeane aufgenommen und in ihren Tiefen verteilt. Die restliche Energie führte zur Erwärmung der Luft und der Kontinente, sodass die globale mittlere Oberflächentemperatur der Erde in den vergangenen 120 bis 170 Jahren um etwa ein Grad Celsius gestiegen ist. Allein das Treibhausgas Kohlendioxid verantwortet rund 50 Prozent dieser Erwärmung. Methan trägt zu 29 Prozent bei und Lachgas zu etwa fünf Prozent. Die restlichen 16 Prozent entfallen auf Stoffe wie zum Beispiel Kohlenstoffmonoxid, Halogen- und Fluorchlorkohlenwasserstoffe sowie Rußpartikel.

Zettajoule
Zettajoule ist eine Maßeinheit für besonders große Energiemengen, die sich kaum mehr in der sonst für Energie üblichen Grundeinheit Joule angeben lassen. Ein Zettajoule entspricht 10^{21} Joule.

Dabei hat sich die Welt allerdings nicht überall gleichermaßen erwärmt. Das liegt an der Verteilung der Land- und Meeresflächen. Die Sonne heizt Landflächen und die darüberliegenden Luftschichten schneller auf als große Meere. Gleichzeitig aber speichert der Erdboden weniger Energie als Meerwasser und kühlt sich demzufolge auch schneller wieder ab. Die Ozeane reagieren deshalb deutlich langsamer auf Klimaveränderungen als die Atmosphäre. Auch der kühlende Effekt der antarktischen Eismassen spielt wohl eine wichtige Rolle. Ihr weitreichender Einfluss auf das Klima der südlichen Hemisphäre könnte mit ein Grund sein, weshalb sich die Folgen des Klimawandels auf der landlastigeren Nordhalbkugel früher und deutlicher zeigten als auf der meerlastigen Südhalbkugel. Während zum Beispiel in der Arktis schon in den 1830er-Jahren erste Anzeichen auf eine Erwärmung hindeuteten, blieben die Temperaturen in Australien und Südamerika noch über die Jahrhundertwende hinweg konstant. Im Südpolargebiet dauerte es sogar bis in die 1950er-Jahre, bis Meteorologen steigende Temperaturen auf der Antarktischen Halbinsel und in der Westantarktis vermeldeten.

Leicht erhöhte örtliche Temperaturen sind allerdings noch nicht gleichbedeutend mit einem generellen Klimawandel. Von diesem sprechen Wissenschaftler erst, wenn in einer Region die Temperaturkurve deutlich und anhaltend – das heißt, über einen Zeitraum von mindestens 30 Jahren – über jene Grenzen hinausschießt, die zuvor durch die natürlich auftretenden Klimaschwankungen definiert wurden. In der Arktis passierte das bereits in den 1930er-Jahren und damit früher als in jeder anderen Region der Welt. Auf den weiteren Plätzen folgten die Tropen und die mittleren Breiten der Nordhalbkugel. In beiden Gebieten zeigte sich das deutliche Erwärmungssignal erstmals in den 1950er-Jahren, gefolgt von Australien und Südostasien, wo sich die Hinweise auf den Klimawandel vor rund 60 Jahren verdichteten.

In der restlichen Welt, mit Ausnahme der zentralen Antarktis, ist die globale Erwärmung seit Beginn des 21. Jahrhunderts in vollem Ausmaß zu spüren. Seitdem häufen sich die Temperaturrekordmeldungen, und große Klimaforschungsinstitutionen führen eine Rangliste der wärmsten Jahre. Sie wird bislang angeführt von den Jahren 2015, 2016, 2017 und 2018. Die Arktis für sich genommen erlebte ihre fünf wärmsten Jahre von 2014 bis 2018.

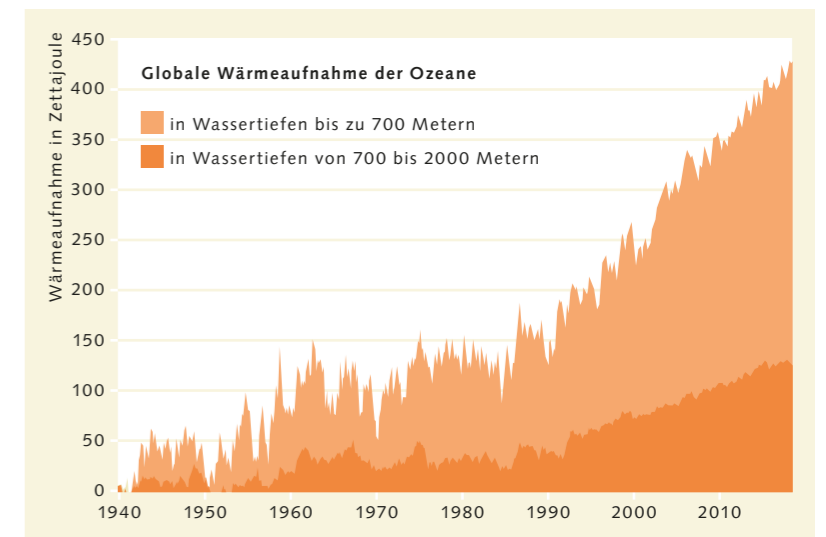
Die Ozeane werden wärmer

Dass die globale Erwärmung bislang mit rund einem Grad Celsius vergleichsweise moderat ausgefallen ist, liegt vor allem an den Weltmeeren. Zum einen haben die Ozeane in der Vergangenheit 30 Prozent des bislang vom Menschen freigesetzten Kohlendioxids aufgenommen und den Treibhauseffekt somit spürbar verlangsamt. Zum anderen verfügen die Weltmeere über eine enorme Wärmespeicherkapazität. Diese ergibt sich aus den physikalischen Eigenschaften des Salzwassers sowie aus der schieren Wassermenge in den Ozeanen. Ein kleines Rechenbeispiel: Erwärmen sich die Weltmeere allesamt um ein Grad Celsius, wäre dafür 1000-mal mehr Wärmeenergie notwendig, als man gebraucht hätte, um die Atmosphäre im gleichen Maß zu erwärmen.

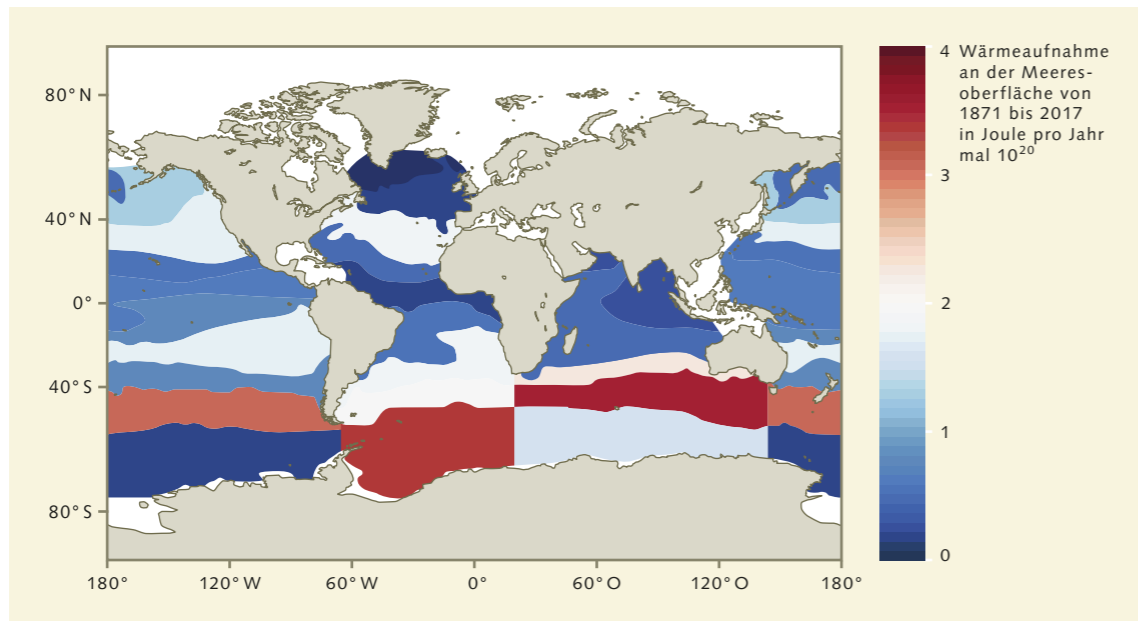
Außerdem reagieren die Ozeane sehr träge auf Umweltveränderungen, weil ihre Wassermassen zirkulieren und sich auf dem Weg in die Polarregionen immer wieder abkühlen. In der Regel vergehen deshalb zehn Jahre, bis sich das Oberflächenwasser des Weltozeans an global steigende Lufttemperaturen anpasst. Jahrhunderte bis Jahrtausende dagegen ziehen ins Land, bis die Wärme auch die Tiefsee erreicht.

Neuen Erkenntnissen zufolge haben die Ozeane seit dem Jahr 1871 rund 436 Zettajoule an Wärmeenergie aufgenommen. Das entspricht der tausendfachen Energiemenge, welche die Menschheit heutzutage in einem Jahr

3.4 > Die Weltmeere nehmen ständig riesige Mengen an Wärmeenergie auf. Wurde diese Wärme zunächst fast ausschließlich in oberen Wasserschichten gespeichert, erreicht sie mittlerweile nachweislich auch tiefere Wasserschichten.



3.5 > Die Weltmeere nehmen nicht alle in gleichem Maß Wärmeenergie auf. Teilt man die Ozeane in mehrere Messgebiete auf, so lassen sich die Unterschiede gut erkennen. Speziell die Gebiete weit im Süden nehmen besonders viel Wärme auf.



verbraucht. Allein in den zurückliegenden 25 Jahren haben die Ozeane so viel Wärme absorbiert, dass diese Energiemenge theoretisch ausgereicht hätte, die Meere um 16,25 Grad Celsius aufzuheizen – vorausgesetzt, sie wären nur zehn Meter tief. Da die Ozeane im Durchschnitt jedoch fast 3700 Meter tief sind, beschränkt sich die Erwärmung auf das bislang beobachtete Maß.

Nichtsdestotrotz ist der Trend eindeutig. Seit Jahrzehnten wird das Wasser in allen Ozeanen kontinuierlich wärmer. Die meiste Wärmeenergie verbleibt in den oberen 700 Metern der Wassersäule, wobei erwähnt werden muss, dass die für diese Messungen eingesetzten Temperatursonden bis zum Jahr 2005 gar nicht tiefer tauchen konnten. Seitdem kommen allerdings auch autonome Treibbojen, die sogenannten ARGO-Gleiter (Array for Realtime Geostrophic Oceanography, Echtzeit-Beobachtungssystem für **geostrophische** Ozeanografie), zum Einsatz. Ihre Daten legen offen, dass sich auch die Wassermassen in einer Tiefe von 700 bis 2000 Metern flächendeckend deutlich erwärmen – mit potenziell gravierenden Folgen für das weltweite Förderband der Meeresströmungen. Die thermohaline Zirkulation kann nämlich auf zweierlei Weise durch die Meerese Erwärmung geschwächt werden. Zum einen verringert die Wärme die Dichte des Wassers durch thermische Ausdehnung. Das Wasser wird

also leichter. Der gleiche Effekt stellt sich zum anderen ein, wenn Meerwasser durch Süßwasser verdünnt wird, weil mehr Regen fällt oder auf Grönland und in der Antarktis die Gletscher schmelzen. Beide Faktoren, sowohl der Süßwassereintrag als auch der Anstieg der Wassertemperatur, erschweren das Absinken von Wassermassen im Nordatlantik und im Südpolarmeer und können so die Motoren der thermohalinen Strömungen drosseln.

Die Spur der Wärme in den Polarmeeren

Für die Polarregionen bedeutet die Erwärmung des Weltozeans vor allem eines: Mit den polwärts fließenden Meeresströmungen erreicht heute mehr Wärme als früher die Arktis oder Antarktis. Der atlantische Einstrom in den Arktischen Ozean beispielsweise wird seit den frühen 1990er-Jahren nachweislich wärmer. Um die Wanderung der Wärme in den Arktischen Ozean nachzuverfolgen, haben deutsche und norwegische Forscher im Jahr 1997 auf Höhe des 79. Breitengrades Nord eine Kette ozeanografischer Messpunkte einmal quer über die Framstraße gezogen – von der Westküste Spitzbergens bis zur Nordostküste Grönlands. Diese sogenannte Verankerungskette erfasst an jeder ihrer 16 Messstellen die Temperatur, die Strömungsgeschwindigkeit und den Salzgehalt der ein-

und ausströmenden Wassermassen über die gesamte Wassersäule. Die Messdaten zeigen: Das aus dem Nordatlantik kommende Wasser des Westspitzbergenstroms ist heute im Durchschnitt ein Grad Celsius wärmer, wenn es durch die Framstraße in den Arktischen Ozean fließt, als noch zu Beginn der Langzeitmessungen vor 20 Jahren. Die Spuren dieses wärmeren Wassers lassen sich bereits im gesamten Eurasischen Becken nachweisen.

Gestiegen ist auch die Meeresoberflächentemperatur in den meisten eisfreien Regionen des Arktischen Ozeans, weshalb das Meer heutzutage nicht nur später im Jahr gefriert; das Meereis der Arktis schmilzt auch früher im Jahr, sodass große Flächen des Nordpolarmeers im Sommer länger eisfrei sind und somit mehr Sonnenenergie absorbieren können, wodurch ihre Temperatur weiter steigt.

Der Südliche Ozean nimmt im Klimasystem der Erde eine Schlüsselposition ein, denn ohne die Abkühlung und Umwälzung der Wassermassen in den Gewässern der Antarktis wären die Ozeane gar nicht in der Lage, so viel Wärme und Treibhausgase zu speichern, wie sie es mittlerweile tun. Das Absinken schweren Wassers stellt somit die einzige Möglichkeit dar, Wärme und Kohlendioxid aus den oberen Meeresschichten für lange Zeit in die Tiefe zu verfrachten – und in der Antarktis geschieht das in einem deutlich größeren Umfang als im Nordatlantik. Forscher dokumentieren im Südpolarmeer seit den 1950er-Jahren einen flächendeckenden Anstieg der Wassertemperaturen. Sein Ausmaß deutet darauf hin, dass das Meer südlich des 40. Breitengrads deutlich mehr Wärme aus der Atmosphäre aufgenommen hat als alle anderen Meeresgebiete zusammen.

Das jahrzehntelange Einlagern großer Wärmemengen hat noch weitere Folgen. Deutsche Polarforscher konnten bei ihren Langzeitmessungen entlang des Nullmeridians feststellen, dass sich im Weddellmeer die gesamte Wassersäule, insbesondere aber die tiefste Wasserschicht, das Antarktische Bodenwasser, seit den 1990er-Jahren erwärmt. Ähnliche Beobachtungen wurden auch in anderen Meeresregionen der Antarktis gemacht, sodass die Wissenschaftler inzwischen davon ausgehen, dass sich das Südpolarmeer in den zurückliegenden drei Jahrzehnten in Tiefen von mehr als 1000 Metern schneller erwärmt hat als der Weltozean im globalen Mittel.



3.6 > Der Kran eines Forschungsschiffs hievt eine Verankerungskette aus dem Meer, an der Geräte zur Wasserprobenentnahme (oben) und zum Sammeln von Phytoplankton (unten) eingehängt sind.

Ungeklärt ist bislang die Ursache dieser Erwärmung. Wird sie in erster Linie durch die wärmer werdende Atmosphäre über dem Südpolarmeer hervorgerufen? Wenn die Lufttemperatur steigt, kann das Meer weniger eigene Wärme an die Atmosphäre abgeben. Gleichzeitig verändern sich die Windverhältnisse über dem Meer, wodurch bestimmte Strömungen zu- oder abnehmen können, die dann wiederum die Tiefenwasserbildung beeinflussen. Oder wird der Anstieg der Wassertemperatur in der Tiefe eher durch die wärmeren Einströme in das Südpolarmeer hervorgerufen? Vermutlich spielen beide Faktoren eine Rolle.

Bemerkenswert ist, dass Forscher die antarktische Erwärmung des Tiefenwassers mittlerweile bis über den

Äquator hinaus Richtung Norden verfolgen können. Dort hin fließen die schweren Wassermassen, nachdem sie das unterste Stockwerk des Südpolarmeers gefüllt haben.

Mehr Nebel, mehr Wolken

Der Einstrom wärmeren Wassers sowie die steigenden Lufttemperaturen führen in den Polarregionen dazu, dass sich die Meere hier verstärkt erwärmen. Und je wärmer ein Ozean wird, desto mehr Wasser verdunstet an seiner Oberfläche. Der Wasserdampfgehalt der Luft steigt und damit sowohl der Treibhauseffekt als auch die Wahrscheinlichkeit, dass sich Nebel oder Wolken bilden. Beide Phänomene behindern vor allem in der Arktis das Abstrahlen von Wärmeenergie in das Weltall und verstärken somit die Erwärmung.

Im Frühling beispielsweise schmilzt infolge hoher Luftfeuchtigkeit und Wolkenbildung die Schneedecke auf dem arktischen Meereis früher, wodurch auch die Meereissschmelze zeitiger einsetzt. Im Sommer sorgen tief hängende Wolken und Nebel dafür, dass sich die Oberfläche des verbliebenen Meereises erwärmt. Modellergebnisse deuten darauf hin, dass eine geringe Meereisbedeckung im Herbst die Wolkenbildung über dem Arktischen Ozean zu verstärken scheint – mit dem Resultat, dass das neu entstandene Eis zum Anfang des Winters dünner ist als bei weniger Bewölkung.

Ob sich die Dicke, die Höhe oder die Konsistenz der Wolkendecke über Spitzbergen verändert hat, können die Meteorologen an der AWIPEV-Polarforschungsstation in

Ny-Ålesund noch nicht sagen, weil entsprechende Messungen erst seit wenigen Jahren durchgeführt werden. Von den seit 1993 täglich stattfindenden Wetterballonaufstiegen bis in 30 Kilometer Höhe aber wissen die Forscher, dass die Luft wärmer geworden ist und mehr Feuchtigkeit enthält. Das Inselklima sei heute auch im Winter eher maritim als wirklich arktisch extrem, berichten die Wissenschaftler.

Neuere Studien untermauern diesen lokalen Eindruck: Trends in der Bewölkung variieren zwar von Region zu Region, doch das Klima in der Arktis ist in vielen Gebieten nasser geworden. Die Luftfeuchtigkeit sowie die Niederschlagsmenge haben zugenommen. Forscher sehen darin Anzeichen dafür, dass heutzutage mehr Feuchtigkeit aus den mittleren Breiten in den hohen Norden gelangt. Für die Zukunft sagen sie eine weitere Zunahme voraus. Da wärmer werdende Luftmassen mehr Feuchtigkeit speichern, sei mit höheren Verdunstungsraten über den eisfreien Flächen des Arktischen Ozeans sowie mit mehr Niederschlägen zu rechnen. Letztere werden die Wasserpegel der arktischen Flüsse ansteigen lassen. Die Forscher erwarten außerdem, dass Sommerregen die Albedo des Meereises reduzieren und die Eisschmelze weiter vorantreiben werden.

Der Atlantik streckt seine Fühler aus

Besonders offensichtlich zeigen sich die wärmegetriebenen Veränderungen des Nordpolarmeers in der Barentssee, dem nordeuropäischen Eingangstor in den Arktischen

Ozean. Das 1,4 Millionen Quadratkilometer große Meeresgebiet zwischen Spitzbergen, Norwegen und dem russischen Inselarchipel Nowaja Semlja lässt sich seit jeher in zwei Regionen mit gegensätzlichen Meereisbedingungen und einem unterschiedlichen Aufbau der Wassersäule einteilen.

Die Wassermassen des nördlichen Teils schichten sich in typisch arktischer Manier übereinander. Das heißt, an der Meeresoberfläche treibt Meereis auf einer Schicht aus kaltem und eher salzarmem Wasser, die Deckschicht, darunter liegt eine zweite kalte, aber salzhaltigere Schicht, die Halokline. Beide schützen die Eisschollen vor den wärmeren Strömungen in der Tiefe. Die weiße Meereisdecke ihrerseits verhindert, dass die Sonne die oberste Wasserschicht im Lauf der Sommermonate großflächig erwärmt, indem sie den größten Teil der einfallenden Strahlung reflektiert.

Im südlichen Teil der Barentssee dagegen fehlen sowohl das Meereis als auch die kalte Oberflächenschicht. Hier strömt warmes, salzhaltiges Wasser aus dem Atlantischen Ozean direkt an der Meeresoberfläche Richtung Norden. Es gibt seine Wärme an die Atmosphäre ab und verhindert auf diese Weise, dass sich im Winter neues Meereis bilden kann. Gleichzeitig absorbiert die eisfreie Wasseroberfläche in den Sommermonaten viel Sonnenenergie. Im August 2018 beispielsweise betrug die Wassertemperatur an der Meeresoberfläche in der südlichen Barentssee elf Grad Celsius. Sie lag damit ein bis drei Grad Celsius über dem Sommer-Temperaturdurchschnitt der Jahre 1982 bis 2010 – und diese Erwärmung hat Folgen.

Studien belegen, dass nicht nur die Temperatur und die Menge des einströmenden atlantischen Wassers in den zurückliegenden zwei Jahrzehnten zugenommen haben, es dringt auch weiter Richtung Norden vor. Begünstigt wird dieser Vorstoß durch den drastischen Rückgang des Meereises in der nördlichen Barentssee – und zwar zu allen Jahreszeiten. Da sich hier im Winter mittlerweile deutlich weniger Meereis bildet als noch zu Anfang des 21. Jahrhunderts, gelangt während der Eisschmelze im Frühjahr und Sommer weniger Süßwasser in das Meer. Infolgedessen nehmen die Temperatur- und Dichteunterschiede zwischen der Deckschicht und den darunterliegenden Schichten ab. Die einst klar voneinander getrennten Wassermassen vermischen sich immer

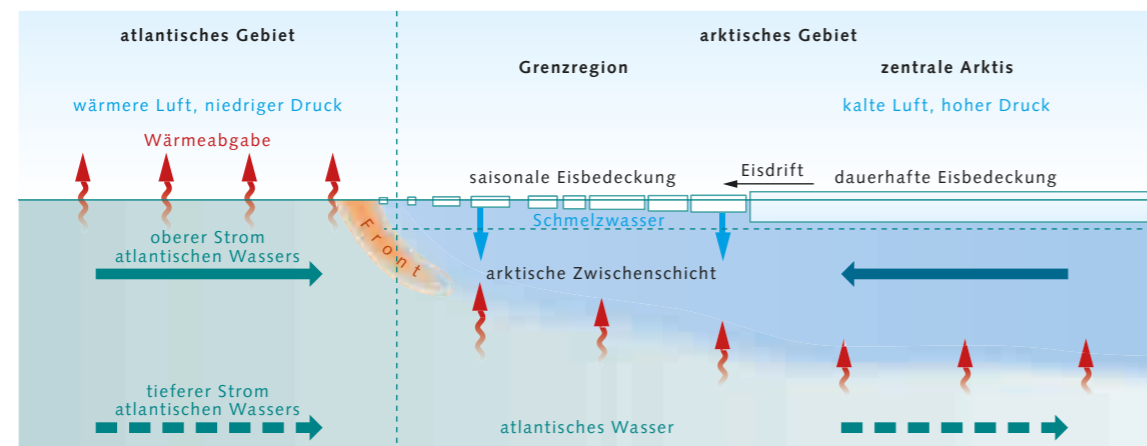
häufiger, wodurch das warme atlantische Wasser aus der Tiefe öfter bis an die Meeresoberfläche gelangt. Dort lässt es unter anderem die Oberflächentemperatur ansteigen und verzögert oder verhindert gar die Bildung neuen Meereises. Wo im Winter Meereis fehlt, kann im Frühjahr dementsprechend weniger Eis schmelzen, was die Schichtung der Wassermassen schwächt und warmes Atlantikwasser aufsteigen lässt, welches dann wiederum im Herbst die Entstehung neuen Eises erschwert. Ein selbstverstärkender Prozess – oder wie Fachleute sagen: eine der vielen „positiven Rückkopplungen“ im Klimasystem der Arktis.

Die stärkere und vor allem bis in größere Tiefen reichende Durchmischung der Wassermassen in der Barentssee hat jedoch noch einen zweiten wichtigen Effekt: Der Arktische Ozean gibt insgesamt mehr Wärme an die Atmosphäre ab, weil er durch das stete Durchmischen des Wassers bis in größere Tiefen abkühlen kann – ein Prozess, der bislang vor allem für den Nordatlantik typisch ist. Auf lange Sicht könnte diese Entwicklung sogar bedeuten, dass sich die Gebiete der nordatlantischen Umwälzbewegung nordwärts in den Arktischen Ozean verlagern und sich die Arktis noch deutlicher erwärmt als bislang.

Kein Meereis, eine Wassersäule ohne klar geschichtete Wassermassen – der Arktische Ozean verliert im Zuge des Klimawandels in der Barentssee zwei seiner markantesten Alleinstellungsmerkmale. Forscher sprechen von einer „Atlantifizierung“ der Barentssee, die einen fundamentalen Wandel der Lebensbedingungen in der Meeresregion mit sich bringt. Einige Klimasimulationen deuten darauf hin, dass die nördliche Barentssee schon zum Ende dieses Jahrhunderts vollständig auf Atlantik-Modus umgeschaltet haben könnte. Norwegische Wissenschaftler dagegen prognostizieren aufgrund von Beobachtungen, dass dieser Systemwechsel bereits viel früher erfolgen könnte. Sollte das Meereis im Tempo der zurückliegenden zwei Jahrzehnte weiter schrumpfen, wird eine so große Menge Süßwasser fehlen, dass die nördliche Barentssee bereits im Jahr 2040 keine klar voneinander getrennten Wasserschichten mehr aufweisen und damit ein vollkommen atlantifiziertes Gewässer sein wird.

Die Barentssee ist jedoch nicht das einzige Randmeer des Arktischen Ozeans, in dem das warme Wasser auf dem Vormarsch ist. Die Labradorsee vor der Ostküste

3.7 > Atlantifizierung: Infolge des Meereseisrückgangs in der Barentssee drängt in diesem Randmeer des Arktischen Ozeans wärmer werdendes atlantisches Wasser immer weiter Richtung Norden vor und lässt die arktisch geprägte Meereszone schrumpfen.



Schwächt mehr Süßwasser im Arktischen Ozean den Golfstrom?

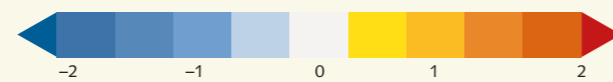
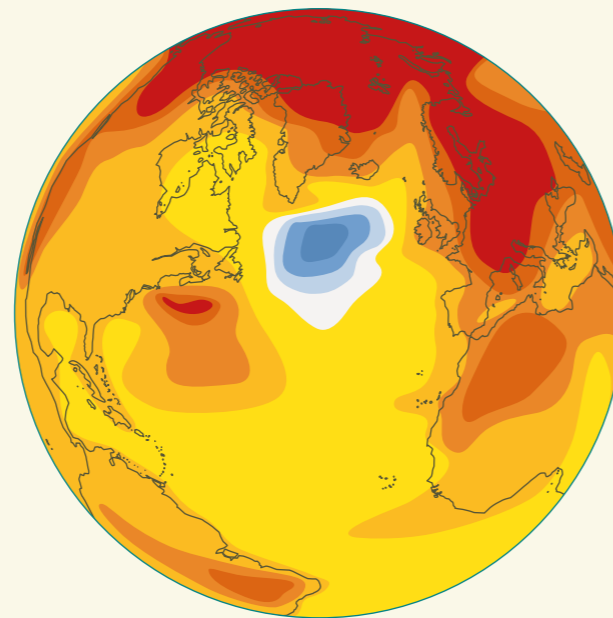
Ein Alleinstellungsmerkmal des Arktischen Ozeans ist seine mächtige salzarme Deckschicht an der Meeresoberfläche. Forscher sprechen an dieser Stelle gern auch etwas irreführend von einer Süßwasserschicht. Sie wird seit jeher durch die vielen Flüsse und den Zufluss salzarmen Oberflächenwassers aus dem Pazifischen Ozean gespeist. Seit einigen Jahrzehnten aber beobachten Forscher eine Zunahme des Süßwasseranteils im Nordpolarmeer, während das Wasser im Nordatlantik salzreicher wird. Eine Ursache für das Ausdünnen des Arktischen Ozeans könnte sein, dass es mittlerweile über Sibirien im Winter mehr schneit und die restliche Zeit des Jahres mehr regnet. Die Flüsse transportieren demzufolge mehr Schmelz- und Regenwasser in das Nordpolarmeer.

Welche Folgen die Süßwasserzunahme nach sich ziehen wird, ist noch unklar. Wissenschaftler aber vermuten, dass diese Veränderung die klimarelevante Umwälzung der Wassermassen im Nordatlantik und damit auch die Stärke des Golfstroms beeinflussen könnte. Wie alle Wassermassen des Arktischen Ozeans wird auch das salzarme Oberflächenwasser südwärts über die Davisstraße, die Framstraße oder aber das Europäische Nordmeer in den Nordatlantik transportiert und verdünnt dessen Wassermassen. Eine entsprechende Menge an Süßwasser könnte also unter Umständen dazu führen, dass das Nordatlantikwasser trotz seiner großflächigen Abkühlung nicht mehr schwer genug ist, um weit genug abzusinken und als Tiefenwasser zurück Richtung Äquator zu wandern. Der nordatlantische Motor der globalen Meereszirkulation würde also langsamer laufen und wichtige Strömungen wie der Golfstrom nachlassen.

Dass es zu einer solchen Kettenreaktion kommen kann, zeigen Beispiele aus der Klimageschichte. Als sich vor 8200 Jahren in Nordamerika der prähistorische Agassizsee plötzlich entleerte und seine riesigen Süßwassermassen über den Sankt-Lorenz-Strom in den Nordatlantik flossen, verlangsamte sich die Umwälzung der atlantischen Wassermassen. Infolgedessen kam die warme Atlantikströmung zum Erliegen oder schwächte sich ab, was dazu führte, dass sich der Nordatlantikraum innerhalb weniger Jahre deutlich abkühlte. Mittlerweile wissen Forscher auch, dass ein Stopp der nordatlantischen Wasserumwälzung über den gesamten Globus wirkt. In der Vergangenheit verlagerte sich zum Beispiel der Regengürtel über den Tropen – und das Südpolarmeer und die Antarktis erwärmten sich.

Für die Zukunft sagen Klimamodelle voraus, dass sich der Golfstrom im Zuge eines Treibhausgasanstiegs in der Atmosphäre abschwächen wird und es infolgedessen zu einer Abkühlung im

Nordatlantik kommt. Genau dies passiert bereits, berichten Klimaforscher. Der subpolare Teil des Atlantischen Ozeans hat sich als einzige Meeresregion der Welt seit Anfang des 20. Jahrhunderts nicht erwärmt, sondern abgekühlt. Die Temperaturveränderungen deuten auf eine Abschwächung des Golfstroms um 15 Prozent hin.



Veränderung der mittleren Oberflächentemperatur im Zeitraum 2014 bis 2018 im Vergleich zur mittleren Oberflächentemperatur von 1880 bis 2018 in Grad Celsius

3.8 > Die sinkenden Oberflächentemperaturen in der Meeresregion südöstlich Grönlands deuten Wissenschaftler als Beleg für eine abnehmende Tiefenwasserbildung im Nordatlantik. Die Logik dahinter: Weil im Zuge der globalen Erwärmung weniger Wassermassen im Nordatlantik umgewälzt werden, hat der Nordatlantikstrom abgenommen, welcher Wärme von der US-Ostküste nach Nordeuropa transportiert. Und wo weniger Wärme ankommt, kühlt sich das Meer ab.

Kanadas sowie die Bering- und die Tschuktschensee vor der Küste Alaskas erwärmen sich in einem vergleichbaren Maß. In allen vier Meeresgebieten steigt die Oberflächentemperatur im Sommer derzeit um ein Grad Celsius pro Dekade. Gleichzeitig geht in allen vier Regionen das Meereis zurück, die eisfreien Wasserflächen nehmen mehr Sonnenenergie auf, und es drängen häufiger warme Wassermassen aus der Tiefe an die Meeresoberfläche, sodass es ausgesprochen schwerfällt, die einzelnen Prozesse und ihre Wirkungen voneinander zu trennen. Tatsache ist, dass durch die Klimaerwärmung Prozesse im Klimasystem der Erde in Gang gesetzt wurden, die sich in ihrer Wirkung gegenseitig verstärken und vor allem im Nordpolargebiet zunehmend spürbar werden.

Arktische Verstärkung – eine fatale Kettenreaktion

Welche Effekte in welchem Ausmaß zur Verstärkung beitragen, wird in der Wissenschaft kontrovers debattiert. Manche Forscher argumentieren, die drastische Erwärmung sei in erster Linie auf die schrumpfenden Schnee- und Meereisdecken in der Arktis zurückzuführen. Je weniger helle Flächen vorhanden seien, desto geringer sei die Rückstrahlkraft der Arktis und desto mehr Sonnenenergie würde im Nordpolargebiet verbleiben und Veränderungen in den Meeren und in der Atmosphäre anstoßen. Andere verweisen darauf, dass die wärmer werdende Luft über der Arktis mehr Wasserdampf aufnehme und sich demzufolge auch häufiger Wolken bildeten, die wiederum die Abstrahlung von Wärmeenergie in das Weltall behinderten. Je nach Jahreszeit und Art der Wolken könne sich dieser Effekt allerdings auch umkehren und die Wolkendecke kühlend wirken.

Jedes Argument für sich genommen stimmt und kann durch Messungen belegt werden. Die eigentliche Erklärung für die Verstärkung liegt wohl im Zusammenspiel aller Faktoren, deren Ausmaß und Wirkung nicht nur mit den Jahreszeiten variieren, sondern auch von Region zu Region unterschiedlich ausfallen. Erschwerend kommt hinzu, dass das Klimasystem nicht nur komplex ist, sondern seine einzelnen Bestandteile auch auf ausgesprochen chaotische Art und Weise miteinander wechselwirken, was die Identifizierung von Ursachen und Wirkungen

enorm verkompliziert. Wissenschaftler sprechen an dieser Stelle vom Klimarauschen, von Klimaschwankungen oder der natürlichen Variabilität des Klimasystems.

Fakt ist, dass Luft- und Meeresströmungen heutzutage mehr Wärme und Feuchtigkeit in das Nordpolargebiet transportieren. Dadurch, so die weitläufige Hypothese, verringert sich der generelle Temperaturgegensatz zwischen den hohen und den mittleren Breiten. Aus diesem Gegensatz aber zieht der Polarfront-Jetstream seine Energie. Dieses leicht gewellte Starkwindband zirkuliert normalerweise zwischen dem 40. und 60. Breitengrad parallel zum Äquator um die Arktis und hält wie ein Schutzwall warme Luftmassen aus dem Süden davon ab, in die Arktis vorzustoßen.

Je wärmer aber die Arktis wird, desto weiter sinkt der Temperaturunterschied zwischen dem Nordpolargebiet und den südlicheren Gefilden. Infolgedessen nehmen auch die Westwinde ab, die den Polarfront-Jetstream ausmachen. Der Luftstrom schwächt sich ab, wird durch Hoch- und Tiefdruckgebiete aus seiner zonalen Ausrichtung abgelenkt und schlängelt sich jetzt in großen Wellen über die Nordhalbkugel (siehe Kapitel 2). Dadurch macht er den Weg frei für zwei gegensätzliche Luftmassenbewegungen. Über dem Nordatlantik und dem Westen Nordamerikas zieht warme, feuchte Luft aus dem Süden in die Arktis. Über Sibirien und dem restlichen Nordamerika dagegen stößt kalte, polare Luft aus der Arktis in die mittleren Breiten vor und sorgt dort vor allem im Winter für Eiseskälte.

In Zeiten eines schwachen Jetstreams passiert es zudem häufiger, dass wandernde Hoch- oder Tiefdruckgebiete gewissermaßen stecken bleiben und für längere Zeit in einer Region verweilen. Eine solche Blockade führt regelmäßig zu extremen Wetterereignissen wie etwa anhaltendem Regen mit anschließenden Überschwemmungen oder aber zu andauernder Wärme und Trockenheit, wie sie Mitteleuropa zum Beispiel im Sommer 2018 erlebt hat.

Die Details dieser folgenreichen Kettenreaktion haben Wissenschaftler noch nicht umfassend verstanden. Aber es gibt große Fortschritte. Neue Studien lassen zum Beispiel darauf schließen, dass der drastische Meereisrückgang in der Barentssee und der Karasee eine entscheidende Rolle bei der Schwächung des Jetstreams über Europa und Asien spielt. Vereinfacht gesagt, absorbieren die beiden Randmeere des Arktischen Ozeans im Sommer

Auf der Wind-Autobahn in die Arktis: Staub- und Rußpartikel

Ein Jetstream auf Schräglängkurs lässt nicht nur warme, feuchte Luft in die Arktis eindringen. In seinem Schlepptau können unter Umständen auch Staubwolken aus der Tausende Kilometer entfernten Sahara in den hohen Norden wandern. Einen solchen Staubeintrag aus Nordafrika beobachteten Atmosphärenforscher beispielsweise im April 2011. Damals kam es infolge des mäandrierenden Jetstreams zu einem Wirbelsturm über dem marokkanischen Teil der Sahara. Der Sturm wirbelte große Mengen Wüstensand auf und riss sie bis in eine Höhe von sechs Kilometern mit sich. Eine große Staubwolke entstand, die zunächst von nordwärts strömenden Luftmassen – später vom Jetstream selbst – über Spanien, Westeuropa und den Nordostatlantik hinweg bis in den Süden Grönlands transportiert wurde. Dort rieselte der Wüstensand dann in Schneekristalle oder Wassertropfen eingeschlossen auf den Eisschild nieder.

Staub- und Rußpartikel, die vom Wind getragen um die Welt reisen, werden von Experten als Aerosole bezeichnet. Sie sind wenige Nanometer bis mehrere Mikrometer klein und damit so leicht, dass sie – einmal aufgewirbelt – kaum mehr zu Boden sinken. Aerosole entstehen jedoch nicht nur bei Wüstenstürmen, sondern auch bei Feld- und Waldbränden, bei Vulkanausbrüchen und wenn der Mensch Öl oder Kohle verbrennt. Speziell für die Arktis sind beispielsweise auch die kargen Böden Islands eine wichtige Quelle. In der Luft schweben können zudem auch Blütenpollen, Bakterien, Viren und aufgewirbelte Meersalzpartikel.

Für das Klima der Arktis spielen Aerosole eine wichtige Rolle. Sie beeinflussen die Wärmebilanz der Nordpolarregion. Tröpfchen aus der Schwefelverbindung Sulfat zum Beispiel reflektieren das einfallende Sonnenlicht, bevor es die Erdoberfläche erreicht, und haben somit einen kühlenden Effekt. Staub- und Rußpartikel hingegen wirken wärmend, weil sie das Sonnenlicht absorbieren und damit dessen Energie in der Atmosphäre halten. In einem geringen Maß streuen und absorbieren Aerosole auch die von der Erde abgestrahlte Wärmeenergie. Das heißt, sie wirken in diesem Fall wie Treibhausgase und erwärmen die Atmosphäre. Dieser wärmende Effekt zeigt sich vor allem über Flächen mit hoher Rückstrahlkraft, wie sie Eis und Schnee besitzen. In den Polarregionen tragen Aerosole daher eher zu einer Erwärmung bei als in niedrigen Breiten. Dort wirken sie eher kühlend.

Ohne Aerosole würden sich auch keine Wolken bilden. Die winzigen Teilchen dienen als Kondensationskeime, an denen sich Wassertropfen oder Eiskristalle bilden, sodass Wolken entstehen können. In der Arktis verstärken diese die Sommerschmelze des Meereises. Staub- und Ruß-

partikel beschleunigen außerdem die Schnee- und Eisschmelze, indem sie sich irgendwann auf dem Meer- und Gletschereis absetzen, deren Oberfläche verschmutzen und so die Rückstrahlkraft des Eises beeinträchtigen. Die Albedo des Grönländischen Eisschildes beispielsweise hat in den zurückliegenden Jahrzehnten spürbar abgenommen, auch weil sich mittlerweile mehr Schwebstoffe auf dem Eispanzer ablagern.

Besonders hohe Aerosolkonzentrationen werden in der Arktis jeweils im späten Winter sowie im darauffolgenden Frühling gemessen. In dieser Zeit schweben dann so viele verschiedene Partikel in der unteren Tropo-



3.9 > Dreckiges Eis: Ruß- und Staubpartikel verdunkeln die Oberfläche des Helheimgletschers im Südosten Grönlands.

sphäre, dass eine weißlich bis rötlich schimmernde Nebelwolke über der gesamten Arktis liegen kann. Forscher nennen dieses Phänomen Arctic Haze (Arktischer Dunst) und sprechen in diesem Zusammenhang auch von Luftverschmutzung. Die meisten Aerosole stammen nämlich von Waldbränden oder werden von Industrieanlagen und Kohlekraftwerken in Europa, Nordamerika und Asien freigesetzt. Der Wind transportiert sie dann Richtung Arktis, wo sie sich vor allem im Winter besonders lang in der Luft halten. Denn zum einen vermischen sich in dieser Jahreszeit die Luftmassen im Nordpolargebiet kaum. Zum anderen entstehen in der

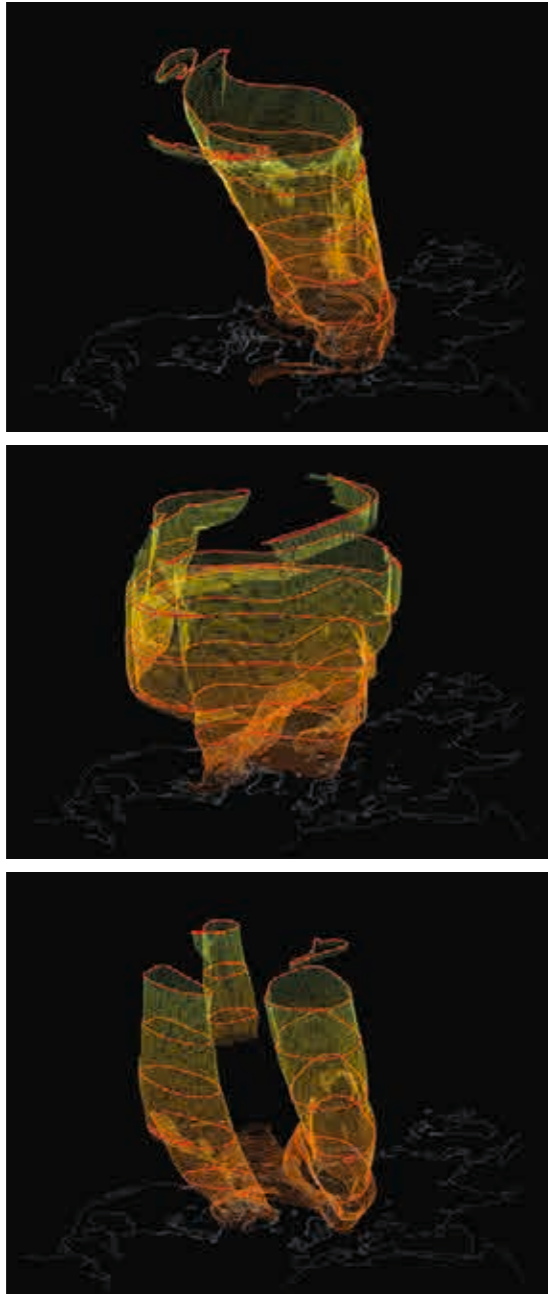
kalten, spätwinterlichen Atmosphäre auch nur wenige Wolken, sodass die Schmutzpartikel so gut wie gar nicht durch Regen oder Schnee herausgewaschen werden.

Ob die Aerosolkonzentration in der Arktis künftig zunehmen wird, können Forscher noch nicht vorhersagen. Wenn der Jetstream mäandriert, gelangt auch mehr Feuchtigkeit in das Nordpolargebiet, deren Niederschlag die Schwebstoffe auswäscht. Insofern bleibt die Frage, welche Aerosole auf welchen Pfaden in die Arktis gelangen und dort das Klima beeinflussen, ein wichtiges Forschungsthema.



3.10 > Luftverschmutzung: Ein US-amerikanisches Forschungsflugzeug fliegt durch eine Dunstwolke über der Arktis, die sich infolge großer Staub-, Ruß- und Schwefelemissionen in Europa, Nordamerika und Asien gebildet hat.

3.11 > Im Winter 2018/2019 zerfiel der arktische Polarwirbel innerhalb von zwölf Tagen in drei kleinere Wirbel. In Nordamerika drängte daraufhin polare Luft weit Richtung Süden vor und löste eine extreme Kältewelle in Kanada und dem Nordosten der USA aus.



so viel Sonnenenergie, dass sie erst im Oktober oder November und damit relativ spät zufrieren. Bis dahin aber geben die offenen Gewässer so viel Wärme und Feuchtigkeit an die Troposphäre ab, dass über Sibirien mehr Schnee fällt. Die wachsende Schneedecke dort wiederum verstärkt die Rückstrahlkraft der Landflächen und befeuert

auf diese Weise die Auskühlung und Entstehung eines Hochdruckgebiets über Sibirien.

Westlich davon jedoch bildet sich infolge der Wärmeabgabe durch das Meer eine Wärmeglocke. Der in höheren Luftschichten darüberstreichende Jetstream wird dadurch nach Süden, teils auch nach Norden abgelenkt. Außerdem stellt die Wärmeglocke ein Hindernis für die planetaren Wellen dar. Wie in einer Halfpipe schießen die aus Westen kommenden Luftpakete hier in die Höhe und erhalten genügend Auftrieb, um in die Stratosphäre aufzusteigen und den dort über der Arktis rotierenden Polarwirbel zu beschädigen. Unter bestimmten Voraussetzungen teilen sie ihn sogar.

Der Zerfall des Polarwirbels wiederum schwächt den Jetstream in der Troposphäre und lässt blockierende Hoch- und Tiefdruckgebiete über Europa und Asien verweilen. Diese lenken dann kalte Luft nach Asien und Europa sowie warme Luft Richtung Grönlandsee. Letztere führt dann in logischer Konsequenz dazu, dass die Lufttemperatur über dem Arktischen Ozean ansteigt, die Zahl der Frosttage sinkt und die Meereisdecke weniger gut gefriert oder sogar schmilzt.

Für die kommenden drei Jahrzehnte sagen Wissenschaftler der Arktis einen Anstieg der Herbst- und Wintertemperaturen von bis zu vier Grad Celsius voraus. Eine Erwärmung von solchem Ausmaß hätte zur Folge, dass weite Teile des Arktischen Ozeans länger im Jahr eisfrei wären. Es würden auch große Flächen des dauerfrozenen Bodens (Permafrost) auftauen. Beide Veränderungen zögen unmittelbare Konsequenzen für die lokalen Ökosysteme sowie für die Schifffahrt, den Rohstoffabbau und alle anderen menschlichen Aktivitäten in der Arktis nach sich.

Unterschiedliche Trends in der Antarktis erkennbar

In der Antarktis zeichnet sich im Zuge des Klimawandels kein so einheitliches Erwärmungsbild ab wie in der Arktis. Ausschlaggebend dafür sind vermutlich der kühlende Effekt der Landeismassen auf dem antarktischen Kontinent, einschließlich ihrer großen Rückstrahlkraft, sowie die isolierende Wirkung des Antarktischen Zirkumpolarstroms. Außerdem gibt es große regionale Unterschiede

zwischen maritim geprägten Küstengebieten und den kontinentalen Bedingungen über der Zentralantarktis.

Im pazifischen Sektor der Westantarktis sowie im Bereich der Antarktischen Halbinsel beobachten Forscher seit Jahrzehnten, dass sich die Gletscher beschleunigen, das Meereis schrumpft, die Oberflächentemperaturen steigen und es in Teilen stärker schneit. Ausschlaggebend dafür sind sowohl Veränderungen in der atmosphärischen Zirkulation, wodurch mehr Wärme und Feuchtigkeit Richtung Pol transportiert werden, als auch Meeresströmungen, die wärmeres Wasser in die Küstengebiete transportieren. Für den zunehmenden Wärmetransport in der Atmosphäre sind die Westwinde über dem Südpolarmeer verantwortlich. Sie haben seit den 1970er-Jahren zugenommen und ihren Pfad polwärts verlagert – ausgelöst durch die steigende Treibhausgaskonzentration und den zunehmenden und anhaltenden Ozonabbau über der Antarktis im Frühjahr. Beide Prozesse haben dazu geführt, dass der Temperaturunterschied zwischen den Tropen und dem Südpolargebiet zugenommen hat, wodurch die Winde an Kraft gewonnen haben.

Die Verlagerung der Westwinde ist jedoch nicht die einzige Klimaveränderung im Südpolargebiet, welche durch die Entstehung des antarktischen Ozonlochs mit angestoßen wurde. Heute weiß man, dass sich der regelmäßige Abbau von Ozon über dem antarktischen Kontinent grundlegend auf das Klima der Region auswirkt.

Wie das Ozonloch das Klima in der Antarktis verändert

Die Erde besitzt ihren eigenen Sonnenschutz – einen Filter aus Ozon. Er absorbiert in der Stratosphäre die kürzesten und damit energiereichsten Strahlen des Sonnenlichts nahezu vollständig und verhindert auf diese Weise,

dass diese für den Menschen nicht sichtbare ultraviolette Strahlung (UV-Strahlung) die Erdoberfläche erreicht. Ohne diese natürliche Schutzschicht wäre ein Leben auf der Erde kaum möglich, denn UV-Strahlen durchdringen Haut- oder andere Schutzschichten von Pflanzen, Tieren und Menschen und würden tief im Gewebe deren Immunsystem und Erbgut schädigen.

Ozon ist ein hochreaktives Gas, dessen Konzentration in der Erdatmosphäre ab einer Höhe von zehn Kilometern langsam zunimmt. Seine höchste Dichte erreicht es in einer Höhe von 30 bis 35 Kilometern. Dennoch ist der Gesamtanteil des Gases an der Atmosphäre verschwindend gering, wie ein kleines Rechenbeispiel zeigt. Würde man eine Luftsäule nehmen, die vom Erdboden bis ins Weltall reicht und diese Luft unter Normaldruck und einer Temperatur von null Grad Celsius zusammenpressen, so ergäbe alles enthaltene Ozon eine gerade einmal drei Millimeter dünne Schicht.

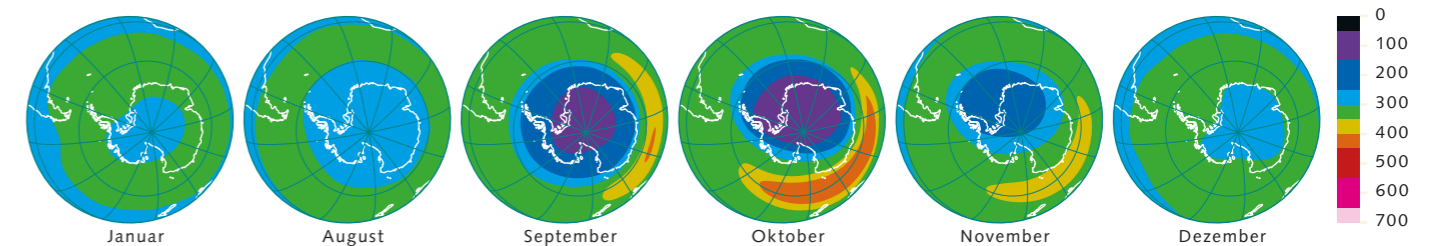
Umso bemerkenswerter ist der Einfluss der Ozonschicht auf das Klima der Erde. Ozon absorbiert nicht nur die einfallende UV-Strahlung. Je nach Höhe nimmt es als Treibhausgas auch Wärmeenergie auf, die von der Erde abgestrahlt wird. Je mehr Ozon ein Luftpaket enthält, desto mehr UV- oder Wärmestrahlung absorbiert das Gas und desto weitreichender erwärmt es Teile der Atmosphäre. Im Umkehrschluss bedeutet dies aber auch: Sollte die Ozonkonzentration in der Stratosphäre abnehmen, würden die umgebenden Luftmassen auskühlen.

Der Kriegszug der freien Radikale

Genau diese Entwicklung beobachten Wissenschaftler, seitdem die Ozonschicht über der Antarktis regelmäßig zum Ende des Winters ausdünnert und in den Monaten September und Oktober das sogenannte Ozonloch entsteht.

3.12 > Der Ozonabbau über der Antarktis konzentriert sich auf wenige Monate im Jahr. Er beginnt im August und erreicht seinen Höhepunkt im September und Oktober. Im November nimmt die Ozonkonzentration dann wieder zu, das Loch schließt sich.

Ozonsausdünnung über der Antarktis im Durchschnitt 1979 bis 2018



Eisbohrkerne: So lesen Forscher im Klimatagebuch des Eises



3.13 > Ein Forscher zersägt einen frisch gebohrten Eiskern. Dabei trägt der Wissenschaftler Schutzkleidung, um die Eisprobe nicht zu verunreinigen. Die Untersuchungsdaten geben wichtige Aufschlüsse über Klimaänderungen in der Vergangenheit.

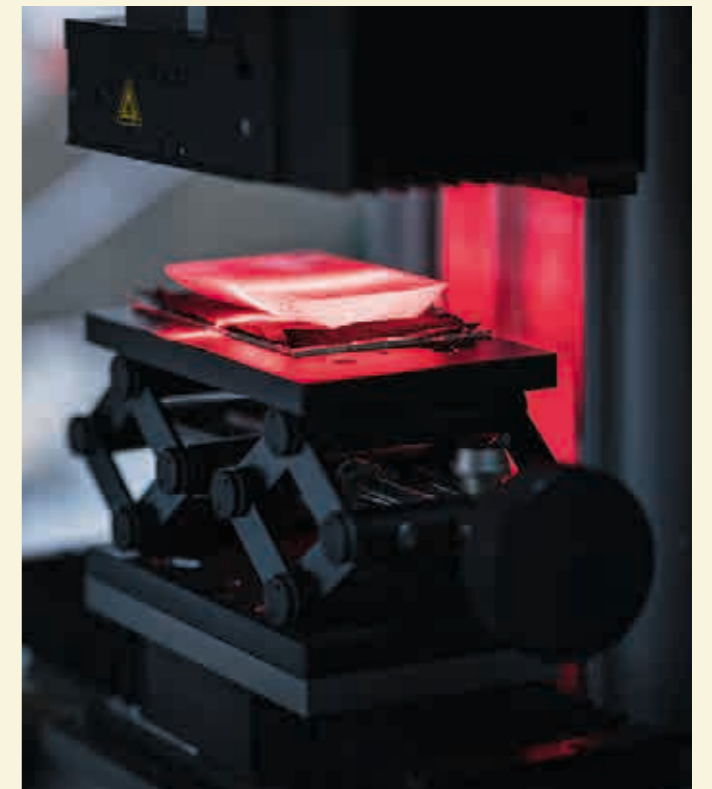
Ein Großteil des Wissens über die Klimageschichte der Polarregionen stammt aus sogenannten Eisbohrkernen. Als solche werden zylinderförmige Eisproben mit einem Durchmesser von zehn bis 15 Zentimetern genannt, die Forscher mithilfe eines Hohlbohrers senkrecht aus Gletschern und Eisschilden bohren. Die Eiskerne geben einen chronologischen Einblick in das Klimatagebuch der Polargebiete. Denn jede Schneeschicht, die auf die Eisschilde und Gletscher fällt und sich im Lauf der Zeit zu Firn und Eis verdichtet, besitzt je nach Jahreszeit und Wetterlage eine spezifische Kristallstruktur und besondere chemische Eigenschaften, anhand derer Forscher noch Jahrtausende später auf die klimatischen Ausgangsbedingungen zur Zeit des Niederschlags schließen können. Wenn sich Firn zu Eis verdichtet, werden zudem Luftbläschen mit ihren

jeweiligen Anteilen an Treibhausgasen eingeschlossen. Gletschereis ist somit das einzige Klimaarchiv, welches Luft über sehr lange Zeiträume konserviert und mit dessen Hilfe sich die chemische Zusammensetzung der globalen Atmosphäre rekonstruieren lässt. Deutliche Spuren im Eis hinterlassen auch Vulkanausbrüche, Meteoriteneinschläge, Wald- oder Steppenbrände. Ihre Aschepartikel wurden einst durch Schnee oder Regen aus der Atmosphäre gewaschen. Im Eiskern bilden diese ehemaligen Schwebstoffe nun Schichten, die sich durch verschiedene Analysemethoden nachweisen lassen. In Ausnahmefällen kann man sie auch mit bloßem Auge erkennen. Anhand dieser Schichten können Wissenschaftler zum Beispiel Eiskerne aus verschiedenen Regionen der Welt genau datieren und sie miteinander vergleichen.

Um im Klimatagebuch des Eises lesen zu können, wird zunächst sein Alter bestimmt. Dazu suchen die Forscher unter anderem nach chemischen Indikatoren, deren Sommer- und Winterkonzentration sich klar voneinander unterscheidet, sodass Jahresschichten identifiziert werden können. Dazu gehören zum Beispiel Natrium- und Ammoniumionen, aber auch Staubpartikel und Kalziumionen. Grönländische Eiskerne weisen oft auch klar erkennbare Schmelzlagen auf. Sie verraten, wann es im Sommer an der Oberfläche des Eisschildes so warm war, dass der Schnee geschmolzen und das Schmelzwasser im Firn versickert und wieder gefroren ist. Der isländische Glaziologe Thorsteinn Thorsteinsson konnte anhand einer solchen dicken Schmelzlage belegen, dass es im Jahr 985 – als Wikinger Erik der Rote nach Grönland fuhr – tatsächlich außergewöhnlich warm war auf der Insel.

Für genauere Analysen werden die Eiskerne dann im Computertomografen untersucht, ihre elektrische Leitfähigkeit gemessen und kleine Eisproben für chemische Messungen geschmolzen. Dabei generieren die Wissenschaftler folgende Informationen: (1) Von der Isotopenzusammensetzung des Wassers leiten sie die Lufttemperatur zum Zeitpunkt der Niederschläge ab. (2) Die Dicke der Jahresschichten lässt Rückschlüsse auf die Niederschlagsmenge zu. (3) Anhand der in den Luftblasen enthaltenen Treibhausgase können die Forscher die chemische Zusammensetzung der damaligen Atmosphäre rekonstruieren. (4) Im Eis enthaltene Meersalz, Sulfat und andere Chemikalien markieren Extremereignisse wie Vulkanausbrüche oder Umweltveränderungen, die auf biogeochemische Kreisläufe zurückgehen. Gleichzeitig lassen sie Rückschlüsse auf die damalige Meereisbedeckung, die Einstrahlung der Sonne, die Kraft der Winde und Extremwetterereignisse wie Dürren zu. Die im Bohrloch gemessenen Temperaturen des Eises ermöglichen Erkenntnisse zur Temperaturentwicklung in der Vergangenheit und belegen somit die Theorie der polaren Verstärkung, wonach sich die Temperaturen in den Polarregionen stets in einem größeren Ausmaß verändert haben als im globalen Durchschnitt.

Die so entstandenen Klimazeitreihen aus Eisbohrkernen reichen in der Antarktis 800 000 Jahre zurück, für Grönland sind es 128 000 Jahre. Ihre hohe Auflösung und Detailtiefe ermöglichten elementare Wissensfortschritte. So weiß man dank der Eisbohrkerne, dass die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre seit dem 18. Jahrhundert radikal angestiegen ist – damals betrug sie gerade einmal 280 ppm, heute etwa 410 ppm. Die Klimazeitreihe aus der Antarktis zeigt außerdem, dass die Lufttemperatur in der Vergangenheit regelmäßigen Schwankungen unter-



3.14 > Um Mikrostrukturen im Eis erkennen zu können, durchleuchtet ein hochauflösender Scanner diese Eisprobe.

lag. Diese wurden unter anderem durch wiederkehrende Veränderungen der Erdbahnparameter um die Sonne ausgelöst und haben auf der Erde zu einem Wechsel von Warm- und Kaltzeiten geführt. Ein Vergleich der Eiskerndaten aus der Antarktis und Grönland ergab zudem, dass das Klimageschehen in beiden Hemisphären eng miteinander verbunden ist. Rapide Temperaturanstiege auf der Nordhalbkugel fallen mit dem Beginn der Abkühlung im Süden zusammen und umgekehrt. Dieses Phänomen wird bipolare Wippe genannt. Aktuell suchen Forscher nach neuen Bohrstellen in der Antarktis, an denen sich bis zu 1,5 Millionen Jahre altes Eis bergen ließe. Von ihm versprechen sich die Wissenschaftler noch genauere Einblicke und Antworten auf noch viele ungelöste Fragen zum Klima der Vergangenheit.

Grund dafür sind vom Menschen hergestellte Gase (Fluorchlorkohlenwasserstoffe und bromierte Kohlenwasserstoffe), die als Treibgase, Kälte- oder Lösungsmittel verwendet wurden – oder zum Teil immer noch werden – und Chlor- oder Bromverbindungen enthalten, welche das Ozon zerstören können. Damit diese Gase jedoch ihre zerstörerische Kraft entfalten, bedarf es besonderer Voraussetzungen, die einzig und allein in den langen, dunklen Wintern der Polargebiete gegeben sind. Ozonlöcher können demzufolge nur in der Antarktis und in Ausnahmefällen auch in der Arktis entstehen.

Zuerst muss die Lufttemperatur in der Stratosphäre auf unter minus 78 Grad Celsius absinken. Solche tiefen Temperaturen werden nur im Winter erreicht – und meist auch nur im Innern des Polarwirbels. Der Polarwirbel ist ein Höhentief, welches sich aufgrund der hohen thermischen Ausstrahlung und der damit verbundenen Kaltluftansammlung im Zuge der Polarnacht über dem entsprechenden Polargebiet bildet. Es erstreckt sich von der oberen Troposphäre bis in die Stratosphäre.

Die Luftmassen in dieser Höhe enthalten nur noch wenig Wasserdampf, dafür aber Tröpfchen von Schwefelsäure, die meist durch Vulkanausbrüche in die Stratosphäre gelangt sind. Bei Temperaturen unter minus 78 Grad Celsius lagern sich Restwasser und Salpetersäure an diesen Tröpfchen ab und gefrieren. Abermillionen Säurekristalle entstehen. Vom Erdboden aus sind die Kristallansammlungen als sogenannte Polare Stratosphärenwolke zu erkennen. Umgangssprachlich wird dieses Himmelsphänomen als Perlmutterwolke bezeichnet.

Diese Wolken sind die Chemiefabriken der Stratosphäre. Auf der Oberfläche ihrer Kristalle laufen chemische Reaktionen ab, im Zuge derer sich die zunächst harmlosen Treibgase und Kühlmittel in hochreaktive Gase verwandeln. Diese sind stabil, solange es dunkel bleibt. Sowie zum Ende der Polarnacht aber die Sonne wieder über den Horizont lugt, zerfallen sie und entlassen Chlor- oder Brom-Radikale, von denen jedes einzelne Abertausende Ozonmoleküle zerstört. Brom ist dabei 60- bis 65-mal effektiver als Chlor. Der Siegeszug der Radikale erreicht seinen Höhepunkt über der Antarktis in der Regel Mitte Oktober und endet erst, wenn die Sonne die Luftmassen innerhalb des Polarwirbels wieder erwärmt, sich die Perlmutterwolken auflösen und ozonreiche Luft aus den middle-

ren Breiten einströmt. Die Radikale verfallen dann in eine Art Sommerruhe. Sie reagieren mit Stickstoffdioxid, welches ebenfalls in der einströmenden Luft enthalten ist, zu Chlornitrat (ClONO_2) oder Bromnitrat (BrONO_2) und warten auf den nächsten Winter.

Von einem Ozonloch sprechen Forscher, wenn die Ozonkonzentration in der Stratosphäre unter den Grenzwert von 220 Dobson-Einheiten fällt. Diese nach dem britischen Physiker und Meteorologen Gordon Dobson (1889–1976) benannte Maßeinheit gibt die Gesamtheit der Ozonmoleküle in der Atmosphäre über einem Punkt der Erde an. Zum Vergleich: 220 Ozonmoleküle entsprechen 220 Dobson-Einheiten und ergäben im oben beschriebenen Rechenbeispiel eine Ozonreinschicht von 2,2 Millimetern. Vor dem ersten Auftreten des Ozonlochs betrug die durchschnittliche Ozonkonzentration in der Antarktis 250 bis 350 Dobson-Einheiten. Heutzutage sinkt sie im antarktischen Frühling regelmäßig auf einen Tiefstwert von etwa 100 Dobson-Einheiten.

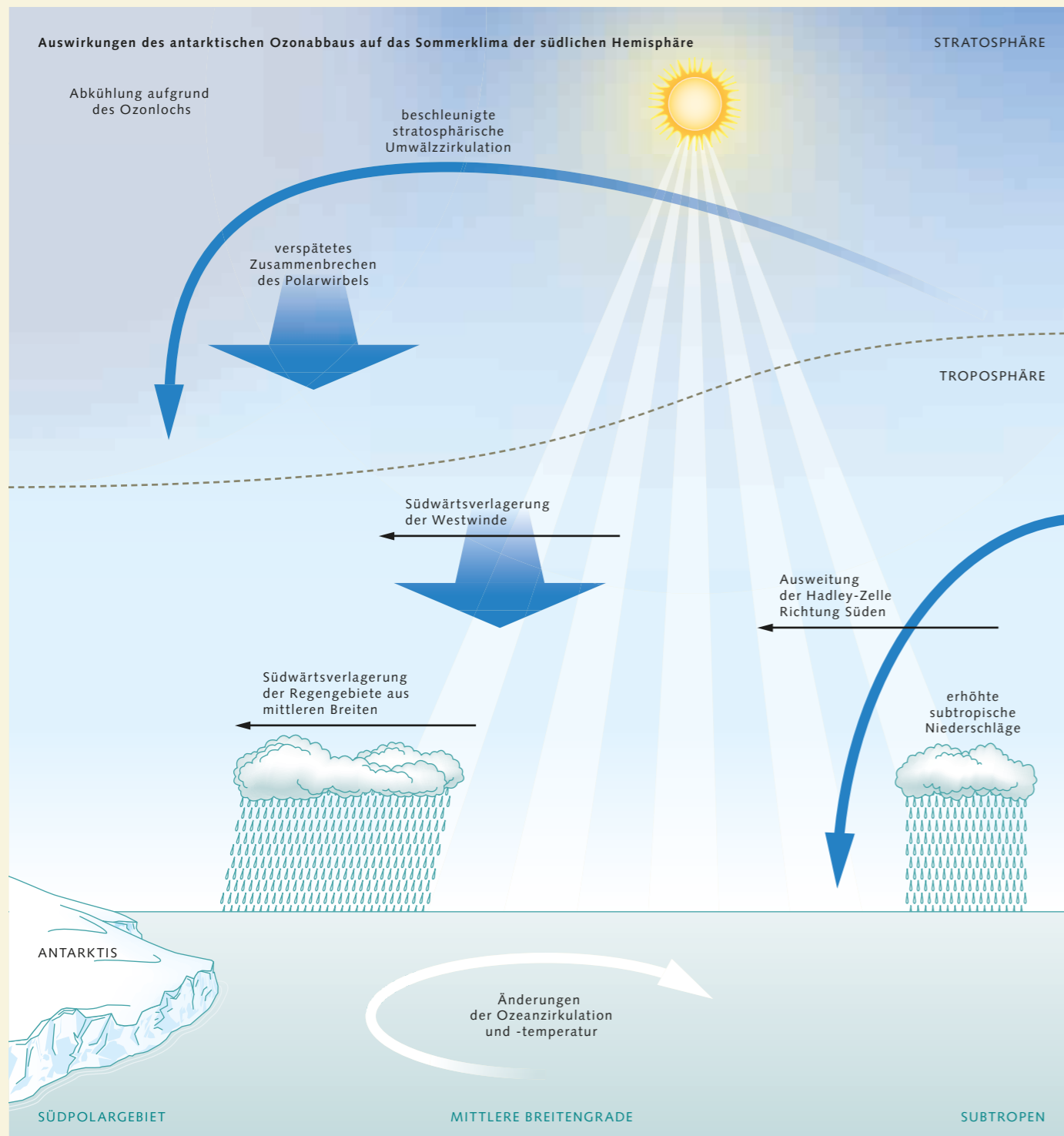
Abkühlung im Zentrum, Erwärmung auf der Antarktischen Halbinsel

Wenn zum Ende der Polarnacht die Ozonschicht über der Antarktis ausdünnert, hat das unmittelbare Konsequenzen für die Temperaturentwicklung in der Stratosphäre und der darunterliegenden Troposphäre. Zunächst erwärmt sich die Luft in der unteren Stratosphäre kaum noch. Mit dem Ozon fehlt ein wichtiges Treibhausgas, welches die langwellige Wärmestrahlung der Erde absorbiert. Die Luftschichten der unteren Stratosphäre sind deshalb heutzutage bis zu zehn Grad Celsius kälter als in der Zeit vor dem Ozonloch.

Die Abkühlung der unteren Stratosphäre hat seit den 1990er-Jahren zu weitreichenden klimatischen Veränderungen in der Antarktis geführt. Der Einfluss des Ozonabbaus reicht sogar so weit, dass Wissenschaftler seit dieser Zeit einen Großteil der Veränderungen in der Temperaturkurve der Antarktis auf das Ozonloch zurückführen können – so zum Beispiel auch das leichte Absinken der Oberflächentemperatur im Innern des antarktischen Kontinents. Dazu kommt es, weil durch den Ozonmangel in der Stratosphäre auch die darunterliegende Troposphäre besser auskühlen kann.



3.15 > Perlmutterwolken schimmern in Regenbogenfarben am Himmel über der Antarktis. Die Wolken aus Säurekristallen bilden sich erst bei Temperaturen von unter minus 78 Grad Celsius und leiten dann den Ozonabbau ein.



3.16 > Der wiederholte Ozonabbau über der Antarktis beeinflusste in der jüngeren Vergangenheit das Klima des Südpolargebiets maßgeblich. Es kam zu einer Abkühlung der unteren Stratosphäre, infolge derer sich beispielsweise Wind- und Regensysteme südwärts verlagert haben.

Die anhaltende Kälte in der unteren Stratosphäre verhindert aber auch ein frühzeitiges Zusammenbrechen des polaren Wirbels. Stattdessen verlängert sich seine Lebensdauer und damit die Periode des Ozonabbaus. Gleichzeitig verstärkt die ozonbedingte Abkühlung der unteren Stratosphäre den Temperaturgegensatz zwischen der Antarktis und den Tropen. Dadurch verändern sich die atmosphärischen Zirkulationsmuster. Die Winde in der Stratosphäre nehmen zu; die Tropopause über der Antarktis senkt sich ab, was unmittelbare Veränderungen des Wettergeschehens nach sich zieht. Die Tropopause beeinflusst auch, auf welche Weise sich Hoch- und Tiefdruckgebiete aneinanderreihen und ausbreiten. So ist das Westwind-Band über dem Südpolarmeer weiter nach Süden gewandert, wodurch sich die Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse in manchen Küstengebieten der Antarktis verändert haben, vor allem im Sommer.

Seit der Entdeckung des Ozonlochs im Jahr 1985 sind beispielsweise die Sommertemperaturen entlang der Antarktischen Halbinsel deutlich gestiegen, bei gleichzeitigem Rückgang der Meereisbedeckung. Vor allem in der Bellingshausensee und in den Gewässern westlich und nordöstlich der Antarktischen Halbinsel verzeichnen Forscher eine deutlich verkürzte Meereisbedeckung als noch vor 30 Jahren. Wissenschaftler haben außerdem festgestellt, dass sich im Schatten der Westwinde auch Sturmpfade und Regengebiete aus den mittleren Breiten Richtung Süden verschoben haben. Beide beeinflussen die Wassertemperatur und die Strömungsverhältnisse des Südpolarmeers. Heutzutage wird zum Beispiel deutlich mehr Wasser in der Antarktis umgewälzt als noch in den 1990er-Jahren. Weiter nördlich, in den Subtropen, hat sich im Zuge des Wandels die Hadley-Zelle vergrößert. Außerdem regnet es dort mehr. Die klimatischen Auswirkungen des Ozonabbaus in der antarktischen Stratosphäre reichen demzufolge weit über die Grenzen der Antarktis hinaus.

Kaum Ozonlöcher in der Arktis

Meldungen über Ozonverluste über der Arktis gibt es nur in seltenen Fällen, weil die Stratosphäre im hohen Norden deutlich wärmer ist als in der Antarktis und der

nördliche Polarwirbel eine sehr viel geringere Stabilität aufweist. Deshalb stellen sich nur in wenigen Ausnahmefällen jene superkalten Bedingungen ein, die zur Entstehung polarer Stratosphärenwolken unbedingt benötigt werden. Auffallend geringe Ozonkonzentrationen über der Arktis beobachteten Wissenschaftler beispielsweise im Frühling 2011 sowie im Januar und Februar 2016, als die Temperatur in der Stratosphäre auf bis zu minus 90 Grad Celsius sank und mehr als ein Viertel des Ozons zerstört wurde.

Ein Abkommen zeigt Wirkung

Insgesamt aber nimmt die Ozonkonzentration in der Stratosphäre seit einigen Jahren wieder zu. Diese positive Entwicklung ist auf die Unterzeichnung und Umsetzung des Montrealer Protokolls zurückzuführen, mit dem am 16. September 1987 die Produktion verschiedener ozonzerstörender Stoffe weltweit eingeschränkt oder verboten wurde. Modellsimulationen haben gezeigt, dass sich ohne dieses Produktionsverbot bereits im Jahr 2011 ein großes Ozonloch über der Arktis gebildet hätte. Kleinere Löcher in der arktischen Ozonschicht wären unter diesen Umständen zum jetzigen Zeitpunkt ein wiederkehrendes Phänomen gewesen.

Dank der internationalen Einigung aber ist die Menge ozonzerstörender Stoffe in der Atmosphäre gesunken, und die Ozonschicht der Erde erholt sich Schritt für Schritt. Außerhalb der Polarregionen sind zum Beispiel die Ozonwerte in der oberen Stratosphäre, also in einer Höhe von mehr als 40 Kilometern, seit dem Jahr 2000 um einige Prozentpunkte gestiegen. Forscher gehen bislang davon aus, dass sich die Ozonschicht über der nördlichen Hemisphäre bis zum Jahr 2030 erholen und auf das Niveau des Jahres 1980 steigen wird. Über der südlichen Hemisphäre wird dieser Prozess voraussichtlich 20 bis 30 Jahre länger dauern.

Das antarktische Ozonloch, welches sich dank des Montrealer Protokolls in den zurückliegenden Jahren nicht vergrößert hat, wird auch in den kommenden Jahren wiederkehren. Es sollte jedoch langsam kleiner werden und ab dem Jahr 2060 Geschichte sein – vorausgesetzt, alle Vorgaben des Montrealer Protokolls werden weiterhin eingehalten.

Der Rückzug des Eises

> **Wo Atmosphäre und Meer stetig wärmer werden, treten Eis und Schnee den Rückzug an. Diese Logik ist schon lange nicht mehr nur ein Gedankenspiel in den Polarregionen. Sie ist tagtägliche bittere Realität, vor allem in der Arktis, wo die Schneedecke und das Meereis schrumpfen, die Gletscher sich ausdünnen und der dauergefrorene Boden immer tiefer auftaut. Der Klimawandel hat aber auch längst die Antarktis erreicht – mit Folgen, die mittlerweile an allen Küsten dieser Welt zu spüren sind.**

Die bittere Wahrheit

In der Wissenschaft werden Daten und Fakten selten emotionsgeladen präsentiert. Stattdessen konzentrieren sich die Fachleute darauf, neue Erkenntnisse in der Regel möglichst sachlich und unaufgeregt vorzustellen. Umso bemerkenswerter erscheinen vor diesem Hintergrund die klaren Worte, welche Klimaforscher mittlerweile wählen, um die Klimaveränderungen in den Polarregionen zu beschreiben, denn die bittere Wahrheit lautet: Der Klimawandel hat die Polarregionen längst erreicht und wirkt sich großräumig auf alle Bestandteile der Kryosphäre – der Eiswelten – aus. Das Meereis und die Schneedecke schrumpfen; die Gletscher transportieren ihr Eis immer schneller Richtung Meer, verlieren auf diese Weise an Masse und ziehen sich zurück; die dauergefrorenen Böden tauen tiefer und länger anhaltend auf; schwimmende Landeisflächen wie die Schelfeisgebiete in der Antarktis werden von der Wärme zerfressen. Hinzu kommt, dass jede dieser Einzelveränderungen unmittelbare Folgen für die anderen Komponenten des Klimasystems hat und die Prozesse sich auf diese Weise gegenseitig verstärken.

Mit Schnee fängt alles an

In der öffentlichen Diskussion um den Klimawandel in den Polarregionen findet Schnee in der Regel geringe Beachtung. Zu Unrecht, denn Schnee besitzt nicht nur von allen natürlichen Materialien die besten Isolations- und Albedoeigenschaften. Das Ausmaß, das Volumen und die Beständigkeit der Schneedecke entscheiden zudem maßgeblich über das Schicksal aller anderen Komponenten der Kryosphäre mit Ausnahme des submarinen Permafrosts – also der dauergefrorenen Böden unter den arktischen Schelfmeeren, weil sie nicht mit Schnee in Berührung kommen.

Schnee ist der Grundbaustoff für Gletscher und Eisschilde. Wo Schneefälle ausbleiben, bildet sich weder Firn noch Gletschereis. Gleichzeitig hat die Sonne bei Schneemangel ein leichtes Spiel. Im Vergleich zu nacktem Gletscher- oder Meereis mit einer Rückstrahlkraft von 20 bis 30 Prozent reflektiert frischer Schnee nämlich 80 Prozent und mehr des einfallenden Sonnenlichts. Er schützt auf diese Weise nicht nur die Eisflächen oder den dauergefrorenen Boden unter sich vor der Sonnenwärme. Schnee trägt somit auch maßgeblich zur Selbstkühlung der Polargebiete bei.

Als luftig-fluffige Auflage isoliert Schnee zudem wie eine Daunenjacke und bewahrt von ihm bedeckte Pflanzen, Tiere und den Boden vor extremer Kälte. Diese Eigenschaft bringt aber auch Nachteile mit sich. So verhindert eine zu dicke Schneedecke unter Umständen, dass Permafrostboden, der im Sommer angetaut ist, im Winter erneut bis in große Tiefe durchfrieren kann. Fällt Schnee auf junges Meereis, bremst die isolierende Schicht den Wärmetransport vom Meer durch das Eis in die Atmosphäre und somit das Gefrieren des Eises von unten. Eisschollen mit Schnee auf ihrer Oberfläche wachsen demzufolge deutlich langsamer als nacktes Eis. In vielen Regionen der Welt, vor allem auch in der hohen Arktis, stellt Schnee zudem ein wichtiges Wasserreservoir dar. Auf den Inseln des kanadisch-arktischen Archipels beispielsweise speisen Schneebänke bis weit in den Sommer hinein kleine Tümpel und Feuchtgebiete mit Wasser.

In der Arktis bedeckt Schnee weite Landschaften bis zu neun Monate im Jahr. Die Dicke der Schneeschicht sowie ihre Verweildauer hängen vor allem von der Lufttemperatur und der Niederschlagsmenge ab. Forscher gehen deshalb davon aus, dass sich die weltweite Schneesituation im Zuge des Klimawandels grundlegend und auf sehr unterschiedliche Weise verändern wird. Um die Entwicklung genau verfolgen zu können, erfassen die

Wissenschaftler drei Schneeparameter: die Größe der von Schnee bedeckten Fläche, seine Verweildauer, also die Länge der Schneesaison, sowie das sogenannte Wasseräquivalent – gemeint ist die Wassermenge, die im Schnee gespeichert ist.

Obwohl es von Jahr zu Jahr große Unterschiede in den einzelnen Parametern geben kann, beobachten die Wissenschaftler in der Arktis einige wichtige Trends, die sich in Zukunft noch verstärken werden:

Kleinere Gesamtfläche, frühere Schmelze

Als Reaktion auf die steigende Lufttemperatur schrumpft die Fläche, die heutzutage noch von Schnee bedeckt wird, denn mittlerweile fällt Schnee in weniger Regionen als noch vor 15 Jahren. Außerdem beginnt die Schneeschmelze in der nördlichen Hemisphäre heutzutage deutlich früher im Jahr und betrifft viel größere Landstriche – vor allem in der Arktis. Im Zeitraum von 1967 bis 2012 hat die Fläche der noch mit Schnee bedeckten Landstriche auf der Nordhalbkugel im Monat Juni um durchschnittlich 53 Prozent abgenommen. Das heißt, auch weite Flächen der Arktis sind auf das Jahr gerechnet länger schneefrei und damit nicht in der Lage, Sonnenstrahlung zu reflektieren. Bestätigt wird dieser Trend zusätzlich durch eine weitere Entwicklung: Die Länge der Schneesaison in der nördlichen Hemisphäre hat seit dem Winter 1972/73 im Mittel um 5,3 Tage pro Jahrzehnt abgenommen. Im Norden Europas und Asiens beträgt der Rückgang sogar 12,6 Tage pro Jahrzehnt.

Mehr Schnee in Sibirien

Im Norden Europas und Asiens fällt heutzutage deutlich mehr Schnee als in der Vergangenheit. Diese Entwicklung wirkt sich vor allem auf die Temperatur des sibirischen Permafrostbodens aus. Sie steigt langsam, weil die wachsende Schneedecke verhindert, dass der Boden im Winter kräftig durchfrieren kann.

Weniger Schnee auf dem Meereis

Auf dem arktischen Meereis nimmt die Schneedecke ab. Dieser Trend ist darauf zurückzuführen, dass das Meereis heutzutage erst deutlich später im Jahr gebildet wird. Schnee, der im Herbst fällt, landet demzufolge nicht mehr wie früher auf jungem Meereis, sondern im offenen Ozean

und ist als Reflexionsschicht für junges Meereis verloren. Schneehöhenmessungen belegen, dass junges Meereis heutzutage eine dünnere Schneedecke aufweist als früher. Das heißt, die Schutzschicht schmilzt im Frühling auch schneller, wodurch das Meereis früher einer direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt wird. Die Folgen sind klar: Das Meereis schmilzt früher, der Ozean hat mehr Zeit, sich zu erwärmen, wodurch sich dann im Herbst die Neubildung des Eises weiter verlangsamt.

Wechsel von Regen und Schnee

Im Zuge der globalen Erwärmung erhöht sich die Wahrscheinlichkeit plötzlicher Wärmeeinbrüche und Schmelzperioden während des arktischen Winters. Niederschlag fällt dann oft in Form von Regen, was die physikalischen Eigenschaften der Schneedecke ebenso verändert wie ein wiederholtes Anschmelzen.

Klimamodellierungen zufolge werden sich die Schneebedingungen in einer wärmeren Welt deutlich ändern. In Küstengebieten wie Alaska und Skandinavien werden die Schneedecke und die Schneemenge drastisch zurückgehen. Arktisweit wird zudem die Länge der Schneesaison abnehmen. Mehr Schnee wird nur in wenigen Gebieten der Arktis fallen – vor allem in Sibirien. Als Reaktion auf die dickere Schneeauflage wird in diesen Regionen aber auch die Bodentemperatur steigen und der bislang dauergefrorene Boden bis in größere Tiefen auftauen. Pflanzen haben somit im Winter bessere Überlebenschancen, weshalb Forscher annehmen, dass die Vegetation der sibirischen Tundra künftig besser wachsen wird.

Härtere Zeiten warten dagegen auf pflanzenfressende Säugetiere wie Karibus, Rentiere und Moschusochsen, denn es wird im Winter künftig noch häufiger regnen. Fällt Regen auf Schnee, bildet sich eine Eisschicht, welche die Tiere in der Regel nur mit großer Mühe durchbrechen können. Mehrere Eisschichten in der Schneedecke verhindern vollends, dass die Tiere an ihr Winterfutter gelangen. Kurze Wärmeeinbrüche im Winter und der dazugehörige Regen können außerdem der Vegetation schaden.

Verändern wird sich auch der Wasserkreislauf in der hohen Arktis. Wissenschaftler beobachten heute schon, dass wichtige Schneebänke im Frühjahr vollständig weggeschmelzen und im Sommer als Wasserspeicher fehlen. Diese Entwicklung wird zunehmen und die sommerliche

Kryosphäre

Kryosphäre ist der Sammelbegriff für alle Komponenten des Systems Erde, die Wasser in seiner gefrorenen Form enthalten. Dazu gehören: Schnee, Eisschilde und Gletscher, die Schelfeise, das Meereis, das Eis auf Flüssen und Seen sowie Permafrost, den es sowohl an Land als auch im Meeresboden gibt.

Trockenheit in den betroffenen Regionen vorantreiben. In Sibirien dagegen treten im Frühling die Flüsse immer öfter über ihre Ufer, weil die Schneemenge wächst und die Schmelze immer rasanter voranschreitet. Die Schneebedingungen in der Arktis verändern sich also grundlegend im Zuge des Klimawandels und ziehen nachhaltige Veränderungen für das Klima, die Ökosysteme und den Menschen nach sich.

Das Meereis macht Platz

Die Meereisflächen der Polarregionen reagieren ausgesprochen empfindlich auf Klimaveränderungen. Wächst das Meereis, deutet diese Entwicklung auf eine Abkühlung des Planeten hin. Schrumpfen hingegen die Eisflächen, spricht dies für eine globale Erwärmung. Die Klimaforschung richtet aber auch deshalb ihren Fokus auf das Meereis, weil es eine Schlüsselrolle im Klimasystem der Erde einnimmt. Wo Meereis entsteht oder den Ozean bedeckt, geschieht dreierlei:

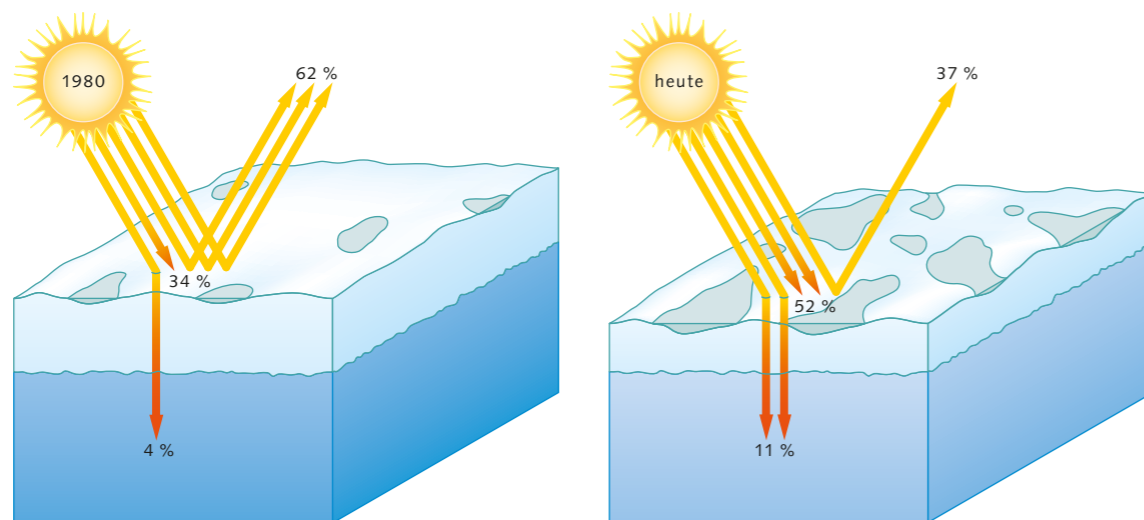
- Meereis reflektiert die einfallende Sonnenstrahlung und kühlt auf diese Weise die Erdoberfläche.
- Meereis kurbelt die Umwälzbewegung der Wassermassen an, indem bei seiner Entstehung Salzlauge freigesetzt wird, welche die Dichte der darunterliegenden Wassermassen erhöht und diese schwerer werden lässt, sodass sie absinken.

- Meereis bremsen als isolierender Deckel den Gas- und Wärmeaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre und verhindert, dass der Wind das Oberflächenwasser durchmischen kann und Wärme aus tieferen Schichten des Ozeans an die Atmosphäre abgegeben wird.

Regionale Veränderungen der Meereisbedeckung wirken deshalb nicht nur lokal, sondern meist auch auf globaler Ebene, indem sie eine Vielzahl von Folgeprozessen auslösen, deren Bandbreite und Komplexität die Wissenschaft noch nicht gänzlich verstanden hat.

Das Meereis der Arktis wird seit dem Jahr 1979 durch Satelliten vermessen. Als vom Meereis bedeckte Fläche gelten dabei alle Meeresregionen, deren Eiskonzentration mindestens 15 Prozent beträgt. Das heißt, auf mindestens 15 Prozent der Wasserfläche sollte Meereis treiben. Die Ausdehnung der von Meereis bedeckten Fläche variiert mit den Jahreszeiten. Zum Ende des arktischen Winters im Monat März ist die Meereisdecke in der Regel doppelt bis dreifach so groß wie zum Ende des Sommers im September. In beiden Monaten schauen die Wissenschaftler deshalb mit besonderem Interesse auf die Ausdehnung des Meereises. Die maximale Ausdehnung im Winter sowie die kleinste Eisfläche im Sommer stellen wichtige Kenngrößen dar, anhand derer sich die Entwicklung des Meereises ablesen lässt – und die ist in der Arktis durchweg negativ.

3.17 > Das Meereis der Arktis ist heutzutage dünner als noch in den 1980er-Jahren und wird großflächiger von Schmelzwassertümpeln bedeckt. Beides führt dazu, dass die Eisdecke und der Ozean darunter mehr Sonnenenergie absorbieren, wodurch sich der Meereisrückgang weiter verstärkt.



3.18 > Der Wind bläst Schnee von der Oberfläche des grönländischen Petermann-Gletschers auf das Meer hinaus. Vor der Abbruchkante des Gletschers staut sich derweil das Meereis und gibt der Eiszunge auf diese Weise zusätzlich Halt.



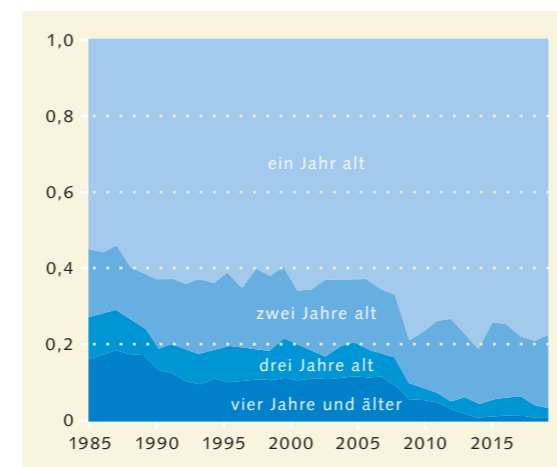
3.19 > Der europäische Erdbeobachtungssatellit CryoSat-2 ist eines der wichtigsten Instrumente der internationalen Meereisforschung. Er hat ein spezielles Radaraltimeter an Bord, welches aus einer Höhe von 700 Kilometern die Dicke des arktischen und antarktischen Meereises vermisst.



Infolge der steigenden Luft- und Wassertemperaturen in der Arktis hat die Ausdehnung des Meereises in den zurückliegenden vier Jahrzehnten um mehr als 30 Prozent abgenommen. Dieser Rückgang ist nicht nur in jeder Jahreszeit, sondern auch in allen Regionen des Arktischen Ozeans zu spüren, fällt aber im Sommer nahezu doppelt so hoch aus wie im Winter. Das großflächige Schmelzen des Eises ist vor allem auf die Temperaturveränderungen im Frühjahr und Sommer zurückzuführen. Die Schmelzsaison beginnt heutzutage etwas früher im Jahr, endet aber vor allem deutlich später. Das heißt, die Schmelzsaison verlängert sich spürbar – um fünf Tage pro Jahrzehnt. In einigen Randmeeren des Arktischen Ozeans schmilzt das Meereis inzwischen sogar elf Tage länger als noch eine Dekade zuvor.

In den zurückliegenden zwölf Sommern (2007 bis 2018) schrumpfte die Eisdecke jeweils in einem solchen Ausmaß, dass diese Jahre die Top 12 der Negativrekordliste ausmachen. In Zahlen ausgedrückt: Die September-Ausdehnung des arktischen Meereises nimmt derzeit um 12,8 Prozent pro Dekade ab. Das entspricht im Zeitraum

von 1997 bis 2014 Einbußen von 130 000 Quadratkilometern pro Jahr. Damit verlor der Arktische Ozean im Durchschnitt jährlich eine Eisfläche so groß wie Griechenland. Im September 2018 betrug die verbleibende Restfläche 4,59 Millionen Quadratkilometer.



3.20 > Arktisches Packeis, das älter als vier Jahre ist, gibt es mittlerweile kaum noch.

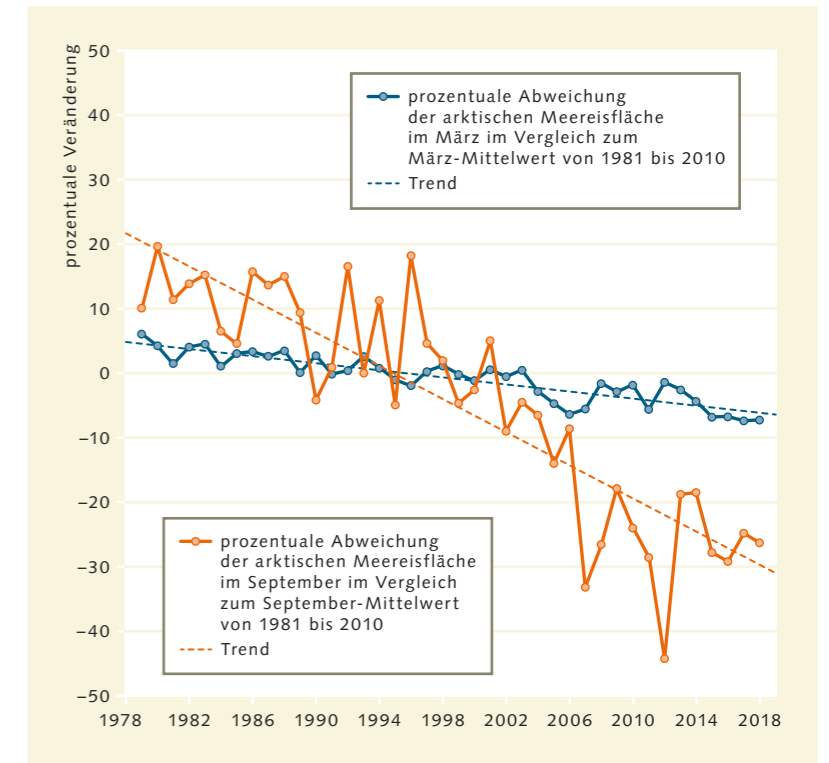
Das Schrumpfen der Meereisdecke in der Arktis gehört damit zu den auffälligsten Veränderungen der Erdoberfläche in den zurückliegenden drei Jahrzehnten. Wissenschaftler gehen sogar so weit zu sagen, dass sich die Arktis aufgrund der globalen Erwärmung im Winter nicht mehr in jene extreme Eiswelt verwandelt, die sie einmal war. In Sachen Meereis trifft diese Aussage auf jeden Fall zu, denn der weiße Eisdeckel des Arktischen Ozeans wird nicht nur kleiner, er ist auch deutlich dünner geworden und sein Eis viel jünger als in der Vergangenheit.

Als die Forscher im Jahr 1985 begannen, auch die Dicke und damit das Alter des arktischen Meereises zu messen, fielen zum Meereismaximum im März 2,54 Millionen Quadratkilometer oder 16 Prozent der Eisfläche in die Kategorie „mehrjähriges Eis“. Das heißt, dieses Eis hatte mehr als vier Sommer überdauert und war dementsprechend bis zu vier oder fünf Meter dick. Zur gleichen Zeit im Jahr 2018 machte der Anteil des mehrjährigen Eises nur noch 130 000 Quadratkilometer und somit 0,9 Prozent der Eisfläche aus. Das heißt, die Fläche des dicken, mehrjährigen Eises ist in 33 Jahren um 95 Prozent zurückgegangen. Das Gros des arktischen Meereises, genauer gesagt: 77 Prozent, ist heute nicht älter als einen Winter.

Messungen des Erdbeobachtungssatelliten CryoSat-2 zeigen, dass das arktische Meereis zum Ende des Winters 2017/2018 im Durchschnitt 2,14 Meter dick war. Da der Satellit jedoch erst seit dem Jahr 2010 im Einsatz ist, sind langfristige Vergleiche der Meereisdicke noch nicht möglich. Die Eisdickenspanne im bisherigen Messzeitraum lag im April zwischen 2,03 und 2,29 Meter. Der Winter 2017/2018 reiht sich also in den mittleren Bereich ein. Nichtsdestotrotz hat sich das Bild des arktischen Meerereises grundlegend gewandelt. Anstelle einer mehrere Meter dicken, mehrsaisonalen und nahezu undurchdringbaren Packeisdecke treibt heute also eine fragile, dünne Eisschicht auf dem Arktischen Ozean.

Leichteres Spiel für Wind und Wellen

Die dünne Eisschicht reagiert nicht nur deutlich empfindlicher auf steigende Luft- und Wassertemperaturen. Wind und Wellen können sie auch leichter aufbrechen – ein



Phänomen, das bislang eher aus der Antarktis bekannt war. Mittlerweile aber beobachten Forscher die zerstörerische Wirkung von Wind und Wellen auf das Meereis auch in der Arktis.

Im September 2009 beispielsweise wurden Wissenschaftler Zeugen, wie auf dem offenen Meer aufgetürmte Wellen bis zu 250 Kilometer weit in die Eisdecke wanderten und dort dicke, mehrjährige Schollen von etwa einem Kilometer Länge in kleinere, nur noch 100 bis 150 Meter messende Stücke zerbrachen. Diese Zerstückelung bewirkte, dass das Eis beweglicher wurde und infolgedessen wahrscheinlich auch schneller schmolz. Für die zunehmende Entfaltungsfreiheit des Windes spricht außerdem die Beobachtung, dass junges Meereis inzwischen häufiger als Pfannkucheneis auf dem Nordpolarmeer treibt. Diese von Wellen geformten Eisteller waren früher vor allem aus der Antarktis bekannt. Dort findet der Wind über dem Südpolarmeer stets ausreichend Platz und eisfreie Wasserflächen, um Wellen aufzutürmen, die anschließend im Küstenbereich die frisch entstandenen Eisplättchen und -nadeln zu Pfannkuchen

3.21 > Die arktische Meereisdecke erreicht meist im März ihre maximale Ausdehnung und vermindert sich dann bis September auf ihre kleinste Fläche. Zu erkennen ist, dass die saisonalen Meereisdecken schrumpfen. Im Sommer sind die Gesamtverluste größer als im Winter.

formen. Im Nordpolarmeer dagegen fehlten diese offenen Wasserflächen bislang. Mittlerweile aber entdecken Forscher bei Winterexpeditionen in den arktischen Gewässern immer häufiger auf diesen auffälligen Typ Eis – vor allem in der westlichen Arktis. In der Beaufortsee und der Tschuktschensee beispielsweise gefriert das Meer inzwischen einen Monat später als noch zu Beginn der Eisbeobachtungen. Der Wind hat demzufolge ausreichend Platz und Gelegenheit, das Meer in Wallung zu versetzen.

Und noch eine Entwicklung ist neu: Das junge, dünnere und damit leichtere Meereis treibt zum Teil schneller durch die Arktis als altes, schweres Packeis. Ein Grund mag sein, dass der Wind weniger Kraft braucht, um das Eis vor sich her zu schieben. Es muss allerdings noch andere Einflussfaktoren geben, denn Windgeschwindigkeit und -richtung allein reichen nicht aus, um die Eiswanderung vollständig zu erklären.

Arktisches Meereis künftig nur noch im Winter?

Wo sich Risse in der Meereisdecke öffnen, Polynien entstehen oder das Meereis großflächig schmilzt, kommen Ozean und Atmosphäre in direkten Kontakt miteinander. Wärme kann ausgetauscht werden, Wasser kann verdunsten, und der Wind kann das Meer in Wallung bringen. Wissenschaftler nehmen deshalb an, dass sich die treibenden Kräfte im Strömungssystem des Nordpolarmeers künftig zumindest im Sommer verändern werden. Bestimmten im Zuge der Meereisbildung bislang vor allem der Salzgehalt und die Temperatur der Wassermassen, wohin diese wanderten oder wie sie sich schichteten (thermohaline Zirkulation), so wird in eisfreien Zeiten künftig der Wind eine größere Rolle spielen. Er wird die oberen Wasserschichten häufiger durchmischen, Oberflächenströmungen beschleunigen und den Wärmeaustausch mit der Atmosphäre zumindest in den Übergangsphasen Frühling und Herbst

3.22 > Auf Pfannkucheneis stießen Meereisforscher früher nur in der Arktis. Mittlerweile aber finden Wind und Wellen auch im westlichen arktischen Ozean ausreichend Platz und Gelegenheit, junges, dünnes Meereis so auffällig zu verformen.

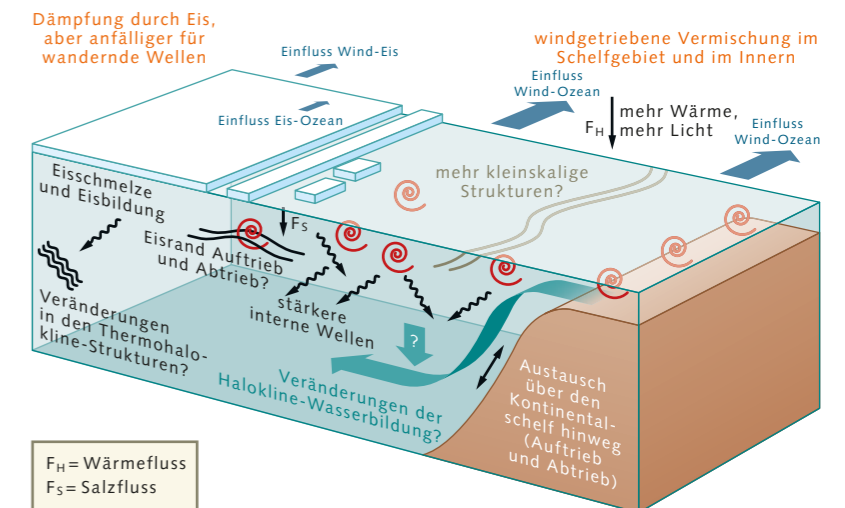
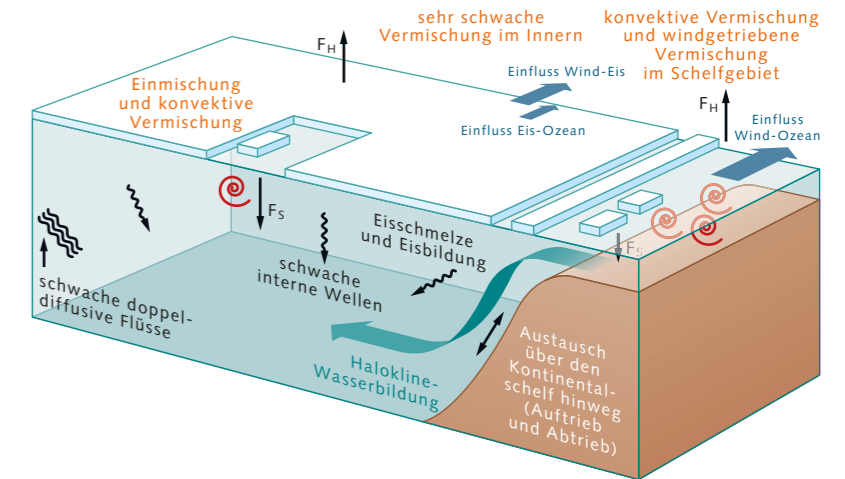


verstärken. Im Winter aber, wenn sich das Meereis wieder ausbreitet, wird der Einfluss des Windes wieder nachlassen.

Dass sich auch künftig Meereis auf dem Arktischen Ozean bilden wird, bezweifelt niemand. Die saisonalen Unterschiede zwischen den jahreszeitlichen Meereisausdehnungen werden sich allerdings verstärken. Der Arktische Ozean wird im Winter großflächig zufrieren, im darauffolgenden Sommer jedoch wird die entstandene Eisdecke ebenso großflächig wieder schmelzen. Damit werden im Nordpolarmeer künftig ähnliche saisonale Meereisbedingungen herrschen wie im Südpolarmeer.

Wann der Arktische Ozean im Sommer zum ersten Mal eisfrei sein könnte, ist auf das Jahr genau nicht vorhersagbar. Die meisten Klimamodellierungen prognostizieren eine derart große Eisschmelze für die Mitte des 21. Jahrhunderts, wobei Polarforscher unter „eisfrei“ etwas anderes verstehen als die allgemeine Öffentlichkeit. Aus wissenschaftlicher Perspektive gilt das Nordpolarmeer als „eisfrei“, wenn die vorhandenen Eisflächen in der Summe weniger als eine Million Quadratkilometer ergeben. Diese auf den ersten Blick merkwürdig anmutende Definition hat einen guten Grund: Meereis gibt es nicht nur im zentralen Arktischen Ozean, sondern auch entlang der Küsten der Anrainerstaaten sowie in den vielen kleinen Meerengen und Seewegen des kanadisch-arktischen Archipels. Dieses küstennahe Eis ist in der Regel dicker als die Schollen auf dem offenen Ozean und wird vermutlich länger erhalten bleiben als die Eisdecke im zentralen Nordpolarmeer. Um diesem Umstand gerecht zu werden und dennoch treffende Vorhersagen machen zu können, haben die Wissenschaftler den Schwellenwert von einer Million Quadratkilometer als Kennwert für einen quasi eisfreien Arktischen Ozean gewählt.

Die Gefahr, dass diese Grenze unterschritten wird, steigt mit der globalen Durchschnittstemperatur. Der Weltklimarat kommt in seinem Spezialbericht aus dem Jahr 2018 zu dem Schluss, dass bei einer globalen Erwärmung um zwei Grad Celsius das Nordpolarmeer nach etwa zehn Jahren das erste Mal im Sommer eisfrei sein wird. Gelingt es der Menschheit jedoch, die Erwärmung auf 1,5 Grad Celsius zu beschränken, dürfte es 100 Jahre dauern, bis das Meereis in der zentralen Arktis für einen Sommer verschwindet und die Gesamtfläche unter den Grenzwert von einer Million Quadratkilometer sinkt.



F_H = Wärmefluss
 F_S = Salzfluss

Rätselraten in der Antarktis

Im Gegensatz zur Arktis hat das saisonale Meereis der Antarktis seit Beginn der Satellitenaufzeichnungen kontinuierlich zugenommen. Rekordmeldungen von einer Wintereisdecke von 20,1 Millionen Quadratkilometern machten im Jahr 2014 weltweit Schlagzeilen, gerade weil die Antarktis zu dieser Zeit einen starken Kontrast zur schrumpfenden Eisdecke der Arktis darstellte. Während der Meereisrückgang im hohen Norden damals mit der globalen Durchschnittstemperatur zunahm, stellten die gegenläufigen Entwicklungen in der Antarktis die Forscher vor ein Rätsel, und zumindest in der Öffentlichkeit keimte die Hoffnung, dass das Südpolargebiet vielleicht doch von den Folgen der Erwärmung verschont bliebe.

3.23 > Wo das arktische Meereis schmilzt, kommen Luft und Meer in Kontakt miteinander. Wärme, Wind und Wellen erhalten so die Chance, wichtige Prozesse in der Wassersäule maßgeblich zu verändern.

Dieser Optimismus erwies sich jedoch als unbegründet, denn die Eisdecke wuchs nur in bestimmten Regionen der Antarktis, unter anderem im Rossmeer, wo Forscher eine Eisflächenzunahme von 5,2 Prozent pro Jahrzehnt dokumentierten. In der Bellingshausen- und Amundsen-see dagegen hatte das Meereis im selben Zeitraum um 5,1 Prozent abgenommen. Ebenso gegensätzlich entwickelte sich die Länge der Eissaison. Während das Meereis im Rossmeer deutlich später im Sommer zu schmelzen begann, zog es sich in den Meeresgebieten der Westantarktis immer früher zurück. Im Weddellmeer beobachteten die Forscher sogar beide Trends: In einigen Regionen nahm die Meereisausdehnung zu, in anderen ab. Antarktisweit reichten die Zuwäche jedoch aus, um die Gesamtbilanz bis zum Jahr 2014 ins Plus zu drehen.

Die Kehrtwende erfolgte zwei Jahre später, als das antarktische Meereis im Winter 2016 plötzlich nur noch auf eine Gesamtfläche von 18,5 Millionen Quadratkilometern anwuchs. Seitdem schrumpft die Meereisausdehnung in der Antarktis. Am 1. Januar 2019 vermeldeten Wissenschaftler sogar ein neues Rekordminus von 5,47 Millionen Quadratkilometern – die kleinste Januar-Eisfläche seit Beginn der Satellitenmessungen vor 40 Jahren. Selbst im sonst so eisstarken Rossmeer hatten sich zu diesem Zeitpunkt schon eisfreie Wasserflächen gebildet.

Warum das Meereis der Antarktis im Winter nicht mehr so große Flächen wie einst bedeckt und wieso es im Sommer inzwischen so blitzartig schmilzt, wird derzeit erforscht. Eine neue Theorie US-amerikanischer Forscher setzt auf natürliche Strömungsschwankungen im Südpolarmeer, die in einem Rhythmus von 30 Jahren auftreten. Demnach haben sich im Zeitraum von 1980 bis 2000 in einigen Regionen des Südpolarmeers die Konvektion und Tiefenwasserbildung abgeschwächt. Wärme aus dem Zwischenwasser sei dadurch in der Tiefe des Ozeans eingeschlossen worden und nicht an die Oberfläche gelangt. Gleichzeitig habe sich das Oberflächenwasser abgekühlt, wodurch beste Voraussetzungen für die Bildung von Meereis entstanden seien – ungeachtet der globalen Erwärmung.

Mittlerweile aber gibt es Hinweise darauf, dass die Umwälzung der Wassermassen im Südpolarmeer wieder zugenommen hat. Somit könnten das Zwischenwasser sowie die in der Tiefe gefangene Wärme wieder an die

Meeresoberfläche gelangen und ein Grund für die Eisrückgänge sein. Sollte diese Vermutung stimmen, würde die Meereisdecke des Südpolarmeers weiter abnehmen, denn die Temperatur des Zwischenwassers steigt.

Andere Wissenschaftler argumentieren, dass man bei der Suche nach den Ursachen des Meereisrückgangs auch die Atmosphäre nicht außer Acht lassen darf. So ließen sich die Meereisverluste in der Bellingshausen- und Amundsen-see sehr gut mit der Abschwächung kalter Winde erklären, die über dem Südpolarmeer wehen und einst das Oberflächenwasser weiträumig gefrieren ließen. Veränderte Winde könnten auch erklären, warum das Meereis im westlichen Teil des Rossmeers bis zum Jahr 2014 so überproportional angewachsen ist.

Diskutiert wird zudem der Einfluss der schmelzenden Gletscher und Eisschilde. Hatten sie in den zurückliegenden Jahrzehnten eventuell einen kühlenden Effekt auf das Oberflächenwasser? Wurde dieses durch ihr Schmelzwasser nachhaltig verdünnt? Welche Rolle spielte die Abnahme der Ozonkonzentration? Wie wirken atmosphärische Veränderungen in den Tropen auf die Klimabläufe in der Antarktis?

Eindeutige Antworten fehlen bislang, auch weil die Wissenschaftler nur auf verhältnismäßig wenig Messdaten aus dem Südpolarmeer zurückgreifen können. Die Dicke des antarktischen Meereises zum Beispiel ist nur stichprobenartig bekannt. Erschwerend kommt hinzu, dass es Klimamodellen bislang nicht gelingt, die bisherige Meereisentwicklung in der Antarktis richtig zu simulieren. Aus diesem Grund gibt es auch noch keine Vorhersagen zur künftigen Entwicklung. Der Weltklimarat verzichtet deshalb in seinem Spezialbericht zum 1,5-Grad-Ziel ganz bewusst auf jegliche Prognosen zur Zukunft des antarktischen Meereises in einer zwei oder 1,5 Grad Celsius wärmeren Welt.

Solche Vorhersagen werden jedoch dringend benötigt: Zum einen, weil das Meereis auf vielfältige Weise die großen Schelfeise schützt. Zum anderen, weil es einen wichtigen Lebensraum für die tierischen Bewohner des Südpolarmeers darstellt – sowohl für Winzlinge wie den Krill, dessen Larven an der Unterseite des Eises überwintern, als auch für Riesen wie den Kaiserpinguin oder die Weddellrobben, die Meereis als natürliche Rast- und Aufzuchtplätze für ihren Nachwuchs nutzen.

Permafrost – der kalte Kitt des Untergrunds

Wenn es in der Vergangenheit etwas gab, worauf sich die Bewohner der Arktis verlassen konnten, dann auf die Tragkraft des Untergrunds. Überall dort, wo im Winter Eiseskälte herrschte und die Schneedecke zu dünn war, um das Erdreich vor Frost zu schützen, frohr der Boden so tief durch, dass er auch im kurzen arktischen Sommer nur an der Oberfläche auftaute. Gebäude, Straßen und Pipelines ruhten also auf einem soliden Fundament aus Sanden, Gesteinen, Tier- und Pflanzenresten, die vom Eis zusammengehalten wurden.

Diese dauergefrorenen Böden der Polarregionen werden als Permafrost bezeichnet, wobei die wissenschaftliche Definition noch etwas spezifischer ist. Demnach gilt sämtlicher Untergrund als Permafrost, der in zwei aufeinanderfolgenden Jahren kontinuierlich Temperaturen von null Grad Celsius und kälter aufweist. Permafrost findet sich demzufolge auch in Hochgebirgen außerhalb der hohen nördlichen Breiten, zum Beispiel in den Höhenlagen der Alpen, je nach Hanglage ab einer Höhe von 2500 bis 3000 Metern. Die Bodentemperatur dieses Gebirgspermafrosts liegt in der Regel über minus drei Grad Celsius. Permafrostgebiete gibt es außerdem im Hochland von Tibet, in den Anden sowie in den unvergletscherten Regionen der Antarktis.

Experten unterscheiden dabei zwischen Regionen mit kontinuierlichem Permafrost, wie sie vor allem in der Arktis vorkommen, und Gebieten mit nicht kontinuierlichem Permafrost. Bei ersteren ist der Untergrund in einer Größenordnung von 90 bis 100 Prozent seiner Fläche gefroren. In Regionen mit nicht kontinuierlichem Permafrost sind es nur 50 bis 90 Prozent der Fläche. Und Landschaften, in denen der Permafrostanteil noch geringer ist, werden als Gebiete mit sporadischem Permafrost bezeichnet.

Als Wissenschaftler vor 20 Jahren die Fläche aller Permafrostregionen der Welt addierten, kamen sie auf eine Gesamtfläche von circa 22,8 Millionen Quadratkilometern. Das entsprach 24 Prozent des Festlands der Erde. Die Mächtigkeit der gefrorenen Bodenschichten variiert dabei bis heute weltweit zwischen weniger als einem Meter und einigen Hundert Metern. In Zentralsibirien erreicht der Permafrost im Extremfall sogar eine Dicke von bis zu etwa 1600 Metern – allerdings nur in Gebieten mit wenig

Erdwärme. Die tiefsten mittleren jährlichen Bodentemperaturen im arktischen Permafrost werden mit minus 15 Grad Celsius im kanadisch-arktischen Inselarchipel gemessen.

Ein Erbe vergangener Eiszeiten

Mächtige Permafrostschichten sind ein Erbe vergangener Eiszeiten. Die entsprechenden Gebiete waren in den zurückliegenden Kaltzeiten nicht von Gletschern bedeckt, sodass ihr Boden der polaren Eiseskälte für Jahrtausende schutzlos ausgeliefert war – abgesehen von einer dünnen Schneedecke. Ihr Untergrund ist infolgedessen bis heute von tiefen Eiskeilen durchzogen. Sie entstehen, wenn sich der dauerhaft gefrorene Boden im Winter aufgrund der großen Kälte zusammenzieht und an bestimmten Stellen aufreißt. Schmilzt dann im Frühjahr der Schnee, rinnt das Schmelzwasser in diese Risse. Bei einer Bodentemperatur von etwa minus zehn Grad Celsius gefriert es dort jedoch sofort wieder und dehnt sich aus. Wiederholt sich dann dieser Prozess in den darauffolgenden Jahren, entsteht im Lauf der Zeit ein Eiskörper, der an einen riesigen Keil erinnert.

In der sibirischen Arktis wuchsen auf diese Weise bis zu 40 Meter tiefe und bis zu sechs Meter breite Eiskeile in

3.24 > Geoforscher des deutschen Alfred-Wegener-Instituts machen Mittagspause. Im Hintergrund: die von Eiskeilen durchzogene Steilküste Sibiriens.



3.25 > Wo die Winterkälte Risse im Permafrostboden Spitzbergens hinterlässt, lagern Schmelzwasserbäche im Frühjahr Wasser, Steinchen und anderes Treibgut ab. Gefriert das Wasser in den Rissen dann zu Eis, dehnt es sich aus und drückt alles Eingelagerte wieder nach außen. Auf diese Weise entstehen diese auffälligen Ringmuster.



den Untergrund, deren Eis teilweise mehr als 100 000 Jahre alt ist. Sie durchziehen den Boden wie ein Netzwerk und sind in Luftaufnahmen als netzartige Struktur sehr gut zu erkennen. In diesen Gebieten bestehen quasi 40 bis 90 Prozent des Untergrunds aus Eis. Forscher nennen Permafrost mit einem derart hohen Eisanteil im Boden Yedoma. Er ist heutzutage in den Tiefländern Sibiriens, Alaskas und im Westen Kanadas weit verbreitet, hat als submariner Permafrost aber auch in jenen arktischen Küstenregionen überdauert, die während der Eiszeiten trocken lagen und erst später wieder überflutet wurden.

Wenn Schmelzwasser im Boden zu Eis gefriert, dehnt es sich aus und vergrößert sein Volumen um etwa zehn Prozent. Auf diese Weise kann es passieren, dass das Eis in Permafrostgebieten hügelartig aus dem Boden herauswächst. Solche Eishügel werden Pingos genannt und kommen vor allem in Alaska und im Nordwesten Kanadas häufig vor. Auch sie können Tausende Jahre alt sein und existieren wie die Eiskeile gewissermaßen aufgrund des jahreszeitlichen Wechsels von Gefrieren und Auftauen in der Arktis.

So reagiert Permafrost auf Erwärmung

Wie schon angedeutet sind die Sommer in weiten Teilen der Arktis warm genug, dass der dauergefrorene Boden an der Oberfläche taut. Die Wärme breitet sich dabei abhängig von der Bodenbeschaffenheit und den lokalen Klimabedingungen bis in eine Tiefe von 20 bis 200 Zentimetern aus und taut das Erdreich auf. Diese im Sommer tauende und im Winter regelmäßig wieder gefrierende oberste Bodenschicht wird Auftauschicht genannt. Ihre Dicke hängt in der Hocharktis sowie in der Tundra in erster Linie von der Lufttemperatur und der Schneebedeckung ab. Je weniger Schnee im Winter gefallen ist, desto besser kann die kalte Winterluft den Permafrost auskühlen. Forscher sprechen deshalb von einem klimagesteuerten Permafrost. Je weiter man aber Richtung Süden reist, desto wärmer wird es – und Permafrost kann sich nur noch in jenen Gebieten halten, in denen die Vegetationsdecke oder Torfablagerungen das Eis im Boden isolieren und gegen die warme Luft abpuffern. Wie wirkungsvoll diese Schutzfunktion ist, konnten deutsche Forscher in den sibirischen Lärchenwäldern beobachten.



3.26 > Die Dahurische Lärche besitzt ein so flaches Wurzelwerk, dass sie in der dünnen Auftauschicht des Permafrosts wachsen kann.

Im Gegensatz zu Kiefern und Fichten ist die sibirische Lärche *Larix gmelinii* ein ausgesprochener Flachwurzler. Dieser Baumart genügt eine sommerliche Auftautiefe von 20 bis 30 Zentimetern, um zu gedeihen. Ihr flacher, dichter Wurzelteppich wiederum bildet eine derart wirkungsvolle Schutzschicht für den Permafrost darunter, dass es in der Vergangenheit bei einem Wechsel von einer Kalt- zu einer Warmzeit oft mehrere Jahrtausende gedauert hat, bis der Permafrost großräumig verschwunden war und sich die Vegetation Sibiriens an die wärmeren Klimabedingungen angepasst hat. Der isolierende Effekt zeigt sich aber auch heute noch: So taut der Permafrost in Regionen, in denen der Lärchenwald abgeholzt wurde, deutlich schneller als in bewaldeten Gebieten.

Wo Schnee schmilzt und der Permafrostboden taut, staut sich Schmelzwasser, weil es aufgrund des gefrorenen Untergrunds nicht versickern kann. Die entstehende Auftauschicht enthält deshalb besonders viel Wasser und ist sehr beweglich, was vor allem in der Tundra schon an kleinen Hängen zu großräumigen Bodenrutschungen und damit zur Erosion führen kann. Anderenorts fällt der Untergrund in sich zusammen oder senkt sich ab, weil das Eis im Erdreich schwindet.

Solche wärmebedingten Veränderungen des Permafrosts werden seit den späten 1960er-Jahren an vielen Stellen in der Arktis, aber auch in Hochgebirgen beobachtet. Mittlerweile gilt das großflächige Tauen des Permafrosts und sein damit verknüpfter Rückzug als eines der eindeutigsten Signale des Klimawandels. In Alaska bei-

Hocharktis

Als Hocharktis werden die polaren Wüstengebiete der Arktis bezeichnet, die vor allem auf Grönland, im hohen Norden Sibiriens sowie im kanadisch-arktischen Archipel zu finden sind. Im Gegensatz zur Tundra wachsen hier keine Sträucher mehr, sondern nur noch speziell angepasste bodenbedeckende Pflanzen. Die Mitteltemperatur für den Monat Juli liegt bei fünf Grad Celsius.

spielsweise hält die Sommerwärme mittlerweile so lang an, dass die Auftauschicht zwei Monate später im Jahr wieder einfriert als noch vor 30 Jahren. In vielen Teilen der Arktis taut das Erdreich im Sommer zudem immer tiefer auf, sodass Flachwurzler wie die Lärche sich Richtung Norden ausbreiten. Im kanadischen British Columbia müssen Forscher heute den Alaska-Highway rund 25 Kilometer weiter hinauffahren als noch im Jahr 1964, bevor sie links und rechts der Strecke auf Bodeneis stoßen, denn die südliche Grenze der Permafrostzone zieht sich immer weiter Richtung Norden zurück. Neue Studien kommen deshalb auch zu dem Schluss, dass die Gesamtfläche des mit Permafrost durchsetzten Untergrunds inzwischen von knapp 23 Millionen Quadratkilometern im Jahr 1999 auf aktuelle 19,9 Millionen Quadratkilometer geschrumpft ist.

Deutliche Veränderungen zeigen sich auch im tiefen Untergrund. Langzeitmessungen des globalen Permafrostnetzwerks haben ergeben, dass in allen Gebieten mit Dauerfrostboden die Temperatur des gefrorenen Untergrunds in mehr als zehn Meter Tiefe im Zeitraum von 2007 bis 2016 um durchschnittlich 0,3 Grad Celsius gestiegen ist – in der Arktis ebenso wie in der Antarktis und in den Hochgebirgen Europas und Zentralasiens. Noch höher fiel die Erwärmung im Nordwesten Sibiriens aus. Dort erwärmte sich der gefrorene Boden in mehr als zehn Meter Tiefe an einzelnen Messstationen um nahezu ein Grad Celsius. Eine deutliche Erwärmung zeichnet sich auch in den Permafrostgebieten der Hochgebirge sowie in der Antarktis ab. Die Bodentemperatur in den Alpen, im Himalaja sowie in den Gebirgen der nordischen Länder stieg im Mittel um 0,19 Grad Celsius. In den wenigen tiefen Bohrlöchern der Antarktis verzeichneten die Forscher einen Anstieg um 0,37 Grad Celsius. Die Bodentemperatur des Permafrosts steigt demzufolge im Takt der Klimaerwärmung und verändert so nachhaltig das Gesicht der Polarregionen, vor allem in der Arktis.

Eine Seenlandschaft auf Zeit

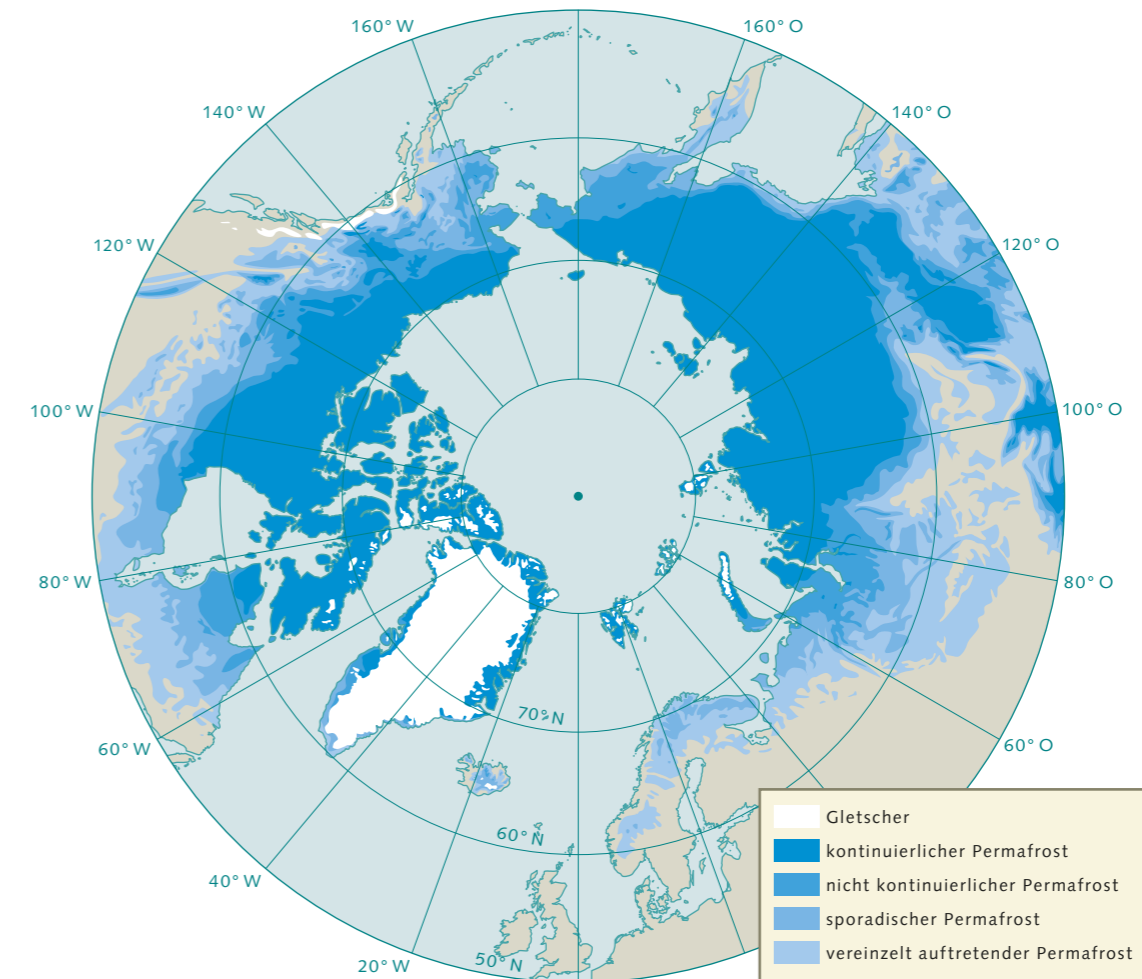
Tundrengebiete, in denen das Bodeneis schwindet, erkennt man unter anderem daran, dass sich dort, wo einst Eiskeile wuchsen, plötzlich Senken im Boden bilden. In diesen Vertiefungen sammelt sich dann im Winter zunächst tiefer Schnee, der den Untergrund vor tiefem

Durchfrieren schützt. Im Frühling und Sommer fließt dann das Schmelzwasser aus der näheren Umgebung in diese Senke. Ein kleiner Tümpel entsteht, der aufgrund seines Wassers und der dunkleren Oberfläche mehr Sonneneinstrahlung speichert als die umgebende Landoberfläche. Die Wärme des Wassers wird am Grund des Tümpels sowie an seinen Rändern besonders effektiv an den Untergrund abgegeben. Auf diese Weise taut der Permafrost im Umfeld des Tümpels immer weiter auf.

Je eisreicher der Untergrund ist, desto wirkungsvoller ist dieser Effekt. Aus dem anfänglichen Tümpel entsteht so im Lauf der Zeit ein sogenannter Thermokarstsee, der ab einer Wassertiefe von etwa zwei Metern auch im Winter nicht mehr vollständig durchfriert. Das heißt, die Wassertemperatur am Grund des Sees bleibt das gesamte Jahr hindurch über dem Gefrierpunkt, was wiederum zur Folge hat, dass sich die Auftauzone unter dem See nochmals vergrößert.

Irgendwann ist der Boden so tief aufgetaut, dass der Untergrund das Seewasser nicht mehr zurückhalten kann. Es versickert in die Tiefe und der See läuft leer. Häufig beobachten die Forscher aber auch, dass sich am Ufer der Thermokarstseen kleine Rinnen bilden, durch die das Wasser dann nach und nach abläuft. Das fließende Wasser taut dabei den umliegenden Untergrund so nachhaltig auf, dass Erosion im großen Maßstab möglich wird. Experten sprechen an dieser Stelle von Thermoerosion. Die Wassermassen lösen Hangrutschungen aus und reißen so viel Bodenmaterial mit sich, dass die anfänglichen Rinnen schnell zu großen Tälern anwachsen und die Seen innerhalb weniger Stunden bis Tage drainieren.

Das heißt, sowohl das Entstehen von Thermokarstseen als auch ihr Verschwinden in einer Permafrostregion deutet auf grundlegende Veränderungen des dauergefrorenen Bodens hin. Ein Team deutscher und US-amerikanischer Wissenschaftler hat sich diese Effekte zunutze gemacht und auf Satellitenbildern aus den Jahren 1999 bis 2015 untersucht, wo überall in Alaska, Kanada und Sibirien die Permafrostlandschaften ihre Oberfläche verändern. Ihre Ergebnisse weisen auf eine großflächige Degeneration des Bodeneises hin – sowohl in Regionen mit kontinuierlichem Permafrost als auch in Gebieten, in denen Permafrost nicht kontinuierlich oder auch nur sporadisch vorkommt.



3.27 > Geowissenschaftler haben die Permafrostregionen der Nordhalbkugel in vier Zonen eingeteilt. Diese unterscheiden sich im Ausmaß, in dem ihr Erdreich gefroren ist.

In der ostsibirischen Region Zentraljakutien beispielsweise hat die Fläche der Thermokarstseen im untersuchten Zeitraum um 50 Prozent zugenommen – eine Beobachtung, die Wissenschaftler auch in anderen Gebieten mit kontinuierlichem Permafrost machen. Am südlichen Rand der Permafrostregion dagegen, in der Zone des sporadischen oder nicht kontinuierlichen Permafrosts, laufen mehr und mehr dieser Seen aus. Belege dafür fanden die Forscher unter anderem im Westen Alaskas. Allgemeingültige Aussagen zu einer generellen Zu- oder Abnahme der Seen sind dennoch schwierig. Das Ausmaß der Bildung von Thermokarst hängt nämlich in erster Linie von den lokalen Wetter-, Boden- und Klimabedingungen ab – und die unterscheiden sich in der Arktis von Region zu Region.

Die Küsten bröckeln

Besonders besorgniserregend ist das Ausmaß der Thermoerosion vor allem entlang der Permafrostküsten und Flusssufer. Wo sich der Permafrost im Zuge steigender Lufttemperaturen erwärmt oder sogar taut, haben Bäche und Flüsse sowie die Wellen des Meeres ein leichteres Spiel. Sie unterspülen die Ufer- oder Küstenabschnitte, transportieren alles lose Material davon und graben sich so Stück für Stück landeinwärts. An einer Steilklippe entlang des Itkillik River im Norden Alaskas dokumentierten Forscher im Zeitraum von 2007 bis 2011 Erosionsraten von 19 Metern pro Jahr. Insgesamt zog sich die rund 700 Meter lange und 35 Meter hohe Klippe in dieser Zeit um bis zu 100 Meter zurück.

Thermoerosion
Als Thermoerosion wird ein dynamischer Prozess bezeichnet, bei dem Material zunächst durch die Wirkung von Wärme (Schmelzen von Eis) gelöst und anschließend abtransportiert wird. In den Permafrostgebieten erfolgt dieser Abtransport in der Regel durch Wasser.

Fatale Feuer in der Tundra

Landsenkungen (Thermokarst) und Thermoerosion können auch durch Waldbrände und Tundrenfeuer ausgelöst werden. Während solcher Brände vernichtet das Feuer die den Permafrost isolierenden Schichten aus Humus, Torf, Gras und Wurzelwerk und beschleunigt auf diese Weise langfristig sein Tauen. Im Norden Alaskas beispielsweise senkte sich nach dem großen Anaktuvuk-River-Feuer im Juli 2007 die Landoberfläche durch die Entstehung von Thermokarst innerhalb von sieben Jahren um teilweise mehr als einen Meter ab.

Das Feuer in der Tundra war im ungewöhnlich warmen und trockenen Sommer 2007 von einem Blitzschlag ausgelöst worden

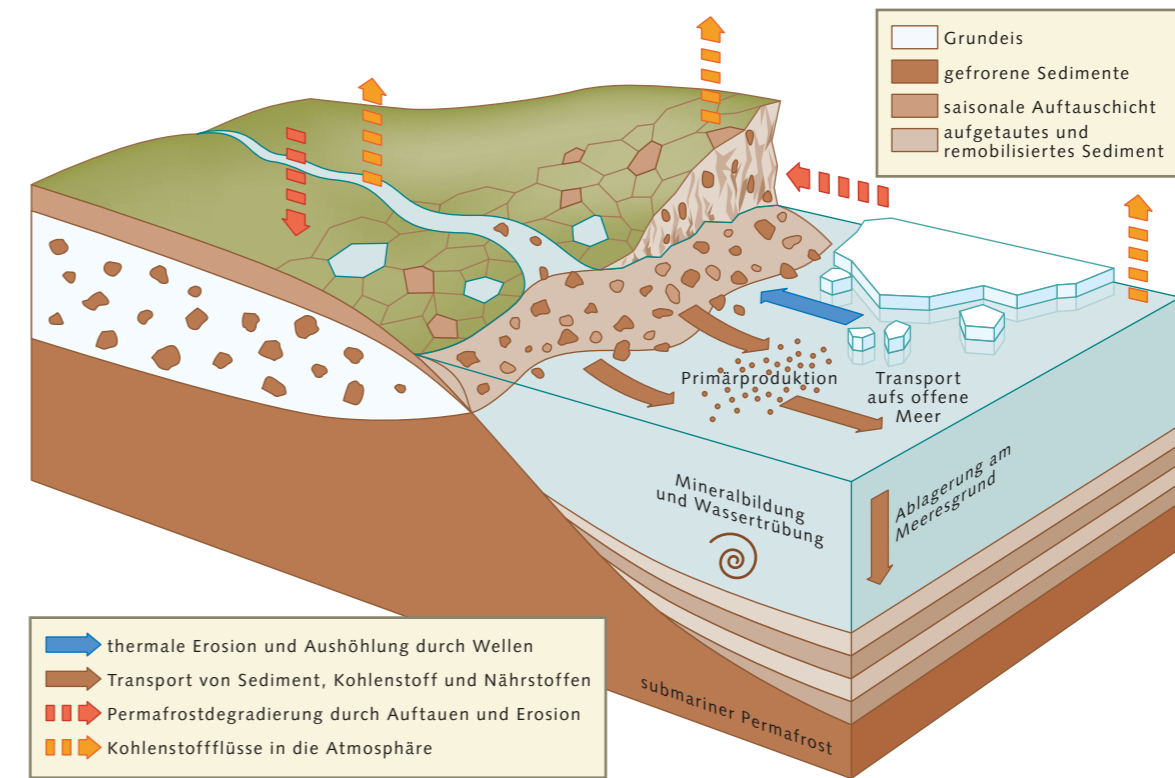


3.28 > Rauchschwaden über dem Yukon Delta National Wildlife Refuge im Südwesten Alaskas. Im Juni 2015 wüteten gleich zwei Tundrenbrände in der Region.

und hatte sich bis zum Einsetzen des ersten Schneefalls Anfang Oktober über eine Fläche von 1039 Quadratkilometern gefressen. Untersuchungen im Anschluss an den Brand ergaben, dass es der größte Flächenbrand in Alaskas Tundra seit 5000 Jahren war. Gewitter waren in den zurückliegenden Jahrtausenden nur selten über die North Slope gezogen, wie die Tundrenlandschaft im Norden Alaskas heißt. Die Polarluft über der Region war die meiste Zeit einfach zu kalt, als dass sich Gewitterwolken hätten bilden können. Und wenn es doch mal brannte, dann nur auf vergleichsweise kleinen Flächen.

Aufgrund der Wärme und Trockenheit im Sommer 2007 aber zerstörte das Anaktuvuk-River-Feuer auf einen Schlag mehr Tundra, als es alle North-Slope-Feuer in den fünf Jahrzehnten zuvor vermocht hatten. Forscher bewerteten die Ursache, das Ausmaß und vor allem auch die Dauer des Brandes als klares Signal eines Wandels in der Tundra, den sie in erster Linie auf klimatische Veränderungen zurückführen. Mit der zunehmenden Erwärmung in der Arktis steigt die Gefahr von Gewittern und somit auch die Wahrscheinlichkeit von Blitzschlägen, die Feuer auslösen können. In der Blitz-Statistik der US-amerikanischen Behörden war zum Zeitpunkt des Brandes bereits eine Zunahme der Blitzhäufigkeit zu erkennen. Außerdem schmilzt mittlerweile die Winterschneedecke in Alaska deutlich früher. Alaskas Feuerwehr hatte deshalb bereits im Jahr vor dem großen Tundrenbrand den Beginn der jährlichen Waldbrandsaison vom 1. Mai auf den 1. April vorverlegt.

Wald- und Tundrenfeuer, ausgelöst durch Blitzschläge, haben das Potenzial, die Landschaft der Hocharktis grundlegend zu verändern und eine klimatische Kettenreaktion auszulösen. Denn wenn die Tundra erst einmal brennt, werden riesige Mengen des Treibhausgases Kohlendioxid freigesetzt. Als die Flammen am Anaktuvuk River loderten, wurden mehr als zwei Millionen Tonnen Kohlendioxid emittiert. Diese Menge entspricht in etwa der Monats-CO₂-Emission einer Großstadt wie Las Vegas. Außerdem hinterließ das Feuer dunkle, verbrannte Erde, die zwischen 50 und 71 Prozent weniger Rückstrahlkraft besaß als eine ungestörte Tundra und in den Folgejahren so viel Sonneneinstrahlung absorbierte, dass der darunterliegende Permafrost tiefer auftaute und sich die Landschaft auf etwa einem Drittel der Brandfläche absenkte. Ähnlich schwerwiegende Folgen für den gefrorenen Boden beobachten Experten nach Bränden in Wäldern mit oberflächennahem Permafrost, von denen es in Alaska reichlich gibt. In diesen Gebieten stieg die Bodentemperatur nach einem Feuer in der Regel so schnell und umfassend, dass schon nach drei bis fünf Jahren kein Permafrost mehr nachweisbar war.



3.29 > Je schneller der Permafrost taut, desto stärker erodieren die arktischen Küsten und desto nachhaltiger verändert sich das Leben im Meer. Denn Flüsse und Wellen spülen große Mengen Schlamm ins Meer und trüben den Flachwasserbereich ein. Gleichzeitig werden Nähr- und Schadstoffe freigesetzt, die in dem Material enthalten sind. Welche langfristigen Folgen diese Entwicklung hat, ist Gegenstand aktueller Forschung.

Die Erosion der arktischen Küstenlinien beträgt durchschnittlich 50 Zentimeter pro Jahr. Dieser Wert wird aber vor allem in jenen Regionen weit übertroffen, wo sich weniger Meereis bildet, welches die Küstenabschnitte normalerweise vor der zerstörerischen Kraft von Wind und Wellen schützt, und wo aufgrund der steigenden Lufttemperatur die Auftauschicht des Permafrosts immer tiefer auftaut, sodass es gerade an Steilküsten häufiger zu Hangrutschungen kommt. An diesen Küstenabschnitten unterspülen die Wellen die Steilküste mittlerweile so wirksam, dass immer häufiger große Stücke Land von der Küste abbrechen.

Auf diese Weise hat zum Beispiel die sibirische Permafrostinsel Muostach in den vergangenen 60 Jahren deutlich mehr als einen halben Kilometer ihrer Nord-Süd-Ausdehnung verloren und damit fast ein Viertel ihrer gesamten Fläche. Noch im Jahr 2012 erstreckte sich das vor dem Lenadelta gelegene bananenförmige Eiland über eine Länge von 7,5 Kilometern. An ihrer breitesten Stelle war sie damals 500 Meter breit. Mittlerweile aber ist sie deutlich kleiner, denn große Abschnitte der eisreichen

Inselküste büßen mittlerweile pro Jahr bis zu 3,4 Meter ein. An der Nordspitze der Insel liegt die Erosionsrate sogar zwischen elf und 39 Metern. Sollte dieser Trend anhalten, wird Muostach in hundert, vielleicht auch 200 Jahren verschwunden sein.

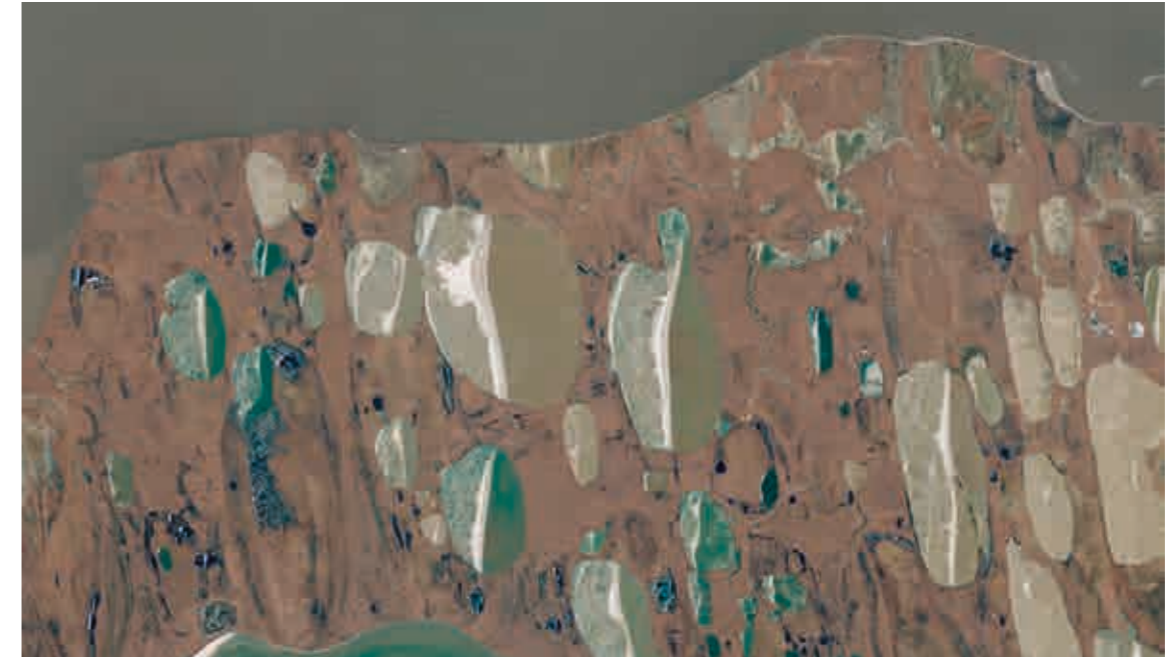
Der Zerfall der arktischen Permafrostküsten gefährdet nicht nur Häuser, Straßen und andere Infrastrukturen, die in Küstennähe errichtet wurden. Er verändert auch die Lebensbedingungen im Meer. Denn je stärker die Erosion ausfällt, desto mehr Schlamm wird vom Land in das Meer getragen, was in den dortigen Flachwasserbereichen oftmals zu massiven Trübungen führt.

Das erodierte Material enthält außerdem jede Menge Nähr- und Schadstoffe wie Stickstoff, Phosphor oder Quecksilber. Sowie diese Stoffe in das Meer gelangen, werden sie dort weitertransportiert, abgebaut oder reichern sich an und verändern auf diese Weise nachhaltig den Flachwasserbereich. Die Folgen für das Ökosystem können Wissenschaftler derzeit noch nicht genauer abschätzen, denn aussagekräftige Langzeituntersuchungen zu diesem Thema fehlen bislang.

3.30 > Küstenerosion in Bildern: Diese Landsat-Aufnahme zeigt einen Abschnitt der US-amerikanischen Nordküste zwischen Drew Point in Alaska (kleiner Zipfel links im Bild) und einem regionalen Flugplatz (kleine Piste an der Küste rechts im Bild) am 8. Juli 1992. Meereis schützt zu diesem Zeitpunkt noch die Küste vor der zerstörerischen Kraft der Wellen.



3.31 > 26 Jahre später, am 5. Oktober 2018, fehlen nordöstlich des Flughafens und rund um Drew Point große Flächen Land. Wind und Wellen haben sie abgetragen – auch weil das Meereis in dieser Region deutlich abgenommen hat. Die Eisunterschiede in beiden Bildern sind allerdings zum Großteil jahreszeitlich bedingt.



Kohlenstoffspeicher Permafrost

Die arktischen Permafrostböden werden häufig als „gigantische Gefriertruhe“ bezeichnet. In den gefrorenen Böden lagern große Mengen an Kohlenstoff in Form fossiler Tier- und Pflanzenreste. Wissenschaftler schätzen die Gesamtmenge dieses Bodenkohlenstoffs auf 1100 bis 1500 Milliarden Tonnen. Davon sind bislang etwa 60 Prozent dauerhaft gefroren und damit dem globalen Kohlenstoffkreislauf der Erde entzogen. Nur zum Vergleich: Diese Menge tiefgefrorenen Kohlenstoffs entspricht in etwa jener Kohlenstoffmenge, die derzeit in der Erdatmosphäre vorhanden ist und in Form von Kohlendioxid und Methan die Erde aufheizt.

Tauen die im Permafrost eingelagerten tierischen und pflanzlichen Überreste auf, beginnen Mikroorganismen, diese zu zersetzen. Dabei wandeln sie den organischen Kohlenstoff entweder in Kohlendioxid oder in Methan um. Welches der beiden Treibhausgase am Ende entsteht, hängt davon ab, welche Mikroorganismen aktiv werden – einige Archaeen produzieren ausschließlich Kohlendioxid, andere nur Methan –, aber auch davon, ob ihnen bei der Zersetzung der Tier- und Pflanzenreste Sauerstoff zur Verfügung stand. Ist dies der Fall, wird er veratmet und

Kohlendioxid ausgestoßen. Zersetzen die Mikroorganismen die aufgetauten Tier- und Pflanzenreste allerdings unter anaeroben Bedingungen, also in einem sauerstoffarmen Milieu wie beispielsweise am schlammigen Grund der Thermokarstseen, bauen die methanproduzierenden Gruppen der Archaeen den Kohlenstoff zu Methan um. Das ausgesprochen klimawirksame Treibhausgas steigt dann in Blasen vom Grund des Sees auf und gelangt in die Atmosphäre. Durch den Abbau von aufgetautem organischem Material könnten die Permafrostregionen der Arktis bis zum Jahr 2100 etwa 140 Milliarden Tonnen Kohlenstoff in die Atmosphäre freisetzen. Diese Emission allein würde zu einer weiteren Erwärmung der Erde um etwa 0,1 Grad Celsius führen.

Wie schnell die Tier- und Pflanzenreste von den Mikroorganismen abgebaut werden können, hängt in erster Linie von der Qualität des organischen Materials ab. Bisherige Studien zeigen, dass die Kohlenstoffqualität im Permafrost auch mit zunehmender Tiefe und zunehmendem Alter gleich bleibt. Vereinfacht gesagt bedeutet das: Ist das organische Material erst einmal aufgetaut, schmeckt den Mikroorganismen die Tiefkühlkost aus Permafrost gleich gut, egal ob sie 20 oder 20 000 Jahre lang gefroren war.

Beeinflusst wird die Methanproduktion auch von den lokalen Wetterbedingungen. Wie US-amerikanische Forscher in einer neuen Studie herausfanden, kann zum Beispiel schon ungewöhnlich früher Frühlingsregen die Methanproduktion in den Thermokarstregionen Alaskas um bis zu 30 Prozent anheben. Grund dafür ist, dass im Frühjahr die Atmosphäre und damit auch der Regen deutlich wärmer sind als der gefrorene Boden.

Regnet es nun wie im Jahr 2016 deutlich früher als in den Jahren zuvor, sammelt sich das Regenwasser in den Thermokarstsenken und taut dort den Untergrund bis in eine Tiefe von einem Meter auf. Die gesamte Senke ähnelt dann einem morastigen Feuchtgebiet im Miniformat, in dessen Schlamm nur wenig Sauerstoff zur Verfügung steht. Im Zuge dieses Auftauprozesses werden deshalb vor allem methanproduzierende Mikroorganismen im Erdreich aktiv. Sie verarbeiten das organische Material zu Methan. Außerdem setzen die Mikroben Nährstoffe frei, welche das Wachstum bestimmter Riedgräser in der Senke anregen. Wie die meisten Pflanzen nehmen auch Riedgräser Kohlendioxid aus der Luft auf und wandeln es durch Photosynthese in Zucker und Sauerstoff um. Einen Teil des Zuckers verfrachten die Pflanzen in den Wurzelbereich, wo er unter Umständen ins Erdreich gelangt und dort von

den Mikroben zu Methan verarbeitet wird. Die Wissenschaftler schlussfolgern daraus: Je mehr Riedgräser in einer Thermokarstsenke wachsen und je eher im Jahr sie dies tun, desto mehr Methan wird im morastigen Untergrund dieser Senke produziert.

Bleibt die Frage, ob durch das verstärkte Pflanzenwachstum in den Permafrostgebieten eventuell mehr Kohlendioxid aus der Atmosphäre entfernt wird, als es die Bodenmikroben freisetzen. Eine klare Antwort darauf gibt es bislang nicht. Fest steht allerdings, dass die positiven Rückkopplungen zwischen Boden, Eis und Atmosphäre den Rückzug des Permafrosts in der Arktis verstärken und so wirken, als hätte jemand der Gefriertruhe den Stecker gezogen. Um genauere Vorhersagen zur Zukunft des Bodeneises treffen zu können, hat die Wissenschaft in den zurückliegenden Jahren eine Vielzahl regionaler und überregionaler Computermodelle entwickelt, die zum Teil schon in der Lage sind, Energieflüsse und Rückkopplungen zwischen Permafrost, Atmosphäre und Vegetation abzubilden. Obwohl diese Modelle im Detail noch große Unterschiede in ihren Vorhersagen aufweisen, so zeigen sie doch alle einen Trend: Die anhaltende Erwärmung der Arktis sowie die Zunahme der Schneefälle in ehemals trockenen Regionen des Nordpolargebiets werden zu einem



3.32 > Abertausende Methanblasen durchziehen das Eis auf dem Lake Minnewanka im kanadischen Banff-Nationalpark. Das klimaschädliche Treibhausgas wird freigesetzt, wenn Mikroorganismen organisches Material zersetzen, welches sich am Seeboden angesammelt hat.

großräumigen Verlust des oberflächennahen Permafrosts führen. Den Rückgang können die Wissenschaftler sogar beziffern. Demnach verliert die Arktis jedes Mal eine 0,8 bis 2,3 Millionen Quadratkilometer große Permafrostfläche, wenn die Lufttemperatur um ein weiteres Grad Celsius steigt.

Der Weltklimarat kommt in seinem 1,5-Grad-Sonderbericht zu dem Schluss, dass bei einer globalen Erwärmung von 1,5 Grad Celsius oder weniger die Fläche der Permafrostregionen im Vergleich zu heute um 21 bis 37 Prozent schrumpfen würde. Sollte sich die Welt um 1,5 bis zwei Grad erwärmen, würde sich die Fläche voraussichtlich um 35 bis 47 Prozent verringern. Bei einer Erwärmung von bis zu drei Grad Celsius wäre davon auszugehen, dass die Permafrostböden der Welt in einem noch weitaus größeren Maß auftauen würden. Klimasimulationen zur Arktis zeigen, dass es unter diesen Umständen vermutlich nur noch in wenigen Regionen Bodeneis gäbe – etwa in der Gegend des kanadisch-arktischen Inselarchipels, an der russischen Arktisküste und in den höher gelegenen Regionen Ostsibiriens.

Kostenfaktor Permafrost

Diese Zukunftsaussichten haben das Thema Permafrost zu einem der dringlichsten Handlungsfelder in den Arktisanrainerstaaten gemacht. Das wirtschaftliche und soziale Schadensrisiko für Städte, Gemeinden und Überland-Infrastrukturen wie Straßen, Schienenwege und Pipelines ist enorm – vor allem in Ländern wie Kanada, dessen Territorium zur Hälfte von Permafrost unterlagert ist. Oder auch in Russland, das auf 65 Prozent seiner Fläche Permafrost aufweist. Einer neuen Studie zufolge müsste der russische Staat mit Reparatur- und Instandhaltungskosten von bis zu 85 Milliarden US-Dollar rechnen, sollte das Worst-Case-Szenario des Weltklimarats eintreten und sich die Welt bis zum Ende des 21. Jahrhunderts um bis zu 4,9 Grad Celsius erwärmen. Die Schäden an Privatbesitz, der dann auf schwindendem Permafrost stünde, könnten sich in diesem Fall auf 53 Milliarden US-Dollar belaufen.

Beachtet werden müssen außerdem die ökologischen Veränderungen, die durch den Verlust der dauergefrorenen Böden hervorgerufen werden. Dazu zählen zum Beispiel ein veränderter Wasserkreislauf oder aber das Vor-



dringen der Baumgrenze. Erschwerend kommt hinzu, dass sich die Umweltbedingungen in der Arktis zu einem Zeitpunkt verändern, an dem sich die ehemals nur dünn besiedelte Region kräftig weiterentwickelt und wirtschaftlich erschlossen wird. Daher steigt der Bedarf an neuen lokalen und überregionalen Beobachtungssystemen, mit denen sowohl Infrastrukturen als auch ganze Landschaften überwacht werden können. Moderne Fernerkundungsmethoden wie Einsätze von Drohnen, regelmäßige Satellitenüberwachungen sowie die lasergenaue Vermessung von Höhenveränderungen werden hier in Zukunft eine wichtige Rolle spielen. Schon heute verfolgen Forscher mithilfe von Satellitenbildern den Rückzug der Permafrostküsten und kartieren neue, durch schnelles Permafrosttauen entstandene Landschaftsformen wie Thermokarstseen und -senken oder Thermoerosionstäler. Außerdem arbeiten Expertengruppen an neuen Risikoanalyseverfahren, die den zukünftigen Klimawandel mitberücksichtigen. Dabei gehen sie auch von einer Zunahme extremer Wetterereignisse wie Starkregen, Überschwemmungen und Gewitter aus.

Wie weitreichend deren Folgen sein können, zeigte die Überschwemmung des Dalton Highways in Alaska im Frühjahr 2015. Die Straße ist die einzige Landverbindung zu Alaskas 24 Ölfeldern im hohen Norden. Parallel zum Highway verlaufen außerdem die Trans-Alaska-Pipeline und der Sagavanirktok River, der im Frühjahr 2015 den

3.33 > Auf Permafrost errichtete Straßen sacken in der Regel zuerst am Rand ab, weil der gefrorene Untergrund dort am schnellsten taut. Um das zu verhindern, werden sogenannte Ventilationsrohre am Straßenrand verlegt, die im Winter eiskalte Außenluft in den dann noch relativ warmen Untergrund führen und ihn dadurch kühlen.

Mysteriöse Krater

Im Sommer 2014 entdeckten russische Rentierhirten ein großes, kreisrundes Loch in der sibirischen Tundra der Region Jamal. Fotos des mysteriösen Kraters erregten weltweit Aufmerksamkeit und befeuerten Spekulationen über Meteoriteneinschläge oder die Machenschaften außerirdischer Lebensformen in dem Gebiet 2200 Kilometer nordöstlich von Moskau. Russische Geowissenschaftler untersuchten daraufhin das etwa 50 Meter tiefe und 30 Meter breite Loch in mehreren Expeditionen. Ihre Ergebnisse lassen darauf schließen, dass das Loch entstand, als im Zuge der Permafrosterwärmung ein sogenanntes Gashydrat, also eine große Menge gefrorenen Methans und Wassers, in großer Tiefe aufgetaut war. Das Methan war dabei vom gefrorenen in den gasförmigen Zustand übergegangen und hatte sich um das 164-Fache ausgedehnt. Anschließend war es mit einem Druck von bis zu 30 Kilogramm pro Quadratmeter Richtung Erdoberfläche aufgestiegen. In jenem Moment, als das Gas auf einen Schlag in die Atmosphäre entwich, muss es eine gewaltige Eruption gegeben haben. Das Erdreich aus dem Krater wurde jedenfalls mehr als 180 Meter weit durch die Luft geschleudert. Mittlerweile gehen die Forscher sogar davon aus, dass solche Methaneruptionen ein ziemlich häufig auftretendes Phänomen in der sibirischen Arktis sind. So wird unter anderem vermutet, dass durch diesen Prozess in einer zurückliegenden Warmphase viele der heute bekannten Seen auf der Halbinsel Jamal entstanden sind.



3.34 > Dieser Krater auf der Halbinsel Jamal entstand im Jahr 2014, als große Mengen Methangas explosionsartig aus dem Erdreich austraten.

Highway überflutete. Von März bis Juni stand die Straße auf einer Länge von fast 60 Kilometern bis zu 75 Zentimeter tief unter Wasser. Der nördliche Teil des Highways musste wochenlang gesperrt werden, was finanzielle Einbußen für die lokalen Transportunternehmen brachte. Die Ölfelder waren nur aus der Luft erreichbar. Alaskas Gouverneur rief in dieser Zeit zweimal den Notstand aus.

Die Flut selbst beschädigte sowohl die Straße als auch die angrenzende Permafrostlandschaft. Das oberflächen-nahe Bodeneis taute großflächig auf, sodass sich Thermokarstsenken bildeten, in denen auch Abschnitte des Highways versanken. Die unmittelbaren Reparaturkosten beliefen sich im Anschluss auf 27 Millionen US-Dollar. Weitere 50 Millionen US-Dollar wurden benötigt, um den Highway gegen künftige Überflutungen zu wappnen.

Wegen solcher und ähnlicher Vorkommnisse wurden unter anderem in Kanada und Norwegen neue Gesetze und Richtlinien zum Bau von Gebäuden und Infrastrukturen in Permafrostregionen eingeführt. Große Anstrengungen werden zudem unternommen, um technische Anpassungsoptionen zu entwickeln. Eine wichtige Frage lautet beispielsweise, auf welche Weise sich der Permafrost unter Straßen, Schienen und Flughäfen kühlen ließe, sodass er den wichtigen Infrastrukturen auch unter wärmeren Klimabedingungen ausreichend Halt böte.

So werden neben vielen Gebäuden und Straßen Alaskas und Kanadas seit den 1970er-Jahren sogenannte Thermosiphone errichtet, um den gefrorenen Untergrund zu kühlen. Die Anlagen bestehen aus senkrecht stehenden Stahlrohren, deren untere Enden tief in den Boden reichen, die luftdicht abgeschlossen sind, und in denen sich in der Regel Kohlendioxid in seiner gasförmigen und flüssigen Phase befindet. Die Thermosiphone kühlen den Untergrund im Winter, indem sie dem Erdreich mithilfe des Kohlendioxid-Phasenwechsels Wärme entziehen. Wenn die Luft über dem Erdboden kälter ist als die Temperatur des Bodens, kondensiert das Gas im oberen Teil des Rohres und läuft als Flüssigkeit in den unteren Teil. Aufgewärmt vom Boden verdunstet die Flüssigkeit dort wieder und steigt als Gas auf. Die für die Verdunstung notwendige Wärme nimmt es mit und gibt sie oben bei seiner Kondensation wieder an die Atmosphäre ab. Dieser Kühlungsmechanismus funktioniert, solange die Außenluft kälter ist als der Boden.

Veränderungen der Gletscher und Eisschilde

Die Antwort auf die Frage, ob ein Gletscher oder Eisschild klimabedingt wächst, schrumpft oder sich im Gleichgewicht befindet, ist das Ergebnis einer prinzipiell einfachen Massenbilanzgleichung. Fällt mehr Schnee auf den Eiskörper, als der auf verschiedene Art und Weise verliert, ist die Bilanz positiv und der Gletscher oder Eisschild wächst. Büßt er jedoch mehr Eismasse ein, als er durch Niederschlag hinzugewinnt, schrumpft der Eispanzer.

In dieser Rechnung gelten sowohl für einzelne Gletscher als auch für die größeren Eisschilde dieselben Kenngrößen. Alle Landeisflächen akkumulieren Masse durch Niederschlag. In den Polarregionen fällt dieser in der Regel als Schnee. Unter Umständen aber regnet es auch über Eisschilden und Gletschern. Dieses Regenwasser trägt ebenfalls zur Gewichtszunahme des Gletschers oder Eisschilds bei – vorausgesetzt, es versickert in der Schnee-Firn-Schicht und gefriert in der Tiefe zu Eis, was in den Polarregionen bislang häufig passiert, weil der Firn hier kalt genug ist.

Deutlich länger ist die Liste jener Prozesse, durch die Gletscher und Eisschilde Masse verlieren. Berücksichtigt werden müssen hier Verluste durch:

- Windtransport (Menge der Schneepartikel, die durch den Wind verfrachtet werden),
- Sublimation (phasenloser Übergang des Wassers vom Schneekristall zum Wasserdampf),
- Schmelzwasser, welches abfließt oder an der Gletscheroberfläche verdunstet,
- das Abbrechen von Eismassen an Land oder im Meer (Eisberge),
- basales Schmelzen im Fall schwimmender Gletscherzungen und Schelfeise.

In der Theorie mag es ein Leichtes sein, diese verschiedenen Kenngrößen in einer Gleichung anzuordnen und zu berechnen. In der Praxis aber ist es bis heute eine riesige Herausforderung, die Massenbilanz der Gletscher und Eisschilde der Polarregionen richtig zu bestimmen, weil es zu vielen der genannten Kenngrößen nur Schätzungen gibt. Eine Ausnahme bilden gut zugängliche Gletscher, bei denen Forscher seit mehr als 40 Jahren regelmäßig den

Schneezutrag und die Schneedichte messen. Ihre Zahl beläuft sich weltweit auf gerade einmal 37 Gletscher, Hochgebirgsgletscher in den mittleren Breiten sind dabei mitberücksichtigt.

Die Waage aus dem Weltall

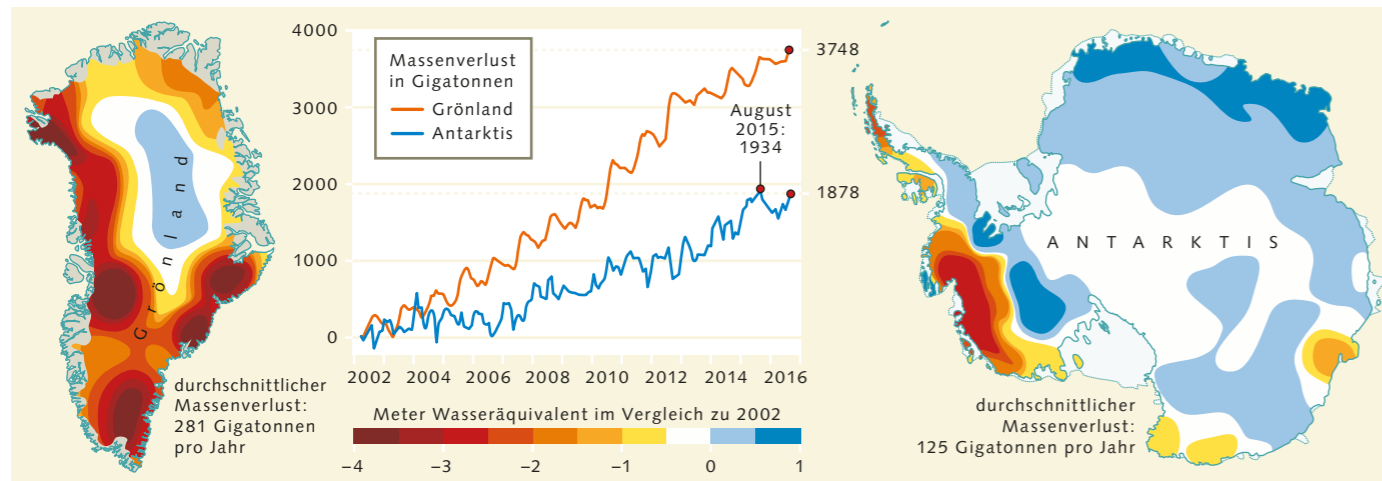
Um die Unsicherheitsfaktoren in der Massenbilanz der Gletscher und Eisschilde zu verringern, wurde im Jahr 2002 die Satellitenmission GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment, Schwerefeldmessung und Klimaexperiment) gestartet. GRACE besteht aus zwei identischen Satelliten, die in 490 Kilometer Höhe auf einer nahezu polaren Umlaufbahn hintereinander die Erde umkreisen und denen gelingt, was mit irdischen Messungen unmöglich ist: Das Gespann vermisst innerhalb eines Monats das gesamte Schwerefeld des Planeten. Das heißt, die Satelliten dokumentieren flächendeckend die Massenveränderungen auf der Erde und damit in erster Linie die Umverteilung des Wassers zwischen den Weltmeeren, den Kontinenten und speziell den Eisschilden. Die Fernerkundungsdaten liefern somit Antworten auf zwei der

Der globale Meeresspiegelanstieg 2005 bis 2018	
Ursachen	in Millimetern pro Jahr
globaler Meeresspiegelanstieg insgesamt	3,5 ±0,2
thermische Ausdehnung des Wassers	1,3 ±0,4
Schmelzen der Gebirgsgletscher	0,74 ±0,1
Schmelzen des Eisschilds in Grönland	0,76 ±0,1
Schmelzen des Eisschilds in der Antarktis	0,42 ±0,1

3.35 > Der Anstieg des globalen Meeresspiegels hat verschiedene Ursachen. Etwas weniger als zwei Drittel des Signals werden durch das Schmelzen der Gebirgsgletscher und Eisschilde ausgelöst. Ungefähr ein Drittel ist auf die wärmebedingte Ausdehnung der Weltmeere zurückzuführen.

drängendsten Fragen der Klimaforschung: Wie viel Eis verlieren die Eisschilde und Gletscher Grönlands und der Antarktis im Zuge des Klimawandels? Und in welchen Regionen der Welt steigt folglich der Meeresspiegel?

Die erste GRACE-Mission dauerte von 2002 bis 2017. Aufgrund ihres großen Erfolges brachte am 22. Mai 2018 eine Trägerrakete vom Luftwaffenstützpunkt Vandenberg



im Santa Barbara County in Kalifornien das Nachfolge-Satellitengespann GRACE-FO (Follow-on, Nachfolgemission) ins Weltall. Es soll mindestens zehn Jahre lang, bei idealen Sonnenbedingungen und demzufolge guter Energieversorgung vielleicht sogar 30 Jahre lang, Klimaforschern aus der ganzen Welt verlässliche Daten zum Wachsen und Schrumpfen der Eisschilde liefern.

Ausgewertet wurden bislang vor allem die Messungen der ersten Mission. Demnach haben der Eisschild in Grönland und die dazugehörigen Gletscher seit 2002 im Durchschnitt jährlich 286 Milliarden Tonnen Eis verloren. Diese Massenverluste kommen vor allem dadurch zustande, dass die Luft über Grönland wärmer wird und dadurch die Intensität und Dauer der Schmelzsaison zunehmen, berichten Wissenschaftler. Die Eiskappe Grönlands verliert heute fast doppelt so viel Eis durch Schmelzprozesse an der Oberfläche als noch im Zeitraum von 1960 bis 1990. Wie nachträglich durchgeführte Modellberechnungen zeigen, waren die Eiszuwächse und -einbußen damals nahezu ausgeglichen. Die Massenverluste durch das Abbrechen von Eisbergen haben bis heute um etwa ein Viertel zugenommen. Grönland liefert mittlerweile den größten Schmelzwasserbeitrag zum Anstieg des globalen Meeresspiegels. Dieser beträgt aktuell 3,34 Millimeter pro Jahr, Grönlands Anteil beläuft sich derzeit auf ungefähr 0,7 Millimeter.

Die Massenbilanz der beiden Eisschilde in der Antarktis ist ebenfalls negativ, obwohl pro Jahr etwa 2000 Gigatonnen Schnee auf die antarktischen Gletscher und Eisschilde fallen. Etwa zehn Prozent dieses Schnees gehen durch Oberflächenschmelze, Windverwehung, Verdunstung und Sublimation verloren. Die verbleibenden 90 Prozent verdichten sich zu Firn und später zu Eis. Wissenschaftler aus den USA und Europa haben in einer Studie aus dem Jahr 2018 GRACE-Daten, Altimetermessungen zur Höhenveränderung der Eisschilde sowie Modellierungsergebnisse zusammengefasst und die Massenbilanz des West- und Ostantarktischen Eisschildes für den Zeitraum von 1992 bis 2017 bestimmt. Demzufolge verlor die Antarktis bis zum Jahr 2011 pro Jahr etwa 76 Gigatonnen Eis – eine Menge, die den globalen Meeresspiegel um jährlich 0,2 Millimeter ansteigen ließ. Seit dem Jahr 2012 aber hat sich der jährliche Eisverlust der Antarktis mit 219 Gigatonnen fast verdreifacht.

Die deutlichsten Veränderungen dokumentierten die Forscher in der Westantarktis. In den ersten fünf Jahren des Beobachtungszeitraums (1992 bis 1997) transportierten deren Gletscher und Eisströme noch durchschnittlich 53 Gigatonnen mehr Eis pro Jahr in das Südpolarmeer, als sich durch Niederschlag über dem Eisschild neu bildete. Im Zeitraum 2012 bis 2017 waren es dann 159 Gigatonnen, also die dreifache Menge. Auffallend viel Eis verliert die Westantarktis seit den späten 2000er-Jahren. Damals begannen vor allem der große Pine-Island-Gletscher und der Thwaitesgletscher schneller zu fließen. Beide Ströme münden in die Amundsensee, wo warme Meeresströmungen die den Gletschern vorgelagerten Schelfeise verstärkt von unten schmelzen.

Die zunehmenden Eisverluste in der Antarktis sind in erster Linie auf das Ausdünnen oder sogar den Zerfall der Schelfeisgebiete zurückzuführen. Je schmäler, leichter und kürzer die einst mächtigen Eiszungen werden, desto weniger sind sie in der Lage, das Nachrutschen des dahintergelagerten Inlandeises zu bremsen. Die zunehmende Instabilität der Eisschilde wird durch zwei Prozesse hervorgerufen: zum einen durch basales Schmelzen infolge warmer Meeresströmungen, die an der Unterseite der Schelfeise wirken; zum anderen durch Schmelzprozesse an der Eisoberfläche, in erster Linie ausgelöst durch warme Luftmassen. Dieses Schmelzwasser sammelt sich dann in Rissen und Spalten des Eiskörpers, vertieft diese und erhöht somit die Wahrscheinlichkeit eines Eisbergabbruchs. In welchem Ausmaß beide Prozesse wirksam werden, hängt von den regionalen Gegebenheiten ab, wie ein Vergleich der Geschehnisse in der Westantarktis und entlang der Antarktischen Halbinsel zeigt.

Im nördlichsten Gebiet der Antarktis, der Antarktischen Halbinsel, zerfielen in den zurückliegenden Jahrzehnten vier von zwölf Schelfeisen, drei verloren bis zu 70 Prozent ihrer Eisfläche. Zusammen beschleunigten sie auf diese Weise den Eismassenverlust auf der Halbinsel auf mittlerweile 25 Gigatonnen pro Jahr. Im Gegensatz dazu hielten sich Eisverluste und -zuwächse in der Ostantarktis in den 25 Jahren in etwa die Waage. Den Daten zufolge wuchs die Masse des Ostantarktischen Eisschildes sogar um fünf Gigatonnen pro Jahr. Da der Fehlerquotient jedoch bei plus/minus 46 Gigatonnen liegt, ist das Ergebnis mit einer ziemlich großen Unsicherheit belastet.

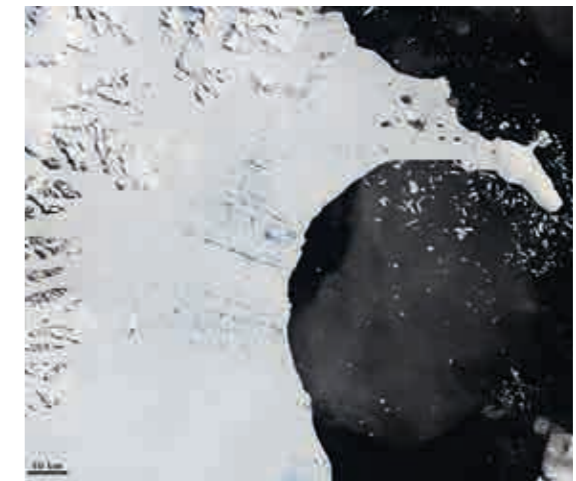
Analysiert man nur die GRACE-Daten aus der Antarktis, dann verliert der Kontinent derzeit pro Jahr 127 Gigatonnen Eis. Die größten Einbußen verzeichnen der Westen der Antarktischen Halbinsel, die Küstenregion der Westantarktis sowie in der Ostantarktis die Küstengebiete des Wilkeslands und des Adélielands. Im südlichen Teil der Westantarktis sowie im nördlichen Teil des Königin-Maud-Landes dagegen wächst der Eispanzer.

Schwachstelle Schelfeis

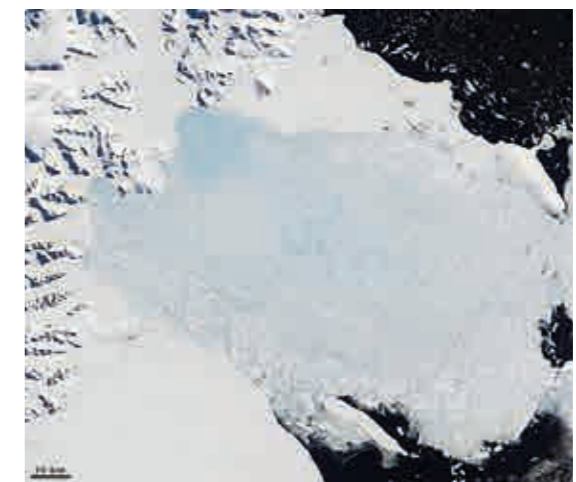
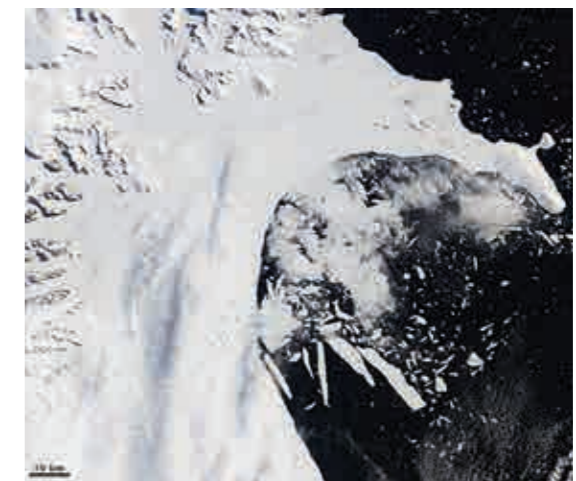
Die zunehmenden Eisverluste in der Antarktis sind in erster Linie auf das Ausdünnen oder sogar den Zerfall der Schelfeisgebiete zurückzuführen. Je schmäler, leichter und kürzer die einst mächtigen Eiszungen werden, desto weniger sind sie in der Lage, das Nachrutschen des dahintergelagerten Inlandeises zu bremsen. Die zunehmende Instabilität der Eisschilde wird durch zwei Prozesse hervorgerufen: zum einen durch basales Schmelzen infolge warmer Meeresströmungen, die an der Unterseite der Schelfeise wirken; zum anderen durch Schmelzprozesse an der Eisoberfläche, in erster Linie ausgelöst durch warme Luftmassen. Dieses Schmelzwasser sammelt sich dann in Rissen und Spalten des Eiskörpers, vertieft diese und erhöht somit die Wahrscheinlichkeit eines Eisbergabbruchs. In welchem Ausmaß beide Prozesse wirksam werden, hängt von den regionalen Gegebenheiten ab, wie ein Vergleich der Geschehnisse in der Westantarktis und entlang der Antarktischen Halbinsel zeigt.

Schwachstelle Schelfeis

Im antarktischen Sommer 2002 warteten Polarforscher in den USA und Europa mit Spannung auf die täglich neuen Satellitenaufnahmen vom Larsen-B-Schelfeis im



3.37 > Das Larsen-B-Schelfeis an der Ostküste der Antarktischen Halbinsel zerfiel im Südsommer 2002 in weniger als sechs Wochen. Die obere Aufnahme (31. Januar 2002) zeigt die noch intakte Eisfläche und die vielen Schmelzwasserseen, welche sich auf der Oberfläche gebildet haben. Auf der zweiten Aufnahme (23. Februar 2002) treiben bereits Hunderte Eisberge vor der Abbruchkante. Knapp zwei Wochen später (7. März 2002) hat das Schelfeis eine Eisfläche von insgesamt 3250 Quadratkilometern verloren.



Larsenschelfeis
Das Larsenschelfeis, welches in die vier Abschnitte A, B, C und D unterteilt wird, ist nach dem norwegischen Walfänger und Antarktisforscher Carl Anton Larsen (1860–1942) benannt. Er war im Dezember 1893 mit seinem Schiff „Jason“ an dem Schelfeis im westlichen Weddellmeer entlangesegelt.

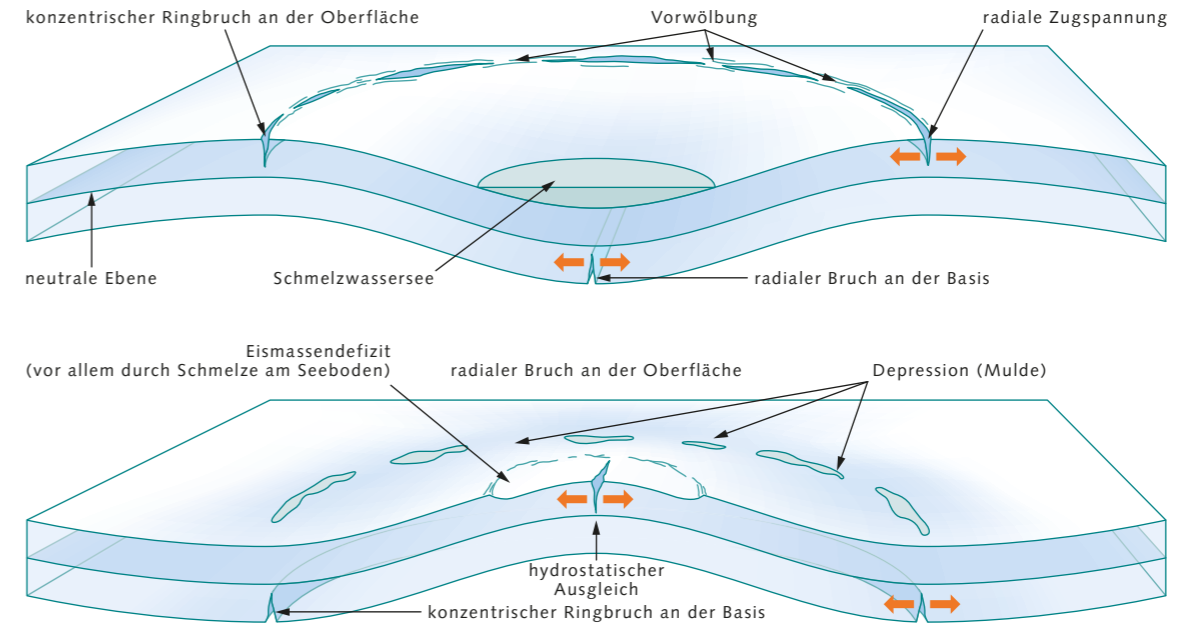
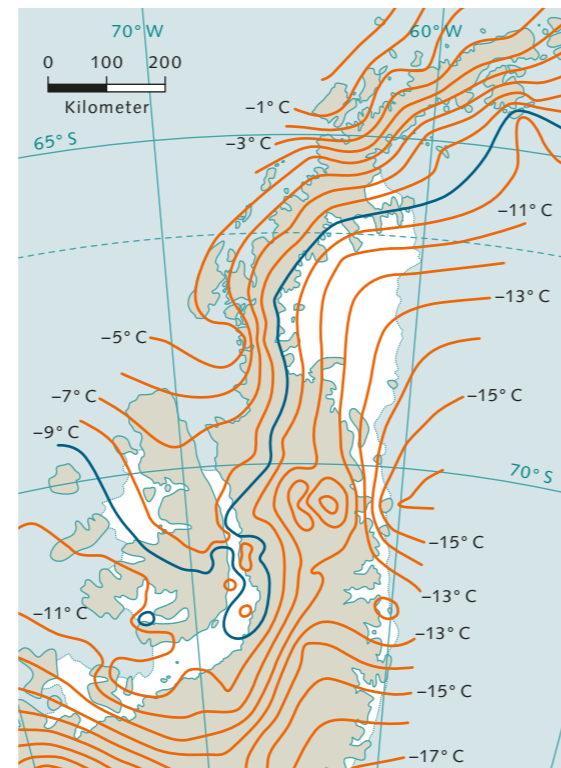
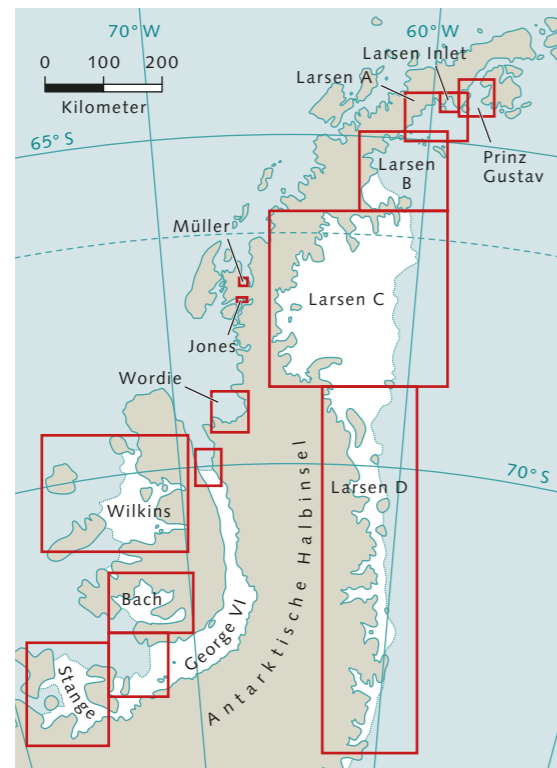
nordwestlichen Weddellmeer. Aus der Ferne wurden die Wissenschaftler Zeugen, wie innerhalb eines Monats eine 3250 Quadratkilometer große, schwimmende Eisfläche in Abermillionen Einzelteile zerfiel und sich quasi auflöste. Das Larsen-B-Schelfeis gehörte bis in die 1990er-Jahre zu einem Ensemble aus fünf nahezu zusammenhängenden Schelfeisen, die sich von der Ostküste der Antarktischen Halbinsel aus bis zu 200 Kilometer weit (Larsen C) auf das Weddellmeer hinausschoben. Im Jahr 1996 zerfielen dann mit dem Prinz-Gustav-Schelfeis und dem Larsen-A-Schelfeis die zwei nördlichsten Eisflächen. Larsen B folgte sechs Jahre später. Die beiden südlichsten, Larsen C und D, existieren bis heute, wobei im Juli 2017 ein Eisberg mit einer Gesamtfäche von rund 5800 Quadratkilometern vom Larsen-C-Schelfeis abbrach. Das Schelfeis verlor damit auf einen Schlag eine Eisfläche, die fast siebenmal so groß war wie die Stadtfläche Berlins.

Die ehemals zwölf Schelfeise entlang der Antarktischen Halbinsel speisen sich aus den Gletschern, die in den Gebirgslagen der Halbinsel entstehen. Ihre Eismassen entstehen einzig und allein aus Schnee und Regen, die

über der Halbinsel fallen. Die Gletscher stehen in keinerlei Verbindung mit dem West- oder Ostantarktischen Eisschild. Mit einer durchschnittlichen Dicke von 200 Metern sind die Schelfeise der Antarktischen Halbinsel auch deutlich dünner als das bekannte Ross- oder Filchner-Ronne-Schelfeis, die beide Eis aus dem Innern der Antarktis führen.

Die Antarktische Halbinsel ist zudem die nördlichste und damit wärmste Region der Antarktis. Seit Beginn des 20. Jahrhunderts sind die Lufttemperaturen über dieser lang gezogenen Berg- und Inselregion um durchschnittlich 3,5 Grad Celsius gestiegen. Seit den 1950er-Jahren wirkt sich diese regionale Erwärmung auf die Stabilität der Schelfeise auf beiden Seiten der Halbinsel aus. Diese, so erkannte der britische Glaziologe John H. Mercer bereits in den 1970er-Jahren, kommen nur in jenen Regionen der Antarktis vor, in denen die Jahresdurchschnittstemperatur minus fünf Grad Celsius nicht überschreitet. Wie die 10° C-Juli-Isotherme für Baumwuchs in der Arktis gab es also lange Zeit auch eine minus 5° C-Isotherme für Schelfeise in der Antarktis.

3.38 > Seit den 1960er-Jahren haben sieben der zwölf Schelfeise entlang der Antarktischen Halbinsel große Eisverluste verzeichnet. Vier von ihnen sind komplett zerfallen (Jones, Wordie, Prinz Gustav, Larsen A). Ausgelöst wurde dieser Rückzug unter anderem durch den Anstieg der Lufttemperaturen um bis zu drei Grad Celsius. Seitdem kommen Schelfeise der Antarktischen Halbinsel nur noch in jenen Regionen vor, deren Jahresdurchschnittstemperatur bei minus neun Grad Celsius und darunter liegt.



3.39 > Sammelt sich Schmelzwasser auf einem Schelfeis, bildet sich ein Tümpel oder See, unter dessen Gewicht die Eisfläche langsam nachgibt – eine Delle bildet sich. Sowie dieser Schmelzwassersee dann aber ausläuft, etwa durch einen Riss im Eis, springt die Delle zurück. Dabei entstehen ringförmige Risse am Rand des Sees, die langfristig zum Zerfall des Schelfeises führen.

Deren Position an der Antarktischen Halbinsel aber verlagerte sich in den zurückliegenden Jahrzehnten im Zuge der Erwärmung immer weiter Richtung Süden – mit gravierenden Folgen für die nun nördlich der Isotherme gelegenen Schelfeisgebiete. Sie begannen aufgrund der steigenden Sommertemperaturen und warmer Föhnwinde wiederholt in großem Ausmaß zu schmelzen. Das dabei entstehende Schmelzwasser sammelte sich in den Spalten und Rissen der Schelfeise. Durch das Gewicht des Wassers stieg der hydrostatische Druck am unteren Ende der einzelnen Spalten, was wiederum zur Folge hatte, dass sich die Risse vertieften. Ähnliche Kräfte wirkten, wenn das Schmelzwasser im Winter wieder gefror und sich in den Spalten ausdehnte. Sowie die Risse durch das gesamte Schelfeis verliefen, stieg entsprechend die Gefahr von Eisbergabbrüchen.

Die Stabilität der Schelfeise litt aber auch unter der Last stetig wiederkehrender Schmelzwasserseen. Sammelt sich Schmelzwasser in einer Vertiefung auf dem Schelfeis, verbiegt sich das Eis darunter aufgrund der hohen Last des Wassers um bis zu einen Meter, wie Messungen auf dem McMurdoschelfeis im Rossmeer ergaben. Das Schelfeis beult gewissermaßen aus. Läuft dieser See dann im Lauf des Sommers plötzlich aus, schnellt das ausgebeulte Stück Eisschelf in seine Ausgangsposition zurück.

Durch diese Bewegung wiederum entstehen kleine, ringförmige Risse im Eis um den See herum sowie in seinem Zentrum. Sickert dann im Anschluss Wasser aus angrenzenden Seen in diese neu entstandenen Risse, wachsen diese weiter und erhöhen somit die Zerfallsgefahr. Eine solche Kettenreaktion aus Schmelzen, Verbiegen, Zurückschnellen, Aufreißen und Vertiefen hat vermutlich im antarktischen Sommer 2001/2002 zur Drainage von über 2000 dicht nebeneinanderliegenden Schmelzwasserseen auf dem Larsen-B-Schelfeis geführt. Kontrovers diskutiert wurde in der Wissenschaft auch die Rolle von Schmelzprozessen an der Unterseite der Schelfeise. Warmes Meerwasser könnte demzufolge durchaus einen kleinen Beitrag zum Zerfall der Schelfeise geleistet haben.

Die Grundursache für den Zerfall der Schelfeise an der Antarktischen Halbinsel aber war der Anstieg der Lufttemperatur. In ihrem Zuge zogen sich die im nördlichen Teil der Halbinsel gelegenen Schelfeise zunächst über mehrere Jahrzehnte hinweg zurück, später zerfielen sie nacheinander – zuerst das Wordieschelfeis an der Westküste der Halbinsel (1980er-Jahre), dann das Prinz-Gustav-Schelfeis an der Ostküste (1995), gefolgt von dem Larsen-A- (1995) und Larsen-B-Schelfeis (2002), dem Jonesschelfeis bei der Arrowsmith-Halbinsel (2003) und großen Teilen des Wilkinsschelfeises (2008).

Den Zusammenhang zwischen wärmerer Luft und zerberstenden Schelfeisen bestätigen auch jene Satellitenbilder, welche das Larsen-B-Schelfeis kurz vor seinem Zerfall zeigen. Darauf erkennt man deutlich zahllose Reihen blauer Schmelzwassertümpel. Als Wissenschaftler ein Jahr nach dem Zerfall von Larsen B die damaligen Temperaturdaten entlang der Antarktischen Halbinsel auswerten, stellten sie fest, dass nur noch jene Schelfeise keine großflächige Oberflächenschmelze und somit auch keine auffälligen Veränderungen aufwiesen, die südlich einer Isotherme von minus neun Grad Celsius lagen. Alle nördlich gelegenen Schelfeise waren bis dahin entweder großflächig geschrumpft oder sogar ganz zerfallen. Die Isotherme von minus neun Grad Celsius Jahresmitteltemperatur gilt seitdem als neue Temperaturgrenze für die Existenz von Schelfeisen entlang der Antarktischen Halbinsel.

Der Zerfall des Larsen-B-Schelfeises hatte Konsequenzen für die Gletscher, die einst das Schelfeis speisten. Innerhalb kurzer Zeit verdoppelte bis versechsfachte sich die Fließgeschwindigkeit der vier betroffenen Gletscher, da die Rückhaltekräfte des ehemals vorgelagerten Schelfeises fehlten. Drei der Ströme büßten außerdem an Höhe ein – das bedeutet, ihre Eiszunge wurde aufgrund der erhöhten Fließgeschwindigkeit flacher. Auf diese Weise

beeinträchtigte der Zerfall eines Schelfeises die Massenbilanz der Gletscher und Eisschilde also weit über den eigentlichen Zeitpunkt des Auseinanderbrechens hinaus.

Die Wege des Schmelzwassers

Dass die Schelfeise und Gletscher der Antarktis gelegentlich an ihrer Oberfläche schmelzen, ist keine neue Erkenntnis. Schon Ernest Shackletons Nimrod-Team vernahm im Jahr 1908 bei seinem Weg über das Nansenschelfeis das Rauschen von Schmelzwasserbächen. Vier Jahre später beschwerten sich Teilnehmer der britischen Expedition unter der Leitung von Robert Falcon Scott, dass sie beim Kartieren des Nansenschelfeises wiederholt durch Schmelzwasserbäche waten mussten und ihre Zelte mehr als einmal geflutet wurden.

Neue Satellitenbeobachtungen sowie Luftaufnahmen und Modellierungen der Massenbilanz deuten darauf hin, dass das Ausmaß und die Bedeutung der schmelzbedingten Eisverluste für die Massenbilanz in der Antarktis größer sind als angenommen. Im Jahr 2017 zählten Wissenschaftler nahezu 700 verschiedene Netzwerke aus Schmelzwasserseen und -bächen, die flüssiges Wasser über alle Schelfeise der Antarktis transportieren.

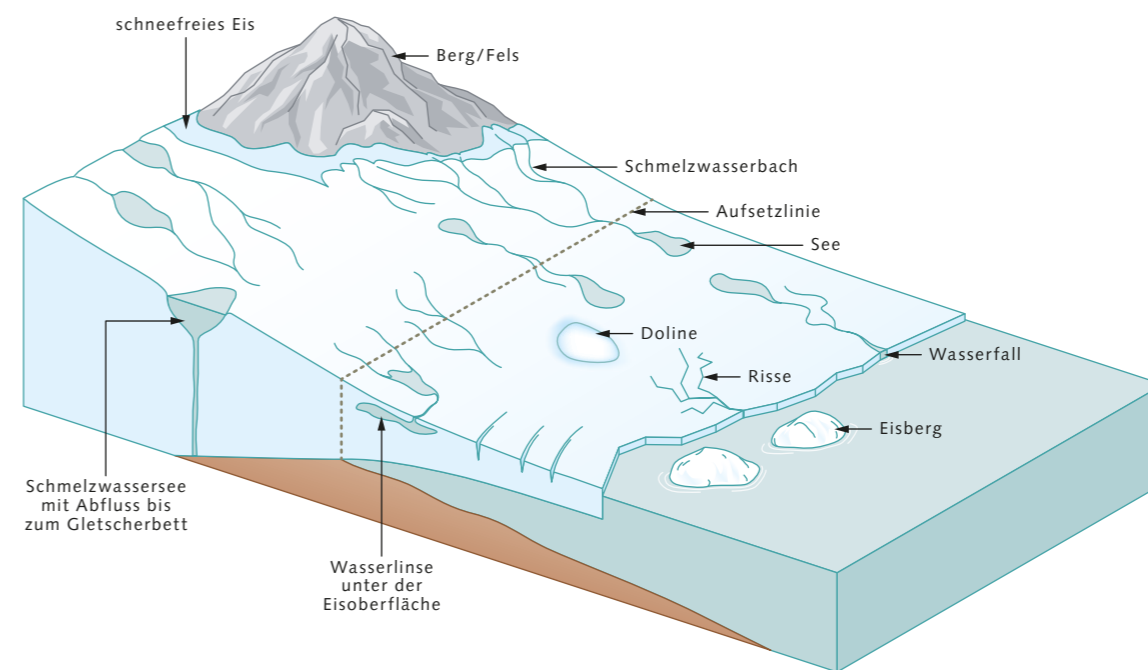
Die größten Oberflächenschmelzraten beobachten Forscher derzeit auf den noch bestehenden Schelfeisen entlang der Antarktischen Halbinsel, hier vor allem auf dem Larsen-C-, dem Wilkins- und dem George-VI.-Schelfeis. Schmelzwasser bildet sich aber auch auf den noch südlicher liegenden Schelfeisen der Ostantarktis, dort beispielsweise auf dem West- und dem Shackletonschelfeis. Auf dem Amery- und dem Roi-Baudouin-Schelfeis fällt die Sommerschmelze sogar so stark aus, dass sich weithin sichtbare Netze aus Schmelzwasserseen und -bächen bilden. Das Ross- und das Filchner-Ronne-Schelfeis hingegen erleben bisher nur kleinere Schmelzereignisse. Antarktisweit schmelzen bislang nur jene Eisflächen an der Oberfläche, die in einer Höhe von bis zu 1400 Metern über dem Meeresspiegel liegen. In allen höher gelegenen Regionen ist es noch zu kalt.

Besonders häufig schmelzen Eisflächen, die keine Schnee- oder Firnauflage besitzen und deshalb als nacktes Eis der Sonne ausgesetzt sind. Wegen seiner Farbe absorbiert dieses nackte Eis mehr Sonneneinstrahlung als schneeweiße Flächen. Hohe Schmelzraten messen Wissenschaftler außerdem in der Nähe von Bergen oder Felsen, die aus den Eisflächen herausragen. Auch sie nehmen mehr Sonnenenergie auf und erwärmen so das

angrenzende Eis. Über die Netzwerke aus Schmelzwasserseen und -bächen wird das Wasser unter Umständen mehrere Hundert Kilometer weit abtransportiert – in der Regel direkt zur eigentlichen Schwachstelle des Eisschildes, den Schelfeisen. Der bislang größte bekannte Schmelzwassersee liegt auf dem Ameryschelfeis. Er ist rund 80 Kilometer lang. An der Abbruchkante des Nansenschelfeises rinnt im Sommer ein Großteil des Oberflächenschmelzwassers über einen 130 Meter breiten Wasserfall in das Rossmeer – und das mindestens seit 1974. Ähnliche Wasserfälle hatten Wissenschaftler auch am Larsen-B-Schelfeis entdeckt, bevor es zerfallen ist. Es wird sogar angenommen, dass Schelfeise, deren Schmelzwasser über ein Netzwerk aus Bächen oberflächlich abfließt, seltener Gefahr laufen auseinanderzubrechen als jene Schelfeise, deren Wasser sich in den Spalten und Rissen ansammelt und diese vertieft.

Während Wissenschaftler auf Grönland regelmäßig beobachten, dass Schmelzwasserseen nahezu senkrecht in das Innere des Eisschildes in sogenannte Gletschermühlen drainieren und ihre Wassermassen anschließend an der Unterseite des Eispanzers Richtung Meer fließen, fehlen bislang gleichlautende Berichte aus der Antarktis. Leerlaufende Schmelzwasserseen kennt man hier bisher

3.40 > Die Wassermassen eines großen Schmelzwasserflusses auf dem Nansenschelfeis stürzten im April 2016 etwa 200 Meter tief in das westliche Rossmeer.



3.41 > Im Zuge des Klimawandels nimmt die Oberflächenschmelze in der Antarktis zu. Das dabei entstehende Schmelzwasser verändert die Gletscher und Schelfeise nachhaltig. Mehr Seen, Bäche, Dolinen und Wasserlinsen entstehen. Außerdem steigt die Gefahr, dass Schmelzwasserseen künftig wie in Grönland Richtung Gletscherbett drainieren und auf diese Weise die Fließgeschwindigkeit der Eismassen beschleunigen.

nur von den Schelfeisen, also vom schwimmenden Eis. Ihre leergelaufenen Becken sehen teilweise aus wie große Krater. Man bezeichnet die typisch geformten Vertiefungen auch als Dolinen. Schmelzwasserseen, die sich direkt auf den Gletschern bilden – also auf Eis, das noch auf dem Land aufliegt –, gefrieren in der Regel im Winter wieder und werden von Schnee bedeckt. Wird es kalt genug, kann es sogar sein, dass die verborgenen Seen vollständig durchfrieren und mächtige Eislinen formen.

Angesichts der weltweit steigenden Lufttemperaturen gehen Forscher davon aus, dass sich bis zum Jahr 2050 zwei- bis dreimal so viel Schmelzwasser auf den Gletschern und Schelfeisen der Antarktis bilden wird wie heute. Diese Mengen flüssigen Wassers werden die Massenbilanz der antarktischen Eisschilde, Gletscher und Schelfeise sehr wahrscheinlich auf dreierlei Weise beeinflussen:

- Schmilzt eine Eisfläche an ihrer Oberfläche, rinnt das Wasser häufig von dieser Eisfläche, wodurch der Eiskörper insgesamt dünner wird. In der Antarktis werden die so entstehenden Eismassenverluste durch Oberflächenschmelze zunehmen.
- Oberflächenschmelzwasser kann unter Umständen in der Schnee-Firn-Schicht eines Eisschildes versickern und auf diese Weise Wasserlinsen unter der Eisoberfläche bilden. Im Zuge der Erwärmung steigt nach Ansicht der Wissenschaft außerdem die Wahrscheinlichkeit, dass auch in der Antarktis Schmelzwasserseen durch sogenannte Gletschermühlen im Eis leerlaufen und über Risse und Spalten im Eiskörper bis zum Felsbett des Gletschers oder Eisschildes vordringen und dort entweder Seen unter dem Eis bilden oder aber als Wasserfilm das Gleiten der Eismassen beschleunigen. Solche Injektionen von Oberflächenschmelzwasser ins Innere oder sogar bis unter den Eispanzer würden die Dynamik der antarktischen Eisschilde und Gletscher fundamental verändern.
- Mehr Schmelzwasser auf den Schelfeisen wird deren Stabilität in einem noch größeren Ausmaß als bislang gefährden und auch in südlicheren Regionen der Antarktis zu Zusammenbrüchen von Schelfeis führen. Grundlegende Prozesse werden dabei erneut das Vertiefen von Rissen durch die Konzentration des

Schmelzwassers in Spalten sowie die Rissbildung durch das wiederholte Verbiegen der Eisfläche sein. Forscher gehen zudem davon aus, dass sich infolge einer zunehmenden Erwärmung auch auf bislang wenig betroffenen Schelfeisen mehr Schmelzwasser bilden wird – vor allem, weil davon auszugehen ist, dass die lokalen Winde wärmer werden.

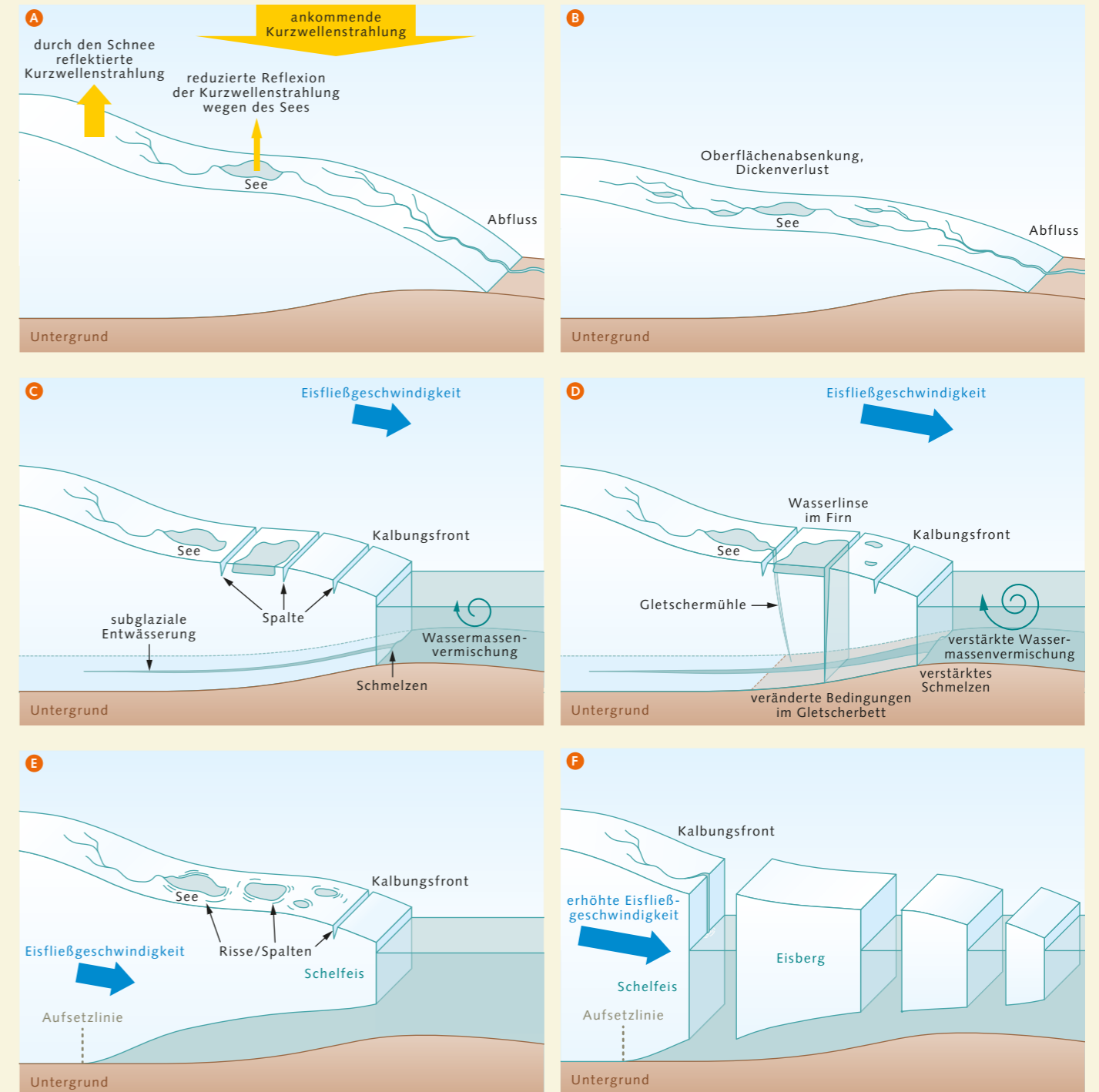
Langfristig wird also nicht nur die Gesamtmenge des Schmelzwassers in der Antarktis zunehmen, sondern auch seine Bedeutung für die Massenbilanz der antarktischen Eisschilde. Deren ohnehin schon negative Bilanz wird also noch größer ausfallen.

Wärmeeinbruch in der Amundsensee

Während der Zerfall der Schelfeise an der Antarktischen Halbinsel vor allem durch die Erwärmung der Atmosphäre ausgelöst wurde, gefährdet in anderen Küstengebieten des Kontinents die Wärme des Ozeans die Schelfeise, genauer gesagt Wassermassen aus dem verhältnismäßig warmen Küstenstrom. Ihnen gelingt es in einigen Regionen immer häufiger, auf die Kontinentalschelfe vorzudringen und von dort unter die Schelfeise zu kriechen. Was folgt, ist eine fatale Kettenreaktion, wie man sie seit einigen Jahrzehnten in der Westantarktis und der angrenzenden Amundsensee beobachten kann.

Große Teile des Westantarktischen Eisschildes gründen auf Land, das nicht nur unterhalb des derzeitigen Meeresspiegels liegt, sondern auch Richtung Süden in die Tiefe abfällt. Das heißt, sollte sich das Südpolarmeer erwärmen, kämen seine Wassermassen sofort mit den auf dem Meeresgrund aufliegenden Eismassen in Kontakt und könnten diese so lange schmelzen, bis der Eisschild vollständig in sich zusammenfiel.

Es wäre in gewissem Sinn also so, als würde warmes Wasser ohne Unterlass in eine gigantische Schüssel laufen, in der ein großer Eisblock liegt. Dieser Umstand macht den Eispanzer der Westantarktis besonders empfindlich gegenüber klimatischen Veränderungen im Allgemeinen und Veränderungen der Meeresströmungen im Besonderen. Sollten die Eismassen der Westantarktis komplett abschmelzen, würden sie den globalen Meeresspiegel um bis zu 4,3 Meter steigen lassen.



3.42 > Schmelzen Gletscher und Schelfeise an ihrer Oberfläche, verstärkt das Schmelzwasser auf dreierlei Weise den Eismassenverlust. A/B: Die dunklere Oberfläche der Seen und Bäche absorbiert mehr Sonnenenergie als weißes Eis. Das Wasser erwärmt sich und treibt die Eisschmelze an der Gletscheroberfläche voran. Die Eismassen dünner von oben her aus. C/D: Schmelzwasser, welches unter den Gletscher gelangt, erhöht die Fließgeschwindigkeit der Eismassen. E/F: Schmelzwasseransammlungen auf dem Schelfeis vertiefen vorhandene Risse und rufen neue hervor, sodass Eisbergabbrüche zunehmen.

3.43 > Warme Wassermassen können dem Westantarktischen Eisschild deshalb so gefährlich werden, weil der Untergrund unter dem Eisschild in die Tiefe abfällt und mehrere Becken bildet. Sollten die warmen Wassermassen den Rand dieser Becken erst einmal überschritten haben, bahnen sie sich quasi ungehindert den Weg unter den Eispanzer.



Als Achillesferse der Region gelten die in die Amundsensee mündenden Gletscher und Eiströme – zum einen, weil die Eismassen hier in einer großen Wassertiefe auf dem Meeresboden aufliegen; zum anderen, weil es keine großen Schelfeise mehr gibt, die das Nachrutschen der Eismassen aus dem Innern der Westantarktis großflächig behindern. Dabei fließt über diese Gletscher ein Fünftel der westantarktischen Eismassen Richtung Meer. In den zurückliegenden Jahrzehnten haben sich die Gletscher dieser Region enorm beschleunigt. Der Pine-Island-, Thwaites-, Haynes-, Smith-, Pope- und Kohlergletscher gehören mittlerweile zu den am schnellsten fließenden Gletschern der Antarktis. Gemeinsam transportieren sie in etwa so viel Eis in das Südpolarmeer, wie auf Grönland alle Gletscher zusammen in die angrenzenden Meere entlassen. Der alleinige Anteil der Gletscher der Amundsensee am weltweiten Meeresspiegelanstieg macht inzwischen zehn Prozent (etwa 0,28 Millimeter pro Jahr) aus. Angenommen, diese sechs Gletscher würden allesamt schmelzen, würde daraus ein globaler Meeresspiegelanstieg von 1,2 Metern resultieren.

Die in die Amundsensee mündenden Gletscher fließen aber heutzutage nicht nur schneller, ihre Eiszungen sind auch deutlich dünner geworden, und ihre Aufsetzlinie – jener Punkt, an dem die Eiszungen aufschwimmen und den Kontakt zum Untergrund verlieren – zieht sich pro Jahr um bis zu einem Kilometer weit landeinwärts zurück. Damit handelt es sich um eine der schnellsten Rückzugsraten der Welt.

Da die Lufttemperatur im Küstengebiet der Amundsensee bislang überwiegend im Minusbereich bleibt, können Schmelzprozesse an der Gletscheroberfläche als Auslöser der Veränderungen ausgeschlossen werden. Stattdessen sind die Ursachen wohl eher in der Amundsensee selbst zu suchen. An deren Grund, so wissen Forscher heute, verlaufen mehrere tiefe Gräben von der Küstenregion des Schelfmeers über den Schelf hinweg bis zum Rand des Festlandssockels, also bis zu jenem Punkt, wo der Kontinent endet und der Meeresboden in sehr große Tiefen abfällt. Die Gräben sind im Lauf zurückliegender Kaltzeiten von mächtigen Eisströmen in den Untergrund gepflügt worden. Zu Zeiten des letzten

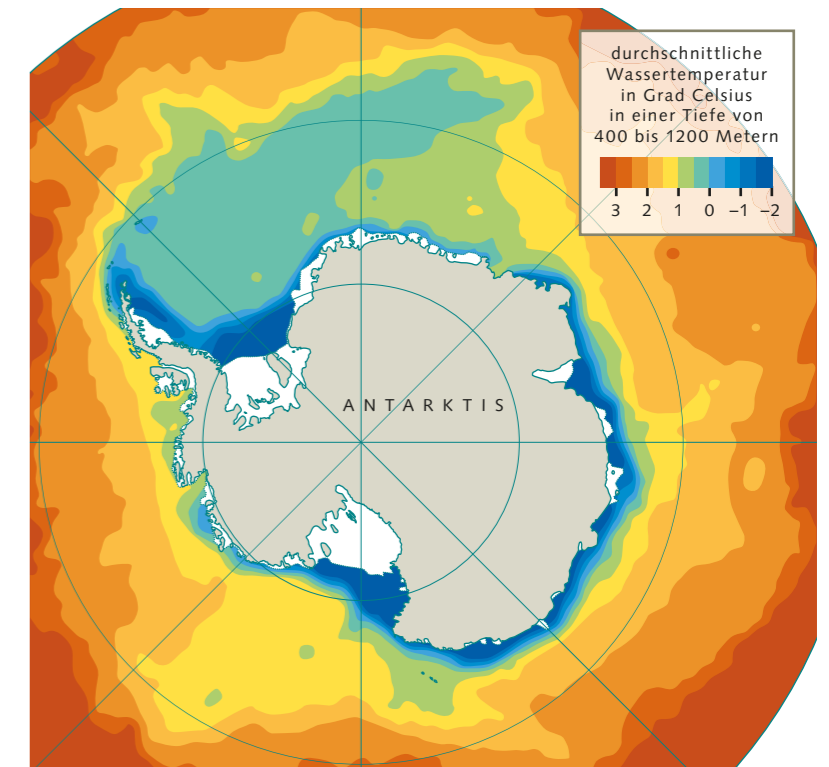
glazialen Maximums beispielsweise, also vor etwa 22 500 Jahren, reichten die Eismassen der Region nachweislich bis zum Rand des Kontinentalschelfs und lagen vermutlich auch über große Teile der Strecke auf dem Meeresboden auf.

Wanderung durch die Gräben

Die beiden größten Gräben im Kontinentalschelf der Amundsensee sind der Pine-Island-Graben und der Dotson-Getz-Graben. Sie spielen eine entscheidende Rolle, denn in ihnen fließt salziges, knapp über ein Grad Celsius warmes Tiefenwasser aus dem Antarktischen Zirkumpolarstrom über den Kontinentalschelf direkt bis unter die schwimmenden Gletscherzungen. Wenn das warme Wasser unter die Eismassen kriecht, beträgt seine Temperaturdifferenz zum Schmelzpunkt des Eises aufgrund des erhöhten Drucks oftmals 3,5 bis vier Grad Celsius. Das heißt, das Wasser beginnt sofort, die Eismassen von unten zu schmelzen.

Seine größte Wirkung entfaltet das warme Tiefenwasser dabei vor allem in Nähe der sogenannten Aufsetzlinie. Schätzungen zufolge verlieren der Pine-Island-Gletscher und der Thwaitesgletscher auf diese Weise im Mittel zwischen 15 bis 18 Meter Eisdicke pro Jahr. Das heißt, die Eiszungen werden zum einen immer dünner, zum anderen verlieren sie immer weiter Richtung Küste die Bodenhaftung – ein Prozess, den Experten als „Rückzug der Aufsetzlinie“ bezeichnen.

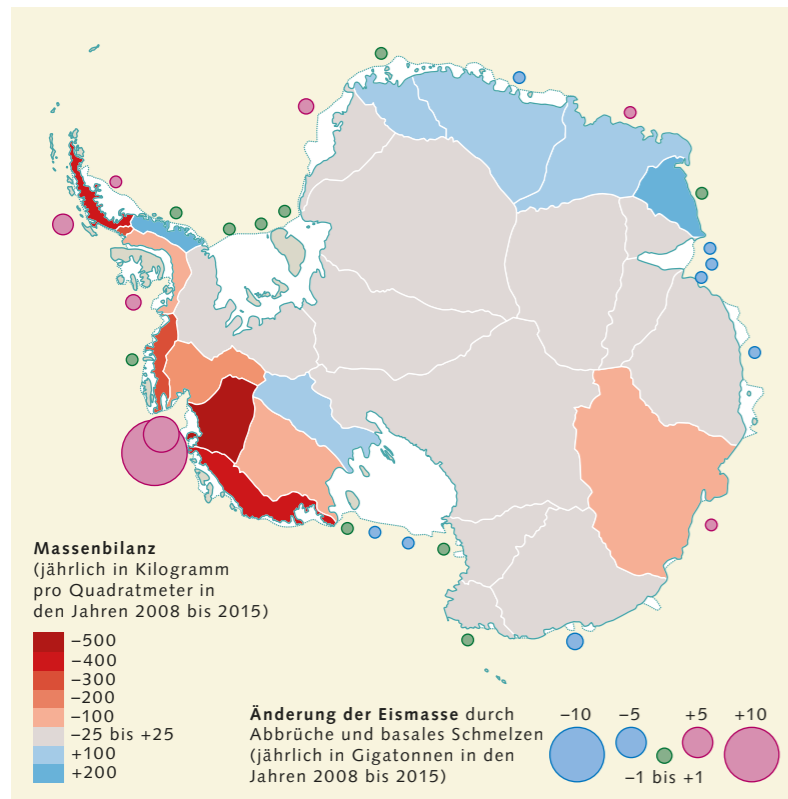
Der Einstrom des warmen Tiefenwassers unter die Eismassen der Amundsensee konnte im Jahr 1994 erstmals durch umfassende Messungen vor Ort nachgewiesen werden. Mittlerweile weiß man auch, dass Wirbel das Wasser entlang der Gräben über den Kontinentalschelf führen. Über die Gräben im östlichen Teil der Amundsensee wandert das warme Wasser ein, über die Gräben im westlichen Teil fließt anschließend das frische, kalte Schmelzwasser wieder ab. Geologische Daten lassen zudem darauf schließen, dass es das warme Tiefenwasser vermutlich infolge eines El-Niño-Ereignisses im Zeitraum von 1939 bis 1942 erstmals schaffte, den Kontinentalhang der Amundsensee zu erklimmen. Zuvor hatte vermutlich schweres, salzreiches Schelfwasser wie eine Barriere dieses Vordringen verhindert.



Heutzutage wird die Menge des einströmenden Tiefenwassers unter anderem durch die Winde über der Amundsensee beeinflusst. Dominieren die Westwinde das Geschehen, strömt viel warmes Wasser ein; herrschen dagegen die östlichen Küstenwinde vor, nimmt der Einstrom ab. Über atmosphärische Fernwirkungen kommt sogar der Einfluss des El-Niño-Phänomens im südlichen Pazifik wiederholt zum Tragen. Vereinfacht gesagt bilden sich während eines El Niños über der Amundsensee häufiger blockierende Wettersysteme, welche die Westwinde anfachen und entsprechend den Einstrom auf den Kontinentalschelf verstärken.

Für die kommenden Jahrzehnte prognostizieren Forscher eine weitere Zunahme der Westwinde sowie eine fortschreitende Verlagerung dieser Luftströmungen Richtung Süden. Außerdem soll die Wassertemperatur steigen. Für die Amundsensee würde diese Entwicklung bedeuten, dass noch öfter jene Umweltbedingungen vorherrschen, unter denen viel warmes Tiefenwasser auf den Kontinentalschelf strömt. Die Reaktion der Gletscher vorherzusagen, gestaltet sich schwierig, weil noch nicht rich-

3.44 > Ein Ring aus kaltem, sehr salzigem Eisschelfwasser bildete noch im Jahr 2005 eine wirksame Schutzbarriere für die Schelfeise im Weddellmeer, in der Ostantarktis und im Rossmeer. Mittlerweile aber bekommt dieser Kaltwasserwall Lücken. In der Westantarktis ist er bereits vor Jahrzehnten zusammengebrochen. Hier gelangt wärmeres Wasser aus dem Zirkumpolarstrom ungehindert auf den Kontinentalschelf und unter die schwimmenden Eiszungen.



3.45 > Zweigeteilte Antarktis: Während die Gletscher und Schelfeise der Westantarktis im Zeitraum von 2008 bis 2015 große Mengen Eis durch den Abbruch von Eisbergen oder aber durch basales Schmelzen verloren haben, fällt die Bilanz im ostantarktischen Teil nicht ganz so negativ aus. In einigen Regionen fiel sogar mehr Schnee, als Eis durch Abbrüche oder Schmelze verloren ging. Die einzige Ausnahme bildet die Region um den Tottengletscher.

tig verstanden wird, ob der derzeitige Rückzug der Eismassen einzig und allein auf das basale Schmelzen zurückzuführen ist – oder ob nicht auch dynamische Prozesse im Eis eine Rolle spielen.

Klimasimulationen deuten jedoch darauf hin, dass sich zum Beispiel die Aufsetzlinie des Pine-Island-Gletschers noch viel weiter zurückziehen könnte, sollte das Schmelzen durch warmes Meerwasser anhalten. Erkenntnisse über die Zukunft des Thwaitesgletschers erhoffen sich US-amerikanische und britische Wissenschaftler von einem neuen, fünfjährigen Forschungsprojekt, das im Januar 2019 begann. Im Rahmen dieses Projekts wollen die Forscher Verankerungen vor und unter dem Gletscher aussetzen, um den Ein- und Ausstrom der Wassermassen zu überwachen. Sie werden Robben mit Messinstrumenten in die Tiefe schicken, die Forscher selbst werden mit geophysikalischen Gerät über den Gletscher ziehen, jede Menge Fernerkundungsdaten erheben und am Ende hoffentlich besser verstehen, ob der Rückzug des Thwaitesgletschers bereits unaufhaltsam ist.

Düstere Zukunftsaussichten für das Filchner-Ronne-Schelfeis

Während sich die Schelfeisgebiete und Gletscher der Westantarktis auf dem Rückzug befinden, zeigen die größten Schelfeise der Antarktis, das Rosseschelfeis im gleichnamigen Rossmeer sowie das Filchner-Ronne-Schelfeis im Weddellmeer, bislang keine besonders auffälligen Veränderungen. Das liegt vor allem an der weiträumigen Meereisbildung in beiden Regionen. Im südlichen Weddellmeer beispielsweise bildet sich während der Herbst- und Wintermonate so viel Meereis, dass die dabei freigesetzte Salzmenge ausreicht, die Wassermassen vor und unter dem 450 000 Quadratkilometer großen Filchner-Ronne-Schelfeis in ein hydrografisches Bollwerk zu verwandeln. Diese Barriere aus sehr salzreichem und etwa minus zwei Grad Celsius kaltem Wasser schützt bislang das Schelfeis vor dem Einstrom 0,8 Grad Celsius warmer Wassermassen, welche der Weddellwirbel an der Kante des Kontinentalsockels entlang transportiert.

Modellberechnungen deutscher Polarforscher zeigen jedoch, dass diese Kaltwasserbarriere vor dem Filchner-Ronne-Schelfeis in den kommenden Jahrzehnten unwiderruflich zusammenbrechen könnte. Auslöser werden steigende Lufttemperaturen über dem Weddellmeer sein. Die ersten Anzeichen dieser Entwicklung sehen die Forscher schon heute. Zum einen entsteht weniger Meereis in der Region; zum anderen belegen ozeanografische Messungen an der Schwelle des Filchnertrogs, einem tiefen Graben vor und unter dem Filchnerschelfeis, dass es wärmeren Wassermassen aus dem Weddellwirbel bereits gelingt, durch diesen Graben auf den Kontinentalschelf vorzudringen. Bis zum Jahr 2016 beobachteten deutsche und norwegische Forscher diese Vorstöße des etwa minus 1,5 Grad warmen Tiefenwassers nur im antarktischen Sommer, phasenweise schaffte es der Einstrom sogar bis zum Schelfeis. Im Winter aber dominierte weiterhin das kalte, hochsaline Schelfwasser. Aktuelle Messreihen aus dem Jahr 2017 aber zeigen nun einen Einstrom, wie ihn die Forscher im Weddellmeer bislang noch nicht erlebt haben. Die Messgeräte am Eingang des Filchnergrabens waren erstmals das gesamte Jahr hindurch von warmem Wasser umgeben – und dessen Temperatur lag deutlich oberhalb von minus einem Grad Celsius.

Diese Veränderungen im Kleinen markieren möglicherweise den Anfang eines grundlegenden und unumkehrbaren Wandels im südlichen Weddellmeer, der vermutlich ab der Mitte des 21. Jahrhunderts einsetzen wird. Sollten die warmen Wassermassen erst einmal unter das Schelfeis gelangen, wird es vermutlich kein Zurück mehr geben, denn ihre Wärme wird das Schmelzen an der Eisunterseite stark beschleunigen. Das dabei entstehende Schmelzwasser wiederum verstärkt dann eine Umwälzbewegung, die weiteres warmes Wasser aus dem Weddellwirbel unter die Eisplatte saugen wird.

Infolge der dramatischen Schmelze an der Schelfeisunterseite wird sich die Aufsetzlinie der Eisplatte weiter nach Süden verlagern und das Eis damit nach und nach den Kontakt zum Meeresboden verlieren. Die Reibung auf dem Untergrund hatte bislang das Fließen der Eisströme gehemmt. Fällt diese Bremse weg, beschleunigt sich das Abfließen des Eises aus dem Ostantarktischen Eisschild. Der Kreislauf aus Wärme und Schmelzwasser unter dem Schelfeis wird erst dann an Kraft verlieren, wenn das Schelfeis zerfallen ist oder kein Gletschereis mehr aus dem Landesinnern nachfließt. Das heißt, die Prozesse würden mehrere Jahrhunderte lang andauern.

Um den prognostizierten Einstrom des warmen Wassers unter das Filchnerschelfeis messen zu können, haben deutsche, britische und norwegische Wissenschaftler im antarktischen Sommer 2016 an sieben Positionen durch die Eisplatte des Filchnerschelfeises gebohrt und ozeanografische Messgeräte unter der Eiszunge verankert. Die Messdaten zur Temperatur, zum Salzgehalt und zur Strömungsgeschwindigkeit und -richtung der Wassermassen im Filchnergraben werden nun täglich nach Europa gefunkt und erlauben es den Wissenschaftlern, in Echtzeit völlig neue Einblicke in das Geschehen unter dem Schelfeis zu bekommen.

Ersten Erkenntnissen zufolge stammte das hier strömende Eisschelfwasser bis zum Jahr 2017 entweder aus der Polynia vor dem Ronneschelfeis, in Nähe der Antarktischen Halbinsel, oder aber es wurde vor dem Filchnerschelfeis gebildet, auf dem sogenannten Berknerschelf mit der gleichnamigen Insel. Die erstgenannte Strömung kam stets aus dem Westen, kroch südlich von der Berknerinsel unter dem Schelfeis entlang und strömte dann durch den Filchnergraben in Richtung Norden – also gewissermaßen



unter dem Schelfeis hervor. Die zweite Strömung verlief in umgekehrter Richtung. Sie strömte durch den Filchnergraben unter das Schelfeis.

Im Jahr 2017 haben die Forscher festgestellt, dass sich diese beiden Strömungen anscheinend nicht mehr abwechseln. Derzeit fließt nur noch aus dem Westen kommendes Ronneschelfwasser durch den Filchnergraben, was unter anderem zur Folge hat, dass das Filchnerschelfeis von unten schmilzt. Darauf lassen Änderungen der Schelfeisdicke schließen, welche die Wissenschaftler aus Satellitendaten ableiten. Warum aber schmilzt das Filchner-Ronne-Schelfeis in der tiefen Kaverne stärker? Seit Beginn der Messungen haben sich die Wassermassen in Bodennähe dort um 0,1 Grad Celsius erwärmt. Das mag nicht viel klingen, ist aber angesichts der Größe des Schelfeises und der darunter strömenden Wassermassen enorm und kann zu erheblichen Schmelzprozessen an der Unterseite des Schelfeises sowie an seiner Aufsetzlinie führen. Wie das Ronneschelfwasser gebildet wird und wie es sich im Verlauf von Jahrzehnten verändert hat, wollen

3.46 > Unter dem Filchner- und dem Ronneschelfeis im Weddellmeer verlaufen zwei Gräben, in denen Wassermassen zirkulieren und bis weit unter die beiden Eisflächen gelangen. Derzeit dominiert das aus dem Westen kommende Ronneschelfwasser (violett). Es hat sich in den zurückliegenden Jahren um 0,1 Grad Celsius erwärmt und schmilzt mittlerweile die Schelfeise nachweislich von unten.

die Forscher im antarktischen Sommer 2021 untersuchen. Dann werden sie mit dem deutschen Polarforschungsschiff „Polarstern“ in die Ronne-Region fahren und umfangreiche ozeanografische Messungen vom Schiff aus vornehmen.

Trägerische Ruhe in der Ostantarktis

Im Osten der Antarktis halten sich die Massenzuwächse und -verluste bislang in etwa die Waage. Erste Anzeichen für klimabedingte Veränderungen gibt es dennoch. So transportieren beispielsweise der große Tottengletscher und seine Nachbarn ihr Eis heute deutlich schneller ins Meer als noch vor 20 Jahren. Wissenschaftler beobachten diese Gletscher ganz besonders aufmerksam, weil ihr Einzugsgebiet so groß wie Frankreich ist und damit weite Regionen des Ostantarktischen Eisschildes einschließt. Ein vollständiges Abschmelzen dieser Eismassen würde den globalen Meeresspiegel um 3,5 Meter erhöhen. Daher wird vor allem der große Tottengletscher als Signalgeber für klimabedingte Veränderungen in der Ostantarktis bezeichnet.

Der Tottengletscher fließt durch einen tiefen, langen Fjord, dessen Grund in einigen Passagen wie der Meeresboden in der Westantarktis Richtung Süden abfällt. Der vordere Teil der Eiszunge schwimmt auf und bildet das Tottenschelfeis, welches bislang in einer Tiefe von etwa 500 bis 800 Metern auf einem sehr zerklüfteten Untergrund aufliegt. Im antarktischen Sommer 2014/2015 gelang es australischen Wissenschaftlern erstmals, mit einem Forschungsschiff direkt bis vor die Abbruchkante des Tottengletschers zu fahren und dort ozeanografische Messungen in der Wassersäule vorzunehmen sowie den Meeresboden genau zu vermessen. Dabei entdeckten sie in etwa 600 Meter Wassertiefe einen etwa zehn Kilometer breiten und bis zu 1097 Meter tiefen Graben im Meeresboden an der westlichen Seite des Gletschers. Durch diesen Graben strömten zum Zeitpunkt der Messungen Wassermassen mit einer Temperatur von minus 0,41 bis minus 0,57 Grad Celsius unter das Schelfeis.

Die Wissenschaftler identifizierten das einströmende Wasser als warmes, salzhaltiges und relativ sauerstoffarmes Tiefenwasser, das aus dem Zirkumpolarstrom stammte. Was die Brisanz dieses Einstroms erhöht, ist die

Tatsache, dass der Tottengletscher stellenweise in einer so großen Wassertiefe auf dem Meeresboden aufliegt, dass der Gefrierpunkt des Wassers aufgrund des hohen Wasserdrucks weit unter den sonst üblichen Werten liegt. Die Wissenschaftler berechneten, dass das einströmende Wasser mit seiner Temperatur von rund minus 0,5 Grad Celsius etwa drei Grad Celsius wärmer war als der Schmelzpunkt an der Aufsetzlinie. Das bedeutet, die Schmelzkraft des Tiefenwassers war fast so groß wie jene des warmen Einstroms in der Amundsensee. Schätzungen zufolge verliert der Tottengletscher pro Jahr zwischen 60 und 80 Gigatonnen Eis durch basales Schmelzen. Diese Eismenge entspricht einem mittleren Dickenverlust von etwa 9,9 bis 10,5 Metern pro Jahr, wobei das Schelfeis insgesamt zwischen 200 und 1000 Meter dick ist.

Damit bestätigt sich, dass auch am größten Gletscher der Ostantarktis warmes Meerwasser bis an die Aufsetzlinie vordringt und dort zu abrupten Massenverlusten führen kann. Der Tottengletscher besitzt also eine größere Dynamik als bislang angenommen. Das heißt, er reagiert viel deutlicher auf klimabedingte Veränderungen und könnte infolge des basalen Schmelzens großflächig den Kontakt zum Meeresboden verlieren. Sollte das passieren, verlöre er damit aber auch seine Funktion als Bremsklotz für die dahinterliegenden Eismassen aus dem Innern der Ostantarktis.

Grönland – Hotspot der Erwärmung

Während Eismassenverluste in der Antarktis vor allem auf Eisbergabbrüche und Schmelzprozesse an der Schelfeisunterseite zurückzuführen sind, schrumpft Grönlands Eiskappe seit den 1990er-Jahren vor allem von oben – durch die Schmelze an der Oberfläche des Eisschildes. Sie macht 61 Prozent der erhöhten Eisverluste aus. Die restlichen 39 Prozent werden durch ein verstärktes Gletscherkalben hervorgerufen. Ausgelöst wurde die verstärkte Oberflächenschmelze durch einen Anstieg der Sommertemperaturen seit den frühen 1990er-Jahren um etwa zwei Grad Celsius.

Extrem hohe Schmelzraten registrierte das Satellitengespann GRACE im Sommer 2012. Damals ließen außergewöhnlich warme Luft und ein anhaltend wolkenloser Himmel Grönlands Eispanzer auf 97 Prozent seiner Ober-



fläche schmelzen. Der Eispanzer verlor allein im Juli 2012 etwa 400 bis 500 Milliarden Tonnen Eis, was zu einem globalen Meeresspiegelanstieg von mehr als einem Millimeter führte. Das Schmelzwasser rauschte in jenem Sommer sturzflutartig vom Eisschild und beschädigte im Westen Grönlands sogar Brücken und Straßen, die dort in den 1950er-Jahren errichtet worden waren und bis dato noch nie Schaden genommen hatten. Schmelzereignisse dieses Ausmaßes hatte es zuvor nur zweimal in der jüngeren Klimageschichte Grönlands gegeben, wie Daten aus Eisbohrkernen belegen – einmal 1889 und ein zweites Mal sieben Jahrhunderte zuvor während der Mittelalterlichen Warmzeit (auch Mittelalterliche Klimaanomale genannt).

Zur Überraschung der Wissenschaftler folgte auf den extremen Schmelzsommer 2012 ein kaltes Jahr, in dem die Gesamtmenge des Neuschnees nahezu genauso groß war wie der Eisverlust durch Schmelze und Eisbergabbrüche. Allerdings ist der Trend seit 1990 eindeutig – Grönland erwärmt sich und verliert dabei mehr und mehr Eis. Die GRACE-Daten zeigen aber auch, dass die Massenbilanz des Eisschildes stark variiert. Von extremer Schmelze bis hin zu Jahren mit viel Schneefall und wenig Schmelzverlusten ist inzwischen alles möglich, berichten Forscher.

Dass es im Sommer in Grönland nun immer wärmer geworden ist, liegt an der zunehmenden Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre. Sie führt dazu, dass seit dem Jahr 2003 immer häufiger warme Luft aus dem Süden

3.48 > Frisch gefallene Schneekristalle besitzen eine Vielzahl an Flächen und Kanten, die Sonnenlicht reflektieren. Wärme aber lässt diese Mikrostrukturen miteinander verschmelzen. Die Kanten werden runder, die Kristalle klumpen zusammen, sodass die Schneedecke insgesamt eindunkelt und mehr Sonnenenergie absorbiert wird.

3.47 > Der Tottengletscher ist der mächtigste Gletscher der Ostantarktis, verliert allerdings auch mehr Eis als die benachbarten Gletscher.



nach Grönland einwandert und dort vor allem den Westen der Insel erwärmt. Wissenschaftler machen dafür unter anderem den Jetstream verantwortlich. Schwächelt der Starkwind infolge der abnehmenden Temperaturgegensätze zwischen der Arktis und den mittleren Breiten, kann sich ein blockierendes Hochdruckgebiet über Grönland festsetzen, welches für wolkenlosen Himmel, hohe Sonneneinstrahlung, wenig Schneefall und Luftströmungen aus dem Süden sorgt.

Das Ausmaß der Oberflächenschmelze wird jedoch auf komplexe Art und Weise zusätzlich auch durch Wolken beeinflusst. Messungen auf dem höchsten Plateau des Grönländischen Eisschildes haben beispielsweise gezeigt, dass selbst die Schneeaufgabe in diesen Höhenlagen gelegentlich schmilzt, wenn im Sommer Wolken aus einem bestimmten Mix aus Wassertropfen und Eiskristallen über das Plateau ziehen. Diese erhöhen die optische Dicke und Absorption der Atmosphäre und verstärken dann die langwellige Wärmestrahlung auf den Eisschild, was die Oberflächenschmelze in Gang setzt. Gleichzeitig deuten neuere Studien darauf hin, dass die Sommerbewölkung über Grönland insgesamt abgenommen hat, weil sich inzwischen häufiger das blockierende Hochdruckgebiet über der Insel ausbildet. Und wo Wolken fehlen, erreicht die Sonnenstrahlung nahezu ungebrems den Eisschild, was insbesondere in den Randzonen mit niedriger Albedo das Schmelzen verstärkt.

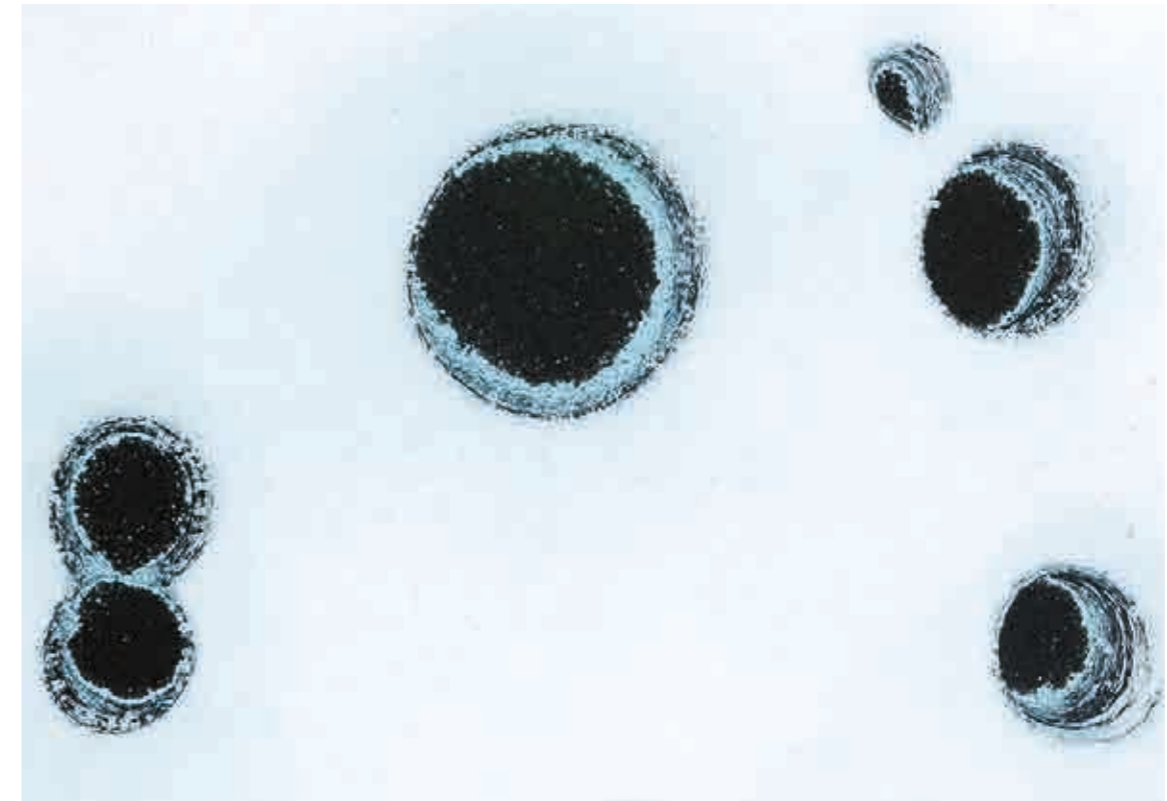
Sonneneinstrahlung gefährdet einen Eispanzer kaum, solange auf diesem eine frische Schicht aus trockenem, feinkörnigem Schnee liegt, denn dieser reflektiert bis zu 85 bis 90 Prozent der einfallenden kurzwelligen Sonnenenergie. Beginnt der Schnee jedoch nur im Ansatz zu schmelzen und nasser zu werden, kommt ein sich selbst verstärkender Prozess in Gang, der insbesondere auf Grönland eine wichtige Rolle spielt, weil das Eis der Insel auf 90 Prozent seiner Fläche von Schnee bedeckt ist. Schneekristalle verklumpen, wenn sie nasser werden, und wachsen. Dadurch verändern sich ihre optischen Eigenschaften, die Rückstrahlkraft der Schneedecke insgesamt sinkt. Das heißt, anstatt die einfallende Strahlung weiterhin nahezu vollständig zu reflektieren, absorbieren die Schneekörner nun mehr und mehr Licht, vor allem im langwelligen Infrarotbereich. Reduziert sich beispielsweise die Albedo einer Schneedecke von 85 Prozent auf

70 Prozent, heißt das, dass der Schnee nun doppelt so viel Strahlung absorbiert wie zuvor. Diese aufgenommene Energie wiederum treibt die Verklumpung der Schneekristalle voran, wodurch der Schnee dunkler wird und die Absorption und damit auch die Schmelze weiter verstärkt werden. Irgendwann ist die Schneedecke vollständig geschmolzen. Zurück bleibt nacktes Eis, dessen Oberfläche ein holpriges Mosaik aus Pfützen, Rinnsalen und zahllosen Eishöckern darstellt. Graue Trübsal statt weißer Pracht, wie man es im Sommer vor allem im westlichen Randbereich des Grönländischen Eisschildes findet.

In der dunklen Randzone

Die graue Farbschattierung des Eises wird durch Eisalgen hervorgerufen, die in der oberen Eisschicht überwintern und große Algenblüten formen, wenn der Schnee an der Oberfläche schmilzt. Aus diesem Grund bezeichnen Wissenschaftler den schneefreien Rand des Eisschildes auch als „dark zone“ – als dunkle Zone. Dass Schnee nicht immer nur weiß ist, sondern sich unter Umständen auch mal grün oder rötlich einfärbt, hat schon der griechische Gelehrte Aristoteles (348–322 vor Christus) berichtet. Um jedoch herauszufinden, dass Organismen für diese ungewöhnlichen Farbtöne verantwortlich sind, bedurfte es zunächst der Erfindung des Mikroskops. Allerdings ist bis heute unklar, wie viele Eis- und Schneealgenarten die Gletscher und Eisschilde dieser Welt besiedeln und wie sie überleben. Antworten fehlen bislang auch auf die Frage, wie stark ihre Blüten die Schmelze des Grönländischen Eisschildes vorantreiben.

Man weiß mittlerweile, dass Schneeealgen je nach Ort ihres Vorkommens ungefähr sechs Monate lang im Sporenstadium überwintern. Erst im Frühjahr und Sommer, wenn der Schnee zu schmelzen beginnt, wachsen und teilen sich die Einzeller, denn sie benötigen flüssiges Wasser, um Photosynthese zu betreiben. Im Sommer bilden sie außerdem Pigmente, sogenannte Karotinoide, die sie als Sonnenschutz um ihren Chloroplasten und Zellkern herum platzieren. Junge Schneeealgen schimmern aufgrund ihres Chlorophylls zunächst in einem grünen Farbton. Je älter die Einzeller jedoch werden, desto mehr Karotinoide lagern sie ein und desto mehr verfärben sie sich ins Orangefarbene oder Rötliche. Schneeealgen spei-



3.49 > Wo sich Staub, Asche oder andere Partikel auf dem Eis ablagern, entstehen solche fingerdicken, zylindrischen Vertiefungen, Kryokonitlöcher genannt. Sie sind Lebensraum für viele Mikroorganismen, verdunkeln den Eisschild aber zusätzlich und treiben somit die Oberflächenschmelze des Eises voran.

chern im Lauf des Sommers auch Fette in ihrer Zelle und verstärken ihre Zellwand, um im Ernstfall dem Druck der Schneemassen standzuhalten und um gegen Fressfeinde gewappnet zu sein. Gleichzeitig verdrängen sie Wasser aus ihrer Zelle, damit sie bei Frost nicht Gefahr laufen, dass das Wasser gefriert, sich dabei ausdehnt und die Alge zerstört.

Dagegen sind Eisalgen, von denen man bisher drei Arten kennt, weniger komplex als Schneeealgen. Die häufig in Ketten vorkommenden Einzeller schützen sich mit einem bräunlichen Pigment vor der Sonneneinstrahlung, weshalb sie dem Eis den typischen grauen Farbton verleihen. Im Gegensatz zu Schneeealgen verstärken Eisalgen auch ihre Zellwände nicht. Bekannt ist bislang nur, dass die Zellen in einer Art Ruhezustand überwintern und erst im Sommer, wenn der Schnee an der Gletscheroberfläche geschmolzen ist, sich kontinuierlich teilen und wachsen.

In den zurückliegenden zwei Jahrzehnten haben die Forschungsarbeiten zu den Auswirkungen der Algengemeinschaften auf die Oberflächenschmelze des Grön-

ländischen Eisschildes und anderer Gletscher zugenommen. Heute weiß man, dass Schneeealgen, deren Vorkommen von sechs Arten dominiert wird, im Zuge ihrer Wachstumsphase die Rückstrahlkraft eines Gletschers deutlich verringern. Rötlich verfärbter Schnee reflektiert nur noch etwa 49 Prozent des einfallenden Sonnenlichts, grünlich schimmernder Schnee sogar nur 44 Prozent. Nacktes, von Eisalgen verfärbtes Eis kommt auf eine Albedo von lediglich 35 Prozent.

Noch weniger Rückstrahlkraft besitzt nur noch Eis, dessen Oberfläche von einem Biofilm aus Algen und mineralischem Staub oder von sogenannten Kryokonitlöchern überzogen ist. Als Kryokonit werden vom Wind verfrachtete Partikel aus organischem (Algen, Bakterien) oder mineralischem Material (Staub, Wüstensand, Aschepartikel) bezeichnet, die sich auf dem Eis abgelagert haben. Als dunkle Flecken oder Staubaufgabe auf hellem Eis absorbieren sie mehr Wärme als die restliche Umgebung, sodass das Eis in unmittelbarer Nähe der Verschmutzungen schmilzt und sich nach und nach zylindrische Vertie-

3.50 > Schmelzwasser strömt unter dem grönländischen Russellgletscher hervor. Es stammt unter anderem aus Seen auf dem Gletscher, die infolge von Rissen im Eis leergelaufen sind.



fungen bilden. In diesen Löchern sammeln sich dann Wasser, Algen sowie weiteres organisches und anorganisches Material, sodass kleine Mikrohabitate entstehen, in denen vor allem Bakteriengemeinschaften, Viren, Bärtierchen, Wimperntierchen, Rädertierchen, Eiszürmer und Mückenlarven gedeihen. Die Rückstrahlkraft der mit Löchern gespickten Gletscheroberfläche für einfallendes Sonnenlicht beträgt allerdings nur noch knapp 23 Prozent.

Mit dem Klimawandel vergrößert sich der Wirkungsbereich der Schnee- und Eisalgen auf dem Grönländischen Eisschild. Zum einen beginnt die Schneeschmelze früher im Jahr – das heißt, die Algenblüte setzt eher ein, wodurch die Einzeller mehr Zeit haben, sich auszubreiten. Zum anderen zieht sich die Schneegrenze aufgrund der Erwärmung kontinuierlich ins Landesinnere zurück. Unter diesen Voraussetzungen können vor allem einzelne Eisalgen, getragen vom Wind, auch entlegene oder zentrale Bereiche des Eisschildes erreichen und dort eine neue Blüte starten. Extreme Schmelzereignisse wie im Sommer 2012 verstärken somit die Verbreitung und die Dauer der Algenblüten und treiben die Oberflächenschmelze des Grönländischen Eisschildes voran.

Eislinsen, Wasserspeicher und türkisblaue Seen

Wie in der Antarktis rinnt auch in Grönland nicht alles Schmelzwasser vom Eisschild herunter. Vor allem in den höher gelegenen Regionen der Insel versickern bis zu 45 Prozent des Schmelzwassers in der porösen Firnschicht des Eisschildes und gefrieren dort zum Großteil wieder. Bei diesem Gefriervorgang gibt das Schmelzwasser latente Wärme an seine Umgebung ab, die langfristig zur Erwärmung der Firnschicht beiträgt. Außerdem gefriert das Schmelzwasser zu einer dichten Eisschicht oder -linse, die im Gegensatz zur Firnschicht keine Poren aufweist.

Sollte also im Folgesommer erneut Schmelzwasser versickern, kann dieses nur bis zum Schmelzwasserhorizont aus dem Vorjahr vordringen. Auf diese Weise nimmt im Lauf der Zeit die Aufnahmekapazität der Firnschicht für Schmelzwasser ab, was zur Folge hat, dass mehr Schmelzwasser an der Eisoberfläche verbleibt und sich dort in Schmelzwasserseen oder -bächen sammelt. Im Südosten und Nordwesten Grönlands führten starker

Schneefall im Winter und hohe Schmelzraten im Sommer sogar dazu, dass sich Wasserlinsen im Firn bildeten. Diese Wasseransammlungen können mehrere Jahre überdauern, bevor sie über Risse und Spalten im Eis in die Tiefe sickern und wenig später als Schmelzwasserstrom an der Unterseite des Gletschers hervortreten.

Schmelzwasser, das nicht versickert, sammelt sich in der Regel in Vertiefungen an der Eisschildoberfläche. Auf diese Weise entstanden früher vor allem in der flachen Randzone des Eisschildes auffällige Schmelzwasserseen. Mittlerweile aber kommen diese Seen auch in höheren Lagen vor. Im Südwesten Grönlands beispielsweise ist die Höhengrenze, bis zu der Schmelzwasserseen vorkommen, in den zurückliegenden 40 Jahren um 53 Kilometer landeinwärts und damit den Eisschild hinaufgewandert. Bis zum Jahr 1995 vollzog sich diese Verlagerung in kleinen Schritten. Die Höhengrenze wanderte damals nur etwa 500 Meter pro Jahr landeinwärts. Seitdem aber ist die Sommertemperatur in der Region um 2,2 Grad Celsius gestiegen. Es schmolzen im Sommer mehr Schnee und Eis, sodass sich die Höhengrenze der Schmelzwasserseen mittlerweile in manchen Jahren bis zu drei Kilometer landeinwärts verlagert hat.

Und dieser Trend wird anhalten. Klimamodellierungen zeigen, dass sich im Südwesten Grönlands ab dem Jahr 2050 auch in Regionen oberhalb von 2200 Meter Höhe Schmelzwasserseen bilden werden. Die Höhengrenze der Seen wird dann mehr als 100 Kilometer landeinwärts und mehr als 400 Meter den Eisschild hinaufgewandert sein. Gleichzeitig wird sich dann im Vergleich zu heute die Eisfläche, auf der Schmelzwasserseen entstehen können, verdoppelt haben.

Diese Seen sind jedoch nicht für die Ewigkeit geschaffen. Viele von ihnen laufen schon nach wenigen Tagen aus, wenn sich das Eis unter ihnen bewegt und im Zuge dieser Bewegung Risse oder Spalten entstehen. Reicht ein solcher Riss von der Eisschildoberfläche bis zum Boden unter dem Gletscher, wird er als Gletschermühle bezeichnet. Durch diesen Abfluss hindurch rinnt dann das gesamte Wasser des Sees unter den Eispanzer – ein Vorgang, der oft nur wenige Stunden dauert und bei dem das Wasser Wärme an den Eispanzer abgibt. Im Felsbett angekommen, erhöht das Seewasser unter Umständen den Wasserdruck unter dem Eisschild oder Gletscher und ver-



3.51 > Schmelzwasserseen absorbieren einen Großteil der einfallenden Sonnenenergie und tauen tiefe Höhlen in das Eis. Stoßen sie dabei auf einen tiefer liegenden Riss oder eine Spalte, kann der See innerhalb kurzer Zeit leerlaufen.

größert den Wasserfilm, auf dem die Eismassen gleiten, und beschleunigt das Fließtempo des Gletschers zumindest für eine kurze Zeit.

Rückzug aus dem Meer

Bei aller Bedeutung der Oberflächenschmelze darf man nicht vergessen, dass Grönlands Gletscher auch an Masse verlieren, indem Eismassen an Land abbrechen und schmelzen oder aber die Gletscher ihre Eiszunge auf das Meer hinauschieben und Eisberge kalben. Wobei das Wort „Meer“ an dieser Stelle nicht ganz passend ist. In der Regel münden die Gletscher in Fjorde, was durchaus Einfluss auf ihr Fließtempo und ihre Stabilität nehmen kann. Solange die Eismassen nämlich an den Felswänden des Fjordes entlangschaben, reiben sie sich an dem Felsen und werden wie von Bremsbacken gebremst. Je kürzer aber die Strecke ist, auf der die Gletscherzunge die Felsen berührt, desto weniger Bremswirkung entfaltet sich an den Seitenrändern und desto schneller fließen die Gletscher. Das haben unter anderem Studien am Petermann-gletscher gezeigt, dessen Eiszunge in den Petermannfjord

ragt. Der große Auslassgletscher im äußersten Nordwesten Grönlands hatte im Jahr 2012 ein großes Stück seiner schwimmenden Eiszunge durch den Abbruch eines Eisbergs verloren. Infolgedessen verringerte sich die Bremswirkung der Felsen auf den Gletscher und der Strom beschleunigte seinen Eistransport um zehn Prozent.

Der Petermann-gletscher ist einer von nur noch drei grönländischen Gletschern, die als sogenannte Auslass-gletscher über eine schwimmende Eiszunge verfügen. Alle anderen früheren Gletscher dieses Typs haben ihre schwimmenden Eismassen bereits eingebüßt. Sie liegen nun vollständig auf dem Meeresgrund auf oder haben sich ganz auf das Land zurückgezogen. Die einst schwimmenden Eisflächen sind der Wärme des Meeres gewichen. Strömungen mit einer Wassertemperatur von bis zu vier Grad Celsius haben die Eisflächen großflächig von unten geschmolzen, sie ausgedünnt und das Abbrechen von Eisbergen auf diese Art forciert – so geschehen vor allem im Südosten und Südwesten Grönlands. Als beispielsweise der Jakobshavn Isbræ (Jakobshavn-gletscher) an der Westküste Grönlands nach 2001 ein 15 Kilometer langes Stück seiner schwimmenden Eiszunge verlor,

waren zuvor die Wassertemperatur um ein Grad Celsius und infolgedessen die Schmelzrate an der Unterseite der schwimmenden Eisfläche um 25 Prozent gestiegen. Schmelzprozesse unterhalb der Wasseroberfläche tragen außerdem dazu bei, dass sich die Aufsetzlinie der Gletscher landeinwärts verlagert und die Bremswirkung des Meeresbodens – in diesem Fall die Reibung auf dem Fjordgrund – ebenfalls nachlässt.

Auf Grönland sind nur 15 von 13 880 Gletschern für die Hälfte aller Massenverluste verantwortlich, die durch Eisbergabbrüche oder basales Schmelzen entstehen. Von Forschern werden diese Einbußen auch als dynamische Eisverluste bezeichnet. Fünf dieser Gletscher machen zusammen mehr als 30 Prozent aus. Dazu zählen der Jakobshavn-gletscher an der Westküste Grönlands sowie der Kangerlussuaq-gletscher, der Koge-Bugt-Gletscher, der Ikertivaq-gletscher und der Helheim-gletscher, die allesamt in enger Nachbarschaft an der Südostküste der Insel liegen. Großen Anteil an den aktuellen Verlusten haben aber auch der Upernavikeisstrom und der Steenstrup-gletscher an der Westküste sowie der Zachariaseisstrom im Nordosten Grönlands.

Obwohl sich die Fließgeschwindigkeit der meisten Gletscher Grönlands erhöht hat, fallen die Zahl der Eisbergabbrüche und damit auch der Rückzug der Eiszungen sehr unterschiedlich aus. Während einige Gletscher nahezu stabil erscheinen, verkürzt sich die Eiszunge anderer im Eiltempo, so beobachtet unter anderem beim Zachariaseisstrom und seinem Nachbarn, dem Nioghalvfjordsfjordgletscher, auch 79°-Nord-Gletscher genannt. Derart gegensätzliches Verhalten wird meist durch die Topografie des jeweiligen Fjordes sowie des Gletscherbetts hervorgerufen. Verlaufen Fjord und Gletscher beispielsweise durch eine sehr enge oder flache Passage oder liegt eine Insel mitten im Fjord, kann ein solches Hindernis Eisabbrüche durchaus verhindern und auf diese Weise die Stabilität des Gletschers für mehrere Jahrzehnte aufrechterhalten. In jenem Moment aber, wo ein solcher Gletscher dann den Kontakt zu diesem Bremsklotz verliert, dünnt er sich unter Umständen abrupt aus und tritt schnell den Rückzug an.

Einen solchen plötzlichen Rückzug seiner Eiszunge erlebte der Zachariaseisstrom, nachdem er in einer flachen Passage seines Fjordes den Kontakt zum Boden ver-

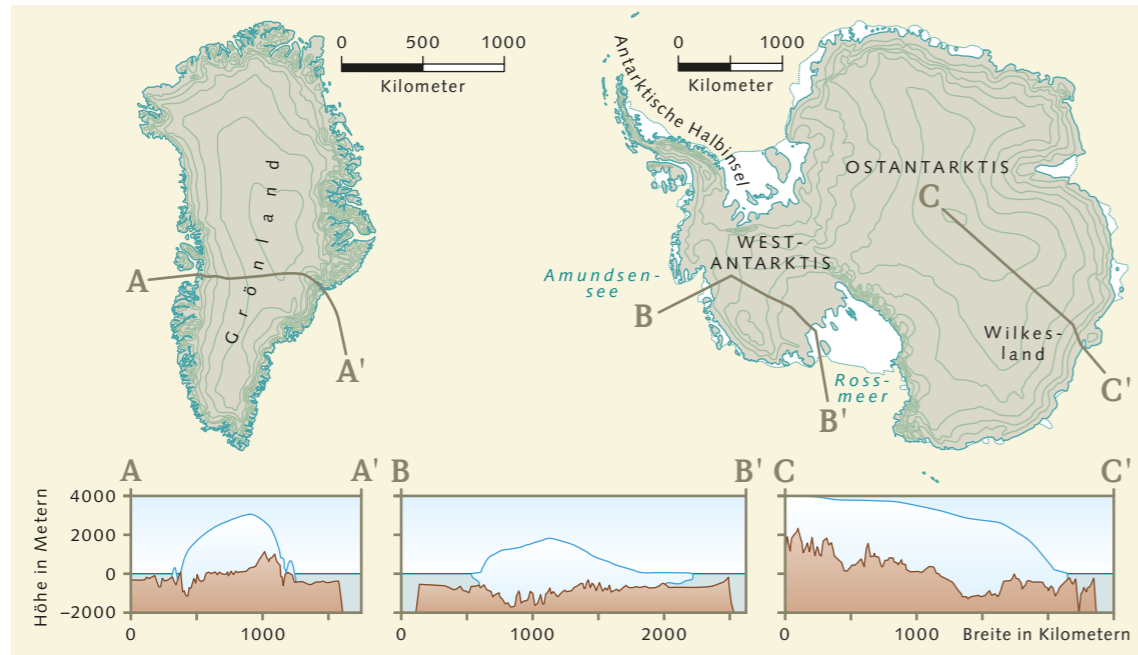


3.52 > Sedimentbeladenes Schmelzwasser tritt unter der schwimmenden Eiszunge eines grönländischen Gletschers hervor und färbt das Meer braun.

loren hatte und anschließend mit seiner Eiszunge in dahintergelagertem, tieferem Wasser auflag. Das warme Meerwasser kam nun großflächig mit dem Eis in Kontakt und ließ dieses schmelzen. Im Gegensatz dazu fließt der 79°-Nord-Gletscher durch einen Fjord, dessen Profil landeinwärts über eine Strecke von 150 Kilometern langsam ansteigt und somit beste Voraussetzungen für einen verzögerten Rückzug des Gletschers bietet.

Eine weitere entscheidende Größe der Gletscherstabilität ist die Menge und Temperatur des Schmelzwassers, das an der Unterseite des Eisstroms Richtung Meer rinnt. Auf Sonaraufnahmen von den Gletschern Westgrönlands entdeckten Wissenschaftler, dass diese subglazialen Schmelzwasserströme Kanäle und Höhlen von unten in die Gletscher schmelzen. Auf diese Weise verliert der Eisstrom nicht nur den bremsenden Kontakt zum Untergrund, an diesen ausgedünnten Stellen steigt auch die Gefahr von Eisbergabbrüchen. Schießt das Schmelzwasser auf breiter Fläche unter dem Gletscher hervor, kann es die basale Schmelzrate an der Abbruchkante unter Umständen sogar verfünffachen. Welches Ausmaß diese Schmelzwasserströme unter dem Eis ein-

3.53 > Während in der Antarktis weite Teile beider Eisschilde auf Landflächen unterhalb des Meeresspiegels ruhen und somit für warme Wassermassen erreichbar wären, gilt das in Grönland nur für Bereiche, in denen die Eismassen tiefe Gletschergräben füllen. Der restliche Untergrund Grönlands ragt bislang noch über die Meeresoberfläche hinaus.



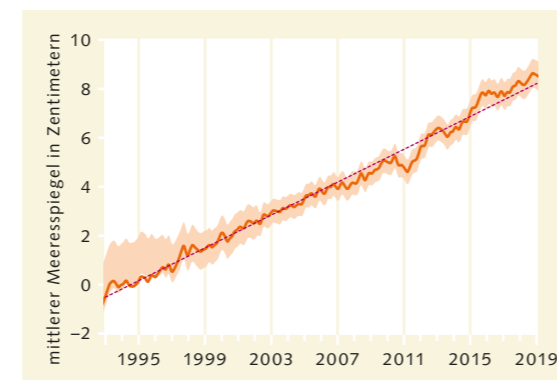
nehmen, lässt sich mit Blick von oben oft nur erahnen. Am Humboldtgletscher im Nordwesten Grönlands beispielsweise fließt so viel Schmelzwasser an der Unterseite des Gletschers in das Meer, dass es große Mengen an Sediment mit sich reißt und das Wasser vor der Abbruchkante kaffeebraun färbt.

Zu guter Letzt hängt die Stabilität der Eismassen an der Abbruchkante auch von der Dichte des Meereises ab, das sich vor der Kalbungsfront drängt und den Gletschereismassen Rückhalt bietet. Im Winter, wenn das Meer gefroren ist und sich die Eisschollen vor dem Gletscher übereinanderstapeln, brechen nur wenige Eisberge ab. Im Sommer aber, wenn sich die Melange aus Eisschollen und Eisbergresten auflöst, steigt die Zahl der Abbrüche wieder an. Der Rückgang des arktischen Meereises beeinflusst somit unmittelbar die Massenverluste der grönländischen Gletscher und langfristig auch den Anstieg des globalen Meeresspiegels.

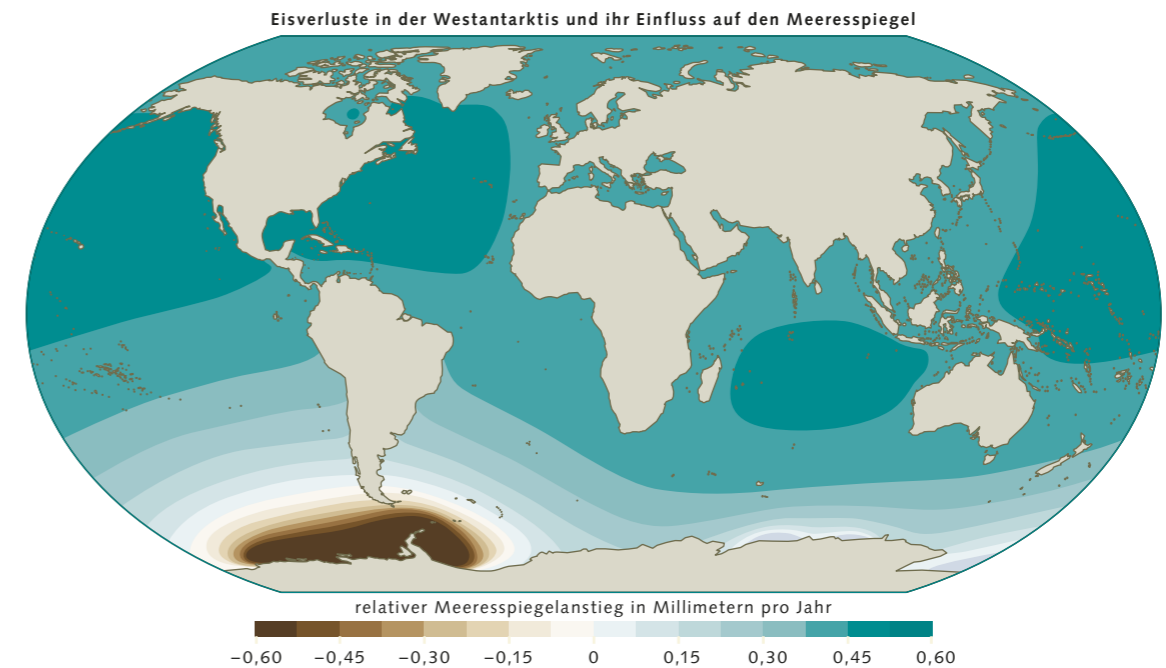
Der Meeresspiegel steigt immer schneller

Der globale Meeresspiegel steigt seit rund 21 000 Jahren. Damals, zum Höhepunkt der letzten Eiszeit, lagen die Pegel etwa 123 Meter tiefer als heute. Der Blick in die

jüngere Klimavergangenheit aber zeigt auch: Seitdem die Menschen sesshaft geworden sind, ist der Meeresspiegel noch nie so schnell gestiegen wie derzeit. Seit Beginn der satellitengestützten Altimetermessung im Januar 1993 übertraf die jährlich gemessene Anstiegsrate bis 2017 sage und schreibe 22-mal die Rate des Vorjahrs. Aktuell steigt der globale Pegel um 3,34 Millimeter pro Jahr. Zu Beginn der Satellitenmessungen im Jahr 1993 waren es noch 1,7 Millimeter; um das Jahr 1900 herum betrug der Anstieg nur etwa 1,2 Millimeter.



3.54 > Der globale Meeresspiegel steigt kontinuierlich an. Seit 1993 ist er um etwas mehr als acht Zentimeter gestiegen.



3.55 > Schrumpft das Eigengewicht eines Eisschilds, reduziert sich auch seine Anziehungskraft auf die Wassermassen in den Ozeanen. Diese werden nun von schwereren Landmassen angezogen und über den Erdball umverteilt. Aus diesem Grund führt die Eisschmelze in der Westantarktis dazu, dass vor allem die Pegel auf der Nordhalbkugel steigen, während sie in der Antarktis sinken.

Dieser besorgniserregend hohe Anstieg wird vor allem durch zwei Prozesse hervorgerufen. Zum einen verlieren die Eisschilde und Gletscher der Welt große Mengen Eis, die als Schmelzwasser entweder direkt in den Weltozean gelangen oder aber von Flüssen eingetragen werden. Zum anderen steigt die Wassertemperatur der Weltmeere – und wärmer werdendes Wasser dehnt sich aus und beansprucht mehr Raum als kaltes Wasser. Außerdem wird heutzutage weniger Wasser an Land gespeichert. Aufgrund des hohen Wasserverbrauchs durch den Menschen enthalten Seen, Flüsse, Talsperren, Stauseen, Grundwasserreservoirs und Feuchtgebiete heutzutage deutlich weniger Wasser als früher. Das Brauchwasser – auch als Betriebs- oder Nutzwasser bezeichnet – endet stattdessen ebenfalls zum Großteil im Meer und trägt, wenn auch nur zu einem kleinen Teil, zum Anstieg der Pegel bei.

Welchen Anteil aber machen die Wärmeausdehnung und der Schmelzwassereintrag aus? Bis vor zehn Jahren trugen beide im gleichen Maß zum Anstieg des Meeresspiegels bei. Seitdem aber haben die Eismassenverluste der Eisschilde und Gletscher weltweit zugenommen. Mittlerweile trägt der Schmelzwassereintrag nahezu zu zwei Dritteln zum Anstieg bei, die wärmebedingte Ausdehnung des Meerwassers etwa zu einem Drittel.

Der Meeresspiegelanstieg fällt dennoch an jedem Küstenabschnitt der Welt anders aus: In manchen Bereichen liegt er weit unter dem Durchschnitt – etwa in der Antarktis und an der US-amerikanischen Westküste. In anderen Regionen steigt er deutlich stärker als im globalen Mittel, so zum Beispiel im Südosten Asiens, in Indonesien und den Philippinen. Diese regionalen Unterschiede sind auf drei Ursachen zurückzuführen:

Lokale, postglaziale Landhebungen oder -senkungen

Das Land ist keine feste, unveränderliche Größe in der Berechnung des Meeresspiegelanstiegs, denn Küstengebiete können sich anheben oder absinken. Solche Prozesse kann man auf der Nordhalbkugel vor allem in jenen Regionen beobachten, die während der letzten Eiszeit von großen Eisschilden bedeckt waren – so zum Beispiel der Nordwesten der USA. Derartige Landflächen waren unter der Last des Eises eingesunken, während die Gebiete am Rand der Eismassen automatisch angehoben wurden. Als die Eisschilde dann nach und nach verschwanden, kehrten sich diese Bewegungen um. Küstenabschnitte in North Carolina oder entlang der deutschen Nordseeküste sinken bis heute wieder ab, während ehemals eingesunkene Regionen wieder an Höhe gewinnen.

Umverteilung des Wassers durch die Schwerkraft

Alles Schmelzwasser, das aufgrund der Eismassenverluste der Eisschilde und Gletscher in das Meer gelangt, verbleibt nicht an Ort und Stelle, sondern wird durch die Schwerkraft der Erde umverteilt. Regionen mit geringem Schwerefeld und demzufolge wenig Anziehungskraft bekommen weniger Wasser ab, Regionen mit großer Anziehungskraft dagegen mehr. Und da sowohl Grönland als auch die Antarktis aufgrund ihrer Eismassenverluste Anziehungskraft einbüßen, sammelt sich das Wasser heutzutage vor allem in den mittleren Breiten.

Umverteilung der Wärme in den Meeren

Warmes Wasser dehnt sich aus und nimmt mehr Platz ein als die gleiche Menge kaltes Wasser. Regionale Unterschiede im Meeresspiegelanstieg werden deshalb auch von der Wärmeverteilung im Weltozean hervorgerufen. Je nachdem, wie die Meeresströmungen die Wärme über den Erdball verteilen, beeinflusst dieser Wärmetransport auch die lokalen Pegelstände. Eine ebenso wichtige Rolle

spielt der Wind. Er kann Wassermassen von der Küste wegdrücken oder aber sie bei umgekehrter Windrichtung vor der Küste auf türmen und auf diese Weise die Pegel maßgeblich verändern.

Der Anstieg des globalen Meeresspiegels ist eine der schwerwiegendsten Folgen des Klimawandels und betrifft in erster Linie niedrig gelegene Inseln sowie die dicht besiedelten Küstengebiete der Welt. Im Fall einer weltweiten Erwärmung von vier Grad Celsius würde der Meeresspiegel so weit steigen, dass Gebiete überschwemmt werden würden, in denen heute 470 bis 760 Millionen Menschen leben. Der Weltklimarat prognostiziert bis zum Jahr 2100 einen Anstieg von 0,3 bis zu einem Meter – je nachdem, wie schnell sich die Erde erwärmt. Ungewiss ist dabei allerdings, wie schnell die Eisschilde und Gletscher auf die Erwärmung reagieren werden und der Meeresspiegel dementsprechend ansteigen wird. Derzeit sieht alles danach aus, als würde sich der Wandel schneller vollziehen als von vielen erwartet.



3.56 > Manche Eisberge bestehen aus marinem Eis, welches sich einst an der Unterseite eines Schelfeises gebildet hat, keine Luftbläschen enthält und zunächst klarer und blauer als normales Gletschereis ist. Friert zudem rötlich-gelbbraunes Eisenoxid mit ein, kann sich durchaus auch eine leuchtend grünliche Färbung ergeben.

Conclusio

Mehr Wärme – viel weniger Eis

Aufgrund steigender Treibhausgasemissionen und des Treibhauseffekts erwärmen sich die Atmosphäre und vor allem der Weltozean, der bislang 93 Prozent der zusätzlichen Wärme aufgenommen hat. Die steigenden Luft- und Wassertemperaturen führen insbesondere in den Polarregionen zu grundlegenden Veränderungen, die in der Arktis allerdings früher und spürbarer einsetzen als in der Antarktis. Die Arktis erwärmt sich doppelt so schnell wie die restliche Welt im Durchschnitt, weil Eis, Land, Meer und Atmosphäre in den Polarregionen so eng miteinander verzahnt sind, dass Veränderungen einer dieser Klimakomponenten auf die anderen zurückwirken und die Prozesse sich gegenseitig verstärken. Forscher sprechen deshalb auch von „arktischer Verstärkung“. Wärmer werden vor allem die Winter. Daher fällt in vielen Regionen der Arktis deutlich weniger Schnee. Gleichzeitig gefriert nicht mehr so viel Meereis. Die Eisdecke des Arktischen Ozeans hat seit dem Jahr 1979 mehr als 30 Prozent ihrer Fläche eingebüßt. Außerdem ist das Meereis heute jünger und damit dünner, zerbrechlicher und beweglicher.

Die zunehmende Wärme setzt zudem den dauerhaft gefrorenen Böden der Arktis zu. Der Permafrost erwärmt sich bis in große Tiefen und taut im Sommer immer tiefer und großflächiger auf. Infolgedessen erodieren Teile der Küsten Alaskas und Sibiriens, ganze Landstriche senken sich ab und der einst gefrorene Untergrund verliert seine Tragkraft, sodass Gebäude, Straßen und andere Infrastrukturen substanzial Schaden nehmen.

Deutliche Veränderungen zeigen auch die Landeismassen der Arktis. Sowohl der Grönländische Eisschild als auch die Gletscher Alaskas und Kanadas verlieren mittlerweile mehr Eis, als sich neues durch Schneefall bildet. Verantwortlich dafür sind Schmelzprozesse an ihrer Oberfläche sowie an der

Unterseite der Eiszungen, sofern diese in Kontakt mit dem Meer stehen.

In der Antarktis hat sich die Atmosphäre bis zum Ende des 20. Jahrhunderts nur an der Antarktischen Halbinsel deutlich erwärmt, was zum Zerfall der nördlichen Schelfeise sowie zu einem Rückgang des Meereises im Westen der Halbinsel geführt hat. In allen anderen Regionen ist die Lufttemperatur nur wenig oder gar nicht gestiegen – eine Entwicklung, die Forscher auch auf die kühlende Wirkung des antarktischen Ozonlochs zurückführen. Das wärmer werdende Südpolarmeer aber verändert die Antarktis nachhaltig, je nach Region allerdings auf unterschiedliche Weise. So sind die Eisverluste in der Westantarktis geradezu besorgniserregend. In der Amundsensee gelangt seit mehreren Jahrzehnten warmes Wasser aus dem Zirkumpolarstrom bis weit unter die Schelfeise und schmilzt diese von unten. Die Eismassen ziehen sich daher im Rekordtempo zurück – ein Prozess, der vermutlich erst enden wird, wenn der auf dem Meeresboden aufliegende Westantarktische Eisschild ganz zerfallen ist.

Anzeichen für eine ähnliche Entwicklung gibt es mittlerweile auch in der Ostantarktis, wo der Tottengletscher an Bodenhaftung verliert, sowie aus dem Weddellmeer, wo warme Wassermassen das zweitgrößte Schelfeis der Antarktis gefährden.

Insgesamt haben sich die Eismassenverluste der Antarktis seit 2012 verdreifacht. Gestiegen ist somit auch ihr Anteil am globalen Meeresspiegelanstieg. Er fällt heute mit 3,34 Millimetern pro Jahr doppelt so hoch aus wie noch im Jahr 1990, wobei der Anstieg in erster Linie auf die Eismassenverluste Grönlands und der Gletscher außerhalb der Antarktis sowie auf die wärmebedingte Ausdehnung des Wassers zurückzuführen ist. Fakt aber ist dennoch: Der Rückzug des polaren Eises gefährdet aufgrund der steigenden Wasserpegel Küstenregionen auf der gesamten Welt.

4 Die Flora und Fauna der Polarregionen

> Kurze Sommer, extrem kalte Winter und dazu jede Menge Eis und Schnee, die das Nahrungsangebot verknappen: Die Arktis und Antarktis zählen zu den lebensfeindlichsten Regionen der Erde. Mithilfe beeindruckender Anpassungsstrategien aber haben Pflanzen und Tiere auch diese Gebiete erobert und weltweit einzigartige Lebensgemeinschaften gebildet. Deren Zukunft jedoch ist angesichts des Klimawandels ungewiss.



Ein Leben in der Kälte

> Die Artenvielfalt im Nord- und Südpolargebiet wird vor allem durch die geografischen Gegebenheiten bestimmt. Während in der Antarktis nahezu alles Leben vom Meer abhängt, weist die Arktis auch an Land eine beeindruckende Vielfalt auf. In beiden Regionen blüht das Leben vor allem während des kurzen Sommers und trotz anschließend mit erstaunlichen Überlebensstricks dem Eis und der Kälte.

Drei Gemeinsamkeiten, viele Unterschiede

Die geografischen und klimatischen Besonderheiten der Polarregionen stellen die Tier- und die Pflanzenwelt der Arktis und der Antarktis vor ganz besondere Herausforderungen. In beiden Gebieten müssen die Organismen seit Jahrmillionen:

- kalte bis extrem kalte Umgebungstemperaturen meistern,
- mit der Existenz von Schnee und Eis in ihren verschiedenen Formen zurechtkommen sowie
- die extremen saisonalen Schwankungen von Sonnenlicht und Temperatur ertragen.

Der Wechsel zwischen dauerhafter Sonneneinstrahlung während der Zeit des Polartags und permanenter Dunkelheit während der Polarnacht führt dazu, dass pflanzliche Biomasse und damit Futter für alle höheren trophischen Stufen nur im Sommer produziert werden kann. In der dunklen, kalten Zeit des Jahres müssen deshalb jene Tiere, die nicht in wärmere Gefilde abwandern, von ihren Nahrungs- und Fettreserven leben, Aas fressen oder aber herabgesunkene Tier- und Pflanzenreste vom Meeresboden abweiden.

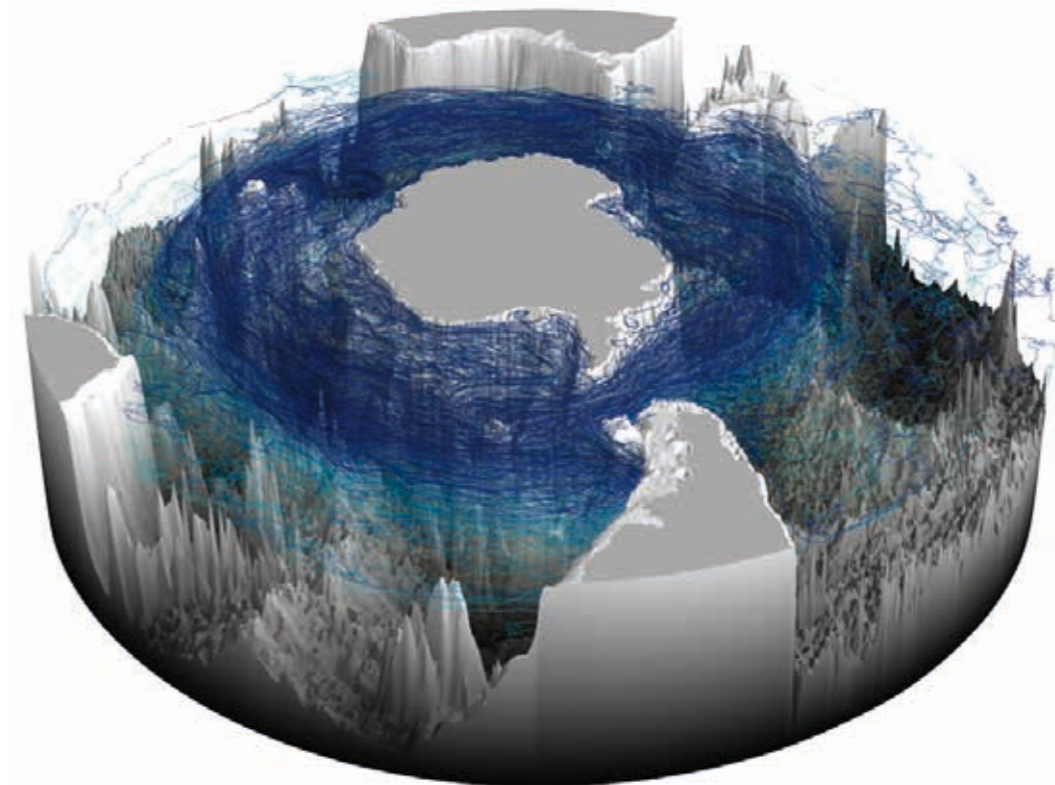
Nichtsdestotrotz hat sich sowohl in der Arktis als auch in der Antarktis eine große Vielfalt des Lebens herausgebildet. Im Nordpolargebiet kennt man mittlerweile mehr als 21 500 Tier- und Pflanzenarten, die sich an die extremen Lebensbedingungen angepasst haben – angefangen von Bakterien und Viren, die auf Gletschern leben, über Fische, die ihre ersten Lebensjahre versteckt unter dem Meereis verbringen, bis hin zu bekannten Arten wie dem Polarfuchs und dem Eisbär. Rund 14 000 der arktischen Arten leben an Land, circa 7600 im Arktischen Ozean.

Im Gegensatz dazu ist das Landleben in der Antarktis nahezu artenarm. Gerade einmal 1600 Tier- und Pflanzenarten besiedeln die wenigen eisfreien Landflächen der Antarktis. Im Meer dagegen blüht das Leben. Hier tummeln sich rund 10 630 Arten, von denen ein Großteil ganz besondere Anpassungsmechanismen aufweist, die es so nirgendwo sonst auf der Welt gibt.

Eine Frage der geografischen Lage

Vergleicht man die Lebensräume beider Polargebiete, so fallen deutliche Unterschiede auf. Während die Arktis über große, gletscherfreie Tundragebiete und weitläufige Flusssysteme verfügt, die im Sommer ausreichend Biomasse produzieren, um auch große Pflanzenfresser wie Karibus und Moschusochsen zu ernähren, ist die Landmasse der Antarktis auch heute noch zu 98 Prozent mit Eis bedeckt. Flechten, Moose und höhere Pflanzen finden deshalb kaum Untergrund, auf dem sie wachsen könnten. Hauptnahrungsquelle für alle in der Antarktis heimischen Tiere ist deswegen das Meer, welches den Kontinent vollständig umgibt.

Die daraus resultierende Isolation der Antarktis vom Rest der Welt hat die Entwicklung des Lebens im Südpolargebiet ebenso nachhaltig geprägt wie die Vereinigungsgeschichte. Seit etwa 34 Millionen Jahren trennen mehr als 3000 Meter tiefe Meeresbecken den antarktischen Kontinent von den umliegenden Landmassen Südamerikas, Afrikas und Australiens. Der Südliche Ozean ist selbst an seiner schmalsten Stelle, der Drakestraße, noch 810 Kilometer breit. Landbewohnende Tierarten, die aus den mittleren Breiten in die Antarktis einwandern wollten, mussten demzufolge auch in der Vergangenheit ausdauernd fliegen oder schwimmen können. Hatten sie diese Hürde genommen, hielt die Antarktis gleich die nächste Herausforderung bereit. In den zurückliegenden



4.1 > Ein dreidimensionales Modell des Südlichen Ozeans. Mit seinen tiefen Becken und zirkulierenden Wassermassen bildet er noch immer eine nur schwer zu überwindende Barriere für so manche Tier- und Pflanzenart aus den mittleren Breiten. Gleichzeitig hinderte er in der Vergangenheit Arten aus den antarktischen Schelfgebieten daran, in den Norden abzuwandern.

Jahrmillionen ist der südliche Kontinent nämlich mehrfach komplett vereist – teilweise sogar über seine Küstenlinie hinaus. Landgebundenen Bewohnern der Antarktis blieb also nur die Wahl, entweder abzuwandern oder aber auf das Meereis auszuweichen. Anderenfalls starben die Arten aus.

Die Arktis zu besiedeln, war im Vergleich dazu um ein Vielfaches einfacher, grenzt sie doch direkt an große kontinentale Landmassen, die weit Richtung Süden und damit auch in wärmere Klimazonen reichen. An Kälte gewöhnte Tier- und Pflanzenarten Eurasiens und Nordamerikas konnten demzufolge über den Landweg in das Nordpolargebiet einwandern. Als sich dann im Zuge der letzten Eiszeit große Eisschilde in der Arktis bildeten, bedeutete das im Gegensatz zur Antarktis nicht das generelle Aus für das Leben an Land. Die arktischen Arten hatten zum einen die Möglichkeit, ihren Lebensraum Richtung Süden zu verlagern und somit vor dem Eis zu flüchten. Zum anderen ist die Arktis während dieser Eiszeit nie vollständig von Gletschern und Eisschilden bedeckt worden. Regionen wie Beringia und der Osten Sibiriens blieben eisfrei und dienten vielen Lebewesen als Rückzugsort. Die nordöst-

lichen Tundragebiete Russlands gehören deshalb bis heute zu den artenreichsten Landflächen der Arktis.

Da die Arktis weder durch ein Meer noch durch Hochgebirgsketten von südlicheren Gefilden getrennt wird, überrascht es auch nicht, dass mit Eisbären, Wölfen und Polarfüchsen eine Vielzahl landbewohnender Räuber im Nordpolargebiet lebt, während es auf dem Festland der Antarktis keinen einzigen vierbeinigen Jäger gibt. Stattdessen brüten dort Millionen Pinguine – Vögel, die nicht fliegen können und außerhalb des Wassers auch keine Feinde kennen. Würde man die Pinguine in die Arktis umsiedeln, hätten Eisbär & Co ein leichtes Spiel, denn den großen Vögeln fehlt an Land das Gespür für Gefahren. Die einzige dem Pinguin ähnliche Vogelart, die es jemals in der Arktis gegeben hat, war der flugunfähige Riesenalk (*Pinguinus impennis*). Er lebte auf abgelegenen Felseninseln im Nordatlantik, auf denen es keine Eisbären, Wölfe oder Füchse gab. Anfang des 19. Jahrhunderts jedoch entdeckten europäische Seefahrer die Vogelkolonien. Sie jagten die wehrlosen Tiere und rotteten die Art innerhalb von nur vier Jahrzehnten aus. Die letzten Riesenalke wurden im Juni 1844 auf der isländischen Insel Eldey getötet.

4.2 > Auf und unter dem zerklüfteten Packeis der Antarktis leben vier endemische Hundsrobbenarten. Dazu zählen die Krabbenfresserrobbe, die Rossrobbe, die Weddellrobbe und der Seeleopard.



Eine Pumpe der Artenvielfalt

Die geografischen Gegebenheiten in der Arktis und Antarktis hatten bislang auch einen entscheidenden Einfluss auf die Artenvielfalt der Polarmeere. Die Ringform des Südlichen Ozeans erlaubt es vielen seiner Bewohner, sich um den gesamten Kontinent herum auszubreiten. Gleichzeitig erschweren der bis in große Tiefe reichende Zirkumpolarstrom sowie die auf seiner Höhe sprunghaft abnehmende Wassertemperatur in den oberen 200 Metern der Wassersäule die Einwanderung von Arten aus nördlicheren Gefilden. Seit der Öffnung der Drakestraße vor 34 Millionen Jahren ist zudem die Wassertemperatur gesunken – anfänglich nur episodisch mit zwischenzeitlichen Erwärmungsphasen; in den zurückliegenden 15 Millionen Jahren aber kontinuierlich. Heutzutage ist das Südpolarmeer im Durchschnitt zehn bis zwölf Grad Celsius kälter als noch vor 40 Millionen Jahren.

In jenem Maß, wie sich das Südpolarmeer abkühlte, veränderten sich auch die Eisbedingungen in der Antarktis – mit weitreichenden Folgen für das Leben im und unter dem Meereis sowie in der Wassersäule und am Mee-

resboden. Je stärker die Antarktis im Zuge einer Kaltzeit vereiste und je weiter sich die Gletscher- und Schelfeismassen auf das Meer hinausschoben, desto weniger Platz fanden Schelfbewohner wie Schwämme oder Seesterne am Meeresboden. Viele Flachwasserbereiche wurden vollends unbewohnbar und ehemals zusammenhängende Meeresgebiete durch den Gletschervorstoß voneinander getrennt. Forscher nehmen an, dass viele Meereslebewesen aus den Schelfmeeren in dieser Zeit gezwungen waren, auf den Kontinentalhang oder aber in die Tiefsee abzuwandern. Gleichzeitig aber, so glaubt man heute, hat die Isolation von Lebensräumen in den Schelfmeeren neue Arten entstehen lassen. Und da sich die antarktischen Eismassen in den zurückliegenden 2,1 Millionen Jahren mehrfach ausgebreitet und wieder zurückgezogen haben, sprechen Biologen auch von einer „biodiversity pump“ – einer Pumpe der Artenvielfalt. Dem Konzept zufolge schaffen die wiederholte Isolation von Lebensgemeinschaften (Kaltzeit, Eismassenwachstum) sowie die anschließende Möglichkeit zur Ausbreitung (Warmzeiten, Eisrückzug) beste Voraussetzungen dafür, dass sich eine einzigartige, hochdifferenzierte Artenvielfalt herausbil-

det, die zudem einen hohen Anteil endemischer Arten aufweist – also Tier- und Pflanzenarten, die nur in der Antarktis vorkommen. Bei den antarktischen Seescheiden, Anemonen, Moostierchen, Muscheln und Asselspinnen liegt der Anteil endemischer Arten bei rund 50 Prozent; bei den Meeresschnecken sind es rund 75 Prozent; bei den Gammaridea, einer Unterordnung der Flohkrebse, sowie bei den Kraken sogar bei 80 Prozent. Auf diese Weise ist im Südlichen Ozean eine Vielfalt des Lebens entstanden, die deutlich breiter und bunter ist, als man es im ersten Moment erwarten würde. Biologen haben bis heute allein mehr als 8000 verschiedene Arten wirbelloser Tiere in der Antarktis identifiziert, dabei sind einige Regionen bislang noch gar nicht richtig erforscht.

Die Fischfauna der antarktischen Schelfmeere wird von der Gruppe der Antarktische, den sogenannten Notothenioidei, dominiert. Sie machen mehr als 70 Prozent der Artenvielfalt und über 90 Prozent der Fisch-Biomasse in den Schelfmeeren aus. Es gibt allerdings auch Tiergruppen, die bislang nur vereinzelt in den antarktischen Schelfmeeren beobachtet wurden – Königskrabben sind hier ein Beispiel – oder aber die bisher noch gar nicht in der Antarktis vorkommen. Hierzu zählen Hummer und Einsiedlerkrebse, womit sich auch erklärt, warum die Bodenfauna der Schelfmeere keine Abwehrmechanismen gegen räuberische Scherenträger entwickelt hat.

Abwanderung in den Süden

Das Nordpolarmeer ist geologisch betrachtet jünger als das Südpolarmeer, weshalb die Arten im hohen Norden weniger Zeit hatten, sich an die polaren Lebensbedingungen anzupassen, als die Tiere im Süden. Doch auch sie mussten Zeiten großflächiger Vereisungen überstehen – so zum Beispiel vor rund 140 000 Jahren, als große Eisschilde Nordamerika und Nordeuropa bedeckten und ihre bis zu 1000 Meter dicken Schelfeise über den gesamten Arktischen Ozean schoben, sodass dieser vermutlich komplett zugefroren war.

Die Lebensgemeinschaften des Nordpolarmeers haben sich in dieser Zeit entweder in größere Tiefe zurückgezogen – oder aber sie sind die Atlantik- und Pazifikküsten entlang in südlichere Breiten abgewandert. Als die Eismassen dann nach und nach verschwanden,

brauchte es einige Zeit, bis die marinen Organismen die arktischen Lebensräume zurückeroberten. Biologen gehen deshalb davon aus, dass die vielfältigen Lebensgemeinschaften in den arktischen Randmeeren nicht viel älter als 125 000 Jahre sind. Zudem unterscheiden die Forscher zwischen einem atlantischen und einem pazifischen Sektor im Arktischen Ozean. Deren Bewohner wanderten aus dem jeweiligen Nachbarozean ein und passten sich getrennt voneinander an die polaren Lebensbedingungen an. So kommt es, dass bis heute in beiden Sektoren unterschiedliche Arten ein und dieselbe Rolle im Ökosystem einnehmen.

In der Arktis fiel und fällt es Schelfmeerbewohnern auch deutlich leichter, von einem Kontinent zum nächsten abzuwandern, als in der Antarktis. Die nördlichen Küstengebiete Europas, Asiens und Nordamerikas sind über ihre vorgelagerten Schelfbereiche durchgehend miteinander verbunden. Der Antarktis dagegen fehlt eine solche Flachwasserverbindung zu den Nachbarkontinenten, weshalb der Anpassungsdruck in der Antarktis stets viel höher war als in der Arktis. In Kaltzeiten standen den Meeresbewohnern im Südlichen Ozean deutlich weniger Rückzugsmöglichkeiten zur Verfügung als den Arten im hohen Norden. Die Lebewesen des Südpolarmeers hatten nur die Möglichkeit, sich anzupassen, oder aber sie sind ausgestorben. Auf diesem Grund haben die Meeresbewohner der Antarktis auch deutlich ausgefeiltere Anpassungsmechanismen entwickelt als die Bewohner des Nordpolarmeers.

4.3 > Antarktische Weißblutfische wie dieser junge Schwarzflossen-Eisfisch bevölkern die kältesten Meeresregionen der Welt und besitzen keine Farbstoffe im Blut.





4.4 > Um der arktischen Winterkälte zu entkommen, fliegt die Küstenseeschwalbe *Sterna paradisaea* im August aus ihren arktischen Brutgebieten bis an den Rand der antarktischen Packeiszone. Dabei legen die Vögel eine Strecke von ungefähr 35 000 Kilometern zurück. Weiter wandert keine andere Zugvogelart.

Die Überlebenstricks landbewohnender Tiere in den Polargebieten

Die Lebensbedingungen in der Arktis und Antarktis sind vom Wechsel der Extreme geprägt. Im Sommer gibt es Sonnenlicht, Wärme, eisfreie Land- und Wasserflächen sowie Futter im Überfluss; im Winter dagegen verkehren sich die Lebensbedingungen ins Gegenteil. In der Arktis beispielsweise sinkt die Oberflächentemperatur im Winter wochenlang auf Werte um minus 40 Grad Celsius, wobei Tage mit Spitzenwerten von minus 50 bis minus 60 Grad Celsius keine Seltenheit sind. Große Temperaturunterschiede gibt es auch von Nord nach Süd beziehungsweise zwischen den Küstenregionen und Gebieten weiter landeinwärts. Solche Gegensätze überlebt nur, wer auf eine oder mehrere der folgenden Anpassungsstrategien setzt:

- Flucht vor der Kälte durch Abwanderung in wärmere Gebiete (Migration),
- Überdauern des Winters an einem geschützten Ort (Winterruhe oder Winterschlaf),
- optimale Wärmeregulation des eigenen Körpers und
- Vorsorge durch das Anfressen großer Fettreserven.

Auf der Flucht vor Hunger und Kälte

Für die Flucht vor der Kälte und Nahrungsknappheit entscheiden sich vor allem die vielen Seevögel, die in den Polarregionen vorkommen. In der Arktis sind insgesamt 200 Vogelarten beheimatet. Die Mehrheit von ihnen gehört zu den Gänse-, Strand- und Seevögeln. Singvögel gibt es im Gegensatz zu den mittleren Breiten nur wenige. Die meisten arktischen Vogelarten verbringen nur wenige Sommermonate im hohen Norden. Wenn der Winter naht, ziehen 93 Prozent der Arten in wärmere Regionen. Ihre Wanderrouten führen tatsächlich in alle anderen Regionen der Welt. Während viele Gänse, Sperlingsvögel, Eulen, Raubvögel, Alkenvögel und Möwen in den angrenzenden mittleren Breiten überwintern, zieht es einige Strandvögel, Wassertreter und die Schwalbenmöwe (*Xema sabini*) bis in die Tropen und nach Australien. Die Pfuhschnepfe (*Limosa lapponica*) beispielsweise fliegt von ihrem Brutgebiet in Alaska 12 000 Kilometer über den Pazifik nach Neuseeland, und Langstreckenflieger wie die Küstensee-



4.5 > Eine Herde Karibue zieht im Oktober auf der Suche nach Futter durch das Arctic National Wildlife Refuge. In der Region hat es zu diesem Zeitpunkt bereits geschneit, sodass die Tiere potenzielle Futterstellen zunächst einmal freischarren müssen.

schwalbe und Raubmöwen steuern sogar die Antarktis an. Dort überwintern sie am Rand der antarktischen Packeiszone. Das heißt, die Tiere legen auf ihrem Weg von den arktischen Brutgebieten in die antarktischen Überwinterungsreviere und zurück eine Strecke von bis zu 80 000 Kilometern pro Jahr zurück. Diese Anstrengung aber lohnt sich, denn beide Polarregionen bieten den Vögeln im Sommer ein reichhaltiges Nahrungsangebot. Und da die Küstenseeschwalben sich bei der Jagd vor allem auf ihre Augen verlassen, haben sie den großen Vorteil, dass in den von ihnen gewählten Lebensräumen insgesamt acht Monate die Sonne nicht untergeht und die Tiere theoretisch rund um die Uhr auf Beutefang gehen könnten.

Es gibt allerdings auch Vogelarten in der Arktis, die nicht in wärmere Gefilde abwandern. Dazu zählen bei den Landvögeln zum Beispiel der Kolkrahe (*Corvus corax*), das Alpenschneehuhn (*Lagopus muta*), die Schneeeule (*Bubo scandiaca*) und der Polarbirkenzeisig (*Acanthis hornemanni*). Aus der Gruppe der Seevögel verbringen unter anderem die Gryllteiste (*Cepphus grylle*), die Dick-schnabellumme (*Uria lomvia*), die Elfenbeinmöwe (*Pagophila eburnea*), die Rosenmöwe (*Rhodostethia rosea*) sowie die Eiderente (*Somateria mollissima*) den Winter im hohen Norden.

Saisonale Wanderungen unternehmen aber auch Säugetiere – so zum Beispiel Bartenwale oder Rentiere (*Rangifer tarandus*), die in Nordamerika Karibus genannt werden. Im östlichen Alaska sowie im kanadischen Yukon-Territorium beispielsweise zieht in jedem Frühling eine Herde der sogenannten Porcupine-Karibus mit 100 000 bis 200 000 Tieren mehr als 1300 Kilometer weit Richtung Norden, um im Küstentiefland des Arctic National Wildlife Refuge ihre Kälber auf die Welt zu bringen. Der Kindergarten am Arktischen Ozean bietet den wilden Tieren im Sommer viele Vorteile. Zum einen ist

die Landschaft flach und nicht bewaldet. Die Rentiere erkennen deshalb mögliche Feinde wie Bären oder Wölfe schon von Weitem. Die frische Meeresbrise verjagt die lästigen Stechmücken, und es gibt Wasser und Futter in Hülle und Fülle. Zum Ende des Sommers treten die Rentiere dann den Rückweg in ihre Winterterritorien in den weiter südlich gelegenen Ogilvie Mountains an. Andere Herden ziehen noch weiter nach Süden und überwintern in den subarktischen Waldgebieten der Taiga. Einige wenige aber verbringen den Winter auch in der Tundra.

Regulation der Körpertemperatur

Diese Rentiere stehen dann wie alle anderen gleichwarmen Tiere in den Polarregionen vor der Herausforderung, ihre Körpertemperatur von 37 bis 41 Grad Celsius aufrechtzuerhalten, obwohl die Luft um sie herum um bis zu 100 Grad Celsius kälter ist. Das gelingt nur, indem die Tiere verhindern, dass Körperwärme an die Umgebung abgegeben wird. Eine schwierige Aufgabe, denn Körperwärme kann auf dreierlei Weise verloren gehen:

- durch Wärmeleitung,
- durch Wärmeabstrahlung sowie
- durch Verdunstung.

Die Tiere müssen alle drei Prozesse kontrollieren, wenn sie nicht auskühlen wollen. Aus diesem Grund haben die gleichwarmen Arten eine Reihe von erstaunlichen Verhaltensweisen entwickelt, mit denen sich Wärmeverluste eindämmen lassen. Dazu zählen unter anderem:

- sich einzuigeln (Reduktion der Körperoberfläche im Verhältnis zum Gesamtvolumen),
- sich in einer Gruppe gegenseitig zu wärmen,
- sich an einen geschützten Ort zurückzuziehen,
- eine wärmende Fettschicht oder aber ein doppeltes Winterfell oder -gefieder auszubilden sowie
- den Atem und die Gliedmaßen abzukühlen.

Sich einzuigeln heißt, sich so klein wie möglich zu machen. Viele Arten, angefangen vom Eisbären bis hin zum Polarbirkenzeisig, rollen sich im Winter zu einer

Gleich- oder wechselwarm

Vögel und Säugetiere haben ein Alleinstellungsmerkmal in der Tierwelt. Sie können als einzige Lebewesen ihre Körpertemperatur unabhängig von der Umgebungstemperatur auf einen konstanten Wert regulieren und werden deshalb auch als gleichwarme oder endotherme Organismen bezeichnet. Als Körperkern gelten jene Bereiche des Rumpfes und Kopfes, in dem alle lebenswichtigen inneren Organe (Eingeweide, Zentralnervensystem, Gehirn) liegen, die auch dann Wärme produzieren, wenn der Organismus ruht. Die Körpertemperatur ist in der Regel ziemlich konstant, während die Temperatur der Körperschale, zu der die Haut und die Extremitäten gehören, stärker schwankt.

Die Körpertemperatur des Menschen beträgt 37 Grad Celsius. Igel kommen auf 35 Grad Celsius, Schwalben auf 44 Grad Celsius. Bei Fleischfressern, Pferden und dem Menschen schwankt die Körpertemperatur im Tagesverlauf aktivitätsbedingt um ein bis zwei Grad Celsius. Lebensbedrohlich wird für die meisten gleichwarmen Organismen ein Anstieg von mehr als sechs Grad Celsius. Er führt in der Regel zum Hitzetod. Der Kältetod dagegen tritt ein, wenn ein Organismus auskühlt und seine Körpertemperatur unter eine artspezifische Grenze fällt. Menschen beispielsweise geraten in Lebensgefahr, wenn die Temperatur ihres Blutes auf unter 27 Grad Celsius sinkt.

Fischen, Amphibien oder auch Reptilien macht eine leichte Abkühlung wenig aus. Sie gehören zu den sogenannten wechselwarmen oder auch ektothermen Lebewesen. Als solche werden alle Organismen bezeichnet, deren Körpertemperatur vollständig von der Umgebungstemperatur abhängt und in der Regel nicht durch den Stoffwechsel der Tiere beeinflusst wird. Um dennoch Einfluss auf die eigene Körpertemperatur nehmen zu können, haben wechselwarme Tiere typische Verhaltensweisen entwickelt. Salamander beispielsweise nehmen morgens ein Bad in der Sonne, um auf „Betriebstemperatur“ zu kommen; viele Fluginsekten dagegen zittern mit ihrem Flugmuskel, um sich aufzuwärmen.



4.6 > Eisbären können sehr gut schwimmen und, wie dieses große Männchen zeigt, auch tauchen. Im Wasser kühlen die Tiere jedoch schnell aus. Ausgewachsene Bären mit einer dicken, isolierenden Fettschicht haben daher auf langen Schwimmstrecken bessere Überlebenschancen als Jungbären.

Kugel zusammen oder ziehen Kopf und Gliedmaßen ein, um ihre Körperoberfläche zu minimieren. Je kugelförmiger der Körper, desto kleiner ist seine Oberfläche im Verhältnis zum Volumen und desto weniger Wärme geben die Tiere durch Wärmeleitung und -abstrahlung ab. Eisbären verschränken dabei oft ihre Pfoten über der Schnauze, weil sie über ihre Nase und die eher dünn behaarte Gesichtspartie die meiste Körperwärme verlieren.

Tiere, die in Gruppen, Herden oder Kolonien leben, stehen oft dicht beisammen, um sich gegenseitig zu wärmen und so den eigenen Wärmeverlust zu minimieren. Das bekannteste Beispiel sind die kreisförmigen sogenannten „Huddles“, wie die Wärmepulke der Kaiserpinguine in der Antarktis genannt werden. Im Winter, wenn die Außenluft bis zu minus 50 Grad Celsius kalt wird und die Männchen brütend auf dem Eis ausharren müssen, rücken die Tiere zu Tausenden so eng zusammen, dass sich bis zu zehn Pinguine auf einem Quadratmeter Fläche drängen – Rücken an Bauch, Seite an Seite, den Kopf auf der Schulter des Vordermannes abgelegt. In der Mitte dieses gigantischen Brutkastens wiederum erwärmt sich die Luft auf

bis zu 24 Grad Celsius, weshalb es den Vögeln im Zentrum sogar zu warm wird. Sie versuchen aus diesem Grund Schritt für Schritt der Wärme zu entkommen. Die Vögel am Rand frieren derweil und drängen schrittweise in die Mitte. So kommt es, dass die Pinguine kontinuierlich ihre Position verändern, der Pulk ständig in Bewegung ist und jedes Tier irgendwann in den Genuss der Wärme kommt. Auf diese Weise gelingt es den großen Vögeln, selbst bei stärksten Winterstürmen ihren Wärmeverlust um die Hälfte zu reduzieren. Ein ähnliches Verhalten zeigen auch die Moschusochsen in der Arktis. An kalten Tagen bilden die Herdenmitglieder einen engen Kreis, sodass sich die Tiere gegenseitig wärmen und ihnen der eisige Wind im Verbund wenig anhaben kann.

Eine dritte Strategie, Wärmeverluste zu vermeiden, ist der Rückzug an einen geschützten Ort. Dieser kann eine Höhle sein – oder aber die Tiere kauern sich zusammen und lassen sich einschneien. Von Eisbären, Wölfen, Füchsen, Hasen und Schneehühnern weiß man, dass sie im Winter zumindest für einige Zeit Schutz in Schneehöhlen suchen. Kleinere Arktisbewohner wie Lemminge und

Hermeline müssen aufgrund ihrer Körpergröße und den damit verbundenen Wärmeverlusten sogar die meiste Zeit des Winters unter der isolierenden Schneedecke verbringen. Die Temperatur dort kann abhängig von der Schneehöhe bis zu null Grad Celsius betragen und ermöglicht den Kleintieren so ein Überleben.

Vögel und Säugetiere, die in den Polarregionen überwintern, schützen sich aber auch durch ein dichtes Winterfell oder -gefieder vor der Eiseskälte. Bei Säugetieren und Vögeln, die zur Nahrungssuche ins Wasser müssen oder aber wie Wale ihr gesamtes Leben im Meer verbringen, erfüllt in der Regel eine dicke Fettschicht diese Isolationsfunktion. Wie gut Federn oder Fell die Wärmeabgabe verhindern, hängt zum einen von der individuellen Wärmeleitfähigkeit eines jeden Haares oder einer jeden Feder ab, zum anderen von der Frage, wie gut das Fell oder Federkleid ein isolierendes Luftpolster nahe am Körper halten kann. Denn Luft leitet Wärme nur halb so gut wie Haare oder Federn. Vermutlich auch aus diesem Grund sind die Deckhaare der Rentiere hohl und ihr Innenraum aufgeteilt in Tausende kleine Luftkammern, die jeweils nur durch eine dünne Wand voneinander getrennt sind. Auf diese Weise schützt das Deckhaar die Tiere nicht nur vor äußeren Einflüssen wie Schnee und Regen. Es bildet neben der Unterwolle auch eine zweite sehr wirkungsvolle Isolierschicht.

Die isolierenden Eigenschaften des Fells unterscheiden sich deutlich von Tierart zu Tierart, wobei die Wärmehaltefähigkeit in der Regel steigt, je dicker die Fellschicht ist. Durch ein Aufplustern des Gefieders oder aber durch das Aufstellen von Haaren kann die isolierende Wirkung des Fells oder Federkleids nochmals verstärkt werden, weil mehr isolierende Luft in Körpernähe eingeschlossen wird. Kleine Felltiere wie Lemminge oder Hermeline sind klar benachteiligt, wenn es darum geht, sich durch Körperbehaarung ausreichend zu wärmen. Sie brauchen ein kurzes Fell, um sich noch ausreichend gut bewegen zu können.

Doch auch die großen, eher dick bepelzten Säugetiere müssen eine Reihe von Faktoren beachten, wenn sie nicht an Unterkühlung sterben wollen. Das lange Fell der Eisbären zum Beispiel isoliert hervorragend, solange es trocken ist. Springt der Bär jedoch ins Meer, um beispielsweise von einer Eisscholle zur nächsten zu schwimmen,

gelangt Wasser an die Haut – und Flüssigkeit leitet Wärme 25-mal besser als Luft. Ausgewachsene Bären vertrauen in solchen Momenten auf die Isolationseigenschaften ihrer bis zu 11,4 Zentimeter dicken Fettschicht. Für den Bärennachwuchs aber kann eine solche Schwimmfähigkeit sehr gefährlich werden, denn die Jungen kühlen äußerst schnell aus. Die gleiche Gefahr besteht auch, wenn es regnet, denn Regen und Schneeregen beeinträchtigen die Funktionseigenschaften eines Fells oder Federkleids ganz entscheidend.

Zu hohen Wärmeverlusten kann auch eisiger Wind führen. Fährt er durch ein Fell oder Federkleid, verwirbelt er die körpernahe Luftschicht, wodurch ihre isolierende Wirkung abnimmt. So kühlen Schneeeulen, die bei einer Außentemperatur von minus 30 Grad Celsius einem Wind mit einer Stärke von 27 Kilometern pro Stunde ausgesetzt sind, so schnell aus, dass sie ihre Wärmeproduktion im Vergleich zur Windstille verdoppeln müssen, um nicht zu erfrieren. Das Fell und die Unterwolle von Rentieren und Moschusochsen dagegen isolieren so umfassend, dass die Tiere selbst bei Winterstürmen wenig bis keine Wärme verlieren.

Wale, Eisbären und Robben schützen sich mit einer dicken Fettschicht gegen die Kälte. Ihre Isolationseigenschaften reichen zwar nicht an jene des Fells heran; dafür wärmt der sogenannte Blubber aber auch im Wasser, wo Fell als Kälteschutz in der Regel versagt. Diese Fettschicht kann eine beeindruckende Stärke erreichen. Bei Grönlandwalen (*Balaena mysticetus*) ist sie bis zu 30 Zentimeter dick. Und wie das Fell von Rentieren und Moschusochsen verändert sich auch der Blubber im Rhythmus der Jahreszeiten – zumindest bei den Robben. Am dünnsten ist deren Fettschicht im Sommer, wenn die Tiere wegen ihres Fellwechsels gezwungen sind, an Land zu bleiben und zu fasten. Zum Winter hin fressen sich die Tiere dann wieder eine dicke isolierende Schicht an.

Pinguine wie die Adélie- und die Kaiserpinguine schützen sich durch ein außergewöhnlich gut isolierendes Federkleid vor der großen Kälte. Bei Tauchgängen im Meer allerdings werden ihre Federn komprimiert und die eingeschlossene Luft herausgedrückt, sodass das Federkleid seine isolierende Wirkung verliert. Ihre Fettschicht schützt die Vögel dann in einem gewissen Maß vor der Auskühlung.

Die Königin der Tundra

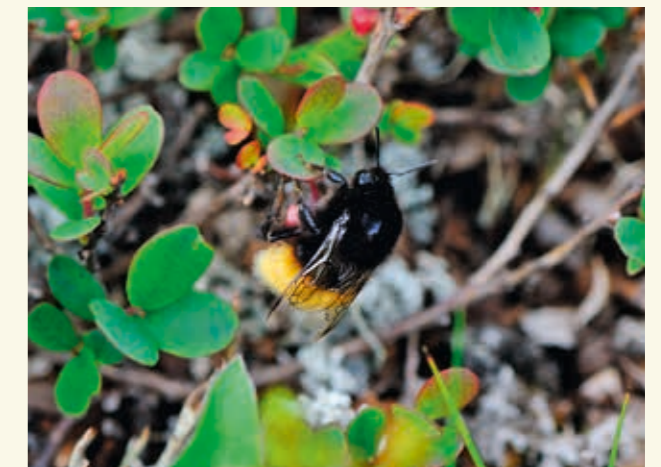
Eines der ersten Insekten, die im Frühling durch die Tundra fliegen, ist die Arktische Hummel *Bombus polaris*. Im Gegensatz zu den meisten anderen Insekten macht ihr die kalte Frühlingsluft nicht viel aus, denn die Hummel hat Wege gefunden, sich warm zu halten, auch wenn sie als Insekt zu den wechselwarmen Organismen gehört. An sonnigen Tagen beispielsweise sitzen die Königin und ihre Arbeiterinnen zunächst für einige Zeit in der Sonne, um ihren Körper aufzuwärmen. Am schnellsten gelingt das, wenn die Tiere zum Sonnenbad in eine Blüte des Arktischen Mohns (*Papaver radicum*) krabbeln. Dessen Blütenblätter sind kegelförmig angeordnet und lenken das Sonnenlicht wie kleine Spiegel in die Blütenmitte.

Sollten Wolken die Sonne verdecken, schalten die Hummeln ihre körpereigene Heizung an. Das bedeutet, sie beginnen mit ihrem starken Flugmuskel zu zittern und erhöhen auf diese Weise ihre Körpertemperatur auf eine Mindestflugtemperatur von 30 Grad Celsius, selbst wenn die Umgebung deutlich kälter ist. Das dicke Haarkleid der Hummeln verhindert anschließend, dass die Tiere schnell wieder auskühlen.

Dank der Fähigkeit, ihre Körpertemperatur zu regulieren, kann die Arktische Hummel schon im Frühlingsmonat Mai auf Futtersuche gehen – also in einer Zeit, zu der die meisten anderen Insekten der Arktis noch vor Kälte erstarrt sind. Und die Hummel hat es eilig: Die Königin, welche als einziges Mitglied ihres Volkes den Winter überlebt hat, muss zunächst Pollen und Nektar sammeln, um zu Kräften zu kommen. Anschließend baut sie ein Nest in eine Erdhöhle und legt mit ihrer ersten Brut, aus der nur Arbeiterinnen schlüpfen, den Grundstein für ein neues Volk. Im Spätsommer legt sie ein zweites Mal Eier ab. Diesmal schlüpfen Drohnen (Männchen) und Hunderte Königinnen, von denen im Durchschnitt aber

nur eine pro Volk den bevorstehenden Winter überstehen wird. Die alte Königin stirbt gemeinsam mit dem Rest ihres Volkes.

Bombus polaris kommt in den nördlichen Tundragebieten Alaskas, Kanadas, Skandinaviens und Russlands vor und gilt als einer der wichtigsten Bestäuber in diesen Regionen. Außer ihr überlebt so weit nördlich des Polarkreises nur noch eine weitere Hummelart, die *Bombus hyperboreus*. Deren Königinnen entern gern die Nester der Arktischen Hummel und übernehmen diese. Sie legen ihre Eier darin ab und lassen die Arbeiterinnen der *Bombus polaris* die Kuckucksbrut pflegen.

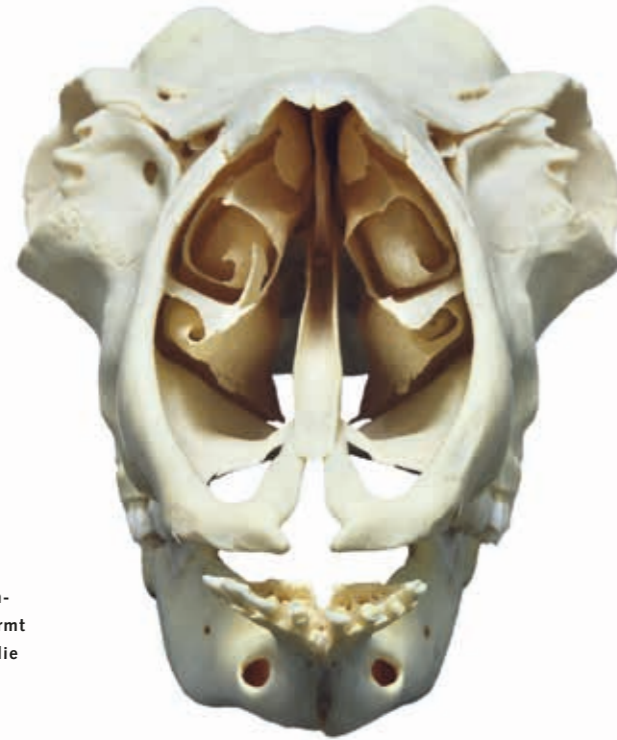


4.7 > Die Arktische Hummel *Bombus polaris* fliegt auch bei kühlen Temperaturen. Die dazu notwendige Körperwärme erzeugt das Insekt, indem es sich sonnt oder aber mit dem Flugmuskel zittert.

Körpereigene Schutzmechanismen gegen Wärmeverluste

Wärmeverluste durch Wärmeleitung lassen sich auch verhindern, indem Tiere ihre äußeren Körperpartien oder aber ihre Gliedmaßen herunterkühlen, während sie die Temperatur in der Körpermitte konstant halten. Ein solches Verhalten zeigen zum Beispiel Rentiere, Kaiserpinguine und Möwen. Sie können die Temperatur in ihren Füßen unter Umständen bis dicht an den Gefrierpunkt herunterkühlen, während ihre Körperkerntemperatur auf Normalniveau bleibt.

Ein solches Auskühlen der oftmals nur schlecht isolierten Gliedmaßen wird möglich, weil die Blutgefäße in den Beinen, Flügeln oder Flossen so dicht nebeneinander verlaufen, dass ein Wärmeaustausch zwischen Arterien und Venen erfolgen kann. Warmes, aus der Körpermitte stammendes arterielles Blut gibt dabei seine Wärme an venöses Blut ab, welches zuvor in den Füßen oder Flossen ausgekühlt war und auf dem Rückweg Richtung Körpermitte ist. Auf diese Weise gelangt nur im Vorweg abgekühltes Blut in die Gliedmaßen, und der Wärmeverlust über die Füße, Flossen oder Flügel wird hierdurch stark reduziert.



4.8 > Wenn ein Rentier einatmet, erwärmt und befeuchtet es die einströmende kalte Atemluft mithilfe stark durchbluteter Schleimhäute in seiner Nase. Diese Häute werden durch dünne, geschwungene Knochenstrukturen gehalten, die auf dieser Schädelaufnahme gut zu erkennen sind.

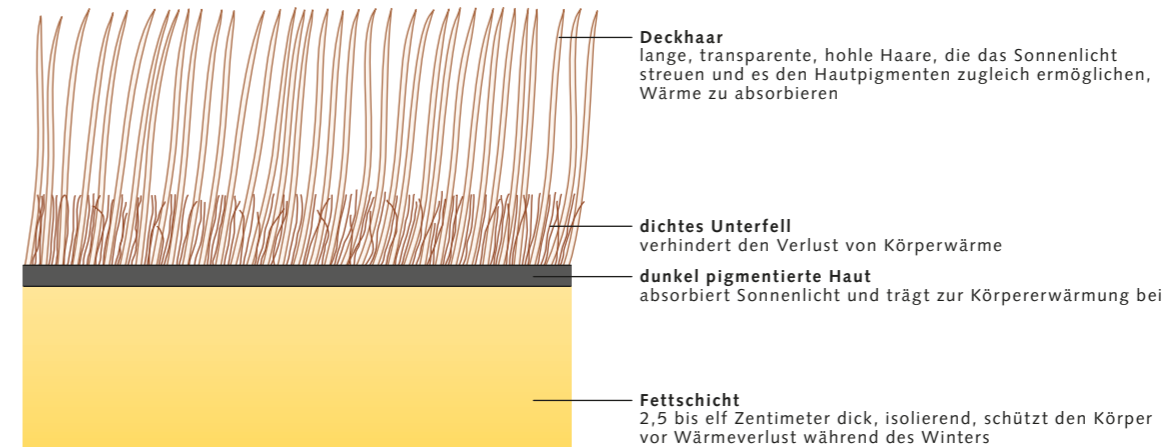
Haben Rentiere so lange Beine, dass der Wärmeaustausch allein schon dadurch funktioniert, dass Vene und Arterie eng nebeneinander angeordnet sind, sieht das bei den kurzen Flossen der Robben etwas anders aus. Hier wird der Wärmeaustausch verstärkt, indem sich die Vene in mehrere Blutbahnen aufteilt, die dann rund um die zentral liegende Arterie verlaufen und deren Wärme aufnehmen. Außerdem können die Tiere den Blutstrom und damit auch die Wärmeversorgung ihrer Gliedmaßen steuern – je nachdem, ob sie die Wärmeabgabe reduzieren wollen, weil es draußen kalt ist, oder sie sich ganz bewusst schnell abkühlen wollen, etwa nach großer Anstrengung und bei Gefahr von Überhitzung.

Erstaunlicherweise haben die Tiere auch dann noch ein Gefühl in ihren Flügeln, Flossen oder Pfoten, wenn diese stark ausgekühlt sind. So funktioniert beispielsweise die Impulsweiterleitung in den Nervenbahnen und Muskeln der Fußballen von Polarwölfen und -füchsen auch dann noch, wenn die Tiere auf bis zu minus 50 Grad kaltem Untergrund stehen und ihre Pfoten auf null Grad Celsius abgekühlt sind. Studien haben gezeigt, dass die Muskeln und Nerven in wenig isolierten Extremitäten

auch dann noch ihre Aufgaben verrichten, wenn das Gewebe eine Tiefsttemperatur von minus sechs Grad Celsius aufweist – ein Anpassungsmechanismus, der bei Säugetieren und Vögeln in den hohen und mittleren Breiten sehr verbreitet scheint.

Ebenso ausgefeilt ist das System, mit dem die Tiere verhindern, dass sie beim Atmen unnötig Wärme und Wasserdampf an die Umgebung abgeben. Atmet ein Mensch bei einer Umgebungstemperatur von minus 30 Grad Celsius aus, erkennt man seine etwa 32 Grad Celsius warme und feuchte Atemluft, weil sie als helle Dampf Wolke die Nase verlässt. Bei Rentieren hingegen bildet sich keine Dampf Wolke. Die Luft, welche die Tiere ausatmen, ist trocken und auf 21 Grad Celsius heruntergekühlt, sodass die Wasser- und Wärmeverluste auf ein Minimum reduziert werden. Das Geheimnis dieser Energieeinsparungen ist abermals ein effektiver Wärmeaustausch. Dieser erfolgt diesmal jedoch in der Nase. Im Gegensatz zum Menschen verlaufen in der Nasenhöhle eines Rentiers eine Vielzahl verschlungener, stark durchbluteter Schleimhäute und Membranen. Diese Nasenstruktur birgt zwei große Vorteile. Zum einen vergrößert sie die Oberfläche der Schleimhaut, an der die ein- oder ausgeatmete Luft vorbeistreift. Das heißt, das Rentier hat ausreichend Gelegenheit, Wärme und Wasser an die Atemluft abzugeben oder diese aufzunehmen. Zum anderen wird die Atemluft durch den komplexen Aufbau der Nase in viele dünne Luftschichten aufgeteilt, sodass der Wärmeaustausch nochmals optimiert wird.

Holt ein Rentier nun tief Luft, strömt die eiskalte Polarluft über die gut durchbluteten Nasenschleimhäute. Dabei wird sie in weniger als einer Sekunde auf die Körpertemperatur des Tieres erwärmt und angefeuchtet. Das heißt, die Luft, welche die Lungen erreicht, ist 38 Grad Celsius warm und ausreichend feucht, um eine optimale Sauerstoffaufnahme zu ermöglichen. Durch die Wärmeabgabe an die eingeatmete Luft kühlen die Schleimhäute für einen Moment lang aus. Atmet das Tier nun wieder aus, strömt die warme Atemluft über die ausgekühlten Nasenschleimhäute und gibt einen Teil seiner Wärme wieder an sie ab. Dabei kühlt die Atemluft auf 21 Grad Celsius ab, und der in ihr enthaltene Wasserdampf kondensiert zu großen Teilen. Auf diese Weise atmen die Rentiere nur kühle, trockene Luft aus und sparen jede Menge Körperwärme und



4.9 > Eine dicke Fettschicht und wärmende Unterwolle schützen Eisbären davor, Körperwärme an die Umgebung zu verlieren. Das transparente Deckhaar lässt zudem Sonnenstrahlung durch, sodass sich die Bären bei schönem Wetter in der Sonne aufwärmen können.

Feuchtigkeit. Letztere kann vor allem dann entscheidend werden, wenn im Winter alle Tümpel, Flüsse und Seen zugefroren sind und die Tiere Schnee fressen müssen, um Wasser aufzunehmen.

Trotz eines dicken Winterfells und ausgeklügelter Wärme-Einsparmechanismen kann es vorkommen, dass die Tiere auskühlen und die Körpertemperatur gefährlich tief sinkt. In diesem Moment steigern die meisten Tiere ihren Stoffwechsel und beginnen zu zittern, um durch die Muskelkontraktionen Wärme zu erzeugen. Wind und Feuchtigkeit beschleunigen in der Regel das Auskühlen, Sonnenschein dagegen kann den Tieren helfen, ihre Körpertemperatur zu halten. Sattelrobben beispielsweise sonnen sich, wenn ihnen kalt ist. Dieselbe Strategie verfolgen auch Eisbären. Ihr langes, transparentes Deckhaar lässt beim Sonnenbaden die einfallende Sonnenstrahlung besonders gut passieren, sodass die darunterliegende schwarze Haut der Bären sie optimal absorbieren kann.

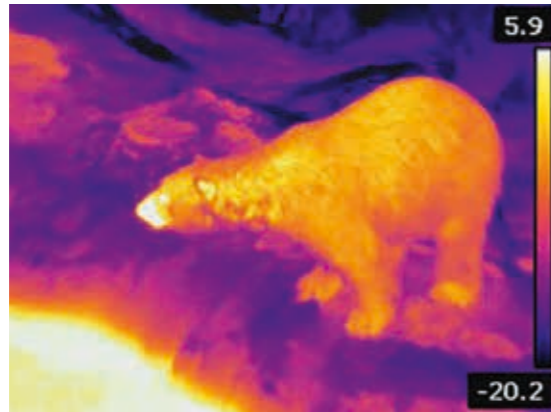
Das Deckhaar der Eisbären weist allerdings noch eine zweite Besonderheit auf. Es absorbiert die langwellige Wärmestrahlung, welche von den Tieren ausgeht. Vereinfacht gesagt nimmt es also einen Großteil jener Wärme wieder auf, welche die Bären trotz ihrer dicken Unterwolle noch abgeben. Das führt dazu, dass die Tiere nur sehr wenig Wärmeenergie über ihre Körperoberfläche verlieren. Aus dieser Stärke kann jedoch auch ein Nachteil erwachsen, etwa wenn die Bären sich schnell bewegen. Dann laufen sie Gefahr, im Nu zu überhitzen. Aus diesem Grund bewegen sich Eisbären die meiste Zeit in einem eher gemächlichen Tempo fort – und sollte ihnen doch

einmal viel zu heiß werden, kühlen sich die größten Landräuber der Arktis mit einem Sprung ins Wasser ab.

Auf diese Option können Rentiere in der Regel nicht zurückgreifen, obwohl die Tiere vor allem im Winter während großer Anstrengung häufig überhitzen. In solchen Momenten kühlen die Vierbeiner die wichtigsten Areale ihres Gehirns, indem sie kaltes Blut aus ihren Nasenschleimhäuten über eine Vene Richtung Gehirn leiten. Kurz vor dem Hirn erfolgt ein Wärmeaustausch mit dem Blut in der Kopfschlagader. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass nur Blut mit Normaltemperatur im Gehirn zirkuliert, während die überschüssige Wärme so lange im restlichen Körper verteilt wird, bis die Belastung vorbei ist und sie wieder über die Nasenschleimhäute abgegeben werden kann.

Die Wärmeregulation bei Jungtieren

Tierischer Nachwuchs kommt in den Polarregionen zu ganz unterschiedlichen Zeiten und unter verschiedenen Bedingungen auf die Welt. Dennoch haben alle Jungtiere eines gemeinsam: Ihr Verhältnis von Körperoberfläche zu Körpermasse ist deutlich schlechter als jenes der Elterntiere – das heißt, die Jungtiere verlieren im Verhältnis mehr Wärme. Meist besitzen sie auch kein Fell oder Federkleid, und wenn doch, dann eines, das deutlich schlechter isoliert als Pelz oder Federn der Alttiere. Problematisch ist diese Ausgangslage vor allem dann, wenn die jungen Vögel oder Säugetiere gewissermaßen nass das Licht der Welt erblicken.



4.10 > Die meiste Körperwärme verlieren Eisbären über ihre nur spärlich behaarte Nase, wie diese Infrarotaufnahme deutlich zeigt.

Damit ihr Nachwuchs dennoch eine Überlebenschance hat, haben die polaren Vögel und Säugetiere spezielle Verhaltensweisen entwickelt. Arten, deren Jungtiere sogenannte Nesthocker sind und am Anfang noch viel elterliche Fürsorge benötigen, so wie das zum Beispiel bei Eisbären und Lemmings der Fall ist, bringen ihren Nachwuchs in der Regel an einem geschützten Ort zur Welt – etwa in einer Schneehöhle, in einem Bau oder aber auch in einem Nest. Während eine Eisbärin in den ersten drei Monaten nach der Geburt ihrer Jungen zwangsläufig fastet, weil sie die Kleinen nicht aus den Augen lässt, muss sich das Lemmingweibchen sehr wohl zwischendurch auf Futtersuche begeben. Seine Welpen bleiben derweil allein im Bau zurück. Die Körpertemperatur der kleinen Lemminge fällt in dieser Zeit auf weit unter 20 Grad Celsius, was den Nachwuchs aber nicht umbringt. Die Tiere sind in ihren ersten Lebenstagen erstaunlich kälteunempfindlich. Je älter die Welpen dann werden, desto besser können sie ihre Körpertemperatur selbst regulieren – sei es durch muskuläre Wärmeerzeugung (Zittern), durch ein dichteres Fell oder aber durch das Verbrennen von Fettsäuren im braunen Fettgewebe, ein Vorgang, der in der Fachliteratur oft auch als zitterfreie Wärmeerzeugung oder biochemische Thermogenese bezeichnet wird.

Braunes Fettgewebe findet sich bei nahezu allen neugeborenen Säugetieren. Seine Zellen sind deutlich kleiner als jene des weißen, isolierenden Fettgewebes. Sie enthalten viele kleine Lipidtropfen und eine besonders große

Zahl von Mitochondrien, den Kraftwerken der Zellen. In ihnen wird durch den Abbau von Lipiden unter anderem Wärme erzeugt, die dem Nachwuchs so mancher polarer Säugetierart ein Überleben ermöglicht.

Frisch geschlüpfte Jungvögel dagegen sind darauf angewiesen, dass die Elterntiere sie wärmen. Antarktische Sturmvögel beispielsweise brüten bei einer Durchschnittstemperatur von minus 25 Grad Celsius auf nacktem Felsen. Sind ihre Küken erst einmal geschlüpft, muss der Nachwuchs mindestens elf Tage lang von den Altvögeln mit Wärme versorgt werden. Die Jungen der Kaiserpinguine verstecken sich bis zu 50 Tage lang zunächst in der Bauchfalte des Männchens, nach der Rückkehr des Weibchens dann in der Bauchfalte des Weibchens, welches das Küken dann das erste Mal mit Futter aus dem Meer versorgt.

Die Kälber der Rentiere sowie die Küken der Schneehühner müssen vom ersten Lebenstag an auf eigenen Beinen stehen, denn sie sind sogenannte Nestflüchter. Im Gegensatz zu den Pinguinjungen werden sie deshalb schon mit einem eigenen Kälteschutz geboren. Die jungen Schneehühner etwa tragen von Anfang an ein wärmendes Federkleid, sind stark genug, schon am ersten Tag lange Strecken zu laufen, und können ihre Körpertemperatur durch Zitterbewegungen ihres Brustmuskels aufrechterhalten. Nichtsdestotrotz suchen auch die kleinen Schneehühner die wärmende Nähe ihrer Mutter, wenn ihre Körpertemperatur auf unter 35 Grad Celsius absinkt. Junge Rentiere und Moschusochsen frieren vor allem, wenn es windet, regnet oder Schneeregen fällt. In solchen Momenten verliert ihr Fell deutlich schneller seine wärmenden Eigenschaften als das Fell der Elterntiere. Der Nachwuchs hält sich dann in erster Linie durch die Verbrennung von Lipiden im braunen Fettgewebe warm. Das Wasser meiden müssen auch die meisten Robbenjungen in den Polargebieten. Sie werden mit einem wolligen, meist weißen Lanugofell geboren, welches allerdings auch nur wärmt, solange es trocken bleibt.

Körperwärme zu erzeugen, kostet Energie, welche der Nachwuchs der Säugetiere über die Muttermilch aufnimmt. Sie ist bei Arten, die in den Polarregionen beheimatet sind, besonders fettreich. Bei Walen, Robben und anderen marinen Säugern liegt der Fettgehalt der Milch zwischen 40 und 50 Prozent; bei landbewohnenden

Arten sind es zehn bis 20 Prozent. (Nur zum Vergleich: Normale Kuhmilch hat einen Fettanteil von rund vier Prozent.) Die Jungen werden je nach Art unterschiedlich lang gesäugt. Während beispielsweise die Klappmützenrobben ihren Nachwuchs nur zwei bis vier Tage lang säugen, versorgen Walrosse ihr Junges länger als ein Jahr lang mit Milch.

Wenn die Nahrung knapp wird

Die Tiere in den Polarregionen müssen nicht nur mit extremen Luft- und Wassertemperaturen zurechtkommen. Sie stehen außerdem vor der Herausforderung, dass sie immer nur zu bestimmten Zeiten des Jahres ausreichend Nahrung finden. Ein Problem, welches die Tiere auf ganz unterschiedliche Weise lösen. Moschusochsen beispielsweise können ihren Stoffwechsel um 30 Prozent herunterfahren. Ähnliche Beobachtungen gibt es vom Polarfuchs, vom Schneehasen und den Schneehühnern. Um Energie zu sparen, schränken die Tiere auch ihren Bewegungsradius ein. Rentiere auf Spitzbergen beispielsweise verbringen im Winter bis zu 80 Prozent des Tages liegend oder stehend, weil jede Anstrengung, jeder zusätzliche Schritt auf dem verschneiten Terrain ihren Preis hat. Beginnen die Tiere zu traben, vervierfacht sich ihr Energieverbrauch – selbst wenn die Herde nur in einem moderaten Tempo von sieben Stundenkilometern unterwegs ist.

Um auf Nummer sicher zu gehen, fressen sich die meisten Tiere deshalb in Zeiten des Überflusses dicke Fettreserven an. Die Schneehühner auf Spitzbergen beginnen bereits im August alles zu fressen, was ihnen vor den Schnabel kommt. Bis November nehmen die Vögel derart zu, dass ihre Fettschicht 30 Prozent ihres Körpergewichts ausmacht. So groß müssen die Reserven allerdings auch sein, denn die Vögel zehren von ihnen, wann immer die Winterwitterung eine weitere Futtersuche unmöglich macht, etwa bei starken Stürmen. Bis Februar haben die Tiere ihren Fettvorrat in der Regel aufgebraucht. Bei Rentieren und Moschusochsen entscheidet die Menge der Fettreserven auch darüber, ob eine Kuh fruchtbar wird und Nachwuchs bekommen kann.

Der Arktische Ziesel (*Urocitellus parryi*) gehört zu den wenigen polaren Arten, die den Winter verschlafen. Die Körpertemperatur der Erdhörnchen sinkt dabei auf bis

zu minus drei Grad Celsius ab, ohne dass ihr Blut gefriert oder Organe und Gewebe durch Eiskristalle beschädigt werden. Um ein Erfrieren zu vermeiden, wachen die Tiere alle drei Wochen aus ihrer Winterstarre auf und beginnen, ein bis zwei Tage lang zu zittern. Ihre Körpertemperatur steigt dann wieder auf 34 bis 36 Grad Celsius. Dabei verbrennen die Vierbeiner jede Menge Fett, welches sie sich zuvor im kurzen Sommer angefrisst haben. Anschließend fallen die Ziesel zurück in die Winterstarre.

Bei den Eisbären überwintern nur die tragenden Weibchen in einer Schneehöhle, wo sie auch ihren Nachwuchs auf die Welt bringen. Die Jungbären und ausgewachsenen Männchen dagegen sind den Winter über mehr oder weniger aktiv – gilt es doch, sich eine fette Speckschicht anzufressen, solange das Meereis ihnen den Zutritt zu den Revieren der Robben gestattet.

Da Robben einmal im Jahr ihr Fell wechseln, steht auch ihnen eine regelmäßige Fastenzeit bevor. In dieser Zeit gehen die Tiere nicht auf Futtersuche, weshalb sich auch ihr Stoffwechsel um die Hälfte reduziert. Körperwärme und Bewegungsenergie gewinnen sie nur durch das Verbrennen von Fettreserven. Polarfüchse und Hermeline dagegen verlassen sich nicht nur allein auf ihre angefrissene Fettschicht. Sie legen sich außerdem Nahrungsvorräte an – eine Aufgabe, die sie von September bis Novem-

4.11 > Ein Arktischer Ziesel hat sich in seinem Bau auf einem Bett aus Moos zusammengerollt und verschläft den Winter, der sieben bis neun Monate andauern kann. Aktiv sind die Tiere nur im kurzen arktischen Sommer.



ber umtreibt. Manche Tiere verstecken ihre zusätzlich erlegte Beute an vielen verschiedenen Stellen; andere horten alles an einem Ort. Das größte bislang bekannte Vorratslager eines Polarfuchses enthielt 136 Seevögel, die der Jäger anscheinend an einer Brutkolonie erbeutet hatte. Von Hermelinen wird berichtet, dass einzelne Tiere bis zu 150 Lemminge erlegt und in Winterverstecken gesammelt haben.

Anpassungen an die Lichtverhältnisse

Ein Alleinstellungsmerkmal der Polarregionen ist der Wechsel zwischen lang anhaltendem Tageslicht im Sommer (Polartag) und lang anhaltender Dunkelheit im Winter (Polarnacht). In der Zeit dazwischen verändern sich die Lichtverhältnisse so schnell, dass an Orten wie Spitzbergen oder im nördlichen Grönland die Tageslänge pro Tag um 30 Minuten zu- beziehungsweise abnimmt. Für die Tiere bedeuten diese Veränderungen, dass sie stetig ihr Verhalten anpassen müssen. Die verfügbare Menge Licht bestimmt nicht nur den Tagesrhythmus der Tiere, sondern auch ihren Jahreskalender und damit den Zeitpunkt wichtiger Ereignisse wie Paarung, Winterschlaf oder aber Fellwechsel. Diese Aussage gilt für die Lebewesen im Süd- und Nordpolargebiet ebenso wie für die Tiere in der restlichen Welt.

Gesteuert wird die innere Uhr der Tiere über biochemische Prozesse, die damit beginnen, dass Informationen über die Lichtverhältnisse von speziellen, lichtempfindlichen Nervenzellen in der Netzhaut der Augen aufgenommen werden. Über Nervenbahnen werden die Signale dann zunächst an den suprachiasmatischen Kern und im Anschluss an die Zirbeldrüse weitergeleitet. Ersterer ist ein Kerngebiet im Gehirn. Er liegt im Hypothalamus und kontrolliert als „innere Uhr“ die Lebensrhythmen der Säugetiere. Die Zirbeldrüse dagegen befindet sich auf der Rückseite des Mittelhirns. Sie produziert nur bei Dunkelheit das Hormon Melatonin, welches anschließend im Blut und in der Gehirn-Rückenmarks-Flüssigkeit freigesetzt wird. Das heißt, mit der abnehmenden Nachtlänge nimmt auch die Menge an Melatonin im Körper ab und damit seine prozesshemmende Wirkung.

Melatonin synchronisiert vereinfacht gesagt alle Abläufe im Körper eines Tieres und stellt dessen innere Uhr

auf die Tages- und Jahreszeit ein. Arten aus den Polarregionen weisen dabei jedoch eine Besonderheit auf. Während die meisten Tiere außerhalb der Arktis und der Antarktis tagsüber aktiv sind und nachts ruhen, passen arktische und antarktische Arten ihr Verhalten an die jeweilige Lichtphase an.

Ein gutes Beispiel sind die arktischen Schneehühner. Im Frühling und Herbst, wenn die Sonne auf- und untergeht, begeben sie sich morgens und abends auf die Futtersuche – so wie viele andere Vogelarten auch. In den Phasen anhaltender Dunkelheit und anhaltender Helligkeit aber sind die Tiere abgesehen von einigen Pausen gewissermaßen rund um die Uhr mit der Futtersuche beschäftigt. Dasselbe Verhaltensmuster wurde auch bei den Rentieren auf Spitzbergen sowie bei Adéliepinguinen beobachtet. Und von den männlichen Kaiserpinguinen weiß man, dass sie selbst in der Polarnacht keine auffällig hohen Melatoninwerte aufweisen. Die Tiere unterliegen am Polartag sowie in der Polarnacht also keinen typischen Tagesrhythmen.

Rentieren fällt die Futtersuche vor allem bei lang anhaltender Dunkelheit leichter als anderen Tieren, weil sie auch das Licht im ultravioletten Bereich wahrnehmen. Diese Fähigkeit bringt einen entscheidenden Vorteil. Weil Schnee und Eis das einfallende ultraviolette Licht zum Großteil reflektieren, sehen die Tiere die Landschaft als helle Fläche. Schwarz erscheinen dagegen all jene Dinge, die UV-Licht absorbieren. Dazu gehören zum einen Flechten, von denen sich die Rentiere im Winter hauptsächlich ernähren. Zum anderen reflektieren auch weißes Fell (Eisbären) und das Fell der Wölfe das UV-Licht nur zu einem geringen Teil. Das heißt, die Rentiere sehen mögliche Angreifer frühzeitig und haben so deutlich bessere Überlebenschancen.

Wissenschaftler nehmen außerdem an, dass das UV-Licht den Tieren zu erkennen hilft, wie eine Schneefläche beschaffen ist. Der Anteil des reflektierten UV-Lichtes verändert sich nämlich mit den physikalischen Eigenschaften einer Schneedecke. Vermutlich sehen die Herden so schon auf einen Blick, ob sich die Futtersuche an einer bestimmten Stelle lohnt oder ob sie vielleicht einen kleinen Umweg machen sollten, weil der Schnee hier zu harsch oder zu weich ist, als dass sie diese Schneefläche queren könnten.

Farbwechsel zum Winteranfang

Die sich ändernden Lichtverhältnisse geben auch den Startschuss für den typischen Fellwechsel, der Polarfuchse, Schneehasen, Hermeline und andere Tiere im Sommer meist grau oder braun aussehen lässt, im Winter dagegen weiß. In den mittleren und polaren Breiten der Nordhalbkugel leben heutzutage 21 Säugetier- und Vogelarten, die diesen Farbwechsel vollziehen. Das heißt, den Tieren wächst zweimal pro Jahr ein völlig neues Fell oder Federkleid. Die Arten haben diese Fähigkeit vermutlich unabhängig voneinander entwickelt, wobei die Evolution des Farbwechsels noch nicht ganz verstanden ist. Interessanterweise aber wechseln die verschiedenen Arten einer Region nahezu zeitgleich ihre Farbe und tragen ihr Wintergefieder oder ihren Winterpelz auch über einen ähnlich langen Zeitraum – darauf abgestimmt, wann vor Ort in der Regel der erste Schnee fällt und wie lange die Schneedecke erhalten bleibt. Arten, die in Gebieten mit sehr variabler oder lückenhafter Schneedecke leben, haben ihre Fellfarbe auch diesen Gegebenheiten angepasst. Ihr Winterfell oder -federkleid ist mit pigmentierten Haaren oder Federn durchsetzt und deshalb in der Regel weiß-braun oder weiß-grau gesprenkelt.

Wissenschaftlich untersucht wurden auch der Sinn und Zweck des Farbwechsels. Den Ergebnissen zufolge dient er in erster Linie der Tarnung und Thermoregulation.

Ein weißes Fell oder Federkleid verspricht im Winter sowohl Jägern als auch Beutetieren große Vorteile. Ist die Landschaft verschneit, werden beide Gruppen von ihren jeweiligen Widersachern schlechter gesehen. Bei Ersteren steigt dadurch die Aussicht auf Nahrung, bei Letzteren erhöhen sich die Überlebenschancen, weshalb Forscher die Fähigkeit, sich zu tarnen, als eine der wichtigsten Triebkräfte in der Evolution der Fellfarbe von Säugetieren bezeichnen.

Optisch mit der Umgebung zu verschmelzen gelingt allerdings nur dann, wenn der Fellwechsel und das Einsetzen des Schneefalls beziehungsweise der Schneeschmelze nahezu zeitgleich erfolgen. Verzögert sich der Winter oder beginnt die Schmelze viel zu früh im Jahr, tragen die Tiere die entsprechend falsche Fellfarbe und die evolutionären Vorteile kehren sich ins Gegenteil um. Aus diesem Grund sind Arten, die ihre Fellfarbe wechseln, in ihrer Existenz stärker vom Klimawandel bedroht als Tiere, die ihre Fellfarbe beibehalten.

Ausgenommen davon sind nach Meinung von Forschern Vögel, weil deren Selbstwahrnehmung oft so stark ausgeprägt ist, dass sie Diskrepanzen zwischen der Umgebungsfarbe und ihrer Gefiederfarbe bemerken und sich dementsprechend verhalten. Alpen- und Weißschwanzschneehühner beispielsweise ruhen sich nur an solchen Orten aus, an denen die dominierende Untergrundfarbe dem Ton ihres Gefieders entspricht. Und in Kanada



4.12 > Das Alpenschneehuhn, der Schneehase, der Hermelin und der Polarfuchs gehören zu den weltweit 21 Tierarten, die mit dem Wechsel der Jahreszeiten die Farbe ihres Fells oder Gefieders ändern. So werden sie von Feinden und Beutetieren schlechter gesehen und verbessern ihre Überlebenschancen. Das Winterfell oder -gefieder isoliert oft auch besser als das Sommerkleid.

beobachteten Forscher Schneehühner, die sich absichtlich beschmutzten, als die Schneeschmelze zu früh einsetzte und die Vögel Gefahr liefen, in ihrem sauberen, weißen Wintergefieder zu schnell erkannt zu werden.

Durch den Wechsel vom Sommer- zum Winterfell verbessern die meisten Tiere aber auch die Isolationseigenschaften ihres Pelzes. Farb- oder pigmentloses Haar ist zum einen in der Regel etwas breiter als pigmentiertes Haar oder aber es enthält mehr luftgefüllte Kammern und isoliert deshalb besser. Zum anderen ist weißes Winterfell im Vergleich zum Sommerpelz oft auch länger und dichter – so zum Beispiel beim Polarfuchs, beim Nördlichen Halsbandlemming (*Dicrostonyx groenlandicus*) sowie beim Dsungarischen Zwerghamster (*Phodopus sungorus*).

Der Fellwechsel wird – wie viele andere Prozesse auch – durch Veränderungen in der Melatonin-Konzentration in Gang gesetzt. Steigt diese im Herbst, gehen Signale an die Hirnanhangdrüse, welche unter anderem das Wachstumshormon Prolactin produziert. Dieses wiederum reguliert unter anderem das Haarwachstum. Nimmt die Prolactin-Konzentration im Frühjahr zu, verlieren zum Beispiel Halsbandlemminge und Schneehasen ihr Winterfell und beginnen mit der Partnersuche. Wird die Produktion dieses Hormons dagegen unterdrückt, wächst bei Polarfüchsen, Lemmingsen und anderen Tieren das helle Winterfell. In experimentellen Studien trugen Säugetiere mit unterdrückter Prolactin-Produktion ihr Winterfell das ganze Jahr hindurch – unabhängig von der Tageslänge.

Melatonin hemmt jedoch auch die Bildung des Pigments Melanin, welches Haut, Federn und Augen ihre Farbe verleiht. Eine hohe Melatonin-Konzentration führt bei Tieren mit wechselfarbigem Fell somit unmittelbar zur Ausbildung eines weißen Winterfells. Wie die Tageslänge und Hormone die Mauser und den Gefiederwechsel bei Vögeln regulieren, ist weniger gut verstanden. Das liegt unter anderem daran, dass Vögel mindestens drei „innere Uhren“ besitzen. Informationen über die sich ändernde Tageslänge werden nicht nur in der Zirbeldrüse verarbeitet, sondern auch im Hypothalamus sowie in den Augen selbst. Die Mauser und die Fortpflanzung sind so aufeinander abgestimmt, dass der Gefiederwechsel erst dann einsetzt, wenn die Brut beendet ist.

Umweltfaktoren wie Temperatur und Schneefall haben im Gegensatz zur Tageslänge nur einen begrenzten

Einfluss auf den Fell- oder Gefiederwechsel. Studien zeigen, dass kalte Temperaturen im Herbst das Wachstum des Winterfells oder -gefieders bei Säugetieren und Vögeln beschleunigen. Außerdem wuchs Schneehühnern in Experimenten ein dunkleres Winterfederkleid, wenn diese bei wärmeren Temperaturen gehalten wurden. Ein kalter, schneereicher Frühling dagegen verlangsamt den Wechsel von der Winter- zur Sommerfarbe. Der Auftakt der Mauser aber wird allein durch die Tageslänge bestimmt.

Die Flora der Polarregionen

Das Nord- und das Südpolargebiet beherbergen trotz ihres extremen Klimas eine zum Teil erstaunlich reiche Flora. In der Arktis zählten Forscher beispielsweise auf einer Fläche von 25 Quadratmetern nahezu 100 verschiedene Gefäßpflanzenarten, Moose und Flechten, sodass die Artenvielfalt der untersuchten Fläche am Ende in etwa so hoch war wie in den artenreichsten Graslandschaften der mittleren und subtropischen Breiten. Im Vergleich zu den tropischen Regenwäldern gelten die polaren Gebiete dennoch als artenarm, was in erster Linie auf die kalten Temperaturen, die kurze Wachstumsperiode, auf fehlende Nährstoffe sowie auf den schwer zu durchwurzelnden Permafrost und auf Extremereignisse wie die in der Arktis typischen Frühjahrsüberflutungen zurückzuführen ist. Außerdem unterscheiden sich in den Polarregionen die Lebensbedingungen für Pflanzen von einem Ort zum anderen oft enorm. Auf der sibirischen Taimyrhalbinsel beispielsweise liegen nur 500 Kilometer zwischen der relativ üppig bewachsenen Subarktis und der polaren Wüste der Hocharktis, in welcher nur noch wenige Pflanzenarten überleben.

Die bewachsenen Tiefebene der Arktis (Low Arctic, Niederarktis) werden auch als Tundra bezeichnet. Der Begriff leitet sich vom Wort *tūndar* ab und bedeutet in der Sprache der Saami, der Ureinwohner Nordskandinaviens, so viel wie: baumlose Ebene, wobei in der Tundra neben Gräsern und Blütenpflanzen durchaus auch Weiden, Birken und Erlen wachsen, die weiter südlich baumförmige Verwandte haben. In der Tundra allerdings strecken sich diese Gewächse nicht im klassischen Sinn in die Höhe, sondern kriechen strauch- oder mattenförmig flach über

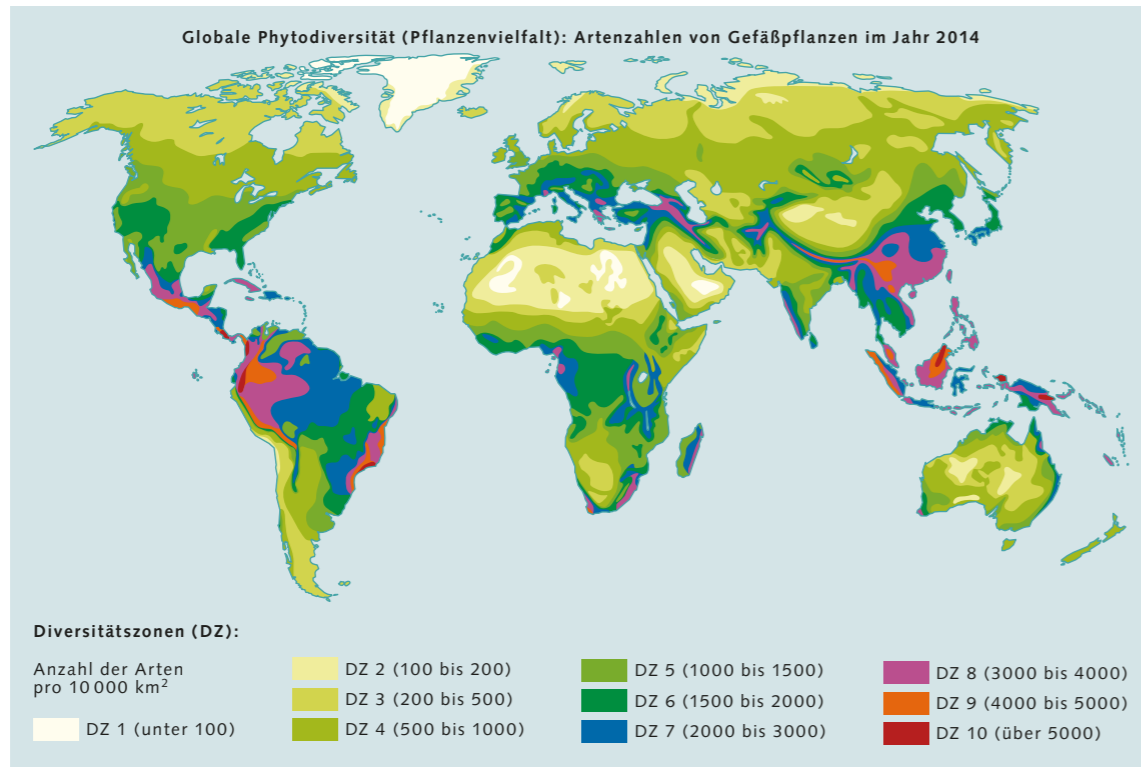
Gefäßpflanzen

Als Gefäßpflanzen bezeichnet man alle Farn- und Samenpflanzen, weil sie für den Stofftransport innerhalb der Pflanze sogenannte Gefäß- oder Leitbündel besitzen.



4.13 > Arktische Blaubeeren tragen erst zum Ende des Sommers reife Früchte. Diese zu pflücken, sei ausgesprochen mühsam, berichten Ureinwohner. Die Blaubeersträucher wachsen so flach am Boden, dass man beim Pflücken auf allen Vieren durch die Tundra kriechen müsse.

4.14 > Die Artenvielfalt der Gefäßpflanzen ist weltweit in den Tropen am höchsten und nimmt dann mit zunehmender geographischer Breite ab. In der Arktis gelten vor allem jenen Regionen als vergleichsweise artenreich, die während der zurückliegenden Eiszeiten nicht vergletschert waren.



Bedecktsamer und Nacktsamer
 Bedecktsamer sind Pflanzen, die Blüten besitzen und deren Samenanlage in den Fruchtknoten des Fruchtblatts eingeschlossen ist. Zu den Nacktsamern werden dagegen alle Pflanzen gezählt, deren Samenanlagen nicht von den Fruchtblättern eingeschlossen sind, sondern stattdessen frei auf den einzelnen Fruchtblättern liegen. Bekannte Vertreter der Nacktsamer sind die Europäische Lärche und die Gemeine Kiefer.

den Boden – auch um den eisigen Wind zu meiden. Im äußersten Norden Sibiriens, an der Ost- und Westküste Grönlands sowie auf dem kanadisch-arktischen Archipel und im Norden Alaskas gehen die Tundragebiete in die Hocharktis über. Deren dünne Vegetationsdecke dominieren Flechten, Moose und zwergenhafte Blütenpflanzen. Im Süden dagegen wird die Tundra vielerorts durch die Krummholzwälder der Subarktis begrenzt.

Die Artenvielfalt der Gefäßpflanzen in den Polarregionen nimmt kontinuierlich ab, je weiter man sich Richtung Pol bewegt. In der Arktis, deren heutige Pflanzenwelt sich erst in den zurückliegenden drei Millionen Jahren entwickelte, kennt man heute schätzungsweise 900 verschiedene Moose sowie 2218 Gefäßpflanzenarten, von denen nahezu alle zu den Bedecktsamern gehören. Nacktsamige Pflanzen dagegen kommen in der Arktis nur selten vor – und wenn, dann ist ihre Artenvielfalt eher gering.

Die Mehrheit der arktischen Pflanzen gilt als zirkumpolar verbreitet. Nichtsdestotrotz unterscheiden sich die verschiedenen Regionen stark in ihrer Artenvielfalt und -zusammensetzung. Während im nördlichsten Teil, der

Hocharktis, gerade einmal 102 Arten vorkommen, sind es im südlichen Teil der Tundra mehr als 20-mal so viele. Rund fünf Prozent der arktischen Gefäßpflanzenarten sind endemisch – das heißt, sie kommen nur in der Arktis vor. Zu diesen Arten zählen vor allem Stauden und Gräser.

Die Vielfalt der arktischen Pflanzenwelt wird auch durch Pflanzenfresser gefördert. Als Forscher in einer Studie Weidetiere wie Gänse, Lemminge, Moschusochsen und Rentiere von bestimmten Flächen fernhielten, häufte sich dort eine große Menge Pflanzenstreu an, die den Boden isolierte und dazu führte, dass das Erdreich im Sommer nicht mehr tief genug auftaute. Die Blütenpflanzen konnten nicht mehr in ausreichendem Maß Wurzeln bilden und verschwanden. An ihrer Stelle wuchsen nun Moose. Der Kot der Pflanzenfresser liefert außerdem dringend benötigte Nährstoffe, denn Stickstoff und Phosphate sind in den Böden der Arktis nur spärlich vorhanden.

Im Vergleich zur Arktis ist die Flora der Antarktis geradezu artenarm. In ihrer kontinentalen Zone, zu der Biologen die wenigen eisfreien Gebiete des antarktischen Kontinents sowie die Ostseite der Antarktischen Halbinsel



4.15 > Biologen teilen die Landflächen des Nordpolargebiets in drei Vegetationszonen ein. Ganz im Norden befindet sich die Zone der Hocharktis. Daran schließt sich die Tundrenlandschaft der arktischen Tiefebene an (Niederarktis). Darauf folgt die nördliche Randzone der borealen Zone.

zählen, gedeiht nur eine kleine Zahl von etwa 40 bis 50 verschiedenen Flechten und Moosen. Diese wachsen in der Regel in Felsspalten oder in Vertiefungen zwischen Steinen, meist jedoch auf dunklem, felsigem Untergrund, der einen Großteil der einfallenden Sonnenenergie absorbiert und Wärme abstrahlt. Viele dieser Flechten gelten als extreme Überlebenskünstler. Sie können noch bei einer Temperatur von minus zehn Grad Celsius Photosynthese betreiben und sind in der Lage, trotz starker, anhaltender Austrocknung und extremer Kälte zu überleben. Einige dieser Arten kommen selbst in den eisfreien Antarktischen Trockentälern im Viktorialand vor.

Ein wärmeres und feuchteres Klima und damit bessere Lebensbedingungen finden Pflanzen an der Westseite der Antarktischen Halbinsel sowie auf den nahe gelegenen Inseln. In dieser als maritime Antarktis bezeichneten Zone wachsen unter anderem auch zwei Gefäßpflanzen – die Antarktische Schmiehe (*Deschampsia antarctica*) und die Antarktische Perlwurz (*Colobanthus quitensis*). Den überwiegenden Teil der antarktischen Vegetation aber bilden blütenlose Pflanzen. Bekannt sind rund 100 verschiedene Moose, über 750 Flechten und schätzungsweise 700 Algenarten, die an Land oder aber im Meer leben. Die Zahl der Pilze dagegen ist unbestimmt.

Die Kälte abwehren

Je näher am Pol eine Pflanze wächst, desto ungünstiger werden die Lebensbedingungen. Oder anders gesagt: Desto stärker wirken jene physikalischen und chemischen Faktoren, welche die Ausbreitung von Pflanzen begrenzen. Dazu zählen beispielsweise die Länge der Wachstumsperiode, die Dauer und Intensität von Frostphasen sowie das Ausmaß, in dem Pflanzen dem Wind ausgesetzt sind. Die Überlebenschancen der Pflanzen sind allerdings auch an die zur Verfügung stehenden Ressourcen geknüpft. Ob Tropen oder Polargebiet, Pflanzen können nur dann existieren, wenn sie eine positive Kohlenstoffbilanz vorweisen, also ausreichend Photosynthese betreiben können, um zu wachsen und Energiereserven in Form von Glukose oder Stärke anzulegen. Dafür benötigen sie genügend Wärme, Wasser, Licht, Kohlendioxid, Nährstoffe und auch Sauerstoff – Letzterer wird vor allem von Pflanzen gebraucht, die in Feuchtgebieten oder Sümpfen wachsen.

Ideale Wachstumsbedingungen sind in den Polarregionen selten gegeben. Die arktische Flora hat deshalb verschiedene Anpassungsmechanismen entwickelt, welche sie in die Lage versetzen, Nährstoffmangel, Kälte und Dunkelheit zu tolerieren und Extremereignisse wie anhaltende Schneefälle oder Frühjahrsüberflutungen nur



4.16 > Moose besiedeln ein Lavafeld auf Island. Arktisweit gibt es etwa 900 Moosarten. Sie kommen vor allem in den arktischen Feuchtgebieten sowie auf Schneebänken vor.

leicht oder sogar unbeschadet zu überdauern. Dazu zählen insbesondere:

- ein langsames, ressourcenschonendes Wachstum,
- eine eher braune als grüne Färbung,
- eine gedrungene Statur,
- wärmeoptimierende Merkmale wie Härchen oder spezielle Blütenformen,
- Frostschutzmechanismen für die Zellen,
- eine große Zahl wichtiger Enzyme, um auch bei widrigen Lichtverhältnissen Photosynthese zu betreiben,
- eine Mehrfachverwertung von Nährstoffen,
- das Speichern großer Energiereserven in den Wurzeln sowie
- die Möglichkeit der ungeschlechtlichen Fortpflanzung an Standorten, an denen die geschlechtliche Reproduktion nicht mehr funktioniert.

Klein kommt weiter

Polare Pflanzen siedeln besonders gern an geschützten Standorten, an denen sie Wind, Eis und Kälte nicht in vollem Maß ausgesetzt sind. Eine zweite wichtige Überlebensstrategie lautet: Wachse langsam und reduziere den Energieverbrauch vor allem in jenen Zeiten, in denen nur



4.17 > Der Knöllchenknöterich *Polygonum viviparum* gehört zu den arktischen Pflanzen, die Zeiträume von mehr als zwei Jahren unter einer Schneedecke überdauern können.

wenige Ressourcen zur Verfügung stehen. Dieser Ansatz ist auch als Montgomery-Effekt bekannt, benannt nach Edward Gerrard Montgomery, einem Forscher an der landwirtschaftlichen Versuchsstation von Nebraska (USA). Er hatte vor mehr als hundert Jahren bei Wachstumsexperimenten mit verschiedenen Getreidesorten festgestellt, dass in Gegenden mit geringen Umweltressourcen Pflanzen durchaus ökologische Vorteile haben, wenn sie langsam wachsen. In der Arktis beispielsweise ist der Sommer und damit die Wachstumsphase so kurz, dass Pflanzen wie das auf Island und Grönland wachsende Arktische Wintergrün (*Pyrola grandiflora*) mehrere Jahre benötigen, um vom Spross zur geschlechtsreifen Pflanze heranzuwachsen und Samen auszubilden. So erklärt sich auch die für Polarregionen typische Langlebigkeit vieler Pflanzen.

Eine Art, die den sparsamen Einsatz von Ressourcen perfektioniert hat, ist der winzige Zwerghahnenfuß (*Ranunculus pygmaeus*). Er wächst häufig umgeben von Moos in der Nähe von Gletschern, Bächen oder Schneesverwehungen und überlebt selbst dann, wenn er im Winter gelegentlich von so viel Schnee bedeckt wird, dass dieser im darauffolgenden Sommer nicht vollständig schmilzt – und die Pflanze deshalb die gesamte Wachstums- und Fortpflanzungsphase verpasst. Andere Arten gehen so sparsam mit ihren Reserven um, dass sie sogar zwei bis drei Jahre in Folge unter einer Schneedecke



4.18 > Die Antarktische Schmieie *Deschampsia antarctica* ist eine von zwei Gefäßpflanzen, die auf dem antarktischen Kontinent heimisch sind.

überdauern. Dazu gehören zum Beispiel der Knöllchenknöterich (*Polygonum viviparum*), der Alpensäuerling (*Oxyria digyna*) und die Polarweide (*Salix polaris*).

Die kleine, gedrungene Statur vieler polarer Pflanzen ist jedoch nicht nur auf ihr verzögertes Wachstum zurückzuführen. Pflanzen, die als dichtes Polster am Boden wachsen, anstatt ihre Blätter und Blüten in die Höhe zu recken, entkommen dem eisigen arktischen Wind. Die Luft innerhalb des Polsters wird daher weniger verwirbelt und durch die Sonne schneller erwärmt. Auf diese Weise schaffen sich die Pflanzen in ihren Polstern ein eigenes Mikroklima, dessen Temperatur an Sommertagen 25 bis 30 Grad Celsius betragen kann, während in zwei Meter Höhe eine Umgebungstemperatur von gerade einmal acht Grad Celsius gemessen wird. Innerhalb des Polsters herrschen dann also optimale Stoffwechselbedingungen für die Pflanzen.

Um im kurzen, kühlen Sommer so schnell wie möglich zu wachsen und zu blühen, wenden polare Pflanzen auch Strategien an, die in wärmeren Gefilden unmittelbar zum Hitzetod führen würden. Dazu zählt zum Beispiel die Färbung. Dunkle Farben absorbieren mehr Sonneneinstrahlung als hellere. Daher ist die Vegetationsdecke in vielen Gebieten der Arktis überwiegend bräunlich gefärbt und nicht grün. Das gilt insbesondere für Pflanzengemeinschaften, die an den Stränden der Arktis leben und eine besonders kurze Wachstumsphase haben.



4.19 > Die weißen Blütenblätter des Gletscherhahnenfußes *Ranunculus glacialis* reflektieren das Sonnenlicht in die Blüthenmitte, sodass sich Insekten dort besonders gern aufhalten.



4.20 > Die weißen Wattedäuse der Wollgräser sind ein typischer Anblick in arktischen Feuchtgebieten. Sie stellen jedoch nicht die Blüte dar, sondern werden erst ausgebildet, wenn die Pflanze bereits Samen trägt. Deren lange Blütenhüllfäden formen dann den Wollschopf und schützen die Samen auch vor Kälte.

Pflanzen wie der Gletscherhahnenfuß (*Ranunculus glacialis*) sind zudem in der Lage, ihre Blätter und Blüten so auszurichten, dass sie optimal zur Sonne stehen. Seine anfänglich weißen Blüten fungieren dann wie kleine Parabolspiegel und lenken das einfallende Sonnenlicht direkt auf die Fortpflanzungsorgane in der Blütenmitte. Die Luft in der Blüte erwärmt sich dadurch, was wiederum dazu führt, dass sich die Fortpflanzungsorgane schneller entwickeln und die Blüten verstärkt Insekten anziehen. Nach der Befruchtung schließt der Gletscherhahnenfuß seine Blüte und die Blütenblätter verfärben sich rot. Auf diese Weise absorbiert die Blüte mehr Sonnenstrahlung, deren Wärme wiederum die Samen schützt, welche sich in der Blüte entwickeln.

Andere arktische Gewächse schaffen sich ihr eigenes Gewächshaus. Weibliche Pflanzen der Arktischen Weide (*Salix arctica*) beispielsweise bilden feine Daunenhärchen auf ihren Blättern und entlang ihres Blütenstands aus. Dieser Daunenzopf hält eine isolierende Luftschicht dicht an der Blattoberfläche. Gleichzeitig verkleinern die Härchen die Blattoberfläche, über welche die Pflanze normalerweise auskühlt, weil hier Feuchtigkeit verdunstet. Die Daunenzöpfe aber schützen die kleinen Weiden so effizient, dass die Temperatur in den Blättern bis zu elf Grad Celsius wärmer ist als die Umgebungstemperatur.

Die Gewächse des Nordens vermeiden es außerdem, ihre Wurzeln in die Tiefe zu strecken, wo der Boden größtenteils das ganze Jahr hindurch vereist ist und sich das Schmelzwasser staut. Stattdessen durchwurzeln sie die flache obere Bodenschicht. Diese taut im Frühjahr als Erste auf und steht in der Regel nur kurzzeitig unter Wasser. Zum Sommer werfen Bäume und Sträucher ihre Nadeln und Blätter ab und überwintern im Knospstadium. Zuvor aber verpacken sie die Knospen noch dick in wolleähnliche Substanzen, sodass ihnen der Frost nur wenig anhaben kann.

Den eisigen Wintertemperaturen trotzen viele arktische Pflanzen, indem sie unter anderem Wasser aus ihren Zellen in Zellzwischenräumen einlagern. Auf diese Weise laufen die Pflanzen weniger Gefahr, dass sich Eiskristalle in den Zellen bilden und diese beschädigen. Gleichzeitig verstärken die Pflanzen ihre Zellmembranen mit bestimmten Zuckern und Proteinen; auch die Lipidzusammensetzung der Membran verändert sich. Spezielle

Enzyme wiederum verhindern, dass die Zellen infolge der Wasserknappheit Schaden nehmen. Diese zellulären Frostschutzmechanismen sind jedoch nicht das ganze Jahr hindurch aktiviert. Sie kommen erst dann zum Tragen, wenn die Temperaturen zum Ende des Sommers sinken und sich die Pflanze akklimatisiert. Zum Höhepunkt des Winters aber sind die meisten Pflanzen so gut gegen Frost gewappnet, dass einige in Laborversuchen sogar ein kurzes Tauchbad in minus 196 Grad kaltem, flüssigem Stickstoff überlebten.

Problematisch wird es dagegen, wenn sich im Winter ungewöhnliche Wärmeperioden und eisiger Frost abwechseln oder aber üblicherweise mit Schnee bedeckte Flächen plötzlich schneefrei sind. In diesem Fall nehmen auch die hartgesottene arktischen Pflanzen Schaden. Dieser kann jedoch meist im Frühjahr durch das Wachstum neuer Blätter und Triebe kompensiert werden.

Den kurzen Sommer ausnutzen

Pflanzen brauchen sogenannte aktive Enzyme, um Kohlendioxid aufzunehmen, Photosynthese zu betreiben und Energiereserven in Form von Glukose und Stärke zu bilden. Die kälteadaptierten Gewächse der Polarregionen besitzen davon besonders viele. Große Mengen des Enzyms RuBisCO (Ribulose-1,5-Bisphosphat-Carboxylase/-Oxygenase) versetzen die arktische Flora in die Lage, auch bei kühleren Temperaturen Stoffwechsel zu betreiben. Allerdings gelingt es auch polaren Gefäßpflanzen nicht, bei Minustemperaturen zu wachsen. Um Blätter und Blüten ausbilden zu können, müssen die Pflanzen auf den kurzen Sommer warten, den sie dann jedoch optimal zu nutzen wissen. In den Zellen kälteadaptierter Pflanzen finden sich nämlich besonders viele Mitochondrien, welche als Kraftwerke der Zelle für die Energieproduktion zuständig sind. Mit ihnen treiben die Pflanzen ihren Stoffwechsel im Sommer auf ein Höchstniveau. Sie nutzen nicht nur die 24 Stunden Helligkeit optimal aus, sondern können auch bei widrigen Lichtverhältnissen noch Photosynthese betreiben.

Diese Stärke macht die kälteadaptierten Pflanzen allerdings anfällig für Wärme. Steigt die Umgebungstemperatur überdurchschnittlich, schießen Stoffwechsel und Zellatmung weit über das gesunde Maß hinaus. Die

Pflanze verbraucht im Nu all ihre Energiereserven und nimmt Schaden. Diese Tatsache erklärt zum einen, warum sich die polaren Pflanzen der Arktis nicht weiter Richtung Süden ausbreiten. Zum anderen wird deutlich, auf welche Weise der Klimawandel den polaren Pflanzen gefährlich wird. Mit der Temperatur steigt die Wahrscheinlichkeit, dass die kälteadaptierten Gewächse völlig entkräftet eingehen.

Auf der Suche nach Nährstoffen

Um in der kurzen Wachstumsphase auf genügend Nährstoffe und Licht zurückgreifen zu können, gehen einige Pflanzen aktiv auf Ressourcensuche. Das heißt, sie bilden über- oder unterirdisch kleine Triebe oder Ableger aus, mit denen sie sich abseits ihres ursprünglichen Standorts überlebenswichtige Licht- oder Nährstoffquellen erschließen. Dadurch verschaffen sich die Pflanzen unter Umständen deutliche Standortvorteile, wie ein Vergleich zweier eng verwandter Wollgräser zeigt, die beide arktische Feuchtgebiete besiedeln.

Das Schmalblättrige Wollgras (*Eriophorum angustifolium*) bildet Ableger aus und geht aktiv auf die Suche nach Mineralien – eine Fähigkeit, die der Pflanze das Überleben in den sehr feuchten Teilen des Sumpfes ermöglicht. Ihre Ableger tolerieren stehendes Wasser und erlauben dem Wollgras, sich auch in überfluteten Gebieten auszubreiten. Das Scheidenwollgras (*Eriophorum vaginatum*) dagegen streckt seine Triebe nicht in die nähere Umgebung aus. Es wächst stattdessen in Form eines Grasbüschels und kommt vor allem an den trockeneren Standorten gut zurecht, wo der Wasserpegel unter Umständen stark schwankt.

Ihre Energiereserven, welche die Pflanzen während des kurzen Sommers durch Photosynthese produzieren, investieren die Gewächse nicht in das Wachstum neuer Blätter, sondern lagern sie zumeist in Form von Stärke in den Wurzeln ein, also unterirdisch. Die Wurzelsysteme arktischer Pflanzen sind deshalb in der Regel größer als jene von Pflanzen aus den mittleren oder tropischen Breiten. Die Anlage großer Vorräte aber macht Sinn, denn arktische Pflanzen müssen angesichts der äußerst variablen Wetterbedingungen im Nordpolargebiet immer davon ausgehen, dass sie eine oder auch zwei Wachstums-

perioden im Schnee vergraben verpassen und in dieser Zeit nur von ihren Reserven leben. Tundrengewächse wie die Rosmarinheide (*Andromeda polifolia*) speichern daher bis zu 75 Prozent ihrer Energiereserven in den Wurzeln.

Ein für polare Pflanzen besonders wertvolles Gut sind auch Nährstoffe wie Stickstoff, Phosphor und Kalium. Gewächse wie die Zwergbirke (*Betula nana*) haben deshalb Wege gefunden, diese einmal aufgenommenen und verarbeiteten Elemente wiederzuverwerten. Kurz bevor zum Sommerende die Blätter der Birke abfallen, holt die Pflanze einen Großteil der in ihren Blättern gespeicherten Nährstoffe zurück in den auf Dauer angelegten Teil ihres Pflanzenkörpers. Auf die gleiche Weise verfährt das Scheidenwollgras. Es vermag 90 Prozent des in den Blättern enthaltenen Phosphors wiederzuverwerten, sodass die Pflanze im Frühjahr nur die Differenz von zehn Prozent des Nährstoffs neu aus der Erde aufnehmen muss.

Fortpflanzung auf zweierlei Weise

Die meisten Tiere müssen sich geschlechtlich fortpflanzen, um ihre Art zu erhalten. Pflanzen dagegen haben oftmals auch die Option der ungeschlechtlichen Reproduktion. Sie bilden Ableger, Verzweigungen oder sogar Samen aus, ohne dass bei Letzterem eine klassische Befruchtung stattgefunden hat (Agamospermie). Zahlreiche in der Arktis beheimatete Pflanzen haben auf diese Weise Jahrhunderte oder sogar mehrere Jahrtausende überdauert, so zum Beispiel arktische Seggen wie *Carex ensifolia*.

Sofern eine sexuelle Fortpflanzung bei Blütenpflanzen scheitert, liegt das entweder daran, dass die Blüten nicht ausgebildet wurden oder aber die Befruchtung nicht stattfinden konnte. Für den letzteren Fall genügt bei einigen Arten oft schon ein kurzer Kälteeinbruch. Im nördlichen Verbreitungsgebiet der Amerikanischen Zwergbirke (*Betula glandulosa*) beispielsweise keimen nur 0,5 Prozent der Birkensamen aus. Der Art bleibt daher keine andere Wahl, als sich in diesen Regionen ungeschlechtlich fortzupflanzen.

Wenn im Frühjahr kurz nach der Schneeschmelze die Tundra plötzlich erblüht, sind dafür in erster Linie mehrjährige Pflanzen verantwortlich. Einjährige Gewächse kommen in den Polargebieten bis auf wenige Ausnahmen so gut wie nicht vor. Um ihre Blüten innerhalb so kurzer

Zeit ausbilden zu können, brauchen arktische Pflanzen Blütenknospen, die bereits im Herbst angelegt wurden und die nach der Schneeschmelze dann sofort startbereit sind.

Bestäubt werden die vielen Blütenpflanzen der Arktis vor allem von Fliegen, was wenig überraschen dürfte, denn Bienen gibt es nördlich des Polarkreises kaum. Als Forscher auf Grönland genauer untersuchten, welche Insekten die für die Arktis typische Weiße Silberwurz (*Dryas octopetala*) bestäubten, zählten sie insgesamt 117 verschiedene Insektenarten, welche die Pflanze anfliegen. Die eigentliche Bestäubungsarbeit aber leistete hauptsächlich eine Art – eine kleine Verwandte der Stubenfliege namens *Spilogona sanctipauli*.

Als Samen im Boden zu überwintern ist eine weltweit verbreitete und äußerst erfolgreiche Überlebensstrategie der Pflanzen – auch in den Polarregionen. Als Forscher die Flora Spitzbergens untersuchten, fanden sie unter den 161 einheimischen Arten 71 Gewächse, die Samen bildeten, um den Fortbestand der Art zu sichern. Auf dieselbe Art und Weise verfahren auch die beiden einzigen Blütenpflanzen der Antarktis. Weltweit unterscheiden sich

die Pflanzen allerdings in der Langlebigkeit ihrer Samen. Während manche weniger als ein Jahr im Erdreich überdauern, überraschen einige arktische Gewächse mit einem erstaunlichen Durchhaltevermögen. In wissenschaftlichen Studien keimten Samen der Seggenart *Carex bigelowii*, die schätzungsweise 200 Jahre alt waren; in Alaska trieben Samen der Wildblume *Luzula parviflora* aus, nachdem diese schätzungsweise 175 Jahre im Boden gelegen hatten. Sollten sich die Lebensbedingungen also eines Tages rapide verschlechtern, wären diese Arten durchaus in der Lage, mehrere Jahrzehnte oder gar Jahrhunderte als Samen im Erdreich auszuharren und erst dann wieder auszutreiben, wenn sich die Bedingungen ins Bessere gekehrt haben.

Die Flora der Polarregionen hat in den zurückliegenden zwei bis drei Millionen Jahren eine erstaunliche Überlebens- und Anpassungsfähigkeit bewiesen und dabei vor allem in der Arktis eine einzigartige Artenvielfalt entwickelt. Im Zuge der globalen Erwärmung steht die kälteadaptierte Pflanzenwelt nun vor neuen Herausforderungen, und es bleibt fraglich, inwiefern die polare Artenvielfalt erhalten bleibt.



4.21 > Herbst in der Arktis: Ein gelb-orangefarbener Teppich aus Weiden- und Zwergbirkensträuchern bedeckt diese Landzunge in der kanadischen Arktis. Die Amerikanische Zwergbirke *Betula glandulosa* pflanzt sich so hoch im Norden vor allem ungeschlechtlich fort.

Das Leben im Meer

> **Die Artenvielfalt und Produktivität der Polarmeere grenzen fast an ein Wunder. Die Lebensbedingungen im Nord- und Südpolarmeer sind von außen betrachtet alles andere als vorteilhaft. Das konstant kalte Wasser bremst das Wachstum und nahezu jede Bewegung wechselwarmer Organismen. Nahrung steht nur im kurzen Sommer zur Verfügung, dann jedoch im Überfluss. Die polaren Meeresbewohner aber kompensieren diese Einschränkungen durch einzigartige Anpassungsmechanismen, von denen es in der Antarktis jedoch deutlich mehr gibt als in der Arktis.**

Im Rhythmus von Licht und Eis

Wie die Landflächen der Polarregionen gelten auch die Meere als extreme Lebensräume. Das Südpolarmeer und der Arktische Ozean weisen die kälteste und konstanteste Wassertemperatur der Weltmeere auf. Diese steigt die meiste Zeit des Jahres nicht über die Null-Grad-Grenze und schwankt jahreszeitlich bedingt in der Regel um weniger als fünf Grad Celsius. In sehr weit südlich gelegenen Meeresregionen wie dem McMurdo Sound, einer Bucht des antarktischen Rossmeers, betragen die Temperaturunterschiede zwischen Sommer und Winter sogar weniger als 0,5 Grad Celsius. Die Bewohner dieses Gebiets müssen demzufolge das ganze Jahr hindurch mit sehr kalten Umgebungstemperaturen zurechtkommen. Die meiste Zeit ist das Wasser minus 1,8 Grad Celsius kalt. Die Polarmeere sind aber auch stärker als alle anderen Meere durch den Wechsel der Jahreszeiten geprägt. Im Sommer geht die Sonne nicht unter, im Winter dagegen herrscht monatelang ununterbrochen Dunkelheit.

Mit diesem Wechsel zwischen Polartag und Polarnacht gehen existenzielle Veränderungen im Nord- und Südpolarmeer einher. Meereis bildet sich und bedeckt im Winter einen Großteil der Meeresflächen, bevor es im Sommer wieder auf seine Minimalfläche zusammenschmilzt. Das Kommen und Gehen von Licht und Meereis bestimmt den Rhythmus des Lebens in den Polarregionen. Wo im Sommer das Meereis aufbricht, fällt endlich wieder Sonnenlicht in die oberen Wasserschichten und regt das Algenwachstum an. Gleichzeitig entlassen die schmelzenden Schollen Mikroorganismen und andere eisassoziierte Lebewesen sowie Spurenelemente wie Eisen in das Wasser, welche zuvor im Eis eingeschlossen worden sind oder sich den Winter über in Form von Staub (Spurenelementen) auf der Eisdecke abgelagert haben.

Sonnenlicht, Eisen und andere im Wasser enthaltene Nährstoffe wie Stickstoff, Phosphor und Siliziumverbindungen initiieren im Frühjahr und Sommer große Algenblüten, die den Grundstein für die Nahrungsnetze der Polarmeere bilden. In der Antarktis erreicht die Algendichte in küstennahen Gewässern in Spitzenzeiten Werte von 30 Milligramm Chlorophyll pro Kubikmeter Wasser. Im Winter dagegen finden sich an gleicher Stelle so wenige Algen, dass der Chlorophyllgehalt des Wassers auf ein Minimum von unter 0,01 Milligramm pro Kubikmeter sinkt. So groß sind die jahreszeitlichen Unterschiede in der Biomasseproduktion in keinem anderen Meer der Welt, denn im Herbst und Winter bremst die Meereisbildung das Leben im Meer. Wenn sich die Meeresoberfläche abkühlt und zu Eis gefriert, sind wichtige Nährstoffe wie Eisen in der Regel durch das Algenwachstum im Sommer aufgebraucht. Alle restlichen Stoffe sinken unter anderem durch die thermohaline Zirkulation der Wassermassen bis zum Meeresboden. Das heißt, in den oberen Metern der Wassersäule verbleibt so gut wie keine Nahrung mehr. Algen stellen das Wachstum ein, die Primärproduktion versiegt. Das Meereis schirmt die Wassersäule aber auch gegen den Wind ab und verhindert auf diese Weise, dass die oberen Wasserschichten durchmischt werden. Die fehlenden Verwirbelungen wiederum führen ebenfalls dazu, dass Algen, Kot und andere in der Wassersäule schwebende Partikel zum Meeresboden hinabsinken und den Nahrungsgehalt in der Wassersäule daher dramatisch reduzieren.

Für die meisten Bewohner der Polarmeere bedeutet die saisonale Abfolge von Licht und Eis den steten Wechsel von Zeiten des Überflusses und Zeiten des Hungers. Hinzu kommt, dass vor allem die am Grund der Schelfmeere siedelnden Organismen immer mit der Gefahr leben, dass treibende Eisberge oder aber im Flachwasserbereich aufliegendes Meereis ihren Lebensraum zerstört.

ren. Wenn in der Antarktis ein Eisberg über den Meeresboden pflügt, sterben mehr als 99,5 Prozent der ansässigen Makroorganismen und mehr als 90 Prozent der kleineren Meiofauna. Ein Eingriff, der in eisbergreichen Gewässern mehr als einmal pro Jahr vorkommen kann, weshalb die Lebensgemeinschaften in solchen Störungszonen meist sehr jung sind und den Meeresboden nur fleckenartig besiedeln.

Eine Frage des Eisens

Trotz vieler Gemeinsamkeiten sind die Meeresfaunen in der Arktis und Antarktis nicht identisch, was unter anderem an der unterschiedlichen Versorgung mit Nährstoffen und Spurenelementen liegt. Während im hohen Norden Flüsse große Mengen Schwemmmaterial in die Randmeere eintragen und den Arktischen Ozean auf diese Weise mit dem lebenswichtigen Eisen versorgen, fehlen im tiefen Süden derart verlässliche Lieferanten. Die Wasser-

massen des Südpolarmeers sind zwar nährstoffreich, an Eisen aber mangelt es nahezu überall. Algenblüten entstehen deshalb überwiegend in zwei Regionen: zum einen in küstennahen Gewässern oder Polynien, wo Eisen zum Beispiel durch Schmelzwasser von Gletschern eingetragen wird; zum anderen an den Rändern der Kontinentalplatte, wo eisenhaltiges Wasser aus der Tiefe aufsteigt. Die größte dieser Auftriebszonen erstreckt sich östlich von der Spitze der Antarktischen Halbinsel bis nach Südgeorgien. Sie ist ein Hotspot des Lebens. Hier gibt es nicht nur die größten Krillschwärme der Antarktis. In der Zone versammeln sich auch Krilljäger wie Wale, Pinguine und Robben.

Die oberste Wasserschicht des zentralen Arktischen Ozeans ist im Gegensatz zum Südpolarmeer eher nährstoffarm. Die starke Schichtung der Wassermassen infolge des hohen Süßwassereintrags durch Flüsse und die sommerliche Eisschmelze verhindern, dass nährstoffreiches Tiefenwasser bis an die Oberfläche aufsteigen kann. Kurze, intensive Algenblüten entstehen deshalb im Frühjahr

Meiofauna

Die Meio- oder auch Mesofauna ist eine Größenkategorie der Bodenfauna. Zu ihr zählen alle Bodenorganismen mit einer Größe von ungefähr 0,05 bis einem Millimeter. Tiere, die kleiner sind, werden der Mikrofauna zugeordnet; größere Organismen der Makrofauna, solange diese nicht größer als 20 Millimeter werden.



4.22 > Seeelefanten, Königspinguine und andere Seevögel wie Sturmvögel und Albatrosse säumen das Ufer der Saint Andrews Bay an der Nordküste Südgeorgiens. Die Pinguine bilden hier Brutkolonien mit bis zu 100 000 Tieren.



4.23 > Ruderfußkrebse machen nicht nur einen Großteil des marinen Zooplanktons aus. Mit rund 13 000 verschiedenen Arten stellen sie auch die artenreichste Gruppe der Krebstiere. Polare Arten sind in der Regel etwas größer und nahrhafter als ihre Verwandten aus den mittleren Breiten.

und Sommer vor allem im Eisrandbereich sowie in den Randmeeren. Die Barentssee, die Tschuktschensee und das Beringmeer gehören zu den produktivsten marinen Ökosystemen der Erde. Hier finden Bodenbewohner, Fische, Seevögel, Robben und Wale so viel Nahrung, dass sie unter Umständen in sehr großen Ansammlungen vorkommen können.

Ihre Zahl ist dennoch in der Regel um ein Vielfaches kleiner als die Populationen in der Antarktis. Während zum Beispiel im Nordpolargebiet und angrenzenden subpolaren Regionen gerade einmal 13 Vogelarten eine Gesamtzahl von mehr als eine Million aufweisen, sind es im Süden 24 polare und subpolare Arten. Die am häufigsten vorkommende Robbenart lebt ebenfalls in der Antarktis. Von der Krabbenfresserrobbe (*Lobodon carcinophaga*) gibt es Schätzungen zufolge 50 bis 80 Millionen Tiere, wobei diese Angabe aufgrund der unüberschaubaren Größe ihres Lebensraums mit einer großen Unsicherheit versehen ist.

Die große Menge an Vögeln, Robben und Walen in den Polarmeeren führte früher zu der Annahme, dass in den Polarmeeren mehr Biomasse produziert und im Nahrungsnetz weitergereicht werde als in den niedrigeren Breiten. Erklärt wurde diese These mit kurzen Nahrungsketten, die von einigen wenigen Schlüsselorganismen gebildet würden. Für die Antarktis ging man davon aus, dass nahezu alles Leben davon abhinge, dass Kieselalgen Photosynthese betrieben und vom Antarktischen Krill gefressen würden, auf den wiederum alle größeren Tiere wie Fische, Pinguine, Robben und Wale Jagd machten.

Diese vereinfachte Sichtweise ist mittlerweile überholt. Heute weiß man, dass die Vielfalt der Primärproduzenten in den Polarmeeren – hier in erster Linie der Algen – genauso hoch ist wie in den mittleren Breiten. Mikroben, Plankton und andere Kleinstlebewesen interagieren auf komplexe Art und Weise. Außerdem sind aus der Antarktis inzwischen auch viele Nahrungsbeziehungen bekannt, in denen der Krill keine Rolle spielt, auch wenn er zweifelsohne nach wie vor zu den Schlüsselarten zählt.

Beim Blick auf das Nahrungsnetz beider Meere fallen heutzutage vor allem zwei Besonderheiten auf. Erstens dienen in den Polarmeeren vergleichsweise wenige Arten als Nahrungsquelle für die großen Räuber. In der Arktis beispielsweise besteht das Zooplankton zu 80 bis 90 Prozent aus fetthaltigen Ruderfußkrebse (Copepoden), die das wichtigste Bindeglied zwischen den Primärproduzenten und größeren Konsumenten wie Fischen und Bartenwalen darstellen. In der Antarktis nehmen Krill, Floh- und Ruderfußkrebse diese Rolle ein. Zweitens stellen die Jäger oder Konsumenten des Südpolarmeers zumeist einer anderen Beute nach als die Jäger des Nordpolarmeeres. Während Robben, Wale und Seevögel im Arktischen Ozean vor allem Fische und am Meeresboden lebende Organismen fressen, ernähren sich die großen Räuber des Südlichen Ozeans in erster Linie von Krill und Fischen wie dem Antarktischen Silberfisch (*Pleuragramma antarctica*). Haie, Walrosse oder Wale, die ihre Nahrung vor allem am Meeresboden suchen, fehlen in der Antarktis gänzlich.

Die Überlebenstricks wechselwarmer Meeresbewohner

Die Fauna der Polarmeere besteht zu einem großen Teil aus wechselwarmen Tieren und hat im Lauf der zurückliegenden Jahrtausende einzigartige Anpassungsmechanismen an die extremen Lebensbedingungen entwickelt. Aufgrund der geografischen Abgeschiedenheit der Antarktis und ihrer längeren Vereisungsgeschichte jedoch sind diese im Südpolarmeere ausgeprägter als im Nordpolarmeere. Zu den Anpassungsmechanismen zählen bei den wechselwarmen Tieren insbesondere:

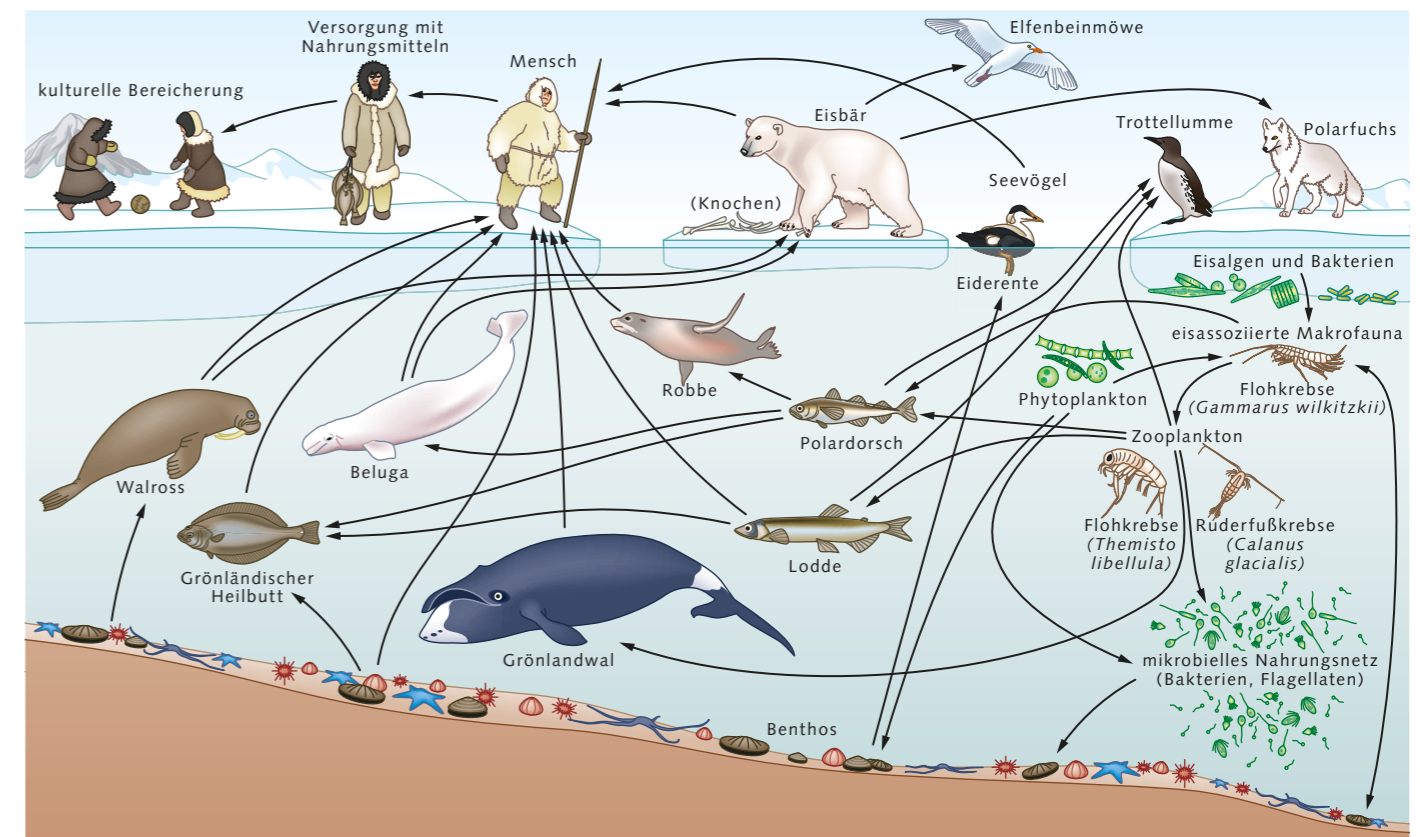
- ein verlangsamtes Wachstum, späte Geschlechtsreife,
- eine verringerte Aktivität,
- die Produktion von Frostschutzproteinen (vor allem bei Fischen),
- die Reduktion roter Blutkörperchen (auch vor allem bei Fischen),

- der Einbau ungesättigter Fettsäuren in Zellmembranen,
- Gewichtseinsparungen durch den Verzicht auf Kalk-einlagerungen in Schuppen und Skelett,
- ein Riesenwachstum,
- verkleinerte Gelege mit großen Eiern, die Nahrungsreserven für das Wachstum der Larven enthalten, und
- Lebendgeburten und intensive Brutpflege.

Temperatur und Futtermangel als Wachstumsbremsen

Kälte beeinträchtigt das Leben wechselwarmer Meeresbewohner nachhaltig. Sie beeinflusst unter anderem die Atmung und Muskelfunktionen und somit die Bewegungsfähigkeit der Tiere. Gleichzeitig bremst sie deren Wachstum und Entwicklung, weshalb die Lebenszyklen polarer Arten eine große Parallele aufweisen. Das Leben in den kalten Meeren geht sehr langsam vonstatten, und

4.24 > Eisalgen und frei im Wasser schwimmendes Phytoplankton bilden das Fundament des Nahrungsnetzes im Arktischen Ozean. Mit Hilfe von Sonnenlicht, Kohlendioxid und Nährstoffen produzieren sie Biomasse, von der anschließend alle Konsumenten zehren, angefangen beim Zooplankton über Bodenbewohner, Fische, Vögel, Meeressäuger bis hin zum Menschen.



Der Methusalem des Nordatlantiks

In den Gewässern Islands und Grönlands leben vermutlich Haie, die dort schon auf Beutefang gingen, als im Jahr 1789 in Paris die Französische Revolution ihren Lauf nahm – also vor 230 Jahren. Grund zu dieser Annahme gibt eine Studie, in der Forscher im Jahr 2016 das Alter von 28 Grönlandhaien (*Somniosus microcephalus*) bestimmt haben. Das älteste Weibchen mit einer Körperlänge von 5,02 Metern war demnach mindestens 272 Jahre alt, vielleicht aber auch bis zu 240 Jahre älter. Eine genauere Eingrenzung war nicht möglich, weil Grönlandhaie als Knorpelfische weder eine verknöcherte Wirbelsäule noch verknöcherte Flossenstrahlen besitzen, deren Wachstumsringe die Forscher hätten zählen können. Stattdessen blieben ihnen nur die Augenlinsen der Haie, die im Embryonalstadium gebildet werden und deren Kohlenstoffisotop-Gehalt die Wissenschaftler mit der Radiokarbonmethode analysierten. Die Ergebnisse machten dennoch Schlagzeilen, denn länger als die größten Fische des Arktischen Ozeans lebt kein anderes bekanntes Wirbeltier der Erde.

Grönlandhaie werden ausgesprochen selten in freier Natur beobachtet. Die Raubfische bevorzugen Regionen mit Wassertemperaturen unter fünf Grad Celsius und durchstreifen auf der Suche nach Kadavern oder Lebendbeute die Küsten- und Tiefseeregionen der Arktis und des Nordatlantiks. Ihre Wanderung durch arktische Gewässer gleicht aus Energie-spargründen jedoch eher einer Schleichfahrt. Mit einem Schwimmtempo von durchschnittlich 30 Zentimetern pro Sekunde (1,08 km/h) sind Grönlandhaie deutlich langsamer als die meisten anderen Haie, was sie aber nicht davon abhält, Fische, Robben und Belugawale zu jagen. Geschlechtsreif werden die Tiere in einem Alter von 156 (± 22) Jahren. Ihr Nachwuchs schlüpft bereits im Körper des Weibchens aus dem Ei und ist bei der Geburt vermutlich etwa 40 Zentimeter lang. Bei einem Wachstum von weniger als einem Zentimeter pro Jahr kann man nur erahnen, wie alt jene Grönlandhaie gewesen sind, die einst mit einer Länge von bis zu 7,3 Metern gefangen worden sind. Diesen Wert gibt die Wissenschaft nämlich bis heute als Maximalgröße für diese immer noch ziemlich unbekanntes Arktisbewohner an.



4.25 > Rekordfische: Grönlandhaie werden Hunderte Jahre alt.

jeder Entwicklungsschritt nimmt mehr Zeit in Anspruch als in den mittleren Breiten. So dauert die embryonale Entwicklung vieler wechselwarmer Meeresbewohner in den Polargebieten fünf- bis zehnmal so lange wie bei wärmeliebenden Arten in den mittleren Breiten. Daran schließen sich oft ein verlangsamtes Wachstum sowie eine verspätete Geschlechtsreife an. Während zum Beispiel Fische aus wärmeren Gebieten in der Regel nach ein bis vier Jahren paarungsbereit sind, brauchen die größeren Fischarten der Antarktis sechs bis zehn Jahre. Der Schwarze Seehecht (*Dissostichus eleginoides*) wird sogar erst in einem Alter von 13 bis 17 Jahren geschlechtsreif. Eine Ausnahme von dieser Regel bilden einige antarktische Seescheiden, Moostierchen und Schwämme, die ebenfalls zu den wechselwarmen Tieren gehören, in verschiedenen Studien aber verhältnismäßig schnell wuchsen oder sich zügig ausbreiteten. Dennoch entwickelten sich auch diese Tiere langsamer als Artverwandte in den mittleren Breiten.

Die verzögerte Entwicklung polarer Arten ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass Kälte den sogenannten Proteinstoffwechsel der Tiere erschwert. Darunter versteht man die stete Neubildung von Proteinen und ihren Abbau zu Aminosäuren in den Zellen. In wachsenden Organismen muss Protein ständig neu synthetisiert und den Organen und Strukturelementen zugeführt werden. Bei Temperaturen von null Grad Celsius und darunter wird es für wechselwarme Lebewesen schwierig, ihren Proteinstoffwechsel aufrechtzuerhalten und viele voll funktionsfähige Proteine zu produzieren. Forscher wissen heute, dass in den Zellen antarktischer Arten bis zu 80 Prozent der synthetisierten Proteine nicht weiterverwendet, sondern stattdessen wieder abgebaut werden. Bei wärmeliebenden Arten liegt dieser Anteil bei gerade einmal 25 bis 30 Prozent. Polare Arten weisen auch eine viel höhere Konzentration des Moleküls Ubiquitin auf. Es ist in den Zellen dafür verantwortlich, dass beschädigte Proteine erkannt und aussortiert werden. Der Abbau dieser schadhafte Proteine erfolgt dann in einem bestimmten Teil des Zellkerns, dem Proteasom. Es wird bei polaren Fischen zwei- bis fünfmal häufiger aktiviert als bei Fischen aus den mittleren Breiten.

Diese und andere zellulären Besonderheiten führen schlussendlich dazu, dass wechselwarme Tiere in den Polarmeeren im Zuge ihres Proteinstoffwechsels ver-

gleichsweise wenig Proteine herstellen, die am Ende auch für das Wachstum verwendet werden können. Zu wachsen ist demzufolge ein besonders energieaufwendiger Prozess für die polaren Arten und läuft deshalb bei vielen von ihnen nur sehr langsam ab. Im Gegenzug erreichen die wechselwarmen Bewohner des Nord- und Südpolarmeers ein ausgesprochen hohes Alter. Größere Fischarten wie der Schwarze Seehecht aus der Antarktis werden zwischen 15 und 30 Jahre alt. Die antarktische Muschel *Laternula elliptica* schafft sogar ein Alter von bis zu 36 Jahren. Im hohen Norden gilt die Islandmuschel (*Arctica islandica*) als Rekordhalterin. Im Jahr 2006 entdeckten britische Wissenschaftler vor Island ein Exemplar, das 507 Jahre alt war.

Forscher führen das langsame Wachstum wechselwarmer Meeresbewohner aber auch auf die extremen saisonalen Veränderungen der Polarmeere zurück. Die meisten wechselwarmen Tiere wachsen nur, wenn sie Nahrung finden. Futter aber steht vielen polaren Arten nur während der sommerlichen Algenblüten in ausreichenden Mengen zur Verfügung. In der Antarktis beispielsweise stellen mehr als 95 Prozent jener Arten, die sich von freischwebendem Phytoplankton oder aber am Meeresboden wachsenden Algen ernähren, im Winter das Fressen ein. Und jene, die weiterhin Nahrung aufnehmen, konsumieren nur einen kleinen Teil ihrer sonst üblichen Futtermenge. Das wiederum hat für die Tiere zur Folge, dass sich auch ihr Wachstum in erster Linie auf den Sommer beschränkt.

Immer im Energiesparmodus

Langsam verläuft in den Polarregionen aber nicht nur die Entwicklung der wechselwarmen Lebewesen. Die Tiere verbringen auch ihren Alltag im Energiesparmodus. Das heißt, sie bewegen sich deutlich langsamer und vermeiden unnötige Anstrengungen. Antarktische beispielsweise jagen ihrer Beute nicht in der Wassersäule hinterher, sondern legen sich kräfteschonend am Meeresgrund auf die Lauer. Die antarktische Muschel *Adamussium colbecki* klappt ihre Muschelschalen nur halb so oft zusammen wie Muscheln aus wärmeren Gebieten, und die räuberische Schnecke *Trophonella longstaffi* benötigt ganze 28 Tage, um durch die Schale ihrer Beute zu bohren

und diese aufzufressen. Ihre Artverwandten in zehn bis 15 Grad warmem Wasser benötigen dafür in der Regel nur zehn bis zwölf Tage.

Bis heute sind nur zwei Beispiele bekannt, bei denen antarktische Meerestiere den temperaturbedingten Nachteil bei Bewegungen durch spezielle Anpassungen kompensieren und deshalb in der Lage sind, diese Bewegung in einem ähnlichen Tempo auszuführen wie Arten außerhalb des Polargebiets. Dazu zählt erstens das Schwimmtempo der Antarktische Fische. Sie besitzen etwa doppelt so viele Mitochondrien in ihren Muskelzellen wie Artverwandte in wärmeren Meeren. Diese befähigen die polaren Barsche, so viel Energie zu erzeugen, dass sie bei Bedarf genauso schnell schwimmen können wie vergleichbare Arten aus mittleren Breiten. Das zweite Beispiel liefert die antarktische Muschel *Laternula elliptica*. Sie kann sich dank eines Fußmuskels, der im Vergleich doppelt bis dreimal so groß ist, genauso schnell im Meeresboden eingraben wie verwandte Muscheln aus mittleren und tropischen Breiten.

Fette, Frostschutz und farbloses Blut

Die weltweit bekanntesten Anpassungsstrategien an den Lebensraum Polarmeer kennt man in erster Linie von den Fischen. Alle Fischarten, die in Gewässern mit einer Temperatur von unter null Grad Celsius leben, schützen sich mithilfe von Frostschutzmitteln vor dem Tod durch Erfrieren. Dazu produzieren sie verschiedene Formen sogenannter Glykoproteine, die sich in sämtlichen Körperflüssigkeiten der Tiere befinden und von Filterorganen wie den Nieren nicht ausgeschieden werden. Glykoproteine sind Zuckerverbindungen und unterbinden das Wachstum von Eiskristallen im Gewebe der Fische. Sowie ein Eiskristall auch nur im Ansatz entsteht, lagern sich die Glykoproteine an dieses Minikristall an und verhindern, dass weitere Wassermoleküle an das Kristall andocken. Der so entstandene Mini-Eis-Zucker-Komplex wird anschließend über den Stoffwechsel ausgeschieden. Mithilfe dieses Schutzmechanismus senken die Fische den Gefrierpunkt ihrer Körperflüssigkeiten auf unter minus 2,2 Grad Celsius und sind in der Lage, Umgebungstemperaturen von bis zu minus 1,8 Grad Celsius zu überleben. Eine Anpassungsstrategie, die Fische aus der Arktis und Antarktis völlig

Radiokarbonmethode

Die Radiokarbonmethode, auch C14-Methode genannt, ist eine Methode zur Bestimmung des Alters organischer Stoffe. Dabei bestimmen Forscher das Mengenverhältnis des radioaktiven Kohlenstoffisotops ¹⁴C und des nicht radioaktiven Isotops ¹²C in der Probe und leiten davon ab, vor wie vielen Jahren das Tier oder die Pflanze gestorben ist.

4.26 > Die roten Blutkörperchen des Menschen sind wie winzige, bikonkave Scheiben geformt und mit dem eisenhaltigen Blutfarbstoff Hämoglobin gefüllt. Aufgrund ihrer Gestalt transportieren sie Sauerstoff auf sehr effiziente Weise. Gleichzeitig verhindern die Blutkörperchen, dass das giftige Hämoglobin in die Blutbahn entweicht.



unabhängig voneinander entwickelt haben und die bis heute weltweit als eines der besten Beispiele für eine sogenannte Parallelevolution gilt. Darunter versteht man die Entwicklung gleicher Merkmale durch nicht näher verwandte Arten.

Eine zweite besondere Anpassungsstrategie kommt nur im Südpolarmeer vor. Dort leben die sogenannten Eis- oder Weißblutfische (Channichthyidae), eine Familie der Antarktische. 16 Arten dieser Raubfischfamilie besitzen keine roten Blutkörperchen und auch keine Pigmente des Blutfarbstoffs Hämoglobin. Ihr Blut ist tatsächlich absolut weiß. Hämoglobin ist bei vielen Wirbeltieren und uns Menschen für den Transport des Sauerstoffes im Körper verantwortlich. Die Pigmente verfügen über jeweils vier Andockstellen für Sauerstoffmoleküle und transportieren das Atemgas auf besonders effiziente Weise von der Lunge, dem Ort der Sauerstoffaufnahme, in jene Körperregionen, wo es verbraucht wird. Auf dem Rückweg nehmen sie das im Gewebe produzierte Kohlendioxid huckepack und bringen es zurück zur Lunge, wo es ausgeatmet wird.

So gut dieser Gastransport auch funktioniert, Hämoglobin bringt nicht nur Vorteile. Frei im Körper kann der Blutfarbstoff zum Beispiel giftig wirken, weshalb er beim Menschen und bei vielen Wirbeltieren in den roten Blut-

körperchen eingeschlossen wird. Außerdem sinkt die Effizienz, mit der Hämoglobin Sauerstoff bindet, je kälter es wird. Unter extrem kalten Bedingungen können viele rote Blutkörperchen mit Hämoglobin das Blut sogar dickflüssiger machen und seinen Transport in den Adern erschweren – vor allem, wenn wie bei den Antarktischen auch noch Mini-Eiskristalle im Blut mitschwimmen.

Um dieses Viskositätsproblem zu vermeiden, haben viele polare Fischarten im Lauf der Evolution die Zahl ihrer roten Blutzellen reduziert. Den Eisfischen ist es sogar gelungen, ganz auf Hämoglobin zu verzichten. Sie leben mittlerweile nur noch vom Sauerstoff, der in den vergrößerten Kiemen der Fische oder aber über ihre Haut direkt in ihr Blut diffundiert und sich dort auf physikalische Weise löst. Das heißt, die Sauerstoffmoleküle docken nirgendwo an, sondern werden freischwimmend im Blut mittransportiert.

Die derart im Blut gelöste Menge Sauerstoff ist allerdings ziemlich klein. Eisfische wie der Schwarzflossen-Eisfisch (*Chaenocephalus aceratus*) müssen im Vergleich zu Antarktischen mit rotem Blut mit weniger als zehn Prozent der üblichen Sauerstoffmenge im Blut auskommen. Forscher gehen inzwischen davon aus, dass diese hämoglobinfreie Sauerstoffversorgung bei Eisfischen

nur deshalb funktioniert, weil nahezu alle Fische des Südpolarmeers aufgrund der kalten Bedingungen einen zehnbis 25-fach verlangsamten Stoffwechsel haben und damit weniger Sauerstoff verbrauchen als Fische in 30 Grad Celsius warmen Meeresgebieten. Die kalten Wassermassen des Südpolarmeers sind zudem sehr sauerstoffreich. Ihre Sauerstoffkonzentration ist fast doppelt so hoch wie jene tropischer Meere, was allen Bewohnern die Sauerstoffaufnahme erleichtert. Hätten Fische außerhalb der Antarktis irgendwann aufgehört, Hämoglobin zu produzieren, wären diese Tiere sofort gestorben. Unter antarktischen Bedingungen aber haben sie bis heute eine Überlebenschance.

Dennoch weisen die Fische mit dem weißen Blut einige spezifische Besonderheiten auf, die darauf schließen lassen, dass ihr Kreislaufsystem sehr viel Blut zirkulieren lassen muss, um die Sauerstoffversorgung sicherzustellen. Das Herz der Eisfische beispielsweise ist so groß, dass es vier- bis fünfmal so viel Blut pumpt wie das Herz von Fischen mit roten Blutkörperchen. Ihre Adern messen im Durchmesser das Eineinhalbfache und darin fließt im Vergleich zwei- bis viermal so viel Blut.

Je kälter der Lebensraum wechselwarmer Meeresbewohner wird, desto häufiger bauen diese auch ungesättigte Fettsäuren in ihre Zellmembranen ein. Auf diese Weise bleiben die Membranen bei niedrigen Temperaturen flüssig-kristallin und damit voll funktionsfähig. Ohne diese Schutzmaßnahme würden sich die Membranen bei Kälte in eine Art Gel verwandeln und ihre überlebenswichtige Durchlässigkeit einbüßen.

Antarktische Fische besitzen auch keine Schwimmblase. Um sich dennoch möglichst energiesparend fortzubewegen, lagern sie Lipide in der Leber und anderen Eingeweiden ein. Die Fette verleihen zusätzlichen Auftrieb. Außerdem reduzieren die Fische ihr Körpergewicht, indem sie vergleichsweise wenig Kalk in Skelett und Schuppen einbauen und es im Bedarfsfall auch durch leichtere Knorpel ersetzen. Das Skelett des Schwarzflossen-Eisfisches sieht deshalb nahezu durchsichtig aus.

Polare Giganten

Obwohl die meisten wechselwarmen Bewohner der Polar-meere langsam wachsen, erreichen vor allem antarktische Arten eine erstaunliche Größe, was Forscher dazu veran-

Das blaue Blut des Antarktischen Warzenkraken

Hämoglobin ist nur eines von vier Atmungspigmenten, welche in der Tierwelt für den Sauerstofftransport eingesetzt werden. Wirbellose Organismen wie zum Beispiel Borstenwürmer nutzen das grüne Chlorocruorin. Spritzwürmer, Rüsselwürmer und Armfüßer setzen auf einen Blutfarbstoff namens Hämyerithrin. Er ist im sauerstoffgeladenen Zustand farblos, mit Sauerstoff im Gepäck dagegen violett. Weichtiere, Spinnen, Skorpione, Krabben, Hummer und Kopffüßer wiederum bilden das blaue, kupferhaltige Pigment Hämocyanin. Von ihm wird angenommen, dass es sich vor allem in kaltem, sauerstoffarmem Wasser besser für den Sauerstofftransport eignet als Hämoglobin. Dennoch: Bei kalten Temperaturen löst sich der bei der Atmung aufgenommene Sauerstoff im Gewebe nur schwerlich wieder von dem blauen Pigment. Der Antarktische Warzenkrake (*Pareledone charcoti*) kompensiert diesen Temperaturnachteil auf zweierlei Weise. Zum einen enthält sein Blut bis zu 46 Prozent mehr Hämocyanin als das Blut verwandter Kraken aus wärmeren Gewässern. Zum anderen diffundiert in den Kiemen des Tieres viel Sauerstoff direkt in das Blut und löst sich dort auf physikalische Weise. So stellt der kleine Flachwasserbewohner aus den Schelfgebieten der Antarktischen Halbinsel sicher, dass er selbst bei Wassertemperaturen von bis zu minus 1,9 Grad Celsius seinen Körper bis in die Armspitzen mit ausreichend Sauerstoff versorgen kann.



4.27 > Das Blut des Antarktischen Warzenkraken *Pareledone charcoti* enthält bis zu 46 Prozent mehr Atmungspigmente als das Blut von Kraken aus wärmeren Regionen.

lasst hat, von einem „polaren Gigantismus“ zu sprechen. Ein Paradebeispiel sind unter anderem die Asselspinnen (Pycnogonida) der Antarktis. Sie erreichen einen Durchmesser von über 50 Zentimetern, während die größten Asselspinnen der gemäßigten Breiten gerade einmal drei Zentimeter groß werden. Die Flohkrebse des Südlichen Ozeans sind bis zu neunmal so lang wie ihre Verwandten in den Tropen, und die vasenförmigen Glasschwämme erreichen Rekordgrößen von zwei Meter Höhe und 1,5 Meter Durchmesser.

Welche Faktoren zu diesem polaren Riesenwuchs führen, wird in der Wissenschaft seit Jahrzehnten kontrovers diskutiert. Als mögliche Treiber gelten unter anderem:

- **geringe Unterhaltskosten:** Da die Temperaturen im Südpolarmeer niedrig sind und der Stoffwechsel der meisten wechselwarmen Arten gedrosselt ist, müssen polare Organismen insgesamt weniger Energie aufbringen, um einen großen Körper zu erhalten, als gleich große Tiere in wärmeren Regionen.
- **hoher Sauerstoffgehalt der polaren Meere:** Er erleichtert die Atmung und somit den Stoffwechsel.
- **hohe Siliziumkonzentration im Wasser:** Sie ermöglicht Kieselalgen, Glasschwämmen, Strahlentierchen und anderen Lebewesen, ihre siliziumhaltigen Skelette aufzubauen, ohne übermäßig viel Energie aufzuwenden.
- **hohes Futtermorkommen im Sommer:** Die großen Algenblüten bieten eine so reichhaltige Nahrungsgrundlage, dass Tiere mit einem verlangsamten Stoffwechsel ideale Wachstumsbedingungen vorfinden und der Wettbewerb unter den Individuen das Größtenwachstum fördert.
- **jahreszeitliche Schwankungen:** Der Energiegrundbedarf größerer Organismen ist im Verhältnis zur Körpermasse geringer als jener kleinerer Lebewesen, und diese können in der Regel auch größere Energiereserven anlegen. In Phasen mit wenig oder ausbleibender Biomasseproduktion haben sie daher Vorteile.

Die Konkurrenz der Arten hat in der Erdgeschichte immer wieder zu einem extremen Größtenwachstum geführt – die Dinosaurier sind hier nur ein Beispiel von vielen. Die

Vergangenheit zeigt aber auch, dass es diesen großen Arten meist sehr schwerfiel, sich an Umweltveränderungen anzupassen. Nicht zuletzt aus diesem Grund vermuten Wissenschaftler, dass die globale Erwärmung die Riesen der Polarmeere empfindlicher treffen könnte als kleinere Arten.

Große Eier, wachsame Eltern

Polare Fische laichen eine vergleichsweise kleine Zahl an Eiern. Diese sind aber deutlich größer als der Laich wärmeliebender Arten. Antarktische Fische betreiben zudem überraschend häufig aktive Brutpflege. Das heißt, die Fische deponieren ihre Eier auf Steinen am Meeresboden oder aber in den Öffnungen von Glasschwämmen und beschützen ihren Nachwuchs so lange, bis dieser als Fischlarve schlüpft.

Auffallend große Eier produzieren auch die Flohkrebse und der Krill des Südpolarmees. Deren Eier waren in der Regel zwei- bis fünfmal so groß wie die Eier ihrer Artverwandten in niedrigeren Breiten. Der Trend zu größeren Eiern in den Polarregionen zeigt sich selbst innerhalb einer Art. Asseln der Art *Ceratoserolis trilobitoides* beispielsweise produzieren im Weddellmeer Eier, die nahezu doppelt so groß sind wie jene, welche die gleiche Art ein Stück weiter nördlich in der Nähe Südgeorgiens erzeugt. Forscher erklären diese Entwicklung unter anderem mit dem unsicheren Nahrungsangebot in den Polargebieten. Während Tierarten in wärmeren Meeresregionen ziemlich sicher davon ausgehen können, dass ihr Nachwuchs ausreichend Futter finden und schnell wachsen wird, ist die Situation in den Polarmeeren eine andere. Hier gestaltet sich die Versorgungslage unter Umständen schwierig, und die niedrigen Temperaturen bedingen eine lange Entwicklungszeit. Dem Nachwuchs werden deshalb von Anfang an mehr Reserven im Ei mitgegeben. Außerdem sind die Jungtiere meist schon etwas größer, wenn sie als Larven schlüpfen und haben somit in der kritischsten Phase ihres Lebens bessere Überlebenschancen. Mittlerweile ist auch bekannt, dass die wechselwarmen Tiere der kalten, sauerstoffreichen Polarmeere größere Zellen besitzen als ihre Artverwandten in wärmeren, sauerstoffärmeren Gewässern. Die Eier sind also auch aus diesem einfachen Grund größer.

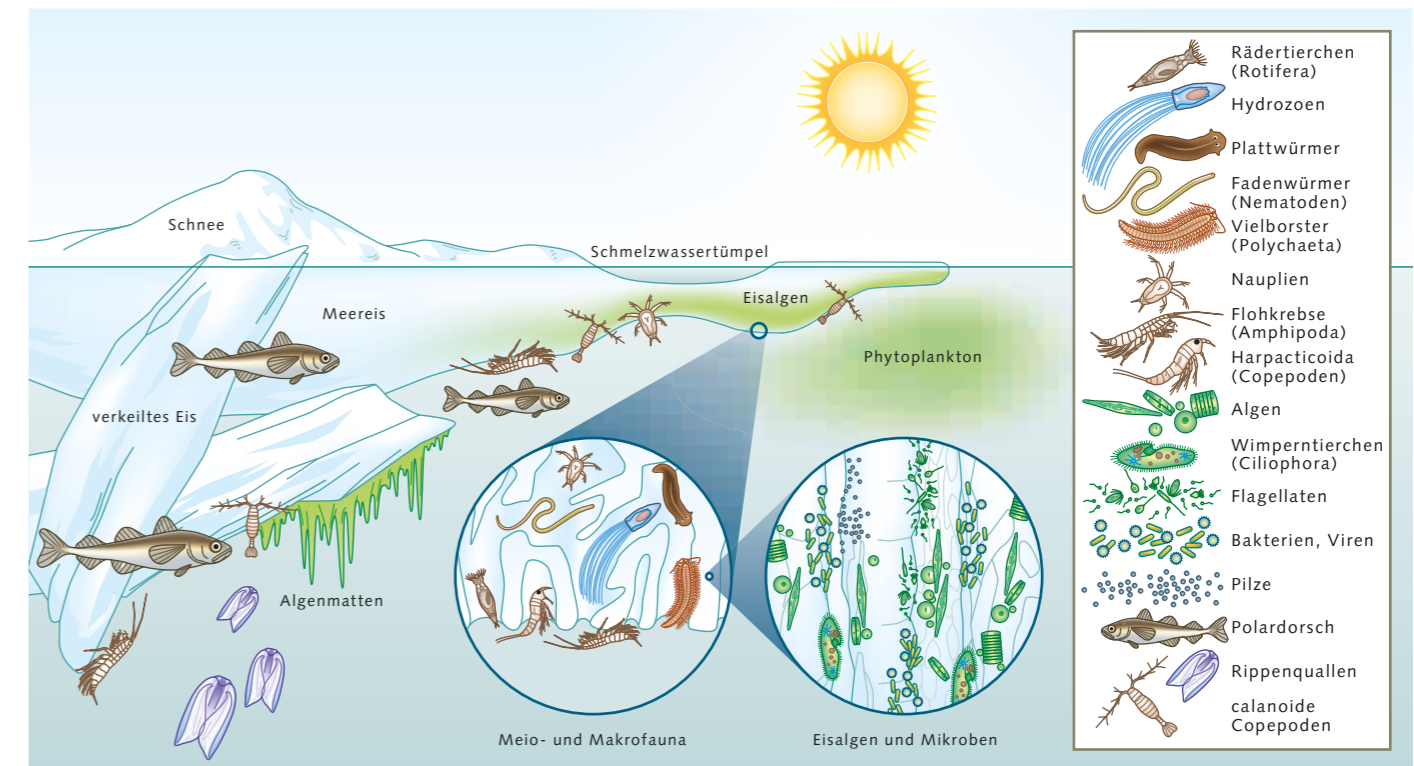
Auch nach der Eiablage und -befruchtung unterscheidet sich der Lebenszyklus vieler polarer Arten von dem ihrer wärmeliebenden Verwandten. Während wirbellose Meeresbewohner in wärmeren Gebieten oft ein Larvenstadium durchlaufen, in dem sie selbst aktiv nach Futter suchen müssen (planktotrophe Ernährung), ist im Südpolarmeer der Anteil jener Arten höher, die ihrem Nachwuchs einen Dottersack mitgeben, der die Larven bis zum nächsten Entwicklungsschritt (Metamorphose) mit ausreichend Nahrung versorgt (lecithotrophe Ernährung). Der Hauptgrund dafür ist abermals die kältebedingt verzögerte Entwicklungszeit in den Polarmeeren. Je weniger Nahrung die Larven finden, desto langsamer vollzieht sich ihre ohnehin schon schleppende Entwicklung, und das wiederum bedeutet, dass der Nachwuchs länger Gefahr läuft, selbst gefressen zu werden. Die Larven des antarktischen Seesterns *Odontaster validus* beispielsweise müssen selbst auf die Futtersuche gehen und verbringen unter Umständen bis zu 180 Tage in der Wassersäule, bevor sie sich am Meeresboden absetzen und die Metamorphose zum jungen Seestern vollziehen können.

Leben im, unter und auf dem Meereis

Das Meereis der Arktis und Antarktis stellt einen einzigartigen Lebensraum für die Flora und Fauna der Polarregionen dar – auch wenn die Eisdecke in vielen Regionen des Nord- und Südpolarmees nur saisonal vorhanden ist. Forscher kennen mittlerweile mehr als 2000 verschiedene Algen- und Tierarten, die im oder am Meereis leben. Die meisten von ihnen sind allerdings zu klein, um sie mit bloßem Auge zu entdecken. Zu den Algen und Tieren gesellen sich noch zahllose kälteadaptierte Bakterien, Archaeen, Viren und Pilze, sodass Forscher mittlerweile von einer Meereis-Lebensgemeinschaft ausgehen, die mehrere Tausend Arten umfasst und von deren Wachstum und Vermehrung das Überleben der gesamten polaren Meeresfauna abhängt.

Diese wichtige Nahrungskette beginnt mit den Eisalgen, von denen ein Großteil bereits beim Gefrieren des Meerwassers im Eis eingeschlossen wird – zusammen mit Partikeln, Nährstoffen, einer Vielzahl von Bakterien und so manchem Kleinstlebewesen. Im Gegensatz zu Fleisch

4.28 > In den vielen Poren, Taschen und Solekanälen des arktischen und antarktischen Meereises gedeiht im Frühjahr und Sommer eine artenreiche Gemeinschaft aus kälteadaptierten Eisalgen, Bakterien, Archaeen, Viren, Pilzen und Kleinstlebewesen. Mittlerweile kennen Forscher mehr als 2000 Arten, die im oder am Meereis leben.



und Gemüse in der Kühltruhe aber gefrieren diese Organismen nicht selbst, sondern überleben an der Eisunterseite oder aber in den Abertausenden kleinen, mit Lake und Meerwasser gefüllten Kanälen und Taschen, die sich im Meereis bilden. Um in diesem in der Arktis bis zu minus zehn Grad Celsius, in der Antarktis bis zu minus 20 Grad Celsius kalten und extrem salzreichen Umfeld zu existieren, haben die eisadaptierten Mikroorganismen die Zusammensetzung der Lipide in ihrer Zellmembran verändert. Diese schützt vor einer Verhärtung der Membran und garantiert, dass die Organismen weiterhin Nährstoffe aus dem Meerwasser aufnehmen können. An die Kälte angepasst ist auch die zelluläre Proteinproduktion, sodass auch bei niedrigen Temperaturen alle überlebenswichtigen Prozesse möglichst reibungslos ablaufen. Eisalgen bilden zudem Frostschutzproteine und legen im Sommer Fettreserven an, um den langen Winter zu überstehen. Trotz solcher Überlebensstrategien gilt dennoch: Je wärmer und weniger salzhaltig das Meereis ist, desto besser ist es für die Meereisflora und -fauna.

Die Gemeinschaft der Eisalgen besteht vor allem aus Kieselalgen, von denen viele Arten in beiden Polarregionen vorkommen. Wie viele Eisalgen in einem Stück Meereis gedeihen, hängt von der Lichtdurchlässigkeit des Eises, von seinem Salzgehalt sowie von den Nährstoffen ab, die im Eis mit eingeschlossen sind beziehungsweise aus dem darunterliegenden Wasser zur Verfügung gestellt werden. In mehrjährigem Meereis leben in der Regel mehr Algenarten als in jungem Eis. Diese älteren Schollen dienen auch als eine Art Samenbank – vor allem im Packeis, welches meist aus neugebildetem Eis, aus einjährigem Eis und aus mehrjährigen Schollen besteht. Algen aus dem mehrjährigen Eis wandern dann im Frühjahr, wenn die Temperaturen steigen und das Eis poröser wird, in das jüngere Eis und starten dort eine Algenblüte.

Eisalgen gedeihen in erster Linie in der untersten Schicht des Eises, in unmittelbarer Nähe zum Wasser. Arten wie die arktische Kieselalge *Melosira arctica* aber siedeln auch an der Eisunterseite und bilden dort im Frühjahr unter Umständen Algenmatten, die bis zu zwei Meter tief in die Wassersäule hängen. Bakterien dagegen kommen in nahezu allen Schichten des Meereises vor, häufen sich aber in der untersten Schicht des Eises sowie an der Eisoberfläche.

Den langen, dunklen Winter verbringt die Artengemeinschaft des Meereises relativ träge im Eis. Im Frühjahr aber, wenn die Sonne wieder über den Horizont steigt, wachsen und vermehren sich die Algen in der untersten Eisschicht sprunghaft. Die dafür benötigten Nährstoffe entziehen sie dem Meerwasser. Sobald die Blüte der Eisalgen einsetzt, stürzen sich winzige Algenfresser wie Ruderfußkrebse, Flohkrebse und Krilllarven auf den wachsenden Futterberg. So manche Algenansammlung aber sinkt auch in die Tiefe hinab und wird am Meeresgrund von Seegurken und anderen Bodenbewohnern verspeist.

Wenn in den vielen Nischen des Eises das große Fresen beginnt, lauern direkt unter dem Eis bereits die ersten Zooplanktonjäger. Zu ihnen zählen in der Arktis zum Beispiel räuberische Flohkrebse wie *Apherusa glacialis* oder *Gammarus wilkitzkii*. Doch auch sie müssen sich in Acht nehmen, denn neben den Flohkrebsen machen auch Polar- und Eisdorsche unter dem Eis Jagd auf Zooplankton. Die Fische stellen dabei vor allem Floh- und Ruderfußkrebse nach, fressen aber auch Schwebegarnelen. Der Polardorsch laicht sogar im Labyrinth des Packeises. Seine Millionen Jungtiere verbringen ihr erstes Lebensjahr versteckt in den Höhlen und Spalten des Eises und wandern mit dem Treibeis aus den Laichgebieten nördlich Sibiriens in die zentrale Arktis. Von Tauchgängen unter dem Eis wissen Forscher außerdem, dass gallertartiges Zooplankton wie Rippenquallen in dichten Ansammlungen unter dem Eis vorkommen kann. Diese Tiere scheinen sich vor allem in jenen Regionen anzusammeln, wo das Meereis besonders tief in die Wassersäule ragt und so Verwirbelungen des Wassers hervorruft.

Säugetiere und Vögel haben zwei Strategien, um in die Speisekammer unter dem Meereis zu gelangen. Sie nutzen entweder Löcher oder Risse im Eis, um zu den Nahrungsgründen vorzustoßen – eine Jagdmethode, die vor allem die verschiedenen Robbenarten des Nord- und Südpolarmeers anwenden –, oder aber sie warten auf den eisfreien Sommer. Arktische Säuger wie Belugas und die großen Bartenwale tun dies zum Beispiel. Sie verbringen den Winter außerhalb der Meereiszone und wandern erst Richtung Norden, wenn sich das Eis langsam zurückzieht und sich große Algenblüten in den Eisrandzonen bilden.

Eisbären wiederum gehen auf dem arktischen Meereis auf Robbenjagd. Sie bilden somit einen von mehreren



4.29 > Von unten betrachtet stellt das antarktische Packeis eine zerklüftete Landschaft dar, an deren lichtdurchlässigsten Stellen Algen die Eisunterseite grün bis bräunlich färben.

Endpunkten in einem Nahrungsnetz, dessen Existenz unmittelbar an das Meereis geknüpft ist. Die Lebensweise eines jeden Akteurs in diesem Netz ist so genau an die polaren Verhältnisse angepasst, dass diese Arten anderswo kaum eine Überlebenschance hätten. Für sie alle bedeutet der Rückgang des arktischen und antarktischen Meereises den Verlust von wertvollem Lebensraum.

Antarktischer Krill – das Massenphänomen

Ein polare Schlüsselart, deren Überleben unmittelbar vom Meereis abhängt, ist der Antarktische Krill (*Euphausia superba*). Der Krebs gehört zu den Leuchtgarnelen und damit zum Zooplankton und gilt als Tier der Superlative. Mit einer Körperlänge von bis zu sechs Zentimetern ist der Antarktische Krill nicht nur eine der größten Schwimmgarnelen des Südpolarmeers. Er kann zudem bis zu elf Jahre alt werden und bildet die größte tierische Biomasse auf der Welt. Sein zirkumpolares Vorkommen wird auf 133 Millionen Tonnen geschätzt, Larven ausgeschlossen. Mehr Gesamtgewicht bringt nur noch der Mensch auf die Waage. Der Begriff „Krill“ stammt übrigens vom norwegischen Wort für Walfutter ab. Früher bezog er auch andere Zooplanktonarten wie Flügelschnecken und

Quallen mit ein. Mittlerweile aber wird das Wort „Krill“ umgangssprachlich nur noch als Bezeichnung für *Euphausia superba* benutzt.

Antarktischer Krill kommt nur im Südozean vor und zählt somit zu den vielen endemischen Arten der Antarktis. Neben ihm gibt es noch fünf weitere Krebsarten in antarktischen Gewässern, darunter der ebenfalls bekannte Eiskrill (*Euphausia crystallorophias*). Diese Krebsart lebt vor allem in den sehr kalten Schelfmeerregionen im Süden, *Euphausia superba* hingegen bevorzugt tiefe, nördlichere Meeresgebiete, in denen die mittlere Wassertemperatur wärmer null bis drei Grad Celsius beträgt. Sein Lebensraum beschränkt sich somit auf etwas mehr als die Hälfte der Fläche des Südozeans, genauer gesagt auf Regionen zwischen 51 und 74 Grad Süd. In diesem Bereich konnten Wissenschaftler bislang sechs große Vorkommen identifizieren – eines im Gebiet des nördlichen Weddellmeers und der Scotiasee, eines vor dem Enderbyland, eines im Gebiet des Kerguelenwirbels, zwei kleinere Vorkommen im Norden des Rossmeers sowie eine Population in der Bellingshausensee westlich der Antarktischen Halbinsel.

Dieser lückenhaften Verbreitung ist auch geschuldet, dass der Krill nicht in allen Regionen des Südozeans die Rolle des Bindeglieds zwischen den Primärproduzenten und den höheren Konsumenten einnimmt. Forscher haben im Südlichen Ozean mittlerweile drei Zooplanktongemeinschaften mit ihren entsprechenden Schlüsselarten identifiziert. Das Zooplankton im nördlichen Teil des Südpolarmeers wird von der Salpe *Salpa thompsoni* und dem Flohkrebs *Themisto gaudichaudii* dominiert. Im südlichen Teil dagegen besetzen vor allem der Eiskrill und der Antarktische Silberfisch (*Pleuragramma antarctica*) die Schlüsselpositionen des Nahrungsnetzes. Der Antarktische Krill spielt hier eine wichtige, aber dennoch untergeordnete Rolle. In der Mitte aber sind der Antarktische Krill und sein enger Verwandter, die Schwimmgarnelle *Thysanoessa macrura*, gemeinsam mit einer Vielzahl von Ruderfußkrebsen die Hauptbeute für Jäger wie Fische, Wale, Robben, Pinguine und andere Meeresvögel.

In diesen Gebieten kommen die Leuchtgarnelen in Schwärmen mit bis zu 30 000 Tieren pro Kubikmeter Wasser vor. Im antarktischen Sommer halten sich die Krillschwärme in der Regel in den oberen 50 bis 150 Metern

der Wassersäule auf. Mit Beginn des Winters im Monat April aber sinken sie oft auf etwa 200 Meter Tiefe ab. Allerdings wurden sie auch schon in Tiefen von 1000 bis 3500 Metern gesichtet.

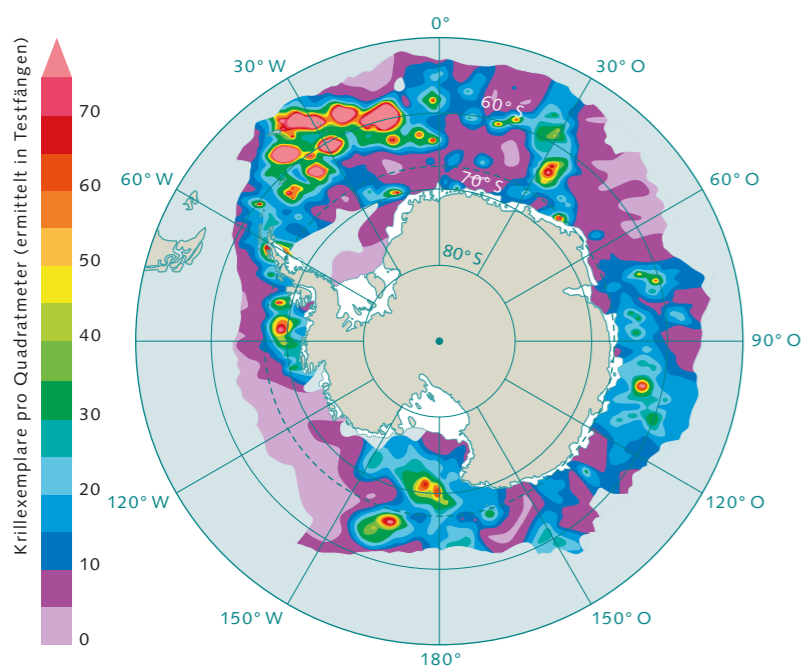
Bis auf eine Tiefe von mehr als 2000 Metern sinken die Eier der Krebstiere hinab, welche die Weibchen von Januar bis März legen. In der Tiefsee entwickeln sich aus den Eiern dann wiederum freischwimmende Larven, die gegen Ende des Sommers wieder aufsteigen und im oberen Teil der Wassersäule von den Oberflächenströmungen mitgerissen werden. Auf diese Weise wandern zum Beispiel die in der Bellingshausensee geschlüpften Krilllarven innerhalb von 140 bis 160 Tagen bis in die Gewässer rund um Südgeorgien.

Seine erste Überwinterung übersteht der Krillnachwuchs, indem er sich in den Nischen, Höhlen oder auch Ritzen des antarktischen Meereises versteckt und sich im Herbst von den Eisalgen und im Winter hauptsächlich von Ruderfußkrebsen und anderen Kleinstlebewesen ernährt. Wichtig scheint dabei zu sein, dass sich das Meereis früh im Winter bildet und die Larven somit über einen mög-

lichst langen Zeitraum Schutz und ausreichend Futter finden. Wenn das Eis dann im Frühjahr schmilzt und den Startschuss für die Algenblüten gibt, durchlaufen die Krebstiere ihren letzten Entwicklungsschritt zum jungen Rekruten.

Die Überlebenschancen des geschlechtsreifen Krills dagegen hängen weniger stark vom Meereis ab. Manche Krebstiere überdauern die dunkle Jahreszeit, indem sie zum Beispiel das Fressen einstellen und ihren Stoffwechsel um bis zu 50 Prozent reduzieren. In solchen Hungerphasen kommt es sogar vor, dass die Tiere schrumpfen. Andere wiederum suchen sich alternative Futterquellen. Das heißt, sie fressen Zooplankton, welches noch in der Wassersäule schwebt, oder aber sinken zum Meeresboden ab, wo sie herabgerieselte Tier- und Pflanzenreste vertilgen. Die Entscheidung, wann sie ihren Stoffwechsel und ihr Futterverhalten auf den Winterrhythmus umstellen müssen, fällen die Krebstiere anhand der Tageslänge. Diese Aussage basiert unter anderem auf Laborstudien, in denen die Tiere bei winterlichen Lichtverhältnissen auch dann nur wenig fraßen, wenn viel Futter in den Aquarien schwamm.

4.30 > Die Vorkommen des Antarktischen Krills verteilen sich ungleichmäßig um den südlichen Kontinent, wie Forscher unter anderem mithilfe von Netzfängen herausfanden. Besonders große Schwärme gibt es demnach vor allem im Nordosten der Antarktischen Halbinsel, vor der Küste des Enderbylands, im Gebiet des Kerguelenwirbels, im Rossmeer und in der Bellingshausensee.



Was lebte unter den Schelfeisen Larsen A und B?

Der plötzliche Zerfall der antarktischen Schelfeise Larsen A (1995) und Larsen B (2002) bot Wissenschaftlern im Jahr 2007 erstmals die Chance, zu untersuchen, welche Tiere in dem bis dato unbekanntem Lebensraum unter den großen Eiszungen vorkamen und wie sich die Fauna infolge des Eisverlusts veränderte. Ihre Inventur ergab, dass die Meeresströmungen bis zum Zusammenbruch der Schelfeise so wenig Nahrung unter die Eiszungen trugen, dass nur einige wenige Suspensionsfresser wie zum Beispiel die Vasenschwämme *Rossella nuda* und *Rossella racovitzae* unter dem Eis existieren konnten. Sie kamen allerdings so vereinzelt und in so kleiner Größe vor, dass jedes Tier die Forscher an einen Tennisball erinnerte, der allein auf einem Tenniscourt liegt. Der nächste Schwamm wuchs dann sinnbildlich gesprochen erst auf dem Spielfeld nebenan.

Zur großen Überraschung der Biologen lebten aber auch 16 Tierarten aus der antarktischen Tiefsee unter den Schelfeisen – darunter hauptsächlich Stachelhäuter wie die Seelilien *Bathycrinus australis* und *Dumetocrinus antarcticus*. Aufgrund dieser Entdeckung schlussfolgerten die Wissenschaftler, dass die Lebens-

bedingungen unter dem Schelfeis vermutlich denen in der Tiefsee sehr geähnelt haben, weshalb es den Tiefseebewohnern gelungen war, in den Schelfmeerbereich einzuwandern.

Mit dem Zusammenbruch der schwimmenden Eisflächen veränderten sich dann das Licht- und Nahrungsangebot im Wasser. Auch wenn die Regionen bis heute noch häufig von Meereis bedeckt sind, entstanden gelegentlich Algenblüten. Weiteres organisches Material wurde durch die Strömungen herantransportiert, sodass sich Pionierarten wie Seescheiden und Glasschwämme auf den ehemals verwaisten Flächen ansiedelten. Den Vasenschwämmen gelang es nun, sich erfolgreich zu vermehren, und in der Wassersäule schwammen, angezogen vom Nahrungsangebot, Eiskrill, Antarktischer Krill und Antarktische Silberfische. Sie wiederum lockten größere Jäger an. So zählten die Biologen im Sommer 2007 in der ehemaligen Schelfeisregion etwa genauso viele Krabbenfresserrobber und Zwergwale, wie sie normalerweise im restlichen Weddellmeer oder vor der Westküste der Antarktischen Halbinsel vorkamen. Die Fauna des Weddellmeers war also schon dabei, den so lange verlorenen Lebensraum zurückzuerobern.

Polare Ökosysteme auf dem Rückzug

> Die globale Erwärmung verändert die Grundpfeiler des Lebens in den Polarregionen – im Wasser ebenso wie an Land. Mit dem Meereis schrumpft die wichtigste Speisekammer der Polarmeere. Die steigenden Temperaturen zwingen kälteliebende Arten zur Flucht, doch Rückzugsorte gibt es kaum noch. Ihren angestammten Platz nehmen Einwanderer aus mittleren Breiten ein. Langfristig wird diese Entwicklung zum Verschwinden der einzigartigen polaren Flora und Fauna führen. Erste Anzeichen dafür gibt es bereits.

Andere Umweltbedingungen durch Klimawandel

Der Klimawandel transformiert die Lebensgemeinschaften in allen Teilen der Erde, insbesondere aber in den Polarregionen. Die Arktis und Regionen entlang der Antarktischen Halbinsel haben sich in den zurückliegenden Jahrzehnten in einem solchen Ausmaß erwärmt, dass sich die wichtigsten physikalischen Grundpfeiler des Lebens maßgeblich verändert haben. Dazu zählen für die Lebensgemeinschaften des Meeres beispielsweise:

- die Wassertemperatur,
- die Meeresströmungen,
- der Salz- und Nährstoffgehalt des Wassers,
- der Kohlendioxidgehalt des Wassers (Ozeanversauerung),
- der Sauerstoffgehalt des Wassers,
- das Meereisvolumen sowie
- die Häufigkeit von Eisbergabbrüchen.

Für die Lebensgemeinschaften an Land verändern sich im Zuge des Klimawandels unter anderem:

- die Lufttemperatur,
- die Niederschlagsformen und -mengen,
- die Dauer und das Ausmaß der Schnee- und Eisbedeckung,
- das Ausmaß des Permafrostes,
- die Häufigkeit und Intensität von Wetterextremen wie Hitzewellen und
- das Ausmaß der Küstenerosion.

Für die kommenden Jahrzehnte sagen Klimaforscher für die Polargebiete weiter steigende Temperaturen, eine zunehmende Versauerung des Meerwassers, verstärkte Schnee- und Eisschmelzen, ein verändertes Nieder-

schlagsaufkommen, einen Anstieg des Meeresspiegels sowie ein weitreichendes Auftauen der Permafrostböden vorher.

Zwei Formen der Anpassung

Lebewesen reagieren auf Veränderungen ihrer Umwelt, indem sie zunächst versuchen, ihr individuelles Verhalten innerhalb kurzer Zeit an die neuen Bedingungen anzupassen (Akklimatisierung). Sie kurbeln je nach Ausgangslage Atmung und Stoffwechsel an, pumpen mehr Blut oder Wasser und Nährstoffe durch den Körper, fressen unter Umständen mehr oder wandern, sofern sie beweglich sind, in Gebiete ab, in denen die gewohnten Umweltbedingungen herrschen. All diese Anpassungsversuche aber kosten Energie, welche die Lebewesen zusätzlich aufbringen müssen. Gelingt das, haben sie relativ gute Überlebenschancen. Fehlen dagegen die notwendigen Reserven, gelangen die Individuen möglicherweise schnell an ihre Leistungsgrenze und laufen Gefahr zu sterben.

Jene Individuen aber, die es schaffen, sich kurz- oder mittelfristig zu akklimatisieren, erhalten in der Regel auch die Chance, sich geschlechtlich fortzupflanzen und sich bestenfalls über mehrere Generationen hinweg genetisch anzupassen. Das heißt, die Lebewesen zeugen Nachwuchs, dessen Erbanlagen im Idealfall derart modifiziert sind, dass die jeweilige Folgegeneration besser mit den neuen Lebensbedingungen zurechtkommt als die Elterngeneration (genetische Adaption).

Beide Optionen gibt es auch für die Flora und Fauna der Polarregionen. Allerdings stellen sie aus zwei Gründen eine große, wenn nicht sogar zu große Herausforderung dar. Um in der Arktis oder Antarktis überleben zu können, haben die meisten polaren Tiere und Pflanzen einst ihren Stoffwechsel und Energieverbrauch so drastisch reduziert, dass die wenigsten von ihnen über ausrei-

chend große Reserven verfügen, um die prognostizierten Temperatursprünge auf Dauer abfedern zu können. Außerdem schließt die langsame Entwicklung vieler polarer Meeresbewohner einen schnellen Generationswechsel aus. Das heißt, die Möglichkeiten, sich zeitnah genetisch an die neuen Lebensbedingungen anzupassen, sind vor allem für höher entwickelte Tiere und Pflanzen gering. Anders sieht die Situation für Organismen mit kurzen Reproduktionszeiten aus. Bakterien, Viren und einzellige Algen beispielsweise pflanzen sich so häufig fort, dass genetische Anpassungen viel wahrscheinlicher sind als bei Weichtieren, Muscheln, Fischen, Vögeln oder Säugetieren. Die individuelle Anpassungsfähigkeit ist für Mikroorganismen deshalb auch nicht so entscheidend wie für langlebige Organismen.

Ökosysteme unter Druck

Da sich die Arktis und Teile der Antarktis doppelt so schnell erwärmen wie die restliche Welt, stehen die hochspezialisierten Lebensgemeinschaften beider Regionen besonders unter Druck. Die vielen artspezifischen Veränderungen, welche Forscher mittlerweile beobachten, lassen sich zu folgenden Trendaussagen zusammenfassen:

- Mit dem Meereis schrumpft in beiden Polarregionen der Lebensraum für Arten, die das Eis als Nahrungsquelle, Ruheplattform oder Kinderstube nutzen. Gleichzeitig verlagern sich insbesondere in der Arktis mit dem Rückzug der Eiskante Nahrungsgründe polwärts. Vögel und Säugetiere, die bislang an der Eiskante gejagt oder gefischt haben, müssen demzufolge längere Wege in Kauf nehmen.
- Das Beutespektrum der polaren Raubtiere verändert sich im Zuge der Meereseiswärmung.
- Die Gesundheit und Fitness vieler Tiere nehmen aufgrund der Nahrungsverknappung ab.
- Der Rückgang des Meeres und der Anstieg der Wassertemperaturen zwingen polare Meeresbewohner, in die wenigen noch verbliebenen kälteren Regionen abzuwandern. Eine solche Abwanderung dürfte beweglichen Hochseearten deutlich leichter fallen als Schelfmeeresbewohnern, die an das Leben im flachen Wasser angepasst sind.

- Die steigenden Luft- und Wassertemperaturen in der Arktis und Antarktis ebnet Einwanderern aus den mittleren Breiten den Weg in die Polargebiete. Diese Einwanderer konkurrieren unter Umständen mit den einheimischen Arten um Nahrung. Oder aber sie stellen selbst eine weniger nahrhafte Beute dar als jene polare Art, deren Platz im Nahrungsnetz sie nun einnehmen.
- Der Klimawandel beeinflusst polare Lebensgemeinschaften aufgrund seiner Wechselwirkungen auf vielfache Weise. Diese unterschiedlichen Stressfaktoren können sich gegenseitig in ihrer Wirkung verstärken oder aber auch abschwächen.
- Wie genau die klimabedingten Veränderungen das Leben der Tiere und Pflanzen in den Polarregionen verändern, hängt stark von den regionalen Gegebenheiten ab. Daher können sich die Richtung und auch das Ausmaß des Wandels von Region zu Region stark unterscheiden.

Meereisrückgang – die Speisekammer schrumpft

Der Rückgang des arktischen und antarktischen Meereises hat bereits heute grundlegende Auswirkungen auf die Lebensgemeinschaften im Eis sowie auf alle Arten, die auf direkte oder indirekte Weise vom Meereis abhängen.

4.31 > Verendeter Grauwal nördlich von San Francisco. Er ist einer von mehr als 200 Walkadavern, die seit Jahresbeginn an der Westküste der USA, Kanadas und Mexikos gefunden wurden.





4.32 > Das Wintermeereis des Beringmeers zieht sich kontinuierlich zurück. Zum Ende des Winters 2018 bedeckte es die kleinste Meeresfläche seit Beginn der Satellitenmessungen. Als Ursache vermuten die Forscher steigende Lufttemperaturen infolge des mädrierenden Jetstreams sowie wärmere Wassertemperaturen.

Je dünner das Meereis ist, desto mehr Licht erreicht im Frühjahr die Eisalgen und desto eher beginnen die so wichtigen Algenblüten. Forscher nehmen an, dass dünneres und früher schmelzendes Meereis in der Arktis die Primärproduktion zunächst einmal ankurbeln wird, weil den Algen im Eis und in der Wassersäule auf das Jahr gerechnet mehr Licht zur Verfügung stehen wird. Voraussetzungen für ein verstärktes Algenwachstum aber sind, dass erstens das Eis und das Meerwasser ausreichend Nährstoffe enthalten. Zweitens darf die Schneemenge auf dem Meereis nicht zunehmen. Eine dicke Schneedecke würde das Sonnenlicht daran hindern, bis zu den Eisalgen vorzudringen. Wachstumshemmend könnte sich außerdem eine stabilere Schichtung der oberen Wassermassen auswirken. Schmilzt das Meereis, steigt der Süßwassergehalt in der obersten Wasserschicht. Diese Veränderung führt dazu, dass sich das salzarme Oberflächenwasser schlechter mit salzigerem und dadurch dichterem und schwerem nährstoffreichem Tiefenwasser vermischt.

Computersimulationen der Meereisentwicklung in der Arktis deuten darauf hin, dass die Eisalgenblüten künftig deutlich früher im Jahr beginnen werden. Eine solche Verschiebung wiederum gefährdet das Überleben der

Ruderfußkrebse und vieler anderer Zooplanktonarten, deren Lebensrhythmus bislang genau auf den Vermehrungszyklus der Eisalgen abgestimmt ist. Rund um Spitzbergen beispielsweise beobachten Wissenschaftler seit den 1980er-Jahren eine Abnahme der eisassoziierten Flohkrebse. Verfrühte oder ausbleibende Eisalgenblüten könnten demzufolge eine fatale Kettenreaktion nach sich ziehen, wie Wissenschaftler sie seit Kurzem im nördlichen Pazifik beobachten.

Eisalgen machten in dieser Region bislang 60 Prozent der Primärproduktion aus. Im Winter 2017/2018 aber schrumpfte die Meereisfläche rund um Alaska auf gerade einmal die Hälfte des Vergleichswerts aus dem Jahr 1978. Entsprechend klein fiel die anschließende Eisalgenblüte aus. Infolgedessen hungerte zuerst das Zooplankton, welches sich von den Eisalgen ernährt. Als nächste darben vermutlich die unter dem Eis lebenden Fischarten, denn im anschließenden Sommer beobachteten die Bewohner Alaskas ein ungewöhnliches Seevogelsterben. Trottellummen (*Uria aalge*), die vornehmlich eisassoziierten Fischen wie Polardorsch (*Boreogadus saida*) und Lodde (*Mallotus villosus*) nachstellen, verhungerten in hoher Zahl. Und wenige Monate später, bis August 2019, spülte der Pazifik mehr als 200 ausgehungerte Grauwale tot an die Westküste Nordamerikas. Die Tiere waren vermutlich verendet, weil sie im Sommer zuvor in ihren arktischen Futtergründen im Beringmeer und in der Tschuktschen- und Beaufortsee zu wenig Nahrung gefunden hatten. Grauwale gehen als einzige Bartenwale am Meeresboden auf Futtersuche. Sie filtern Flohkrebse, Würmer, Muscheln, Fischeier und andere Bodenbewohner aus dem Schlamm und fressen sich in der Arktis reichlich Fettreserven an, bevor sie für die Geburt ihrer Kälber bis in den Golf von Kalifornien wandern.

Den eisbedingten Einbruch der Fischbestände im pazifischen Teil des Arktischen Ozeans spürten auch die Fischer Alaskas. Sie fingen bislang im Beringmeer wirtschaftlich wichtige Arten wie Pazifischen Pollack (*Gadus chalcogrammus*) und Pazifischen Kabeljau (*Gadus macrocephalus*). Beide Arten mögen kalte Wassermassen, die früher im Beringmeer eine Art Kaltwasserpool bildeten. Im Jahr 2018 aber fiel diese Kaltwasseransammlung so klein aus wie nie zuvor. Der Grund, so wird vermutet, war auch hier das fehlende winterliche Meereis. Die Fisch-



4.33 > Weil es im Sommer nicht mehr ausreichend Meereis vor der arktischen Küste Alaskas und Russlands gibt, sind rund 100 000 Pazifische Walrosse an einen Strand der Tschuktschensee gekommen, um sich von ihren Jagdzügen auszuruhen und ihre Jungen zur Welt zu bringen. Solche Massenansammlungen gab es auch früher schon. Je weiter sich das Meereis jedoch zurückzieht, desto häufiger werden sie.

schwärme jedenfalls wanderten anscheinend dem kalten Wasser hinterher Richtung Norden ab und somit außer Reichweite der Fischer. Sollte sich diese Kettenreaktion in den kommenden Jahren wiederholen, ist der Fortbestand der bislang lukrativen Fischerei im Beringmeer gefährdet. Noch im Jahr 2017 fingen und verarbeiteten die Fischer Pazifischen Pollack im Wert von 1,3 Milliarden US-Dollar. Bei einer Abwanderung der Bestände Richtung Norden aber wäre der Betrieb der großen Fabrikschiffe nicht mehr rentabel.

Forscher sprechen angesichts des zunehmenden Meereisrückgangs im Beringmeer von einem bevorstehenden Regimewechsel. Gemeint ist die Transformation eines polaren marinen Ökosystems, in dessen Mittelpunkt einst das Meereis als Lebensraum und Nahrungsquelle stand, in ein gemäßigtes System, in dem das Meereis und die mit ihm verbundenen Arten so gut wie keine Rolle mehr spielen.

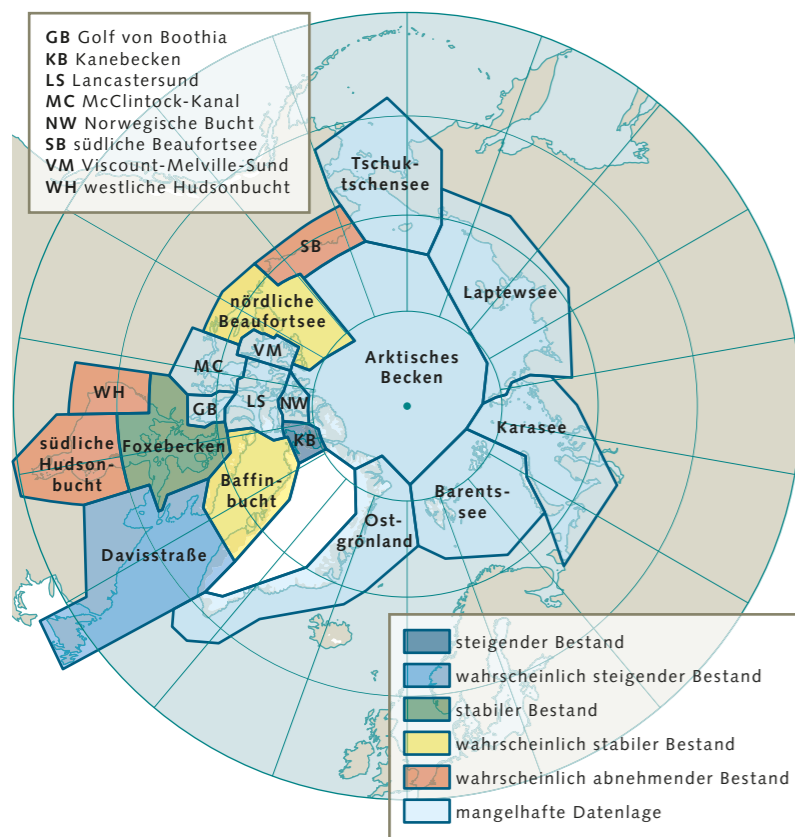
Zu wenig Eis für Walrosse und Eisbären

Der Meereisrückzug im Beringmeer verändert auch die Lebensbedingungen für Pazifische Walrosse (*Odobenus*

rosmarus divergens). Die bis zu 3,6 Meter langen und bis zu 1900 Kilogramm schweren Robben suchen am Meeresboden des Beringmeers und der Tschuktschensee nach Nahrung und verschlafen früher ihre Tauchpausen in kleinen Gruppen auf Eisschollen, die in der näheren Umgebung ihrer Fischgründe trieben. Auf dem Eis brachten die Kühe auch ihre Kälber zur Welt und zogen sie dort groß. Seit dem Jahr 2007 aber beobachten Forscher, dass die Walrosse vor allem im Sommer und Herbst immer seltener Eisschollen als Ruheplattform finden. Stattdessen sind die Tiere gezwungen, den Rückweg zum Land anzutreten. Oft kommen sie dann zu Tausenden an Küstenabschnitte, an denen Wind und Wellen ihnen wenig anhaben können. Erschöpft und dicht gedrängt liegen die Robben dann auf dem Strand, in Gruppen von bis zu 100 000 Tieren. Werden die Walrosse in einer solchen Situation gestört, sei es durch Eisbären, Flugzeuge oder aber durch den Menschen, bricht unter Umständen eine Massenpanik aus. Die massigen Tiere stürzen dann blindlings ins Meer und überrennen jeden, der nicht rechtzeitig aus dem Weg springt. Viele Kälber überleben eine solche Massenpanik nicht.

Solche Stampeden sind jedoch nicht die einzige Folge des Klimawandels für die großen Robben. Mit dem Anstieg

4.34 > Die Eisbären der Arktis leben in 19 Populationen, deren Bestandszahlen Forscher jedoch nur unzureichend kennen. 2019 gab es lediglich aus acht Regionen aussagekräftige Daten.

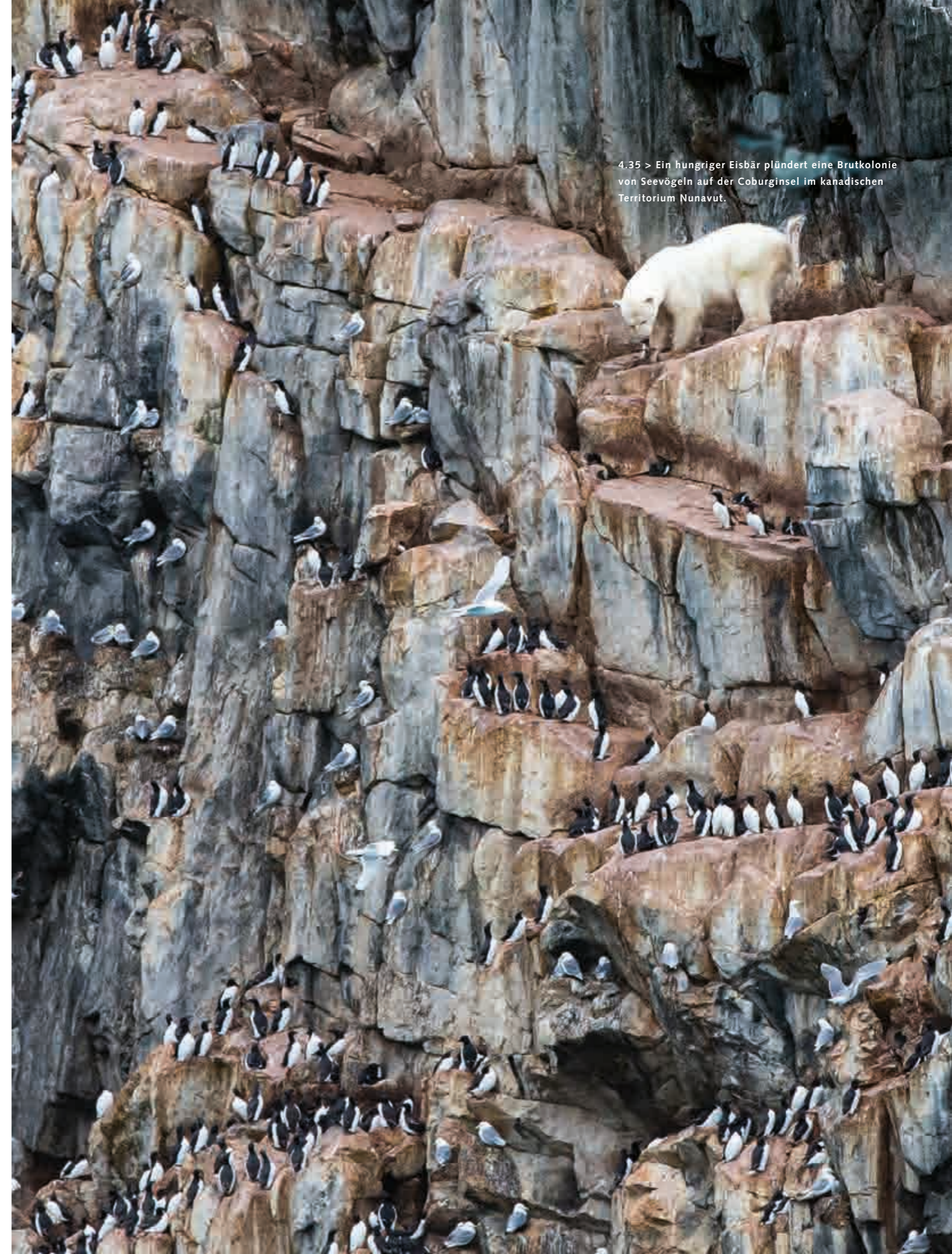


der Wassertemperaturen im pazifischen Teil des Arktischen Ozeans verändert sich auch das Nahrungsangebot der Walrosse. Subarktische Bodenbewohner und potenzielle Walrossbeutetiere wie die Dekorateurkrabbe (*Oregonia gracilis*) wandern von Süden her in die Tschuktschensee ein und erobern neue Lebensräume. Außerdem werden die Wege von der Küste bis zur Eiskante für die Tiere immer länger. Ureinwohner aus Alaska berichten, dass sie in den Mägen erlegter Walrosse immer häufiger Hochseefische finden und deutlich weniger Muscheln – eine Beobachtung, welche darauf hindeutet, dass sich das Beutespektrum der großen Robben verändert. Welche Auswirkungen dieser Wandel auf die Gesamtpopulation haben wird, bleibt abzuwarten. Bei den Sattel- und Klappmützenrobben im atlantischen Teil des Arktischen Ozeans verzeichnen Forscher bereits einen Rückgang der Geburten, eine abnehmende Fitness der Tiere und sinkende Bestandszahlen. Auch diese Entwicklung führen die Wissenschaftler auf den Rückgang des Meereises zurück.

Wenig hoffnungsvoll sind auch die Vorhersagen für Eisbären, denen der Klimawandel mit dem Meereis den einzigen Lebensraum nimmt, in dem sie ausreichend Futter finden. Neuen Erkenntnissen zufolge benötigen die Bären nämlich bis zu 60 Prozent mehr Energie als zuvor angenommen. Das heißt, die Tiere verbrennen selbst an Tagen, an denen sie sich kaum bewegen, mehr als 12 000 Kalorien. Dieser Grundbedarf lässt sich nur durch die Jagd auf Ringelrobben (*Pusa hispida*) und Bartrobbe (*Erignathus barbatus*) decken, denen die Bären auf dem Meereis nachstellen. Alle anderen Nahrungsquellen genügen nicht, um den Bären ein Überleben zu sichern. In den zurückliegenden Jahren waren vor allem junge Eisbären dabei beobachtet worden, wie sie an Land nach Futteralternativen suchten. Die Tiere fraßen Beeren und Seetang, machten Jagd auf Enten und kleinere Säugetiere und plünderten die Nester von Schneegänsen (*Chen caerulescens*) und Dickschnabellummen (*Uria lomvia*).

Langfristig gehen die Wissenschaftler deshalb davon aus, dass ein ungebremster Rückgang des arktischen Meereises in vielen Regionen zum Aussterben der Eisbären führen wird. Die Robbenjagd gelingt den Bären nämlich nur auf dem Eis, wo sie im Spätfrühling zunächst den Robbenjungen nachstellen. Diese können zu dieser Zeit noch nicht ins Wasser flüchten und haben als Beute einen Fettgehalt von 50 Prozent. Sowie der Nachwuchs sich dann ins Meer retten kann, lauern die Bären den Robben an einem der vielen Atemlöcher auf.

Eisbären, die das ganze Jahr hindurch Zutritt zum Eis haben, können jederzeit auf die Robbenjagd gehen. Tiere, die dagegen in Regionen leben, wo das Meereis im Sommer flächendeckend schmilzt, müssen diese eisfreie Zeit an Land verbringen und fasten die meiste Zeit. Je länger diese Bären nicht auf dem Meer jagen können, desto größer ist die Gefahr, dass sie verhungern. Biologen haben die Sterblichkeit ausgewachsener Bären für die westliche Hudsonbucht in Modellen berechnet. Demnach sterben drei bis sechs Prozent aller ausgewachsenen Männchen, wenn die sommerliche Fastenzeit 120 Tage andauert. Verlängert sich diese Hungerperiode um weitere 60 auf insgesamt 180 Tage, sind 28 bis 48 Prozent der Bären vom Hungertod bedroht. Längere Fastenzeiten beeinträchtigen nachweislich auch die Fortpflanzung der Raubtiere. Eisbärinnen bringen in Jahren mit wenig Meereis weniger



4.35 > Ein hungriger Eisbär plündert eine Brutkolonie von Seevögeln auf der Coburginsel im kanadischen Territorium Nunavut.



4.36 > Solange das fehlende Meereis den Eisbären den Zutritt zu den Robbenrevieren verwehrt, suchen die Tiere an Land nach Futter – etwa auf den Müllhalden arktischer Gemeinden.

und kleinere Junge zur Welt, gleichzeitig steigt in dieser Zeit die Sterblichkeit der Jungtiere.

Probleme bereitet den Eisbären auch die Abnahme der durchschnittlichen Meereisdicke, denn dünnere Eisschollen treiben schneller. Für die Eisbären bedeutet die verstärkte Drift, dass sie größere Anstrengungen unternehmen müssen, um in ihrem angestammten Jagdrevier zu verbleiben. Mehr Anstrengung wiederum bedeutet einen steigenden Energiebedarf, den die Tiere erst einmal decken müssen. Eine Aufgabe, welche die Bären mittlerweile immer öfter in die Nähe menschlicher Siedlungen treibt oder aber in Regionen, in denen sie zuvor selten beobachtet wurden. So stattete eine Eisbärin im Juni 2018 der US-amerikanischen Forschungsstation Summit Camp auf dem Grönländischen Eisschild einen Besuch ab. Die Station liegt in einer Höhe von 3200 Metern und weiter als 400 Kilometer entfernt von der nächsten Küste.

Schätzungen zufolge gibt es in der Arktis heutzutage rund 25 000 Eisbären, die sich auf 19 Populationen vertei-

len. Von acht dieser Populationen ist die Bestandsentwicklung bekannt. Gestiegen ist die Zahl der Bären einzig und allein im sogenannten Kanebecken südöstlich der Ellesmereinsel. Eine ähnliche Entwicklung vermuten die Wissenschaftler für die Population in der Davisstraße. Stabil sind bislang die Populationen in der Baffinbucht, im Foxebecken (kanadisch-arktischer Archipel) und in der nördlichen Beaufortsee. Rückgänge verzeichnen die Forscher dagegen in der südlichen Beaufortsee sowie in der südlichen und westlichen Hudsonbucht. Stimmen die wissenschaftlichen Prognosen, werden die Eisbären in diesen beiden Regionen in den nächsten 30 bis 40 Jahren aussterben. Im selben Zeitraum dürfte die Gesamtzahl der Eisbären in der Arktis um zwei Drittel einbrechen.

Zu wenig Eis im Kindergarten des Krills

In der Antarktis schrumpft die Meereisdecke bislang vor allem westlich der Antarktischen Halbinsel, dem Kindergarten der Krillpopulation im südwest-atlantischen Sektor des Südozeans (20 bis 80 Grad West). Sie umfasst mehr als die Hälfte des Gesamtbestands und ist damit die größte Krillpopulation der Antarktis. Wissenschaftler haben Fang- und Größendaten des Krills aus den zurückliegenden 90 Jahren ausgewertet und dabei Hinweise auf fundamentale Veränderungen gefunden. Nicht nur hat die Krillgesamtmenge um über 50 Prozent abgenommen, die großen Schwärme sind heutzutage auch viel weiter südlich zu finden als noch in den 1920er-Jahren. Damals gab es die größten Sommer-Vorkommen rund um Südgeorgien. Mittlerweile aber halten sich die Krebstiere überwiegend an der Nord- und Westküste der Antarktischen Halbinsel auf. Außerdem sind die einzelnen Tiere heutzutage im Durchschnitt sechs Millimeter länger als noch in den 1970er-Jahren. Diese Beobachtung lässt auf eine demografische Veränderung innerhalb der Krillschwärme schließen. Die Tiere sind heutzutage deutlich älter als früher, was bedeutet, dass der Antarktische Krill weniger Nachwuchs produziert – oder aber der Nachwuchs in geringerem Maße sein Larvenstadium überlebt.

Als Hauptgrund dafür wird der Rückgang des Meereseis westlich der Antarktischen Halbinsel vermutet. Wo das Eis fehlt, fallen Algenblüten kleiner aus, weshalb Zoo-

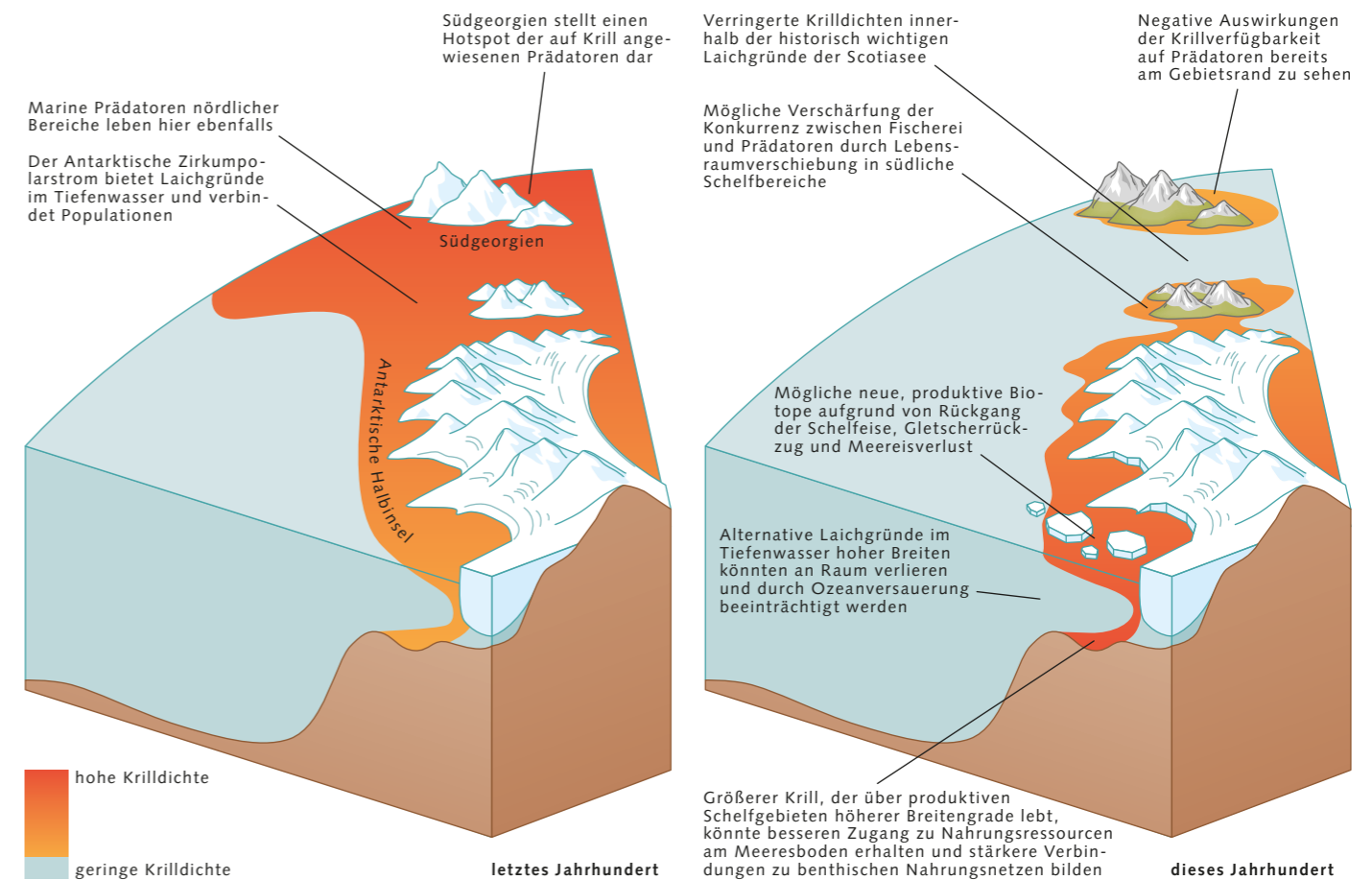
planktonarten wie Krill im Frühjahr zum Anfang ihrer Reproduktionszeit nicht mehr ausreichend Futter finden. Ein schlechtes Nahrungsangebot im Frühjahr beeinflusst die Eierproduktion sowie den Schlupferfolg des Nachwuchses. In den Nischen, Ritzen und Höhlen des Meereseis im Winter konnten sich die Krilllarven und Jungtiere bislang auch vor Feinden wie dem Antarktischen Silberfisch verstecken. Ohne diesen Rückzugsraum aber sind die Krebstiere ihren Jägern hilflos ausgeliefert.

Auf veränderte Lebensbedingungen treffen die Leuchtgarnelen aber auch in vielen Fjorden entlang der Antarktischen Halbinsel. Wo sich Gletscher auf das Land zurückgezogen haben, waschen Schmelzwasserbäche viele Sedimente in die Fjorde und trüben deren Wassermassen ein. Diese Verschmutzung trifft den Krill auf zweierlei Weise: Zum einen bedeutet trübes Wasser weniger Licht für die verschiedenen Algenarten, die in der Wasser-

säule leben. Diese können nicht mehr ausreichend Photosynthese betreiben, wachsen infolgedessen deutlich langsamer oder sterben nach kurzer Zeit und stehen dem Krill nicht mehr als Futter zur Verfügung. Zum anderen unterscheidet der Krill bei der Futteraufnahme nicht wirklich zwischen Phytoplankton und Sandpartikeln. Die Tiere fressen, was sie aus dem Wasser filtern. Besteht ihre Nahrung hauptsächlich aus Sandkörnchen, verhungern die Leuchtgarnelen. Aus der Potter Cove, einer gut erforschten Gletscherbucht auf King George Island, ist der Antarktische Krill aus diesem Grund schon verschwunden. Seinen Platz im Nahrungsnetz haben nun Salpen eingenommen, die in dem trüben Fjordwasser deutlich besser zurecht kommen.

Die Veränderungen der Krillpopulation im südwest-atlantischen Sektor hinterlassen deutlich Spuren im Artengefüge des Südpolarmeers. So bringen zum Beispiel die

4.37 > Die Erwärmung des Südozeans hat dazu geführt, dass der Antarktische Krill aus seiner einstigen Heimat, den Gewässern rund um Südgeorgien, abgewandert und mittlerweile weiter südlich, in den Küstengewässern der Antarktischen Halbinsel zu finden ist. Dadurch verändert sich das Nahrungsnetz in beiden Regionen nachhaltig.



Robben Südgeorgiens heute deutlich leichtere Kälber auf die Welt als zu jenen Zeiten, in denen sich die Krillschwärme noch rund um die Insel konzentrierten. Die Abwanderung der Krillschwärme Richtung Süden erschwert auch den Adéliepinguinen auf den Südlichen Shetlandinseln und entlang der Westküste der Antarktischen Halbinsel die Futtersuche. Ihre Kolonien sind in den zurückliegenden Jahrzehnten um bis zu 50 Prozent geschrumpft, was jedoch nicht nur am sinkenden Krillbestand liegt. Die veränderten Witterungsbedingungen an der Antarktischen Halbinsel spielen ebenfalls eine große Rolle.

Adéliepinguine nisten auf eis- und schneefreiem Untergrund. Werden die brütenden Vögel von Regenfällen oder aber einer starken Schneeschmelze überrascht, kann es passieren, dass ihre Nester überschwemmt werden und Eier oder Küken verloren gehen. Solche Verluste haben in der Vergangenheit ebenso zum Rückgang der Adéliepinguine entlang der Antarktischen Halbinsel beigetragen wie die sinkende Krillpopulation und der Rückgang des ebenfalls eisassoziierten Antarktischen Silberfischs, einer weiteren Leibspeise der Pinguine.

Leben am Wärmelimit

Wissenschaftler haben in den zurückliegenden Jahren auf vielfältige Art und Weise untersucht, wie polare Meeresbewohner auf steigende Wassertemperaturen reagieren. Die meisten Laborstudien belegen, dass die kälteliebenden, wechselwarmen Organismen des Nord- und Südpolarmeers einen Aufenthalt in wärmerem Wasser deutlich seltener überleben als verwandte Arten aus gemäßigten Meeresgebieten. Antarktische Wirbellose wie die Muschel *Limopsis marionensis*, der Schlangensterne *Ophionotus victoriae* oder auch der Armfüßer *Liothyrella uva* starben schon bei Wassertemperaturen von drei bis vier Grad Celsius. Sie gehören damit zu den weltweit wärmeempfindlichsten Meereslebewesen.

Um beurteilen zu können, wie groß die Anpassungsfähigkeiten eines wechselwarmen Meeresbewohners sind, bestimmen Forscher die Breite seines sogenannten Temperaturfensters. Gemeint ist der Bereich zwischen der Temperaturobergrenze, bis zu der dieser Organismus reibungslos funktionieren kann, und der entsprechenden

Untergrenze. Dieses Fenster ist je nach Art und Lebensraum unterschiedlich weit gefasst. Tiere aus den gemäßigten Breiten wie der Nordsee besitzen generell ein breiteres Temperaturfenster. Schließlich leben sie in einer Meeresregion, deren Wassertemperatur aufgrund von Gezeiten und Jahreszeiten stark schwankt. Das heißt, die Tiere müssen sowohl warme Sommer als auch kalte Winter aushalten. Das Temperaturfenster der Lebewesen in den Tropen oder Polargebieten dagegen ist zwei- bis viermal schmaler als jenes der Nordseebewohner.

Die Temperaturgrenzen einer Tierart variieren zudem mit dem Alter der einzelnen Individuen. Von Larven oder Jungtieren nahm man lange an, dass sie das schmalste Temperaturfenster besitzen. Wo es ihnen zu warm werde, könne sich die Art nicht ansiedeln, hieß es oft. Diese Annahme stimmt unter anderem für den Kabeljau und den Polardorsch. Bei beiden Fischarten genügt schon ein leichter Anstieg der Wassertemperatur, um einen Großteil ihrer Eier absterben zu lassen. Forschungsarbeiten an verschiedenen wirbellosen Tieren aus dem Südpolarmeer deuten allerdings darauf hin, dass der Nachwuchs durchaus unterschiedlich auf Wärme reagiert. In manchen Studien nahm die Sterblichkeit der Jungtiere erst ab einer Temperatur zu, bei der auch ausgewachsene Tiere Schwierigkeiten bekamen. In anderen waren die Jungtiere sogar wärmeresistenter als die älteren Generationen.

Deutlich wurde aber auch, dass sich der Nachwuchs polarer Arten in wärmerem Wasser schneller entwickelt. Pflanzt sich beispielsweise der antarktische Seeigel *Sterechinus neumayeri* in 0,5 Grad Celsius warmem Wasser fort, sinken die Larven schon 90 Tage nach der Eibefruchtung zum Meeresboden, wo sie dann die Metamorphose zum jungen Seeigel durchlaufen. In minus zwei Grad Celsius kaltem Wasser benötigen die Tiere für diese Entwicklung 120 Tage, wodurch die Larven auch mehr Zeit haben, mit der Strömung in weiter entlegene Regionen zu wandern. Verkürzt sich die Zeit des Larvenstadiums, könnte das Auswirkungen auf die Verbreitung der Art haben.

Ganz grundsätzlich wird mittlerweile davon ausgegangen, dass die meisten wechselwarmen Tiere der Polarregionen langfristig in bis zu drei bis vier Grad wärmerem Wasser überleben würden. Erwärmt sich das Meer jedoch über diese Obergrenzen hinaus, nehmen zum einen die Sterblichkeit und die Zahl der Missbildungen bei Jung-



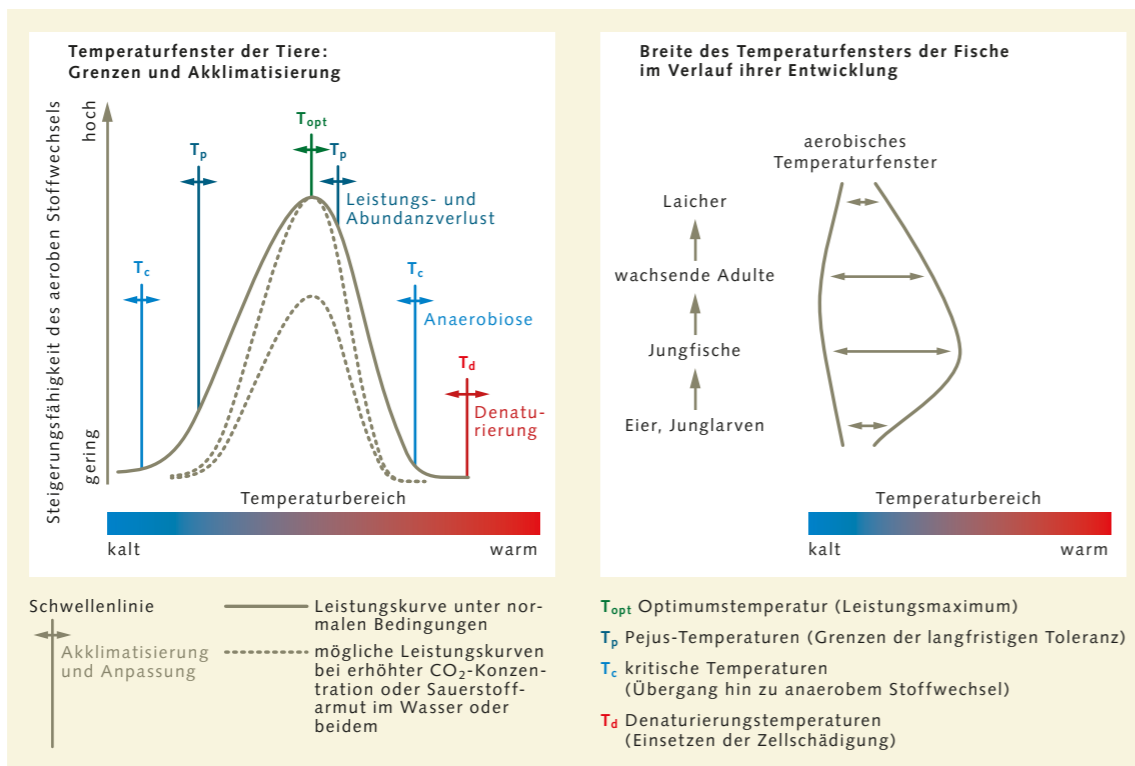
4.39 > Die Embryonen des Atlantischen Kabeljaus benötigen Wassertemperaturen von drei bis sieben Grad Celsius, um sich optimal entwickeln zu können. Ist das Wasser auch nur geringfügig wärmer, sterben die etwa 1,5 Millimeter großen Eier ab.

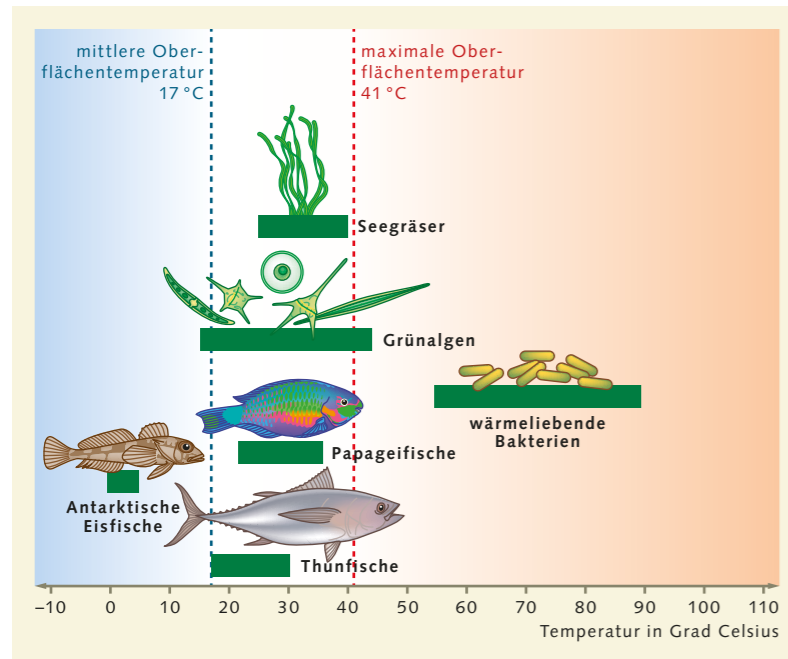
tieren zu. Zum anderen sind die Lebewesen dann aus verschiedenen Gründen nicht mehr in der Lage, ihren Energie- und Sauerstoffbedarf zu decken, der mit der Wassertemperatur steigt. Wird das Wasser wärmer, laufen alle körpereigenen Prozesse wechselwarmer Meeresbewohner schneller ab und benötigen demzufolge mehr Energie als zuvor. Das heißt unter anderem, dass die Tiere ihre aufgenommene Nahrung schneller verdauen und ein größerer Anteil der aufgenommenen Energie in den sogenannten Grundstoffwechsel fließt – gemeint ist der Erhalt der normalen Körperfunktionen. Fressen die Tiere unter diesen Bedingungen die gleiche Menge Futter wie zuvor, steht ihnen am Ende weniger Energie für das Wachstum und die Fortpflanzung zur Verfügung als unter kälteren Bedingungen.

Diese und ähnliche Wechselwirkungen werden vor allem im Winter gefährlich, wenn in den Polarregionen aufgrund des Lichtmangels so gut wie keine Primärproduktion stattfindet. Bislang reduzieren die meisten kälteliebenden Arten ihren Stoffwechsel im Winter. Sollte die globale Erwärmung der Meere jedoch anhalten, steigt der Energiebedarf auch in der futterarmen Polarnacht. Überleben werden dann nur noch jene Individuen, die in der Lage waren, ausreichend große Reserven anzulegen.

Von Langzeitstudien mit Fischen und anderen wechselwarmen Organismen in der Antarktis weiß man zudem, dass diese Arten sehr viel Zeit benötigen, um sich an neue Umweltbedingungen anzupassen. In Laborexperimenten vergingen bis zu neun Monate, bis die Tiere zum Beispiel

4.38 > Jedes Lebewesen besitzt einen begrenzten Temperaturbereich, in dem es funktionieren und existieren kann. Forscher bezeichnen diesen Bereich als Temperaturfenster. Am leistungsfähigsten ist ein Organismus, wenn die Umgebungstemperatur dem Mittelwert seines Temperaturfensters entspricht. Wird es wärmer oder kälter, nimmt die Funktionsfähigkeit des Organismus ab – unter Umständen sogar, bis er stirbt. Die Weite des Temperaturfensters verändert sich mit zunehmendem Alter der meisten Lebewesen. Fische beispielsweise ertragen als Jungtiere größere Temperaturschwankungen als im Embryonalstadium.





4.40 > Die Meeresbewohner haben sich über Generationen an die Lebensbedingungen in ihren Heimatgewässern angepasst und einen entsprechenden Temperaturtoleranzbereich entwickelt. Dieser fällt bei Arten aus den mittleren Breiten (Thunfisch) in der Regel größer aus als bei Arten in den Tropen oder in den Polarmeeren. Dafür leben tropische und polare Organismen meist an der oberen beziehungsweise unteren Grenze ihres Wohlfühlbereichs.

die Fettsäuren in ihren Zellmembranen der neuen Temperatur entsprechend umstrukturiert haben. Dieses verzögerte Akklimatisieren schwächt die Tiere auf lange Sicht, bedeutet es doch, dass viele Abläufe im Körper mehrere Monate lang nicht optimal funktionieren, wenn sich die äußeren Bedingungen schnell ändern – etwa bei einem Wechsel der Jahreszeiten. Bislang gehen Forscher zwar davon aus, dass die Wassertemperaturen in der Antarktis auch in den nächsten hundert Wintern bis dicht an den Gefrierpunkt sinken werden. Angenommen wird aber auch, dass sich die Winter verkürzen und die Sommer wärmer werden. Die kälteliebenden Meeresbewohner werden sich demzufolge dauerhaft im Anpassungsmodus befinden und in Zukunft nur selten optimale Lebensbedingungen vorfinden.

Abwanderung Richtung Pol

Der vermeintlich einfachste Weg, sich an die globale Erwärmung anzupassen, ist die Abwanderung in Gebiete, in denen die Temperatur noch gewohnte Werte erreicht. Für Landlebewesen ist das entweder in höheren Berglagen oder aber in nördlicheren beziehungsweise südlicheren Gefilden der Fall. Meeresbewohner dagegen

können in größere Tiefen ausweichen oder ebenfalls Richtung Pol abwandern. Forscher beobachten seit Jahrzehnten solche temperaturbedingten Wanderungsbewegungen von Plankton, wirbellosen Tieren, Fischen und Seevögeln, auch in den Randzonen der Polarmeere. Das Phytoplankton des Nordatlantiks beispielsweise verschiebt sich seit den 1950er-Jahren polwärts – und zwar um mehrere Hundert Kilometer pro Jahrzehnt. Im Südozean sind Kalkalgen heute viel weiter südlich zu finden als noch vor 20 Jahren.

Die Zooplankton-Gemeinschaften der Weltmeere sind seit Beginn der Industrialisierung im Durchschnitt rund 600 Kilometer polwärts gewandert, um den steigenden Wassertemperaturen zu entkommen. In Regionen, die sich besonders erwärmt haben, verschob sich das Verbreitungsgebiet der Kleinstlebewesen sogar um bis zu 2550 Kilometer.

Der Atlantische Kabeljau (*Gadus morhua*) ist auf der Flucht vor der Wärme bereits so weit Richtung Norden vorgestoßen, dass er im Sommer mittlerweile auch in den Gewässern Spitzbergens in großen Mengen vorkommt. Die warmen atlantischen Wassermassen überlagern in dieser Zeit die kalten arktischen Wassermassen aus der Barentssee, sodass der Kabeljau bei Wassertemperaturen um vier Grad Celsius optimale Bedingungen vorfindet. Sein arktischer Verwandter dagegen, der Polardorsch, muss bei dieser Wärme weichen. Als kälteliebende Art bevorzugt er Wassertemperaturen um null Grad Celsius. Der Weltklimarat sagt ihm und anderen kälteadaptierten Bewohnern des Nord- und Südpolarmeers ein Schrumpfen ihres Lebensraums voraus, weil es für sie auf lange Sicht keine weiteren Rückzugsorte mehr geben wird.

Wo Einwanderer aus den mittleren Breiten in die Polargebiete vordringen, konkurrieren sie unter Umständen mit den angestammten Arten um Nahrungsressourcen. So machen zum Beispiel atlantische und pazifische Schwertwale mittlerweile auch in arktischen Gewässern Jagd auf Robben und treten somit in Konkurrenz zu den Eisbären. Durch die Nordwärtswanderung des Kabeljaus bekommt auch der Polardorsch einen Nahrungskonkurrenten mehr. Dort, wo sich die beiden Fischarten das Meer teilen, machen sie unter Umständen Jagd auf dieselbe Beute.

Einwandernde Arten verändern das Nahrungsgefüge der Polargebiete aber auch, indem sie selbst zur Beute werden, dabei aber deutlich kleiner und weniger nahrhaft sind



4.41 > Kalkalgen und anderes Phytoplankton blühen im Frühjahr und Sommer in den nährstoffreichen Gewässern der Barentssee und färben das arktische Randmeer leuchtend grün bis milchig blau ein. Forscher beobachten, dass das Ausmaß dieser Algenblüten im Zuge des Klimawandels zunimmt. Gleichzeitig treten die Blüten heute weiter nördlich auf als noch zu Beginn des 21. Jahrhunderts. Grund dafür ist der Rückgang des arktischen Meereises.

als jene angestammten Arten, die sie verdrängt haben. Ein Beispiel dafür ist der atlantische Ruderfußkreb *Calanus finmarchicus*. Er dringt über den Nordatlantikstrom in den Arktischen Ozean vor und ersetzt in seinem nördlichen Verbreitungsgebiet mittlerweile fetthaltigere arktische Arten wie *Calanus glacialis* und *Calanus hyperboreus*. Für die Jäger der Ruderfußkrebse bedeutet dieser Artenwechsel, dass sie größere Mengen des Neulings fressen müssen, um am Ende die gewohnte Menge an Energie aufzunehmen. Sehr ähnliche Veränderungen beobachten die Wissenschaftler auch bei den Flohkrebse.

Die Polarmeere versauern

Als gigantischer Kohlenstoffspeicher hat der Ozean etwa ein Drittel des Kohlendioxids aufgenommen, das seit Beginn der Industrialisierung durch menschliche Aktivitäten in die Atmosphäre gelangte. Dadurch verlangsamten die Weltmeere die Erwärmung der Erde. Gleichzeitig aber hinterließ diese Aufnahme Spuren, denn wenn sich Kohlendioxid aus der Atmosphäre im Meerwasser löst, kommt es zu einer folgenschweren chemischen Veränderung des Oberflächenwassers. Normalerweise hat Meerwasser

einen pH-Wert von 8,2 im Durchschnitt und ist damit eher basisch. Grund dafür sind mineralische Bestandteile im Wasser, sogenannte Kalziumkarbonate wie Calcit und Aragonit, die einst aus verwitterndem Gestein an Land gelöst und dann ins Meer geschwemmt wurden.

Nimmt der Ozean nun aber Kohlendioxid auf, löst sich dieses Gas im Gegensatz zu Sauerstoff nicht einfach nur im Wasser. Im Gegenteil – eine Teilmenge des Kohlendioxids verbindet sich mit dem Wasser, sodass Kohlensäure entsteht. Dieses Prinzip kennt jeder, der sich sein Sprudelwasser zu Hause mit dem Sodastream selbst zubereitet. Auf Knopfdruck wird Kohlendioxid in die mit Leitungswasser gefüllte Flasche gedrückt und bildet dort sofort die für Kohlensäure typischen Bläschen. Dasselbe passiert gewissermaßen im Meer. Die Kohlensäure im Meer aber ist nicht stabil. Sie zerfällt in Bikarbonate, die sogenannten Salze der Kohlensäure, und Protonen (auch als Wasserstoffionen bezeichnet). Letztere treiben den Säuregehalt des Wassers in die Höhe, der Ozean versauert.

Das Maß für die Konzentration der Wasserstoffionen in einer Lösung ist der sogenannte pH-Wert. Dieser Zahlenwert gibt die Konzentration jedoch als negativen dekadischen Logarithmus an. Das bedeutet, je mehr Wasserstoffionen in einer Lösung vorhanden sind, desto kleiner ist der pH-Wert. Der mittlere pH-Wert der Meeresoberfläche ist seit dem Jahr 1860 von 8,2 auf 8,1 gesunken. Dieser vermeintlich kleine Schritt auf der logarithmischen pH-Skala entspricht einem realen Anstieg des Säuregehalts um 26 Prozent – eine Veränderung, wie sie die Weltmeere und ihre Bewohner in den letzten Jahrtausenden nicht erlebt haben. Bis zum Jahr 2100 wird der pH-Wert der Ozeane voraussichtlich um weitere 0,3 bis 0,4 Einheiten sinken und das Meerwasser so um hundert bis 150 Prozent saurer werden. Das heißt nicht, dass die Ozeane tatsächlich sauer sind, denn auch bei Werten um 7,7 bleiben sie chemisch betrachtet basisch, doch sind sie – relativ gesehen – saurer als zuvor.

Alle Meereslebewesen, die wie Fische, Muscheln oder Seesterne im Wasser atmen, haben im Vergleich zu Landlebewesen fünf- bis 20-mal weniger Kohlendioxid im Blut. Forscher nehmen deshalb an, dass kohlendioxidreicheres Wasser die Meeresbewohner auf eine andere, vermutlich dramatischere Art und Weise beeinflussen wird als Lebewesen, die Luft atmen. Steigt die Kohlendi-

oxidkonzentration in den Körperflüssigkeiten eines Lebewesens, führt diese auch dort zu einer Versauerung und beeinträchtigt unter anderem den Transport von Stoffen durch die Zellmembranen.

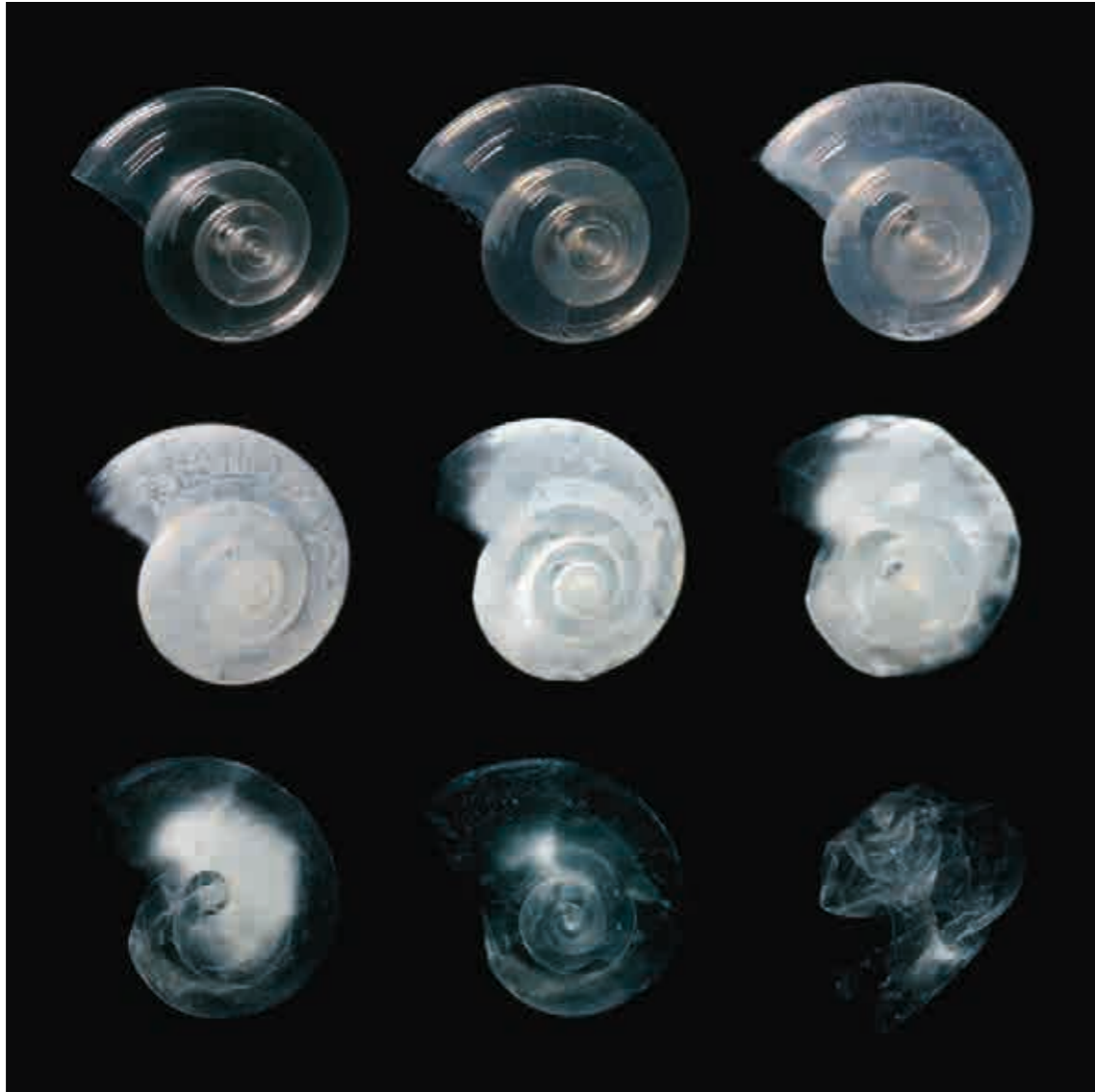
Besonders gefährdet sind kalkbildende Organismen wie Muscheln, Korallen, Stachelhäuter oder bestimmte Planktonarten, denn sie benötigen Kalziumkarbonate, um ihre Schalen und Skelette zu bilden. Die Konzentration dieser Mineralien im Meerwasser sinkt jedoch mit zunehmender Versauerung. Das bedeutet für die Organismen: Je saurer das Wasser wird, desto mehr Aufwand müssen sie betreiben, um ihre Schalen und Skelette zu bilden. Je mehr Energie die Lebewesen aber in die Kalkbildung investieren, desto weniger bleibt ihnen für andere überlebenswichtige Prozesse wie Wachstum oder Fortpflanzung. Auf lange Sicht sinken also die Größe, das Gewicht und die allgemeine Fitness der Organismen. Mit zunehmender Versauerung steigt außerdem die Gefahr, dass das saurere Wasser bestehende Muschelschalen, Schneckenhäuser oder Korallenriffe angreift und sie beschädigt oder sogar vollständig zersetzt.

Die Ozeanversauerung beeinflusst Organismen also ganz direkt – vor allem in den Polarregionen, wo die meisten Organismen schon heute nur überleben, weil sie ihren Energieverbrauch weitestgehend reduziert haben. Das heißt, viele Meeresbewohner haben kaum Energiereserven, um versauerungsbedingten Mehraufwand zu leisten. Erschwerend kommt hinzu, dass Meeresversauerung und -erwärmung Hand in Hand gehen. Das Wechselspiel beider Prozesse kann die Wirkung der Ozeanversauerung je nach Art verstärken oder aber auch abschwächen. Fakt ist jedoch, dass die Effekte auf einzelne Mitglieder des Nahrungsnetzes indirekt die gesamte Lebensgemeinschaft des Meeres beeinflussen.

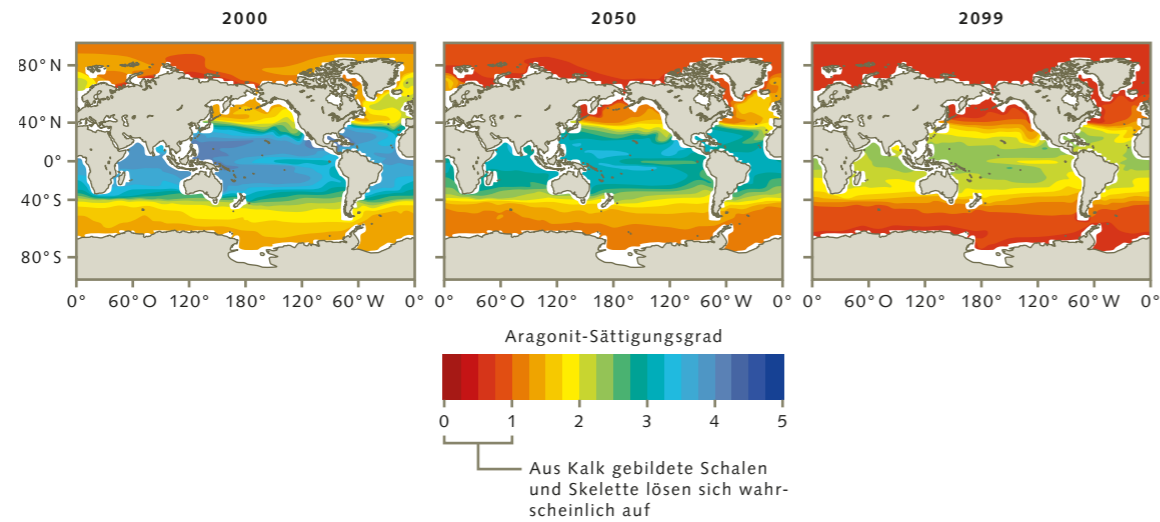
Hotspots der Ozeanversauerung

Die eisfreien Gebiete des Nord- und Südpolarmeers nehmen im Vergleich zum Weltozean mehr Kohlendioxid aus der Atmosphäre auf und versauern schneller als wärmere Meeresregionen. Das liegt in erster Linie an den immer noch vergleichsweise niedrigen Wassertemperaturen der Polarmeere. Gase wie Sauerstoff und Kohlendioxid lösen sich leichter in kaltem Wasser. In der Arktis tragen die

4.42 > In einem Laborexperiment haben Forscher die antarktische Flügelschnecke *Limacina helicina antarctica* unter jenen Versauerungsbedingungen gehalten, wie sie für das Jahr 2100 vorhergesagt werden – vorausgesetzt, die Menschheit reduziert ihren Kohlendioxidausstoß nicht. Das Ergebnis: Die Kalkschale der Meeresschnecke löste sich innerhalb von 45 Tagen auf.



4.43 > Weil sich Gase wie Sauerstoff und Kohlendioxid leichter in kaltem Wasser lösen, versauern die Polarmeere deutlich schneller als Gewässer in den mittleren und tropischen Breiten. Gleichzeitig sinkt mit zunehmender Versauerung der Polarmeere die Konzentration wichtiger Kalziumkarbonate im Wasser.



großen Flüsse zudem viel organisches Material in die Randmeere ein. Wenn dieses von Mikroorganismen zersetzt wird, entsteht ebenfalls Kohlendioxid, welches die Versauerung des Nordpolarmeers vorantreibt. Das gilt vor allem für die Laptewsee, die Ostsibirische See sowie die Tschuktschensee. Das Schmelzen der großen Eismassen verstärkt den Trend zusätzlich. Gelangt nämlich Schmelzwasser in das Meer, verdünnt es dessen Wassermassen. Das heißt, die Konzentration der Kalziumkarbonationen nimmt ebenfalls ab. Bei Algenblüten dagegen wird Kohlendioxid aus dem Meer entfernt und der pH-Wert des Wassers steigt wieder. Aus diesem Grund unterliegt der pH-Wert des Meerwassers insbesondere in den Polarmeer natürlichen Schwankungen.

Forscher sehen bereits deutliche Anzeichen dafür, dass die Polarmeere versauern. Die Reaktionen ihrer Bewohner auf den sinkenden pH-Wert des Wassers aber unterscheiden sich deutlich. In Labor- und Feldexperimenten überraschten zum Beispiel die Viren- und Bakteriengemeinschaften mit einer erstaunlich großen Widerstandskraft. Ein Teil der Bakterienarten wuchs in saurerem Wasser sogar besser als in Wasser mit einem normalen pH-Wert. Ähnlich robust zeigte sich auch das Phytoplankton. Dennoch geben die Forscher keine Entwarnung, denn wenn die Algen in den Experimenten erst einmal auf die Versauerung reagierten, zog das in der Regel grundlegende Artenverschiebungen für das gesamte Nahrungsnetz nach sich.

Zu den Profiteuren der Versauerung zählen Großalgen wie der arktische Kelp *Saccharina latissima*, auch Zuckertang genannt. Der steigende Kohlendioxidgehalt im Wasser erleichtert ihnen bis zu einem gewissen Grad die Photosynthese, sodass die Algen besser wachsen. Experimente belegen zudem, dass auch arktische Kaltwasserkorallen in einer saureren Umgebung ihr Kalkskelett bilden können – vorausgesetzt, sie finden ausreichend Futter, um ihren steigenden Energiebedarf zu decken. Langfristig befürchten Forscher aber, dass die Versauerung des Wassers zu Auflösungserscheinungen an den Fundamenten der Riffe führen könnte. Diese bestehen aus dem Kalk abgestorbener Korallen, der sich auflösen könnte, sollte der Säuregehalt des Nordpolarmeers steigen.

Zu den Verlierern der Versauerung gehören dagegen die arktischen und antarktischen Flügelschnecken. Diese Tiere tragen ein Schneckenhaus aus Kalk. Forscher beobachteten in Experimenten, dass die Schneckenhäuser unter Versauerungsbedingungen in der Regel kleiner und instabiler waren und größere Schäden aufwiesen als in Wasser mit normalem pH-Wert. Der grüne Seeigel *Strongylocentrotus droebachiensis* produziert in saurerem Wasser weniger Nachwuchs, weil die Eier schlechter befruchtet werden. Außerdem steigt die Zahl von Missbildungen bei den Embryos. Düstere Vorhersagen gibt es auch für die Stachelhäuter der antarktischen Schelfmeere. Diese Meeresregionen werden voraussichtlich so schnell versauern, dass Stachelhäuter wie Seeigel und Seesterne

in tiefere Gebiete werden abwandern müssen, wenn sie nicht im saureren Wasser Schaden nehmen wollen.

Fische gehören nach den Meeressäugern zu den am höchsten entwickelten Lebewesen im Weltozean. Sie können auf komplexe Regulationsmechanismen zurückgreifen, um sich an wechselnde Temperaturen und Kohlendioxidkonzentrationen im Wasser anzupassen. Die Tiere neutralisieren das überschüssige Kohlendioxid in ihrem Körper mithilfe säureregulierender Prozesse in ihren Kiemen, im Darmtrakt und in der Leber. Biologen haben diesen Effekt in der Vergangenheit ausführlich untersucht und dabei festgestellt, dass Fische innerhalb von wenigen Stunden einen niedrigeren pH-Wert ausgleichen können.

Die Forscher fanden allerdings auch heraus, dass diese Mechanismen erst bei ausgewachsenen Fischen umfassend funktionieren. Jungfische dagegen können sich noch nicht ausreichend schützen und reagieren deutlich auf eine Versauerung des Meeres – so zum Beispiel der Nachwuchs des Kabeljaus. In Versauerungsexperimenten schlüpfen die Fischlarven in kleinerer Zahl aus dem Ei, waren zu diesem Zeitpunkt deutlich kleiner als unter normalen Umweltbedingungen und verbrauchten mehr Sauerstoff. Gleichzeitig starben bei pH-Werten, wie sie für das Ende des 21. Jahrhunderts vorausgesagt werden, doppelt so viele Jungfische in den ersten 25 Tagen ihres Lebens als unter heutigen Bedingungen. Studien mit jungem Atlantischem Hering ergaben, dass der Fischnachwuchs in versauertem Wasser häufiger Organschäden und -missbildungen aufweist. Diese fielen umso schwerwiegender aus, je saurer das Wasser in den Testbecken war.

Solche artspezifischen Folgen der Ozeanversauerung verändern indirekt das gesamte Artengefüge der Polarmeere – etwa, indem eine Art infolge der Versauerung klare Wettbewerbsnachteile erfährt, während ihre Konkurrenten unbeeindruckt bleiben. Biologen nehmen zum Beispiel an, dass nicht kalkifizierende Algenarten künftig deutlich bessere Wachstumsbedingungen vorfinden werden als kalkbildende Algen. Eine solche Entwicklung könnte langfristig dazu führen, dass an jenen Stellen, wo heute noch große Kelpwälder wachsen, künftig eher matenähnliche Algenteppeiche gedeihen. Die Versauerung könnte aber auch zur Folge haben, dass wichtige Kalkstrukturen im Meer verloren gehen – und mit ihnen die

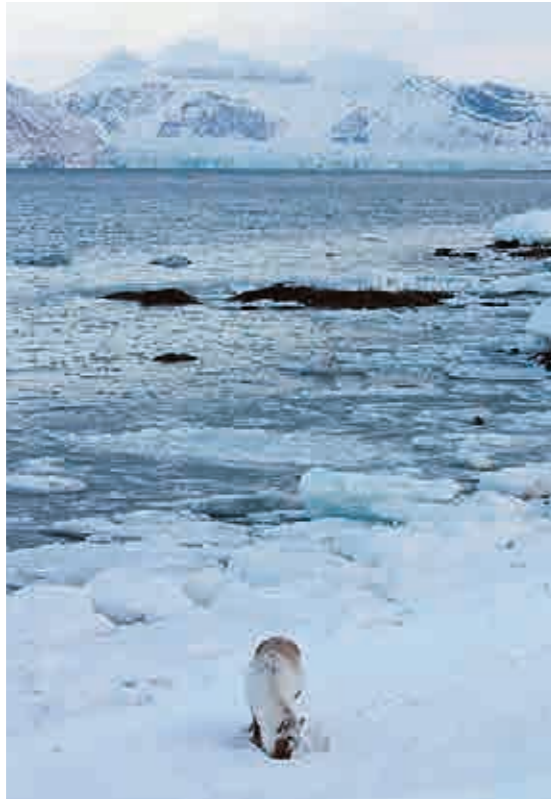
Arten, die auf oder in diesen Strukturen leben. Gefährdet sind hier insbesondere Kaltwasserkorallenriffe, Muschel- und Maerlbänke. Letztere sind küstennahe Sand- oder Kiesbänke, die zu mehr als 50 Prozent aus verzweigten lebenden und toten Rotalgen bestehen. Muschelbänke zum Beispiel dienen vielen Seevögeln und Meeressäugern wie dem Walross als Futterquelle. Sollten sie infolge der Versauerung absterben, fehlt nicht nur den höher entwickelten Tieren, sondern auch dem Menschen eine entscheidende Lebensgrundlage.

Verschärft wird die Situation durch das Zusammenspiel von Ozeanversauerung und Meerereswärmung. Eine große Metaanalyse hat ergeben, dass arktische Meeresbewohner empfindlicher auf saureres Wasser reagieren, wenn ihre Umgebung gleichzeitig wärmer wird. Das gilt beispielsweise für Flügelschnecken und Fische. Sollten sich beispielsweise die Versauerung und Erwärmung der Barentssee so fortsetzen wie bisher, wird die dort ansässige und für die Fischerei enorm wichtige Kabeljaupopulation vermutlich bis zum Ende dieses Jahrhunderts zusammenbrechen. In Studien mit antarktischen Fischen und Seeigeln wiederum wurde deutlich, dass Temperaturveränderungen die Tiere in einem deutlich größeren Ausmaß unter Stress setzte als saurer werdendes Wasser. An Letzteres konnten sich viele Versuchstiere anpassen. Allerdings benötigten sie dafür jede Menge Zeit, die sie in freier Natur vermutlich nicht haben werden.

Die großen Unterschiede in den Reaktionen der einzelnen Arten auf die zunehmende Versauerung und Erwärmung der Polarmeere erschwert es den Wissenschaftlern bislang, allgemeingültige Aussagen zu treffen. Außerdem fehlen vor allem für die Antarktis aussagekräftige Langzeitstudien, die mehrere Umweltfaktoren berücksichtigen. Alle bisherigen Ergebnisse und Prognosen deuten aber darauf hin, dass mit dem sinkenden pH-Wert des Wassers grundlegende Veränderungen der Lebensgemeinschaften einhergehen werden, die zumindest in der Arktis auch den Menschen unmittelbar treffen werden.

Veränderungen für Tiere an Land

Der Klimawandel verändert auch die Landflächen der Polarregionen und somit den Lebensraum ihrer Bewohner – vor allem in der Arktis. Die Schneedecke schmilzt



4.44 > Rentiere auf Spitzbergen haben sich angewöhnt, in Wintern mit viel Regen und überfrierender Schnee- oder Eisdecke vom Meer angespülten Seetang zu fressen.

heute in vielen Regionen deutlich früher im Jahr, das Meereis zieht sich früher und länger zurück, und die Vegetation beginnt aufgrund der wärmeren Temperaturen früher im Jahr zu sprießen. Dieser Wandel hat Folgen. Forscher beobachten, dass polare Arten ihre Verbreitungsgebiete Richtung Norden verschieben, während an der Südgrenze subarktische Arten einwandern. Die ganze Tundra ist in Bewegung, selbst Elche machen sich auf den Weg, wie ein sibirischer Rentierhirte schon vor mehr als fünf Jahren beobachtete.

In Zukunft dürften die Veränderungen noch dramatischer ausfallen, denn selbst wenn es der Menschheit gelingt, die globale Erwärmung auf zwei Grad Celsius zu begrenzen, werden die Lufttemperaturen in der Arktis um 2,8 bis 7,8 Grad Celsius steigen und Arten aus südlicheren Gefilden den Weg bereiten. Den einzigartigen Lebensgemeinschaften der Hocharktis dagegen droht langfristig

das Aus, denn ihre Rückzugsmöglichkeiten werden durch den Arktischen Ozean begrenzt. Überlebenschancen werden vermutlich nur jene polaren Arten haben, denen es gelingt, sich in Höhenlagen oder aber auf entlegene Inseln zurückzuziehen.

Welche Arten künftig in der Arktis überleben werden, wird sich vor allem im Winter entscheiden. Temperaturstress und Überflutungen durch Starkregen oder plötzliche Schneeschmelze bedrohen beispielsweise kleine Nagetiere wie Lemminge, die bislang unter der Schneedecke Schutz vor Kälte und Feinden fanden. Eisregen oder fest überfrierende Schneedecken behindern auch Karibus, Rentiere und Moschusochsen bei der Futtersuche. Die überlebenswichtigen Flechten sind dann so fest im Eis eingeschlossen, dass die Tiere sie mit ihren Hufen nicht freikratzen können. Die Tiere drohen zu verhungern, vor allem wenn es sich um Herden handelt, die auf arktischen Inseln oder in sehr isolierten Gebieten leben und demzufolge kaum eine Chance haben, in andere Regionen abzuwandern. Die Rentiere im Westen Spitzbergens sind deshalb dazu übergegangen, in Wintern mit stark vereistem Untergrund am Strand nach Futter zu suchen. Die Tiere ziehen dann die Küste entlang und fressen angeschwemmten Kelp und Seetang. Die salzigen Algen scheinen jedoch nur eine Notlösung zu sein, denn in Wintern mit gewohnten polaren Witterungsbedingungen begeben sich die Tiere wieder auf die Suche nach Flechten.

Die zunehmende Erwärmung der Arktis bringt jedoch auch den Kalender der Natur durcheinander. Das heißt, die zeitliche Abfolge wichtiger biologischer Abläufe verschiebt sich. In einigen Regionen Grönlands beginnt die Vegetation mittlerweile 30 Tage früher im Jahr zu wachsen. Die Kälber der Rentiere aber werden weiterhin zur gewohnten Zeit geboren, denn der Fortpflanzungsrythmus der Tiere wird durch die Tageslänge gesteuert und nicht durch die Temperatur. Fanden die Rentierkühe und ihr Nachwuchs früher also genau zur richtigen Zeit das qualitativ beste Futter, kommen sie inzwischen zu spät, wodurch die Sterblichkeit der Kälber gestiegen ist.

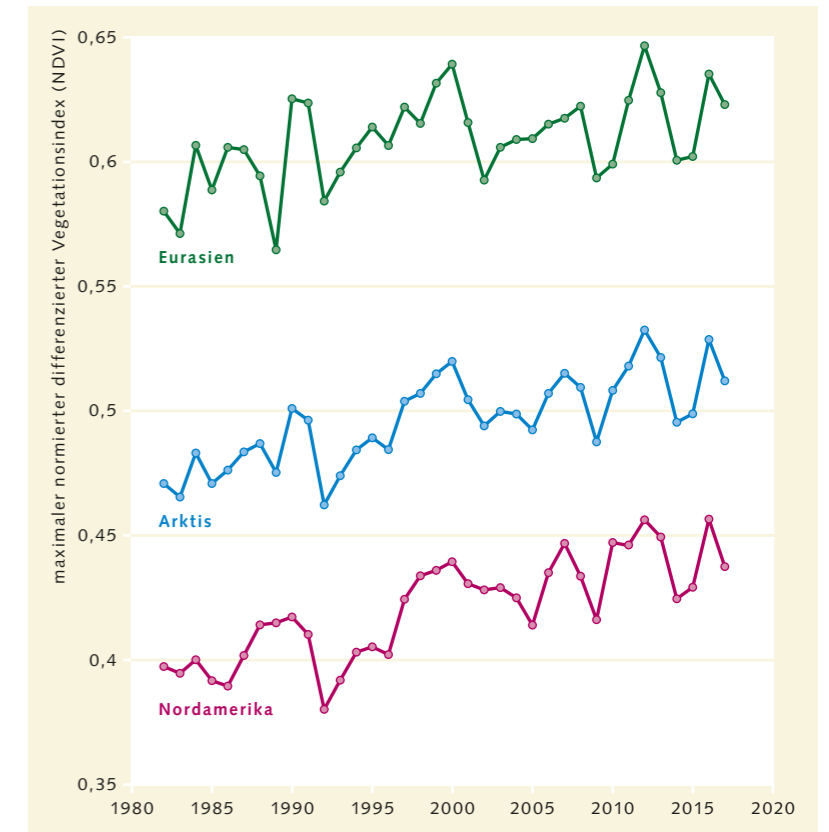
Veränderungen der polaren Pflanzenwelt

Mit Blick auf die Vegetation stellen sich Forscher bereits seit mehreren Jahrzehnten die Frage, ob die Erwärmung



und der steigende Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre den Pflanzen im Nordpolargebiet einen Wachstumsschub verleihen werden oder ob die zunehmende Wärme den kalteadaptierten Gewächsen schadet – und es dadurch langfristig eher zu einem Verlust der Artenvielfalt kommen wird.

Die Antwort darauf lautet bislang: sowohl als auch, denn die Entwicklung verläuft nicht einheitlich. In einigen Regionen der arktischen Tundra beobachten Forscher eine Zunahme der pflanzlichen Biomasse (Arctic Greening). Das heißt, die Pflanzen kurbeln vor allem infolge der steigenden Sommertemperaturen ihren Stoffwechsel an, wachsen früher und stärker und breiten sich Richtung Norden aus. Besonders deutlich zeigt sich diese Entwicklung auf dem North Slope in Alaska sowie in den südlichen Tundragebieten Kanadas und Ostsibiriens. In diesen Gebieten wachsen zum Beispiel strauchförmige Weiden und Erlen heutzutage deutlich weiter in die Höhe, als dies früher der Fall war. Die Triebe der Sträucher sind



dicker und die Gewächse bilden mehr Äste und Zweige aus. Pflanzen wie der Alpensäuerling (*Oxyria digyna*) kommen früher im Jahr zum Vorschein und tragen größere und grünere Blätter, und selbst an vielen exponierten Standorten, an denen früher nur Schotter zu finden war, sprießen mittlerweile Gräser.

Es gibt aber auch Gebiete, in denen der Trend gegenläufig ist und die Vegetationsdichte und die Biomasse trotz steigender Sommertemperaturen abnehmen (Arctic Browning). Zu diesen Regionen zählen zum Beispiel das Yukon-Kuskokwim-Delta im Westen Alaskas, die Hocharktis auf dem kanadisch-arktischen Archipel sowie die nordwestliche sibirische Tundra. Hier haben verschiedene Extremereignisse wie winterliche Wärmeepisoden mit plötzlicher Schneeschmelze, Vereisungen durch ungewöhnlichen Winterregen, Tundrenfeuer, anhaltende Trockenheit oder auch Schädlingsplagen in den angrenzenden Wäldern die Lebensbedingungen der Pflanzen verschlechtert. Mit dem Auftauen des Permafrosts steigt zudem die

4.45 > Forscher nutzen seit den 1970er-Jahren Satellitendaten, um die Vegetationsentwicklung in der Arktis zu beobachten. Dazu erstellen sie mithilfe der Daten aus dem All den sogenannten normierten differenzierten Vegetationsindex (NDVI). Dieser fällt umso höher aus, je mehr Gefäßpflanzen in einer Region wachsen (Arctic Greening). Stirbt die Vegetation dagegen ab, sinkt der Index (Arctic Browning).

Gefahr von Überflutungen, stehendem Wasser in Senken und Erosion.

Aufgrund dieser unterschiedlichen Entwicklungen schlussfolgern Wissenschaftler, dass es im Zuge des Klimawandels zu komplexen Wechselwirkungen zwischen der Vegetation, der Atmosphäre, dem mit Permafrost durchsetzten Erdreich und pflanzenfressenden Tieren kommen wird. Das Ausmaß der Erwärmung allein entscheidet also nicht darüber, ob die Vegetationsdecke in einer bestimmten Region dichter und grüner wird. Ein verstärktes Pflanzenwachstum deutet vielmehr darauf hin, dass ein Gebiet in seiner Gesamtheit auf die Erwärmung reagiert.

Mit Blick auf die Zukunft ist zudem noch ungewiss, ob das Pflanzenwachstum in der Arktis auch dann noch zunehmen wird, wenn der Klimawandel so weit vorangeschritten ist, dass die Temperatur der Vegetation keine Grenzen mehr setzt. Computersimulationen sagen voraus, dass die Vegetation weiter Richtung Norden vordringen wird. Sollte die Menschheit ihre Kohlendioxidemissionen nicht drastisch reduzieren, wird es in der Arktis zum Ende des 21. Jahrhunderts nur noch einige wenige Gebiete geben, in denen polare Kälte das Pflanzenwachstum behindert. Einfach aber dürfte es für die Pflanzen in der Arktis auch dann nicht werden. Solange die Erdachse nämlich ihre Neigung beibehält, werden die Winter in den Polarregionen weiterhin lang und dunkel bleiben und die sommerliche Wachstumsperiode somit herausfordernd kurz.



4.46 > Auf Herschel Island im äußersten Norden Kanadas hat das Pflanzenwachstum im Zuge des Klimawandels zugenommen, wie diese zwei Fotos belegen. Das linke Bild wurde im Jahr 1987 aufgenommen, das rechte Bild zwei Jahrzehnte später.

Mit dem Tempo steigt das Risiko

Die Tier- und Pflanzenwelt der Arktis und Antarktis haben Jahrtausenden gebraucht, um sich an die extremen polaren Lebensbedingungen anzupassen. Im Vergleich dazu gehen die gegenwärtigen, durch die globale Erwärmung getriebenen Klimaänderungen in einem solchen Tempo vonstatten, dass die polaren Ökosysteme und ihre zum Teil hochspezialisierten Organismen Gefahr laufen, sich nicht ausreichend schnell anpassen zu können. Der anthropogene Klimawandel bedroht somit massiv die Artenvielfalt polarer Lebensgemeinschaften und auf diese Weise auch ihre Funktionalität.

Heute weiß man, dass die Nahrungsbeziehungen in den polaren Ökosystemen deutlich komplexer und artenreicher sind, als man es früher angenommen hat. Daran schließt sich die Erkenntnis, dass die Menschheit bislang relativ wenig über die Biodiversität vieler polarer Organismengruppen weiß. Wissenschaftler kannten zum Beispiel im Jahr 2014 weniger als zwei Prozent aller Antarktisbewohner gut genug, um klimabedingte Veränderungen in ihrer Lebensweise feststellen zu können. Entsprechend wenig können die Forscher bislang auch über die möglichen Reaktionen der betroffenen Lebensgemeinschaften sagen. In jenen Teilbereichen, die gut erforscht sind, wird eines jetzt schon deutlich: Dort, wo der Klimawandel bereits seine Wirkung entfaltet, sehen die natürlichen polaren Lebensgemeinschaften heute anders aus als vor Beginn der Industrialisierung.



Conclusio

Hochspezialisiert und extrem gefährdet

Kälte, Licht und Eis bestimmen den Ablauf des Lebens in der Arktis und Antarktis. An Land sind diese Parameter der Grund dafür, dass beispielsweise die Vegetations- beziehungsweise Reproduktionszeiten der meisten Lebewesen nur sehr kurz sind – und viele Tiere gegen Ende des Sommers die Polarregionen verlassen. Im Meer zwingt die Kälte die Lebewesen zu einer energiesparenden Gemächlichkeit und erhöht die Langlebigkeit vieler Organismen. Im Rhythmus von Polartag und -nacht verändern sich zudem die Meereismenge, das Nahrungsangebot und die Verfügbarkeit von offenem Wasser.

Unter dem Druck dieser extremen Umweltbedingungen haben sich in beiden Polargebieten höchst angepasste Lebensgemeinschaften entwickelt, deren Biodiversität erstaunlich groß ist – auch wenn die Artenzahlen keineswegs an die Dimensionen tropischer Regionen heranreichen. In der Arktis findet sich die größte biologische Vielfalt an Land, was auf die Ozean-Kontinent-Verteilung zurückzuführen ist. In der Antarktis dagegen hängt nahezu alles Leben vom Meer ab. Hier ist der Anpassungsgrad und die Zahl endemischer mariner Arten auch deutlich höher als in der Arktis. Beides liegt an der geografischen Isolation des Südkontinents sowie an seiner längeren und abwechslungsreicheren Vereisungsgeschichte.

Das wiederholte Anwachsen der antarktischen Gletscher und Schelfeise bis an den Kontinentalrand hat die Bewohner der Schelfmeere immer wieder an ihre physiologischen Grenzen gebracht. Im Lauf der Zeit sind auf diese Weise viele neue, hochspezialisierte Arten entstanden, weshalb Wissenschaftler auch von einer Pumpe der Artenvielfalt sprechen. Die Bewohner des Arktischen Ozeans dagegen konnten in Zeiten weiträumiger Vereisung in den Nordpazifik und Nordatlantik abwandern. Noch heute unterscheiden Forscher in Hinblick auf die marinen

Ökosysteme des Arktischen Ozeans zwischen einem atlantisch und einem pazifisch geprägten Sektor.

Die Pflanzen trotzen der Kälte und dem Lichtmangel, indem sie unter anderem zelluläre Frostschutzmechanismen entwickelt haben, eine gedrungene Statur aufweisen, langsam wachsen, wärmeoptimierende Merkmale wie Härchen oder Blütenformen ausbilden, große Reserven anlegen, ihre Photosyntheseleistung verbessern, sich zu einem großen Teil auch ungeschlechtlich fortpflanzen und Nährstoffe mehrfach verwerten. Bei gleichwarmen Tieren verhindert ein gut isolierendes Winterfell oder -geflügel den Verlust wertvoller Wärme. Sie fressen sich große Fettreserven an, wärmen sich gegebenenfalls gegenseitig und überdauern extreme Witterungsbedingungen an geschützten Orten. Viele wechselwarme Meereslebewesen setzen Frostschutzproteine ein, bewegen sich im Energiesparmodus, wachsen langsam und produzieren vergleichsweise wenig Nachwuchs, dem sie allerdings die bestmöglichen Startbedingungen ins Leben geben.

Durch den Klimawandel aber verändern sich die physikalischen Grundpfeiler des Lebens in der Arktis und Antarktis. Das birgt für ihre polaren Ökosysteme und ihre teils hochspezialisierten Organismen das Risiko, dass sie sich nicht mit der nötigen Geschwindigkeit anpassen können. Mit dem Meereis schwindet ein Lebensraum, der vielen Arten als Versteck, Nahrungsquelle und Jagdrevier dient. Diese Lebewesen sind vom Aussterben bedroht. Steigende Wassertemperaturen erhöhen den Energiebedarf wechselwarmer Organismen und ebnen einwandernden Arten den Weg. Nahrungsgefüge geraten aus dem Gleichgewicht, der Wettbewerb um Futter verschärft sich. Die Versauerung der Polarmeere wiederum erschwert vor allem Arten, die Schalen oder Skelette aus Kalk bilden, das Überleben. Der Klimawandel bedroht somit massiv die Biodiversität und damit die Funktionalität polarer Ökosysteme.

5 Politik und Wirtschaft in den Polarregionen

> Im Zuge des Klimawandels schwinden Eis und Kälte in den Polarregionen, vor allem in der Arktis. Schifffahrtswege öffnen sich, unberührte Rohstofflagerstätten rücken in greifbare Nähe, weshalb das Nordpolargebiet längst als interessanter Wirtschaftsstandort gilt. In der Antarktis verfolgt eine wachsende Zahl von Nationen und Unternehmen ebenfalls kommerzielle Interessen. Ihnen aber setzt das Gebot des Umweltschutzes bislang enge Grenzen.



Die Arktis und die Antarktis als politische Arenen

> Kooperation und Kompromissbereitschaft waren bislang die Devise, wenn es um die politische Agenda der Polarregionen geht. Während das Südpolargebiet bereits seit Unterzeichnung des Antarktisvertrags 1959 gemeinschaftlich verwaltet wird, stimmen die Arktisanrainer die Leitlinien ihrer Politik seit 1996 im Arktischen Rat ab. Beide Dialogforen aber stehen angesichts des Klimawandels und der geopolitischen Gesamtentwicklung vor Herausforderungen. Je weiter das Eis weicht, desto lauter werden die Rufe nach einer kommerziellen Nutzung der Polargebiete.

Paradigmenwechsel und neue geopolitische Interessen

Die Polarregionen erleben derzeit einen grundlegenden Bedeutungswandel. Je weiter der Klimawandel voranschreitet und je ausgefeilter die Technik von Schiffen, Flugzeugen, Gebäuden, Informations- und Kommunikationskanälen wird, desto besser gelingt es den Menschen, ihren Aktionsradius in der Arktis und Antarktis auszuweiten. In beiden Regionen sind heute deutlich mehr Staaten und Akteure aktiv als noch zur Jahrtausendwende – und jeder einzelne von ihnen verfolgt individuelle Interessen. Der Klimawandel hat gewissermaßen eine geopolitische Ket-

tenreaktion in Gang gesetzt, welche sowohl die Anrainerstaaten der Arktis als auch die Mitgliedsstaaten des Antarktisvertragssystems vor neue Herausforderungen stellt.

Leichter Zugang durch Meereisrückgang

Der Rückgang des Meereises erleichtert Menschen und Schiffen den Zugang zu den arktischen und antarktischen Regionen. Im August 2014 beispielsweise konnte das deutsche Kreuzfahrtschiff „Hanseatic“ aufgrund ungewöhnlicher Eisbedingungen in der östlichen zentralen Arktis die Position 85° 41' Nord erreichen. Es setzte damit eine neue Rekordmarke für Passagierschiffe. Auch weite Teile der Antarktis kann man nach Ansicht von Beob-

5.1 > Ein Eisbrecher eskortiert Tank- und Frachtschiffe durch die arktischen Gewässer Russlands. Dieser Begleitservice ist teuer, von russischen Behörden vorgeschrieben und für Reedereien bislang einer von mehreren Gründen, die Nordostpassage gar nicht oder nur selten für Transporte von Europa nach Asien zu nutzen.



achtern nicht mehr als entlegene und unberührte Regionen bezeichnen. Jahrzehntelanger Wal- und Robbenfang, das vom Menschen verursachte Ozonloch sowie die vielen Spuren, welche Forschende, Fischer und Touristen mittlerweile in der Antarktis hinterließen, sprächen eindeutig dagegen.

Wirtschaftliche Interessen

Je mehr Wasser- und Landflächen die schrumpfenden Eismassen in der Arktis und Antarktis freigeben, desto eher wecken diese auch wirtschaftliche Begehrlichkeiten bei ganz unterschiedlichen Akteurs- und Interessengruppen wie Reiseunternehmen, Fischereiflotten, rohstoffexplorierende Unternehmen und Reedereien. Nach Angaben des United States Geological Survey (USGS, Geologischer Dienst der Vereinigten Staaten) lagern allein 22 Prozent der bislang unentdeckten Erdöl- und Erdgasvorkommen nördlich des arktischen Polarkreises. Reedereien wie das dänische Unternehmen Mærsk schicken bereits zu Testzwecken Frachtschiffe von Nordeuropa über die Nordostpassage in den indopazifischen Raum – in der Hoffnung, eines Tages über diese Strecke viel Transportzeit und somit Kosten zu sparen.

Sicherheitsbedenken

Mit dem Meereis schmilzt für die arktischen Küstenstaaten eine natürliche Barriere, welche sie nach Ansicht einiger Beobachter bislang auch vor einer militärischen Invasion aus dem Norden geschützt hat. Diese neue sicherheitspolitische Ausgangslage verunsichere die nordischen Länder, heißt es, vor allem weil sich mit dem zunehmenden ökonomischen Engagement im arktischen Raum auch die militärischen Aktivitäten häuften und latente Konflikte wieder aufbrechen könnten. So stellte die Arktis in der Ära des Kalten Krieges eine Schlüsselregion der militärischen Konfrontation zwischen den beiden damaligen Großmächten USA und Sowjetunion dar. Beide Seiten unterhielten damals große Militärbasen und Raketenabschussrampen nördlich des Polarkreises. Nahezu alle diese Standorte aber wurden im Zuge der Entspannungspolitik der 1990er-Jahre geschlossen. Mit dem Klimawandel und der aktuellen Debatte um Seewege und Durchfahrtsrechte aber könnte auch die Militärpräsenz in den nördlichen Regionen der Anrainerstaaten der Arktis wieder zunehmen.



Im Fokus der internationalen Öffentlichkeit und Forschung

Gleichzeitig ruft das Ausmaß des Klimawandels in den Polarregionen Forscher und Umweltschützer auf den Plan. Erstere lenken durch stetig neue Forschungsergebnisse den Blick der Öffentlichkeit immer häufiger auf die Polargebiete. Letztere kämpfen mit weltweiten Kampagnen für deren Schutz. In der Arktis und Antarktis, so die Kernbotschaft, entscheide sich die Zukunft unseres Planeten.

Alle diese Entwicklungen deuten darauf hin, dass die Polarregionen – und hier insbesondere die Arktis – zunehmend zu geopolitischen Arenen werden, in denen eine steigende Zahl von Akteuren Begehrlichkeiten und Sorgen anmeldet. Zur gleichen Zeit konkurrieren die Großmächte auch in diesen Regionen wieder intensiver um Macht und Einfluss, was die bislang sehr gut funktionierende internationale Zusammenarbeit in beiden Regionen zuweilen erschwert.

5.2 > Auf Stelzen stehen die Gebäude einer neuen Militärbasis, welche Russland auf der zu Franz-Josef-Land zählenden arktischen Insel Alexandraland errichtet hat. In dem 14 000 Quadratmeter großen Komplex sind Luftabwehreinheiten untergebracht.

Münchener Sicherheitskonferenz
Die Münchener Sicherheitskonferenz (Munich Security Conference, MSC) findet jedes Jahr im Februar in München statt und ist ein weltweit bedeutendes Forum für Debatten zur internationalen Sicherheitspolitik. Ihre Organisatoren verfolgen das Ziel, Frieden durch Dialog zu fördern, und bieten Entscheidungsträgern aus Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft eine Plattform für offizielle und inoffizielle diplomatische Initiativen. Zusätzlich zur Hauptkonferenz richtet die MSC Diskussionsveranstaltungen zu spezifischen Themen und Regionen aus. Eine ist der Runde Tisch zur Sicherheit in der Arktis.

Wer regiert die Arktis?

Die Antwort auf die Frage, wer politisch das Sagen hat, fällt in der Arktis anders aus als in der Antarktis, welche gemeinschaftlich verwaltet wird. Der Grund dafür ist abermals die Lage der beiden Polarregionen. Die Arktis ist geografisch durch den nördlichen Polarkreis begrenzt. Große Teile des Nordpolargebiets liegen auf dem Territorium von insgesamt acht Staaten. Dabei handelt es sich um Kanada, Russland, die USA mit ihrem Bundesstaat Alaska, Norwegen, Dänemark – aufgrund seiner engen Verbindungen mit dem eigentlichen Arktisanrainer Grönland –, Island, Schweden und Finnland.

Die drei letztgenannten Staaten weisen im Vergleich zu den fünf anderen eine Besonderheit auf. Sie besitzen keinen unmittelbaren Zugang zum Nordpolarmeer. Arktische Staaten in einem engeren geografischen Sinn, das heißt mit direktem Zugang zum Arktischen Ozean, sind deshalb nur Dänemark (Grönland), Kanada, Norwegen (Spitzbergen), Russland und die USA (Alaska). Sie werden aus diesem Grund auch als die Arktischen Fünf bezeichnet – in Abgrenzung zu den acht Staaten mit Hoheitsgebieten innerhalb des Polarkreises.

Obwohl sich die Arktisanrainer auf drei Kontinente verteilen, sind alle acht Nationen Teil einer Kultur-, Norm- und Wertegemeinschaft und auf unterschiedliche Weise miteinander verknüpft – sei es aufgrund klima- und umweltpolitischer Belange, aufgrund wirtschaftlicher, sicherheitspolitischer und gesellschaftlicher Fragen oder aber aufgrund ihrer indigenen Bevölkerung in den arktischen Territorien. Wichtige gemeinschaftliche Fragen debattieren die Nationen deshalb im Arktischen Rat, der seit der **Erklärung von Ottawa** im Jahr 1996 als führendes staatenübergreifendes Forum für die Arktis die Zusammenarbeit zwischen den Anrainerstaaten, der indigenen Bevölkerung und anderen Bewohnern der Arktis fördert und koordiniert. Seine Arbeitsschwerpunkte liegen dabei vor allem auf einer nachhaltigen Entwicklung des Nordpolargebiets sowie auf dem Umweltschutz. Sicherheitspolitische oder militärische Themen sind von der Agenda des Arktischen Rates explizit ausgeschlossen. Sie werden stattdessen in Foren wie dem halbjährlich stattfindenden Treffen des Arctic Security Forces Roundtable (ASFR) diskutiert, auf Veranstaltungen des Arctic Coast Guard

Forum (ACGF) oder beim Runden Tisch zur Arktischen Sicherheit, welchen die Münchener Sicherheitskonferenz (Munich Security Conference, MSC) gemeinsam mit wechselnden Partnern organisiert.

Dem Arktischen Rat gehören neben den acht Mitgliedsstaaten auch sechs Organisationen an, welche die Interessen der indigenen Völker der Arktis vertreten. Sie werden als sogenannte Permanente Teilnehmer des Rates bezeichnet. Entscheidungen des Gremiums bedürfen der Zustimmung aller Mitglieder und werden in enger Abstimmung mit den Permanenten Teilnehmern getroffen. Rechtsverbindlich sind die Richtlinien und Empfehlungen des Rates allerdings nicht. Ob die Beschlüsse umgesetzt werden, liegt einzig und allein im Ermessen der einzelnen Mitgliedsstaaten.

Dieser rechtsunverbindliche Charakter des Arktischen Rates ist nach Ansicht vieler Beobachter jedoch eine Stärke und keine Schwäche. Erlaubt er doch flexible und zeitnahe Anpassungsmaßnahmen in einer sich rasant verändernden Umwelt. Außerdem hat der Arktische Rat in der Vergangenheit schon dreimal die Unterzeichnung rechtsverbindlicher multilateraler Abkommen initiiert. Im Jahr 2011 unterzeichneten die Arktisstaaten das Abkommen über die Zusammenarbeit im Such- und Rettungsdienst; zwei Jahre später folgte das Abkommen über die Zusammenarbeit bei der Behandlung mariner Ölverschmutzung, und im Jahr 2017 wurde das Abkommen zur Verbesserung der internationalen wissenschaftlichen Zusammenarbeit auf den Weg gebracht.

An den Sitzungen des Arktischen Rates nehmen neben den Vertretern der Mitgliedsstaaten und den Permanenten Teilnehmern auch Sprecher der mittlerweile sechs Arbeitsgruppen des Rates teil. Deren Mitglieder erstellen regelmäßig umfangreiche und wegbereitende Zustandsberichte zu verschiedenen Aspekten der arktischen Umwelt und Gesellschaft. Diese dienen den Anrainerstaaten der Arktis als Handlungsempfehlung und werden darüber hinaus weltweit als wichtige Informationsquelle genutzt.

Als Beobachter der Ratssitzungen sind außerdem die Vertreter von 13 Nichtanrainerstaaten, von 14 zwischenstaatlichen Organisationen und von zwölf internationalen Nichtregierungsorganisationen zugelassen. Zu den Nationen mit Beobachterstatus zählen derzeit unter

anderem Deutschland, China, Frankreich, Indien, Polen, Japan und Großbritannien. Diese Beobachterstaaten erhoffen sich von ihrer Mitgliedschaft internationale Sichtbarkeit und direkten Zugang zu arktisrelevanten Informationen. Als Gegenleistung sind sie vom Arktischen Rat dazu aufgefordert, sich in den verschiedenen Arbeitsgruppen zu engagieren und deren Arbeit zu unterstützen.

Deutschland zum Beispiel entsendet mittlerweile Wissenschaftler und Experten in alle sechs Arbeitsgruppen des Rates und finanziert gemeinsam mit den Niederlanden die Stelle eines Koordinators im Vogelschutzprogramm der Arbeitsgruppe Erhalt der Arktischen Flora und Fauna (Conservation of Arctic Flora and Fauna, CAFF). Über ihr Engagement müssen die Beobachter regelmäßig Bericht ablegen. Auf Basis dessen entscheiden die acht Mitglieder des Arktischen Rates dann, ob der Beobachterstatus einer

Nation aufrechterhalten bleibt oder nicht. Bislang ist jedoch noch keinem Staat dieser Status wieder entzogen worden.

Welche Themen der Arktische Rat in den Mittelpunkt rückt, hängt vor allem vom Programm jenes Mitgliedsstaats ab, der den Ratsvorsitz innehat. Dieser wechselt alle zwei Jahre unter den acht Arktisstaaten. Im Mai 2019 übergab Finnland die Leitung des Forums an Island, welches die Phase seines bis 2021 andauernden Vorsitzes unter das Motto „Together Towards a Sustainable Arctic“ (Gemeinsam für eine nachhaltige Arktis) gestellt hat.

Die Grundidee des Arktischen Rates, gemeinsame Anliegen auf Basis wissenschaftlicher Empfehlungen zu diskutieren und einheitliche Handlungsempfehlungen für alle Mitgliedsländer abzustimmen, wird von einigen Experten mittlerweile als Erfolgsgeschichte gewertet. Im

Eine Zone des Friedens

Die Gründung des Arktischen Rates im Jahr 1996 geht zu einem kleinen Teil auch auf den ehemaligen sowjetischen Staatspräsidenten Michail Gorbatschow zurück. Dieser hatte in seiner berühmten Rede von Murmansk im Jahr 1987 die Arktis als Zone des Friedens bezeichnet und für mehr Zusammenarbeit zwischen den Arktisanrainerstaaten geworben. Finnland nahm diese Aufforderung zum Anlass, die Arktisnationen an einen Tisch zu holen und sie im Zuge mehrerer Konferenzen im Jahr 1991 zu überzeugen, eine erste gemeinsame arktische Umweltschutzstrategie (Arctic Environmental Protection Strategy, AEPS) zu verabschieden. Diese hatte zum Ziel, die Forschungskoooperation der Arktisanrainer zu Umweltschutzthemen zu stärken. Im Fokus stand dabei zum einen die Verschmutzung der Arktis durch Öl, Schwermetalle und schwer abbaubare organische Schadstoffe. Zum anderen ging es den Initiatoren aber auch um die Lärmbelastigung von Meerestieren, um Radioaktivität und die Versauerung des Arktischen Ozeans. Um diese Themenkomplexe erarbeiten zu können, wurden verschiedene Arbeitsgruppen eingerichtet, darunter:

- das Programm zur Beobachtung und Bewertung der Arktis (Arctic Monitoring and Assessment Programme, AMAP),
- die Arbeitsgruppe zum Schutz der arktischen marinen Umwelt (Protection of the Arctic Marine Environment, PAME),
- die Arbeitsgruppe Notfallprävention, -vorsorge und -einsatz

- (Emergency Prevention, Preparedness and Response, EPPR) und
- die Arbeitsgruppe zum Erhalt der arktischen Flora und Fauna (Conservation of Arctic Flora and Fauna, CAFF).

Zu diesen Arbeitsgruppen sind im Laufe der Zeit weitere hinzugekommen. Sie alle geben die Grundstruktur des Arktischen Rates vor und erarbeiten bis heute die inhaltlichen Grundlagen für alle Diskussionen und Entscheidungen im Rat.



5.3 > Treffen des Arktischen Rates in Rovaniemi, Finnland, Mai 2019.

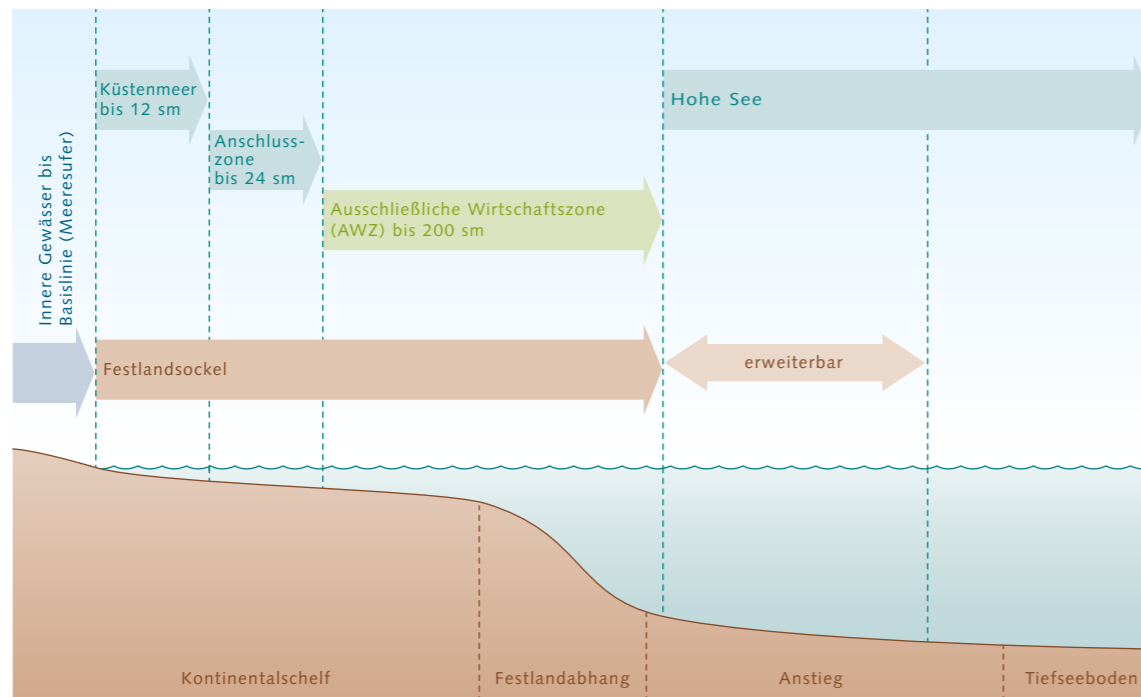
Januar 2018 schlug eine Gruppe von Politikwissenschaftlern und Sicherheitsexperten den Arktischen Rat sogar für den Friedensnobelpreis vor. Angesichts der weltweit zunehmenden politischen Spannungen zwischen den Großmächten sei es wichtig zu zeigen, welche Zusammenarbeit der Arktische Rat ermöglichen, argumentierten die Forscher.

Grenzziehung im Arktischen Ozean

Trotz der zentralen Stellung des Arktischen Rates und seiner acht Mitgliedsstaaten kommt den fünf Küstenstaaten in manchen Teilbereichen arktischer Steuerung und Entscheidungsfindung eine besondere Rolle zu. Ausschlaggebend dafür ist, dass sie auf Grundlage des See-

rechtsübereinkommens der Vereinten Nationen (United Nations Convention on the Law of the Sea, UNCLOS) über weitreichende Souveränitäts- und Hoheitsrechte verfügen, die für die Küstengewässer, die Ausschließlichen Wirtschaftszone und weite Teile des Meeresbodens auf dem arktischen Festlandssockel gelten.

Dieses UN-Seerechtsübereinkommen wurde im Jahr 1982 geschlossen und gilt als das umfangreichste Regelwerk zur Nutzung und zum Schutz der Meere, weshalb es manchmal auch „Verfassung der Meere“ genannt wird. Von den fünf arktischen Küstenstaaten haben nur die USA dieses Übereinkommen noch nicht ratifiziert. Im Mai 2008 unterzeichnete die US-Regierung jedoch die **Ilulissat-Deklaration** und sicherte damit zu, alle Angelegenheiten, die den Arktischen Ozean betreffen, gemeinsam



5.4 > Das Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen (SRÜ) teilt das Meer in verschiedene Rechtszonen auf. Die Souveränität eines Staates nimmt dabei mit zunehmender Entfernung von der Küste ab. An die Inneren Gewässer schließt sich das Küstenmeer an, das auch 12-Seemeilen-Zone genannt wird. Hier ist die Souveränität des Küstenstaats bereits eingeschränkt, weil es Schiffen aller Länder erlaubt ist, diese Gewässer zu durchfahren. In der sich bis zu 200 Seemeilen vor der Küste erstreckenden Ausschließlichen Wirtschaftszone

(AWZ) hat ein Küstenstaat das alleinige Recht, lebende und nicht lebende Ressourcen zu explorieren und zu ernten. So darf er Erdöl und Erdgas, mineralische Rohstoffe oder auch Fischbestände ausbeuten. Im Bereich des Festlandssockels, der eine natürliche Verlängerung des Festlands darstellt und über die Ausschließliche Wirtschaftszone hinausreichen kann, darf er Ressourcen am Meeresgrund explorieren und ernten. An die Ausschließliche Wirtschaftszone schließt sich das Gebiet der Hohen See an.

mit den übrigen Arktisanrainern friedlich auf Basis des Seevölkerrechts zu regeln.

Das UN-Seerechtsübereinkommen gibt die Definition für verschiedene maritime Zonen, in denen der Umfang bestimmter souveräner Rechte der Küstenstaaten festgelegt ist. Dazu gehören:

- die Inneren Gewässer und das Küstenmeer eines Staates,
- die Anschlusszone,
- die Ausschließliche Wirtschaftszone,
- der Festlandssockel sowie
- die Hohe See.

Innere Gewässer und Küstenmeer

Als Innere Gewässer werden diejenigen salinen Gewässer definiert, welche von der Basis- oder Niedrigwasserlinie aus betrachtet landeinwärts liegen. Das Küstenmeer dagegen erstreckt sich seewärts. Es hat eine Breite von maximal zwölf Seemeilen (eine Seemeile entspricht 1852 Meter). In seinen Inneren Gewässern besitzt ein Staat uneingeschränkte Hoheitsgewalt, denn sie gehören wie auch das Küstenmeer zu seinem Staatsgebiet. Die Souveränität im Küstenmeer ist ebenfalls recht umfassend. Sie erstreckt sich auf den Luftraum, die Wassersäule, den Meeresboden und den darunterliegenden Untergrund. Es ist einem Küstenstaat jedoch verboten, die friedliche Durchfahrt fremder Schiffe durch sein Küstenmeer zu behindern.

Die Durchfahrt gilt als friedlich, wenn das betreffende Schiff bei seiner Fahrt durch das Küstenmeer keinerlei Gewalt ausübt, diese auch nicht androht, den Küstenstaat nicht ausspäht und zu keinem Zeitpunkt auf andere Art und Weise eine Gefahr für die Sicherheit des Küstenstaats darstellt. Wann Letzteres der Fall ist, wird im UN-Seerechtsübereinkommen im Einzelnen definiert. U-Boote beispielsweise müssen für die Durchfahrt auftauchen und ihre Flagge hissen. Verboten sind außerdem illegale Einleitungen oder andere Meeresverschmutzungen. Der Küstenstaat darf jedoch Fahrinnen ausweisen, auf welchen die Durchfahrt erfolgen muss, und Gebühren erheben, wenn er Leistungen erbringt, welche die Sicher-

heit des Schiffsverkehrs erhöhen. Bei der Ausweisung von Schifffahrtswegen und Verkehrstrennungsgebieten muss er allerdings die Empfehlungen der Internationalen Seeschifffahrts-Organisation (International Maritime Organization, IMO) berücksichtigen.

Ist das Küstenmeer Teil einer Meerenge oder Wasserstraße, die Gebiete der Hohen See oder verschiedene Ausschließliche Wirtschaftszone miteinander verbindet und von der internationalen Schifffahrt genutzt wird, muss der Küstenstaat laut Artikel 37 des Seerechtsübereinkommens fremden Schiffen das Recht auf eine Transitdurchfahrt gewähren. Im Vergleich zum Recht der friedlichen Durchfahrt verfügt der Küstenstaat bei Transitdurchfahrten über noch geringeren Spielraum, diese zu beschränken. Es gilt nämlich im Grunde dieselbe Freiheit der Schifffahrt wie auf Hoher See. Letztlich ist eine Aussetzung oder Beschränkung der Transitdurchfahrt nur im Fall der Androhung oder Ausübung militärischer Gewalt durch das Schiff möglich. U-Boote dürfen Meerengen durchtauchen.

Die Frage, ob fremde Schiffe ein Recht auf unbehelligte Transitdurchfahrt haben, löst in der Arktis regelmäßig Streitigkeiten aus – etwa in den Hoheitsgewässern im arktischen Archipel Kanadas, durch welche die Routen der Nordwestpassage verlaufen, oder aber in den Hoheitsgewässern vor Russlands Arktisküste. Dort entlang führen die Routen der Nordostpassage. Schiffe, welche die arktischen Gewässer Russlands queren wollen, müssen Auflagen der russischen Regierung erfüllen. Besonders streng sind diese für fremde Kriegsschiffe. Militärschiffe der NATO beispielsweise sollen sich 45 Tage vor der Durchfahrt anmelden und einen russischen Lotsen an Bord lassen, was die US-Regierung aufgrund von Sicherheitsbedenken kategorisch ablehnt. Washington argumentiert, amerikanische Kriegsschiffe hätten auf Basis des Seevölkerrechts das Recht auf eine freie, unbehelligte (Transit-) Durchfahrt. Ein Ende dieses Streits ist nicht abzusehen.

Anschlusszone und Ausschließliche Wirtschaftszone

An das Küstenmeer schließt sich die sogenannte Anschlusszone an. Sie darf sich maximal 24 Seemeilen über die Niedrigwasserlinie hinaus erstrecken. In dieser Zone dürfen Küstenstaaten besondere Kontrollbefugnisse ausüben

Basislinie

Die Basislinie verläuft normalerweise entlang der Niedrigwasserlinie an der Küste und entspricht damit dem durchschnittlichen Ebbestand des Wassers, wie er in amtlichen Seekarten verzeichnet ist.

und beispielsweise Zollvorschriften gegenüber Drittstaaten durchsetzen. Auf die Anschlusszone folgt die Ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ), die von der Niedrigwasserlinie aus betrachtet eine Breite von 200 Seemeilen nicht überschreiten darf und nicht zum Staatsgebiet gehört. Dennoch haben die Küstenstaaten in dieser Zone das alleinige Recht, Fischfang zu betreiben oder aber künstliche Inseln und Anlagen wie etwa Ölbohrplattformen und Offshore-Windenergieanlagen zu genehmigen, zu errichten und zu betreiben. Der Küstenstaat verfügt in diesem Meeresgebiet zudem über Hoheitsbefugnisse in Bezug auf den Meeresschutz und die Meeresforschung. Aus diesem Grund müssen fremde Staaten grundsätzlich die Zustimmung des Küstenstaats einholen, wenn sie in dessen Ausschließlicher Wirtschaftszone wissenschaftliche Untersuchungen vornehmen wollen. Territoriale Ansprüche aber kann ein Küstenstaat in seiner Ausschließlichen Wirtschaftszone nicht erheben. Drittstaaten genießen in diesem Gebiet Schifffahrtsfreiheit und dürften hier auch unterseeische Kabel und Rohrleitungen verlegen.

Die Grenzen der Ausschließlichen Wirtschaftszonen haben die Arktisstaaten definiert und ihren Verlauf seit den 1970er-Jahren in verschiedenen bi- und trilateralen Abkommen untereinander abgestimmt. Disput gibt es nur in wenigen Regionen. Kanada und die USA beispielsweise streiten sich über den genauen Verlauf ihrer maritimen Grenzen in der Beaufortsee.

Erweiterter Festlandsockel

Spezielle Regelungen sieht das UN-Seerechtsübereinkommen für den sogenannten Festlandsockel vor, welcher größtenteils unterhalb der Ausschließlichen Wirtschaftszone verläuft. Der Festlandsockel ist wie die Ausschließliche Wirtschaftszone ein Hoheitsraum, in dem nur der Küstenstaat die natürlichen Ressourcen erforschen und ausbeuten darf. Seerechtlich kann jeder Küstenstaat den Festlandsockel in der Ausschließlichen Wirtschaftszone von bis zu 200 Seemeilen Breite proklamieren, selbst wenn der Sockel geologisch betrachtet schmaler ist.

Reicht der geologische Festlandsockel jedoch über diese 200-Seemeilen-Grenze der Ausschließlichen Wirtschaftszone hinaus, kann der Küstenstaat nach Artikel 76 des Seerechtsübereinkommens die äußere Grenze dieses

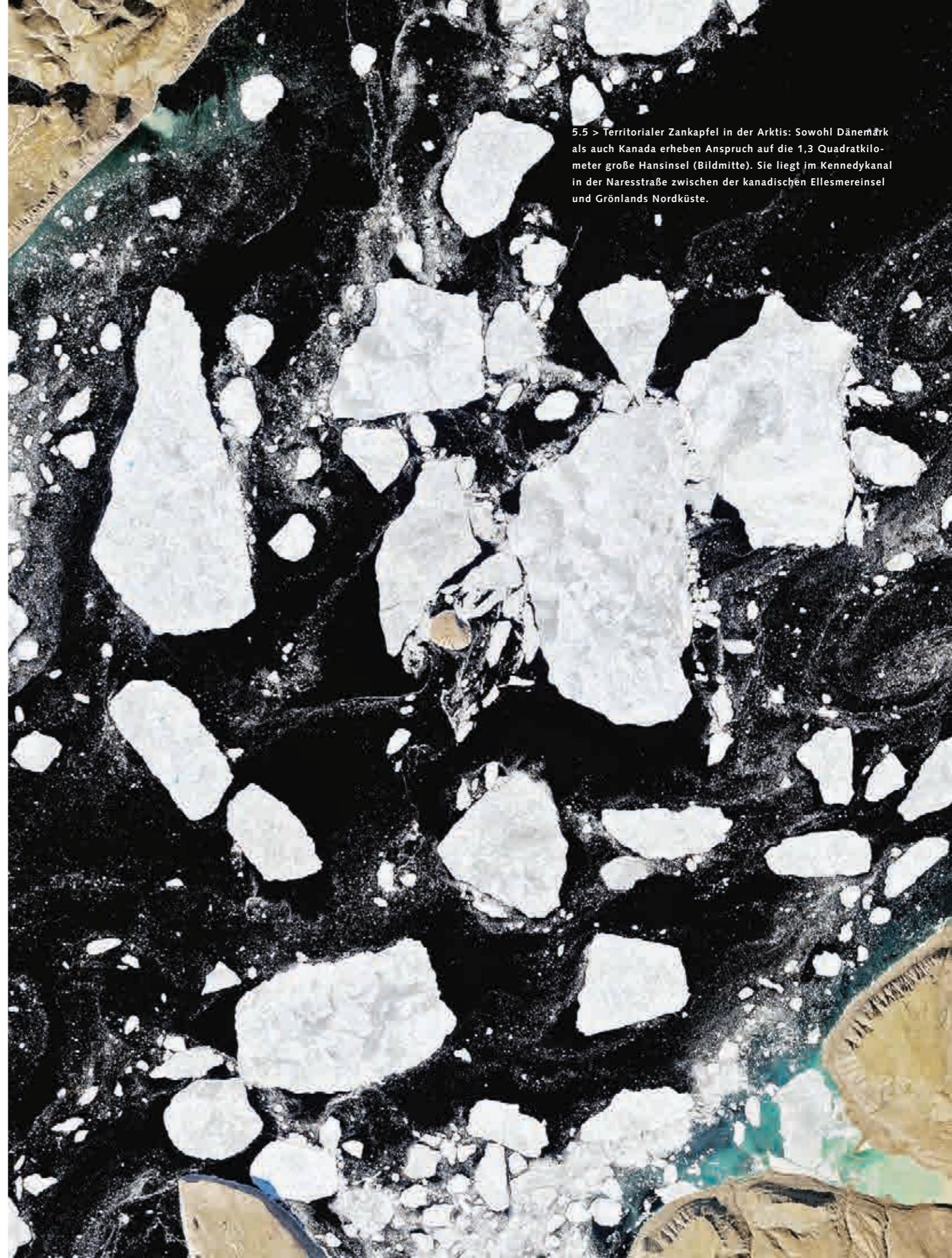
Sockels erweitern. Dazu muss er gegenüber der UN-Kommission zur Begrenzung des Festlandsockels (Commission on the Limits of the Continental Shelf, CLCS) wissenschaftliche Daten vorlegen, aus denen sich ergibt, dass es sich bei dem betreffenden Teil des Meeresbodens und -untergrunds um die natürliche Verlängerung seines Festlandrands handelt.

Einer solchen Erweiterung sind jedoch Grenzen gesetzt: Die neue Außengrenze des Festlandsockels darf entweder nicht weiter als 350 Seemeilen entfernt von der Basislinie des Küstenstaats verlaufen oder nicht mehr als 100 Seemeilen über die 2500-Meter-Wassertiefenlinie hinausgehen. Eine Kombination der beiden Methoden ist zulässig.

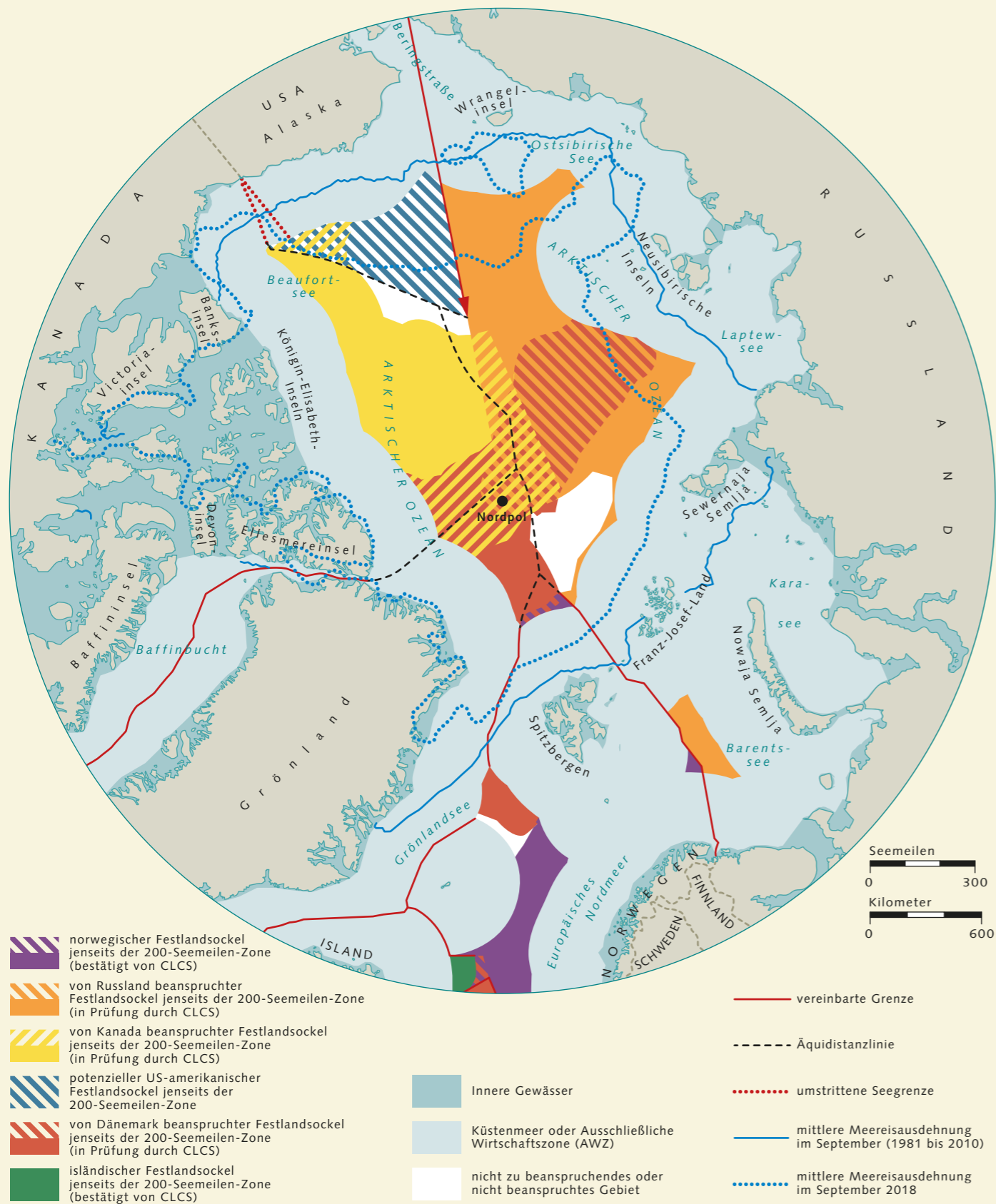
Verkompliziert wird die Grenzziehung in der Arktis dadurch, dass am Meeresboden des Arktischen Ozeans drei unterseeische Bergrücken verlaufen – der Lomonosowrücken, der Gakkelerücken und der Alpha-Mendejew-Rücken – und deshalb eine Ausnahmeregelung des Seerechtsübereinkommens zum Tragen kommt. In Artikel 76 wird nämlich zwischen unterseeischen Bergrücken und unterseeischen Erhebungen unterschieden.

Für den Fall, dass beide mit dem Festlandsockel eines Küstenstaats verbunden sind, gelten unterschiedliche Regelungen. Verläuft der Festlandsockel in Teilen über einem unterseeischen Bergrücken, kann nur die 350-Seemeilen-Regel angewendet werden. Die Regel zur 2500-Meter-Wassertiefenlinie entfällt. Erstreckt sich der Festlandsockel jedoch über einer unterseeischen Erhebung, gelten beide Richtlinien, weil davon ausgegangen wird, dass die unterseeische Erhebung in der Regel aus dem gleichen Material besteht wie der Festlandsockel. Unterseeische Bergrücken dagegen bestehen meist aus vulkanischem Gestein und somit aus einem anderen Material als der Festlandsockel.

Diese komplexen Vorgaben des Seerechtsübereinkommens erschweren die Arbeit der UN-Kommission zur Begrenzung des Festlandsockels. Sie prüft alle eingereichten Anträge und gibt am Ende eine Empfehlung ab. Sofern der Küstenstaat die Außengrenze seiner erweiterten Wirtschaftszone der Empfehlung entsprechend anpasst, ist diese Außengrenze endgültig und verbindlich. Fraglich ist bislang, was passiert, wenn sich ein Küstenstaat der Kommissionsempfehlung widersetzt und die Außen-



5.5 > Territorialer Zankapfel in der Arktis: Sowohl Dänemark als auch Kanada erheben Anspruch auf die 1,3 Quadratkilometer große Hansøen (Bildmitte). Sie liegt im Kennedykanal in der Naresstraße zwischen der kanadischen Ellesmereinsel und Grönlands Nordküste.



5.6 > In der zentralen Arktis überlappen sich die Ansprüche der arktischen Küstenstaaten auf Meeresbodengebiete außerhalb ihrer jeweiligen 200-Seemeilen-Zone. Frei von Ansprüchen sind lediglich zwei kleine Regionen, die zu weit von der Küste entfernt liegen, als dass Forderungen erhoben werden könnten.

grenze in Widerspruch zur Empfehlung festlegt. Die Kommission ist nämlich kein Organ der Rechtskontrolle. Sie soll nur garantieren, dass die Grenzziehung wissenschaftlichen Standards entspricht.

Die Aussicht auf eine Erweiterung des Festlandssockels und damit auch der exklusive Anspruch auf die im Meeresboden lagernden Rohstoffe hat bislang alle arktischen Küstenstaaten, die dem Seerechtsübereinkommen beigetreten sind, dazu veranlasst, entsprechende Anträge zu stellen. Norwegen wurde im Jahr 2009 eine Erweiterung von Teilen seines Festlandssockels zugestanden. Russland, Dänemark und Kanada versuchen seit Jahrzehnten mithilfe seismologischer Studien nachzuweisen, dass der Lomonossow- und der Alpha-Mendelejew-Rücken unterseeische Erhebungen und damit natürliche geologische Fortsätze ihres jeweiligen Festlandssockels darstellen. Kanada beispielsweise hat erst am 23. Mai 2019 einen 2100 Seiten umfassenden Antrag bei der UN-Kommission eingereicht. Demnach erhebt das Land Anspruch auf eine Meeresfläche von insgesamt 1,2 Millionen Quadratkilometern, den geografischen Nordpol mit eingeschlossen. Russland und Dänemark hatten in ihren Anträgen zuvor ähnlich lautende Ansprüche erhoben. Empfehlungen der Kommission aber gibt es bislang zu keinem der Anträge, weil die Bearbeitung und Entscheidungsfindung mehrere Jahre dauern.

Hinzu kommt, dass die Kommission nicht zuständig ist, wenn zwei oder mehrere Küstenstaaten mit gegenüberliegenden oder aneinandergrenzenden Küsten um eine genaue Abgrenzung ihres jeweiligen Festlandssockels ringen oder aber sich die von ihnen beanspruchten Gebiete überlappen. In solchen Fällen verpflichtet das Seerechtsübereinkommen die beteiligten Staaten vielmehr zum Abschluss eines oder mehrerer Abgrenzungsübereinkommen. Das heißt, die beteiligten Staaten müssen diese strittigen Fragen untereinander klären. Sollte das nicht gelingen, könnte der Streit vor einem internationalen Gericht, zum Beispiel dem Internationalen Gerichtshof oder dem Internationalen Seegerichtshof, verhandelt werden, vorausgesetzt, die beteiligten Staaten erkennen diesen als Rechtsinstanz an.

In der Vergangenheit haben die Verhandlungs- und Kompromissbereitschaft der arktischen Küstenstaaten ausgereicht, Grenz- oder Gebietskonflikte beizulegen. So

einigten sich zum Beispiel Norwegen und Russland im September 2010 auf einen Kooperationsvertrag, der einen vier Jahrzehnte andauernden Streit um die Abgrenzung ihrer nebeneinanderliegenden Wirtschaftszonen und Festlandssockel in der rohstoff- und ressourcenreichen Barentssee beendet. Der darin beschlossene Grenzverlauf trägt den Ansprüchen beider Staaten zu gleichen Teilen Rechnung. Außerdem vereinbarten beide Parteien, dass sie mögliche neue, bislang unentdeckte grenzüberschreitende Ressourcenlagerstätten gemeinsam ausbeuten wollen.

Hohe See

An der Außengrenze der Ausschließlichen Wirtschaftszone beginnt die Hohe See. Hier gilt für alle Staaten die Freiheit der Hohen See. Das heißt, diese Meeresregion darf unter anderem frei von Schiffen durchfahren und von Flugzeugen überflogen werden. Zudem ist es jedermann in diesem Gebiet erlaubt, zu fischen und zu forschen. Alle Aktivitäten müssen jedoch friedlicher Natur sein. Der Meeresboden jenseits der küstenstaatlichen Festlandssockel sowie alle darin vorhandenen Ressourcen gehören hingegen zum sogenannten gemeinsamen Erbe der Menschheit, auf welches niemand – kein Mensch, kein Staat – alleinigen Anspruch erheben darf. Dieses Gebiet und seine Ressourcen werden vielmehr von der Internationalen Meeresbodenbehörde (International Seabed Authority, ISA) verwaltet. In der Arktis gilt dieser Status allerdings nur für zwei kleine Regionen im zentralen Arktischen Ozean. Alle restlichen Meeresgebiete werden von einem oder mehreren Küstenstaaten beansprucht.

Eine vertragliche Sonderrolle in der Arktis nimmt zudem Spitzbergen ein. Die Souveränität der Inselgruppe östlich Grönlands wird seit dem Jahr 1920 durch den sogenannten Spitzbergenvertrag geregelt. Formal steht Spitzbergen seitdem unter norwegischer Verwaltung. Alle Vertragsstaaten genießen jedoch das Recht, gleichberechtigt mit den Norwegern die Ressourcen des Archipels friedlich zu nutzen und dort zu arbeiten, zu handeln und Schifffahrt durchzuführen. Zudem erhalten alle Bürger der Vertragsstaaten freien Zugang zur Inselgruppe. Bislang haben 46 Staaten den Vertrag unterzeichnet. Ungeklärt bleibt jedoch die völkerrechtliche Situation in Bezug auf die Seegebiete um Spitzbergen. Einerseits ist die Aus-

schließliche Wirtschaftszone um die Inselgruppe unstrittig norwegischer Hoheitsgewalt unterworfen. Andererseits gibt es bislang keine Antwort auf die Frage, ob der Spitzbergenvertrag und die darin beschlossene gemeinsame Ressourcennutzung durch die Unterzeichnerstaaten auch für dieses Meeresgebiet gilt. Die Frage ist entscheidend, vor allem in Hinblick auf die künftige Nutzung der prognostizierten Erdöl- und Gasvorkommen in der nördlichen Barentssee. Noch ist diese Region für die Mineralölkonzerne nicht zugänglich. Das langfristige Interesse an einer Öffnung der Region für Erdöl- und Gaskundungen ist jedoch groß und birgt somit Konfliktpotenzial.

Der Club der Antarktisnationen

Im Gegensatz zur Arktis liegt der antarktische Kontinent fernab der Küsten und Landesgrenzen eines oder mehrerer Nationalstaaten. Oft und gern wird dieser Umstand zum Anlass genommen, den südlichen Kontinent und die ihn umgebenden Meeresgebiete als losgelöst vom internationalen Politik- und Wirtschaftsgeschehen zu betrachten. Bei genauerem Hinschauen aber wird schnell deutlich, dass das Südpolargebiet sehr wohl ein politischer Raum ist, dessen komplexe Geschichte stets vor dem Hintergrund der internationalen Weltpolitik betrachtet werden muss – damals wie heute.

Den juristischen Rahmen der politischen Arena der Antarktis bestimmt das Antarktisvertragssystem (Antarctic Treaty System, ATS). Es besteht aus dem Antarktisvertrag, dem darauf aufbauenden internationalen Übereinkommen zum Umweltschutz in der Antarktis sowie zweier Abkommen zum Schutz der antarktischen Robben und der lebenden Meeresschätze. Der Antarktisvertrag wurde auf Initiative der USA hin ausgehandelt und am 1. Dezember 1959 von zwölf Staaten unterzeichnet. Ungefähr anderthalb Jahre später, am 23. Juni 1961, trat er in Kraft. Zu den Unterzeichnern gehörten Argentinien, Australien, Belgien, Chile, Frankreich, Großbritannien, Japan, Neuseeland, Norwegen, die damalige Sowjetunion, die damalige Südafrikanische Union sowie die Vereinigten Staaten.

Der Vertragsabschluss stellte zum damaligen Zeitpunkt im doppelten Sinn einen historischen Durchbruch dar. Zum einen war der Antarktisvertrag das erste inter-

nationale Abkommen nach dem Zweiten Weltkrieg, für welches sich die zerstrittenen und hochmilitarisierten Ost- und Westmächte mitten im Kalten Krieg an den Verhandlungstisch setzten und sich auf die gemeinsame friedliche Nutzung und Erforschung des Gebiets südlich von 60 Grad südlicher Breite einigten. Zuvor hatten beide Seiten noch gedroht, Raketen und Militär in der Antarktis zu stationieren.

Zum anderen ließen Großbritannien, Norwegen, Australien, Frankreich, Neuseeland, Chile und Argentinien für ein Zustandekommen des Vertrags ihre bis dato erhobenen Gebietsansprüche in der Antarktis ruhen. Das heißt, der damals schwelende Territorialkonflikt in der Antarktis wurde mit der Unterzeichnung des Vertrags eingefroren und der Weg für eine friedliche Zusammenarbeit von Nationen mit ganz unterschiedlichen Interessen geebnet. Hinzu kommt: Der Antarktisvertrag wurde auf unbestimmte Zeit geschlossen. Auch wenn bestimmte Folgeabkommen nach einer gewissen Zeit erneuten Verhandlungen unterzogen werden können, läuft der Antarktisvertrag nicht aus. Die Unterzeichnerstaaten verpflichten sich auf Dauer dem Schutz der Antarktis und der friedlichen Nutzung des Gebiets.

Die Idee, die Antarktis gemeinsam und losgelöst von der restlichen Weltpolitik als Kontinent der Forschung zu verwalten, ging jahrzehntelang auf. In der Region herrscht seit der Vertragszeichnung Frieden. Mittlerweile sind 54 Nationen dem Antarktisvertragssystem beigetreten und haben sich zu einer friedlichen Nutzung des Südpolargebiets verpflichtet. All jene Staaten, die tatsächlich auch aktiv Forschung in der Antarktis betreiben – sie werden Konsultativstaaten genannt –, verfolgen zwar ihre eigenen nationalen Forschungsprogramme, kooperieren aber auch auf vielen Ebenen. Sie tauschen wissenschaftliche Ergebnisse aus, planen gemeinsame Expeditionen, organisieren zusammen die immer noch sehr aufwendige Logistik für den Betrieb von Forschungsstationen auf dem südlichen Kontinent und helfen sich im Notfall gegenseitig – ungeachtet aller Konflikte, welche die Staaten möglicherweise in der restlichen Welt miteinander austragen.

Diese überaus erfolgreiche internationale Kooperation in der Antarktisforschung täuscht jedoch darüber hinweg, dass die Territorialkonflikte von damals auch heute noch schwelen. Seit der Vertragsunterzeichnung hat keine der

sieben Nationen mit Gebietsansprüchen diese aufgegeben – im Gegenteil. Länder wie Norwegen und Australien beispielsweise haben bei der UN-Kommission zur Begrenzung des Festlandssockels Anträge auf Zuschreibung der entsprechenden antarktischen Territorien gestellt. Man hat sich zwar darauf geeinigt, dass diese Anträge erst dann von der UN-Kommission bearbeitet werden, wenn der Antarktisvertrag eines Tages aufgekündigt werden sollte. Die Antragstellung allein aber zeigt, mit welcher Ernsthaftigkeit die beteiligten Parteien nationale Interessen auch im Gebiet südlich von 60 Grad Süd verfolgen.

Die Gebietsansprüche erschweren zudem die internationale Zusammenarbeit in der Antarktis – so zum Beispiel die Verhandlungen zur Ausrufung von Meereschutzgebieten im Südpolarmeer. An allen bisher ausgewiesenen Schutzgebieten und Schutzgebietsvorschlägen waren Staaten mit Gebietsansprüchen beteiligt, was von Beobachtern als ein Versuch der Konsolidierung dieser Ansprüche gesehen wird. Ausnahme hiervon ist der Vorschlag Deutschlands und der Europäischen Union, eine Schutzzone im Weddellmeer einzurichten. Dieser Vorschlag traf allerdings auf den Widerstand Norwegens, das in einigen der zu schützenden Gebiete östlich des Nullmeridians (in dem Bereich, der von Norwegen in der Antarktis beansprucht wird) zusätzliche Forschungsarbeiten durchführen und darauf aufbauend getrennte Schutzmaßnahmen erarbeiten möchte. Australische Politiker beobachten derweil mit Argwohn, dass China mittlerweile drei seiner vier Forschungsstationen in der Antarktis in jenem Teil der Ostantarktis errichtet hat, den Australien für sich beansprucht.

Wer investiert, darf mitentscheiden

Die Mitgliedsstaaten des Antarktisvertragssystems treffen sich einmal im Jahr, um Informationen auszutauschen und gemeinschaftliche Themen zu besprechen. An diesen sogenannten jährlichen Treffen der Konsultativstaaten (Antarctic Treaty Consultative Meetings, ATCM) nehmen teil:

- Vertreter der bislang 29 Konsultativstaaten, also all jene Staaten, die den Antarktisvertrag unterzeichnet haben und nachweislich und mit erheblichem Aufwand Forschung in der Antarktis betreiben;

Ansprüche aus Walfang- und Entdeckerzeiten

Die ersten Gebietsansprüche in der Antarktis wurden bereits im Jahr 1904 gestellt, also zu jener Zeit, als Walfänger den Südozean als Jagdgebiet für sich entdeckten und die Walfangnationen begannen, um die besten Fangplätze zu wetteifern. Zu diesem Zeitpunkt hisste der norwegische Walfänger und Kapitän Carl Anton Larsen die britische Flagge an der neu erreichten Walfangstation Grytviken auf Südgeorgien, denn der Neubau war unter anderem mit britischem Kapital finanziert worden. Bis dahin hatte die Insel gewissermaßen als Niemandsland gegolten. Wenig später aber erhob Großbritannien auch offiziell Anspruch auf Südgeorgien, und im Jahr 1908 erklärte das Vereinigte Königreich die gesamte Antarktische Halbinsel zwischen dem 20. und dem 80. Längengrad West zu britischem Territorium – und das war erst der Anfang.

Im Jahr 1923, also mehr als 80 Jahre nach der Entdeckung des Rossmeeres durch den Engländer James Clark Ross (5. Januar 1841), nahm Großbritannien die Leistung dieses und anderer britischer Entdecker zum Anlass, weitere Ansprüche zu erheben. Zunächst annektierte das Königreich den Rossmeer-Sektor zwischen dem 160. Längengrad Ost und dem 150. Längengrad West und unterstellte ihn seiner Kolonie Neuseeland. Drei Jahre später erhob es Anspruch auf weitere 40 Prozent des antarktischen Kontinents (45° Ost bis 160° Ost), diesmal in der Ostantarktis. Dieser Sektor wurde im Jahr 1933 der ehemaligen britischen Kolonie Australien übertragen. Ausgenommen davon war lediglich ein kleines Tortenstück (136° Ost bis 142° Ost), welches Frankreich bereits zuvor zu seinem Eigentum erklärt hatte.

Norwegen, die damals größte Walfangnation, beobachtete die Expansion Großbritanniens mit großer Sorge. Die Norweger befürchteten Fangverbote für ihre Schiffe vor den Küsten der annektierten Gebiete. Um einen möglichen Ausschluss zu verhindern, organisierten sie eigene Expeditionen in den Südozean, verbunden mit dem klaren Auftrag an die Schiffsbesatzungen, entdecktes Neuland zu annektieren. Das gelang zunächst bei zwei Inseln. Bis zum Jahr 1939 erkundeten und annektierten norwegische Entdecker dann den gesamten antarktischen Sektor zwischen 16° 30' westlicher Länge und 45° östlicher Länge, einschließlich der Küstengewässer, des Landesinnern und des geografischen Südpols. Das Gebiet heißt heute Königin-Maud-Land und erstreckt sich über eine Fläche von fast drei Millionen Quadratkilometern.

Nach Norwegen erhoben dann noch die am äußersten Südpol des amerikanischen Kontinents gelegenen Staaten Chile (1940) und Argentinien (1942) Ansprüche auf antarktisches Territorium. Die ausgelobten Gebiete aber überschneiden sich nicht nur gegenseitig, sie schließen auch Gebiete mit ein, die Großbritannien für sich beansprucht. All diese Territorialkonflikte aber ruhen, solange der Antarktisvertrag nicht aufgekündigt wird.

5.7 > Anfang jedes Jahres wird in der Antarktis die Position des geografischen Südpols neu bestimmt und mit einem Pfosten und den Flaggen der zwölf Erstunterzeichnerstaaten des Antarktisvertrags markiert. Die jährliche Neubestimmung ist notwendig, weil sich das Eis dort jährlich um zehn Meter bewegt.

- Vertreter der 25 Nichtkonsultativstaaten. Diese Staaten sind dem Antarktisvertragssystem beigetreten, betreiben aber zumeist keine eigene aktive Forschung im Südpolargebiet;
- Beobachterorganisationen wie der Wissenschaftliche Ausschuss für Antarktisforschung (Scientific Committee on Antarctic Research, SCAR) und die Kommission zur Erhaltung der lebenden Meeresschätze der Antarktis (Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources, CCAMLR);
- eingeladene Experten eines globalen Zusammenschlusses von Umweltschutzorganisationen (Antarctic and Southern Ocean Coalition, ASOC) oder aber der Internationale Verband der Reiseveranstalter mit dem Zielgebiet Antarktis (International Association of Antarctica Tour Operators, IAATO).

Entscheidungen können auf den ATCM-Sitzungen nur einstimmig getroffen werden, wobei einzig und allein die 29 Konsultativstaaten an den Abstimmungen teilnehmen. Alle anderen Teilnehmer dürfen sich an den vorhergehenden Diskussionen beteiligen, von den Abstimmungen selbst sind sie jedoch ausgeschlossen. Kritiker werfen dem Antarktisvertragssystem deshalb fehlende Offenheit, Fairness und Transparenz vor und fordern Reformen. Die Konsultativstaaten aber geben sich selbstbewusst. Ihrer Meinung nach sollen nur jene Nationen Einfluss auf das Geschehen in der Antarktis nehmen können, die aktiv Forschung betreiben und sich finanziell an der dafür benötigten Logistik und Infrastruktur beteiligen. Aus diesem Grund sind auch internationale Organisationen wie die Europäische Union und die Vereinten Nationen nicht bei den Treffen der Antarktisvertragsstaaten vertreten.



Begründet wird diese Ausgrenzung unter anderem mit dem Argument, diese Bündnisse würden auch die Interessen von Ländern vertreten, die dem Antarktisvertragssystem noch nicht beigetreten sind.

Internationale Abkommen zum Schutz der Antarktis

Die zweite Säule des Antarktisvertragssystems bilden mehrere internationale Übereinkommen zum Umweltschutz in der Antarktis, deren Bestimmungen für alle Mitgliedsstaaten rechtlich bindend sind. Allerdings setzt jeder Mitgliedsstaat diese Abkommen durch eine eigene nationale Gesetzgebung um. Zu den Übereinkommen gehören:

Die Vereinbarten Maßnahmen zur Erhaltung der antarktischen Fauna und Flora (Agreed Measures for the Conservation of Antarctic Fauna and Flora)

Dieser erste gemeinsame Maßnahmenkatalog für den Umweltschutz in der Antarktis wurde im Jahr 1964 in Brüssel beschlossen und zielte damals darauf ab, die internationale Forschung und Zusammenarbeit zum Schutz der antarktischen Flora und Fauna zu stärken. Außerdem definierte er Rahmenrichtlinien für spezielle geschützte Gebiete innerhalb der Antarktis. Auf dem ATCM-Treffen 2011 einigten sich die Konsultativstaaten jedoch darauf, dass er durch das Umweltschutzprotokoll ersetzt wurde.

Das Übereinkommen zur Erhaltung der antarktischen Robben (Convention for the Conservation of Antarctic Seals, CCAS)

Diese Konvention zum Schutz der Robbenpopulationen in der Antarktis wurde im Jahr 1972 unterzeichnet, um den damals noch stattfindenden kommerziellen Robbenschlag im Südpolargebiet zu regulieren. Das Übereinkommen trat 1978 in Kraft, fordert mittlerweile aber wenig Mitarbeit der Vertragsparteien, weil die Jagd auf Robben in der Antarktis eingestellt wurde. Alle unter dem CCAS-Abkommen gemeldeten Aktivitäten werden von Großbritannien als CCAS-Depositärstaat gesammelt und auf den jährlichen ATCM-Treffen berichtet.

Das Übereinkommen über die Erhaltung der lebenden Meeresschätze der Antarktis (Convention on the Conservation of Antarctic Marine Living Resources, CAMLR Convention)

Die CAMLR-Konvention wurde im Jahr 1980 beschlossen, nachdem die damalige Sowjetunion den Antarktischen Marmorbarsch (*Notothenia rossii*) in nur zwei Fangzeiten stark überfischt hatte und das kommerzielle Interesse an Antarktischem Krill gestiegen war. Das Abkommen trat zwei Jahre später in Kraft und war das erste Meeresübereinkommen, welches einen Ökosystemansatz zum Schutz und Management der lebenden Meeresressourcen verfolgte. Das heißt, mögliche Fischereipläne und Fangquoten werden immer auch daraufhin bewertet, welche Folgen diese Entnahme von Fisch und anderen Meeresschätzen für die daran gekoppelten Ökosysteme hätte.

Die Konvention umfasst bis heute alle im Konventionsgebiet lebenden marinen Organismen, einschließlich der Seevögel, und hat den Erhalt der marinen Ökosysteme der Antarktis zum Ziel. Fischerei wird dennoch nicht ausgeschlossen, sie muss allerdings auf nachhaltige Art und Weise erfolgen. Die Umsetzung des Abkommens koordiniert und überwacht die Kommission zur Erhaltung der lebenden Meeresschätze der Antarktis (Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources, CCAMLR) mit Sitz in Hobart, Australien. Sie legt auf Empfehlung eines wissenschaftlichen Ausschusses Fangquoten fest, stellt Arten bei Bedarf unter Schutz und ist für die Ausweisung von Meeresschutzgebieten im Südozean zuständig. Die Kommission zählt derzeit 25 Mitglieder, darunter auch die Europäische Union. Kommissionsentscheidungen können nur einstimmig getroffen werden. Der Geltungsbereich des Übereinkommens wird durch die **Südpolarfront** begrenzt und reicht deshalb in einigen Bereichen bis 50 Grad Süd. Das umschlossene Gebiet beinhaltet ungefähr zehn Prozent der Weltmeere.

Das Umweltschutzprotokoll zum Antarktisvertrag (Protocol on Environmental Protection to the Antarctic Treaty)

Das Umweltschutzprotokoll wurde am 4. Oktober 1991 in Madrid, Spanien, beschlossen und wird deshalb auch Madrid-Protokoll genannt. Es setzt nach Aussage des deut-

schen Umweltbundesamts (German Environment Agency) die schärfsten und umfangreichsten Umweltschutzregelungen um, die jemals für eine Region der Erde in einem internationalen Übereinkommen erarbeitet wurden. Das Abkommen verbietet seit seinem Inkrafttreten im Jahr 1998 den Abbau von Rohstoffen in der Antarktis und verpflichtet die Vertragsstaaten, die Antarktis als Naturreservat zu belassen, welches allein dem Frieden und der Wissenschaft gewidmet ist (Artikel 2, Umweltschutzprotokoll).

Es reglementiert im Gebiet des Antarktisvertrags sämtliche Tätigkeiten, die Auswirkungen auf die Umwelt sowie die abhängigen und verbundenen Ökosysteme der Antarktis haben könnten. Gleichzeitig schreibt es für alle Vertragsstaaten geltende Verfahren und Regelungen vor, die vor der Erteilung einer Genehmigung für eine Tätigkeit in der Antarktis durchgeführt oder beachtet werden müssen. Die spezifischen Vorschriften in den fünf Anhängen des Protokolls betreffen die Durchführung von Umweltverträglichkeitsprüfungen, den Erhalt der antarktischen Flora und Fauna, die Beseitigung und Behandlung von Abfällen oder Maßnahmen zur Verhütung der Meeresverschmutzung (zum Beispiel zum Einleiten von Öl, schädlichen Stoffen und Abwasser sowie Müllbeseitigung) sowie den besonderen Schutz und die Verwaltung von ausgewählten Gebieten.

Das Umweltschutzprotokoll kann nach einer Laufzeit von 50 Jahren – also ab dem Jahr 2048 – neu verhandelt werden. Es erlischt zu diesem Zeitpunkt aber nicht automatisch, sondern gilt weiter, sofern sich die Vertragsstaaten nicht auf eine Neuverhandlung einigen. Die Aussicht, dass das Umweltschutzprotokoll im Jahr 2048 erneut verhandelt werden könnte, bereitet vor allem Umweltschutzorganisationen Sorgen. Sie befürchten, dass bei möglichen Verhandlungen das Moratorium des mineralischen Rohstoffabbaus in antarktischen Gewässern wegfallen könnte. Überlegungen zur Exploration antarktischer Rohstofflager hatte es bereits in den 1980er-Jahren gegeben. Damals beschlossen 19 Staaten im Juni 1988 – nach sechs Jahre dauernden Verhandlungen – ein entsprechendes Regelwerk für den Rohstoffabbau, das jedoch von einigen Staaten abgelehnt wurde. Das Übereinkommen trug den Titel Regelung der Tätigkeiten im Zusammenhang mit mineralischen Ressourcen der Antarktis (Convention on the Regulation of Antarctic Mineral Resource Activi-

ties, CRAMRA). Eine für Dezember 1988 geplante formelle Inkraftsetzung dieses Abkommens scheiterte am Widerstand Frankreichs und Neuseelands. Beiden Staaten gingen die Umweltbestimmungen im damaligen Vertragstext nicht weit genug.

Daraufhin wurden Verhandlungen für ein umfassendes Umweltschutzabkommen für die Antarktis aufgenommen. In nur vier Jahren entstand das heute geltende Umweltschutzprotokoll. Die Gespräche fielen kurz nach dem Ende des Kalten Krieges in eine Phase der politischen Entspannung, in welcher viele Beteiligte eine neue Kompromissbereitschaft in Sachen Umweltschutz zeigten. In dieser Zeit verhandelte und beschloss die internationale Staatengemeinschaft der Vereinten Nationen nicht nur das Umwelt- und Entwicklungs-Aktionsprogramm Agenda 21, sondern auch die sogenannte Biodiversitätskonvention (Convention on Biological Diversity, CBD), die Klimarahmenkonvention (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) und das Übereinkommen zur Bekämpfung der Wüstenbildung (United Nations Convention to Combat Desertification in Those Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, Particularly in Africa, UNCCD). Bei den Verhandlungen für das Umweltschutzprotokoll einigten sich die Mitglieder des Antarktisvertragssystems darauf, den Umweltschutzgedanken in den Mittelpunkt des gemeinsamen Handelns in der Antarktis zu stellen und die Idee einer Rohstoffausbeutung vorerst vollständig aufzugeben. Ein bemerkenswerter Wandel, wie Beobachter heute noch sagen.

Neue Akteure, neue Wahrnehmung

Die Zeit der Entspannung ist mittlerweile vorbei. Seit Inkrafttreten des Umweltschutzprotokolls im Jahr 1998 hat nicht nur das Ausmaß menschlicher Aktivitäten in der Antarktis insgesamt zugenommen. Auch die geopolitische Weltordnung hat sich verändert. Die Großmächte konkurrieren wieder stärker um Macht und Einfluss. Frühere Entwicklungs- und Schwellenländer wie China, Indien und Südkorea sind mittlerweile wirtschaftlich stark genug, ihre wachsenden politischen und wirtschaftlichen Interessen auch durch eine verstärkte Forschungspräsenz in der Antarktis zum Ausdruck zu bringen. Außerdem engagieren sich diese Länder immer häufiger in wichtigen



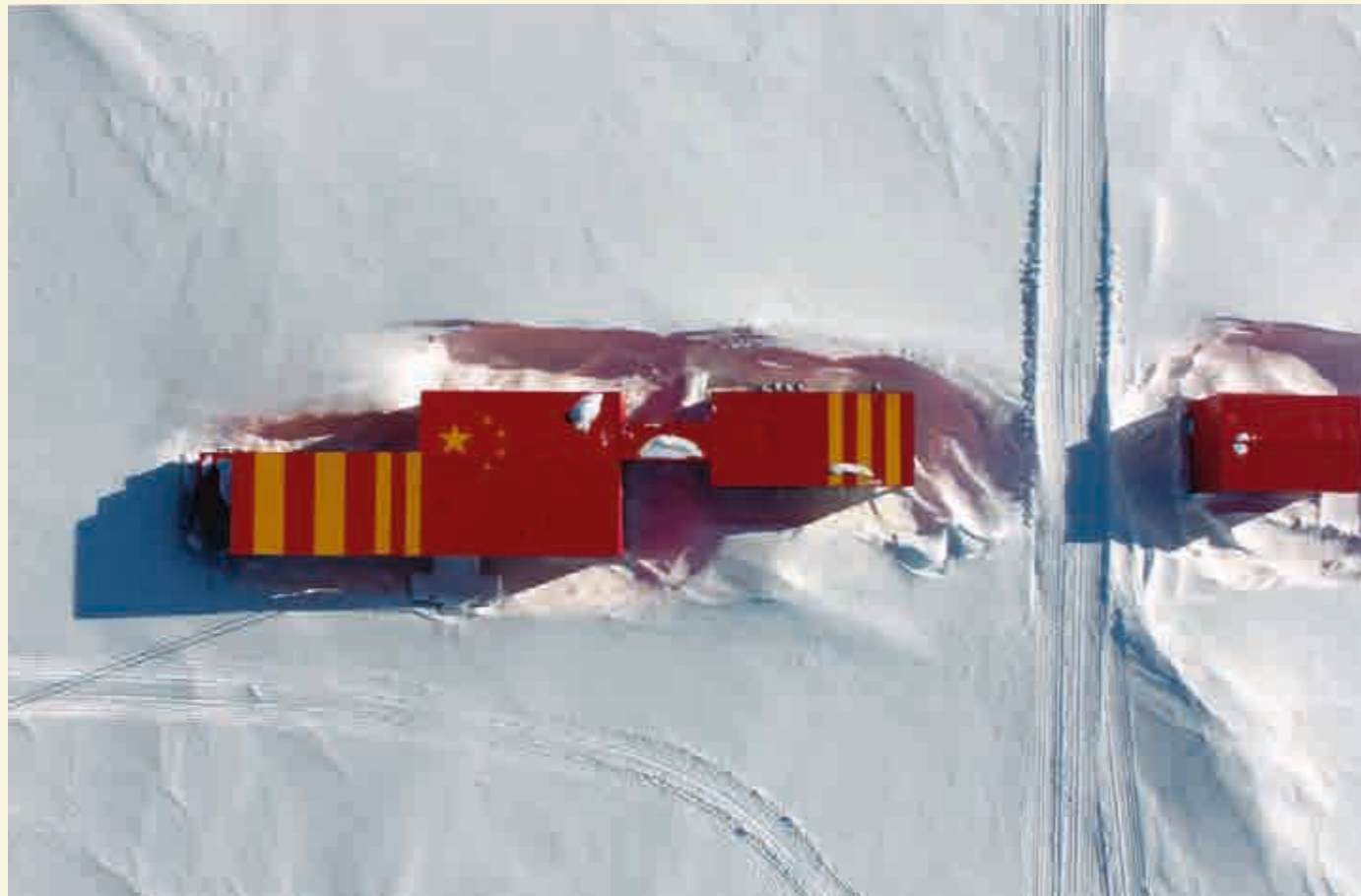
5.8 > Der Antarktisvertrag trat am 23. Juni 1961 offiziell in Kraft. Nur wenige Tage später, vom 10. bis 24. Juli 1961, trafen sich im australischen Canberra die Vertreter der damaligen zwölf Unterzeichnerstaaten zur ersten offiziellen Sitzung der Mitglieder des Antarktisvertrags. Diese Treffen finden bis heute jährlich statt, zählen aber mittlerweile deutlich mehr Teilnehmer.

wissenschaftlichen und technischen Gremien wie dem Wissenschaftlichen Ausschuss für Antarktisforschung (Scientific Committee on Antarctic Research, SCAR) und dem Rat der Leiter der nationalen Antarktisprogramme (Council of Managers of National Antarctic Programs, COMNAP). Letzterer ist die Dachorganisation aller nationalen Verbände und Institute, die in der Antarktis Forschungen betreiben. COMNAP koordiniert die Transportlogistik und die Forschungsprojekte und nimmt als Berater an den Treffen der Konsultativstaaten teil.

So mancher der Erstunterzeichnerstaaten des Antarktisvertrags sieht in dieser Entwicklung ein geopolitisches Risiko und unterstellt den aufstrebenden Nationen, vornehmlich strategisch und aus kommerziellen Interessen zu handeln. Aber auch alle westlichen Staaten haben in der Vergangenheit Interesse an den Ressourcen und Rohstoffen der Antarktis gezeigt. Politikwissenschaftler warnen deshalb vor einer Stigmatisierung der neuen Akteure.

Diese könnte langfristig die friedliche Kooperation in der Antarktis gefährden. Stattdessen schlagen Kritiker vor, das Einstimmigkeitsprinzip in wichtigen Gremien wie den ATCM-Treffen oder aber in der Kommission CCAMLR abzuschaffen und ein demokratisches Mehrheitsprinzip einzuführen. Es brächte den Vorteil, dass auch über strittige Themen (wie zum Beispiel die Einrichtung von Meereschutzgebieten unter CCAMLR) abgestimmt werden könnte, die bislang durch das Veto einiger weniger Mitgliedsstaaten blockiert werden. Gegen eine solche Lösung spricht jedoch die Tatsache, dass die Beschlüsse von den Mitgliedsstaaten in nationales Recht umgesetzt werden müssten. Staaten, die ein Veto in den Abstimmungen einlegten, wären nicht an die getroffenen Maßnahmen gebunden und hätten vermutlich kein Interesse, entsprechende Auflagen in nationale Gesetze zu gießen. Am Ende bestünde so die Gefahr, dass sich gerade die wichtigen Akteure nicht an die Beschlüsse halten würden.

Chinas wachsendes Interesse an den Polarregionen



5.9 > Die chinesische Forschungsstation Kunlun wurde rund 1200 Kilometer landeinwärts in der Ostantarktis errichtet – in einer Höhe von 4087 Metern. Bewohnt wird sie nur im antarktischen Sommer. Forschende ziehen dann Eisbohrkerne und führen atmosphärische und geophysikalische Messungen durch.

Im Januar 2018 erschien ein Strategiepapier, auf welches die führenden Staaten in Angelegenheiten der Arktis und Antarktis lange gewartet hatten: Die Volksrepublik China veröffentlichte erstmals eine offizielle Arktisstrategie, in der die zweitgrößte Wirtschaftsmacht der Welt ihre Ziele und Interessen in der Nordpolarregion formulierte. Als Nichtanrainerstaat besitzt China keinerlei rechtliche Ansprüche in der Arktis, son-

dern ist auf bilaterale Kooperationen mit arktischen Küstenstaaten angewiesen. An den Sitzungen des Arktischen Rates nimmt das Land erst seit dem Jahr 2011 als Beobachterstaat teil.

Dennoch hat sich die Rolle Chinas sowohl in der Arktis als auch in der Antarktis in den zurückliegenden zehn Jahren grundlegend geändert. Die Volksrepublik sieht sich als aufstrebende Großmacht mit wirtschaft-

lichen und strategischen Interessen, die weit über den asiatisch-pazifischen Raum hinausgehen. China möchte diese Interessen durchsetzen und weltpolitisch mitgestalten. Die Polarregionen spielen dabei eine Schlüsselrolle.

In der Arktis ist China in erster Linie an neu entstehenden Schifffahrtsrouten und an den reichen Rohstoffvorkommen interessiert. Mit Russland verhandelt China über den Ausbau einer polaren Seidenstraße, welche China über verschiedene Transport- und Kommunikationswege, vor allem aber über Schifffahrtswege, Zugang zur Arktis verschaffen würde. Im Mittelpunkt stehen dabei die Routen der Nordostpassage durch russische Gewässer. Schiffe, die über diesen nördlichen Seeweg vom Hafen Rotterdam in den Niederlanden nach Dalian in China fahren, benötigen für die Strecke zehn Tage weniger als über die bislang übliche Südroute durch den Sueskanal. Außerdem können über die Nordostpassage Erdöl- und Erdgaslieferungen innerhalb von zehn bis 14 Tagen aus nahezu jedem arktischen Hafen nach China verschifft werden.

Die dringend benötigten Rohstofflieferungen kommen bislang vor allem aus Russland, mit dessen Mineralölkonzernen China langfristige Lieferverträge über Hunderte Milliarden US-Dollar abgeschlossen hat. Der chinesische Ölkonzern CNPC und Chinas Seidenstraßen-Fond halten zudem Anteile an Russlands Flüssiggasprojekt Jamal LNG im Nordosten der sibirischen Halbinsel Jamal. Dort wird Erdgas gefördert und anschließend verflüssigt, sodass es leichter per Schiff abtransportiert werden kann. Chinas Regierung festigt aber auch ihre Beziehungen zu anderen Arktisanrainern. Mit Island einigte sie sich im Jahr 2014 auf ein Freihandelsabkommen, mit Norwegen wird noch verhandelt. Mit Finnland sprechen die Asiaten über die Verlegung eines submarinen Telekommunikationskabels, und auf Grönland interessieren sie sich für die Vorkommen wertvoller Metalle und Seltener Erden.

Im April 2019 unterzeichneten China und Russland zudem einen Forschungskooperationsvertrag, der den Bau eines gemeinsamen Forschungszentrums in der Arktis beinhaltet. Es wäre die dritte chinesische Forschungsbasis in der Arktis. Seit dem Jahr 2004 betreibt das Land eine Station im Wissenschaftsdorf Ny-Ålesund auf Spitzbergen. Im Oktober 2018 eröffnete es mit Island ein gemeinsam betriebenes arktisches Observatorium im nördlichen Teil der Insel. Außerdem entsendet China seinen Forschungseisbrecher „Xue Long“ (übersetzt: Schneedrache) seit 2003 regelmäßig zu wissenschaftlichen Expeditionen in die Arktis. Ein

zweites Polarforschungsschiff mit dem Namen „Xue Long 2“ wurde im September 2018 vom Stapel gelassen und soll noch in 2019 seinen Dienst aufnehmen. China beteiligt sich somit aktiv am Ausbau der Forschungsinfrastrukturen in der Arktis. Es betont in seinem Strategiepapier aber auch, dass es technische Innovationen für den Rohstoffabbau, für die Nutzung erneuerbarer Energien sowie für das Umweltmonitoring in der Arktis vorantreiben will. Das Land hat zudem seine Mitarbeit in den Arbeitsgruppen des Arktischen Rates intensiviert. Unabhängige Experten bezeichnen diese politischen und wirtschaftlichen Ambitionen als legitim. Solange sich China an alle internationalen Normen und Regeln halte, sollten seine Investitionen in der Arktis als Chance und nicht als Bedrohung wahrgenommen werden.

In der Antarktis hat China in den vergangenen Jahren mehr Geld für den Ausbau seiner Forschungsinfrastrukturen investiert als jede andere Nation. Das Land, welches 1983 den Antarktisvertrag unterzeichnete und seit 1985 den Status eines Konsultativstaats besitzt, verfügt mittlerweile über vier Forschungsbasen: eine auf der Antarktischen Halbinsel gelegen, drei weitere in der Ostantarktis. Eine fünfte Station wird derzeit auf Inexpressible Island im Rossmeer errichtet. Sie soll im Jahr 2022 eröffnet und ab dann permanent im Sommer wie im Winter betrieben werden.

Im Mai 2017 richtete China erstmals ein ATCM-Treffen aus. Zeitgleich stellte es sein erstes Strategiepapier zur Forschung in der Antarktis vor. Dabei betonte die Regierung die Bedeutung der partnerschaftlichen Zusammenarbeit und ihren Respekt vor den Gesetzen und Normen der Antarktis. Dennoch möchte das Land als starke Antarktisnation wahrgenommen werden. Und für den Fall, dass das Antarktisvertragssystem eines Tages hinfällig werden würde, wäre China vor Ort – mit mindestens fünf Außenposten und klar artikulierten Ansprüchen.

Interesse zeigt China unter anderem an den lebenden Meeresschätzen der Antarktis. Dem Abkommen zu deren Erhaltung (CCAMLR) trat das Land im Jahr 2006 bei. Auf der jährlichen Sitzung der Kommission CCAMLR ergreifen Chinas Vertreter mittlerweile deutlich das Wort. Zusammen mit Russland sehen sie die Einrichtung von Meeresschutzgebieten als eine Gefahr für die zukünftige Nutzung von Krill, Antarktischem Seehecht und anderen lebenden Ressourcen des Südozeans. Um diese ökonomischen Interessen zu wahren, hat China nach der Annahme des Meeresschutzgebiets Rossmeer alle weiteren Schutzgebietsvorschläge unter CCAMLR blockiert.

Ein Wirtschaftsaufschwung mit Nebenwirkungen

> Die Polarregionen sind seit jeher reich an Rohstoffen und natürlichen Ressourcen und faszinieren Menschen auf der ganzen Welt. Daraus jedoch ein lohnendes Geschäft zu machen, gestaltete sich in der Vergangenheit oftmals schwierig, weil Eis und Kälte den Zutritt versperrten. Im Zuge des dramatischen Klimawandels aber öffnen sich nun vor allem in der Arktis die Tore für Goldgräber, Investoren und Touristen. Während die Arktisanrainer diese Entwicklung als Chance begreifen, warnen Wissenschaftler und Umweltschützer vor den schwerwiegenden Folgen.

Das große Jagen

Die ersten einträglichen Geschäfte in den Polarregionen machten Robbenjäger und Walfänger. Seit dem 17. Jahrhundert wurden in den Gewässern der Arktis Wale in kommerziellem Stil gefangen. Auf Spitzbergen beispielsweise begann die Waljagd bereits im Jahr 1612, nur 16 Jahre nach der Entdeckung des Inselarchipels durch den niederländischen Seefahrer und Entdecker Willem Barents (1550–1597). Am Anfang stellten die Jäger vor allem Grönlandwale und dem Atlantischen Nordkaper nach. Beide Arten besitzen eine dicke Fettschicht und schwimmen so langsam, dass die Walfänger den Tieren in Ruderbooten nachstellten und sie mit Handharpunen erlegen konnten. Im Gegensatz zu Buckel- oder Blauwalen sinken Grönlandwale und Nordkaper nach ihrem Tod nicht zum Meeresboden. Ihre Kadaver treiben stattdessen an der Wasseroberfläche, was den Fängern das Bergen ihrer Beute erleichterte.

Der Blubber der erlegten Tiere wurde eingekocht und in Europa als Lampenöl sowie für die Herstellung von Seifen verwendet. Aus den biegsamen Barten der Wale fertigte man Korsetts und Sonnenschirme. Die Aussicht auf das „flüssige Gold“, wie Waltran auch genannt wurde, lockte zum Ende des 17. Jahrhunderts 200 bis 300 Walfangschiffe aus allen seefahrenden Nationen Europas in die Gewässer östlich Grönlands. Schätzungen zufolge erlegten allein niederländische Fänger zwischen 1661 und 1823 etwa 73 000 Wale in der Arktis. Daher überrascht es kaum, dass die arktischen Walbestände bereits Ende des 18. Jahrhunderts erschöpft waren.

Zu dieser Zeit machten die ersten Berichte über große Robbenpopulationen im Südatlantik die Runde. Die Fangschiffe nahmen Kurs Richtung Süden und begannen bereits ein halbes Jahrhundert vor der Entdeckung des

antarktischen Kontinents mit dem Robbenschlag auf Südgeorgien. Die Jäger stellten dabei zunächst der Antarktischen Pelzrobbe (*Arctocephalus gazella*) nach. Mit ihrem kostbaren Fell ließ sich in Nordamerika, Asien und Europa viel Geld verdienen. Wenig später kamen auch die Seeelefanten hinzu. Sie wurden wegen ihrer dicken, tranreichen Speckschicht getötet.

Von Südgeorgien aus entdeckten die Robbenjäger in den folgenden zehn Jahren neue Fangplätze auf den südatlantischen Inselgruppen überall im Bereich des Scotiabogens bis hin zu den Südlichen Shetlandinseln an der Spitze der Antarktischen Halbinsel. Gleichzeitig stießen die Fangschiffe im südlichen Indischen Ozean bis zu den Kerguelen und McDonaldinseln vor, wo die Männer vor allem der Subantarktischen Pelzrobbe (*Arctocephalus tropicalis*) nachstellten. Nach 20 weiteren Jahren radikaler Bejagung waren die wichtigsten Fanggründe für südliche Pelzrobben ausgebeutet.

Dennoch kam die Jagd auf diese Tiere erst um das Jahr 1900 zum Erliegen. Von beiden Robbenarten überlebten nur ein paar Hundert bis tausend Tiere in unzugänglichen Buchten einiger Inseln. Die Jagd auf Seeelefanten war schon 30 Jahre früher abgeebbt, denn durch die Einführung des Petroleums als Lampenöl hatte die Nachfrage nach Robbenöl abgenommen.

Anders als die Pelzrobben und Seeelefanten sind die vier im Packeis des Südozeans lebenden Robbenarten (Krabbenfresserrobbe, Weddellrobbe, Rossrobbe und Seeleopard) nur selten bejagt worden und somit von einer kommerziellen Ausbeutung verschont geblieben. Das absolute Gegenteil gilt für die Großwale der Antarktis, deren Bejagung im Jahr 1904 mit dem Bau der ersten Landstation zum Abspecken der getöteten Wale auf Südgeorgien Fahrt aufnahm. Durch den Einsatz von Dampfmaschinen und die Erfindung und Perfektionierung der

Harpunenkanone durch den Norweger Svend Foyn (1809–1894) in den Jahren 1864 bis 1870 wurde es nun auch möglich, die schnellen Furchenwale wie den Finnwal (*Balaenoptera physalus*), den Blauwal (*Balaenoptera musculus*), den Seiwal (*Balaenoptera borealis*) und den Zwergwal (*Balaenoptera acutorostrata*) sowie Buckelwale (*Megaptera novaeangliae*) zu töten und zu bergen. Zudem kam im Jahr 1925 die erste schwimmende Kocherei mit Heckaufschleppe zum Einsatz. Mit Fabrikschiffen wie diesem war es fortan nicht mehr notwendig, die erlegten Wale für die Verarbeitung an Land zu schleppen.

Derart technisch aufgerüstet, erlegten die Walfänger in knapp 80 Jahren Walfang im Südpolarmeer deutlich mehr Tiere als in 300 Jahren Walfang im Nordpolarmeer. Allein im Südsommer 1930/1931 töteten und verarbeiteten die Walfänger in der Antarktis 14 923 Blauwale, 28 009 Finnwale und 2079 Buckelwale. Der Schutzgedanke setzte sich erst nach dem Ende des Zweiten Weltkriegs langsam durch. Im Dezember 1946 wurde das Internationale Übereinkommen zur Regelung des Walfangs unterzeichnet und im Zuge dessen auch die Internationale Walfangkommission ins Leben gerufen. Sie scheiterte jedoch an der Aufgabe, den Walfang wirkungsvoll einzudämmen. Während die Blauwalfänge aufgrund der Populationsrückgänge zurückgingen, machten die Walfänger in der Antarktis nun Jagd auf Finnwale und Seiwale sowie ab 1973 auch auf die deutlich kleineren Zwergwale.

Verboten wurde der Walfang zu kommerziellen Zwecken erst im Jahr 1982, als unter dem großen Druck der Öffentlichkeit ein entsprechendes Moratorium zum Schutz der Großwale unterzeichnet wurde. Es trat 1986 in Kraft, wird aber von Ländern wie Norwegen, Island, Japan und Südkorea unterlaufen. Außerdem ist es einigen indigenen Bevölkerungsgruppen in Grönland, auf der sibirischen Tschuktschenhalbinsel, in Alaska und dem US-Bundesstaat Washington sowie auf den Karibikinseln St. Vincent und den Grenadinen gestattet, zur eigenen Existenzsicherung und aus kulturellen Gründen eine bestimmte Anzahl von Walen zu töten.

Rohstoffnutzung in den Polarregionen

Je zugänglicher die Polarregionen für den Menschen werden, desto öfter wird auch die Frage nach ihren möglichen

Rohstoffvorkommen gestellt und wie sich diese nutzen ließen. Weltweit steigt der Bedarf an Erdöl und -gas, Metallen und Seltenen Erden, und mit der Nachfrage der Preis und damit die Bereitschaft, mehr Geld in die Rohstofferkundung und -exploration zu investieren, vor allem in der Arktis.

Der Abbau von Rohstoffen in den schwer zugänglichen und kaum erschlossenen Gebieten ist jedoch mit vielen unkalkulierbaren Risiken und Faktoren verbunden, welche die Kosten und damit auch das Investitionsrisiko in die Höhe treiben und in der Vergangenheit bereits dazu führten, dass geplante Erschließungen nicht stattfanden oder aber die entsprechenden Pläne ad acta gelegt wurden. Im Jahr 2015 beispielsweise beendete der Mineralölkonzern Shell seine Explorationsarbeiten in der Tschuktschensee, weil Kosten und Nutzen in keinem Verhältnis standen und der Ruf des Unternehmens durch das Arktisprogramm litt.

Zu den unkalkulierbaren Faktoren der Rohstoffförderung in der Arktis gehören:

- Fehlende Infrastrukturen in der Arktis und infolgedessen lange Erschließungszeiten: Von der Entdeckung eines Vorkommens bis zum Beginn der Förderung können bis zu 17 Jahre vergehen. Und selbst dann stellt die Abgelegtheit der Minen oder Förderplattformen Unternehmen später weiterhin vor Probleme. So beklagten beispielsweise chinesische Bergbauunternehmen, die in Grönland investieren, dass sie ihre Mitarbeiter nur per Hubschrauber einfliegen könnten, was die Betriebskosten enorm in die Höhe schraubte.
- Schwierige klimatische und witterungsabhängige Bedingungen: Extreme Temperaturen, starke Winde, bewegliches Meereis und die Instabilität des arktischen Permafrostbodens sind schwer vorherzusagen und erfordern den Einsatz teurer Spezialtechnik. Minen, Straßen, Schienen und Gebäude müssen gegen den tauenden Untergrund abgesichert werden; Offshore-Anlagen wie Ölbohrplattformen und Tanker müssen den sich stetig ändernden Eisbedingungen standhalten.
- Lange, zum Teil schwierige Transportwege: Die Förderstätten liegen weit entfernt von den Verbrauchern.

- Hohe Personalkosten für Fachpersonal, welches bereit ist, in den unwirtschaftlichen und entlegenen Gebieten zu arbeiten.
- Verschiebungen am Weltmarkt und schwankende Rohstoffpreise: Die Rohstoffförderung in schwierigen Gebieten wie der Arktis ist nur dann rentabel, wenn es entsprechend große Märkte und einen damit einhergehend hohen Preis für die Rohstoffe gibt.
- Geopolitische Entwicklungen: Die Rohstoffexploration in der Arktis verlangt Technologien und Expertisen, die ein Staat allein in der Regel nicht aufbringen kann. Russland beispielsweise musste einige seiner geplanten Explorationsprojekte verschieben, nachdem es die Krim besetzt hatte und viele Staaten Wirtschaftssanktionen gegen Russland verhängten.
- Umweltbeeinträchtigungen: Polare Ökosysteme reagieren extrem sensibel auf kleinste Schwankungen und regenerieren sich nach Unfällen nur sehr langsam. Viele Experten stufen daher das Umweltrisiko in der Arktis aufgrund der Eisbedeckung und der extrem niedrigen Temperaturen, in denen sich beispielsweise Ölrückstände deutlich langsamer abbauen als in wärmeren Regionen, als nicht kalkulierbar ein.

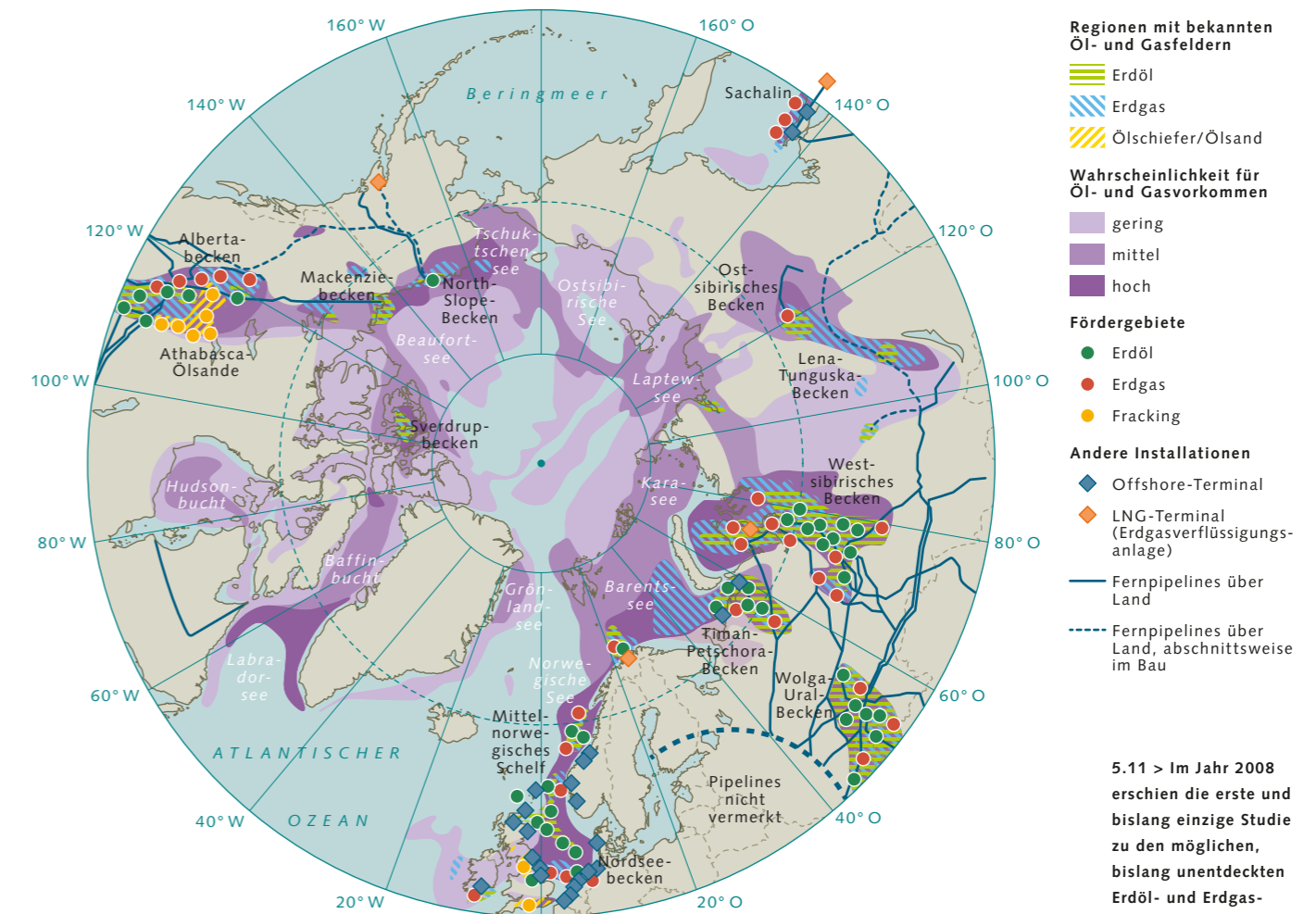
- Druck der Öffentlichkeit: Klagen oder Kampagnen von Umweltorganisationen und der einheimischen Bevölkerung können den Genehmigungsprozess von Explorationsmaßnahmen in der Arktis verzögern oder aber sogar verhindern. Erst im April 2019 entzog das norwegische Parlament einem geplanten Öl- und Gasbohrprojekt in den Gewässern der Lofoten seine Zustimmung. Der Entscheidung vorangegangen waren weltumspannende Kampagnen von Umweltschutzorganisationen wie SeaLegacy, die vor den Folgen des Rohstoffabbaus für Umwelt, Fischerei und Tourismus gewarnt hatten.

Geologische Voraussetzungen

Beim Thema Rohstoffe unterscheiden Experten zwischen mineralischen Rohstoffen und Kohlenwasserstoffvorkommen, sogenannten Energierohstoffen. Zur ersten Kategorie gehören Metalle und Minerale wie Eisenerz, Uran, Gold, Diamanten und viele andere; in die zweite Kategorie fallen Erdgas und Erdöl. Wie sich die Lagerstätten dieser Rohstoffe in einer Region verteilen, hängt in erster Linie von der plattentektonischen Entwicklung dieses Gebiets ab. Im Umkreis des Arktischen Ozeans beispielsweise liegen die drei großen und geologisch sehr alten Kontinentalshilde Laurentia, Baltica und Siberia. Diese bestehen überwiegend aus kristallinen Gesteinen und teilweise aus mächtigen Sedimentserien, die ein Alter von einer Milliarde bis 2,5 Milliarden Jahren haben. Die dort vorherrschenden geologischen Bedingungen führten vor allem zur Bildung mineralischer Rohstoffe wie Gold, Kupfer, Eisenerz, Molybdän, Blei, Zink, Platin, Nickel, Diamanten und Seltene Erden.

Erdöl- und Erdgaslagerstätten dagegen finden sich eher in jenen Teilen der Arktis, wo Flüsse und Meere einst über Millionen von Jahren Sedimente abgelagert haben, sodass kilometerdicke Sedimentschichten entstanden. Das geschah in den zurückliegenden 350 Millionen Jahren vor allem in den Schelfgebieten. Deren Sedimentschichten enthalten zum Teil sehr viel organisches Material und boten somit beste Bedingungen für die Bildung und Anreicherung von Erdöl und Erdgas.

Im Gegensatz zu den flachen, ausgedehnten Schelfmeeren der Arktis eignen sich die häufig schmalen Schelf-



5.11 > Im Jahr 2008 erschien die erste und bislang einzige Studie zu den möglichen, bislang unentdeckten Erdöl- und Erdgasvorkommen in der Arktis. Die größten Lagerstätten werden demnach im West-sibirischen Becken, im Timan-Petschora-Becken sowie in Alaskas North-Slope-Becken und im Mittel-norwegischen Schelf vermutet.

5.10 > In der Diavik-Diamantenmine im subarktischen Teil der kanadischen Northwest-Territorien werden seit dem Jahr 2003 hochwertige Diamanten für die Schmuckherstellung abgebaut. Seit 2012 erfolgt der Abbau gänzlich unter Tage.



gebiete in der Antarktis nur in Maßen für die Offshore-Erdöl- und Erdgasexploration. Das Gewicht des Eispanzers drückt den antarktischen Kontinent nach unten, sodass der Meeresboden des Festlandssockels größtenteils in einer Tiefe von mehr als 500 Metern liegt. Wäre eine Förderung erlaubt, müssten Mineralölkonzerne großen Aufwand betreiben, um dort nach Erdöl und -gas zu bohren.

Energierohstoffe in der Arktis

Erdöl und -gas werden seit mehreren Jahrzehnten in der Arktis gefördert. Seit Beginn der Suche nach beiden Rohstoffen Mitte der 1930er-Jahre wurden über 450 bedeutende Erdöl- und Erdgasvorkommen nördlich des Polarkreises entdeckt – an Land ebenso wie in den

Schelfgebieten. Mittlerweile finden insgesamt etwa zehn Prozent der weltweiten Erdöl- und 25 Prozent der Erdgasförderung in der Arktis statt, allerdings nahezu ausschließlich aus Lagerstätten auf dem Festland. Für die arktischen Staaten stellt die Erschließung von Öl- und Gasreserven in ihren nördlichen Territorien einen bereits entscheidenden oder aber immer wichtiger werdenden Wirtschaftszweig dar. Russisches Erdgas wird zum Beispiel auch nach Deutschland geliefert. Die Bundesrepublik erhält gut ein Drittel seines Erdgases aus Westsibirien.

Trotz dieser großen Fördermengen gilt die Arktis nach wie vor in großen Teilen als unerschlossen, vor allem offshore. Das heißt, viele mögliche Lagerstätten sind noch gar nicht entdeckt. Wie groß die bislang unentdeckten Vorkommen beider Rohstoffe in der Arktis vermutlich

sind, versuchte der Geologische Dienst der Vereinigten Staaten (US Geological Survey, USGS) im Jahr 2008 in seiner großen CARA-Studie (Circum-Arctic Resource Appraisal, CARA) abzuschätzen. Seinen Berechnungen zufolge lagern nördlich des Polarkreises etwa 30 Prozent aller noch unentdeckten Erdgasreserven der Welt und rund 13 Prozent der unentdeckten Erdölvorkommen. Ein Großteil dieser bislang unentdeckten Felder wird in den flachen Schelfbereichen des Arktischen Ozeans vermutet – in Wassertiefen von weniger als 500 Metern.

In seiner Studie untersuchte der USGS insgesamt 25 arktische Provinzen. 90 Prozent der vermuteten Reserven aber liegen in nur zehn dieser Regionen. Das bedeutet, die möglichen Erdöl- und Erdgaslagerstätten in der Arktis konzentrieren sich in einigen wenigen Gebieten. Hinzu kommt: Die Menge des vermuteten Erdgases ist dreimal so groß wie die Menge des angenommenen Erdöls. Die größten Energierohstoffvorkommen werden im Westsibirischen Becken, dem Timan-Petschora-Becken sowie in Alaskas North-Slope-Becken und dem Mittelnorwegischen Schelf (Barentssee) vermutet. Die ölfreichsten Gebiete liegen dabei vor der Nordküste Alaskas sowie in den arktischen Gewässern Kanadas und Grönlands; die größten Erdgaslagerstätten befinden sich vermutlich im Westsibirischen Becken Russlands, hier vor allem in der südlichen Karasee.

Die Prognosen des USGS machen deutlich, dass einige Arktisstaaten über besonders große Vorkommen verfügen. Der Studie zufolge liegen zwei Drittel der zu erwartenden Reserven im eurasischen Teil der Arktis, das restliche Drittel im nordamerikanischen Teil. Etwa 90 Prozent der Vorkommen in der eurasischen Arktis sind Erdgas; die Lagerstätten in der nordamerikanischen Arktis dagegen enthalten vermutlich mehr Erdöl. In der Rangliste der rohstoffreichsten Arktisstaaten führt demnach Russland, welches etwa die Hälfte der bislang unentdeckten Vorkommen beanspruchen kann. Den zweiten Platz belegen die USA mit Alaska und einem Fünftel der erwarteten Reserven, gefolgt von Norwegen, Dänemark/Grönland und Kanada.

Die USGS-Studie ist bis heute die einzige arktisweite Studie zu möglichen Erdöl- und Erdgasvorkommen und aufgrund ihrer Methodik mit großen Unsicherheiten versehen. Die Schätzungen der US-amerikanischen Wissen-

schaftler stützen sich vielerorts nur auf sehr vage geologische Informationen. Aus vielen Teilen der Arktis gibt es nämlich noch keine ausreichenden Daten. Die Forscher erwarten daher, dass sich die Schätzungen erheblich ändern werden, sobald neue geologische Daten vorliegen.

Zudem verweisen die Autoren darauf, dass sie in ihren statistischen Berechnungen technologische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen sowie mögliche Risiken der Exploration nicht mitberücksichtigt haben. Aus diesem Grund ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass ein substantieller Teil der vermuteten Vorkommen niemals erschlossen und abgebaut wird. Auch genaues Wissen über eine Lagerstätte bedeutet in der Realität allerdings nicht, dass diese auch ausgebeutet wird. So gibt es arktisweit mehrere Vorkommen, die seit fast 40 bis 50 Jahren bekannt sind, bislang aus Rentabilitäts- oder Umweltschutzgründen jedoch nicht erschlossen wurden. Das gilt insbesondere für Lagerstätten in der nordamerikanischen Arktis, wo die Öl- und Gasförderung allein durch die Marktnachfrage bestimmt wird und damit durch den zu erzielenden Preis.

In Russland dagegen besitzt die Ressourcenförderung auch eine strategische und politische Bedeutung. Einem Strategiepapier zufolge betrachtet die russische Regierung die Rohstoffausbeutung in der Arktis als essenzielle Grundlage für die soziale und wirtschaftliche Entwicklung des Landes. Der Export von Rohöl und daraus verarbeiteten Erzeugnissen macht über 50 Prozent der russischen Gesamtexporte aus. Die Ressourcenförderung in der Arktis dient außerdem dem Infrastrukturaufbau in den nördlichen Regionen sowie der symbolischen Aufwertung des russischen Selbstbildes als arktischer Nation.

Die Regierung fördert den Ressourcenabbau deshalb zum Beispiel durch Steuererleichterungen. Große Staatskonzerne wie Gazprom und Rosneft dominieren zudem die Industrie und fördern Erdgas und Erdöl in wesentlich mehr Gebieten, als dies zum Beispiel in Nordamerika der Fall ist. Und die Zahl der Förderanlagen steigt weiter. Im April 2019 verkündete der russische Mineralölkonzern Rosneft nach einem Treffen mit dem russischen Präsidenten Wladimir Putin, dass das Unternehmen die Erschließung mehrerer Öl- und Gasfelder in der russischen Arktis plane, wodurch unter anderem Öllagerstätten im Umfang von 1,5 Milliarden Tonnen abbaubar



5.12 > Mithilfe der speziell konstruierten, meereistauglichen Ölbohrplattform „Prirazlomnaja“ gelang es dem russischen Mineralölkonzern Gazprom im Jahr 2013 erstmals, Erdöl aus arktischen Offshore-Lagerstätten zu fördern. Die Plattform ist bis heute im Prirazlomnoje-Förderfeld südlich der Insel Nowaja Semlja im Einsatz.

5.13 > Am Nordostufer der Halbinsel Jamal haben der russische Konzern Novatek und seine Partner das Flüssigerdgaswerk Jamal LNG errichtet. In drei Produktionslinien wird hier Erdgas gefördert, verflüssigt und über den Hafen Sabetta nach Europa und Asien verschifft.



wären. Außerdem diene das Projekt dem Ausbau des nördlichen Seewegs entlang der russischen Arktisküste. Um diese Pläne zu realisieren, muss Rosneft nicht nur in neue Eisbrecher und eisfähige Tankschiffe investieren und eine Ölpipeline von seinen Wankor-Ölfeldern westlich des Flusses Jenissei bis zur arktischen Küste errichten. Der Konzern hat auch begonnen, Wohnungen für die erwarteten 20 000 Arbeiter zu bauen. Außerdem sucht Rosneft nach internationalen Partnern für dieses Großprojekt, die trotz aller Risiken und der unsicheren Preisentwicklung für Energierohstoffe in das Vorhaben investieren.

Das russische Ministerium für Ressourcen und Umwelt gab nahezu gleichzeitig bekannt, dass es mehr als hundert Projekte zur Öl- und Gasförderung in der Arktis sowie zum Ausbau von Infrastrukturen und Tourismus mit einer Summe von umgerechnet 164,2 Milliarden US-Dollar fördern wolle. Darunter sind auch bereits angelaufene Großprojekte wie große Öl- und Gasförderstätten auf der Halbinsel Jamal und im östlichen Sibirien.

Auf der Gydanhalbinsel am Ostufer des Obbusens beispielsweise errichtet derzeit Russlands größter privater Mineralölkonzern Novatek seine zweite Anlage für die Produktion und Verschiffung von Flüssiggas (Arctic LNG 2). Der Bau des Hafenterminals und aller dazugehö-

riger Industrieanlagen und Gebäude kostet etwa 21 Milliarden US-Dollar und wird unter anderem durch Saudi-Arabien, den französischen Mineralölkonzern Total und japanische Handelsfirmen mitfinanziert. Der Industriekomplex mit einer Jahreskapazität von 19,8 Millionen Tonnen Flüssiggas soll im Jahr 2023 den Betrieb aufnehmen und Flüssiggas für Kunden in Asien und Europa liefern. Die Investorenliste steht beispielhaft für die zunehmende internationale Kooperation bei der Erkundung und Ausbeutung von Rohstoffen in der Arktis. Da die Erdöl- und Erdgasförderung im Nordpolargebiet technisch schwierig ist und enorme Kosten verursacht, sind auch erfahrene Akteure wie Rosneft, Gazprom oder Novatek darauf angewiesen, mit amerikanischen, europäischen und asiatischen Unternehmen zu kooperieren.

In den USA treibt die Trump-Regierung derzeit den Verkauf von Ölbohrlicenzen im einst geschützten Küstengebiet (genannt: 1002 Area) des Arctic National Wildlife Refuge voran – etwa indem die Administration notwendige Studien zu den Folgen einer möglichen Erdölexploration in sehr kurzer Zeit durchführen lässt. Dabei wäre Vorsicht angebracht. Die Arktis ist aufgrund ihrer klimatischen und geografischen Bedingungen eine risikoreiche Region für wirtschaftliche Aktivitäten, vor allem für Großprojekte

wie die Öl- und Gasförderung. Unfälle und Risiken können selbst dann nicht ausgeschlossen werden, wenn die Bergbau- und Mineralölkonzerne allen Umweltauflagen folgen und moderne Sicherheitstechnik einsetzen. Die Gefahr von Umweltbeeinträchtigungen durch Ölverschmutzungen, Müll und Lärm besteht und wiegt in der Arktis zumindest im Fall von Tankerunfällen oder Pipeline-Lecks um so schwerer, weil Kohlenwasserstoffe wie Öl aufgrund der niedrigen Temperaturen viel länger im Ökosystem verbleiben.

Experten kommen außerdem zu dem Schluss, dass Maßnahmen zur Beseitigung von Öllachen oder Ölteppichen in der Arktis sehr schwierig und langwierig, wenn nicht sogar unmöglich sind. Säuberungstechniken, die sich in anderen Regionen als nützlich erwiesen hätten, seien in arktischen Gewässern weniger effektiv oder sogar unbrauchbar, heißt es. Eis könnte die Ölabsaugsysteme verstopfen, Ölsperren könnten einfrieren. Zur Zeit der Polarnacht würde zudem die Dunkelheit jede Säuberungsaktion behindern. Überdies sind viele Regionen in der Arktis nur mit dem Flugzeug, Hubschrauber oder Schiff erreichbar. Das bedeutet, dass entlang der arktischen Küste wichtige Infrastrukturen und auch das entsprechende Personal fehlen, um im Unglücksfall eine Ölpest schnell und effektiv bekämpfen zu können.

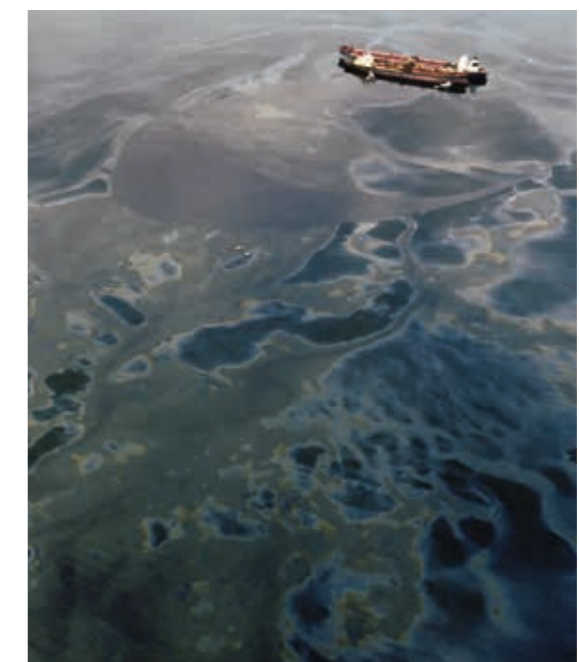
Mineralische Rohstoffe in der Arktis

Während in der Antarktis der Abbau mineralischer Rohstoffe durch das Umweltschutzprotokoll verboten ist, bilden Bodenschätze wie Kohle, Zink, Kupfer, Gold, Diamanten, Platin, Nickel, Palladium, Eisenerz und Seltene Erden in vielen Regionen der Arktis wichtige Wirtschaftszweige oder werden – wie zum Beispiel in Grönland – als Grundlage für eine künftige wirtschaftliche Entwicklung betrachtet. Kanada beispielsweise gehört seit der Entdeckung von Diamantenvorräten in seinen Nordwest-Territorien zu den fünf größten Diamantenproduzenten der Welt. Die größte Zinkmine der Welt – Red Dog Mine genannt – befindet sich in Alaska. Sie erschließt die größten bislang bekannten Zinkvorkommen auf der Erde und steht allein für zehn Prozent der weltweiten Förderung dieses Metalls.

Die Erschließung mineralischer Rohstoffe in der Arktis hat eine lange Geschichte. Die mittlerweile zweitgröß-

te Eisenerzmine der Welt im schwedischen Malmberget, Provinz Lappland, eröffnete bereits im Jahr 1745. Auf Grönland wurden schon seit Mitte des 19. Jahrhunderts in kleinerem Maßstab Kupfer, Blei, Zink, Silber, Gold, Marmor, Graft, Olivin und Kryolith gewonnen. Der Goldrausch am Klondike River lockte ab dem Jahr 1896 mehr als 100 000 Goldsucher nach Alaska und überschwemmte den Weltmarkt mit Gold. Knapp zwei Jahrzehnte später begann Russland mit dem Bau seines größten Bergbau- und Hüttenkomplexes in der sibirischen Arktis (Bergbaubezirk Norilsk in der Region Krasnojarsk). Wegen der ungefilterten Hüttenemissionen gehörte die Stadt Norilsk lange Zeit zu den Städten auf der Welt mit der größten Luftverschmutzung.

Bis heute findet der Abbau mineralischer Rohstoffe in der Arktis ausschließlich an Land statt und ist aus diesem Grund weniger von den Folgen des Klimawandels und dem damit einhergehenden Rückgang des arktischen Meereises betroffen. Derzeit gibt es etwas mehr als 20 Bergwerksbetriebe, die mineralische Bodenschätze abbauen. In Russland allein sind es über ein Dutzend, denn die russische Arktis ist reich an Eisen-, Bunt-, Edelmetallen, Metallen der Seltenen Erden und Düngemittelrohstoffen sowie an Edel- und Halbedelsteinen.



5.14 > Eine der schlimmsten Ölkatastrophen aller Zeiten: In der Nacht am 24. März 1989 lief im Prinz-William-Sund vor Alaska der Tanker „Exxon Valdez“ auf ein Riff und verlor 39 000 Tonnen Rohöl. Infolge der Ölpest starben mindestens 400 000 Vögel und Säugetiere; die Fischerei kam zum Erliegen. Die Küste ist bis heute mit Öl belastet.



5.15 > Im Zuge des Klimawandels könnte sich für Grönland eine neue Einnahmequelle auftun, berichten Forscher. Wo Eismassen schmelzen, transportieren Schmelzwasserbäche und -flüsse große Mengen an Sediment Richtung Küste und lagern diese dort ab. Sand wiederum ist ein weltweit begehrter Rohstoff, dessen Export sich lohnen könnte, wenn der Abbau umweltverträglich erfolgen kann.

Parallel dazu finden nach Angaben des Arktischen Wirtschaftsrates (Arctic Economic Council, AEC) viele Prospektionen in der Arktis statt, um genauer herauszufinden, wo und vor allem in welchen Mengen Rohstoffe vorkommen. Von Grönland beispielsweise weiß man seit Jahrzehnten, dass die Insel über sehr große Rohstofflagerstätten verfügt. Hervorzuheben sind hier unter anderem Gold, Platingruppenmetalle, Seltene Erden, Uran und Coelestin. Wirtschaftsplaner und große Teile der grönländischen Bevölkerung hoffen, dass der Abbau von Mineralien künftig große Einnahmen generieren und die Insel langfristig zu einem bedeutenden Lieferanten aufsteigen wird. Entsprechende Abbaulizenzen sind bereits vergeben, unter anderem an chinesische Bergbauunternehmen. Bislang aber verhinderte eine Vielzahl von Gründen einen gewinnbringenden Abbau in großem Stil, denn auf Grönland fehlen wie in weiten Teilen der restlichen Arktis noch immer wichtige Infrastrukturen wie Straßen, Schienen, Häfen und Unterkünfte für die Minenarbeiter. Die Durchschnittstemperaturen auf der vereisten Insel sind so niedrig, dass ein Abbau von Bodenschätzen nur im kurzen Sommer möglich ist. Außerdem versperrt arktisches Meereis Transportschiffen noch häufig den Weg zu Förderstätten wie dem Zitronenfjord im hohen Norden. Die Arktisstaaten haben sich im Arktischen Rat zudem darauf geeinigt, ihre arktischen Territorien möglichst nachhaltig zu entwickeln. Das heißt, jede Nation macht Bergbauunternehmen mittlerweile Auflagen zum Umwelt- und Arbeitsschutz sowie zum Umgang mit der lokalen Bevölkerung, was die Explorationskosten zusätzlich in die Höhe treibt. Angesichts niedriger oder zumindest schwankender Weltmarktpreise für Rohstoffe wie Blei, Zink und Seltene Erden befinden sich die meisten Bergbauvorhaben auf Grönland deshalb noch immer in der Planungs- oder Entwicklungsphase.

Gefördert wird derzeit nur in einer Mine. Das norwegische Unternehmen Greenland Ruby gewinnt seit Mai 2017 im südwestgrönländischen Aappaluttoq pinkfarbene Rubine und verkauft diese als Schmuck an Grönland-Touristen sowie auf dem skandinavischen Markt. Kurz vor dem Produktionsstart steht anscheinend auch die kanadische Firma Hudson Resources Inc. Sie will in der Region White Mountain am westgrönländischen Søndrestromfjord kalziumreichen Feldspat (Anorthosit) abbauen und

an Produzenten von Fiberglas verkaufen. Eine Förderung des Industrieminerals aber wird nur im kurzen Sommer möglich sein, sodass fraglich bleibt, ob sich der Betrieb der Mine langfristig rentieren wird.

In anderen Teilen der Arktis dagegen geht die Nutzung der Bodenschätze und der Ausbau der dazu notwendigen Infrastruktur zügig voran. Ende 2019 soll in der Nähe der russischen Hafenstadt Murmansk ein neuer Hafenterminal eröffnet werden, über den dann jährlich neun Millionen Tonnen Kohle verschifft werden. Den Planungen zufolge wird sich diese Menge nochmals verdoppeln, wenn bis 2023 weitere Ausbaustufen abgeschlossen sind. Die norwegische Regierung stimmte im Februar 2019 dem Bau einer Kupfermine in der arktischen Gemeinde Kvalsund zu, obwohl einheimische Fischer und Rentierhirten gegen die Pläne protestiert hatten. Der Minenbetreiber Nussir ASA schätzt die Kupfervorkommen in dem Gebiet auf 72 Millionen Tonnen. Größer ist keine andere bekannte Kupferlagerstätte in Norwegen.

Im Südwesten Alaskas kämpfen derweil Umweltschützer und Teile der indigenen Bevölkerung gegen Pläne des kanadischen Konzerns Northern Dynasty Minerals, eine große Gold- und Kupfermine in der Region Bristol Bay zu eröffnen. Das Gebiet mit seinen vielen Seen und Flüssen gilt als eines der wichtigsten Laichgebiete des Rotlachs (*Oncorhynchus nerka*). Nach Angaben des Bergbaukonzerns lagern dort aber auch die vermutlich zweitgrößten Kupfervorkommen der Welt sowie große Mengen an Gold, Silber, Molybdän, Silber, Palladium und Rhenium.

Schiffsverkehr in der Arktis

Der starke Rückgang des arktischen Meereises – vor allem nördlich der russischen Küsten sowie in den Gewässern Alaskas – eröffnet neue Schifffahrtswege, die sowohl für Akteure aus den Arktisanrainerstaaten als auch für viele Unternehmen aus Drittstaaten interessant sein könnten. Wo das Meereis weicht oder nur noch im Winter auf dem Wasser treibt, können nämlich:

- Kutter in bislang unberührte Fischgründe vorstoßen;
- Bohrschiffe oder Plattformen jene marinen Erdgas- und Erdöllagerstätten ausbeuten, die bislang nicht zugänglich waren;

Die Bodenschätze unter dem Eis der Antarktis

Die Antarktis ist bis heute der einzige Kontinent der Erde, auf dem noch kein Bergbau stattgefunden hat. Dieses Alleinstellungsmerkmal ist zum einen auf die extremen Temperaturen und die großflächige Vereisung des Kontinents zurückzuführen, welche geologische Untersuchungen des Untergrundes außerordentlich erschweren. Zum anderen verbietet das Madrider Umweltschutzprotokoll zum Antarktisvertrag jegliche kommerzielle Explorationsmaßnahme südlich des 60. Breitengrads Süd. Bohrungen oder Gesteinsprobenahmen zu Forschungszwecken sind jedoch durchaus erlaubt.

Die Geologie der Landmassen im Südpolargebiet ist deshalb in einigen Regionen der Antarktis hinreichend bekannt, um Annahmen über das Rohstoffpotenzial zu machen. Forscher wissen mittlerweile, dass es zum Beispiel im Transantarktischen Gebirge Kohlelagerstätten und in den ostantarktischen Prinz-Charles-Bergen Vorkommen an Eisenerz gibt. Diese abzubauen, wäre logistisch und technisch jedoch sehr aufwendig und ist daher aus Expertensicht wirtschaftlich uninteressant. Außerdem ist wenig über die Qualität und Gesamtmenge dieser Vorkommen bekannt.

Vorkommen anderer Bodenschätze werden vermutet, konnten bislang aber nicht endgültig nachgewiesen werden. Dazu gehören Metalle wie Nickel, Kupfer und Platin. Die Vermutungen stützen sich auf die Erkenntnis, dass die Küstenregionen der Antarktis große geologische Gemeinsamkeiten mit rohstoffreichen Randgebieten Südamerikas, Afrikas und Australiens aufweisen, an die der

südliche Kontinent ja noch vor 250 Millionen Jahre grenzte. Der goldreiche Höhenzug Witwatersrand in Südafrika beispielsweise könnte die gleichen geologischen Merkmale aufweisen wie Teile des antarktischen Königin-Maud-Landes. Die Antarktische Halbinsel wiederum bildet die Fortsetzung der südamerikanischen Anden, wo Metalle wie Molybdän, Gold und Silber abgebaut werden. Kleine Vorkommen dieser Bodenschätze wurden auch schon auf der Halbinsel entdeckt. Und im sogenannten Dufekmassiv in den Pensacolabergen, einer Gebirgsregion im westantarktischen Queen Elizabeth Land, vermuten Forscher Platingruppenmetalle, Chrom und andere mineralische Rohstoffe, wie sie auch im geologisch ähnlichen Bushveld-Komplex in Südafrika abgebaut werden.

Erdöl- und Erdgasvorkommen werden in den antarktischen Schelfgebieten vermutet. Entsprechend dicke Sedimentablagerungen, die für die Bildung beider Rohstoffe gebraucht werden, könnten auf den Schelfen des Ross- und Weddellmeers vorkommen sowie in der Amundsen- und Bellingshausensee. Mögliche Lagerstätten aber wären höchstwahrscheinlich zu klein, als dass sich eine Förderung wirtschaftlich lohnen würde. Außerdem treiben in den Schelfgebieten der Antarktis viele, zum Teil sehr große Eisberge. Sie würden eine ernstzunehmende Gefahr für Bohrschiffe und -plattformen darstellen und wären aufgrund ihrer weit in die Tiefe reichenden Eismassen jederzeit auch in der Lage, technische Installationen am Meeresboden zu zerstören. Das Risiko von Unfällen und Umweltverschmutzungen wäre also sehr hoch.



5.16 > Wo die Antarktis nicht von Eis bedeckt ist, kann man Hinweise auf Rohstofflagerstätten finden. Die markante schwarze Linie am Fuß dieses Sandsteinfelsens im Transantarktischen Gebirge etwa verrät ein Kohleflöz, das sich vor mehr als 250 Millionen Jahren gebildet hat.

- Handelsunternehmen und Reedereien zum Teil erhebliche Zeit- und damit Kostenersparnisse verbuchen, weil sie ihre Waren und Güter über die kürzeren arktischen Seewege von Nordeuropa nach Nordostasien verschiffen und
- Reiseunternehmen mit Kreuzfahrten in der Arktis neue Kundschaft generieren.

Dabei wird in der öffentlichen Diskussion jedoch oft vergessen, dass Schifffahrt in der Arktis keineswegs ein neues Phänomen ist. Im Gegenteil: Große Teile der Nordpolarregion erschloss der Mensch per Schiff. Regelmäßige Schiffsverbindungen entstanden bereits vor mehr als hundert Jahren in den eisfreien arktischen Meeresgebieten wie der West- und Nordküste Skandinaviens sowie überall dort, wo Regierungen oder Unternehmen in arktische Standorte investierten und Menschen versorgt werden mussten – etwa auf Spitzbergen, wo um das Jahr 1900 der Kohleabbau begann und der Schiffstransport die einzige Möglichkeit war, Maschinen und Fahrzeuge auf die arktische Inselgruppe zu bringen sowie die Kohle von dort abzutransportieren.

In großen Teilen der Arktis sind Schifffahrtsverbindungen bis heute die Lebensader für die lokale Bevölkerung. Die Menschen haben ihre Siedlungen nah an der Küste errichtet, weil der Seeweg die einzige Möglichkeit ist, lebensnotwendige Waren zu erhalten. Straßen oder Schienen gibt es in vielen Regionen nicht.

Regional statt international

Die arktischen Gewässer werden heutzutage vor allem für die Fischerei, den Rohstofftransport, die Versorgung der arktischen Siedlungen und Bergbaustätten, für die Passagierschifffahrt, den Tourismus sowie für die Polar- und Meeresforschung genutzt. Ein Großteil dieser Fahrten findet nach wie vor im Sommer oder im Herbst statt, wenn große Gebiete eisfrei und die Risiken möglichst gering sind. Viele Schiffe meiden auch die vom Eis bedeckten Regionen. Sie verkehren vor allem in der Peripherie des Arktischen Ozean, beispielsweise entlang der norwegischen Küste, in der größtenteils eisfreien Barentssee, rund um Island und die Färöerinseln, südwestlich von Grönland und im Beringmeer.

Die meisten arktischen Schifffahrtslinien werden von einheimischen oder staatseigenen Schifffahrtsunternehmen bedient. Entlang der norwegischen Küste beispielsweise transportieren sieben Küstenschiffe der Hurtigruten-Reederei Fracht und Gäste zu 34 Anlaufhäfen zwischen Bergen im Südwesten und Kirkenes im Nordosten. Auf Grönland liegt der schiffsbasierte Waren- und Treibstofftransport in den Händen der regierungseigenen Reederei Royal Arctic Line. Ihre Schiffe verkehren zwischen Grönlands 13 größten Häfen und versorgen auch kleinere Siedlungen. In Russland halten Eisbrecher im Auftrag der Regierung seit dem Jahr 1979 die Küstengewässer zwischen der Halbinsel Kola und der Mündung des Jenissei das ganze Jahr hindurch befahrbar, um regelmäßige Schiffstransporte in der Region zu ermöglichen.

Der Schiffsverkehr in der Arktis ist somit eher regional denn international ausgerichtet. Dennoch interessiert sich die breite Öffentlichkeit beim Thema Schifffahrt in der Arktis vor allem für transarktische Fahrten. Diese führen in der Regel über zwei Haupttrouten. Eine dritte Route, die quer über den Arktischen Ozean führt und dabei quasi den geografischen Nordpol streift, spielt angesichts der noch vorherrschenden Eis- und Wetterverhältnisse in der zentralen Arktis noch keine wirkliche Rolle, sondern wird nur theoretisch diskutiert.

Die Nordwestpassage

Die Nordwestpassage ist eine Ansammlung von sieben größeren Routen zwischen dem Atlantischen und dem Pazifischen Ozean. Diese verlaufen von der Beringstraße und den Küsten Alaskas kommend durch die Inselwelt des kanadisch-arktischen Archipels und führen im Anschluss durch die Baffinbucht und die Labradorsee in den Nordatlantik. Die erste nachgewiesene Durchquerung der Nordwestpassage gelang Anfang des 20. Jahrhunderts dem Norweger Roald Amundsen. 80 Jahre später durchquerte mit der schwedischen „Lindblad Explorer“ das erste Passagierschiff die Passage; im Jahr 2008 folgte das erste Containerschiff, 2017 das erste Kreuzfahrtschiff.

Transarktische Fahrten durch die Nordwestpassage blieben bisher jedoch die Ausnahme, zum einen weil die rund 36 000 Inseln im hohen Norden Nordamerikas die Navigierbarkeit beeinträchtigen, zum anderen weil das Meereis im kanadisch-arktischen Archipel in der Regel



5.17 > Bei den meisten Schiffsbewegungen in der Arktis handelt es sich um regionale Transporte in den Küstengewässern der Anrainerstaaten – oder aber um Tanker- und Frachtverkehr in einen Hafen südlich des Nordpolarkreises (destinationsbezogener Verkehr).

dicker ist und aufgrund der lokalen Gegebenheiten weniger stark zurückgeht als beispielsweise im Beringmeer und in der Tschuktschensee. Wenn sich Schiffe auf diese Reise begaben, dann waren es in der Regel Eisbrecher der Küstenwache oder aber Privatyachten. Letztere gehen ein ziemlich hohes Risiko ein, weil die Eisverhältnisse in der kanadischen Arktis nur schwer vorherzusagen sind. Experten gehen deshalb davon aus, dass die Schifffahrt im kanadisch-arktischen Archipel auch in den kommenden Jahrzehnten risikoreich bleiben wird. Dennoch bieten gleich mehrere Kreuzfahrtanbieter für den Sommer 2020 Reisen durch die Nordwestpassage an, darunter Hurtigruten aus Norwegen sowie Hapag-Lloyd aus Deutschland.

Zugenommen hat dagegen zumindest im kanadischen Teil der Passage der Verkehr von Fischerbooten und Frachtschiffen. Letztere bringen Güter in den kanadischen Norden oder aber werden in den arktischen Häfen mit Rohstoffen beladen. So verschifft das Unternehmen Baffinland Iron Mine im Jahr 2018 allein fünf Millionen Tonnen Eisenerz von einem neuen Hafen an der Nordküste der Baffininsel – eine Rekordmenge für die kanadische Arktis. Langfristig will der Konzern seine jährliche Fördermenge auf zwölf Millionen Tonnen Eisenerz erhöhen. Der Rückgang des Meereises könnte ihm dabei helfen. Schon jetzt hat sich die Saison, in der die Gewässer rund um die Baffininsel beschiffbar sind, von vier auf fünf Monate verlängert.

Die Nordostpassage

Die Nordostpassage besteht aus verschiedenen Routen, die von Nordwesteuropa aus entlang der nördlichen Küsten Skandinaviens und Russlands in das Beringmeer und anschließend in den Pazifik führen. Ein Teil dieser Passage – von der Karastraße bis zur Beringstraße – wird auch als Nördlicher Seeweg bezeichnet. Er verläuft durch die Ausschließliche Wirtschaftszone Russlands und wird vom russischen Transportministerium verwaltet. Bis vor rund 30 Jahren war dieser Seeweg für Schiffe aus Ländern außerhalb des ehemaligen sowjetischen Einflussgebiets unzugänglich. Die Sowjetunion nutzte ihn für militärische Zwecke und baute ihn zu einer wichtigen Versorgungsader seiner arktischen Bergbau- und Erdölindustrie aus.

Seit dem 1. Juli 1991 steht der Nördliche Seeweg allen Staaten offen. Schiffe müssen ihre Durchfahrt jedoch anmelden und bestimmte Auflagen erfüllen, was unter



anderem von den USA kritisiert wird. Sie fordert, dass die Routen der Nordostpassage und der Nordwestpassage als internationale Meerengen betrachtet werden und deshalb das Recht aller Staaten auf Transitdurchfahrt gilt. Damit wäre den jeweiligen Küstenstaaten das Recht auf strenge Regeln und Auflagen entzogen. Hintergrund dieser Forderung ist, dass von allen drei möglichen Seewegen durch die Arktis derzeit vor allem die Nordostpassage als aussichtsreiche Schifffahrtsroute gilt. Eis- und Windverhältnisse deuten nämlich darauf hin, dass vor der Nordküste Russlands als Erstes eine dauerhaft befahrbare Rinne entstehen wird.

Russlands Pläne

Russland selbst unternimmt große Anstrengungen, um den Nördlichen Seeweg zu einer der wichtigsten Schifffahrtsrouten der Welt auszubauen. Das Land will entsprechend seiner proklamierten Transport- und Verkehrsstrategie den Bau neuer atomgetriebener Eisbrecher in Auftrag geben, die Häfen entlang seiner arktischen Küste modernisieren, Infrastrukturen für Such- und Rettungsmaßnahmen

5.18 > Eine Schiffsreise von Rotterdam nach Yokohama ist zwar über den Nördlichen Seeweg deutlich kürzer als über die Südroute. Aufgrund der hohen Kosten und der schwer vorhersagbaren Eisbedingungen in der Arktis aber setzen Reedereien noch immer auf die längere Route durch den Sueskanal.

5.19 > Der 300 Meter lange Flüssiggastanker „Christophe de Margerie“ ist eines von 15 Tankschiffen mit Double-Acting-Funktion, welche die Betreiber des Flüssigerdgaswerks Jamal LNG haben bauen lassen. Er kann sich im Rückwärtsgang durch bis zu 2,1 Meter dickes Eis brechen und das ganze Jahr hindurch ohne die Unterstützung von Eisbrechern operieren.



errichten und ein System zur Überwachung des Schiffsverkehrs installieren.

Die Investitionen knüpfen sich an die Hoffnung, dass Frachtschiffe aus Nord- und Nordwesteuropa auf ihrem Weg nach Japan oder China bis zu 40 Prozent ihrer Wegstrecke einsparen würden, wenn sie über die Nordostpassage fahren anstatt über die klassische Südroute via Sueskanal und Indischem Ozean. Auf diese Weise könnten die Schiffe auch unsichere südliche Meeresgebiete wie das Horn von Afrika oder aber die Straße von Malakka (Malaysia, Indonesien) meiden. In beiden Regionen stellen Terrorismus oder Piraterie eine ernsthafte Gefahr für den internationalen Schiffsverkehr dar.

Bislang aber ist der Nördliche Seeweg nur im Sommer relativ sicher für Schiffe zu befahren, und selbst dann müssen Frachtschiffe häufig von Eisbrechern begleitet werden – ein Umstand, der die Kosten der Durchfahrt deutlich erhöht und das Entwicklungspotenzial der arktischen Schifffahrt gegenwärtig sehr einschränkt. Wie alle kommerziellen Unternehmungen muss sich diese nämlich zuerst und vor allem wirtschaftlich lohnen. Ob dies der Fall ist, hängt unter anderem ab von den möglichen Distanzeinsparungen, von der Frage, für welche Fracht die

arktischen Routen geeignet sind, vom Zeitmanagement sowie dem Verlauf und der Entwicklung der anderen Haupthandelsrouten.

Experten warnen davor, das Potenzial der arktischen Schifffahrt zu überschätzen und die Risiken zu unterschätzen. Transarktische Fahrten wie jene des Eisklasse-Frachtschiffes „Venta Mærsk“ im August 2018 hätten vor allem Showcharakter und lohnen sich wirtschaftlich nicht. Die Zahl der Transitfahrten über den Nördlichen Seeweg ist auch dementsprechend niedrig. Nach einem Boom in den Jahren 2010 bis 2013 ebte der Durchfahrtsverkehr ab 2014 wieder ab und bleibt seitdem unter den Erwartungen.

Das mangelnde Interesse der Schifffahrtsindustrie hat vor allem wirtschaftliche Gründe. In wissenschaftlichen Umfragen gaben Reedereien und Handelsunternehmen an, dass die arktische Schifffahrt ein großes unternehmerisches Risiko darstelle. Zu den genannten Risikofaktoren gehören:

- hohe Kosten für den Bau von Schiffen mit hohen Eisklassen, für polartaugliche Ausrüstung an Bord, für Schiffsversicherungen (20 bis 100 Prozent über den

Standardpreisen) und geschultes Personal: Erschwerend kommt hinzu, dass die eisgängigen Tanker und Frachtschiffe in anderen Gewässern nicht rentabel sind, weil sie aufgrund ihrer dickeren Hülle ein zu geringes Fassungsvermögen besitzen;

- hohe Ausgaben für Spezialtreibstoff: Schiffe in der Arktis benötigen einen kältetauglichen Treibstoff. Der Verbrauch steigt zudem enorm an, wenn das Schiff durch Meereis fährt;
- hohe Kosten für die Begleitung durch russische Eisbrecher sowie für die Services der Verwaltung des Nördlichen Seewegs: Zudem dürfen die Schiffe nicht breiter als 30 Meter (Fahrrinne der Eisbrecher) sein. Auf der Südroute über den Sueskanal sind bis zu 60 Meter Schiffsbreite möglich;
- die geringe Anzahl der zur Verfügung stehenden Eisbrecher: Sie erschwert die langfristige Planung von Schifffahrten auf dem Nördlichen Seeweg;
- die Gefahr zeitlicher Verzögerungen und entsprechender Strafzahlungen aufgrund der unberechenbaren Eisbedingungen: Deshalb ist die Nordostpassage vor allem für die Containerschifffahrt, die ihre Waren auf den Tag genau liefern muss, noch keine Alternative zur klassischen Südroute;
- die hohe Wahrscheinlichkeit von Meereis und extremen Witterungsbedingungen und die damit verbundenen Risiken;
- die Abgelegenheit der Schiffsroute und die bislang immer noch fehlende Infrastruktur für Such- und Rettungsmaßnahmen;
- die Beschränkung des Tiefgangs auf maximal zwölf Meter: Aufgrund der geringen Wassertiefe dürfen Schiffe oft nicht voll beladen werden, was die Gewinnspanne für die Unternehmen und die Reedereien schmälert;
- schwankende Weltmarktpreise für Roh- und Treibstoffe: Sinken die Preise, wird der teure Arktistransit für Unternehmen im Vergleich zur bewährten Südroute weniger attraktiv;
- der Ausbau des Panama- und Sueskanals, wodurch die Südrouen aus Sicht der Reedereien wieder wirtschaftlich attraktiver werden: Der Panamakanal ist seit dem Ende der zehnjährigen Ausbauarbeiten (Verbreiterung und Vertiefung) im Jahr 2016 für 96 Pro-

zent der Welthandelsflotte befahrbar. Der Sueskanal wurde ebenfalls ausgebaut. Ihn können seit August 2015 doppelt so viele Schiffe befahren wie früher.

Neue Schiffstypen, genaue Verkehrsanalysen

Um die Schifffahrt in der Arktis dennoch gewinnbringend zu gestalten, setzen einige Schifffahrtsunternehmen auf neue Technologien. Dazu gehören eisverstärkte Frachtschiffe und sogenannte Double-Acting-Schiffe. Letztere stellen eine Mischung aus Eisbrecher und herkömmlichem Frachtschiff dar. Diese Schiffe sind mit einem konventionellen Bug für die Navigation auf offener See sowie einem Heck mit Eisbrecherfunktion ausgestattet. In eisfreien Gewässern fährt das Schiff vorwärts. Sobald jedoch Meereis in Sichtweite kommt, dreht das Schiff um und bahnt sich rückwärts seinen Weg – das eisbrechende Heck voran.

Solche neuen Schiffstypen werden vor allem für den Rohstofftransport entlang der russischen Küste eingesetzt. Ihre Reisen aber fließen meist nicht in die Transitstatistik mit ein. Bei der Analyse des arktischen Schiffsverkehrs unterscheiden Experten nämlich zwischen vier Verkehrskategorien:

- *destinationsbezogene Verkehre:* In diese Kategorie fallen zum Beispiel Öltanker, die Öl oder Flüssiggas aus Nordnorwegen oder Nordwestrussland in einen Hafen außerhalb der Arktis liefern;
- *intraarktische Verkehre:* Gemeint sind Schiffsbewegungen, die zwei oder mehr Staaten in der Arktis miteinander verbinden;
- *transarktische Verkehre:* Dazu gehören Schiffstransporte, die durch die Arktis führen und beispielsweise Waren aus einer Hafenstadt am Pazifik in einen Hafen am Atlantik oder in der Nordsee liefern;
- *Schiffsverkehr in den Küstengewässern eines Arktisanrainerstaats:* Diese Schiffsbewegungen werden auch als regionaler Verkehr bezeichnet und umfassen zum Beispiel in Russland regelmäßige Rohstofftransporte zwischen dem Hafen von Dudinka im Norden des Westsibirischen Tieflands und der nördlich des Polarkreises gelegenen Hafenstadt Murmansk auf der Halbinsel Kola.

Während sich der Transitverkehr auf einem niedrigen Niveau eingependelt hat, nimmt der regionale und destinationsbezogene Schiffsverkehr auf dem Nördlichen Seeweg stetig zu. Im Jahr 2018 hatten Fracht- und Tankschiffe in nur elf Monaten 15 Millionen Tonnen Fracht über diesen Seeweg transportiert – unter anderem auch nach Europa, Asien und Südamerika. Diese Zahl entsprach nahezu einer Verdopplung der Frachtmenge des Vorjahres. Im Vergleich zu 2014 hatte sich die Frachtmenge sogar verfünffacht. Die Zuwächse sind vor allem auf den steigenden Export von Flüssiggas, Erdöl und Kohle aus der russischen Arktis zurückzuführen. Gasproduzent Novatek beispielsweise verschifft 2018 mehr als sieben Millionen Tonnen Flüssiggas über seinen neuen Hafen Sabetta. Dieser gehört zum Großprojekt Jamal auf der Halbinsel Jamal und wurde 2017 in Betrieb genommen.

Prognosen zufolge wird das Frachtvolumen in der russischen Arktis noch weiter ansteigen – angetrieben vor allem durch die verstärkte Kohleförderung im Taibassbecken an der Nordspitze der Taimyrhalbinsel. Kohleproduzent VostokCoal hat angekündigt, dort ab dem Jahr 2025 jährlich bis zu 30 Millionen Tonnen Anthrazit-Steinkohle abzubauen. Sie ist besonders kohlenstoffhaltig, wird vor allem für die Metallherstellung benötigt und nur in wenigen Ländern abgebaut. Für das Jahr 2019 strebt

das Unternehmen eine Jahresfördermenge von zehn Millionen Tonnen an, und jede Tonne wird über zwei neu erbaute Häfen in der Nähe der Hafenstadt Dikson verschifft. Ab dem Jahr 2025 könnte demzufolge jede zweite Schiffsbewegung auf dem Nördlichen Seeweg ein Kohlefrachter aus Dikson sein.

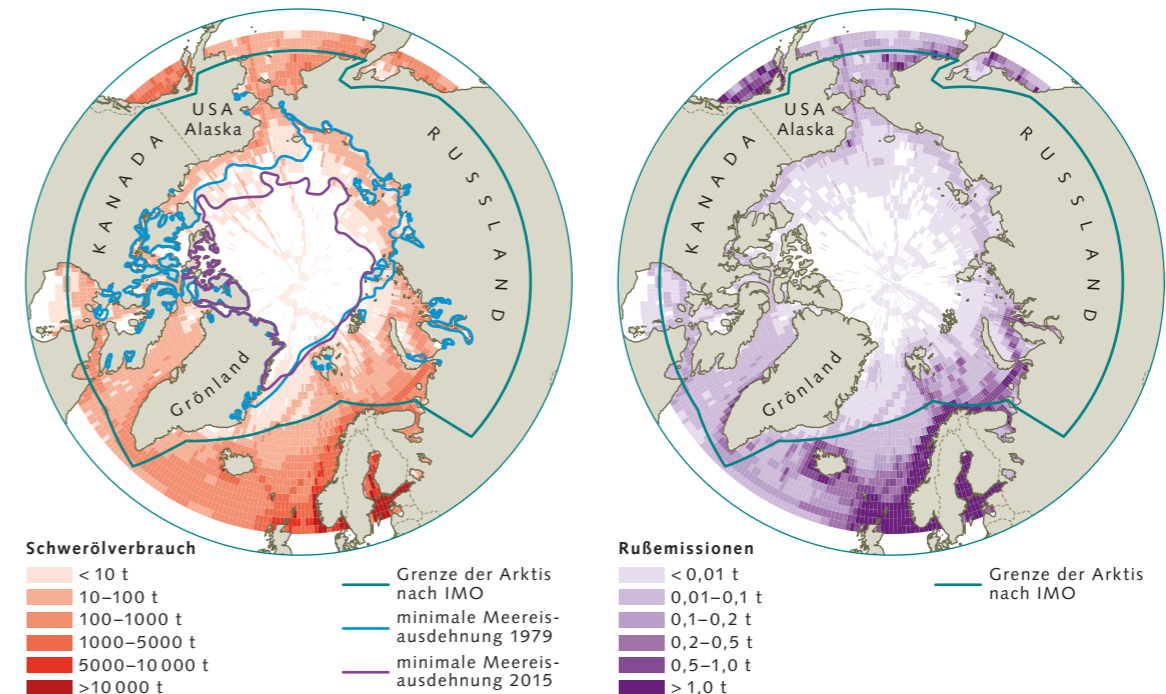
Wie viele andere Rohstoffkonzerne auch wird VostokCoal eisverstärkte Frachter für den Kohletransport einsetzen. Das russische Transportministerium überlegt allerdings, die bislang sehr strengen Auflagen und Sicherheitsanforderungen für den Schiffsverkehr auf dem Nördlichen Seeweg zu lockern. Bislang durften nur Schiffe der Eisklasse Arc7 und höher im Winter den Nördlichen Seeweg befahren. Da es aber vor allem dem Gasproduzenten Novatek nicht gelungen ist, seine Flotte mit den teuren Eisklasse-Schiffen auszustatten, hatte das Ministerium im November 2018 angekündigt, die Eisklasse-Vorschriften abzuschwächen. Demnach sollten künftig auch Schiffe der Eisklassen Arc4 und Arc5 die Küstengewässer im Winter befahren dürfen, allerdings nur in Begleitung eines Eisbrechers.

Kritiker werfen dem Ministerium vor, mit dieser Entscheidung wirtschaftliche Interessen über die Schiffsicherheit und den Umweltschutz zu stellen und unnötige Risiken einzugehen. Weniger Meereis bedeute nicht weniger Gefahren. Im Gegenteil: Dünneres Eis wird stärker vom Wind verdriftet und bewegt sich schneller. Dadurch erschwere sich die Eisvorhersage. In flachen Schelfmeeren wie der gerade mal 52 Meter tiefen Ostsibirischen See sei zudem die Gefahr groß, dass Schiffe auf Grund liefen, wenn schlechte Eis- und Wetterverhältnisse die Navigation erschwerten.

Die Folgen des Schiffsverkehrs für die Umwelt

Wie die Ressourcenförderung bringt auch die arktische Schifffahrt eine Reihe bekannter und möglicher Gefahren für die empfindliche arktische Umwelt mit sich. Sollte es zu einem Tankerunfall kommen oder ein Schiff auf andere Weise Öl oder Treibstoff verlieren, wäre davon auszugehen, dass die Auswirkungen einer solchen Verschmutzung in der kalten Arktis viel länger anhalten als in wärmeren Gebieten. Säuberungsmaßnahmen wären sehr aufwendig und langwierig – und nach Ansicht einiger

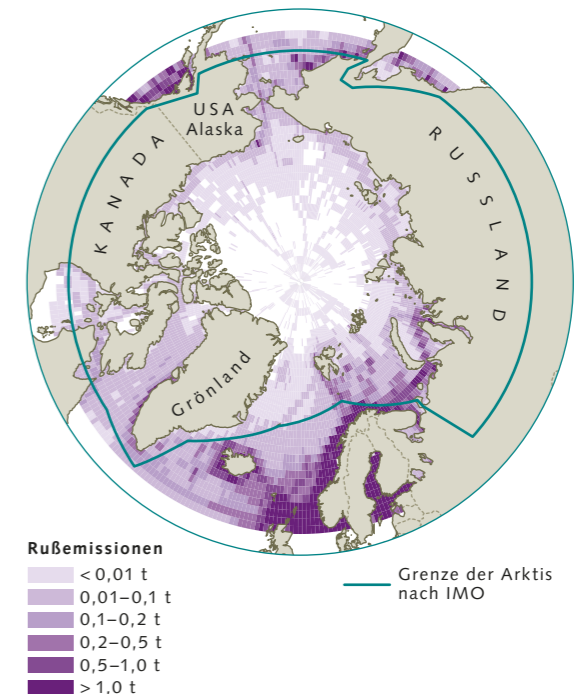
5.20 > Auf seinem Weg von Südkorea nach Frankreich durchfuhr im Februar 2018 der Flüssiggastanker „Eduard Toll“ als erstes kommerzielles Schiff den Nördlichen Seeweg im Winter, ohne dabei die Hilfe von Eisbrechern in Anspruch zu nehmen. Im Hafen von Sabetta legte er kurz an, um neues Flüssiggas zu laden.



Experten garantiert unzureichend, weil es noch keine adäquaten technischen Lösungen gibt. Bleibende Schäden an Umwelt, Pflanzen und Tieren wären daher unvermeidbar.

Anders als in der Antarktis dürfen Schiffe in der Arktis bislang auch mit schwefelhaltigem Schweröl fahren. Dieser Treibstoff ist ein hochgiftiges, sehr zähflüssiges Abfallprodukt aus der Ölindustrie, das im Jahr 2015 in der Arktis 57 Prozent des genutzten Schiffstreibstoffs ausmachte. Tritt es durch eine Havarie, ein Leck oder aber durch eine gezielte Einleitung aus und kommt mit Wasser in Kontakt, verteilt es sich an der Meeresoberfläche, emulgiert und nimmt ein Vielfaches seines ursprünglichen Volumens an. Die mousseartige Masse lagert sich dann entweder auf dem Meereis ab und gefriert – oder aber es wird an die Küsten geschwemmt oder sinkt zum Meeresboden. Aufgrund seiner Konsistenz kann emulgiertes Schweröl große Regionen verseuchen. Der Arktische Rat ist deshalb zu dem Urteil gekommen, dass dieser Treibstoff das größte von Schiffen ausgehende Risiko für die arktische Meeresumwelt darstellt.

Bei der Verbrennung von Schweröl in den Schiffsmotoren entstehen neben großen Mengen Kohlendioxid auch Luftschadstoffe wie Schwefeloxide, Stickoxide, Feinstaub



sowie braune und schwarze Rußpartikel. Lagern sich diese dunklen Partikel auf Schnee oder Meereis ab, sinkt deren Rückstrahlungsfähigkeit. Beide Materialien absorbieren fortan mehr Sonnenstrahlung und schmelzen schneller. Umweltverbände und die Internationale Seeschiffahrtsorganisation (International Maritime Organization, IMO) setzen sich deshalb für ein Schwerölverbot in der Arktis ein. Die Verhandlungen sind gerade in vollem Gange. Die IMO hat sich zum Ziel gesetzt, das Verbot im Jahr 2021 zu beschließen und bis 2023 arktisweit zu implementieren.

Mit dem Schiffsverkehr steigt auch die Gefahr, dass arktisfremde Tier- und Pflanzenarten an Bord der Schiffe in das Nordpolargebiet einwandern. Zum Beispiel, weil sie sich am Schiffsrumpf festgesetzt haben oder im Ballastwasser der Schiffe schwimmen. Je mehr Schiffe in arktischen Gewässern fahren, desto höher ist auch die Gefahr, dass sie mit Walen oder Robben kollidieren, die Wanderbewegungen der Meeressäuger stören oder aber die Tiere mit ihrem Motorenlärm belästigen.

Schallwellen wandern in kaltem Wasser weiter als in wärmerem. Das heißt, Motorengeräusche oder der Lärm der Explorationsarbeiten sind in der Arktis auf größere Entfernungen zu hören. Zudem schrumpft mit dem Anteil

5.21 > Nach Angaben des Internationalen Ausschusses für sauberen Transport (International Council on Clean Transportation) nutzten im Jahr 2015 rund 57 Prozent aller in der Arktis verkehrenden Schiffe Schweröl als Treibstoff. Rund zwei Drittel der von Schiffen verursachten Rußemissionen können auf diesen „dreckigen“ Treibstoff zurückgeführt werden.

von dickem, mehrjährigem Meereis ein bislang wirkungsvoller Schalldämpfer, der früher weite Teile des Arktischen Ozeans in einen Ort der Stille verwandelt hat. Forscher berichteten bereits im Jahr 1993 von Beobachtungen aus den Gewässern der Nordwestpassage, wonach Belugawale die Geräusche eines eisbrechenden Schiffes über eine Distanz von 85 Kilometern wahrnahmen. Als sich dieses Schiff den Walen auf eine Entfernung von 35 bis 50 Kilometer näherte, brachen die Tiere in Panik aus, sandten Alarmrufe aus und flüchteten als Herde geschlossen aus dem Gebiet. Narwale dagegen verstummten angesichts des Schiffslärms und verließen einzeln die Region.

US-amerikanische Biologen kommen in einer Studie aus dem Jahr 2018 zu dem Schluss, dass vor allem Narwale, Walrosse, Grönlandwale und Belugas durch den zunehmenden Schiffsverkehr gefährdet sind. Die Gefahr für Ringelrobben und Eisbären ist etwas geringer, weil diese Tiere den Sommer zum Großteil an Land verbringen, wo die Auswirkungen des Schiffsverkehrs weniger störend sind. In anderen Studien untersuchen Wissenschaftler derzeit die Auswirkungen des Kreuzfahrttourismus auf die Tiere der Polarregionen. Schiffsreisen in die Arktis und Antarktis sind seit Jahren ein Wachstumsmarkt.

Tourismus in den Polarregionen

Urlaubsreisen in die Polarregionen haben aus drei Gründen an Attraktivität gewonnen. Erstens erleichtern die steigenden Temperaturen und der damit verbundene Rückgang des Meereises vor allem in der Arktis den Zugang in viele Regionen. Zweitens glauben viele Naturliebhaber und Abenteuerurlauber angesichts dieser dramatischen Veränderungen, sie müssten sich beeilen, wenn sie die Eislandschaften der Arktis und Antarktis noch mit eigenen Augen sehen wollen. Experten bezeichnen dieses Phänomen als „Tourismus der letzten Chance“. Die Antarktis als letzte Wildnis unseres Planeten reizt zudem all jene, die bereits alle anderen Regionen der Erde bereist haben und nun auch den vermeintlich unzugänglichsten Kontinent am Südpol besuchen wollen.

Daher verwundert es nicht, dass in den zurückliegenden Jahrzehnten der Tourismus in beiden Polargebieten stark angestiegen ist. Die Zahl der Kreuzschiffahrten im kanadisch-arktischen Archipel stieg im Zeitraum von

2005 bis 2017 von 121 auf 416. Und für die Antarktis, welche Urlauber in erster Linie an Bord kleinerer Kreuzfahrtschiffe (bis maximal 500 Passagiere) erreichen, erwarten Experten für den Sommer 2019/2020 erstmals mehr als 78 000 Touristen, die Besatzungen der insgesamt 63 gemeldeten Kreuzfahrtschiffe nicht mitgezählt. Im Sommer zuvor waren es nach Angaben des Internationalen Verbands der Reiseveranstalter mit dem Zielgebiet Antarktis (IAATO) rund 56 168 Besucher, in der Saison 2000/2001 nur 12 248.

Lediglich zwei kurze Einbrüche erlebte die Antarktische Reisebranche: einmal während der Weltwirtschaftskrise, das andere Mal, nachdem die Internationale Seeschiffahrts-Organisation im August 2011 den Transport und Gebrauch von Schweröl südlich von 60 Grad Süd verboten hatte. Seitdem aber kalkulieren die Reiseveranstalter ihren Treibstoffverbrauch so genau, dass alles Schweröl aufgebraucht ist, bevor die Schiffe die Gewässer der Antarktis erreichen – und die Besucherzahlen steigen wieder.

In Grönland und Spitzbergen, den beliebtesten Kreuzfahrtregionen der Arktis, haben sich die Passagierzahlen nach kontinuierlichen Zuwächsen bis 2007/2008 mittlerweile auf Jahresmittelwerte um die 24 000 (Grönland) beziehungsweise 40 000 (Spitzbergen) eingependelt.

Wichtig ist zu wissen, dass es deutliche Unterschiede zwischen dem Polartourismus in der Arktis und jenem in der Antarktis gibt. Im Nordpolargebiet sind die Entwicklung des Reisesektors und damit verbundene Themen wie Infrastrukturmaßnahmen oder Einreise- und Zugangsbestimmungen für arktische Regionen eine Angelegenheit der einzelnen Anrainerstaaten. Am häufigsten besucht werden jene Regionen, die für Urlauber leicht zu erreichen sind. Dazu gehören Island, Alaska und auch das nördliche Skandinavien. Das gut erschlossene arktische Territorium Norwegens beispielsweise ist bereits seit Jahrzehnten als Urlaubsdestination beliebt, und auf der Inselgruppe Spitzbergen landeten schon um das Jahr 1890 die ersten Bootstouristen an. Mittlerweile arbeiten die meisten Einwohner des Archipels in der Tourismusbranche. Das Territorium Nunavut im Nordosten Kanadas dagegen verfügt nicht einmal über ein ausgebautes Straßennetz. Die Reisesaison in diesem Teil der Arktis beschränkt sich einzig und allein auf den kurzen Sommer, in dem Touristen die Region hauptsächlich via Kreuzfahrtschiff oder Yacht erkunden.

5.22 > Antarktisches Naturerlebnis: Ein Expeditionskreuzfahrtschiff ankert vor einer Eselspinguinkolonie.



Mariner Tourismus in der Antarktis (basierend auf Unternehmensdaten und anderen Quellen)					
Jahr	Zahl der Reiseveranstalter	Zahl der Schiffe und Yachten	Zahl der Reisen	Zahl der Passagiere mit Landgang	Zahl der Passagiere ohne Landgang
1992/1993	10	12	59	6704	
1993/1994	9	11	65	7957	
1994/1995	9	14	93	8098	
1995/1996	10	15	113	9212	
1996/1997	11	13	104	7322	
1997/1998	12	13*	92	9473	
1998/1999	15	15*	116	9857	
1999/2000	17	21*	154	13 687	936
2000/2001	15*	32*	131	12 109	0
2001/2002	19*	37*	117	11 429	2029
2002/2003	26*	47*	136	13 263	2424
2003/2004	31*	51*	180	19 369	4949
2004/2005	35*	52*	207	22 297	5027
2005/2006	47*	44*	249	25 167	4632
2006/2007	42*	47*	268	28 622	6930
2007/2008	48	55	308	32 637	13 015
2008/2009	44	53	290	26 921	10 652
2009/2010	44	51	239	21 622	15 020
2010/2011	41	47	223	19 065	14 373
2011/2012	36	41	234	21 131	4872
2012/2013	39	45	258	24 892	9070
2013/2014	42	51	283	27 374	9670
2014/2015	37	44	268	26 812	9459
2015/2016	38	48	286	29 960	8109
2016/2017	38	47	298	36 440	7475
2017/2018	44	50	344	42 576	9131
2018/2019	44	56	360	44 600	10 889
2019/2020	46*	63**	432**	59 367**	18 420**

* inklusive Nicht-IAATO-Segel- und Motoryachten, wenn Informationen vorlagen
** basierend auf Schätzungen zu Anfang der Saison und nicht auf tatsächlichen Zahlen

5.23 > Der Kreuzfahrttourismus in die Antarktis ist ein boomendes Geschäftsfeld. Seit dem Sommer 1992/1993 hat sich nach Angaben der IAATO die Zahl der Schiffsreisenden nahezu verzehnfacht.

Wegen der von Land zu Land unterschiedlichen Erhebungsmethoden und einer unklaren Abgrenzung zwischen den arktischen und subarktischen Regionen, existieren auch keine verlässlichen Statistiken über Anzahl und Art des Tourismus für die Gesamtarktis. Interessenverbände der polaren Reisebranche wie die Vereinigung der in der Arktis tätigen Schifffahrtsreiseunternehmen (Association of Arctic Expedition Cruise Operators, AECO) sammeln zwar Informationen zur Marktentwicklung und zur Zahl ihrer Mitglieder. Dennoch hat die AECO vor allem die Top-Reiseregionen wie Spitzbergen und Norwegen im Blick und nicht die gesamte Arktis.

Was den Verkehr von Kreuzfahrtschiffen in arktischen Gewässern betrifft, dürfte jedoch bald mehr Klarheit herrschen. Der Arktische Rat hat über seine Arbeitsgruppe zum Schutz der arktischen marinen Umwelt (Protection of the Arctic Marine Environment, PAME) im Februar 2019 eine neue Datenbank zum Schiffsverkehr in der Arktis ins Leben gerufen. Sie dokumentiert alle Schiffsbewegungen, einschließlich der Daten zum Kurs, zur Fahrtgeschwindigkeit, zum Treibstoffverbrauch und zu den entstandenen Emissionen, und soll auf diese Weise bisherige Wissenslücken zum Schiffsaufkommen im Nordpolargebiet schließen. Vertreter der Arktisstaaten sowie Wissenschaftler können so arktisweit die Entwicklungen des Schiffsverkehrs beobachten und entsprechende Sicherheits- und Managementempfehlungen ableiten. Für alle Nichtarktisanrainer ist die Datenbank jedoch passwortgeschützt und der Zugang kostet Geld.

Die Antarktis dagegen ist internationales Gebiet. Dorthin kann jeder reisen, solange ein Antarktisvertragsstaat dem Reiseveranstalter oder Kreuzfahrtschiffbetreiber die Genehmigung für die Reise erteilt hat. Die Touristenzahlen werden von der 1991 gegründeten IAATO – also von der Tourismusindustrie selbst erhoben. Kritiker bemängeln, dass die IAATO in ihren Statistiken häufig die in der Branche beschäftigten Personen wie Schiffsbesatzungen, das Personal in Camps oder aber Piloten nicht mit aufführe und dadurch der Eindruck einer viel geringeren Besucherzahl vermittele. Außerdem fehlen in der IAATO-Statistik alle Kreuzfahrtschiffe, Privatexpeditionen und Yachten, deren Veranstalter oder Eigner nicht in der Vereinigung organisiert sind. Für Privatexpeditionen in die Antarktis, einschließlich der in den letzten Jahren ver-

mehrt auftretenden Formen des Extremtourismus, gibt es bislang auch keine gemeinsame Meldestelle, die alle Daten sammelt.

Stattdessen betreibt die IAATO, der derzeit 116 und damit nahezu alle Reiseveranstalter angehören, ein Buchungssystem, welches das Schiffsaufkommen derart regelt, dass sich die einzelnen Kreuzfahrtschiffe möglichst wenig begegnen. Diese Maßnahme hat zum einen das Ziel, den Passagieren weiterhin eine abgelegene Wildnis zu präsentieren. Zum anderen ist sie den strengen Regeln des Antarktisvertrags geschuldet, welche vorschreiben, dass sich zu jedem Zeitpunkt maximal 100 Touristen an Land befinden dürfen. Durch die Absprachen unter den Reiseveranstaltern kommt es an den touristischen Hauptattraktionen entlang der Antarktischen Halbinsel allerdings auch nicht zu Wartezeiten. Damit das trotz des steigenden Schiffsverkehrs so bleibt, überarbeitet die IAATO derzeit das Buchungssystem. Die bislang genutzte Version hat ihre Kapazitätsgrenzen erreicht.

Anders als in manchen Teilen der Arktis, wo Touristen im Sommer wie im Winter ihren Urlaub verbringen können, ist Tourismus in der Antarktis bisher ein ausschließliches Saisongeschäft. Die Expeditionskreuzfahrtschiffe mit bis zu 500, in der Regel aber weniger als 200 Passagieren an Bord, verkehren im Südsommer in der Zeit von Ende Oktober bis Anfang März und laufen vor allem die eisfreien Gebiete entlang der Antarktischen Halbinsel an. Regionen wie das Rossmeer und die Ostantarktis werden aufgrund der harschen Eis- und Wetterverhältnisse nur vereinzelt besucht.

Ausbau der touristischen Infrastrukturen

Das große touristische Interesse an Gletschern, Eisbären und Polarlichtern weckt bei den Arktisanrainerstaaten die Hoffnung, ihre Polarregionen nachhaltig entwickeln zu können. Sie fördern deshalb ein weiteres Wachstum der Branche, indem sie zum Beispiel die touristische Infrastruktur ausbauen. Auf Grönland beispielsweise sind drei neue Flughäfen geplant, die Reisenden den Zutritt zu der vereisten Insel erleichtern sollen. Sie werden in Nuuk, Ilulissat und Qaortoq gebaut und voraussichtlich im Jahr 2023 den Betrieb aufnehmen. Angetrieben wird die Entwicklung des Polartourismus allerdings auch durch bes-

sere Ausrüstung und Technologien sowie durch ein besseres geografisches Wissen über arktische Regionen auf Basis detaillierterer Schiffskarten.

Die Zuwächse im Antarktistourismus sind darauf zurückzuführen, dass die Reiseveranstalter ihre Polarschifflotte ausbauen. Allein im Sommer 2019/2020 werden neun neugebaute eisgängige Kreuzfahrtschiffe den Pendelverkehr zwischen der Südspitze Argentiniens und der Antarktischen Halbinsel aufnehmen. Die Zahl der Reisenden steigt dadurch um 33 Prozent. Bis zum Jahr 2023 sollen weitere rund 40 Kreuzfahrtschiffe fertiggestellt werden; darunter auch eine Luxusyacht, auf welcher Passagiere für einen Preis von 51 000 bis 146 000 Euro pro Person von Argentinien zunächst in die Antarktis und dann über Südamerika und Europa in die Arktis reisen können.

Mehr Flug- und Individualtourismus

Bis vor 20 Jahren unterschied sich die Reisebranche in der Arktis aufgrund ihrer geografischen, infrastrukturellen und rechtlichen Gegebenheiten deutlich vom Tourismus in der Antarktis. Während im Südpolargebiet Naturbeobachtungen, Wanderungen oder Schlauchbootfahrten oft die einzig möglichen Aktivitäten vor Ort waren, konnten Arktisbesucher seit Langem zwischen folgenden Reisekategorien wählen:

- Massentourismus für Reisende, welche die bekanntesten Attraktionen sehen und möglichst komfortabel untergebracht sein wollen;
- Sportfischerei und Jagdtourismus für Hobbyangler und -jäger, die ihrem Freizeitvergnügen in einem nahezu unberührten Gebiet nachgehen wollen;
- Ökotourismus für Naturliebhaber, die eine einzigartige Tierwelt beobachten und die Schönheit der arktischen Natur erleben wollen;
- Abenteuer-tourismus für Urlauber, die eine sportliche oder körperliche Herausforderungen suchen;
- Kulturtourismus für Reisende, die entweder den persönlichen Austausch mit der indigenen Bevölkerung suchen, mehr über historische Ereignisse oder Kulturstätten erfahren oder aber selbst historische Plätze in der Arktis erkunden wollen.

Indigene Bevölkerungsgruppen gibt es in der Antarktis nicht, und damit auch keinen entsprechenden Kulturtourismus. Die Zeit, in der Reiseveranstalter ihren Antarktiskunden jedoch nur Naturbeobachtungen anbieten, sind längst vorbei. Zum Erlebnispaket Antarktis gehören mittlerweile auch Hubschrauberflüge, U-Boot-Tauchfahrten, Tauchen, Schnorcheln, Schwimmen, Stand-up-Paddling, Camping, Kajaktouren, Bergsteigen, Skitouren und Snowboarden. Auch Individual- und Extremtourismus, zum Beispiel Laufwettbewerbe und Marathons, werden angeboten. Eine zunehmende Zahl von Urlaubern bucht zudem Reisen in das Innere des antarktischen Kontinents – in der Saison 2015/2016 waren es bereits 409 Personen, 2018/2019 genau 679; die Vorhersage für 2019/2020 geht von 733 Personen aus.

Sechs in der IAATO organisierte Reiseveranstalter und Logistikunternehmen bieten solche Inlandstouren mittlerweile als Pauschalreisen an. Je nach Angebot und Preis (zum Teil über 90 000 US-Dollar pro Person) sind Besuche am Südpol, an einer Pinguinkolonie, Ausflüge mit Motorfahrzeugen oder extreme Berg- und Skitouren mit enthalten. Der dafür betriebene personelle und logistische Aufwand ist jedoch immens. Landepisten müssen angelegt und gepflegt, Camps aufgebaut und betreut werden. Eine solche Landebahn mit dazugehörigem Camp gibt es seit zwei Sommern nördlich der deutschen Antarktisforschungsstation Neumayer III. In der Hauptreisezeit landet dort jetzt zehn- bis zwölfmal ein Polarflugzeug vom Typ Basler BT-67 mit Touristen an Bord, die die lokale Kaiserpinguinkolonie besuchen wollen. Bei seinem ersten Besuch war das Flugzeug noch direkt neben den Pinguinen auf dem Meereis gelandet und hatte Teile der Kolonie sowie die dort stattfindenden Forschungsarbeiten erheblich gestört.

Experten gehen davon aus, dass diese Form des Fly-in- und Individualtourismus in den Polarregionen weiter zunehmen wird, denn Touristen hätten zwar weniger Zeit zum Reisen, dafür seien sie jedoch bereit, mehr Geld für ihren Urlaub auszugeben. Die argentinische Fluglinie LADE beispielsweise hat angekündigt, noch im Jahr 2019 einen Linienflugverkehr zwischen Ushuaia an der Südspitze Argentiniens zur landeseigenen Forschungsstation Marambio auf der Seymourinsel im Weddellmeer einzurichten. Dort sollen dann zehn Prozent der vor-

handenen Unterkünfte für Touristen zur Verfügung gestellt werden.

Es zeichnet sich zudem ab, dass die Kreuzfahrt- und Kurzzeitreisen in die Polarregionen zunehmen werden. Die große Nachfrage hat zur Folge, dass es mehr und größere Schiffe geben wird und an Land neue Infrastrukturen geschaffen werden müssen. Manche Reiseveranstalter führen ihren Passagierwechsel mittlerweile in den Polarregionen durch – beispielsweise auf Spitzbergen –, um sich die lange An- und Abreise der Schiffe zu sparen. Das bedeutet allerdings, dass die Schiffe vor Ort ihre Treibstoff-, Wasser- und Lebensmittelvorräte auffüllen müssen. Voraussetzung dafür wiederum ist, dass in den Häfen entsprechende Depots und Lagerhallen errichtet werden.

Umweltrisiken des zunehmenden Tourismus

Für die Menschen in der Arktis schafft diese Entwicklung Arbeitsplätze. Nach Expertenmeinung gehen mit dem boomenden Reisegeschäft aber auch erhebliche soziale und Umweltrisiken einher. Dazu zählen:

- ein erhöhtes Müllaufkommen;
- Luft-, Land- und Wasserverschmutzungen durch den zunehmenden Flug- und Schiffsverkehr;
- ein steigendes Unfallrisiko, insbesondere für Kreuzfahrtschiffe;
- Beeinträchtigungen der lokalen Tierwelt;
- mögliche Konflikte zwischen Tourismus und traditionellen Jagd- und Fischereiaktivitäten.

Angesichts dieser Problemlage hatte der Arktische Rat seiner Arbeitsgruppe PAME den Auftrag erteilt, Handlungsempfehlungen für einen nachhaltigen marinen Arktistourismus zu erarbeiten. Diese sind im Jahr 2015 erschienen und definieren nachhaltigen Tourismus als Tourismus, der negative Auswirkungen minimiert und soziokulturelle, umweltbezogene und wirtschaftliche Vorteile für Einwohner der Arktis maximiert.

Um dieses Ziel zu erreichen, müssen Reiseveranstalter, Gemeinden, Regierungsbehörden, Wissenschaft und andere Stakeholder eng zusammenarbeiten, heißt es in dem Dokument. Vom Arktischen Rat fordert die Arbeitsgruppe unter anderem, ein standardisiertes Verfahren zu

entwickeln, nach dem orts- oder gebietspezifische Richtlinien für das Verhalten in den Küstengewässern und -regionen erstellt werden. Die Themenpalette sollte dabei von lokalen Sicherheitsbestimmungen und Umweltauflagen bis hin zu Informationen über ökologische, kulturelle und historische Besonderheiten der jeweiligen Region reichen, sodass Schiffs- beziehungsweise Bootspassagiere umfassend aufgeklärt werden. Benötigt werde außerdem, so die Arbeitsgruppe PAME, eine aussagekräftige, öffentlich zugängliche und regelmäßig aktualisierte Datenbank zum Tourismus in der Arktis.

Zudem sollten alle Schiffsbesatzungen ein automatisches Schiffsidentifikationssystem mitführen. Es überträgt die Positionskordinaten, den Kurs und die Geschwindigkeit des Schiffes per Satellit an die Schiffsfahrtszentren und erleichtert so die Kontrolle des Verkehrs und mögliche Such- und Rettungsmaßnahmen. Für Fracht- und Passagierschiffe ab einer bestimmten Größe ist das System bereits vorgeschrieben; kleinere Boote mit weniger als zwölf Passagieren an Bord sind bislang von dieser Vorschrift ausgenommen.

Die Arktisanrainerstaaten ruft die Arbeitsgruppe dazu auf, ihre behördlichen Verfahren zur Regelung des touristischen Schiffsverkehrs zu vereinheitlichen, öffentlich für ein nachhaltiges Verhalten zu werben, Meeresinformationen zu teilen sowie die Kommunikation und den Austausch zwischen den Schiffsbetreibern und den Küstengemeinden zu fördern. Voraussetzung für Letzteres sei jedoch, dass es in den Gemeinden feste Ansprechpartner für die Schiffsführung gäbe, so die Arbeitsgruppe.

Die Umweltauswirkungen touristischer Aktivitäten in der Antarktis realistisch zu bewerten, fällt Experten aufgrund der fehlenden belastbaren Zahlen schwer. Die meisten Touristen, etwa 95 Prozent, besuchen die Region der Antarktischen Halbinsel. Weil sie Besuchern landschaftliche Superlative bietet, lassen Kreuzfahrtschiffe ihre Gäste in kleinen Booten an Land bringen. Doch obwohl es circa 200 Anlandestellen in der Region gibt, finden knapp 68 Prozent aller Anlandungen an lediglich 15 Stellen statt. Im Extremfall besuchen so Tausende Touristen in einer Saison denselben Ort oder dieselbe Pinguinkolonie.

Werden solche Urlauberguppen von qualifiziertem Personal geführt, sodass keiner der Teilnehmer den Wanderpfad verlässt oder den festgelegten Mindestabstand zu

den Tieren unterläuft, halten sich die Auswirkungen des Landgangs auf die Umwelt meist im Rahmen. Werden die bestehenden Umweltauflagen jedoch missachtet, sind die Folgen schwerwiegend. An beliebten Anlandestellen wie etwa der Halbmondinsel (Half Moon Island) im Norden der Antarktischen Halbinsel kommt es zum Beispiel mittlerweile vor, dass große Kreuzfahrtschiffe, die nicht anlanden dürfen, weil sie mehr als 500 Passagiere an Bord haben, so nah wie möglich an die dortige Zügelpinguinkolonie heranfahren und mit laufenden Maschinen für etwa eine Stunde an Ort und Stelle verweilen, damit die Urlauber die Tiere bestaunen können. Ähnliche Berichte gibt es von bekannten Robbenkolonien entlang der Antarktischen Halbinsel.

Das Ausmaß einer solchen Störung (Lärm, Abgase, Blockade) wird umso deutlicher, wenn man bedenkt, dass die Hauptreisezeit in der Antarktis genau in jene Jahreszeit fällt, in der Robben und Pinguine an Land kommen, um zu brüten, ihre Jungen zu säugen oder aber ihr Fell oder Gefieder zu wechseln. Fliegende Vögel, soviel ist bereits bekannt, meiden Gebiete mit Schiffsverkehr. Leider haben sich die Mitgliedsstaaten des Antarktischer Vertragssystems bislang nicht auf ein einheitliches Beobachtungsprogramm zu den Auswirkungen touristischer Aktivitäten einigen können. Ein entsprechender Schutz- und Vorsorgeplan für die Antarktische Halbinsel wird derzeit gemeinsam von der IAATO und dem Wissenschaftlichen Ausschuss für Antarktisforschung (Scientific Committee on Antarctic Research, SCAR) erarbeitet. Bis dahin aber werden bekannte Effekte nur von der Tourismusindustrie selbst oder der US-amerikanischen Nichtregierungsorganisation Oceanites veröffentlicht. Letztere pflegt jedoch enge Kontakte zur IAATO.

Eine große Gefahr für die polare Umwelt in beiden Hemisphären geht von Schiffsunfällen aus. Sowohl im Nordpolargebiet, hier vor allem im östlichen Teil des Nördlichen Seewegs und in der kanadischen Arktis, als auch im Südpolargebiet fehlen die entsprechenden Infrastrukturen für effektive Such-, Seenotrettungs- und Säuberungsmaßnahmen. Die russische und kanadische Arktis wird zudem nur rudimentär von Satelliten abgedeckt, was im Notfall die Kommunikation in hohem Maß erschwert. Eine wirkungsvolle Unfallfolgenbekämpfung ist somit nahezu ausgeschlossen.

5.24 > In der Arktis teilen sich die acht Anrainerstaaten die Zuständigkeit für Luft- und Seenotrettungseinsätze. Jedes Land verantwortet einen bestimmten Sektor, wird im Ernstfall jedoch von den anderen Ländern unterstützt. So regelt es das gemeinsame Abkommen über die Zusammenarbeit im Such- und Rettungsdienst, welches im Jahr 2011 unterzeichnet wurde.



Welche Auswirkungen ein Schiffsunfall in der Antarktis haben kann, hat die Havarie der „Bahía Paraíso“ im Jahr 1989 gezeigt. Das 131 Meter lange Schiff lief vor der Antarktischen Halbinsel auf Grund und verlor 645 000 Liter Diesel, die das Meer auf einer Fläche von 30 Quadratkilometern verschmutzten. Tote gab es keine zu beklagen, aber die Meeresumwelt wurde stark geschädigt. Vögel wie Skuas und Blauaugenkormorane verloren aufgrund der Ölverschmutzung ihre gesamte Jahresbrut. Die Bestandszahlen der Adéliepinguine in der Region brachen ebenfalls ein.

Hilfe für den Notfall

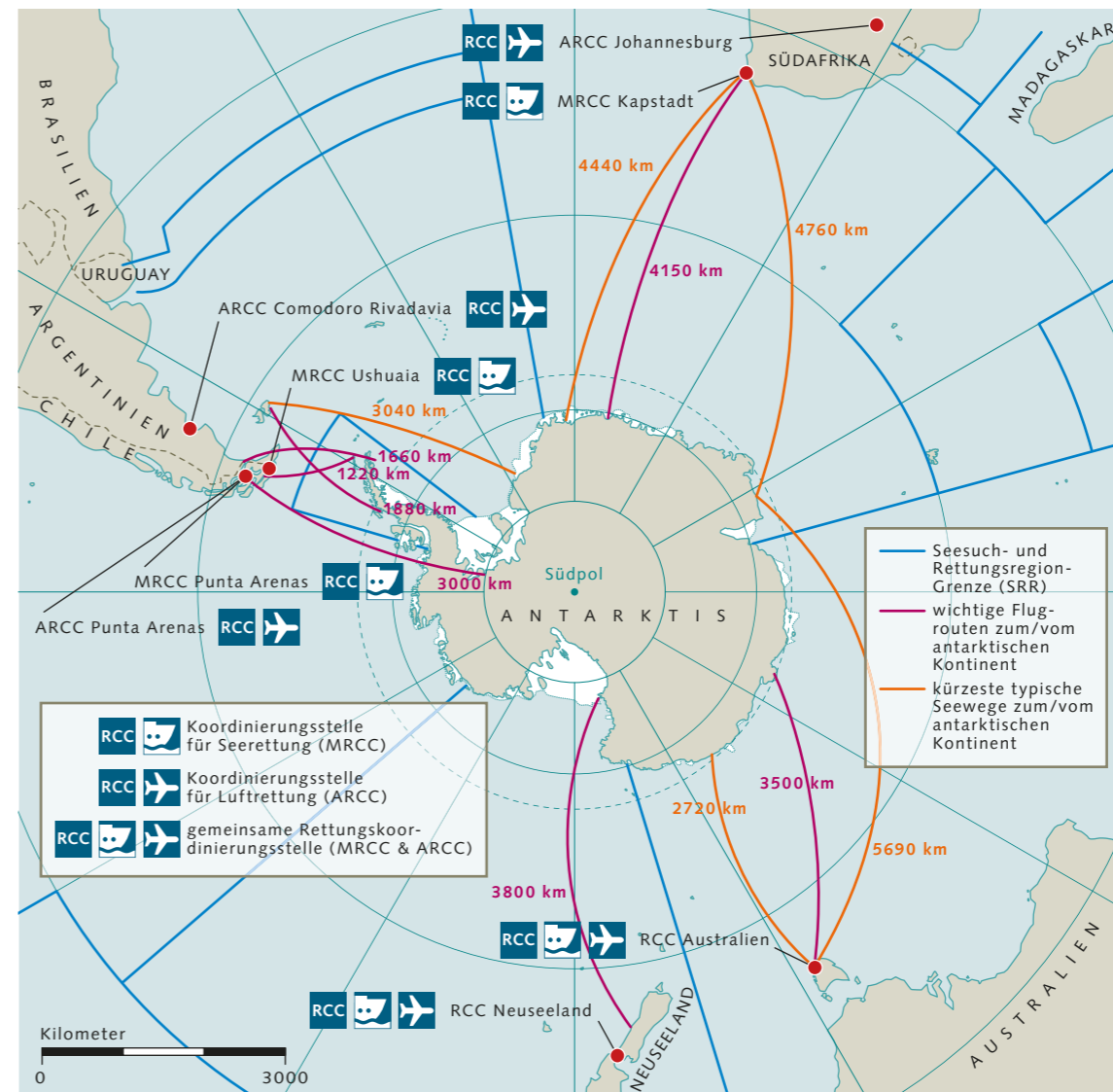
Um die Sicherheit der Schifffahrt im atlantischen Teil der Arktis zu erhöhen, haben sich im September 2018 Seenotrettungszentren, Forschungsinstitutionen und Behörden aus 13 Ländern zu einem neuen Sicherheits- und Notfall-Netzwerk (Arctic and North Atlantic Security and Emergency Preparedness Network, ARCSAR) zusammenschlossen. Gemeinsam wollen sie Lücken im derzeitigen Rettungsnetz identifizieren und Maßnahmen entwickeln, mit denen sich die arktischen Such- und Rettungsdienste

auf die zunehmende Zahl der Schiffe und Passagiere einstellen können. Da Luft- und Seenotrettung in der Arktis oft auch Aufgabe der Küstenwache ist, trainieren entsprechende Grenzschutzeinheiten der acht Arktisstaaten gemeinsam unter dem Schirm des Arctic Coast Guard Forum den Ernstfall und suchen bei ihren Beratungen ebenfalls nach Wegen der besseren Zusammenarbeit.

Wie dringend der Ausbau der Rettungskapazitäten ist, zeigte die Havarie des Kreuzfahrtschiffs „Viking Sky“ vor der Westküste Norwegens im März 2019. Das Schiff mit 1373 Menschen an Bord war während eines Sturmes mit

Motorschaden in Seenot geraten und trieb bei schwierigen Wetterverhältnissen manövrierunfähig auf die Westküste Norwegens zu. Den Rettungskräften gelang es innerhalb von 19 Stunden, mit sechs Hubschraubern rund 470 Menschen an Land zu holen. Die restlichen Passagiere mussten an Bord ausharren, bis die Besatzung den Schaden beheben konnte.

Glücklicherweise ereignete sich dieser Vorfall dicht vor der norwegischen Küste, in einer Region, in der die Hubschrauber schnell zur Verfügung standen und ausreichend Rettungskräfte innerhalb kurzer Zeit zusammen-



5.25 > Die Luft- und Seenotrettung in der Antarktis wird durch fünf Havariezentren in Australien, Neuseeland, Chile, Argentinien und Südafrika koordiniert. Hilfe vor Ort aber leisten im Ernstfall Schiffe, die dafür von anderen Aufgaben abgezogen werden.

Ein Regelwerk für mehr Sicherheit in polaren Gewässern

Angesichts des zunehmenden Schiffsverkehrs in den Polarregionen hat die Internationale Seeschifffahrts-Organisation (IMO) neue Sicherheitsvorschriften verabschiedet. Sie sollen die Unfallgefahr bannen und Umwelt und Menschen in der Arktis und Antarktis vor den negativen Folgen des Schiffsverkehrs schützen. Die Regeln des sogenannten Polar Code (International Code for Ships Operating in Polar Waters) gelten seit dem 1. Januar 2017 für alle Schiffe, die im Arktischen Ozean oder dem Südpolarmeer operieren.

Das Regelwerk setzt verpflichtende Standards für (1) die Konstruktion eines Schiffes, (2) seine Sicherheitsausstattung, (3) seinen Einsatzbereich, (4) die Qualifikation der Besatzung, (5) mögliche Such- und Rettungseinsätze sowie für Umweltschutzvorkehrungen – und gilt zusätzlich zum Internationalen Übereinkommen von 1974 zum Schutz des menschlichen Lebens auf See (International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, SOLAS), welches bislang die Sicherheitsstands in der weltweiten Meeresschifffahrt regelte.

Gemäß Polar Code müssen alle in der Arktis und Antarktis tätigen Schiffe zum Beispiel mit technischen Anlagen ausgestattet sein, die ihnen jederzeit Zugriff auf aktuelle Wetter- und Eisdaten gestatten. Vorgeschrieben sind außerdem zusätzliche Kommunikationskanäle, auf die zurückgegriffen werden kann, wenn die Satellitenverbindung abreißen sollte; beheizbare Fenster für gute Sicht auf der Schiffsbrücke; Decks-equipment, mit dem die Mannschaft Schnee und Eis entfernen kann (Hammer, Besen und so weiter), sowie Rettungsboote, die rundum geschlossen sind. Alle in der Arktis und Antarktis tätigen Schiffe müssen zudem einen warmen Überlebensanzug für jeden der Passagiere bereithalten und Feuerlöschinstrumente so lagern, dass ihnen die Kälte nichts anhaben kann und sie jederzeit einsatzbereit sind.

Beim Thema Umweltschutz verschärft der Polar Code die für alle Schiffe gültigen Regeln des internationalen Meeresschutzübereinkommens MARPOL (International Convention for the Prevention of Marine Pollution from Ships). So ist das Einleiten von Öl oder ölhaltigen Flüssigkeiten in den Polarregionen strengstens verboten. Alle Öltanker müssen mit einer Doppelhülle ausgestattet sein, um eine Ölleckage im Fall eines Unfalls zu verhindern. Darüber hinaus regeln strengere Vorschriften den Umgang mit Essensabfällen, Tierresten und sonstigem Müll. In den Polarregionen dürfen Essensabfälle nur unter bestimmten Bedingungen ins Meer entsorgt werden. Sämtlicher restlicher Müll muss gesammelt und verbrannt oder aber beim nächsten Hafenanlauf an Land entsorgt werden.

Die Schiffsbesatzungen müssen den Vorschriften zufolge ein spezielles Polartraining durchlaufen. Kapitäne, Steuerleute und Decks-offiziere brauchen zum Beispiel Schulungen zur Schiffsführung und zum Verhalten in Meeresgebieten mit Eis, bevor sie in den Polarregionen eingesetzt werden dürfen. Außerdem muss die Schiffsführung immer ein Handbuch parat haben, in dem genau beschrieben ist, wie das jeweilige Schiff in polaren Gewässern eingesetzt werden muss und darf. Darin vermerkt ist unter anderem auch die Polarklasse des Schiffes. Hierbei unterscheidet der Code zwischen drei Kategorien: Ein Klasse-A-Zertifikat erhalten Schiffe, deren Konstruktion den Einsatz in Gebieten erlaubt, deren Eisdecke aus mitteldickem einjährigem Meer-eis besteht, aber auch Einschlüsse von mehrjährigem Eis enthält (Polar-Eisklasse 1 bis 5). Schiffe der B-Klasse können eigenständig dünnes einjähriges Eis brechen, ohne dabei Gefahr zu laufen, Schaden zu nehmen (Polar-Eisklasse 6 und 7). Und Schiffe der Klasse C können in polaren Gewässern operieren, in denen keines oder nur sehr wenig Eis vorkommt (Schiffe mit Baltischer Eisklasse oder ganz ohne Eisverstärkung).

Die Initiatoren des Polar Code feierten das Inkrafttreten der neuen Sicherheitsauflagen als großen Erfolg. Schließlich hatte man das neue Regelwerk nahezu 20 Jahre lang erarbeitet und verhandelt. Umweltschützern aber gehen die Auflagen nicht weit genug. Zwar empfiehlt der Polar Code, weniger giftige Treibstoffe als Schweröl in der Arktis einzusetzen, er verbietet dessen Einsatz aber noch nicht. Eine entsprechende Regelung wird derzeit verhandelt. Rechtlich nicht bindend sind außerdem Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Ballastwasser und am Schiffsrumpf anhaftender Organismen. Auf diese Weise soll eigentlich verhindert werden, dass die Schiffe fremde Arten in die Arktis einschleppen.

Unberücksichtigt bleiben im neuen Regelwerk Themen wie Unterwasserlärm, Abgasemissionen und der Umgang mit sogenanntem Grauwasser. Gemeint sind Abwässer aus Duschen und Bädern an Bord eines Schiffes. Dieses Wasser enthält in der Regel jede Menge Chemikalien (Shampoo, Seife), Bakterien, Mikroplastikpartikel (Zahnpasta, Peeling) und andere Verschmutzungen. Kreuzfahrtschiffe beispielweise leiten einen großen Teil ihres Brauchwassers in das Meer ein. Nach Schätzungen der US-amerikanischen Umweltbehörde produziert ein normaler Schiffspassagier pro Reisetag zwischen 135 und 450 Liter Grauwasser. Dieses darf zumindest in den meisten Gebieten des Arktischen Ozeans direkt eingeleitet werden.

Umweltschützer kritisieren außerdem, dass das Regelwerk des Polar Code nicht für Fischkutter, Privatyachten mit weniger als zwölf Passagieren und kleinere Frachtschiffe mit einer Größe von weniger als 500 Bruttoregistertonnen gilt. Deren mögliches Schadenspotenzial für die

Umwelt mag zwar nicht so groß sein, als wenn ein großer Öltanker havarien würde. Dennoch: Fischkutter machen einen Großteil der in arktischen Gewässern verkehrenden Schiffe aus – und die Zahl der Privatyachten steigt zumindest im Bereich der Nordwestpassage stetig.



5.26 > Obwohl der Polar Code noch nicht für Fischkutter gilt, bleibt zu hoffen, dass seine Auflagen zum Umgang mit Abfällen und Müll an Bord von Schiffen dazu beitragen werden, die Polarmeere vor einer zunehmenden Verschmutzung zu bewahren.

geholt werden konnten. Weiter nördlich – etwa an der Ostküste Spitzbergens – wäre ein solcher Rettungseinsatz kaum möglich gewesen; allein schon, weil auf der Inselgruppe nur zwei Rettungshubschrauber stationiert sind. Medienberichten zufolge aber werden im Sommer 2020 allein rund um Spitzbergen mehr als 26 kleinere, sogenannte Expeditionskreuzfahrtschiffe und mehrere große Kreuzfahrtschiffe mit bis zu tausend Passagieren im Einsatz sein. Einige von ihnen werden dabei auch Regionen befahren, aus denen es noch keine detaillierten bathymetrischen Karten gibt. Die Unfallgefahr ist somit hoch.

In der Antarktis ist internationale Zusammenarbeit in der Luft- und Seenotrettung (Search and Rescue, SAR) noch dringender erforderlich als überall sonst auf der Welt. Rettungseinsätze in der entlegensten Region sind nämlich nicht nur besonders aufwendig und damit teuer. Weil Rettungseinheiten vor Ort fehlen, können in der Regel auch nur jene Schiffe Hilfe leisten, die eigentlich andere Aufgaben verfolgen (Stationsversorgung, Fischerei, Kreuzfahrt oder Forschung), diese dann aber für den Rettungseinsatz unterbrechen.

Verantwortlich für die Koordination der Luft- und Seenotrettung in den fünf SAR-Zonen des Südpolarmeers sind die fünf am südlichsten gelegenen Staaten: Australien, Neuseeland, Chile, Argentinien und Südafrika. Sie betreiben Havariezentren, die mögliche Rettungseinsätze koordinieren sowie regelmäßig Wetterberichte und andere wichtige Navigationshinweise für ihre jeweilige SAR-Region veröffentlichen. Die Zentren befinden sich in Canberra (Australien), Wellington (Neuseeland), Punta Arenas (Chile), Ushuaia (Argentinien) und Kapstadt (Südafrika). Chile und Argentinien haben außerdem im Jahr 1998 eine gemeinsame Küstenpatrouille (Patrulla Antártica Naval Combinada, PANC) eingerichtet. Küstenschutzschiffe beider Länder fahren von November bis März in der Drakestraße sowie in den stark befahrenen Gewässern entlang der Antarktischen Halbinsel Streife und eilen bei Notrufen zu Hilfe. Ihre Mannschaften sind für Such- und Rettungseinsätze ausgebildet und sollen im Ernstfall auch Umweltschutzmaßnahmen durchführen. Einheiten der PANC halfen unter anderem bei den Lösch- und Rettungsarbeiten, als im Februar 2012 auf King George Island die brasilianische Forschungsstation Estação Antártica Comandante Ferraz abbrannte.

Um die Arbeit der Havariezentren zu erleichtern, teilen der Rat der Leiter der nationalen Antarktisprogramme (Council of Managers of National Antarctic Programs, COMNAP) und die IAATO aktuelle Schiffsdaten mit den Zentren. Die Antarktisvertragsstaaten haben zudem im Jahr 2012 eine Arbeitsgruppe für SAR-Belange ins Leben gerufen und die Durchführung regelmäßiger internationaler SAR-Workshops beschlossen. An diesen Arbeitstreffen nehmen teil: Vertreter der Rettungszentren, Gesandte der nationalen Forschungsprogramme, Sprecher der IAATO, der CCAMLR und der IMO sowie kommerzielle Anbieter und Dienstleister. Gemeinsam beraten sie, wie sich die Sicherheit im Luft- und Schiffsverkehr verbessern ließe und welche Lehren aus zurückliegenden Einsätzen gezogen werden müssten.

Fischerei in der Arktis

Die Barentssee ist eine jener arktischen Regionen, in welcher der Fischfang für einen Großteil des Schiffsverkehrs verantwortlich ist. Nach Angaben des Arktischen Rates befahren bis zu 1600 Fischkutter die Region pro Jahr. Sowohl in Norwegen als auch in Russland ist die Hochseefischerei ein Hauptwirtschaftszweig, und ein beträchtlicher Teil der Fänge wird exportiert. Genaue Zahlen über die Fangmengen in arktischen Gewässern zu ermitteln, ist jedoch schwierig, weil es keine klar definierte Grenze des Arktischen Ozeans gibt.

Die Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) beispielsweise teilt die Meere der Welt in 19 Fischereiregionen ein, von denen fünf Gebiete arktische Gewässer enthalten. Dazu gehören:

- das Gebiet Nr. 18 – zentraler Arktischer Ozean ohne die arktischen Gewässer zwischen 40 Grad West und 68° 30' Ost;
- das Gebiet Nr. 21 – Nordwestatlantik, einschließlich der Davisstraße und der Baffinbucht;
- das Gebiet Nr. 27 – Nordostatlantik, einschließlich des Europäischen Nordmeers, der Barentssee und der Gewässer des zentralen Arktischen Ozeans zwischen dem 40. Längengrad West und der Nordspitze der Insel Nowaja Semlja (68° 30' Ost);



5.27 > Fischerei in kalten, arktischen Gewässern war und ist körperliche Schwerarbeit. Im Vergleich zu früher kommt heute jedoch auf vielen Kuttern moderne Fangtechnik zum Einsatz, die einen Großteil der Helfer überflüssig macht.

- das Gebiet Nr. 67 – Nordostpazifik, einschließlich des östlichen Beringmeers sowie
- das Gebiet Nr. 61 – Nordwestpazifik, einschließlich des westlichen Beringmeers.

Der Nordwestpazifik ist eine der produktivsten Meeresregionen weltweit und mit einem Fangvolumen von mehr als 22 Millionen Tonnen Fisch und Meeresfrüchten das bedeutendste Fischereigebiet der Erde. Im Nordostpazifik fangen die Fischer nur etwa ein Siebtel so viel Fisch (2016: 3,1 Millionen Tonnen). Mit Umsätzen von rund 1,7 Milliarden US-Dollar aber stellt die Fischereiflotte Alaskas dennoch einen wichtigen Wirtschaftszweig in der nordamerikanischen Arktis dar. Gefangen werden im Nordpazifik vor allem Pazifischer Pollack (*Gadus chalcogrammus*), Pazifischer Kabeljau (*Gadus macrocephalus*), Pazifischer Heilbutt (*Hippoglossus stenolepis*), Krabben und pazifische Lachsarten wie den Rotlachs (*Oncorhynchus nerka*).

In den nordatlantischen Fischereiregionen 21 und 27 wurden im Jahr 2016 insgesamt 10,1 Millionen Tonnen Fisch gefangen, wobei sich die Fischzüge in arktischen Gewässern vor allem auf die eisfreien Küstengewässer konzentrierten. Das heißt, die Fischzüge fanden meist innerhalb der Ausschließlichen Wirtschaftszonen statt. Die wichtigsten Fischgründe in der atlantischen Arktis liegen in der Barentssee, im Europäischen Nordmeer sowie rund um Grönland und Island. Gefischt wird in diesen Gebieten nach Atlantischem Kabeljau (*Gadus morhua*), Schellfisch (*Melanogrammus aeglefinus*), Atlantischem Hering (*Clupea harengus*) und nach arktischen Arten wie Lodde (*Mallotus villosus*), Grönländischer oder Schwarzer Heilbutt (*Reinhardtius hippoglossoides*), Eismeergarnele (*Pandalus borealis*) und Polardorsch (*Boreogadus saida*).

In den subarktischen Regionen der Barentssee und dem Europäischen Nordmeer werden sogar bis zu 20 Arten befischt, darunter auch Leuchtgarnelen und Ruderfußkrebse. Einen herausragenden wirtschaftlichen

Fischereiverbot im zentralen Nordpolarmeer

Der zentrale Arktische Ozean ist eine der wenigen Regionen in der Welt, in der bislang nicht kommerziell gefischt wurde. Daran wird sich auch in den kommenden 15 Jahren nichts ändern, denn die fünf arktischen Küstenstaaten haben sich im Oktober 2018 gemeinsam mit Island, China, Japan, Südkorea und der Europäischen Union auf ein Verbot der Hochseefischerei in den internationalen Gewässern der zentralen Arktis geeinigt. Das Übereinkommen zur Verhinderung der unregulierten Hochseefischerei im zentralen Nordpolarmeer schützt eine Region so groß wie das Mittelmeer für mindestens 16 Jahre vor kommerzieller Fischerei und enthält die Option auf eine automatische Verlängerung um weitere fünf Jahre.

Auf diese Weise wollen die Vertragsstaaten der internationalen Wissenschaft ausreichend Zeit geben, das 2,8 Millionen Quadratkilometer große Gebiet zu untersuchen, seine Fischbestände zu

bewerten und Strategien für eine nachhaltige Bewirtschaftung zu entwickeln. Bislang war in dieser Region aufgrund ihrer dauerhaften Meereisdecke nicht gefischt und kaum Fischereiforschung betrieben worden. Aus diesem Grund weiß man auch kaum etwas über die Größe der dortigen Fischpopulationen, über ihre Wanderungen, Lebensräume und Räuber-Beute-Beziehungen. Das gilt auch für den Polardorsch, der an den südlichen Rändern seines Verbreitungsgebiets schon stark befischt wurde.

Ausschlaggebend für die Einigung auf das Fischereiverbot in der zentralen Arktis war der klimabedingte Meereisrückgang, in dessen Zuge die menschlichen Aktivitäten im Nordpolarmeer zunehmen. Mittlerweile sind bis zu 40 Prozent des zentralen Arktischen Ozeans im Sommer eisfrei, sodass Schiffe diese Region befahren können und das Interesse an Fischzügen in der Arktis gestiegen ist.

Stellenwert besitzt die Fischerei vor allem für Island, Grönland und die Färöerinseln. Bei den letzten beiden machen Einnahmen aus dem Verkauf von Fischereierzeugnissen 20 Prozent des Bruttoinlandsprodukts und nahezu 90 Prozent aller Exporteinnahmen aus.

Reguliert wird die Fischerei in der Arktis durch eine Reihe von Konventionen und Vorschriften. Dazu gehören:

- nationale Gesetze und Auflagen, die für die Fischerei innerhalb der jeweiligen Ausschließlichen Wirtschaftszone gelten;
- Fischereivorschriften der Europäischen Union (im Nordatlantik),
- bilaterale oder multilaterale Vereinbarungen zwischen zwei oder mehreren Staaten, die sich Fischbestände teilen. Die wichtigsten Fischbestände der Barentssee beispielsweise werden seit dem Jahr 1976 von einer norwegisch-russischen Fischereikommission überwacht und Fanggrößen und -quoten gemeinsam festgelegt;
- Vorgaben der Regionalen Organisationen für das Fischereimanagement (Regional Fisheries Management Organisations, RFMOs). Im Nordatlantik beispielsweise kontrolliert die Fischereikommission für

den Nordostatlantik (North East Atlantic Fisheries Commission, NEAFC) die Fischerei in der Hohen See und gibt auf Anfrage der Vertragspartner (Dänemark, EU, Island, Norwegen, Russland) auch Empfehlungen für das Management der Bestände in den Ausschließlichen Wirtschaftszonen. Relevant für Teile des Arktischen Ozeans sind außerdem die Nordwestatlantische Fischereiorganisation (Northwest Atlantic Fisheries Organization, NAFO) sowie die Internationale Kommission für den Schutz des atlantischen Thunfisches (International Commission for the Conservation of Atlantic Tuna, ICCAT).

- internationale Übereinkommen wie das UN Fish Stocks Agreement, welches im Jahr 2001 in Kraft trat und das UN-Seerechtsübereinkommen ergänzt. Es zielt darauf ab, kommerziell wertvolle Fischbestände, die sich entweder über große Gebiete erstrecken oder aber weite Wanderungen vornehmen, gemeinschaftlich zu erhalten und nachhaltig zu befischen.

Fangquoten, Fangzeiten und Fanglizenzen werden in allen Teilen der Arktis auf Basis wissenschaftlicher Empfehlungen ausgegeben. Diese kommen unter anderem vom

Internationalen Rat für Meeresforschung (International Council for the Exploration of the Sea, ICES), genauer gesagt von dessen Arbeitsgruppe zur Fischerei in der Arktis. Sie beurteilt jedes Jahr aufs Neue den Zustand der aus Fischereisicht wichtigen Bestände in der Barentssee und der Norwegensee und berät zuständige Managementgremien wie die norwegisch-russische Fischereikommission.

Sowohl nationale als auch überregionale Fischereibehörden verfolgen in arktischen Gewässern das Vorsorge- und Nachhaltigkeitsprinzip. Das heißt, es dürfen zu bestimmten Zeiten jeweils nur so viele Tiere eines Bestandes entnommen werden, dass sich die Population von selbst erhalten kann, ihre Produktivität nicht abnimmt und auch keine negativen Auswirkungen auf das Ökosystem zu befürchten sind. Zudem werden die Bestände streng überwacht, sodass nach Einschätzung von Experten die meisten Fischbestände in den arktischen Gewässern gesund sind.

Ausgenommen davon sind zum Beispiel die westgrönländischen Kabeljaue. Sie waren zwischen 1950 und 1980 so stark befischt worden, dass die Population in den 1980er-Jahren zusammengebrach. Seitdem haben sich die Bestände nicht erholt. Sinkende Fangzahlen beobachten seit mehr als zehn Jahren auch die kanadischen und westgrönländischen Eismeerkrabbenfischer. Hier liegt der Verdacht jedoch nahe, dass die Rückgänge auf die klimabedingte Abwanderung der Eismeerkrabben Richtung Norden zurückzuführen sind.

Im Zuge des Klimawandels verschieben sich die Lebensräume vieler Speisefische polwärts. In der Barentssee sind einige arktische Fischbestände bereits derart außer Reichweite der Küstenfischer gerückt, dass diese jetzt anderen Arten nachstellen oder aber sich zu Hochsee-Fischereiunternehmen zusammenschließen. In der Region Barentssee beobachteten Wissenschaftler bereits vor zehn Jahren, dass weniger Fischer auf das Meer hinausfahren als früher, diese aber größere Schiffe und modernere Fangtechnik einsetzten.

Gleichzeitig hat sich im Zeitraum von 2004 bis 2012 die Artenzusammensetzung der Fische in der Barentssee geändert. Früher landeten vor allem arktische Fischarten wie Dickkopfgroppen (*Triclops nybelini*), Grönländischer oder Schwarzer Heilbutt (*Reinhardtius hippoglossoides*) und Scheibenbäuche (*Liparis spp.*) in den Netzen. Heutzutage

sind es in erster Linie nordatlantische Fischarten, die etwas wärmere Bedingungen mögen, darunter der Atlantische Kabeljau, Schellfisch und Doggerscharben (*Hippoglossoides platessoides*). Außerdem haben sich eingeschleppte Arten wie die Kamtschatkakrabbe (*Paralithodes camtschaticus*) und die Schneekrabbe (*Chionoecetes opilio*) in der Barentssee ausgebreitet und mittlerweile so stark vermehrt, dass sich die Krabbenfischerei lohnt.

Den Fischern auf Grönland, auf Neufundland und Labrador fällt die klimabedingte Artenwanderung die Netze ebenfalls mit kostbaren Speisefischen aus dem Atlantik. Vor der Ostküste Grönlands fangen Makrelenfischer mittlerweile auch Blauflossenthunfisch (*Thunnus thynnus*). Deutlich gestiegen ist zudem die Menge des gefangenen Kabeljaus. Landeten Grönlands Hochseefischer im Jahr 2013 noch 10 700 Tonnen Kabeljau an, waren es 2017 bereits 17 800 Tonnen. Diese Entwicklung bestätigt wissenschaftliche Prognosen aus dem Jahr 2014, wonach die Einnahmen atlantischer Arktisanrainer durch Fischerei im Zeitraum von 2000 bis 2050 um 39 Prozent zunehmen werden.

Die Aussicht auf eine künftig gewinnbringende Kabeljau- und Heilbutt-Fischerei hat Regierungsbehörden und Vertreter der indigenen Bevölkerung im Nunavut-Territorium Kanadas dazu veranlasst, sieben Millionen kanadische Dollar in Fischereiforschungsvorhaben vor der Ostküste der Baffininsel zu investieren. Bislang fischte die indigene Bevölkerung der Baffininsel nur für den Eigenverbrauch. Eine kommerzielle Fischereiflotte aber könnte Arbeitsplätze schaffen, die in der Region so dringend benötigt werden. Fischkutter aus Neufundland und Labrador machen vor der Küste Nunavuts mittlerweile so gute Fänge, dass ihre Umsätze im Zeitraum von 2006 bis 2014 von 38 auf 86 Millionen kanadische Dollar gestiegen sind.

Während das südliche Beringmeer die wichtigsten Fischgründe der Welt beheimatet, wird im nördlichen Beringmeer in einem deutlich kleineren Ausmaß kommerziell gefischt. Für die US-amerikanischen Gebiete in der Tschuktschen- und Beaufortsee hat die zuständige Fischereiaufsicht (North Pacific Fishery Management Council) im Jahr 2009 sogar ein Verbot kommerzieller Fischerei ausgesprochen, um die empfindlichen marinen Lebensgemeinschaften vor möglichen negativen Folgen zu schützen. Aus dem hohen Norden Kanadas sind ebenfalls

keine kommerziellen Fischereiaktivitäten bekannt. In beiden Regionen fischen die Menschen nur für den Eigenverbrauch, wobei Fisch eine der wichtigsten Nahrungsquellen für die indigene Bevölkerung Alaskas und der nördlichen Territorien Kanadas darstellt. Gefangen werden an der kanadischen Nordküste in erster Linie Seesaibling (*Salvelinus alpinus*), Atlantischer Lachs (*Salmo salar*) und Große Maräne (*Coregonus nasus*). Die Summe der angelandeten Fänge beläuft sich seit Mitte der 1990er-Jahre auf etwa 800 bis 900 Tonnen pro Jahr.

Meeresbiologen arbeiten derzeit mit Hochdruck an neuen Fischereibeobachtungs- und Managementkonzepten, mit denen es gelingen soll, Artenwanderungen und klimabedingte Populationseinbrüche zu dokumentieren und bei der Festlegung der Fangquoten zu berücksichtigen – auch über die Grenzen der einzelnen Fischereiregionen hinweg. Im Zuge des Klimawandels wird es nämlich zunehmend schwerer, die Fischbestände der arktischen und subarktischen Gewässer nachhaltig zu bewirtschaften.

Fischerei in der Antarktis

Die Nutzung mariner Lebewesen im Südpolarmeer wie Krill und Fisch fällt in den Zuständigkeitsbereich der Kommission zur Erhaltung der lebenden Meeresschätze der Antarktis (CCAMLR). Das von ihr verwaltete Meeressgebiet wird von der Polarfront begrenzt, der Trennungslinie zwischen kalten antarktischen und etwas wärmeren subantarktischen Wassermassen, und geht stellenweise über den südlichen Polarkreis hinaus. Es erstreckt sich über eine Gesamtfläche von 35,7 Millionen Quadratkilometern und entspricht damit rund zehn Prozent des Weltozeans.

Das oberste Ziel der CAMLR-Konvention ist der Erhalt aller marinen Arten und Ökosysteme des Südozeans. Allerdings ist in dem Übereinkommen definiert, dass dieser Erhalt auch die Nutzung dieser Ressourcen beinhaltet. Die Fischerei im Südozean ist streng reguliert, wobei der Naturschutzgedanke stets vor die Fischereii Interessen gestellt werden sollte. Zu den Grundpfeilern der CAMLR-Konvention gehört, dass die Kommission Fangquoten auf Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse festlegt und dabei dem Vorsorgeprinzip verpflichtet ist. Alle CCAMLR-Mitgliedstaaten müssen im Sinn der Konvention agieren

und verhindern, dass die empfindlichen marinen Arten und die Ökosysteme im Südpolarmeer durch Fischereimaßnahmen geschädigt werden.

Innerhalb der CCAMLR-Region gibt es keinen Fischereihafen und auch keine einheimische Bevölkerung, die zur Selbstversorgung Fischfang betreibt. Alles, was Fischer in den antarktischen Gewässern fangen, wird außerhalb der CCAMLR-Region angelandet. Der Fischfang in der Antarktis beschränkt sich gegenwärtig auf wenige Arten. Dazu zählen Antarktischer Krill (*Euphausia superba*), Bändereisfisch (*Champsocephalus gunnari*), Schwarzer Seehecht (*Dissostichus eleginoides*) und der Antarktische Seehecht (*Dissostichus mawsoni*), manchmal auch Riesen-Antarktisdorsch genannt. Seit einem Jahr befischt Russland testweise auch antarktische Stein- und Königskrabben (*Neolithodes yaldwini* und *Paralomis birsteini*).

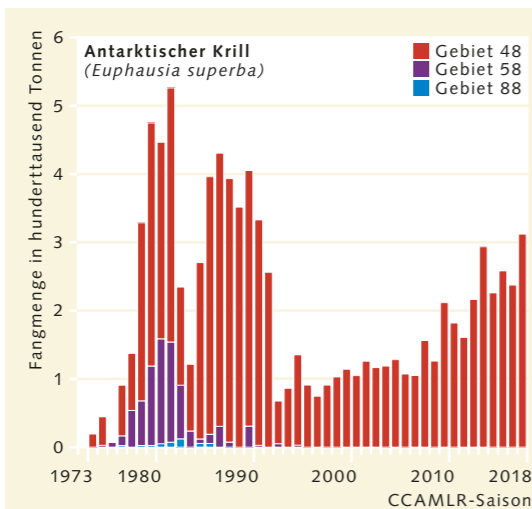
Antarktischer Krill wird derzeit nahezu ausschließlich im atlantischen Sektor des Südozeans gefangen, genauer gesagt in den Gewässern westlich der Antarktischen Halbinsel, rund um die Südlichen Orkneyinseln und rund um Südgeorgien. Die jährliche Fangmenge beläuft sich auf 200 000 bis 300 000 Tonnen, wobei allein rund 60 Prozent des Fanges von norwegischen Trawlern eingeholt werden, 20 Prozent von chinesischen Fischern und zehn Prozent von Schiffen aus Südkorea. In 2017 beteiligten sich elf Fangschiffe an dem Krillfang; in 2018 waren es neun Schiffe, die aber zusammen eine größere Menge Krill fischten als im Vorjahr. Die norwegische Firma Aker BioMarine hat in diesem Jahr ein neues, speziell für den Krillfang gebautes Schiff in Dienst gestellt. Die „Antarctic Endurance“ ist 130 Meter lang, hat über 140 Millionen US-Dollar gekostet und verfügt über die modernste technische Ausstattung, was den umweltfreundlichen Betrieb des Schiffes als auch dessen Krillfang-Effizienz steigert.

Die Gesamtmenge des gefangenen Krills steigt seit mehr als 20 Jahren. In 2018 wurden 312 989 Tonnen Krill gefangen – eine Menge, die immer noch weit unter den von CCAMLR festgesetzten Quoten liegt. Diese umfassen 620 000 Tonnen für die Krillfanggebiete im atlantischen Sektor und 892 000 Tonnen für den ostantarktischen Sektor. Letzterer wird derzeit aber kaum für den Krillfang genutzt. CCAMLR bemüht sich schon seit mehreren Jah-

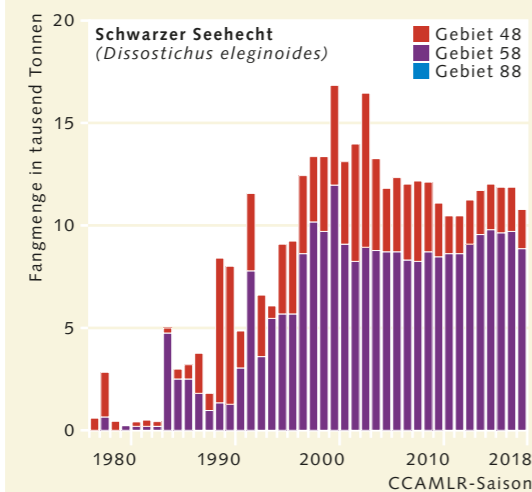


5.28 > Die wirtschaftliche Entwicklung der arktischen Regionen verändert auch das Leben ihrer Ureinwohner. Schneemobile, Autos und Flugreisen gehören mittlerweile genauso zu ihrem Alltag wie die traditionelle Jagd auf Robben und Schneegänse, wie dieser Wandteppich im Museum von Iqaluit, Kanada, zeigt.

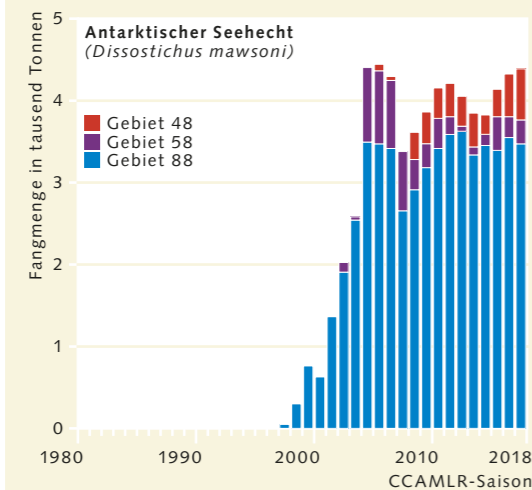
5.29 > Antarktischer Krill wird vor allem im atlantischen Sektor des Südpolarmeers gefangen. Die Fangmengen steigen seit einigen Jahren wieder kontinuierlich an, auch weil die aus Krill gewonnenen Omega-3-Fettsäuren als Nahrungsergänzungsmittel genutzt werden.



5.30 > Schwarzer Seehecht (*Dissostichus eleginoides*) wird mit Langleinen in einer Tiefe von 1200 bis 1800 Metern gefangen. Die Fischerei wird durch CCAMLR streng reglementiert und überwacht. Im Jahr 2018 durften nicht mehr als 2600 Tonnen dieses Fisches gefangen werden.



5.31 > Der Antarktische Seehecht (*Dissostichus mawsoni*) ist ein enger Verwandter des Schwarzen Seehechts und wird in einigen Regionen exploratorisch befishet. Das heißt, die Fangquoten werden in jedem Jahr durch CCAMLRs wissenschaftliches Komitee und die Arbeitsgruppe zu Fischbeständen überprüft.



ren, diese Fangquoten auf Basis neuer wissenschaftlicher Untersuchungen zu revidieren. Im Zuge dessen sollen auch die potenziellen Auswirkungen des Klimawandels auf die antarktischen Krillbestände berücksichtigt werden.

Wie Krill werden auch Bändereisfische mit Netzen gefangen. Ihnen stellen die Fischer in den Schelfgebieten Südgeorgiens und der Insel Heard nach. Sie landen pro Jahr 400 bis 500 Tonnen dieser Fischart an. Die Kutter kommen dabei vornehmlich aus Großbritannien (57 Prozent) und aus Australien (25 Prozent).

Der Schwarze Seehecht dagegen wird mit Langleinen in einer Tiefe von 1200 bis 1800 Metern befischt. Jede dieser Leinen ist zwischen drei und zehn Kilometer lang und mit Tausenden beköderten Haken besetzt. Französische, britische und australische Schiffe legen diese rund um Südgeorgien aus sowie in mehreren Gebieten des indischen Sektors. Die Gesamtausbeute beläuft sich dabei auf 11 000 bis 12 000 Tonnen pro Jahr. Nur ein Viertel so groß sind die Fänge des Antarktischen Seehechts, dem koreanische, neuseeländische, britische, russische, spanische und ukrainische Fischer ebenfalls mit Langleinen nachstellen. Die Fanggebiete liegen im atlantischen und indischen Sektor des Südozeans sowie im Rossmeer.

Beide Arten des Seehechts werden bis zwei Meter lang und 60 bis 80 Kilogramm schwer. Die Tiere wachsen nur sehr langsam, erreichen ihre Geschlechtsreife erst im Alter von etwa acht bis zehn Jahren und leben im Idealfall 45 bis 50 Jahre lang. Aufgrund dieser Eigenschaften laufen beide Fischarten schnell Gefahr, überfischt zu werden. Mit einer Temperatur-Toleranzgrenze von gerade einmal zwei Grad Celsius ist vor allem der Antarktische Seehecht zusätzlich durch die klimabedingte Erwärmung des Südozeans gefährdet.

Als einziges Land fischt Russland derzeit im pazifischen Sektor der Antarktis nach Stein- und Königskrabben. Das zwar nur in kleinem Rahmen und als Pilotstudie, doch der ökologische Schaden ist groß. Die Tiere werden nämlich wie Hummer mit Reusenkörben gefangen. Jede dieser Reusen hat einen 1,5 Meter großen Durchmesser. Jeweils 120 dieser Reusen werden an einer mit Gewichten beschwerten Leine befestigt. Um die ausgelegten Leine wieder einholen zu können, werden an ihrem Ende Bojen befestigt, die an der Wasseroberfläche treiben. Sollte nun der sehr wahrscheinliche Fall eintreten, dass Eisberge

oder Eisschollen diese Markierungsbojen mitreißen, wird die gesamte Leine mit Gewichten und Körben über viele Kilometer über den Meeresboden geschleift und zerstört die dort ansässigen empfindlichen Lebensgemeinschaften. Aus diesem Grund versuchen Deutschland und andere CCAMLR-Mitgliedsstaaten derzeit, die CCAMLR-Kommission von einem Verbot dieser Fischerei zu überzeugen.

Wo in welchem Ausmaß gefischt werden darf, entscheidet die CCAMLR-Kommission bei ihren jährlichen Treffen in Hobart, Tasmanien. Alle Vereinbarungen müssen einstimmig getroffen werden, was jeden Mitgliedsstaat in die Lage versetzt, Maßnahmen wie zum Beispiel die Einrichtung von Meeresschutzgebieten zu verhindern, wenn diese nicht in seinem Interesse sind. Gleichzeitig hat die Kommission in den zurückliegenden Jahrzehnten die Kontrolle der Fischerei in der Antarktis massiv verstärkt, um die Einhaltung der beschlossenen Fangquoten und Auflagen zu überwachen sowie die Zahl illegaler Fischzüge zu reduzieren.

Zu den Auflagen gehören beispielsweise eine saisonale Begrenzung der Langleinenfischerei auf den Winter (nur in einigen Fanggebieten) und spezielle Maßnahmen zur Reduzierung des Beifangs von Seevögeln wie Albatrosse und Sturmvögel. Diese folgen häufig den Langleinenschiffen, verschlucken beim Auslegen der Leinen die beköderten Haken und ertrinken anschließend. Gerade in den Anfängen der Langleinenfischerei in der Antarktis in den 1980er- und 1990er-Jahren waren so viele Seevögel an den Langleinen verendet, dass manche Populationen um bis zu 40 Prozent einbrachen. Viele Albatrossarten gelten seitdem als vom Aussterben bedroht. Die von CCAMLR beschlossenen Schutzmaßnahmen aber zeigen Wirkung. Durch den Einsatz von Gewichten, welche die Langleinen schneller in große Tiefen sinken lassen, durch das Anbringen von Leinen mit Flutterbändern, welche die Seevögel von der Fangleine fernhalten, sowie durch das Gebot, die Leinen nur bei Dunkelheit ins Wasser zu lassen, konnte der Beifang schlagartig reduziert werden. Fielen am Anfang der 1990er-Jahre noch über 6000 Seevögel pro Jahr der Langleinenfischerei im CCAMLR-Gebiet zum Opfer, sind es heutzutage weniger als zehn Tiere pro Jahr. Dabei ist in den zurückliegenden Jahren die Anzahl der im Südozean ausgelegten Langleinen und Haken gestiegen.

In den 1990er-Jahren nahm auch die Zahl illegaler Fischzüge auf den Schwarzen und den Antarktischen Seehecht zu. Bei dieser illegalen Fischerei werden zumeist enorm schädliche Tiefseestellnetze verwendet, deren Einsatz im gesamten CCAMLR-Gebiet verboten ist. Der Fang von Schwarzem und Antarktischem Seehecht ist finanziell äußerst lukrativ. Je nach Angebot und Nachfrage können Preise zwischen zehn und 20 US-Dollar pro Kilogramm erzielt werden, manchmal auch weit mehr. Der Fisch wird unter dem Handelsnamen Chilean Sea Bass überwiegend in Nord- und Südamerika, aber auch in einzelnen Ländern in Asien und Europa vermarktet.

Die CCAMLR-Kommission hat ein strenges Berichts- und Kontrollsystem eingeführt, um illegale Fischerei zu verhindern – mit Erfolg. Wurden im Jahr 1996 noch schätzungsweise 30 000 Tonnen Seehecht illegal angelandet, waren es 2014 weniger als 1500 Tonnen. Mittlerweile gibt es nur noch vereinzelte Hinweise auf illegale Fänge. Forscher berichten aber, dass im Zuge der Überfischung in den 1990er-Jahren dennoch einige Seehechtbestände zusammengebrochen seien und sich bis heute nicht erholt hätten. Als Beispiele nennen sie die Bestände rund um Prinz-Eduard-Inseln, auf dem Kerguelenplateau sowie an der Banzarebank im indischen Sektor des Südpolarmeers (58° 50' Süd und 77° Ost).

Neue Spannungen in der Arktis?

Die wirtschaftliche Expansion in der Arktis eröffnet zu neuen Chancen auf neue internationale Kooperationen, sie bietet nach Ansicht einiger Beobachter aber auch Anlass für Sicherheitsbedenken – etwa weil einige Arktisstaaten ihre Militärpräsenz in der Arktis ausbauen, nachdem die Skepsis der NATO-Mitgliedsstaaten gegenüber Russland nach der Annektierung der Krim gestiegen ist, oder aber weil der neu entfachte Handelsstreit zwischen den USA und China Verhandlungen zu arktischen Themen erschwert. Die weltpolitische Lage, so die Beobachter, nehme unmittelbar Einfluss auf die Kooperation der Arktisstaaten beziehungsweise beeinträchtigt diese.

Andere Wissenschaftler betonen, dass es für einen solchen sogenannten Spill-over-Effekt keine empirischen Belege gebe. Heutzutage seien immer noch deutlich weniger Soldaten in der Arktis stationiert als zu Zeiten des

Kalten Krieges. Außerdem erfolge die Entsendung militärischer Verbände in den hohen Norden in den meisten Fällen nicht, weil sich die Küstenstaaten unmittelbar in ihrer nationalen Sicherheit bedroht fühlten. Es gehe den Staaten vielmehr darum, jene Grenze, die einst ausreichend durch das Eis geschützt war, nun flächendeckend zu überwachen, gerade weil die Zahl der Schiffe und Akteure in der Arktis zugenommen habe. Außerdem erfüllten die Soldaten Aufgaben in der Luft- und Seenotrettung. Für Russland sei die Stationierung von Militär zudem ein Mittel der Infrastrukturförderung in den entlegenen arktischen Gebieten.

Die russische Regierung hat in den zurückliegenden Jahren viel Geld in den Aus- und Neubau seiner Militärbasen entlang der russischen Arktisküste investiert. So entstand zum Beispiel auf Franz-Josef-Land ein neuer Armeestützpunkt. Nach Aussage der russischen Regierung wird das Militär in der Arktis gebraucht, um den Schiffsverkehr auf dem Nördlichen Seeweg und andere wirtschaftliche Aktivitäten zu schützen. Die US-Regierung unter Präsident Donald Trump wiederum sieht US-amerikanische Sicherheitsinteressen bedroht sowohl durch die Präsenz des russischen Militärs in der Arktis als auch durch die enge wirtschaftliche Zusammenarbeit Russlands und Chinas. Die US-Streitkräfte haben angekündigt, künftig öfter mit ihren Militärschiffen in arktischen Gewässern patrouillieren zu wollen. Außerdem planen die USA für das Jahr 2020 die Modernisierung eines Militärflugplatzes

auf Island, von dem das US-Militär im Jahr 2006 abgezogen war und den es jetzt nur noch gelegentlich für Aufklärungsflüge nutzt.

Trotz dieser Entwicklung sehen deutsche Beobachter die politische Zusammenarbeit in der Arktis nicht gefährdet. Die arktische Kooperation sei gut institutionalisiert, basiere auf von allen Parteien anerkannten internationalen Regeln und habe sich bisher als äußerst funktional und effektiv erwiesen. Mit Forderungen nach neuen Institutionen für arktische Sicherheitspolitik, wie sie unter anderem am Runden Tisch der Münchner Sicherheitskonferenz geäußert wurden, räume man dem Thema zu viel Aufmerksamkeit ein. Am Ende würden auf diese Weise bisherige Kooperationsformate vom Thema Sicherheit überschattet und womöglich Unsicherheitsfaktoren befördert, die man doch eigentlich verhindern wollte. Angesichts der dramatischen Veränderungen in der Arktis seien internationale Kooperation und Zusammenarbeit im Nordpolargebiet heutzutage wichtiger als jemals zuvor, so die Beobachter.

Ein Beispiel, wie grenz- und bündnisüberschreitende Zusammenarbeit in der Arktis aussehen kann, präsentierten Russland und Norwegen im Mai 2019. Küstenschutz-, Such- und Rettungseinheiten beider Nachbarstaaten trainierten gemeinsam einen Tag lang den Ernstfall in der Barentssee. Sie suchten gemeinsam nach vermissten Personen auf See und übten Maßnahmen zur Bekämpfung einer Ölverschmutzung.



5.32 > Die Arktisanrainerstaaten führen regelmäßig gemeinsame Übungen zur Luft- und Seenotrettung durch, sodass im Ernstfall die grenzübergreifende Zusammenarbeit funktioniert und Menschenleben und Umwelt bestmöglich geschützt werden können.

Conclusio

Wachsendes Interesse an den Polarregionen

Die Wahrnehmung der Polargebiete hat sich in den zurückliegenden Jahrzehnten grundlegend geändert. Interessierten sich früher vornehmlich Robben- und Walfänger für die damals noch schwer zugänglichen Regionen, wächst im Zuge des Klimawandels das internationale Interesse, die Arktis und Antarktis zu erkunden und auf vielfältige Weise kommerziell zu nutzen. Infolgedessen steigen nicht nur die Mitgliederzahlen in den politischen Gremien und der erforderliche Regulierungs- und Abstimmungsbedarf; alte Polarnationen agieren zuweilen auch protektionistischer, was die Kompromissfindung sowohl in der Arktis als auch in der Antarktis erschwert.

In der von den Konsultativstaaten gemeinschaftlich verwalteten Antarktis steht im Mittelpunkt allen Handelns der Gedanke, mit der Antarktis die einzige Region der Welt zu erhalten und zu schützen, welche der friedlichen Kooperation und der Forschung gewidmet ist. Der Antarktisvertrag und die dazugehörigen Umweltschutzabkommen beschränken die Nutzung auf die Forschung, eine nachhaltige und mittlerweile streng kontrollierte Fischerei sowie auf den Tourismus.

In der Arktis dagegen liegt die Verwaltung der nördlichen Territorien in den Händen der einzelnen Anrainerstaaten. Deren legitimes Interesse ist es, diese bislang nur spärlich besiedelten Gebiete wirtschaftlich zu entwickeln. Die meisten Nationen, allen voran Russland, konzentrieren sich dabei in erster Linie auf den Abbau von Rohstoffen und auf die Schifffahrt, denn die Arktis gilt als rohstoffreiche Region. Einer Studie zufolge lagern allein 22 Prozent der bislang unentdeckten Erdöl- und Erdgasvorkommen der Welt nördlich des arktischen Polarkreises. Zudem gibt es große Mengen von Kohle, Eisenerz, Seltenen Erden und anderen mineralischen Roh-

stoffen. Diese in Zukunft abzubauen, wird lukrativer, weil die Nachfrage steigt und der Rückzug des Eises Menschen den Zugang in die nördlichen Regionen erleichtert.

Der Rohstoffreichtum führt aber auch zu Gebietsstreitigkeiten zwischen den arktischen Küstenstaaten, die bis heute nur teilweise geklärt sind. Gleichzeitig weckt er das Interesse arktisferner Staaten wie zum Beispiel China. Diese versuchen, sich ein Zugriffs- und Mitspracherecht zu sichern, indem sie bilaterale Kooperationen mit Arktisanrainern vereinbaren, in Anlagen zur Rohstoffförderung investieren und ihr Engagement im Arktischen Rat erheblich verstärken.

Im Zuge der Rohstoffausbeutung steigt der Schiffsverkehr in arktischen Küstengewässern. Zuwächse verzeichnet auch die Kreuzfahrtbranche. Um die damit einhergehende Havariegefahr zu minimieren, gelten für alle Schiffe in den Polarregionen die Auflagen des Polar Code. Das Regelwerk setzt auf Prävention. Schiffstransporte in den Polarregionen sind nämlich wegen der niedrigen Temperaturen und der sich schnell ändernden Eis- und Wetterverhältnisse mit einem hohen Risiko verbunden, und sollte ein Schiff in Seenot geraten, kann es vor allem in der Antarktis unter Umständen sehr lange dauern, bis Hilfe vor Ort ist.

Vorsicht und Nachhaltigkeit müssen aber auch in allen anderen Bereichen menschlichen Handelns in den Polarregionen der Maßstab sein. Die Arktis und in Teilen auch die Antarktis erleben im Zuge des Klimawandels grundlegende Veränderungen, welche die dort beheimateten Lebensgemeinschaften sowie die natürlichen Prozesse auf eine harte Probe stellen. Angesichts dessen sollte die Menschheit alles daran setzen, den eigenen Fußabdruck in diesen äußerst empfindlichen Gebieten zu minimieren und ihn nicht durch unbedachtes, gewinnorientiertes Handeln zu vergrößern.

6

Arktis und Antarktis – extrem, klimarelevant, gefährdet

Während dieser sechste „World Ocean Review“ noch geschrieben wird, verzeichnen Meteorologen in weiten Teilen der Arktis neue Hitzerekorde. In Alaska brennen im Juli 2019 bei extremer Trockenheit und Sommertemperaturen von über 30 Grad Celsius rund 6000 Quadratkilometer Tundra und Taiga. Weitaus mehr noch sind es in Sibirien, wo die russischen Behörden wegen großer Flächenbrände für fünf Regionen den Ausnahmezustand erklärt haben. Die Wassermassen des Beringmeers und der Tschuktschensee sind bis zu vier Grad Celsius wärmer im Vergleich zum Mittel der Jahre 1981 bis 2010. Die sommerliche Eisdecke des Arktischen Ozeans schrumpft höchstwahrscheinlich auf ein neues Rekordminimum, und für Grönlands Eisschild notierten Wissenschaftler im Juni 2019 den frühesten Start der Sommerschmelze seit Beginn der Aufzeichnungen. Im Folgemonat Juli verliert der Eispanzer im Zuge einer lang anhaltenden Wärmeperiode 197 Milliarden Tonnen Eis, davon 160 Milliarden Tonnen allein durch Oberflächenschmelze. Selbst am höchsten Punkt des Eisschildes, 3200 Meter über dem Meeresspiegel, beginnt der Schnee auf dem Eis zu schmelzen. Auf dem Südpolarmeer bildet sich zur gleichen Zeit auffallend wenig Wintermeereis, auch wenn die Lufttemperaturen über der Ostantarktis etwas niedriger sind als üblich. Im westlichen Teil des vereisten Kontinents dagegen ist es, wie schon oft zuvor in den letzten Jahren, zu warm. Hinsichtlich dieser Dichte an Hiobsbotschaften aus der Arktis und Antarktis scheint es heute kaum noch gerechtfertigt, vom „ewigen Eis“ in den Polargebieten zu sprechen.

Heutzutage gestatten uns Satelliten und ein wachsendes Netzwerk von meteorologischen Messstationen und -instrumenten jederzeit Einblick in die Gesamtwetterlage der Arktis und Antarktis. Beide Regionen bilden die Kälte-

pole der Erde, weil sie aufgrund ihrer geografischen Lage, der Neigung der Erdachse sowie der Wanderung der Erde um die Sonne nicht kontinuierlich von eben jener Licht- und Wärmequelle beschienen werden – und wenn, dann mit geringerer Einstrahlung als Regionen in den mittleren und tropischen Breiten. Infolgedessen kühlen die Polargebiete seit Jahrtausenden während der Polarnacht so stark aus, dass sich in jedem Jahr aufs Neue große Meereisflächen bilden und dort, wo die Luft ausreichend Feuchtigkeit enthält, Schnee fällt. Die reinweißen Eis- und Schneeflächen wiederum reflektieren nach der Rückkehr der Sonne im Frühjahr bis zu 90 Prozent der einfallenden Strahlung. Befinden sich dagegen Staub, Schmelzwasser oder andere dunkle Flächen auf dem Eis, oder ist das Meer sogar eisfrei, wird nur ein viel kleinerer Anteil der Sonnenenergie zurückgestrahlt. Auf diese Weise bremsen die Eis- und Schneeflächen nicht nur den Temperaturanstieg vor Ort und ermöglichen die Bildung von Gletschern und Eisschilden. Durch ihren sogenannten Albedo-Effekt tragen Eis und Schnee auch dazu bei, dass sich die Erde insgesamt viel langsamer erwärmt, als dies ohne die Schnee- und Eismassen der Polarregionen der Fall wäre. Allein schon aus diesem Grund nehmen das Nord- und Südpolargebiet eine Schlüsselrolle im Klimasystem der Erde ein. Verstärkt wird ihre Bedeutung durch die Tatsache, dass die Temperaturunterschiede zwischen den kalten Polarregionen und den warmen Tropen die weltumspannenden Wind- und Meeresströmungen antreiben und somit wesentlich dazu beitragen, dass die im Meer und in der Atmosphäre gespeicherte Wärme weiträumig über den Globus verteilt wird.

Das extreme Klima in beiden Polarregionen darf jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass sich die Arktis und

Antarktis in vielerlei Hinsicht grundlegend voneinander unterscheiden. Dies gilt sowohl für ihre Entstehungs- und Besiedlungsgeschichte als auch für ihre Tier- und Pflanzenwelt, für die Auswirkungen des Klimawandels sowie für die Nutzung durch den Menschen. Um diese Unterschiede zu verstehen, muss man sich daher die Lage und Geografie beider Polargebiete ins Gedächtnis rufen. Die Antarktis stellt einen nahezu gänzlich von Eismassen bedeckten Kontinent dar, der vollständig von Wasser umschlossen ist. Um ihn herum haben sich gigantische atmosphärische Windbänder und Meeresströmungen gebildet und verstärken die Isolation des südlichen Kontinents. Im Nordpolargebiet dagegen rahmen kontinentale Landmassen einen kleinen Ozean in ihrer Mitte ein. Sie gehen zum Teil ineinander über oder sind durch mittlerweile überflutete Landbrücken miteinander verbunden, was es Tieren, Pflanzen und auch dem Menschen in Zeiten mit niedrigem globalem Meeresspiegel erleichterte, die nördlichen Territorien zu erobern. Das prominenteste Beispiel einer Landverbindung war die Beringbrücke, ein breiter Streifen Land, der zum Höhepunkt der letzten Eiszeit Ostsibirien und Alaska miteinander verband und es den Urzeitjägern Sibiriens erlaubte, nach Nordamerika einzuwandern.

Die zentrale Pollage des Arktischen Ozeans bedingt, dass er von Meereis bedeckt ist, dessen Ausdehnung im Winter zunimmt und im Sommer schrumpft. Da es jedoch bis heute im Sommer nicht vollständig schmilzt, wird die Eisdecke weiterhin als dauerhaft bezeichnet. Das Meereis des Südpolarmeers dagegen schmilzt im Sommer so großflächig, dass Experten in diesem Fall von einer saisonalen Eisbedeckung sprechen.

Beeindruckend sind die Landeismassen des Südpolargebiets. Sie bedecken 98 Prozent des antarktischen Kontinents und speichern so viel Süßwasser, dass sie im Fall eines kompletten Abschmelzens den globalen Meeresspiegel um 58,3 Meter ansteigen lassen würden. Im hohen Norden gibt es mit dem Grönländischen Eisschild nur eine vergleichbare Landeismasse. Sie umfasst genügend Eis, um die Wasserpegel an den Küsten der Welt um etwa 7,3 Meter anzuheben.

Die zeitgleiche Existenz großer Eismassen in beiden Polargebieten stellt mit Blick auf die Erdgeschichte schon fast eine Ausnahme dar. Seit Entstehung der Erde haben sich ihre wandernden Kontinente nämlich nur wenige Male

derart angeordnet, dass sowohl im Norden als auch im Süden polare Klimabedingungen entstanden und beide Gebiete vereisen konnten. Während Wissenschaftler die Klimageschichte der Antarktis mittlerweile ziemlich gut rekonstruieren können, fehlen ihnen im Hinblick auf die Vereisungsgeschichte der Arktis noch viele Antworten. Klimadaten aus der Vergangenheit aber werden dringend gebraucht, um mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Polarregionen genauer vorherzusagen.

Steigende Luft- und Wassertemperaturen im Rahmen des Klimawandels führen insbesondere in den Polarregionen zu grundlegenden Veränderungen, wobei sich beim Vergleich beider Gebiete ein zweigeteiltes Bild ergibt: In der Arktis hat der klimabedingte Wandel deutlich früher eingesetzt als in der Antarktis, und er ist bis heute im hohen Norden deutlich spürbarer als im tiefen Süden. Während sich in der Antarktis der Temperaturanstieg auf die Region der Antarktischen Halbinsel beschränkt, ist die Arktis in den zurückliegenden Jahrzehnten zum Hotspot des Klimawandels geworden. Sie erwärmt sich mehr als doppelt so schnell (2,7 Grad Celsius im Zeitraum von 1971 bis 2017) wie die restliche Welt, wobei die Wintertemperaturen schneller steigen als die Sommertemperaturen. Die Jahre 2014, 2015, 2016, 2017 und 2018 waren im Mittel zudem allesamt wärmer als die 113 Jahre zuvor.

Auslöser dieser dramatischen Erwärmung sind komplexe Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Land, Meer und schwindendem Eis – ein Zusammenspiel, welches Wissenschaftler als arktische Verstärkung bezeichnen. Welche Effekte in welchem Ausmaß zur Verstärkung beitragen, wird in der Wissenschaft kontrovers debattiert. Manche Forscher argumentieren, die drastische Erwärmung sei in erster Linie auf die schrumpfenden Schnee- und Meereisdecken in der Arktis zurückzuführen. Je weniger helle Flächen vorhanden seien, desto geringer sei die Rückstrahlkraft der Arktis und desto mehr Sonnenenergie würde im Nordpolargebiet verbleiben und Veränderungen in den Meeren und in der Atmosphäre anstoßen. Neuen Erkenntnissen zufolge wird ein Totalverlust des restlichen arktischen Meereises die Erderwärmung so schnell vorantreiben, als würde man eine Billion Tonnen zusätzliches Kohlendioxid in die Atmosphäre entlassen – eine Menge, wie sie die Menschheit derzeit in etwa 25 Jahren emittiert. Das heißt, der Klimawandel würde sich enorm beschleunigen.

Gesamt-Conclusio

Andere Forscher verweisen darauf, dass die wärmer werdende Luft über der Arktis mehr Wasserdampf aufnehme und sich demzufolge auch häufiger Wolken bildeten, die wiederum die Abstrahlung von Wärmeenergie in das Weltall behinderten. Je nach Jahreszeit und Art der Wolken könne sich dieser Effekt allerdings auch umkehren und die Wolkendecke kühlend wirken. Jedes Argument für sich genommen stimmt und kann durch Messungen belegt werden. Die eigentliche Erklärung für die Verstärkung liegt wohl im Zusammenspiel aller Faktoren, deren Ausmaß und Wirkung nicht nur mit den Jahreszeiten variieren, sondern auch von Region zu Region unterschiedlich ausfallen.

Angesichts des Ausmaßes der Klimaveränderungen in der Arktis kommen Wissenschaftler mittlerweile zu dem Schluss, dass die Nordpolarregion ein neues Stadium erreicht habe. In vielen Regionen fällt deutlich weniger Schnee, die Meereisdecke des Arktischen Ozeans schrumpft kontinuierlich. Das Packeis ist deutlich jünger, dünner, zerbrechlicher und damit auch beweglicher als zu Beginn der Satellitenmessungen im Jahr 1979. Zum Ende des Sommers sind mittlerweile so große Meeresgebiete eisfrei, dass die Sonne den Arktischen Ozean weiträumig erwärmen kann. Diese Wärme wiederum verursacht grundlegende Veränderungen im Meer selbst sowie in der Atmosphäre darüber.

So wissen Forscher mittlerweile, dass der Rückgang des Meereises in der Barents- und Karasee die Stärke und den Verlauf des Jetstreams über der nördlichen Hemisphäre negativ beeinflusst und somit auch indirekt Einfluss auf das Wetter in den mittleren Breiten nimmt. Weil die Temperaturgegensätze zwischen Tropen und Polargebiet abnehmen, schwächt sich das für die mittleren Breiten wetterbestimmende Starkwindband ab und verändert seinen Pfad. Im Sommer steigt dadurch unter anderem die Wahrscheinlichkeit von Wetterextremen wie Hitzewellen und Dürren in Europa. Im Winter dagegen führt ein schwächerer Jetstream zu außergewöhnlichen Kälteeinbrüchen in Mitteleuropa und dem mittleren Westen Amerikas, während über Spitzbergen und dem Beringmeer warme Luftmassen bis weit in die Arktis vordringen.

Im Zuge des Meereisrückgangs verändert sich auch die Schichtung der Wassermassen in arktischen Randmeeren wie der Barentssee und gleicht sich der des Nordatlantiks an. Wissenschaftler sprechen in diesem Zusammenhang von der Atlantifizierung des Arktischen Ozeans. Durch die

Schmelze der Meer- und Landeismassen wird zudem mehr Süßwasser in das Nordpolarmeer eingetragen. Welche Folgen diese Entwicklung nach sich ziehen wird, ist noch unklar. Forschende aber vermuten, dass sie die klimarelevante Umwälzung der Wassermassen im Nordatlantik bremsen – und infolgedessen der für Europa so wichtige Golfstrom an Kraft verlieren könnte.

Traurige Realität ist bereits, dass im Zuge des Meereisrückgangs in der Arktis die Erosion der arktischen Permafrostküsten zunimmt. Wo der Meereisdeckel fehlt, hat nicht nur der Wind Platz, Wellen aufzutürmen und diese gegen die fragilen Küsten rollen zu lassen. Das Wasser erwärmt sich auch schneller und taut die Küsten mit jedem Wellenschlag ein bisschen mehr an. Über Land lassen die steigenden Temperaturen den Permafrost bis in große Tiefen tauen und reduzieren die Tragkraft und Stabilität des einst gefrorenen Untergrunds. Außerdem beginnen Mikroorganismen, das ehemals im Permafrost eingeschlossene organische Material zu zersetzen – ein Prozess, bei dem große Mengen Kohlendioxid und Methan entstehen, auf natürliche Weise in die Atmosphäre entweichen und den Klimawandel weiter vorantreiben.

Die Wärme lässt auch die Landeismassen der Arktis schmelzen; im Fall der ins Meer mündenden Gletscher Alaskas sogar bis zu hundertmal schneller als bislang angenommen, wie Forscher im Juli 2019 vermeldeten. Angeführt von Grönlands Eisschild tragen die schrumpfenden Gletscher des Nordpolargebiets derzeit mehr zum globalen Meeresspiegelanstieg bei als das Abschmelzen der Hochgebirgsgletscher oder der Eismassen der Antarktis. Auf Island ist im Sommer 2019 der erste von 400 Gletschern der Insel aufgrund der Wärme so weit zusammengeschmolzen, dass er seinen Status als Gletscher verloren hat. An den mickrigen Überresten des Gletschers Okjökull haben Wissenschaftler eine Gedenkplakette aufgestellt. Der Text ist auf Englisch und Isländisch verfasst und bedeutet ins Deutsche übersetzt: In den nächsten 200 Jahren werden alle restlichen Gletscher folgen.

Der Klimawandel beeinflusst aber auch die polare Flora. Anstelle kleinwüchsiger, kälteangepasster Flechten, Moose und Pflanzen erobern nun Sträucher und Bäume die Tundra und begrünen sie in einigen Regionen (Arctic Greening). In anderen Gebieten wiederum führen Wärme und zunehmende Trockenheit dazu, dass die Pflanzenwelt verküm-

mert (Arctic Browning), es deutlich häufiger brennt und bei den Feuern weitere Mengen Treibhausgase freigesetzt werden. Allein bei den Wald- und Tundrenbränden in Alaska im Juli 2019 wurde eine so große Menge Kohlendioxid in die Atmosphäre entlassen, wie sie ein Land wie Schweden bislang innerhalb eines Jahres emittiert. Die Feuer verstärken demzufolge den globalen Klimawandel.

Extrem besorgniserregend sind auch die Zukunftsprognosen für die marinen Lebensgemeinschaften der Polarregionen. Mit dem Meereis schmilzt die Heimat der Eisalgen. Sie sind die wichtigsten Primärproduzenten des Arktischen Ozeans. Wo sie verschwinden, müssen sich Fische, Zooplankton und Bodenbewohner neue Nahrungsquellen suchen. Wie erdbebengleich diese Entwicklung die Nahrungsnetze des Meeres über die Grenzen der Arktis hinaus erschüttert, zeigt sich derzeit im nördlichen Pazifik. Nach massiven Meereisrückgängen gingen dort zunächst die Fischbestände zurück, anschließend starben Seevögel und Grauwale in großer Zahl. Auch die Leistungsfähigkeit der kälteadaptierten arktischen Meeresbewohner wird durch die steigenden Wassertemperaturen und die zunehmende Ozeanversauerung beeinträchtigt. Letztere beeinträchtigt vor allem jene Lebewesen, die Skelette, Gehäuse oder Schalen aus Kalk bilden.

Wer kann, passt sich an die neuen Lebensbedingungen an. Kälteadaptierten polaren Arten wie dem Polardorsch oder dem Antarktischen Seehecht fehlt hierzu jedoch der notwendige Spielraum. Ihr Temperatur-Wohlfühlbereich ist zu klein, als dass sie sich innerhalb kurzer Zeit an die rapide Meerereswärmung anpassen können. Besonders empfindlich reagiert zudem der Nachwuchs einiger Arten auf zu warme Temperaturen. Diesen Bewohnern der Polarmeere bleibt keine andere Wahl, als in die letzten verbleibenden kalten Regionen abzuwandern. Ein Blick auf die langfristigen Temperaturvorhersagen für den Arktischen Ozean aber verdeutlicht, dass auch diese Option nicht mehr lange bestehen wird. In 30 Jahren oder vielleicht schon viel früher wird das Nordpolarmeer im Sommer vermutlich eisfrei sein und bis dahin längst von Arten bewohnt, die auf ihrer Flucht vor der Wärme aus den mittleren Breiten in das Nordpolargebiet eingewandert sind.

Leidtragende des Meereisrückgangs sind auch Eisbären, Walrosse, Pinguine und andere vom Meereis abhängende Seevögel und Säuger. Weil das fehlende Eis ihnen den Zutritt

zu ihren Jagdrevieren verwehrt, belagern hungrige Eisbären mittlerweile regelmäßig die Müllhalden arktischer Gemeinden und Siedlungen. Biologen haben die Sterblichkeit ausgewachsener Bären für die westliche Hudsonbucht in Modellen berechnet. Demnach sterben drei bis sechs Prozent aller ausgewachsenen Männchen, wenn die sommerliche Fastenzeit 120 Tage andauert. Verlängert sich diese Hungerperiode um weitere 60 auf insgesamt 180 Tage, sind 28 bis 48 Prozent der Bären vom Hungertod bedroht. Angesichts des anhaltenden Meereisrückgangs gehen die Forscher deshalb langfristig von einem Aussterben der imposanten weißen Riesen aus.

Die Rentiere auf Spitzbergen haben sich angewöhnt, an den Strand gespültes Seegras zu fressen, wenn es im Winter auf die Schneedecke regnet und sich eine dicke Eisschicht bildet, welche verhindert, dass sie die von ihnen bevorzugten Flechten freischarren können. Bislang schien diese Futteralternative auszureichen. Als Wissenschaftler des Norwegischen Polarinstituts im Frühjahr 2019 jedoch ihre jährliche Bestandszählung auf Spitzbergen vornahmen, stellten sie fest, dass im regenreichen Winter 2018/2019 rund 200 Rentiere verhungert waren. Eine so hohe Sterblichkeit im Winter hatte es bis dato nur einmal gegeben.

Während sich die Arktis im Zuge des Klimawandels flächendeckend und dazu noch in einem rapiden Tempo verändert, schreitet der Wandel in der Antarktis bislang langsamer voran. Sein Ausmaß unterscheidet sich dabei von Region zu Region deutlich. Hinzu kommt, dass die Entstehung des Ozonlochs über der Antarktis zu Klimaveränderungen geführt hat, deren Auswirkungen das Südpolargebiet bis heute nachhaltig prägen. Wissenschaftlern fällt es deshalb schwer, neue Entwicklungen eindeutig und einzig und allein auf den globalen Anstieg der Treibhausgaskonzentration zurückzuführen.

Fakt ist jedoch, dass auch die Antarktis in großen Teilen ihr Gesicht verändert. Brennpunkte sind bislang die Antarktische Halbinsel, die Westantarktis sowie die Region des Totengletschers in der Ostantarktis. Erste Anzeichen eines Wandels gibt es aber auch aus vermeintlich stabilen Regionen wie dem Weddellmeer. Die stärkste Erwärmung wurde bislang an der Antarktischen Halbinsel dokumentiert. Sie führte in den zurückliegenden Jahrzehnten zu einem Rückgang der Meereisbedeckung in der Bellingshausensee, zum Zerfall mehrerer Schelfeise der Ost- und Westküste der

Gesamt-Conclusio

Halbinsel – darunter auch des 3250 Quadratkilometer großen Hauptteils des Larsen-B-Schelfeises –, zum rapiden Rückzug vieler kleinerer Gletscher sowie zu starken Veränderungen des marinen Nahrungsnetzes. In den meisten anderen Regionen der Antarktis aber, vor allem im Zentrum des Kontinents, ist die Lufttemperatur nur wenig oder gar nicht gestiegen, was Forscher unter anderem auf die kühlende Wirkung des Ozonlochs zurückführen. Wo sich die Ozonschicht ausdünn, fehlt Ozon als Treibhausgas. Infolgedessen kühlen sowohl die untere Stratosphäre als auch die Troposphäre schneller aus, die Lufttemperatur sinkt.

Die Wärme kommt stattdessen aus dem Meer. In der Westantarktis klettern warme Wassermassen aus dem Zirkumpolarstrom den Kontinentalhang hinauf in das Schelfmeer und wandern durch Gräben bis weit unter die schwimmenden Schelfeise und Gletscherzungen. Dort schmelzen sie die Eismassen großflächig von unten. Infolgedessen steigt nicht nur die Zahl der Eisbergabbrüche, die Eisströme verlieren auch an vielen Stellen ihre Bodenhaftung – etwa dort, wo sie auf Inseln oder Unterseebergen auflagen, welche bis dato wie Bremskeile ein Nachrutschen der Eismassen verhindert hatten. Ohne diese Stopper aber beginnen die Eismassen schneller zu fließen. Das bedeutet: Die Schelfeise und Gletscherzungen ziehen sich nicht nur im Rekordtempo zurück (Eisbergabbrüche), sie transportieren gleichzeitig auch mehr Eis aus dem Landesinnern in das Meer (höheres Fließtempo), wodurch der Meeresspiegel steigt. In der Westantarktis wird dieser Teufelskreis vermutlich erst enden, wenn der Westantarktische Eisschild vollständig zerfallen ist. Dessen Eismassen liegen nämlich großflächig auf dem Meeresboden auf und können sich deshalb den warmen Wassermassen keinesfalls entziehen.

Nach demselben Muster beschleunigt sich auch die Fließgeschwindigkeit des großen Tottengletschers in der Ostantarktis. Addiert man seine Eiseinbußen zu jenen in der Westantarktis und an der Antarktischen Halbinsel, wird klar, dass sich die Gesamteisverluste der Antarktis seit dem Jahr 2012 verdreifacht haben. Gestiegen ist auch ihr Beitrag zum globalen Meeresspiegelanstieg. Dieser fällt mit 3,3 Millimetern pro Jahr inzwischen doppelt so hoch aus wie noch im Jahr 1990, wobei nahezu zwei Drittel des Anstiegs auf den Eintrag von Schmelzwasser zurückzuführen sind. Für das restliche Drittel ist die wärmebedingte Ausdehnung des Meerwassers verantwortlich.

Während die Antarktis nicht besiedelt ist und deshalb nur einige Hundert Forschende Zeuge des Gletscherrückzugs werden, sind arktisweit etwa vier Millionen Menschen unmittelbar vom Klimawandel betroffen. Diese gegensätzlichen Bewohnerzahlen lassen sich ebenfalls durch die Geografie der Polargebiete erklären. Die meisten Gebiete der Arktis konnte sich der Mensch zu Fuß erschließen. Aus Nordafrika kommend besiedelten unsere Vorfahren vor etwa 45 000 Jahren Sibirien und wanderten später von dort über die Beringbrücke nach Nordamerika ein. In Grönland und im hohen Norden Europas konnten Menschen allerdings erst heimisch werden, nachdem die großen Eisschilde der jüngsten Eiszeit geschmolzen waren und den Weg in die Arktis freigegeben hatten.

Die Entdeckung der Arktis durch Europäer begann Ende des 15. Jahrhunderts, als Handelsleute per Schiff nach einem nördlichen Seeweg Richtung Indien und China suchten. Eisige Kälte und dichtes arktisches Packeis stoppten jedoch nicht nur den Italiener Giovanni Caboto, der auf seiner Reise gen Westen immerhin Labrador entdeckte. Sie bereiteten fast sechs Jahrzehnte später auch der ersten Arktis-Schiffs-Expedition in die heutige Nordostpassage ein Ende. Es sollte noch weitere 175 Jahre dauern, bis Vitus Bering als erster Europäer und Gesandter des russischen Zaren mit einem Schiff von Kamtschatka aus die später nach ihm benannte Meerenge zwischen Asien und Nordamerika durchfuhr. Die erste Durchfahrt der Nordostpassage gelang 1878/1879 dem Schweden Adolf Erik Nordenskiöld an Bord des Dampfschiffers „Vega“. Die Nordwestpassage dagegen wurde erst im Jahr 1906 vom Norweger Roald Amundsen erstmals vollständig durchfahren. Für die waghalsige Schiffsreise benötigte Amundsen jedoch drei Jahre.

Während zum Ende des 19. Jahrhunderts Forscher wie Fridtjof Nansen bereits den Arktischen Ozean vermaßen, blieb das Südpolargebiet lange Zeit noch ein weißer Fleck auf der Landkarte. Erst aufgrund von Reiseberichten des baltendeutschen Kapitäns Fabian Gottlieb von Bellingshausen, der die Antarktis von 1819 bis 1821 umschiffte und von großen Wal- und Robbenbeständen berichtet hatte, drangen Wal- und Robbenfänger auf ihrer Suche nach neuen Fanggründen immer weiter Richtung Süden vor und entdeckten große Teile der Antarktischen Halbinsel sowie das Weddellmeer.

Auf die Jäger folgten Entdecker und Wissenschaftler aus Großbritannien und Deutschland. Sie teilten die Antarktis

in Quadranten auf und erforschten sie im Zeitraum von 1901 bis 1905 auf mehreren Expeditionen. Die Ergebnisse der ersten deutschen Antarktisexpedition unter Leitung von Erich von Drygalski aber fanden in der Öffentlichkeit wenig Anerkennung. Diese Fahrt fiel bereits in die Ära des beginnenden kolonialen Imperialismus, in welcher die Polarforschung zum sportlichen Wettkampf wurde, wo es weniger um wissenschaftliche Erkenntnisse als vielmehr darum ging, als erste Nation in unbekanntes Terrain vorzustößen oder den Pol zu erreichen. Dafür gingen alle Beteiligten lebensgefährliche Risiken ein. Zu den bekanntesten Todesopfern gehören der britische Kapitän Robert Falcon Scott und seine Begleiter. Sie verloren 1911 das Wettrennen zum Südpol gegen den Norweger Roald Amundsen und starben auf dem Rückweg auf dem Antarktischen Inlandeis.

Nach dem Ersten Weltkrieg, mit zunehmender Professionalisierung der Expeditionen und besserer Technik, erkannte man auch, welche entscheidende Rolle die Arktis und Antarktis für das Klima der Erde spielen. Das Ansehen der Polarforschung stieg dadurch deutlich. Internationale wissenschaftliche Zusammenarbeit bereitete dann auch den Boden für den Antarktisvertrag. Er trat 1961 in Kraft, schreibt bis heute den Schutz sowie eine friedliche, rein wissenschaftliche Nutzung des südlichen Kontinents vor und legte die Entscheidungsgewalt in allen Belangen der Antarktis in die Hände seiner aktiven Mitgliedsstaaten (Konsultativstaaten). Das Südpolargebiet wird demzufolge vom Club der Antarktisnationen verwaltet.

Forschung ist aber längst nicht das einzige Betätigungsfeld des Menschen im Südpolargebiet. Während der kommerzielle Walfang mittlerweile verboten ist, darf in einigen Regionen des Südpolarmeers immer noch gefischt werden. Die Fangquoten sind limitiert und ihre Einhaltung wird streng durch die Kommission zur Erhaltung der lebenden Meeresschätze der Antarktis (CCAMLR) überwacht. Dennoch kritisieren Umweltschützer die Fischzüge als massiven Eingriff in die empfindlichen polaren Ökosysteme. Außerdem besuchen pro Jahr Zehntausende Kreuzfahrtpassagiere den südlichen Kontinent, Zahl steigend. Der Schiffsverkehr entlang der touristischen Highlights an der Antarktischen Halbinsel hat mittlerweile derart zugenommen, dass Experten von weitreichenden Beeinträchtigungen der heimischen Tier- und Pflanzenwelt ausgehen. Als problematisch erweist sich zudem, dass im Fall eines Schiffsunfalls

Such- und Rettungseinheiten aus weit entlegenen Gegenden herbeieilen müssen und die nur schwer vorhersagbaren Eisbedingungen Rettungseinsätze enorm erschweren können.

Entlang der arktischen Küsten nimmt der Schiffsverkehr ebenfalls zu. Ausgelöst wird das erhöhte Schiffsaufkommen – neben einer wachsenden Zahl der Kreuzfahrten – vor allem durch die steigende Ressourcennutzung im Norden Russlands, Skandinaviens und Nordamerikas. Die Arktis ist reich an Bodenschätzen. Einer Studie zufolge lagern allein 22 Prozent der bislang unentdeckten Erdöl- und Erdgasvorkommen der Welt nördlich des arktischen Polarkreises. Zudem gibt es Kohle, Eisenerz, Seltene Erden und andere mineralische Rohstoffe. Diese abzubauen, kann für die Arktisnationen in Zukunft wirtschaftlich interessant werden, weil die globale Nachfrage steigt und der Rückzug des Eises Menschen den Zugang in die nördlichen Regionen erleichtert. Russland allein will in den kommenden Jahren umgerechnet über 160 Milliarden US-Dollar investieren, um die wirtschaftliche Entwicklung seiner arktischen Territorien voranzutreiben und den Nördlichen Seeweg auszubauen. Finanzstarke Partnerländer wie China und Saudi-Arabien unterstützen diese Pläne in der Hoffnung, sich über bilaterale Kooperation oder Projektbeteiligungen Zugriffsrechte auf arktische Ressourcen zu sichern.

Das ökonomische Kalkül der Akteure mag legitim sein, lässt aber echte Klimaweitsicht vermissen. Hinzu kommt, dass die zunehmenden Begehrlichkeiten im Nordpolargebiet zumindest oberflächlich zu neuen politischen Machtkämpfen führen. Die Zone des Friedens, wie die Arktis nach dem Ende des Kalten Krieges für kurze Zeit genannt wurde, hat sich mittlerweile in eine geopolitische Arena verwandelt, in welcher wieder härter um Kompromisse und gemeinschaftliche Interessen gerungen werden muss. Das gilt auch für die Antarktis. Dabei werden gemeinsame Lösungen zum Schutz des Klimas und der Polargebiete dringend gebraucht. Solange der Mensch aber weiterhin fossile Rohstoffe in großem Stil fördert und verbrennt, wird sich die Wärmespirale weiterdrehen und das Eis der Polarregionen weiter schmelzen – mit katastrophalen Folgen für die gesamte Welt. Der Klimawandel ist für die Menschheit längst zur Klimakrise geworden, und es bedarf der Entschlossenheit aller, deren Folgen einzudämmen, sodass die Erde auch für kommende Generationen noch ein lebenswerter Ort sein kann.

Glossar

Erklärung von Ottawa: ist ein Dokument, in welchem die acht arktischen Staaten Kanada, Dänemark, Finnland, Island, Norwegen, Russland, Schweden und die USA die Gründung des Arktischen Rates als zwischenstaatliches Dialogforum beschließen und seine grundsätzlichen Aufgaben und Arbeitsweise festlegen. Unterzeichnet wurde die Erklärung von den Außenministern der beteiligten Staaten am 19. September 1996 in der kanadischen Hauptstadt Ottawa.

geostrophisch: Der Begriff wird vor allem in der Meteorologie und Ozeanografie verwendet, denn dort spricht man über das geostrophische Gleichgewicht – gemeint ist ein Gleichgewichtszustand, der sich in der Atmosphäre oder im Ozean einstellt, wenn nur die Corioliskraft und die horizontale Druckgradientkraft berücksichtigt werden und sich beide Kräfte gegenseitig aufheben. Als Resultat dessen stellt sich ein geostrophischer Wind beziehungsweise eine geostrophische Strömung ein, die senkrecht zur Druckgradientkraft gerichtet ist.

Ilulissat-Deklaration: eine rechtlich nicht bindende Erklärung, welche die fünf arktischen Küstenstaaten Kanada, Dänemark, Norwegen, Russland und USA am 28. Mai 2008 im grönländischen Ilulissat unterzeichnet haben. Darin versprechen die Nationen, innerarktische Konflikte friedlich zu lösen, die arktische Umwelt zu schützen, insbesondere vor Öiverschmutzungen, sich im Rahmen der Internationalen Seeschiffahrts-Organisation (IMO) für strengere Umweltschutzrichtlinien einzusetzen, die Luft- und Seenotrettung entlang ihrer arktischen Küsten auszubauen und in der Forschung enger zusammenzuarbeiten. Gleichzeitig betonen die fünf Staaten in dieser Erklärung, dass es keines neuen UN-Abkommens zur Regelung innerarktischer Gebietsstreitigkeiten bedarf, sondern die fünf arktischen Küstenstaaten alle Konflikte auf Grundlage des Seevölkerrechts lösen werden.

kondensieren: Ein Stoff kondensiert, wenn er vom gasförmigen Aggregatzustand in den flüssigen Aggregatzustand übergeht. Der Kondensationsprozess ist somit die Umkehr der Verdunstung. Der Phasenübergang von Wasserdampf zu flüssigem Wasser gehört zu den grundlegenden physikalischen Prozessen des Wasserkreislaufs der Erde. Ohne ihn bilden sich aus dem in der Luft enthaltenen Wasserdampf weder Nebel noch Wolken oder Regentropfen. Die Wasserdampfkondensation ist allerdings an zwei Bedingungen geknüpft. Zum einen muss die Luft wenigstens leicht mit Wasserdampf übersättigt sein. Zum anderen bedarf es in der Luft schwebender Partikel, welche als sogenannte Kondensationskeime dienen.

Nordatlantikstrom: warme Oberflächenströmung, die den Golfstrom von Neufundland bis nach Europa verlängert und dessen Wärme in den Nordwesten Europas transportiert. Angetrieben werden der Golfstrom und sein Ausläufer, der Nordatlantikstrom, durch Winde und die thermohaline Zirkulation, das heißt durch Unterschiede im Salzgehalt und in der Temperatur des Meerwassers. Auf seinem Weg nach Norden gibt das Wasser des Nordatlantikstroms große Mengen Wärme an die Atmosphäre ab und prägt auf diese Weise das milde Klima im Nordwesten Europas.

plattentektonische Prozesse: bezeichnen Bewegungen der verschiedenen Kontinentalplatten, aus denen die äußere Erdhülle (Lithosphäre) besteht. Diese Platten driften auseinander, stoßen zusammen oder aber schieben sich aneinander vorbei und verursachen dabei Erdbeben und Vulkanismus. Dort, wo zwei Platten auseinanderdriften – etwa am Mittelozeanischen Rücken –, steigen große Mengen Magma aus dem Erdinneren auf und bilden eine neue basaltische Kruste und somit eine neue feste Gesteinshülle. In Regionen, in denen Platten sich aufeinander zubewegen, entstehen lang gestreckte Kollisionszonen, in denen je nach Zusammensetzung und Alter der beiden Platten unterschiedliche Prozesse ablaufen.

Südpolarfront: Der Begriff wird gelegentlich als Synonym für die Antarktische Konvergenz verwendet und bezeichnet die nördliche Grenze des Südozeans. In dieser 30 bis 50 Kilometer breiten Zone trifft kaltes, nordwärts fließendes Oberflächenwasser aus der Antarktis auf südwärts fließendes wärmeres Oberflächenwasser aus den gemäßigten Breiten des Atlantischen, Pazifischen oder Indischen Ozeans. Weil das etwa zwei Grad Celsius kalte Antarktische Wasser eine höhere Dichte besitzt und deshalb schwerer ist als das etwa acht Grad Celsius warme Wasser aus dem Norden, sinkt es in der Konvergenzzone hinab und fließt in einer Tiefe von 800 Metern nordwärts. Die genaue Lage der Antarktischen Konvergenz hängt vom Längengrad, vom Wetter und von der Jahreszeit ab. Ihre Position verschiebt sich unter Umständen um bis zu 150 Kilometer nord- oder südwärts, in der Regel aber liegt die Antarktische Konvergenz auf Höhe von etwa 50 Grad südlicher Breite. Weil die Temperatur des Oberflächenwassers innerhalb der Antarktischen Konvergenz sprunghaft ansteigt, bildet sie eine Verbreitungsgrenze für viele polare Meeresbewohner. Diese kommen nördlich der Südpolarfront so gut wie nicht mehr vor, weil das Wasser dort zu warm ist.

Das Glossar erläutert Begriffe, die für das Verständnis der Texte besonders wichtig sind, aber in den einzelnen Kapiteln aus Platzgründen nicht ausführlich erläutert werden können. Im Text sind Glossar-begriffe gefettet dargestellt.

Abkürzungen

ACGF Arctic Coast Guard Forum; unabhängiges und informelles Dialogforum der Küstenwachen und Grenzschutzeinheiten der acht Arktisstaaten

AECO Association of Arctic Expedition Cruise Operators; Vereinigung der in der Arktis tätigen Schifffahrtsreiseunternehmen

AEPS Arctic Environmental Protection Strategy; Arktische Umweltschutzstrategie

AMAP Arctic Monitoring and Assessment Programme; Programm zur Beobachtung und Bewertung der Arktis

AMOC Atlantic Meridional Overturning Circulation; Atlantische Meridionale Umwälzbewegung

ARCSAR Arctic and North Atlantic Security and Emergency Preparedness Network; Netzwerk für Sicherheit und Notfallrettung in der Arktis und dem Nordatlantik

ARGO Array for Realtime Geostrophic Oceanograph; Echtzeit-Beobachtungssystem für geostrophische Ozeanografie

ASFR Arctic Security Forces Roundtable; Dialogforum der Streitkräfte aller Arktisstaaten außer Russland sowie Vertretern Deutschlands, Frankreichs, der Niederlande und Großbritanniens

ASOC Antarctic and Southern Ocean Coalition; Antarktis- und Polarmeervereinigung, ein globaler Zusammenschluss von Umweltschutzorganisationen mit dem gemeinsamen Ziel, die Antarktis und das Südpolarmeer zu schützen

ATCM Antarctic Treaty Consultative Meeting; Treffen der Konsultativstaaten des Antarktisvertrags

ATS Antarctic Treaty System; Antarktisvertragssystem

AWIPEV Deutsch-französische Arktisforschungsstation, betrieben vom Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) und dem Polarinstitut Paul-Émile Victor (IPEV) in Ny-Ålesund, Spitzbergen

AWZ Ausschließliche Wirtschaftszone

CAFF Conservation of Arctic Flora and Fauna; Arbeitsgruppe des Arktischen Rates zum Erhalt der arktischen Flora und Fauna

CAMLR Convention on the Conservation of Antarctic Marine Living Resources; Übereinkommen über die Erhaltung der lebenden Meeresschätze der Antarktis

CARA Circum-Arctic Resource Appraisal; Studie des US-amerikanischen Geologischen Dienstes zu vermuteten Erdgas- und Erdölvorkommen in der Arktis

CBD Convention on Biological Diversity; Biodiversitätskonvention

CCAMLR Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources; Kommission zur Erhaltung der lebenden Meeresschätze der Antarktis

CCAS Convention for the Conservation of Antarctic Seals; Übereinkommen zur Erhaltung der antarktischen Robben

CLCS Commission on the Limits of the Continental Shelf; UN-Kommission zur Begrenzung des Festlandssockels

CNPC China National Petroleum Corporation; staatlicher chinesischer Mineralölkonzern

COMNAP Council of Managers of National Antarctic Programs; Rat der Leiter der nationalen Antarktisprogramme

CRAMRA Convention on the Regulation of Antarctic Mineral Resource Activities; Übereinkommen zur Regelung der Tätigkeiten im Zusammenhang mit mineralischen Ressourcen der Antarktis

EPPR Emergency Prevention, Preparedness and Response; Arbeitsgruppe des Arktischen Rates zur Notfallprävention, -vorsorge und -einsatz

FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations; Welternährungsorganisation

GRACE Gravity Recovery and Climate Experiment; Schwerefeldmessung und Klimaexperiment

IAATO International Association of Antarctica Tour Operators; Internationaler Verband der Reiseveranstalter mit dem Zielgebiet Antarktis

ICCAT International Commission for the Conservation of Atlantic Tuna; Internationale Kommission für die Erhaltung der Thunfischbestände im Atlantik

ICES International Council for the Exploration of the Sea; Internationaler Rat für Meeresforschung

IMO International Maritime Organization; Internationale Seeschifffahrts-Organisation

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change; Weltklimarat

ISA International Seabed Authority; Internationale Meeresbodenbehörde

LNG Liquefied Natural Gas; verflüssigtes Erdgas

MARPOL International Convention for the Prevention of Marine Pollution from Ships; Internationales Übereinkommen zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch Schiffe

MSC Munich Security Conference; Münchner Sicherheitskonferenz

NAFO Northwest Atlantic Fisheries Organization, Nordwestatlantische Fischereiorganisation

NATO North Atlantic Treaty Organization; Organisation des Nordatlantikvertrags, auch Nordatlantisches Bündnis genannt

NEAFC North East Atlantic Fisheries Commission; Kommission für die Fischerei im Nordostatlantik

NEGIS North East Greenland Ice Stream; nordostgrönländischer Eisstrom

NSR Northern Sea Route; Nördlicher Seeweg

PAME Protection of the Arctic Marine Environment; Arbeitsgruppe des Arktischen Rates zum Schutz der arktischen marinen Umwelt

PANC Patrulla Antártica Naval Combinada; chilenisch-argentinische Küstenpatrouille an der Antarktischen Halbinsel

ppm parts per million; Teile von einer Million, Millionstel

RFMO Regional Fisheries Management Organisation; Regionale Organisation für das Fischereimanagement

RuBisCO Ribulose-1,5-bisphosphat-carboxylase/-oxygenase; ein Enzym

SAR Search and Rescue; Suche und Rettung (Luft- und Seenotrettung)

SCAR Scientific Committee on Antarctic Research; Wissenschaftlicher Ausschuss für Antarktisforschung

SCR Suez Canal Route; Route durch den Sueskanal

SOLAS International Convention for the Safety of Life at Sea; Übereinkommen zum Schutz des menschlichen Lebens auf See

UNCCD United Nations Convention to Combat Desertification in those Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, particularly in Africa; Übereinkommen zur Bekämpfung der Wüstenbildung

UNCLOS United Nations Convention on the Law of the Sea; Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen

UNFCCC United Nations Framework Convention on Climate Change; Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen

USGS United States Geological Survey; Geologischer Dienst der Vereinigten Staaten

UV Ultraviolet; Ultraviolettstrahlung

Quellenverzeichnis

Kapitel 1

Arktis und Antarktis – Naturräume in Poleposition

AMAP, 1998. AMAP Assessment Report: Arctic Pollution Issues. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, Norway.

Arbeitskreis Geologie und Geophysik der Polargebiete der Deutschen Gesellschaft für Polarforschung, 2015. Geowissenschaftliche Polarforschung in Deutschland – globale Bedeutung und Perspektiven. *Polarforschung* 85 (1): 1–64.

Bourgeon, L., A. Burke & T. Higham, 2017. Earliest Human Presence in North America Dated to the Last Glacial Maximum: New Radiocarbon Dates from Bluefish Caves, Canada. *PLoS ONE* 12 (1): e0169486. DOI: 10.1371/journal.pone.0169486

Clancy, R., J. Manning & H. Brolsma, 2014. Mapping Antarctica – A Five Hundred Year Record of Discovery. Springer. DOI: 10.1007/978-94-007-4321-2

Ebenesersdóttir, S. S., M. Sandoval-Velasco, E. D. Gunnarsdóttir, A. Jagadeesan, V. B. Guðmundsdóttir, E. L. Thordardóttir, M. S. Einarsdóttir, K. H. S. Moore, Á. Sigurðsson, D. N. Magnúsdóttir, H. Jónsson, S. Snorraddóttir, E. Hovig, P. Møller, I. Kockum, T. Olsson, L. Alfredsson, T. F. Hansen, T. Werge, G. L. Cavalleri, E. Gilbert, C. Lalueza-Fox, J. W. Walsler III, S. Kristjánisdóttir, S. Gopalakrishnan, L. Árnadóttir, Ó. Þ. Magnússon, M. T. P. Gilbert, K. Stefánsson & A. Helgason, 2018. Ancient genomes from Iceland reveal the making of a human population. *Science*, 360: 1028–1032. DOI: 10.1126/science.aar2625

Flegontov, P., N. E. Altinisik, P. Changmai, N. Rohland, S. Mallick, D. A. Bolnick, F. Candilio, O. Flegontova, C. Jeong, T. K. Harper, D. Keating, D. J. Kennett, A. M. Kim, T. C. Lamnidis, I. Olalde, J. Raff, R. A. Sattler, P. Skoglund, E. J. Vajda, S. Vasilyev, E. Veselovskaya, M. G. Hayes, D. H. O’Rourke, R. Pinhasi, J. Krause, D. Reich & S. Schiffels, 2017. Paleo-Eskimo genetic legacy across North America. *bioRxiv*, 203018. DOI: 10.1101/203018

Kintisch, E., 2016: The Lost Norse – Why did Greenland’s Viking disappear? *Science*. DOI: 10.1126/science.aal0363

Kotlyakov, V. M., A. A. Velichko & S. A. Vasil’ev, 2017. Human Colonization of the Arctic: The Interaction Between Early Migration and the Paleoenvironment. Elsevier. DOI: 10.1016/C2015-0-04747-5

Losch, M. & C. Hanfland, 2014. Als die Erde ein Schneeball war. *Physik in unserer Zeit*, 45: 64–71. DOI: 10.1002/piuz.201301362

Lozán, J. L., H. Graßl, D. Piepenburg, D. Notz, 2014. Warnsignal Klima – Die Polarregionen. Universität Hamburg.

Lozán, J. L., H. Graßl, D. Kasang, D. Notz, H. Escher-Vetter, 2015. Warnsignal Klima – Das Eis der Erde. Universität Hamburg.

Lüdecke, C. 1995. Die deutsche Polarforschung seit der Jahrhundertwende und der Einfluß Erich von Drygalskis. *Berichte zur Polarforschung*, 158. DOI: 10.2312/BzP_0158_1995

Lüdecke, C., 2004. The First International Polar Year (1882–83): A big science experiment with small science equipment. XXI International Congress of History of Science, Mexico City. *History of Meteorology*, 1.1: 54–63.

Lüdecke, C., 2004. The First International Polar Year (1882–83): A big science experiment with small science equipment. XXI International Congress of History of Science, Mexico City. *History of Meteorology*, 1.1: 54–63.

Moerder-v.-Drygalski, R. 1964. Erich von Drygalski zum hundertsten Geburtstag am 9. Februar 1965. *Polarforschung*, 34, 1–2: 263–266.

National Snow & Ice Data Center. About the Cryosphere. <https://nsidc.org/cryosphere>

Nielsen, R., J. M. Akey, M. Jakobsson, J. K. Pritchard, S. Tishkoff & E. Willerslec, 2017. Tracing the peopling of the world through genomics. *Nature* 541: 302–310. DOI: 10.1038/nature21347

Pitulko, V. V., P. A. Nikolsky, E. Y. Giryva, A. E. Basilyan, V. E. Tumskoy, S. A. Koulakov, S. N. Astakhov, E. Y. Pavlova & M. A. Anisimov, 2004. The Yana RHS Site: Humans in the Arctic Before the Last Glacial Maximum. *Science*, 303: 52–56. DOI: 10.1126/science.1085219

Pitulko, V. V., A. N. Tikhonov, E. Y. Pavlova, P. A. Nikolskiy, K. E. Kuper & R. N. Polozov, 2016. Early human presence in the Arctic: Evidence from 45,000-year-old mammoth remains. *Science*, 351: 260–263. DOI: 10.1126/science.aad0554

Sverdrup, H. U. Roald Engelbregt Gravning Amundsen (1872–1928), The Fram Museum, <https://framuseum.no/>

Kapitel 2

Die Polargebiete als Teil des globalen Klimasystems

Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, 2018. Klimaforschung in den Polarregionen. DOI: 10.2312/awi-focus-klima2018

Buchal, B. & C.-D. Schönwiese, 2016. Klima – Die Erde und ihre Atmosphäre im Wandel der Zeiten. Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung, Helmholtz-Gemeinschaft, 3. aktualisierte Auflage. C. H. Beck.

Dahlman, L. & R. Lindsey, 2018. Climate Change: Ocean Heat Content. NOAA, Climate.gov, Understanding Climate. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-ocean-heat-content>

Fahrbach, E., 2011. Meeresströmungen und Wassermassen. In: Lozán, J. L., H. Graßl, L. Karbe & K. Reise. Warnsignal Klima: Die Meere – Änderungen und Risiken. Universität Hamburg. 25–31.

Hupfer, P., A. Helbig, 2005. Ozean und Kryosphäre in ihren Wirkungen auf die Weltwasserbilanz und das Klima. In: Lozán, J. L., H. Graßl, P. Hupfer, C.-D. Schönwiese & L. Menzel. Warnsignal Klima – Genug Wasser für alle? Universität Hamburg. 53–61.

IPCC, 2014. Klimaänderung 2013: Naturwissenschaftliche Grundlagen. Häufig gestellte Fragen und Antworten – Teil des Beitrags der Arbeitsgruppe I zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) (Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P. M. Midgley [Hrsg.]). Deutsche Übersetzung durch die deutsche IPCC-Koordinierungsstelle und Klimabüro für Polargebiete und Meeresspiegelanstieg, Bonn, 2017.

Lozán, J. L., H. Graßl, D. Piepenburg, D. Notz, 2014. Warnsignal Klima – Die Polarregionen. Universität Hamburg.

Lozán, J. L., H. Graßl, D. Kasang, D. Notz, H. Escher-Vetter, 2015. Warnsignal Klima – Das Eis der Erde. Universität Hamburg.

Morlighem, M., C. N. Williams, E. Rignot, L. An, J. E. Arndt, N. Chauché, J. A. Dowdeswell, B. Dorschel, I. Fenty, J. L. Bamber, K. Hogan, G. Catania, I. Howat, A. Hubbard, M. Jakobsson, T. M. Jordan, K. K. Kjeldsen, L. Mayer, J. Mouginot, B. P. Y. Noël, C. O’Cofaigh, S. Palmer, R. Millan, S. Rysgaard, H. Seroussi, M. J. Siegert, P. Slabon, F. Straneo, M. R. van den Broeke, W. Weinrebe, M. Wood & K. B. Zinglarsen, 2017. BedMachine v3: Complete bed topography and ocean bathymetry mapping of Greenland from multibeam echo sounding combined with mass conservation. *Geophysical Research Letters*, 44: 11051–11061. DOI: 10.1002/2017GL074954

National Snow & Ice Data Center. About the Cryosphere. <https://nsidc.org/cryosphere>

Ohshima, K. I., S. Nishashi & K. Iwamoto, 2016. Global view of sea-ice production in polynyas and its linkage to dense/bottom water formation. *Geoscience Letters*, 3, 13 (2016). DOI: 10.1186/s40562-016-0045-4

Preußner, A., G. Heinemann, S. Willems & S. Paul, 2016. Circumpolar polynya regions and ice production in the Arctic: results from MODIS thermal infrared imagery from 2002/2003 to 2014/2015 with a regional focus on the Laptev Sea. *The Cryosphere*, 10: 3021–3042. DOI: 10.5194/tc-10-3021-2016

Quante, M., 2005. Verteilung und Transport des Wassers in der Atmosphäre. In: Lozán, J. L., H. Graßl, P. Hupfer, C.-D. Schönwiese & L. Menzel: Warnsignal Klima – Genug Wasser für alle? Universität Hamburg. 62–71.

Rintoul, S. R., 2018. The global influence of localized dynamics in the Southern Ocean. *Nature*, 558: 209–218. DOI: 10.1038/s41586-018-0182-3

Scambos, T. A., G. G. Campbell, A. Pope, T. Haran, A. Muto, M. Lazzara, C. H. Reijmer & M. R. van den Broeke, 2018. Ultralow surface temperatures in East Antarctica from satellite thermal infrared mapping: The coldest places on Earth. *Geophysical Research Letters*, 45: 6124–6133. DOI: 10.1029/2018GL078133

Schauer, U., G. Rohardt, E. Fahrbach, 2017. Die physikalische Umwelt Meer. In: G. Hempel, K. Bischoff, W. Hagen (Hrsg). *Faszination Meeresforschung*, Springer. 3–14, DOI: 10.1007/978-3-662-49714-2_1

Smith, R., M. Desflots, S. White, A. J. Mariano, E. H. Ryan. The Antarctic CP Current. *Ocean Surface Currents*. <https://ocean.currents.rsmas.miami.edu/southern/antarctic-cp.html>

Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P. M. Midgley (eds.), 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Van As, D., R. S. Fausto, K. Steffen & the PROMICE project team, 2014. Katabatic winds and piteraq storms: Observations from the Greenland ice sheet. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin*, 31: 83–86.

Vernet, M., W. Geibert, M. Hoppema, P. J. Brown, C. Haas, H. H. Hellmer et al., 2019. The Weddell Gyre, Southern Ocean: Present knowledge and future challenges. *Reviews of Geophysics*, 57. DOI: 10.1029/2018RG000604

Winsborrow, C. M., C. D. Clark, C. R. Stokes (2010). What controls the location of ice streams? *Earth-Science Reviews* 103: 45–59. DOI: 10.1016/j.earscirev.2010.07.003

Woodgate, R. 2013. Artic Ocean Circulation – Going around at the Top of the World. *Nature Education Knowledge* 4(8):8.

Kapitel 3

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Polarregionen

Abram, N. J., H. V. McGregor, J. E. Tierney, M. N. Evans, N. P. McKay, D. S. Kaufman & the PAGES 2k Consortium, 2016. Early onset of industrial-era warming across the oceans and continents. *Nature*, 536: 411–418. DOI: 10.1038/nature19082

AMAP, 2017. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway.

AMAP, 2019. Arctic Climate Change Update 2019. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Tromsø, Norway.

Bell, R. E., W. Chu, J. Kingslake, I. Das, M. Tedesco, K. J. Tinto, C. J. Zappa, M. Frezzotti, A. Boghosian & W. S. Lee, 2017. Antarctic ice shelf potentially stabilized by export of meltwater in surface river. *Nature*, 544: 344–348. DOI: 10.1038/nature22048

Bell, R. E., A. F. Banwell, L. D. Trusel & J. Kingslake, 2018. Antarctic surface hydrology and impacts on ice-sheet mass balance. *Nature Climate Change*, 8: 1044–1052. DOI: 10.1038/s41558-018-0326-3

Bell, R. E., W. Chu, J. Kingslake, I. Das, M. Tedesco, K. J. Tinto, C. J. Zappa, M. Frezzotti, A. Boghosian & W. S. Lee, 2017. Antarctic ice shelf potentially stabilized by export of meltwater in surface river. *Nature*, 544: 344–348. DOI: 10.1038/nature22048

Benn, D. I., T. Cowton, J. Todd & A. Luckman, 2017. Glacier Calving in Greenland. *Current Climate Change Reports*, 3: 282–290. DOI: 10.1007/s40641-017-0070-1

Beszczynska-Möller, A., R. A. Woodgate, C. Lee, H. Melling, & M. Karcher, 2011. A synthesis of exchanges through the main oceanic gateways to the Arctic Ocean. *Oceanography*, 24(3): 82–99. DOI: 10.5670/oceanog.2011.59

Bokhorst, S., S. H. Pedersen, L. Brucker, et al., 2016. Changing Arctic snow cover: A review of recent developments and assessment of future needs for observations, modelling, and impacts. *Ambio*, 45: 516–537. DOI: 10.1007/s13280-016-0770-0

Brook, E. J. & C. Buizert, 2018. Antarctic and global climate history viewed from ice cores. *Nature*, 558: 200–208. DOI: 10.1038/s41586-018-0172-5

Caesar, L., S. Rahmstorf, A. Robinson, G. Feulner & V. Saba, 2018. Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation. *Nature*, 556: 191–196. DOI: 10.1038/s41586-018-0006-5

Cheng, L., J. Abraham, Z. Hausfather, K. E. Trenberth, 2018. How fast are the oceans warming? *Science*, 363: 128–129. DOI: 10.1126/science.aav7619

Cook, A. J. & D. G. Vaughan, 2010. Overview of areal changes of the ice shelves on the Antarctic Peninsula over the past 50 years. *The Cryosphere*, 4: 77–98. DOI: 10.5194/tc-4-77-2010

Cook, J., A. Edwards, N. Takeuchi, T. Irvine-Fynn, 2015. Cryocoinite: The dark biological secret of the cryosphere. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, Vol. 40. DOI: 10.1177/0309133315616574

Dethloff, K., D. Handorf, R. Jaiser, A. Rinke & P. Klinghammer, 2019. Dynamical mechanisms of Arctic amplification. *Annals of*

the New York Academy of Sciences, 1436: 184–194. DOI: 10.1111/nyas.13698

Francis, D., J.-P. Chaboureaud, T. Mote & D. M. Holland, 2018. Polar Jet Associated Circulation Triggered a Saharan Cyclone and Derived the Poleward Transport of the African Dust Generated by the Cyclone. *JGR Atmosphere*, 123: 11899–11917. DOI: 10.1029/2018JD029095

Gardner, A. S., G. Moholdt, T. Scambos, M. Fahnestock, S. Ligtenberg, M. van den Broeke & J. Nilsson, 2018. Increased West Antarctic and unchanged East Antarctic ice discharge over the last 7 years, *The Cryosphere*, 12: 521–547. DOI: 10.5194/tc-12-521-2018

Grosse, G., J. Lenz, J. Strauss, 2018. Permafrostverbreitung und -degradation in den Polarregionen. *Geographische Rundschau* 11-2018: 10–15.

Hausfather, Z., 2018. State of the climate: New record ocean heat content and a growing El Niño. *CarbonBrief*. <https://www.carbonbrief.org/state-of-the-climate-new-record-ocean-heat-content-and-growing-a-el-nino>

Heinemann, G., M. Braun, T. Brey, D. Damaske, M. Melles, M. Rhein & S. Willmes (Hrsg.), 2017. *Polarforschungsagenda 2030 – Status und Perspektiven der deutschen Polarforschung*. Statusbericht des Deutschen Nationalkomitees SCAR/IASC der DFG.

Helmholtz-Verbund Regionale Klimaänderungen (REKLIM). www.reklim.de

Hu, F. S., P. E. Higuera, J. E. Walsh, W. L. Chapman, P. A. Duffy, L. B. Brubaker & Melissa L. Chipman, 2010. Tundra burning in Alaska: Linkages to climatic change and sea ice retreat. *JGR Biogeosciences*, 115: G4. DOI: 10.1029/2009JG001270

Jahn, A., 2016. How predictable is the first ice-free Arctic summer? *CarbonBrief*. <https://www.carbonbrief.org/guest-post-predictable-first-ice-free-arctic-summer>

Jenkins, A., P. Dutrieux, S. Jacobs, E. J. Steig, G. H. Gudmundsson, J. Smith & K. J. Heywood, 2016. Decadal Ocean Forcing and Antarctic Ice Sheet Response: Lessons from the Amundsen Sea. *Oceanography*, 29: 106–117. DOI: 10.5670/oceanog.2016.103

Jones, B. M., G. Grosse, C. D. Arp, E. Miller, L. Liu, D. J. Hayes & C. F. Larsen, 2015. Recent Arctic tundra fire initiates widespread thermokarst development. *Scientific Reports*, 5: 15865. DOI: 10.1038/srep15865

Leeson, A. A., S. Ahepherd, K. Briggs, I. Howat, X. Fettweis, M. Morlighem & E. Rignot, 2015. Supraglacial lakes on the Greenland ice sheet advance inland under warming climate. *Nature Climate Change*, 5: 51–55. DOI: 10.1038/nclimate2463

Le Quéré, C. et al, 2018. Global Carbon Budget 2018, *Earth System Science Data*, 10: 2141–2194. DOI: 10.5194/essd-10-2141-2018, 2018.

Lind, S., R. B. Ingvaldsen & T. Furevik, 2018. Arctic warming hot spot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import. *Nature Climate Change*, 8: 634–639. DOI: 10.1038/s41558-018-0205-y

Lindsay, R., 2018. Climate Change: Global Sea Level. NOAA Climate.gov, Understanding Climate. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-sea-level>

Lutz, S., A. M. Anesio, S. E. Jorge Villar & L. G. Benning, 2014. Variations of algal communities cause darkening of a Greenland glacier. *FEMS Microbiology Ecology*, 89: 402–414. DOI: 10.1111/1574-6941.12351

Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, & T. Waterfield (eds.), 2018. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. In Press.

McSweeney, R., 2015. Darkening ice speeds up Greenland melt, new research suggests. *CarbonBrief*. <https://www.carbonbrief.org/darkening-ice-speeds-up-greenland-melt-new-research-suggests>

McSweeney, R., 2018. ‘Atlantification’ of Arctic sea tipping it towards new climate regime. *CarbonBrief*. <https://www.carbonbrief.org/atlantification-arctic-sea-tipping-towards-new-climate-regime>

Meereisportal. www.meereisportal.de

Milillo, P., E. Rignot, P. Rizzoli, B. Scheuchl, J. Mouginot, J. Bueso-Bello & P. Prats-Iraola, 2019. Heterogeneous retreat and ice melt of Thwaites Glacier, West Antarctica. *Science Advances*, 2019: 5: eaau3433. DOI: 10.1126/sciadv.aau3433

Moore, G. W. K., 2016. The December 2015 North Pole Warming Event and the Increasing Occurrence of Such Events. *Scientific Reports*, 6: 39084. DOI: 10.1038/srep39084

Morris, E. M. & A. P. M. Vaughan, 2003. Spatial and temporal variation of surface temperature on the Antarctic Peninsula and the limit of viability of ice shelves. In: Domack, E. W., A. Leventer, A. Burnett, R. Bindshadler, P. Convey & W. Kirby. *Antarctic Peninsula climate variability: historical and palaeoenvi-*

ronmental perspectives, Vol. Volume 79. American Geophysical Union, Antarctic Research Series, Volume 79, Washington, D.C., 61–68.

Mouginot, J., E. Rignot & B. Scheuchl, 2014. Sustained increase in ice discharge from the Amundsen Sea Embayment, West Antarctica, from 1973 to 2013, *Geophysical Research Letters*, 41: 1576–1584. DOI: 10.1002/2013GL059069

NASA Ozone Watch. <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/SH.html>

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2017. *Antarctic Sea Ice Variability in the Southern Ocean-Climate System: Proceedings of a Workshop*. Washington, DC: The National Academies Press. DOI: 10.17226/24696

National Snow & Ice Data Center. *Sea Ice News*. <https://nsidc.org/arcticseaicenews/>

National Snow & Ice Data Center. *Greenland Ice Sheet Today*. <https://nsidc.org/greenland-today/>

Osborne, E., J. Richter-Menge & M. Jeffries (Eds.), 2018: *Arctic Report Card 2018*, <https://www.arctic.noaa.gov/Report-Card>.

Polar Portal – Monitoring Ice and Climate in the Arctic. <http://polarportal.dk/en/greenland/>

Rahmstorf, S. & H. J. Schellnhuber, 2018. *Der Klimawandel*. C. H. Beck.

Rainville, L., C. M. Lee & R. A. Woodgate, 2011. Impact of wind-driven mixing in the Arctic Ocean. *Oceanography*, 24(3): 136–145, DOI: 10.5670/oceanog.2011.65

Rintoul, S. R., A. Silvano, B. Pena-Molino, E. van Wijk, M. Rosenberg, J. S. Greenbaum & D. D. Blankenship, 2016. Ocean heat drives rapid basal melt of the Totten Ice Shelf. *Science Advances*, Vol. 2, no. 12, e1601610. DOI: 10.1126/sciadv.1601610

Russel, L. M. & G. E. Shaw, 2015. Arctic and Antarctic Haze. In: G. R. North, J. Pyle & F. Zhang: *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. 2nd Edition, Elsevier. 116–121. DOI: 10.1016/B978-0-12-382225-3.00073-6

Scripps Institution of Oceanography. *The Keeling Curve*. <https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/>

Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P. M. Midgley (eds.), 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Strauss, J., L. Schirrmeyer, G. Grosse, D. Fortier, G. Hugelius, C. Knoblauch, V. Romanovsky, C. Schädel, T. Schneider von Deimling, E. A. G. Schuur, D. Shmelev, M. Ulrich & A. Veremeva, 2017. Deep Yedoma permafrost: A synthesis of depositional characteristics and carbon vulnerability. *Earth-Science Reviews* 172: 75–86. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.07.007

Stroewe, J. C., D. Schroder, M. Tsamados & D. Feltham, 2018. Warm winter, thin ice? The Cryosphere, 12: 1791–1809. DIO: 10.5194/tc-12-1791-2018

Swart, N. C., S. T. Gille, J. C. Fyfe & N. P. Gillett, 2018. Recent Southern Ocean warming and freshening driven by greenhouse gas emissions and ozone depletion. *Nature Geoscience*, 11: 836–841. DOI: 10.1038/s41561-018-0226-1

The IMBIE team, 2018. Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017. *Nature*, 558: 219–222. DOI: 10.1038/s41586-018-0179-y

The Ocean Portal Team. Sea Level Rise. Smithsonian, <https://ocean.si.edu/through-time/ancient-seas/sea-level-rise>

Turner, J., A. Orr, G. H. Gudmundsson, A. Jenkins, R. G. Bingham, C.-D. Hillenbrand & T. J. Bracegirdle, 2017. Atmosphere-ocean-ice interactions in the Amundsen Sea Embayment, West Antarctica. *Reviews of Geophysics*, 55: 235–276. DOI: 10.1002/2016RG000532

van den Broeke, M., J. Box, X. Fettweis, E. Hanna, B. Noël, M. Tedesco, D. van As, W. J. van de Berg, L. van Kampenhou, 2017. Greenland Ice Sheet Surface Mass Loss: Recent Developments in Observation and Modeling. *Current Climate Change Reports* 3: 345–356. DOI: 10.1007/s40641-017-0084-8

Vlasov, A. N., A. N. Khimenkov, D. B. Volkov-Bogorodskiy, Yu. K. Levin, 2018. Natural Explosive Processes in the Permafrost Zone. *Seismic Instruments*, 54: 631–641. DOI: 10.3103/S0747923918060130

WCRP Global Sea Level Budget Group, 2018. Global sea-level budget 1993–present. *Earth System Science Data*, 10: 1551–1590. DOI: 10.5194/essd-10-1551-2018

Waugh, D. W., A. H. Sobel & L. M. Polvani, 2017. What is the polar vortex and how does it influence weather? *BAMS*, January 2017, 37–44. DOI: 10.1175/BAMS-D-15-00212.1

Webster, M., S. Gerland, M. Holland, E. Hunke, R. Kwok, O. Lecomte, R. Massom & M. Sturm, 2018. Snow in the changing sea-ice systems. *Nature Climate Change*, 8: 946–953. DOI: 10.1038/s41558-018-0286-7

World Meteorological Organization, 2018. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018. Global Ozone Research and Monitoring Project – Report No. 58. Geneva, Switzerland.

Zannaa, L., S. Khatiwalab, J. M. Gregory, J. Isona & P. Heimbach, 2018. Global reconstruction of historical ocean heat storage and transport. *PNAS*. DOI: 10.1073/pnas.1808838115

Kapitel 4 Die Flora und Fauna der Polarregionen

AMAP, 2018. AMAP Assessment 2018: Arctic Ocean Acidification. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Tromsø, Norway.

AMAP, 2019. Arctic Climate Change Update 2019. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Tromsø, Norway.

Amundsen, B., 2016. A small fly is a super pollinator in the Arctic. *Science Nordic*. <http://sciencenordic.com/small-fly-super-pollinator-arctic>

Atkinson, A., S. L. Hill, E. A. Pakhomov, V. Siegel, C. S. Reiss, V. J. Loeb, D. K. Steinberg, K. Schmidt, G. A. Tarling, L. Gerrish & S. F. Sailley, 2019. Krill (*Euphausia superba*) distribution contracts southward during rapid regional warming. *Nature Climate Change*, 9: 142–147. DOI: 10.1038/s41558-018-0370-z

BIOACID, 2017. Dem Ozeanwandel auf der Spur. GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel.

Boetius, A., A. M. Anesio, J. W. Deming, J. A. Mikucki & J. Z. Rapp, 2015. Microbial ecology of the cryosphere: sea ice and glacial habitats. *Nature Reviews Microbiology*, 13: 677–690. DOI: 10.1038/nrmicro3522

Bremset Hansen, B., J. R. Lorentzen, J. M. Welker, Ø. Varpe, R. Aanes, L. T. Beumer, Å. Ø. Pedersen, 2019. Reindeer turning maritime: Ice-locked tundra triggers changes in dietary niche utilization. *ECOSPHERE*, 10:e02672. DOI: 10.1002/ecs2.2672

CAFF, 2013. Arctic Biodiversity Assessment. Status and trends in Arctic biodiversity. Conservation of Arctic Flora and Fauna, Akureyri, Iceland.

CAFF, 2013. Life linked to ice. Conservation of Arctic Flora and Fauna, Akureyri, Iceland.

CAFF, 2017. State of the Arctic Marine Biodiversity Report. Conservation of Arctic Flora and Fauna International Secretariat, Akureyri, Iceland.

Cimino, M. A., H. J. Lynch, V. S. Saba & M. J. Oliver, 2016. Projected asymmetric response of Adélie penguins to Antarctic climate change. *Scientific Reports*, DOI: 10.1038/srep28785

Cornwall, W., 2019: Vanishing Bering Sea ice threatens one of the richest U.S. seafood sources. *Science*. DOI: 10.1126/science.aay0513

Crawford, R. M. M., 2008. *Plants at the Margin – Ecological Limits and Climate Change*. Cambridge University Press.

De Broyer, C., P. Koubbi, H. J. Griffiths, B. Raymond, C. d’Udekem d’Acoz, et al., 2014. Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge.

Eamer, J., G. M. Donaldson, A. J. Gaston, K. N. Kosobokova, K. F. Lárússon, I. A. Melnikov, J. D. Reist, E. Richardson, L. Staples & C. H. von Quillfeldt, 2013. Life Linked to Ice: A guide to sea-ice-associated biodiversity in this time of rapid change. CAFF Assessment Series No. 10. Conservation of Arctic Flora and Fauna, Iceland.

Edwards, J. E., E. Hiltz, F. Broell, P. G. Bushnell, S. E. Campana, J. S. Christiansen, B. M. Devine, J. J. Gallant, K. J. Hedges, M. A. MacNeil, B. C. McMeans, J. Nielsen, K. Præbel, G. B. Skomal, J. F. Steffensen, R. P. Walter, Y. Y. Watanabe, D. L. VanderZwaag & N. E. Hussey, 2019. Advancing Research for the Management of Long-Lived Species: A Case Study on the Greenland Shark. *Frontiers in Marine Science*, 6: 87. DOI: 10.3389/fmars.2019.00087

Hogg, C., M. Neveu, K.-A. Stokkan, L. Folkow, P. Cottrill, R. Douglas, D. M. Hunt & Glen Jeffery, 2011. Arctic reindeer extend their visual range into the ultraviolet. *Journal of Experimental Biology*, 214: 2014–2019. DOI: 10.1242/jeb.053553

Kawaguchi, S., A. Ishida, R. King, B. Raymond, N. Waller, A. Constable, S. Nicol, M. Wakita & A. Ishimatsu, 2013. Risk maps for Antarctic krill under projected Southern Ocean acidification. *Nature Climate Change*, 3: 843–847. DOI: 10.1038/nclimate1937

Körner, C., 2016. Plant adaptation to cold climates. *F1000 Faculty Reviews*. DOI: 10.12688/f1000research.9107.1

Mintenbeck, K., E. R. Barrera-Oro, T. Brey, U. Jacob, R. Knust, F. C. Mark, E. Moreira, A. Strobel, W.E. Arntz, 2012. Impact of Climate Change on Fishes in Complex Antarctic Ecosystems. In: Ute Jacob & Guy Woodward. *Advances In Ecological Research*, Vol. 46, Burlington: Academic Press, 351–426.

Myers-Smith, I., et al., 2019. Complexity revealed in the greening of the Arctic. *EcoEvoRxiv*, DOI: 0.32942/osf.io/mzyjk

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2017. Understanding Northern Latitude Vegetation Greening and Browning: Proceedings of a Workshop. Washington, DC. The National Academies Press. DOI: 10.17226/25423

Nielsen, J., R. B. Hedeholm, J. Heinemeier, P. G. Bushnell, J. S. Christiansen, J. Olsen, C. Bronk Ramsey, R. W. Brill, M. Simon, K. F. Steffensen & J. F. Steffensen, 2016. Eye lens radiocarbon reveals centuries of longevity in the Greenland shark (*Somniosus*

microcephalus). *Science*, 353: 702–704. DOI: 10.1126/science.aaf1703

Oellermann, M., B. Lieb, H.-O. Pörtner, J. M. Semmens & F. C. Mark, 2015. Blue blood on ice: modulated blood oxygen transport facilitates cold compensation and eurythermy in an Antarctic octopod. *Frontiers in Zoology*, 12: 6. DOI 10.1186/s12983-015-0097-x

Peck, L., 2018. Antarctic marine biodiversity: adaptations, environments and responses to change. In: S. J. Hawkins, A. J. Evans, A. C. Dale, L. B. Firth & I. P. Smith. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, Volume 56. Taylor and Francis, 105–236.

Polar Bears International. <https://polarbearsinternational.org>

Pörtner, H.-O., D. M. Karl, P. W. Boyd, W. W. L. Cheung, S. E. Luch-Cota, Y. Nojiri, D. N. Schmidt, & P. O. Zavalov, 2014. Ocean systems. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Field, C. B., V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, & L. L. White [eds.]). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 411–484.

Schytte Blix, A., 2016: Adaptations to polar life in mammals and birds. *Journal of Experimental Biology*, 219: 1093–1105. DOI: 10.1242/jeb.120477

Siegel, V., 2016. *Biology and Ecology of Antarctic Krill*. Springer.

Smetacek, V. & S. Nicol, 2005. Polar Ocean ecosystems in a changing world. *Nature*, 437: 362–368. DOI: 10.1038/nature04161

Soppela, P., M. Nieminen & Jouni Timisjärvi, 1986. Thermoregulation in Reindeer. *Rangifer*, 1: 273–278.

Stirling, I. & A. E. Derocher, 2012. Effects of climate warming on polar bears: a review of the Evidence, *Global Change Biology*, 18: 2694–2706. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2012.02753.x

Tedesco, T., M. Vichi & E. Scoccimarro, 2019. Sea-ice algal phenology in a warmer Arctic. *Science Advances*, 5:eav4830. DOI: 10.1126/sciadv.aav4830

Zimova, M., K. Hackländer, J. M. Good, J. Melo-Ferreira, P. Célio Alves & L. S. Mills, 2018. Function and underlying mechanisms of seasonal colour moulting in mammals and birds: what keeps them changing in a warming world? *Biological Reviews*, 93: 1478–1498. DOI: 10.1111/brv.12405

Kapitel 5

Politik und Wirtschaft in den Polarregionen

AMAP, 2017. Adaptation Actions for a Changing Arctic: Perspectives from the Barents Area. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway.

AMAP, 2017. Adaptation Actions for a Changing Arctic: Perspectives from the Bering-Chukchi-Beaufort Region. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway.

AMAP, 2018. Adaptation Actions for a Changing Arctic: Perspectives from the Baffin Bay/Davis Strait Region. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway.

Arctic Economic Council, 2018. Mineral Development in the Arctic. Responsible Resource Development Working Group.

Barange, M., T. Bahri, M. C. M. Beveridge, K. L. Cochrane, S. Funge-Smith & F. Poulain, 2018. Impacts of climate change on fisheries and aquaculture – Synthesis of current knowledge, adaptation and mitigation options. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper 627, Rome.

Brady, M., 2017. China as a Polar Great Power. Cambridge University Press.

Brooks, C., D. G. Ainley, P. A. Abrams, P. K. Dayton, R. J. Hoffman, J. Jaquet & D. B. Siniff, 2018. Antarctic fisheries: factor climate change into their management, *Nature*, 558: 177–180. DOI: 10.1038/d41586-018-05372-x

Damm, V., C. Reichert, K. Berglar & H. Andruleit, 2016. Der Arktische Ozean aus rohstoffwirtschaftlicher und völkerrechtlicher Sicht. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Deutsche Rohstoffagentur, 2010. Das mineralische Rohstoffpotenzial Grönlands. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Deutsche Rohstoffagentur, 2012. Das mineralische Rohstoffpotenzial der nordamerikanischen Arktis. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Deutsche Rohstoffagentur, 2012. Das mineralische Rohstoffpotenzial der nordeuropäischen Arktis. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Deutsche Rohstoffagentur, 2012. Das mineralische Rohstoffpotenzial der russischen Arktis. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Devyatkin, P., 2018. Russia's Arctic Strategy: Energy Extraction (Part III). The Arctic Institute. <https://www.thearcticinstitute.org/russias-arctic-strategy-energy-extraction-part-three/>

Devyatkin, P., 2018. Russia's Arctic Strategy: Maritime Shipping (Part IV). The Arctic Institute. <https://www.thearcticinstitute.org/russias-arctic-strategy-maritime-shipping-part-iv/>

Dodds, K., A. D. Hemmings, P. Roberts, 2017. Handbook on the Politics of Antarctica. Edward Elgar Publishing.

Hangaslammi, S. & I. Hatakka, 2018. Red Cross Arctic Disaster Management Study. Finish Red Cross, Helsinki, Finland.

Hauser, D. D. W., L. K. L. Laidre & H. L. Stern, 2018. Vulnerability of Arctic marine mammals to vessel traffic in the increasingly ice-free Northwest Passage and Northern Sea Route. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115: 7617–7622. DOI: 10.1073/pnas.1803543115

High North News. <https://www.highnorthnews.com/>

Humpert, M. & M. A. Kuo, 2019. The US and China's Arctic Ambitions. *The Diplomat*. <https://thediplomat.com/2019/06/the-us-and-chinas-arctic-ambitions/>

International Association of Antarctic Tour Operators (IAATO). <https://iaato.org>

Kommission zum Erhalt der lebenden Meeresschätze der Antarktis (CCAMLR). <https://www.ccamlr.org/>

Koivurova, T., L. Kauppila, S. Kopra, M. Lanteigne, M. Shi, M. Smieszek & A. Stepien, 2019. China in the Arctic and the Opportunities and Challenges for Chinese-Finnish Arctic Co-operation. *Publications of the Government's analysis, assessment and research activities 8/2019*.

Lasserre, F., 2019. Arctic Shipping: a contrasted expansion of a largely destination market. In: M. Finger & L. Heininen. *The Global Arctic Handbook*. Springer, 83–100. DOI: 10.1007/978-3-319-91995-9

Lasserre, F., L. Beveridge, M. Fournier, P.-L. Têtu & L. Huang, 2016. Polar seaways? Maritime transport in the Arctic: An analysis of shipowners' intentions II. *Journal of Transport Geography*, 105–114. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2016.10.004

Lozán, J. L., H. Graßl, D. Piepenburg, D. Notz, 2014. Warnsignal Klima – Die Polarregionen. Universität Hamburg.

Mayer, M., B. Lange, K. Lucke, M. Schuster, K. von Juterzenka & H.-P. Reinthaler, 2017. Nutzung aktueller Erkenntnisse aus der Polarforschung für die Antarktis-Umweltschutzaufgaben. Umweltbundesamt Texte 76.

Neumann, Antje, 2012. Energetische Rohstoffe in den Polargebieten. Bundeszentrale für politische Bildung.

Norwegian Ministry of Foreign Affairs, 2015. Norwegian Interests and Policy in the Antarctic, *Meld. St. 32 (2014–2015) Report to the Storting (white paper)*.

Paul, M., 2017. Arktis und Südchinesisches Meer: Ressourcen, Seewege und Ordnungskonflikte. *Aus Politik und Zeitgeschichte*, 51–52/2017.

Piepjoh, K., 2011. Vorkommen und Potentiale geologischer Ressourcen in der Arktis. *Geographische Rundschau*, 12: 34–39.

Rachold, V. & L. Grosfeld, 2019. Fact Sheet: Arktischer Rat. Deutsches Arktisbüro am Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung.

Schopmans, H., 2019. Revisiting the Polar Code: Where Do We Stand? The Arctic Institute. <https://www.thearcticinstitute.org/revisiting-polar-code/>

Secretariat of the Antarctic Treaty. <https://www.ats.aq/e/ats.htm>

Stephen, K., S. Knecht & G. M. Bartsch, 2018. Internationale Politik und Governance in der Arktis: Eine Einführung. Springer. DOI: 10.1007/978-3-662-57420-1

Tengelmann, F., V. Rachold & L. Grosfeld, 2019. Fact Sheet: Schifffahrt in der Arktis. Deutsches Arktisbüro am Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung.

The Barents Observer. <https://thebarentsobserver.com/>

The International Council on Clean Transportation, 2017. Prevalence of heavy fuel oil and black carbon in Arctic shipping, 2015 to 2025. Washington DC.

Umweltbundesamt, 2013. Das Antarktisvertragssystem. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/nachhaltigkeit-strategien-internationales/antarktis/das-antarktisvertragssystem>

U.S. Geological Survey, 2008. Circum-Arctic Resource Appraisal: Estimates of Undiscovered Oil and Gas North of the Arctic Circle. U.S. Geological Survey Fact Sheet 2008-3049. <https://pubs.usgs.gov/fs/2008/3049/>

Mitwirkende

Zur Erstellung des „World Ocean Review“ 2019 haben viele Experten mit ihrem Fachwissen beigetragen. Beteiligt waren insbesondere Wissenschaftler der dem Konsortium Deutsche Meeresforschung (KDM) angehörigen Einrichtungen.

Prof. Dr. Peter Braesicke forscht als Atmosphärenwissenschaftler am Institut für Meteorologie und Klimaforschung – Atmosphärische Spurengase und Fernerkundung (IMK-ASF), welches zum Karlsruher Institut für Technologie (KIT) gehört. Er leitet die Abteilung Modellierung am IMK-ASF und untersucht in seinen vielen Studien die detaillierten Wechselwirkungen zwischen Luftzusammensetzung und Klima. Er gehört zum Leitautorenteam des aktuellen internationalen Sachstandberichts zur Lage der Ozonschicht (Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018) und steht als wissenschaftlicher Koordinator dem Helmholtz-Verbund Regionale Klimaänderungen (REKLIM) vor, in welchem neun Forschungszentren der Helmholtz-Gemeinschaft gemeinsam disziplin- und zentrenübergreifend zu den regionalen Auswirkungen des Klimawandels forschen.

Dr. Harald Elsner forscht als Geologe und Experte für mineralische Rohstoffe an der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Hannover. Er beobachtet die globalen Rohstoffmärkte und geht in seinen Studien regelmäßig der Frage nach, welche Rohstoffe nachgefragt werden, wie groß deren Vorräte sind und inwieweit diese Lagerstätten in Zukunft überhaupt nutzbar sein werden. Seine Themenschwerpunkte sind dabei zum Beispiel Seltene Erden, sogenannte Hightech-Metalle, wie sie für Zukunftstechnologien benötigt werden, alle Schwerminerale, aber auch der Massenrohstoff Sand.

Dr. Klaus Grosfeld forscht als Geophysiker im Fachbereich Klimawissenschaften des Alfred-Wegener-Instituts, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven. Sein Forschungsschwerpunkt sind die Massenbilanzen der polaren Eisschilde und ihr Beitrag zum globalen Meeresspiegelanstieg. Darüber hinaus ist er Geschäftsführer des Helmholtz-Verbundes Regionale Klimaänderungen (REKLIM) und leitet am Alfred-Wegener-Institut die Forschungseinheit Wissenstransfer. In dieser entwickeln Klaus Grosfeld und seine Kolleginnen und Kollegen Ideen für neue Formate, Produkte oder Maßnahmen, mit denen sie die breite Öffentlichkeit sowie Entscheidungsträger in Wirtschaft, Politik und Gesellschaft über wichtige Entwicklungen in den Polargebieten informieren und bei Bedarf entsprechend beraten können.

Prof. Dr. Julian Gutt ist Meeresökologe am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven. Er untersucht Lebensgemeinschaften am Meeresboden des Südlichen Ozeans auf ihre Lebensvielfalt, Ökosystemfunktionen und Anfälligkeit gegenüber Umweltveränderungen. Dabei stehen bildgebende Methoden im Vordergrund, weil sie das Ökosystem schonen und die Lebensgemeinschaften in ihrem natürlichen Zustand zeigen. Er hat diese Untersuchungen während vieler Expeditionen in die Arktis und Antarktis durchgeführt, davon zweimal als wissenschaftlicher Fahrtleiter an Bord des deutschen Forschungseisbrechers „Polarstern“. Seine Polarexpertise und langjährige Erfahrung bringt Julian Gutt bringt in zahlreiche internationale Organisationen ein, so etwa in den Wis-

senschaftlichen Ausschuss für Antarktisforschung und in die die Politik beratende Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES).

Dr. Stefan Hain leitet die Stabstelle Umweltpolitik am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven und ist in dieser Funktion unter anderem Kontaktperson des Instituts zum Umweltbundesamt, der deutschen Genehmigungsbehörde für alle Tätigkeiten im Geltungsbereich des Antarktisvertrags. Der Meeresbiologe hat einst am AWI promoviert und anschließend mehr als 25 Jahre lang an der Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Politik gearbeitet – unter anderem als Leiter der Korallenriff-Units des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (UNEP) in Cambridge, Großbritannien. 2009 kehrte er an das AWI zurück und koordiniert seitdem als umweltpolitischer Sprecher die Beiträge des Instituts zu diversen internationalen Prozessen, die potenzielle Auswirkungen auf die Forschungsarbeiten des Instituts haben können, speziell in der Antarktis. Besonders viel Zeit und Energie investiert er in das deutsch-europäische Vorhaben, ein Meeresschutzgebiet im Weddellmeer einzurichten. Der Antrag dazu wurde vom AWI ausgearbeitet, die entsprechenden Verhandlungen unter dem Übereinkommen zur Erhaltung der lebenden Meeresschätze der Antarktis (CCAMLR) sind jedoch schwierig und langwierig.

Dr. Hartmut H. Hellmer arbeitet als physikalischer Ozeanograf in der Sektion Physikalische Ozeanografie der Polarmeere am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven. Sein Fokus liegt auf den Wechselwirkungen der polaren Randmeere mit den schwimmenden Ausläufern des Antarktischen Eisschilds, den Schelfeisen. Seine Untersuchungen führten zur mathematischen Formulierung und numerischen Umsetzung der Austauschprozesse von Wärme und Salz an der Grenzfläche Ozean-Schelfeis und zu dem ersten gekoppelten Eis-Ozean-Modell der Südhemisphäre, BRIOS. Simulationen mit diesem Modell haben gezeigt, dass die zu erwartende Erwärmung in der Antarktis zu einer Veränderung der Zirkulation im südlichen Weddellmeer führen kann, welche warme Wassermassen des offenen Ozeans in die Kavernen angrenzender Schelfeise transportiert. Das damit verbundene erhöhte basale Schmelzen kann die Bremswirkung eines Schelfeises reduzieren und zu einem beschleunigten Abfluss des Landeises führen, was mit einer Erhöhung des Meeresspiegels einhergehen würde.

Dr. Heike Herata leitet seit dem Jahr 2006 das Fachgebiet „Schutz der Arktis und Antarktis“ im Umweltbundesamt. Zuvor hat die Hydrologin an der Technischen Universität Dresden studiert und promoviert und als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Wasserwirtschaft Berlin geforscht. Im Jahr 1991 begann sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin im Umweltbundesamt, wo sie zunächst zum Thema Meeresschutz, anschließend

im Fachgebiet Stoffhaushalt Gewässer tätig war. In ihrer jetzigen Position ist sie unter anderem für den Vollzug des Gesetzes zur Ausführung des Umweltschutzprotokolls zum Antarktisvertrag (AUG) zuständig und damit die Leiterin der nationalen Genehmigungsbehörde für die Antarktis. Außerdem arbeitet sie international in der ATCM, CCAMLR und IAATO mit. Im Jahr 2014 wurden ihre Zuständigkeiten um den Schutz der Arktis erweitert. In dieser Funktion verhandelt Heike Herata unter anderem im Arktischen Rat sowie in der IMO mit.

Dr. Thomas Hollands ist Experte für Fernerkundungsdaten und die Beobachtung von Meereisbewegungen aus dem Weltall. Von 2009 bis 2019 hat er als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe „Erdbbeobachtungssysteme“ der Sektion Meteorologie der Polargebiete am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven gearbeitet. In dieser Zeit hat der Geowissenschaftler zum Thema „Meereisbewegung aus Satellitenbildern“ promoviert und anschließend unter anderem Methoden entwickelt, mit denen sich Polynienereignisse durch die Kombination verschiedener Satellitensensoren beobachten und klassifizieren lassen. Auf Grundlage dieser Daten lässt sich beispielsweise abschätzen, wie viel Meer eis in den Polynien produziert wird.

Prof. Dr. Angelika Humbert ist Glaziologin am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven und leitet dort die Arbeitsgruppe zur Eisschildmodellierung. Deren Ziel ist es, die physikalischen Prozesse des Fließens von Eis in Eisschilden, Eisströmen und Gletschern so genau zu verstehen, dass sie als mathematische Formeln in computerbasierten Eismodellen dargestellt werden können und auf diese Weise helfen, die Dynamik der Eismassen, ihre künftige Entwicklung und ihren Beitrag zum Meeresspiegelanstieg vorherzusagen. Dazu führen die Modellierer sowohl Prozess- als auch Systemstudien durch. In Prozessstudien modellieren sie zum Beispiel die Effekte von subglazialen Wasser, sich erwärmenden Eises oder aber einer Verlagerung der Aufsetzlinie eines Gletschers oder Schelfeises. In Systemstudien untersuchen die Wissenschaftler das Verhalten ganzer Eisschilde oder aber einzelner Eisstrom-Schelfeis-Systeme wie zum Beispiel den Recoverygletscher und das Filchner-Schelfeis.

Dr. Ralf Jaiser ist Physiker und forscht als Klimamodellierer in der Sektion Physik der Atmosphäre des Alfred-Wegener-Instituts, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Potsdam. Sein Spezialgebiet ist die großräumige Zirkulation der Luftmassen bis in die Stratosphäre hinauf und deren zeitliche Veränderung. Diese vermisst der Wissenschaftler jedoch nicht selbst, sondern er analysiert die vielen zur Verfügung stehenden Datensätze aus Klimamodellen. Ralf Jaisers Forschung trägt unter anderem dazu bei zu verstehen, wie der Meereisrückgang in der arktischen Barents- und Karasee den Jetstream abschwächt und somit auch das Wetter in den mittleren Breiten beeinflusst.

Dr. Sebastian Knecht ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fakultät für Soziologie der Universität Bielefeld. Seine Forschungsschwerpunkte liegen unter anderem in den Bereichen internationale Beziehungen, geopolitische Narrative, institutioneller Wandel und Wissenschaftstransfer in Bezug auf polare und maritime Governance. Er ist Mitherausgeber des Buches „Governing Arctic Change: Global Perspectives“ (Palgrave Macmillan) und Co-Autor des deutschsprachigen Lehrbuchs „Internationale Politik und Governance in der Arktis: Eine Einleitung“ (Springer).

Dr. Gert König-Langlo hat an der Universität Hamburg Meteorologie studiert und überwinterte im Anschluss an sein Studium an der deutschen Antarktis-Forschungsstation „Georg von Neumayer“. Die Antarktis ließ ihn seitdem nicht mehr los. Im Jahr 1989 wurde er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI) und übernahm die Leitung der meteorologischen Observatorien an der Neumayer-Station in der Antarktis sowie auf dem deutschen Forschungseisbrecher „Polarstern“. In beiden Observatorien werden meteorologische Langzeitdaten für die Klimaforschung gesammelt. Außerdem leitete Gert König-Langlo bis zu seiner Pensionierung im Jahr 2017 viele Jahre lang das World Radiation Monitoring Center (WRMC), welches als zentrales Archiv des Baseline Surface Radiation Networks (BSNR) Klimaforschern die bestmöglichen bodennahen Strahlungsmessungen zur Verfügung stellt.

Dr. Thomas Krumpfen forscht als Meereisphysiker am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven. Im Fokus seiner Arbeit steht die Frage, wie sich der Klimawandel auf das Meereis in der Arktis und Antarktis auswirkt. Ihn interessiert dabei vor allem, welche atmosphärischen und ozeanografischen Prozesse die Änderungen in den Polarregionen steuern und welche Konsequenzen sich aufgrund der sich verändernden Eisbedeckung für das Ökosystem und den biogeochemischen Stoffkreislauf ergeben. Hierzu greift der Forscher auf Satellitendaten zurück, die Aufschluss über Flächen- und Dickenänderungen des Eises in den zurückliegenden 35 Jahren geben. Ergänzt werden die Satellitendaten durch Messungen, die auf Expeditionen mit dem Forschungsschiff „Polarstern“ oder den Polarforschungsflugzeugen „Polar 5“ und „Polar 6“ durchgeführt werden. Ein Schwerpunkt der Messungen ist die Erfassung der Eisdicke in Schlüsselregionen der Arktis mit einem Sensor namens EM-Bird.

Dr. Stefan Kruse arbeitet als Ökologe und Vegetationsmodellierer in der Forschungsgruppe Polare Terrestrische Umweltsysteme am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Potsdam. Sein Fachgebiet sind die Veränderungen der polaren Vegetation, hier vor allem der Baumgrenze, im Zuge des aktuellen Klimawandels. Dazu untersucht er Tundra- und Waldflächen mit unterschiedlicher Artenzusammensetzung und Dichte und erfasst das Baumwachstum mithilfe

dendroökologischer Methoden. Außerdem nutzt der Wissenschaftler die genetischen Informationen einzelner Bäume, um davon Erkenntnisse zu ihrer Ausbreitung auf kurzen und langen Distanzen abzuleiten. Die so gewonnenen Daten verarbeitet er in einem selbst programmierten, individuenbasierten Waldcomputermodell, welches es erlaubt, mittels Klimaszenarien die Auswirkungen der Erwärmung auf die Vegetation zu testen. So konnte Stefan Kruse zum Beispiel zeigen, dass sich die Baumgrenze weitaus langsamer nach Norden verlagert als es die Erwärmung aktuell zulässt.

Dr. Andreas Läufer leitet seit 2009 den Arbeitsbereich Polar-geologie an der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Hannover und ist Spezialist für die Geologie und geodynamischen Prozesse in der Antarktis. Um sie zu verstehen, unternimmt der Strukturgeologe seit 30 Jahren regelmäßig Forschungsreisen in die Antarktis. Ein Zielgebiet ist dabei das Viktorialand mit der angrenzenden Rossmeer-Region. Dort untersucht er die nicht vom Eis bedeckten Gesteine mit geologischen und geophysikalischen Methoden, um Indikatoren zu finden, mit denen sich die Entstehung und das Auseinanderbrechen des südlichen Großkontinents Gondwana zurückverfolgen lässt.

Prof. Dr. Cornelia Lüdecke lehrt Geschichte der Naturwissenschaften an der Universität Hamburg und gehört seit dem Jahr 2012 der Internationalen Akademie für Wissenschaftsgeschichte in Paris als korrespondierendes Mitglied an. Außerdem leitet sie seit fast 30 Jahren den Arbeitskreis „Geschichte der Polarforschung“ der Deutschen Gesellschaft für Polarforschung und steht seit 2004 der Expertengruppe für die Geschichte der Antarktisforschung im Wissenschaftlichen Ausschuss für Antarktisforschung (Scientific Committee on Antarctic Research, SCAR) vor. Sie hat 18 Monografien und über 180 Artikel zur Geschichte der Meteorologie, Geografie, Ozeanografie und Polarforschung verfasst und ist zudem seit 2012 Vizepräsidentin der Internationalen Kommission zur Geschichte der Ozeanographie (International Commission on History of Oceanography).

Dr. Stefanie Lutz ist Mikrobiologin und Expertin für die Vielfalt und Ökologie von Mikroorganismen in kalten Umgebungen, insbesondere in der Arktis. Für ihre Doktorarbeit an der Universität Leeds untersuchte sie die Auswirkungen von in Schnee und Eis lebenden pigmentierten Algen auf die Verdunklung von Gletscheroberflächen in der Arktis und Antarktis und half auf diese Weise mit zu verstehen, inwieweit die Schnee- und Eisalgen die Oberflächenschmelzraten der Gletscher erhöhen. Diese Forschungsarbeit der Schnittstelle von Mikrobiologie, mikrobieller Ökologie und Bioinformatik setzte sie im Anschluss als Postdoc am Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungs-Zentrum (GFZ) fort und war beispielsweise am interdisziplinären Forschungsprojekt „Black & Bloom“ auf Grönland beteiligt. Mittlerweile arbeitet Stefanie Lutz als Wissenschaftlerin bei Agroscope in der Schweiz.

Dr. Felix Mark forscht als Meeresbiologe in der Sektion Integrative Ökophysiologie am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven. Er hat sich auf die physiologischen Anpassungsmechanismen wechselwarmer Meeresbewohner spezialisiert und untersucht diese in Hinblick auf Meerereswärmung, Ozeanversauerung und Sauerstoffmangel vor allem bei polaren Fischen vom Gesamtorganismus bis auf die molekulare Ebene. Felix Mark führt regelmäßig Expeditionen in die Polarmeere durch und leitete im Rahmen des großen deutschen Forschungsprogramms zu den Biologischen Auswirkungen von Ozeanversauerung (BIOACID) das Themenpaket „Auswirkungen von Ozeanversauerung und Erwärmung auf natürliche und menschliche Gemeinschaften: Mechanismen, Vulnerabilitäten und gesellschaftliche Anpassung“.

Dr. Marion Maturilli ist Atmosphärenphysikerin am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Potsdam und leitet das meteorologische Observatorium an der deutsch-französischen Forschungsbasis AWIPEV in Ny-Ålesund, Spitzbergen. Mithilfe der dort erhobenen meteorologischen Langzeitdaten erforscht sie, wie sich das Klima in Spitzbergen und dem europäischen Teil der Arktis verändert. Ihre Arbeitsschwerpunkte liegen dabei auf dem veränderten Auftreten von Tiefdruckgebieten sowie dem sich ändernden Wärme- und Feuchtetransport in die Arktis. Außerdem kombiniert die Atmosphärenforscherin in verschiedenen Studien Beobachtungsdaten von Landoberfläche, Ozean und Meereis, um die komplexen Wechselwirkungsprozesse in der Arktis und deren Beitrag zur sogenannten Arktischen Verstärkung besser zu verstehen.

Dr. Michaela Mayer arbeitet seit 1994 als Meeresbiologin und Ornithologin in den Polarregionen. In dieser Zeit hat sie unter anderem an Bord des deutschen Forschungseisbrechers „Polarstern“, an der deutsch-französischen Forschungsstation AWIPEV in Ny-Ålesund, Spitzbergen, sowie an der argentinischen Antarktisch-Forschungsstation Carlini auf der King-George-Insel geforscht. Wenn sie nicht auf Forschungsexpedition ist, leitet die Wissenschaftlerin das von ihr gegründete Institut für Nachhaltige Aktivitäten auf See (INASEA) in Bremen. Dort führt sie Studien zu den Umweltauswirkungen von Tourismus, Schifffahrt, Offshore-Projekten und anderen menschlichen Aktivitäten auf See durch, entwickelt Konzepte, wie sich Umweltschutz und Wirtschaftlichkeit dieser Vorhaben miteinander vereinbaren lassen, und berät Unternehmen in Sachen Umweltmanagement.

Prof. Dr. Bettina Meyer leitet die Arbeitsgruppe „Ökophysiologie pelagischer Schlüsselarten“ am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI). Das Ziel ihrer Arbeitsgruppe ist, die physiologischen Engpässe im Lebenszyklus pelagischer Schlüsselarten wie Krill, Ruderfußkrebse und Salpen zu identifizieren und deren Leistungs- und Anpassungsfähigkeit in Bezug auf (anthropogene) Umweltveränderungen zu

untersuchen sowie den Einfluss dieser Arten in biogeochemischen Kreisläufen zu verstehen. Die gewonnenen Daten fließen in individuenbasierte Modellierungen und Ökosystemmodelle ein, welche es ermöglichen, Vorhersagen zu Populationsveränderungen von Schlüsselorganismen zu identifizieren und deren Folgen auf Ökosystemebene zu verstehen.

Dr. Katja Mintenbeck forscht als Meeresbiologin am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven. Im Mittelpunkt ihrer Arbeit stehen die Ökologie antarktischer mariner Lebensgemeinschaften sowie die Frage, wie empfindlich antarktische Fische auf Störungen und Umweltveränderungen reagieren. Seit dem Jahr 2017 arbeitet sie außerdem als wissenschaftliche Direktorin der Technischen Unterstützungseinheit der Arbeitsgruppe II des Weltklimarats (IPCC). In dieser Funktion trug sie unter anderem die Verantwortung für den IPCC-Sonderbericht „Ozean und Kryosphäre im Klimawandel“, der im September 2019 veröffentlicht wurde.

Dr. Juliane Müller ist Geowissenschaftlerin am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven und leitet dort die Helmholtz-Nachwuchsforschungsgruppe PALICE, deren Ziel es ist, die Wechselwirkungen zwischen Änderungen der Meereisbedeckung und der ozeanischen und atmosphärischen Zirkulation während vergangener Klimaschwankungen zu untersuchen. Dazu analysiert das Team marine Sedimentkerne und sucht in den Bodenproben nach fossilen organischen Molekülen – sogenannten Biomarkern. Anhand dieser können die Wissenschaftler erkennen, ob und wann in der Vergangenheit die Region, aus welcher der Kern stammt, mit Meereis bedeckt war. Diese Daten liefern unter anderem eine wichtige Grundlage für die Überprüfung und Entwicklung von Klimamodellen.

Dr. Ilka Peeken forscht als Meereisökologin am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven, wo sie sich mit der Ökologie, Biogeochemie und Verschmutzung von Meereis befasst. Sie untersucht in erster Linie die Zusammenhänge zwischen dem Meereis und den verschiedenen darin und darunter lebenden Organismen, um einschätzen zu können, inwieweit der Klimawandel den Lebensraum Meereis verändert und was diese Veränderungen für die Meeresumwelt bedeuten. Dazu nimmt sie auf vielen Expeditionen Meereisproben, analysiert die Artenvielfalt der darin vorkommenden Meereisorganismen, untersucht, welche Rolle diese Arten im globalen Kohlenstoffhaushalt spielen und geht der Frage nach, wie sich der Wandel von mehrjährigem zu einjährigem Eis in der Arktis auf die Biodiversität und Kohlenstoffproduktion dieses Ökosystems auswirkt. Parallel dazu misst sie die Belastung des Meereises durch Mikroplastikpartikel und erforscht, welche Folgen diese Verschmutzung für die Meereisorganismen hat.

Dr. Karsten Piepjohn arbeitet als Polargeologe an der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Hannover und erforscht die Geodynamik der Randbereiche des Arktischen Ozeans. Im Mittelpunkt stehen dabei die initialen Öffnungsprozesse des Arktischen Ozeans, der damit verbundene Magmatismus, die Entstehung von Sedimentbecken sowie die Entstehung eines Faltengebirgsgürtels, der sich heute von Spitzbergen über Nord-Grönland bis weit in die kanadische Arktis hinein verfolgen lässt und mit der Öffnung des Eurasischen Beckens des Arktischen Ozeans in Zusammenhang steht.

Prof. Dr. Alexander Proelß ist Rechtswissenschaftler und lehrt an der juristischen Fakultät der Universität Hamburg internationales Seerecht und Umweltrecht, Völkerrecht und Öffentliches Recht. Zu seinen Forschungsschwerpunkten zählen neben Aspekten des allgemeinen Völker- und Europarechts vor allem das internationale See- und Umweltrecht, das Außenverfassungsrecht sowie ausgewählte Bereiche des nationalen Umweltrechts. Er ist an zahlreichen nationalen wie internationalen Forschungsprojekten beteiligt und bringt seine Expertise auch in interdisziplinäre Großprojekte wie den DFG-Forschungsschwerpunkt zum Climate Engineering mit ein.

Dr. Benjamin Rabe forscht als Ozeanograf am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven und untersucht die Zusammensetzung und Zirkulation der Wassermassen des Arktischen Ozeans. Er koordiniert zusammen mit einer schwedischen Kollegin die ozeanografischen Forschungsarbeiten während der einjährigen Drift des deutschen Forschungseisbrechers „Polarstern“ durch die Arktis (Expedition MOSAiC). Das Schiff wird sich im Herbst 2019 nördlich Sibiriens im Meereis einfrieren lassen und anschließend ein Jahr lang mit dem Packeis über den Nordpol Richtung Framstraße treiben. Während dieser Zeit untersuchen Forscher aus 17 Nationen das Meereis sowie den Ozean darunter und die Atmosphäre darüber, um herauszufinden wie diese Komponenten des polaren Klimasystems miteinander interagieren und welche Wechselwirkungen das arktische Meereis so rapide schrumpfen lassen.

Dr. Volker Rachold leitet das Deutsche Arktisbüro am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI). In dieser Position berät der ehemalige Permafrostforscher und langjährige Direktor des International Arctic Science Committee (IASC) die deutsche Bundesregierung in Arktis-Fragen. Für das Bundesministerium für Bildung und Forschung bereitete er zum Beispiel die zweite Arktische Wissenschaftsministerkonferenz inhaltlich vor. Im Auftrag des Auswärtigen Amtes unterstützt er die deutschen Vertreter in der Arbeitsgruppe Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP) des Arktischen Rates. Seine eigene wissenschaftliche Laufbahn begann als Geochemiker, einer Forschungsdisziplin, in der er promovierte und habilitierte.

Dr. Thomas Rackow hat Technomathematik studiert und dieses Studium mit einer Arbeit über die Eisbergdrift abgeschlossen. Anschließend promovierte er an der Universität Bremen im Fach Physik. Seit 2015 ist er Klimamodellierer am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven und erforscht Mechanismen, die zu Klimavariabilität führen. Sein Ziel ist es, bislang fehlende Prozesse wie kleine Ozeanwirbel oder die Eisbergdrift in heutige Klimasimulationen einzubauen und deren Vorhersagen dadurch zu verbessern. Außerdem engagiert sich der Modellierer in der Wissenschaftskommunikation. Im Rahmen der MOSAIC Summer School auf dem russischen Eisbrecher „Akademik Fedorov“ unterrichtet Thomas Rackow zum Beispiel 20 internationale Master- und PhD-Studenten zum Thema: Wie sagt man die Bewegung von Meereis und treibenden Objekten wie Eisbergen mathematisch vorher?

Dr. Christoph Ritter forscht als Atmosphärenphysiker am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, verbringt aber im Schnitt sieben Wochen pro Jahr an der deutsch-französischen Arktis-Forschungsstation AWIPEV in Ny-Ålesund, Spitzbergen. Dort schickt er mit dem LIDAR-System, einem Gerät bestehend aus Laser, Teleskop und Zählleinheit, Laserblitze mehrere Kilometer hoch in den Himmel, um deren Reflexion zu messen und auf diese Weise die in der Atmosphäre enthaltenen Aerosole zu untersuchen. Sein Ziel ist es, die Verteilung verschiedener Aerosoltypen in der Atmosphäre so genau wie möglich zu bestimmen, um deren Einfluss auf das Klima künftig besser in Klimamodellen simulieren zu können.

Dr. Ingo Sasgen forscht als Geowissenschaftler am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven und untersucht mithilfe von Satelliten das Wachsen und Schrumpfen der polaren Eisschilde. So zieht der Fernerkundungsexperte unter anderem Rückschlüsse auf den Schmelzwasserbeitrag Grönlands und der Antarktis zum globalen Meeresspiegelanstieg. Außerdem kombiniert er die Satellitendaten zum Schwerefeld der Eismassen mit Radardaten zu ihren Höhenänderungen und bestimmt so in räumlich hoher Auflösung, in welchen Regionen die Eisschilde besonders schnell schrumpfen und wie sich die Verlustzonen über die Zeit ausdehnen. Derzeit entwickelt er gemeinsam mit einer AWI-Kollegin eine neue Methode, mit der sich die Eismassenbilanz des Grönländischen Eisschildes statistisch vorhersagen lässt.

Prof. Dr. Ursula Schauer arbeitet als Ozeanografin am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven und hat in ihrer wissenschaftlichen Laufbahn mehrere Expeditionen des deutschen Forschungseisbrechers „Polarstern“ in die Arktis geleitet. Sie ist ausgewiesene Expertin für die Zirkulation im Arktischen Ozean und forscht unter anderem zur Tiefenwasserbildung im hohen Norden, zu den langfristigen Veränderungen im Wärme- und Süßwasser- beziehungsweise Salzhaushalt des Nordpolarmeers sowie zu den

Wechselwirkungen zwischen dem Meer und den Ausläufern des Grönländischen Eisschildes. Auf ihre Studien und Messungen geht unter anderem die Erkenntnis zurück, dass sich die tiefen Wassermassen der Grönlandsee im Zeitraum von 1980 bis 2010 zehnmal schneller erwärmt haben als der Weltozean im Mittel.

Dr. Stephan Schiffels ist Gruppenleiter für Populationsgenetik am Max-Planck-Institut für Menschheitsgeschichte in Jena und verfolgt bei seiner Forschung das Ziel, globale Verwandtschaften von Bevölkerungsgruppen und prähistorische Bevölkerungsbewegungen zu rekonstruieren. Dazu analysiert und vergleicht er genetische Daten aus archäologischen Funden (DNA aus Skelettresten) mit denen heute lebender Menschen. Parallel dazu entwickelt der promovierte Physiker neue statistische und bioinformatische Methoden, mit denen sich die immer größer werdenden genetischen Datensätze verarbeiten und untersuchen lassen. Im Jahr 2019 leitete er unter anderem eine internationale Studie zur genetischen Herkunft der nordamerikanischen Ureinwohner, vor allem jener in den arktischen Regionen. Deren Ergebnisse wurden in der Fachzeitschrift „Nature“ veröffentlicht.

Dr. Volker Strass ist seefahrender Ozeanograf in der Sektion Physikalische Ozeanografie der Polarmeere im Fachbereich Klimawissenschaften am Alfred-Wegener-Institut (AWI) in Bremerhaven. Sein wissenschaftliches Arbeitsgebiet ist breitgefächert und erstreckt sich von der großräumigen mittleren Ozean-Zirkulation über die mesoskalige Dynamik von Wirbeln und Fronten bis hin zu kleinskaligen turbulenten Austauschprozessen zwischen der oberflächennahen Ozean-Deckschicht und der Atmosphäre. Dabei interessieren ihn vor allem jene klimarelevanten Prozesse, welche die Wärme- und Kohlenstoffaufnahme des Ozeans steuern. Beim Thema Kohlenstoffaufnahme hat er auch die biogeochemischen Stoffkreisläufe im Blick und forscht interdisziplinär zum Einfluss physikalischer Prozesse auf die Photosynthese und – über akustische Messverfahren – zur Interaktion von pflanzlichem und tierischem Plankton und dem daraus resultierenden Absinken von organischem Material. Seine Forschungsfahrten führen Volker Strass vor allem in den Südozean und dort in erster Linie in die Region des Antarktischen Zirkumpolarstroms sowie in das Weddellmeer.

Dr. Jens Strauss ist Geoökologe und leitet die Arbeitsgruppe „Permafrost Biogeochemie“ in der Sektion Permafrostforschung am Potsdamer Standort des Alfred-Wegener-Instituts, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI). Er hat sich auf tiefen, eisreichen Permafrost (Yedoma) spezialisiert und geht den Fragen nach, wie viel organische Substanz darin eingefroren ist, welche Qualität dieser Kohlenstoff hat und wie schnell er im Fall eines Auftauens durch Mikroorganismen abgebaut und in Form von Treibhausgasen freigesetzt werden kann. Seine Feldforschung dient als Basis für Modellierungen, in denen berechnet wird, welche Mengen Kohlendioxid und Methan auf natürliche Weise emittiert werden, wenn der Permafrost großflächig taut.

Aktuell leitet Jens Strauss dazu ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung kofinanziertes Projekt mit dem Titel: Veränderung des arktischen Kohlenstoffkreislaufs im küstennahen Ozean (Changing Arctic Carbon Cycle in the Coastal Ocean Near-shore, CACOON).

Dr. Johannes Sutter arbeitet als Eismodellierer am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven und in der Abteilung Klima- und Umweltphysik der Universität Bern. Er forscht insbesondere zu der Frage, wie die Eismassen der Antarktis in der Vergangenheit auf Warmphasen reagiert haben, und erstellt Szenarien, inwieweit der Antarktische Eisschild durch den zukünftigen Klimawandel zum Meeresspiegelanstieg beitragen wird. Mit seinen Eisschildmodellierungen half er außerdem bei der Suche nach idealen Bohrstellen für das internationale Forschungsprojekt Beyond EPICA – Oldest Ice, im Zuge dessen Glaziologen das älteste Eis der Antarktis erbohren wollen.

Prof. Dr. Jörn Thiede ist Geologe und Paläontologe und leitet seit 2011 das Köppen-Labor des Instituts für Erdwissenschaften an der Staatlichen Universität von Sankt Petersburg. Zuvor hatte der Professor für Paläo-Ozeanografie in Kiel zunächst als Gründungsdirektor des Forschungszentrums für Marine Geowissenschaften gewirkt, einer der Vorgängereinrichtungen des heutigen Helmholtz-Zentrums für Ozeanforschung Kiel (GEOMAR). Im Anschluss daran leitete er zehn Jahre lang das Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven. Im Rahmen von nationalen und internationalen Expeditionen auf Forschungsschiffen befuhr er alle Weltmeere mit dem Ziel, die Geschichte ihrer Physiographie, Wassermassen und Lebewesen zu verstehen. Für seine biowissenschaftlichen Verdienste erhielt Jörn Thiede zahlreiche renommierte Forschungspreise und wurde von Wissenschaftsakademien im In- und Ausland als Mitglied aufgenommen.

Dr. Renate Treffeisen leitet das Helmholtz-Klimabüro für Polargebiete und Meeresspiegelanstieg am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven. In dieser Funktion entwickelt die ehemalige Atmosphärenforscherin unter anderem innovative Vermittlungsformate, mit denen Forschungsergebnisse aus den Polarregionen für Entscheidungsträger in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft nutzbar gemacht werden. Außerdem betreut sie als Wissenschaftsredakteurin das Onlineportal meereisportal.de, in dem die Meereisforscher des AWI und der Universität Bremen aktuelle Meereisdaten zur Verfügung stellen und regelmäßig Analysen zur Entwicklung der Eisdecken in Arktis und Antarktis veröffentlichen.

Index

Gefettete Seitenzahlen
verweisen auf die-
jenigen Textstellen, die
für das Verständnis
besonders wichtig sind.

–5° C-Isotherme 154
1,5-Bisphosphat-Carboxy-
lase/-Oxygenase 201
10° C-Juli-Isotherme 16, 154
12-Seemeilen-Zone 244 ff.
79°-Nord-Gletscher 171
1002 Area 264
2500-Meter-Wassertiefenlinie
246

A

Aappaluttoq 267
Acanthis hornemanni 183
Adamussium colbecki 209
Adélieland 51, 75 ff., 153
Adéliepinguin 186, 226, 282
Adhäsion 97
Aerosole **120 f.**
Agassizsee 118
Aggregatzustände 63
Agulhasstrom 85
Aklimatisierung 218 ff.
Alaska 16, 35 ff., 80, 131 ff.,
184, 220 ff., 242, 259 ff.
Alaska-Highway 142
Alaska-Tschuktschen-Mikro-
kontinent 23
Albatrosse 205
Albedo 25 ff., **62 ff.**, 95 ff.,
120, 130 ff.
Alexandraland 241
Algenblüten 204 ff., 224
Alkenvögel 183
Alpensäuerling 199
Alpenschneehuhn 183 ff.
Alpha-Mendelejew-Rücken
20 ff., 90, 246 ff.
Amerasisches Becken 22
Amerikanische Zwergbirke
202 f.
Ameryschelfeis 86, 157
Amundsen, Roald 45 ff.,
48 ff., 269
Amundsenbecken 22, 92
Amundsen-Scott-Südpolstation
99
Amundsensee 138 ff.
Andromeda polifolia 202
Anemonen 181
Anorthosit 267
Anschlusszone 245
Antarctic and Southern Ocean
Coalition (ASOC) 252
Antarctic Treaty Consultative
Meeting (ATCM) 251
Antarktika 12 ff., 51

Antarktische Halbinsel 21 ff.,
98 ff., 153, 218 ff.
antarktische Kontinentalplatte
18 ff.
Antarktische Pelzrobbe 258
Antarktische Perlwurze 197
Antarktischer Krill **216 ff.**,
253, 290 ff.
Antarktischer Marmorbarsch
253
Antarktischer Seehecht
290 ff.
Antarktischer Silberfisch
206 ff., 226
Antarktischer Warzenkrake
211
Antarktischer Zirkumpolar-
strom **85 ff.**, 122 ff., 161 ff.
Antarktisches Bodenwasser
79 ff., 115 ff.

Antarktische Schmiele 197 ff.
Antarktisches Zwischen-
wasser 89 ff.
Antarktisvertrag 14, **240 ff.**
Antarktisvertragssystem
(Antarctic Treaty System,
ATS) 250 ff.
Anziehungskraft 174
Apherusa glacialis 214
Aragonit 231 f.
Arbeitsgruppe Notfallpräven-
tion, -vorsorge und -einsatz
(Emergency Prevention,
Preparedness and Response,
EPPR) 243
Arbeitsgruppe zum Schutz
der arktischen marinen
Umwelt (Protection of the
Arctic Marine Environment,
PAME) 243, 278 ff.
Archaeen 146, 213
Arctica islandica 209
Arctic and North Atlantic
Security and Emergency
Preparedness Network
(ARCSAR) 282
Arctic Browning 235
Arctic Coast Guard Forum
(ACGF) 242, 283
Arctic Environmental Protec-
tion Strategy (AEPS) 243
Arctic Greening 235
Arctic Haze 121
Arctic Human Development
Report (AHDR) 17

Arctic LNG 2 264
Arctic Monitoring and Assess-
ment Programme, AMAP
(Programm zur Beobachtung
und Bewertung der Arktis)
17, 243
Arctic National Wildlife
Refuge 184, 264
Arctic Security Forces Round-
table (ASFR) 242
Arctocephalus gazella 258
Arctocephalus tropicalis 258
Argentinien 250 f., 279 ff.
ARGO-Gleiter (Array for
Realtime Geostrophic
Oceanography, Echtzeit-
Beobachtungssystem für
geostrophische Ozeano-
grafie) 56, 114

Aristoteles 166
Arktisanrainer 242 ff.
Arktische Blaubeere 195
Arktische Fünf 242 ff.
Arktische Hummel **187**
arktische Kaltwasserkorallen
232
Arktischer Dunst 121
arktischer Kelp 232
arktischer Magnetpol **13**, 43
arktischer Polarwirbel 122
Arktischer Rat **240 ff.**
Arktischer Wirtschaftsrat
(Arctic Economic Council,
AEC) 267
Arktischer Ziesel 191
Arktisches Becken 90
Arktische Seggen 202
Arktisches Tiefenwasser **95**
Arktisches Wintergrün 199
Arktische Verstärkung **119 ff.**
Arktische Weide 201
Armfüßer 211, 226
Arrowsmith-Halbinsel 155
Artenvielfalt 178 ff.
Asselspinnen 181, 212
Atlantifizierung 116, 117
Atlantische Meridionale
Umwälzbewegung (Atlantic
Meridional Overturning
Circulation, AMOC) 90 ff.
Atlantischer Hering 233, 287
Atlantischer Kabeljau 227 f.
Atlantischer Lachs 290
atlantisches Wasser **92 ff.**
Atmosphäre 25 ff., **60 f.**
Aufsetzlinie 160 ff.

Auftauschicht 141 f.
Auftriebsgebiete 83 ff.
Auftriebszonen 205
Auslassgletscher 100, 170
Ausschließliche Wirtschafts-
zone (AWZ) 244 ff.
Australien 19 f., 250, 286
automatisches Schiffsidenti-
fikationssystem 281
AWIPEV (deutsch-franzö-
sische Arktisforschungs-
station, betrieben vom
Alfred-Wegener-Institut,
Helmholtz-Zentrum für
Polar- und Meeresforschung
[AWI] und dem Polarinstitut
Paul-Émile Victor [IPEV])
111 ff.

B

Baffinbucht 24, 43, 224, 269
Baffininsel 17, 289
Bahía Paraíso 282
Bakterien 169, 213, 219 ff.
Balaena mysticetus 186
Balaenoptera acutorostrata
259
Balaenoptera borealis 259
Balaenoptera musculus 259
Balaenoptera physalus 259
Baltica 260
Banff-Nationalpark 148
Banksinsel 24
Banzarebank 293
Barents, Willem 39 ff.
Barentssee 90, 116 ff., 206,
229 ff., 249, 269
Bartenwal 184
Bärtierchen 169
Bartrobbe 222
basales Schmelzen
104, 151 ff.
Basislinie 245 f.
Bathyrinus australis 217
Baumgrenze 16
Beaufortsee 93, 220 ff.
Bedecktsamer 196
Beechey, Frederick William
45
Belgica-Expedition 48 ff.
Belgien 250
von Bellingshausen, Fabian
Gottlieb 50
Bellingshausensee 50, 138,
216 f.
Beluga 276

Benguelastrom 84 f.
Bergen 269
Bering, Vitus **41 ff.**
Beringbrücke 35 ff.
Beringia 179
Beringmeer 16 f., 206,
220 f., 269
Beringstraße 42
Berknerschelf 163
Betula glandulosa 202 f.
Billefjord 21
Biodiversitätskonvention
(Convention on Biological
Diversity, CBD) 254
bipolare Wippe 125
Blauflossenthunfisch 289
Blauwal 259
Blei 260
Blizzard 74 f.
Blubber 186, 258
Bombus polaris **187**
Boothiahalbinsel 13
Boreogadus saida 220, 287
Bristol Bay 267
bromierte Kohlenwasserstoffe
126
Bromnitrat 126
Brüllende Vierziger 88
Bubo scandiaca 183
Buckelwal 259
Bushveld-Komplex 268
Byrdgletscher 102

C

C14-Methode 209
Cabot, John 41
Caboto, Giovanni 41
Caboto, Sebastiano 41
Calanus finmarchicus 230
Calanus glacialis 230
Calanus hyperboreus 230
Calcit 231
CAMLN-Konvention 290
Canberra 255, 286
Cape-Darney-Polynia 79
CARA-Studie (Circum-Arctic
Resource Appraisal, CARA)
262
Carex bigelowii 203
Carex ensifolia 202
Cephus grylle 183
Ceratoserolis trilobitoides 212
Chaenocephalus aceratus 210
Chancellor, Richard 41
Channichthyidae 210
Chen caerulescens 222

Chile 250 f., 286
China 39, 243 ff., 272 ff.
Chionoecetes opilio 289
Chlornitrat 126
Chrom 268
Cloviskultur 36 f.
Clupea harengus 287
CNPC (chinesischer Ölkon-
zern) 257
Coburginsel 223
Coelestin 267
Colobanthus quitensis 197
Cook, Frederick A. 48
Cook, James 41 ff.
Copepoden 206
Coppermine River 43
Coregonus nasus 290
Corioliskraft 68 ff., 84 ff.
Corvus corax 183
CryoSat-2 134 f.
Cuverville Island 277

D

Dahurische Lärche 141
Dalton-Highway 149
Dänemark 242 ff.
Davisstraße 224
Deckschicht 92 ff.
Dekorateurkrabbe 222
Deschampsia antarctica 197
Deschnjow, Semjon Iwanow-
witsch 41
Deutsches Umweltbundes-
amt (German Environment
Agency) 253
Deutschland 243
Diamanten 260
Diamond Dust 67
Diavik-Diamantenmine 260
Dickkopfgroppen 289
Dickschnabellumme 183, 222
Dicrostonyx groenlandicus
194
diffuse Himmelsstrahlung 64
Dikson 274
Dinosaurier 22
Diskobucht 45
Dissostichus eleginoides
208, 290
Dissostichus mawsoni 290
Dobson-Einheiten 126
Dobson, Gordon 126
Doggerscharben 289
Doline 157 f.
Dotson-Getz-Graben 161
Double-Acting-Schiff 273

Drake Passage 21
Drakestraße 178 f.
Drew Point 146 f.
Dryas octopetala 203
von Drygalski, Erich **47 ff.**
Dsungarischer Zwerghamster
194
Dufekmassiv 268
Dumetocrinus antarcticus 217
Dumont d'Urville 51, 74
Dünneis 78

E

Eiderente 183
Eis-Albedo-Rückkopplung 25
Eisalgen 167 f., 207, 220 ff.
Eisbär **179 ff.**, 221 f.
Eisbärfell **189**
Eisbergtypen **94 f.**
Eisbildung **82 ff.**
Eisbohrkerne 124 f.
Eisen 205 ff.
Eisenerz 260
Eisenoxid 174
Eisfließgeschwindigkeit
100 ff.
Eisformen **32 f.**
eisfrei 137
Eishügel 141
Eiskalotte **33**
Eiskeile 139, 142
Eisklassen 274–301
Eiskrill 216
Eislinsen 169–301
Eismeergernele 287
Eisnadeln 78
Eisplättchen 78
Eisschild **33**, **95 ff.**
Eisschilde der Antarktis 95 ff.
Eisschilde Grönlands 95 ff.
Eisschlamm 78
Eisstrom 100 ff.
Eiswürmer 169
Eiszeit 25 ff.
Ekman, Vagn Walfrid 84
Ekman-Spirale 84
Ekman-Transport 84
Eldey 179
Elfenbeinmöwe 183
Ellesmereinsel 24, 37, 105,
224, 247
Ellsworth, Lincoln 54
Ellsworthsee 103
El Niño 161
Enderbyland 216
Energiesparmodus 209 ff.

Energieverbrauch 218 ff.
England 39 ff.
Entstehungsgeschichte
– Arktis **18 ff.**, **22 ff.**
– Antarktis **18 ff.**
Erdachse 62 ff.
Erdgas 259 ff.
Erdhörnchen 191
Erdneigung 16
Erdöl 259 ff.
Erdrotation 13
Erdwärme 100 ff.
Erignathus barbatus 222
Erik der Rote 38, 125
Eriophorum angustifolium
202
Eriophorum vaginatum 202
Erklärung von Ottawa 242
Ernährungs- und Landwirt-
schaftsorganisation der
Vereinten Nationen (Food
and Agriculture Organiza-
tion of the United Nations,
FAO) 286
erste deutsche Antarktis-
expedition 49
Erste Kamtschatkaexpedition
41 ff.
Erstes Internationales
Polarjahr 46
Eulen 183
Euphausia crystalloporias
216
Euphausia superba 216, 290
Eurasien 23
Eurasisches Becken 23, 115
Europa 14
Europäisches Nordmeer 16,
90
Exosphäre 61
Exxon Valdez 265

F

Farbwechsel 193 f.
Färöerinseln 269
Feinstaub 25
Feldspat 267
Ferrel, William 70
Ferrel-Zelle 70 ff.
Festeis 81
Festlandssockel 160 ff., 245 ff.
Filchnergraben 163
Filchner-Ronne-Schelfeis
103 f., 157
Filchnertrög 162 f.
Finnland 242 ff.

- Finnwal 259
 Firn 130 ff.
 Firnbildung **97**
 Fischereikommission für den Nordostatlantik (North East Atlantic Fisheries Commission, NEAFC) 288
 Fischereiverbot 288
 Flachwasserpolygonien 79
 Flachwurzler 141 f.
 Flechten 194 ff.
 Flohkrebse 181, 206 ff., 214, 220
 Flügelschnecken 230, 232 f.
 Fluorchlorkohlenwasserstoffe 126
 Foxebecken 224
 Foyn, Svend 259
 Fram 24, 48 ff.
 Framstraße 24, 79 ff., 115 ff.
 Franklin, John 45
 Frankreich 243 ff.
 Franz-Josef-Land 46, 241, 294
 freie Radikale 123 f.
 Frostschutzproteine 207
- G**
Gadus chalcogrammus 220, 287
Gadus macrocephalus 220, 287
Gadus morhua 228, 287
 Gakkel, Jakob Jakowlewitsch 23
 Gakkelrücken 23, 246
 Gamaland 42
 Gamburzewgebirge 30
 Gamburzew, Grigori Alexandrowitsch 30
 Gammaridea 181
Gammarus wilkitzkii 214
 Gänsevögel 183
 Gazprom 264
 Gauß 52
 Gefäßpflanzen **194 ff.**
 Gegenstrahlung 64
 genetische Adaption 218 ff.
 geografischer Nordpol **13**
 Geologischer Dienst der Vereinigten Staaten (US Geological Survey, USGS) 262
 geomagnetische Pole **13**
 geomagnetisches Koordinatensystem **13**
 George-VI.-Schelfeis 157
- Geothermie 100 ff.
 de Gerlache de Gomery, Adrien 52
 Gjøa 45
 Glasschwämme 217
 Glaziale 25
 gleichwarm 184
 Gletscher **32 ff.**, 95 ff.
 Gletscherhahnenfuß 199 ff.
 Gletschermühle 158 f.
 globale mittlere Oberflächentemperatur 112 ff.
 globaler Meeresspiegelanstieg 151 ff.
 globales Klimasystem **58 ff.**
 Glykoproteine 209
 Gold 260 ff.
 Golf 21
 Golfstrom 15, 85 ff., **118**
 Golf von Bohai 79
 Gondwana 19 ff.
 Gorbatschow, Michail 243
 GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment, Schwerefeldmessung und Klimaexperiment) 151 ff.
 GRACE-FO (Follow-on, Nachfolgeemission) 152
 Grafit 265
 Grauwal 219 ff.
 Great Rift Valley 20
 Grönland 16, 37 ff., 90, 125, 152 ff., 203, 234, 242 ff., 257 ff.
 Grönlandhai **208**
 Grönländischer Heilbutt 289
 Grönlandsee 122
 Grönlandwal 186, 276
 Großbritannien 243 ff.
 Große Maräne 290
 Großer Bär 16
 Grundstoffwechsel 227
 Gründungslinie 105
 Gryllsteite 183
 Grytviken 251
 Gydanhalbinsel 264
- H**
 Hadley, George 70
 Hadley-Zelle 70 ff.
 Halbmondinsel 281
 haline Konvektion 86 ff.
 Halokline 94 ff., 117
 Hämerithrin 211
 Häemocyanin 211
 Hämoglobin 210 ff.
- Hanseatic 240
 Hansinsel 247
 Hapag-Lloyd 271
 Haynesgletscher 160
 Heckaufschleppes 259
 Helheimgletscher 106, 171
 Hermelin 185 ff.
 Herschel Island 236
 Heulende Sechziger 88
Hippoglossoides platessoides 289
Hippoglossus stenolepis 287
 HMS Erebus 45
 HMS Terror 45
 Hocharktis **141 ff.**, 196
 Hohe See 245 ff.
 Holland 39 ff.
Homo sapiens 34 ff.
 Huddle 185
 Hudsonbucht 16, 222
 Hudson Resources Inc. 267
 von Humboldt, Alexander 51
 Humboldtigletscher 172
 Hurlgruten-Reederei 269
 hydrostatischer Druck 155
- I**
 Icy Cape 43 ff.
 Ikertivaqgletscher 171
 Ilulissat 279
 Ilulissat-Deklaration 244
 Independencia 1 37
 Indien 20, 39, 243 ff.
 Inexpressible Island 257
 Inlandeis **33**
 Innere Gewässer 244 f.
 Interglaziale 25
 International Arctic Science Committee (IASC) 56
 Internationaler Gerichtshof 249
 Internationale Kommission für den Schutz des atlantischen Thunfischs (International Commission for the Conservation of Atlantic Tuna, ICCAT) 288
 Internationale Konvention zur Regulierung des Walfangs 259
 Internationale Meeresbodenbehörde (International Seabed Authority, ISA) 249 ff.
 internationales Meeresschutzübereinkommen MARPOL (International Convention for the Prevention of Marine Pollution from Ships) 284
 Internationaler Ausschuss für sauberen Transport (International Council on Clean Transportation) 275
 Internationaler Rat für Meeresforschung (International Council for the Exploration of the Sea, ICES) 289
 Internationaler Seegerichtshof 249
 Internationaler Verband der Reiseveranstalter mit dem Zielgebiet Antarktis (International Association of Antarctica Tour Operators, IAATO) 252 ff., 276 ff.
 Internationale Seeschiffahrtsorganisation (International Maritime Organization, IMO) 245 ff., 275, 284
 Internationale Studiengesellschaft zur Erforschung der Arktis mit dem Luftschiff 54
 Internationales Übereinkommen von 1974 zum Schutz des menschlichen Lebens auf See (International Convention for the Safety of Life at Sea, SOLAS) 284
 Internationale Walfangkommission 259 ff.
 Iqaluit 291
 Island 16, 38, 198, 242 ff., 259
 International Arctic Science Committee (IASC) 56
 Islandmuschel 209
 Italia 54
 Itkillik River 143
- J**
 Jackson, Frederick George 50
 Jakobshavnneisstrom 101 ff., 170 f.
 Jakobshavnigletscher 170 f.
 Jamal 150, 257, 264 ff.
 Jamal LNG 264
 Jana 34
 Japan 243 ff., 259
 Jennissee 42, 264 ff.
 Jetstream 73 ff., 119 f., 166
 Johansen, Hjalmar 50
 Jonesschelfeis 155
- K**
 Kabeljau 227
 Kaiserpinguin 185 f.
 kalben 12, 96, 106
 Kalbungsfront 95 ff.
 Kalifornienstrom 85
 Kalkalgen 228 f.
 Kalkgestein 27
 Kalziumkarbonat 231
 Kamtschatka 42
 Kamtschatkakrabbe 289
 Kanada 16, 242 ff.
 Kanadabecken 94
 Kanarenstrom 85
 Kanebecken 222 ff.
 Kangerlussuaqgletscher 171
 Kap-Darnley-Polynia 86
 Kap Morris Jesup 111
 Kapstadt 286
 Kap Tscheljuskin 42
 Karasee 79, 119
 Karbon 22
 Karibu 178 ff.
 Karotinoide 166
 katabatische Winde 75 ff., 88
 Kellett, Henry 45
 Kennedykanal 247
 Kerguelen 258
 Kerguelenwirbel 87, 216
 Kieselalge 214
 King George Island 225
 Kirkenes 269
 Kirschvink, Joseph L. 25
 Klappmützenrobbe 222
 Kleiner Bär 16
 Klimageschichte **25 ff.**, 124 f.
 Klimarahmenkonvention (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) 254
 Klimawandel **110 ff.**, 130 ff., 218 ff., 240 ff.
 Knöllchenknöterich 198 f.
 Koge-Bugt-Gletscher 171
 Kohle 265
 Kohlendioxid 25 ff., 61 ff., 112 ff., 146 ff., 230 ff.
 Kohlensäure 231
 Kohlenstoffspeicher 146 f.
 Kohlergletscher 160
 Kola 90, 269, 273
 Koldewey, Carl Christian 46
 Kolkrabe 183
 Kolyma 42
 Kommission zur Erhaltung der lebenden Meeresschätze
- der Antarktis (Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources, CCAMLR) 252 ff., 290
 Kondensation 66 f.
 Kondensationsenergie 68
 Königin-Maud-Land 30, 153, 251, 268
 Königskrabben 181, 290, 292
 Königspinguine 205
 Kontinentalverschiebung 18 ff.
 Konvergenzzone 17
 Korkenzieherströmung 84
 Körperkerntemperatur 184
 Krabbenfresserrobbe 180, 206 ff., 258
 Kraken 181
 Krasnojarsk 265
 Kreuzfahrttourismus **276 ff.**
 Krill 205 ff., **224 ff.**
 Krim 260 ff.
 Kryokonit 167
 Kryolith 265
 Kryosphäre 130
 Kupfer 260 ff.
 Küstenmeer **244 ff.**
 Küstenpolynien 78 ff.
 Küstenseeschwalbe 182 f.
 Kvalsund 267
- L**
 Labrador 16
 Labradorsee 24, 90, 117, 269
 Lachgas 25, 112
 LADE 280
Lagopus muta 183
 Lake 78 ff.
 Lake Minnewanka 148
 Lamplughgletscher 80
 Landhebung 173
 Landsenkung 173
 Lappland 265
 Laptewsee 79, 232
 Lärchenwälder 141
Larix gmelinii 141
 Larsen A 217
 Larsen B 105, 217
 Larsen C 105
 Larsen, Carl Anton 154, 251
 Larsenschelfeis **154**
 latente Wärme 64
Laternula elliptica 209
 Laurasia 22 f.
 Laurentia 260
- Laurentische Platte 19
 lecithotrophe Ernährung 213
 Lemminge 185 ff., 234
 Lenadelta 35, 145
 Leuchtgarnelen 225
 von Liébana, Beatus 39
Limacina helicina antarctica 230
Limopsis marionensis 226
Limosa lapponica 183
 Lindblad Explorer 269
Liothyrella uva 226
Liparis spp. 289
Lobodon carcinophaga 206
 Lodde 220, 287
 Lofoten 15
 Lomonossow, Michail Wassiljewitsch 23
 Lomonossowrücken 23 ff., 246 ff.
 Luftfeuchtigkeit 66
 Luft- und Seenotrettung (Search and Rescue, SAR) 286 ff.
 Luftzirkulation 68 ff.
 Lutwidge, Skeffington 39
- M**
 Mackenziedelta 24
 Mackenzie River 35 ff.
 Madrid-Protokoll 253, 268
 Maerlbänke 233
 Mærsk 241
 Magnetfeld 13
 magnetische Feldlinien 13
 magnetischer Nordpol **13**
 magnetischer Südpol **13**, 51
 Makarowbecken 94
 Makganyene-Vereisung 27
 Makrofauna 204
Mallotus villosus 220, 287
 Malmberget 265
 Mammot 34
 Marambio 280
 de Margerie, Christophe 272
 Marie-Byrd-Land 20
 marines Eis 174
 Marinoische Eiszeit 27
 Marmor 265
 Larsen C 105
 Massenbilanz 151 ff.
 Massenbilanzgleichung 151
 McClure, Robert 45
 McDonaldinseln 258
 McMurdoschelfeis 155
 McMurdo Sound 204
- Mercer, John H. 154
 Meereis **32 ff.**, **78 ff.**, 110 ff., 131
 Meereisausdehnung 134 ff.
 Meereisrückgang 218 ff., 240 ff.
 Meeresschnecken 181
 Meeresschutzgebiete 293
 Meeresströmungen **83 ff.**, 174
Megaptera novaeangliae 259
 mehrjähriges Eis 135
 Meiofauna 204
 Melanin 194
Melanogrammus aeglefinus 287
 Melatonin 194
Melosira arctica 214
 Melvilleinsel 45
 Mercator, Gerhard 39
 Mertzgletscher 79
 Mesosphäre 61
 Methan 25 ff., 61 ff., 112, 146 ff.
 Methaneruption 150
 Mexiko 19
 Mikrofauna 204
 mineralische Rohstoffe 260 ff.
 Mittelalterliche Klimaanomalie 165
 Mittelnorwegischer Schelf 261
 Mittelozeanischer Rücken 23
 Mittleres Karbon 21
 Molybdän 260 ff.
 Montgomery, Edward Gerrard 199
 Montgomery-Effekt 199
 Montrealer Protokoll 129
 Moose 194 ff.
 Moostierchen 181
 Moratorium zum Schutz der Großwale 259
 Moschusochse 178 ff., 234
 Möwen 183
 Münchner Sicherheitskonferenz **242**, 294
 Muostach 145
 Murmansk 267 ff.
 Muscheln 181, 209, 226
- N**
 Nacktsamer 196
 Nahrungsnetz 206 ff.
 Nansen, Fridtjof 24, 47 f.

- Nansenbecken 94
 Nansenschelfeis 156
 Naresstraße 37, 247
 Narwal 276
 NATO 245
 Neigungswinkel 31
 Neoeskimos 36
Neolithodes yaldwini 290
 Neufundland 106
 von Neumayer, Georg 46
 Neumayer III 67, 280
 Neuseeland 250, 286
 Nickel 260 ff.
 Nilas 32
 Nilsen, Thorvald 48
 Nimrod-Team 156
 Nioghalvfjordsfjordgletscher 171
 Nobile, Umberto 54
 Nordatlantikstrom 16, 90, 118
 Nordatlantisches Tiefenwasser 90 ff.
 Nordenskiöld, Adolf Erik 42 f.
 Nordhimmel 16
 Nördlicher Halsbandlemming 194
 Nördlicher Seeweg 271 ff.
 nordost-grönländischer Eisstrom (North East Greenland Ice Stream, NEGIS) 103
 Nordostpassage 39, 41, 43, **240–301**, 271–301
 Nordostpazifik 287
 Nordpolarmeer 14
 Nordwestatlantische Fischereiorganisation (Northwest Atlantic Fisheries Organization, NAFO) 288
 Nordwestpassage 39 ff., 269 ff.
 Nordwestpazifik 287
 Nordwest-Territorien 260
 Norge 54 f.
 Norilsk 265
 normierter differenzierter Vegetationsindex (NDVI) 235
 North Carolina 173
 Northern Dynasty Minerals 267
 North Slope 144, 235
 North-Slope-Becken 261
 Norwegen 15, 242 ff., 259
 Norwegischer Strom 90
Notothenia rossii 253
 Notothenioidei 181
 Novatek 264
 Nowaja Semlja 117, 263
 Nunavut 223, 289
 Nussir ASA 267
 Nuuk 279
 Ny-Ålesund 111, 257
- O**
 Obbusen 264
 Oberflächenenergie 97
 Oberflächenmassenbilanz 98 ff.
 Oberjura 22
 Obliquität 16
 Ochotsk 41
Odobenus rosmarus divergens 221
Odontaster validus 213
 Ogilvie Mountains 184
 Olivin 265
Oncorhynchus nerka 267, 287
Ophionotus victoriae 226
 Ordovizium 19
Oregonia gracilis 222
 Österreichisch-Ungarische Nordpolarexpedition 46
 Ostgrönlandstrom 91
 Ostsibirische See 232, 274
Oxyria digyna 199, 235
 Ozeanversauerung **218 ff.**
 Ozon 61 ff., 123
 Ozonloch **110 ff.**
- P**
 Packeis 78 ff.
Pagophila eburnea 183
 Paläoeskimos 36 f.
 Paläogenetik 35
 Palladium 265
Pandalus borealis 287
 Pangäa 22
Paralithodes camtschaticus 289
Paralomis birsteini 290
Pareledone charcoti 211
 parts per million 27
 Passat 68 ff.
 Patrulla Antártica Naval Combinada (PANC) 286
 Pazifischer Heilbutt 287
 Pazifischer Kabeljau 220, 287
 Pazifischer Pollack 220 ff., 287
- Peary, Robert 48
 Pearyland 37
 Pensacolaberge 268
 Perlmuttwolke 126 f.
 Permafrost **32 ff.**, 122, **139 ff.**, 194 ff., 259 ff.
 – kontinuierlicher 139 ff.
 – nicht kontinuierlicher 139 ff.
 – sporadischer 139 ff.
 Permanente Teilnehmer 242
 Perustrom 85
 Peter der Große 41
 Petermann, August Heinrich 46
 Petermannfjord 170
 Petermanngletscher 133, 170
 Pfannkucheneis 32, 78 ff., 135
 Pfuhlschnepfe 183
 Phipps, Constantine J. 39
Phodopus sungorus 194
 Phosphat 196
 pH-Wert 231 ff.
 Phytoplankton 225 ff.
 Pilze 213
 Pine-Island-Gletscher 152 ff.
 Pine-Island-Graben 161
 Pingo 141
 Pinguine 179 ff.
Pinguinus impennis 179
 Piri Reis 40
 Piri-Reis-Karte 41
 Piteraqq 76 f.
 Platin 260 ff.
 plattentektonische Prozesse 18
 Plesiosaurier 22
Pleuragramma antarctica 206 ff.
 Point Barrow 45
 Polarbirkenzeisig 183 f.
 Polar Code (International Code for Ships Operating in Polar Waters) 284
 Polardorsch 220 ff., 287
 polare Ostwinde 70 ff.
 polarer Gigantismus 212
 polare Seidenstraße 257
 Polare Stratosphärenwolke 126
 Polarfront-Jetstream 73, 119
 Polarfuchs 178 f.
 Polarjet 73
 Polar-Jetstream 72 f.
 Polarklasse 284
- Polarkreis 14 ff.
 – Durchmesser 14
 – nördlicher 14
 – südlicher 14
 Polar Night Jet 71 ff.
 Polarstern 164
 Polarweide 199
 Polarwirbel 73
 Polarzelle 70 ff.
 Polen 243
 Polumkehr **13**
Polygonum viviparum 198
 Polynien **78 ff.**, 136 ff., 205
 Popelgletscher 160
 Porcupine-Karibu 184
 positive Rückkopplungen 63, 110 ff.
 Potter Cove 225
 Primärproduktion 204 ff., 220 ff.
 Prinz-Charles-Berge 268
 Prinz-Eduard-Inseln 293
 Prinzessin-Martha-Küste 50
 Prinz-Gustav-Schelfeis 154
 Prinz-William-Sund 265
 Prirazlomnaja 263
 Programm zur Beobachtung und Bewertung der Arktis (Arctic Monitoring and Assessment Programme, AMAP) 17, 243
 Prolactin 194
 Propellerschlitten 54
 Proteinstoffwechsel 208
 Punta Arenas 286
Pusa hispida 222
 Putin, Wladimir 262
 Pycnogonida 212
Pyrola grandiflora 199
- Q**
 Qaortoq 279
 Queen Elizabeth Land 268
- R**
 Rädertierchen 169
 Radiokarbonmethode 209
Rangifer tarandus 184
Ranunculus glacialis 199
Ranunculus pygmaeus 199
 Rat der Leiter der nationalen Antarktisprogramme (Council of Managers of National Antarctic Programs, COMNAP) 255, 286
 Raubmöwen 183
 Raubvögel 183
 Recoveryeisstrom 103
 Red Dog Mine 265
 Regelung der Tätigkeiten im Zusammenhang mit mineralischen Ressourcen der Antarktis (Convention on the Regulation of Antarctic Mineral Resource Activities, CRAMRA) 254
 Regen 131
 Regionale Organisationen für das Fischereimanagement (Regional Fisheries Management Organisations, RFMOs) 288 ff.
 Reine 15
Reinhardtius hippoglossoides 287 ff.
 Rentier 184 ff., 234
 Rhenium 267
Rhodostethia rosea 183
 Riedgräser 147
 Riesenalk 179
 Ringelrobben 222
 Robben 180 ff., 253
 Robbenöl 258
 Rodinia 19 ff.
 Roi-Baudouin-Schelfeis 157
 Ronneschelfwasser 163
 Rosenmöwe 183
 Rosmarinheide 202
 Rosneft 264
 Ross, James Clark 44 ff., 251
 Rossby, Carl-Gustaf Arvid 73
 Rossby-Wellen 72–301
 Rosselli, Francesco 39
 Rossinsel 51
 Rossmeer 20 ff., 78 ff., 86 ff., 138 ff., 216, 257
 Rossrobbe 180, 258
 Rossschelfeis 79, 157
 Rosswirbel 87
 Rotalgen 233
 rote Blutkörperchen 210 ff.
 Rotlachs 267, 287
 rotten ice 83
 Royal Arctic Line 269
 RuBisCO 201
 Ruderfußkrebse 206, 214,
 Russellgletscher 168
 Rüsselwürmer 211
 Russland 16, 179 ff., 240 ff., 260 ff.
- S**
 Saami 194
 Sabetta 264 ff.
Saccharina latissima 232
 Sagavanirktok River 149
 Saint Andrews Bay 205
 saisonale Meereisdecke 14
Salix polaris 199
Salmo salar 290
Salpa thompsoni 216
 Salpe 216
Salvelinus alpinus 290
 Salzlake 32, 79 ff.
 Sandwichinseln 17
 Saqqaq 37
 Sastrugi 60
 Sattelrobben 189, 222
 Saudi-Arabien 264
 Scheibenbäuche 289
 Scheidenwollgras 202
 Schelfeis **33**, **104 ff.**
 Schelfwasser 86 ff.
 Schellfisch 287
 Schlangensterne 226
 Schmelzrate 157
 Schmelzwasser 110 ff., **156 ff.**
 Schmelzwasserfilm 100
 Schmelzwassersee 155 ff.
 Schmelzwassertümpel 82 ff.
 Schnee 96–301, **130 ff.**
 Schneialgen 166
 Schneeball-Erde 25 ff.
 Schneeeulen 183 ff.
 Schneegänse 222
 Schneehasen 191 ff.
 Schneehühner 185 ff.
 Schneekrabbe 289
 Schneekristalle 96 f.
 Schneeverdichtung **97**
 Schröder-Stranz, Herbert 53
 Schwalbenmöwe 183
 Schwämm 180
 Schwarzer Heilbutt 287
 Schwarzer Seehecht 208, 290 ff.
 Schwarzflossen-Eisfisch 181, 210
 Schwebegarnelen 214
 Schweden 242
 Schwerefeld 174
 Schweröl 275 ff.
 Schwertwal 228
 Scott, Robert Falcon 53, 156
 Scotiabogen 258
 SeaLegacy 260
- Seeelefanten 205
 Seeigel 227, 232
 Seeleopard 180, 258
 Seelilie 217
 Seen unter dem Eis 103
 Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen (United Nations Convention on the Law of the Sea, UNCLOS) 244, 245, 288
 Seesaibling 290
 Seescheiden 181, 217
 Seestern 180
 Seetang 234
 Seevögel 183
 Seiwal 259
 Seltene Erden 259
 Seymourinsel 280
 Shackleton, Ernest 156
 Shackletonschelfeis 157
 Sibirien 16, 35 ff., 131
 Siedlungsgeschichte Arktis **34 ff.**
 Silber 265 ff.
 Silikatgestein 27
 Skandinavien 16, 38, 131 ff.
 Smithgletscher 160
 Sueskanal 271
 Summit Camp 224
 Superkontinent 19 ff.
 Sverdrup, Otto 50
- T**
 Tafeleisberg **95**
 Taibassbecken 274
 Taiga 184
 Taimyr 34, 42, 194, 274
 Tasiilaq 77
 Tasmanian Passage 30
 Tasmanien 21
 Temperaturfenster 226
 Terra Nova Bay 78
Themisto gaudichaudii 216
 thermische Ausdehnung 114
 thermische Konvektion 86 ff.
 thermodynamisches Wachsen 79
 Thermoerosion **142**
 thermohaline Zirkulation **85 ff.**, 114 ff.
 Thermokarstsee 142
 Thermoregulation 193
 Thermosphäre 150
 Thermosphäre 61
 Thorsteinsson, Thorsteinn 125
 Thule-Kultur 38
 Thunfisch 228
Thunnus thynnus 289
- Strandvögel 183
 Stratosphäre 61 ff., 126 ff.
Strongylocentrotus droebachiensis 232
 Sturmvögel 205
 Sturische Eiszeit 27
 St. Vincent und die Grenadinen 259
 Subantarktische Pelzrobbe 258
 Sublimation 83, 151
 Subtropen-Jetstream 70 ff.
 subtropische Ozeanwirbel 85
 Südafrika 84, 268 ff.
 Südafrikanische Union 250
 Südgeorgien 17, 205, 226, 251, 258
 Südkorea 254, 259
 Südliche Orkneyinseln 290
 Südlicher Ozean 14 ff.
 Südliche Shetlandinseln 226, 258
 Südpolarfront 253
 Südpolarmeer 14, **87 ff.**

Thwaitesgletscher 102, 152 ff.
Thysanoessa macrura 216
 Timan-Petschora-Becken 261
 Tiniteqilaq 76
 Toll, Eduard 274
 Total 264
 Tottengletscher 162 ff.
 Tourismus der letzten Chance 276 ff.
 Trans-Alaska-Pipeline 149
 Transantarktisches Gebirge 18 ff., 268
 Transpolardrift 50, 79
 Treibhauseffekt 64
 Treibhausgase 61 ff., 111 ff.
Triclops nybelini 289
Trophonella longstaffi 209
 Troposphäre 61 ff., 126
 Trottellummen 220
 Trump, Donald 294
 Tschirikow, Alexej Iljitsch 142
 Tschuktschensee 92, 206, 220 ff.
 Tundra 131, **184 ff.**
 Tundrenfeuer 144

U

Übereinkommen über die Erhaltung der lebenden Meeresschätze der Antarktis (Convention on the Conservation of Antarctic Marine Living Resources, CAMLR Convention) 253
 Übereinkommen zur Bekämpfung der Wüstenbildung (United Nations Convention to Combat Desertification in Those Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, Particularly in Africa, UNCCD) 254
 Übereinkommen zur Erhaltung der antarktischen Robben (Convention on the Conservation of Antarctic Seals, CCAS) 253
 ultraviolette Strahlung 64, 123
 Umweltschutzprotokoll zum Antarktisvertrag (Protocol on Environmental Protection to the Antarctic Treaty) 253 f.

UN Fish Stocks Agreement 288
 United States Geological Survey (USGS, Geologischer Dienst der Vereinigten Staaten) 241
 UN-Kommission zur Begrenzung des Festlandssockels (Commission on the Limits of the Continental Shelf, CLCS) 246
 Untereisvulkane **20**
 untermeerische Schwellen 91
 Unterperm 21
 Upernavikeisstrom 171
 Uran 267
Uria aalge 220
Uria lomvia 183, 222
 USA 241 ff., 271
 Ushuaia 286
 Uummannaqfjord 49

V

Vandenberg 151
 Vasenschwämme 217
 Vega 42
 Venta Mærsk 272
 Venus 71
 Venustransit 51
 Verankerungskette 114 f.
 vereinbarte Maßnahmen zur Erhaltung der antarktischen Fauna und Flora (Agreed Measures for the Conservation of Antarctic Fauna and Flora, CAFF) 243, 253
 Vereinigung der in der Arktis tätigen Schifffahrtsreiseunternehmen (Association of Arctic Expedition Cruise Operators, AECO) 278
 Vergletscherungen 25
 verrottetes Eis 83
 Vertrag von Tordesillas 39
 Viking Sky 283
 Viktorialand 21, 51, 197
 Viren 169, 213, 219–301
 Vortizität 72
 VostokCoal 274

W

Wale 186 ff.
 Walfang **258 ff.**
 Walkadaver 219
 Walrosse 191, 221 ff., 276
 Waltran 258

Wankor-Ölfelder 264
 Ward-Hunt-Eissschelf 105
 Wärmeaustausch 188
 Warmzeit 25 ff.
 Washington 259
 Wasseräquivalent 98, 131 ff.
 Wasserdampf 25 ff., 62
 Wasserisotope 28
 Wasserstoffionen 231
 Wassertreter 183
 wechselwarme Organismen 184, 204 ff.
 Weddell, James 50
 Weddellmeer 20 ff., 86 ff., 103 f., 138 ff., 251
 Weddellrobbe 180, 258
 Weddellwirbel 87, 162
 Wegener, Alfred 18, 54
 Weißblutische 181, 210
 Weiße Silberwurz 203
 Wellington 286
 Weltklimarat 137 ff., 228
 Weltorganisation für Meteorologie (World Meteorological Organization, WMO) 60
 Westantarktisches Riftsystem 20
 Westaustralstrom 85
 westliche Randströme 85
 Westsibirisches Becken 261
 Westspitzbergenstrom 90 ff., 115 ff.
 Westwindzone 71
 Weyprecht, Carl 46
 Whillanseisstrom 102
 White Mountain 267
 Whiteout 75
 Wikinger 37 ff.
 Wilde Fünfziger 88
 Wilkes, Charles 51
 Wilkesland 51, 98, 153
 Wilkinsschelfeis 155
 Willoughby, Hugh 41
 Wimperntierchen 169
 Windsysteme 68 ff.
 Wissenschaftlicher Ausschuss für Antarktisforschung (Scientific Committee on Antarctic Research, SCAR) 56, 252, 255, 281
 Witwatersrand 268
 Wolf 179
 Wolken 67 ff., 116
 Wollgras 200 ff.
 Wordieschelfeis 155
 Wostok 60 ff.

Wostoksee 103
 von Wrangel, Ferdinand 42

X

Xema sabini 183
 Xue Long 2 257

Z

Zachariaseisstrom 171
 Zentraljakutien 143
 Zink 260 ff.
 Zirkulationszellen 70 ff.
 Zirkumpolares Tiefenwasser 79 ff.
 zirkumpolare Westwinde 88
 Zitronenfjord 267
 Zooplankton 206 ff., 220 ff.
 Zuckertang 232
 Zweite Kamtschatkaexpedition 42 f.
 Zweites Internationales Polarjahr 55
 Zwergbirke 202 f.
 Zwerghahnenfuß 199
 Zwergrwal 217, 259

Partner

Future Ocean: Im Kieler Forschernetzwerk bündeln Meeres- und Wirtschaftswissenschaftler, Mediziner, Mathematiker sowie Rechts-, Sozial- und Gesellschaftswissenschaftler ihr Fachwissen und untersuchen den Ozean- und Klimawandel. Insgesamt haben sich mehr als 250 Forschende der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU), des GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel, des Instituts für Weltwirtschaft (IfW) und der Muthesius Kunsthochschule zusammengeschlossen, um Handlungsoptionen für einen nachhaltigen Schutz und Nutzen des Ozeans zu entwickeln.

IOI: Das International Ocean Institute wurde 1972 als gemeinnützige Nichtregierungsorganisation von Elisabeth Mann Borgese gegründet. Es besteht aus einem Netzwerk von verschiedenen Niederlassungen, die über die ganze Welt verteilt sind, und hat seinen Hauptsitz in Malta. Das IOI setzt sich für eine friedliche und nachhaltige Nutzung des Ozeans ein.

KDM: Das Konsortium Deutsche Meeresforschung bündelt die Expertise der deutschen Meeresforschung. Seine Mitglieder setzen sich aus allen Forschungseinrichtungen zusammen, die in Meeres-, Polar- und Küstenforschung aktiv sind. Ein Hauptanliegen des KDM ist, die Interessen der Meeresforschung gegenüber nationalen Entscheidungsträgern und der EU sowie gegenüber der Öffentlichkeit gemeinsam zu vertreten.

mare: Die Zeitschrift der Meere wurde 1997 von Nikolaus Gelpke in Hamburg gegründet und erscheint alle zwei Monate in deutscher Sprache. Mare rückt den Stellenwert, den das Meer als Lebens-, Wirtschafts- und Kulturraum für den Menschen bietet, in das Bewusstsein der Öffentlichkeit. Neben dem Magazin, das vielfach für seine hochwertigen Reportagen und Fotostrecken ausgezeichnet wurde, bringt der mareverlag zweimal im Jahr ein Buchprogramm heraus.

Danksagung

Die Erstellung einer Publikation wie die des „World Ocean Review“ ist in erster Linie ein Unterfangen, das mit hohem Aufwand verbunden ist. Daher gilt mein Dank zuerst allen beteiligten Wissenschaftlern, die an dieser Ausgabe mitgewirkt haben. Ein herzliches Dankeschön auch den Organisationsteams des Forschernetzwerks Future Ocean und des Konsortiums Deutsche Meeresforschung für die reibungslose Kommunikation und die Arbeit hinter den Kulissen.

Dank gebührt darüber hinaus insbesondere auch der Wissenschaftsjournalistin Sina Löschke, die den Texten die allgemeine Verständlichkeit gegeben hat, die es nun auch den „Nicht-Wissenschaftlern“ ermöglicht, den roten Faden nicht aus den Augen zu verlieren. Im Zusammenwirken mit Anna Boucsein, die für die Gestaltung verantwortlich war, Petra Koßmann und Anastasia Hermann, die die Bildredaktion innehatten, und Dimitri Ladischensky, der das Lektorat betreute, möchte ich zuletzt auch Jan Lehmköster herzlich danken, der als Gesamtprojektleiter auf maribus-Seite den „World Ocean Review“ von Beginn an federführend begleitet hat.

Nikolaus Gelpke

Geschäftsführer maribus gGmbH

Abbildungsverzeichnis

Umschlagabbildung: Tobias Gelston, TobyG/shutterstock.com; S. 1 (Karte Arktis): maribus; S. 9 v.o.n.u.: plainpicture/Bernd Schumacher; Nick Cobbing; Nick Cobbing; plainpicture/Minden Pictures/Hiroya Minakuchi; Nick Cobbing; S. 10/11: plainpicture/Bernd Schumacher; Abb. 1.1: miralex/Getty Images; Abb. 1.2: nach Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/North_Magnetic_Pole#/media/File:Magnetic_North_Pole_Positions_2015.svg; Abb. 1.3: nach Diercke-Weltatlas, Westermann; Abb. 1.4: Leo Patrizi/Getty Images; Abb. 1.5: maribus; Abb. 1.6: nach Arbeitskreis Geologie und Geophysik der Polargebiete der Deutschen Gesellschaft für Polarforschung; Abb. 1.7: nach Arbeitskreis Geologie und Geophysik der Polargebiete der Deutschen Gesellschaft für Polarforschung; Abb. 1.8: nach „The Guardian“, <https://www.theguardian.com/world/2017/aug/12/scientists-discover-91-volcanos-antarctica>; Abb. 1.9: Eye Ubiquitous/UIG/Getty Images; Abb. 1.10: nach Arbeitskreis Geologie und Geophysik der Polargebiete der Deutschen Gesellschaft für Polarforschung; Abb. 1.11: Jørn Hurum/NHM/UIO; Abb. 1.12: maribus; Abb. 1.13: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR); Abb. 1.14: nach Lozán et al.; S. 28/29: nach Martin Künsting/Alfred-Wegener-Institut; Abb. 1.15: Kelly Hogan/Britisch Antarctic Survey; Abb. 1.16: Bernhard Edmaier/Science Photo Library; Abb. 1.17: Alfred-Wegener-Institut/IceCam/Stefan Hendricks; Abb. 1.18: Ole Jorgen Liodden/naturepl.com; Abb. 1.19: Michel Roggo/naturepl.com; Abb. 1.20: nach Nielsen et al.; Abb. 1.21: George R. King/National Geographic Image Collection; Abb. 1.22: Private Collection/Look and Learn/Bridgeman Images; Abb. 1.23: akg-images/Album/Prisma; Abb. 1.24: Heritage Images/Fine Art Images/akg-images; Abb. 1.25: Heritage Images/Getty Images; Abb. 1.26: Interfoto/National Maritime Museum, London; Abb. 1.27: nach Lüdecke; S. 48: Online: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Amundsen_in_fur_skins.jpg (Stand: 10/2018); S. 49: akg-images; Abb. 1.28: ullstein bild; Abb. 1.29: Johannes Georgi, Archiv des Alfred-Wegener-Instituts; Abb. 1.30: Tallandier/Bridgeman Images; S. 58/59: Nick Cobbing; Abb. 2.1: Ted Scambos, NSIDC; Abb. 2.2: maribus; Abb. 2.3: NASA/GSFC/Science Photo Library; Abb. 2.4: nach NASA/Goddard Space Flight Center, Scientific Visualization Studio; S. 65: nach IPCC, 2013; Abb. 2.5: nach Buchal et al.; Abb. 2.6: Babak Tafreshi/Science Photo Library; Abb. 2.7: nach Hamburger Bildungsserver, Klimawandel; Abb. 2.8: maribus; Abb. 2.9: nach Martin Künsting/Alfred-Wegener-Institut; Abb. 2.10: nach ClimateReanalyser.org; Abb. 2.11: Yann Arthus-Bertrand/Getty Images; Abb. 2.12: [M] mare, Foto © Jacob Aue Sobol/Magnum Photos/Agentur Focus; Abb. 2.13: maribus; Abb. 2.14: Landsat 8, USGS, 2014;

Abb. 2.15: maribus; Abb. 2.16: Michelle Theall/Aurora/laif; Abb. 2.17: nach meereisportal.de; Abb. 2.18: Stefan Hendricks/Alfred-Wegener-Institut; Abb. 2.19: maribus; Abb. 2.20: nach NASA; Abb. 2.21: nach Schauer et al.; Abb. 2.22: nach Vernet et al.; Abb. 2.23: nach Rintoul; Abb. 2.24: maribus; Abb. 2.25: nach Martin Künsting/Alfred-Wegener-Institut; Abb. 2.26: nach Wikipedia; Abb. 2.27: NASA/Operation IceBridge; Abb. 2.28: nach Britannica; Abb. 2.29: Petr Dvořák/Alamy Stock Foto; Abb. 2.30: nach Centre for Ice and Climate/University of Copenhagen; Abb. 2.31: maribus, Vorlagen erstellt durch Ingo Sasgen/Alfred-Wegener-Institut; Abb. 2.32: Morlighem et al.; Abb. 2.33: Copernicus Sentinel data (2015)/ESA; Abb. 2.34: nach Programme for Monitoring of the Greenland Ice Sheet; Abb. 2.35: nach Martin Künsting/Alfred-Wegener-Institut; S. 108/109: Nick Cobbing; Abb. 3.1: © Bryan and Cherry Alexander/ArcticPhoto; Abb. 3.2: nach ECMWF, Copernicus Climate Change Service; Abb. 3.3: nach IPCC, „Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways“; Abb. 3.4: nach Carbon-Brief; Abb. 3.5: nach Zanna et al.; Abb. 3.6: McLane Research Laboratories; Abb. 3.7: nach Lind et al.; Abb. 3.8: nach NASA; Abb. 3.9: Nick Cobbing; Abb. 3.10: Julie Cozic, NOAA ESRL CSD; Abb. 3.11: Zachary Lawrence (NMT), stratobserve.com; Abb. 3.12: nach NASA Ozone Watch; Abb. 3.13: J. G. Paren/Science Photo Library; Abb. 3.14: Jan Vincent Kleine/Alfred-Wegener-Institut; Abb. 3.15: ddp images/Picture Press/Per-Andre Hoffmann; Abb. 3.16: nach World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project; Abb. 3.17: nach Marcel Nicolaus/Alfred-Wegener-Institut; Abb. 3.18: © Jeremy Harbeck/NASA IceBridge; Abb. 3.19: ESA/AOES Medialab; Abb. 3.20: nach Arctic Report Card 2018; Abb. 3.21: nach Arctic Report Card 2018; Abb. 3.22: © Jim Thomson; Abb. 3.23: nach Rainville et al.; Abb. 3.24: © Volkmar Kochan/rbb/Alfred-Wegener-Institut; Abb. 3.25: © Jaroslav Obu; Abb. 3.26: © Stefan Kruse/Alfred-Wegener-Institut; Abb. 3.27: nach Soil Atlas of the Northern Circumpolar Region; Abb. 3.28: © Matt Snyder/Alaska Division of Forestry/AP/dpa; Abb. 3.29: nach REKLIM-Report September 2018; Abb. 3.30: © NASA Earth Observatory images by Lauren Dauphin, using Landsat data from the U.S. Geological Survey and NDVI and NDWI annual trend data courtesy of Neal Pastick; Abb. 3.31: © NASA Earth Observatory images by Lauren Dauphin, using Landsat data from the U.S. Geological Survey and NDVI and NDWI annual trend data courtesy of Neal Pastick; Abb. 3.32: © Paul Zizka Photography; Abb.: 3.33: Science Photo Library/Stephen J. Krasemann; Abb. 3.34: © Vladimir Pushkarev/Alfred-

Wegener-Institut; Tab. 3.35: nach WCRP Global Sea Level Budget Group; Abb. 3.36: nach NASA; Abb. 3.37: © NASA/Goddard Space Flight Center; Abb. 3.38: nach Cook et al.; Abb. 3.39: nach CIRES/University of Colorado, Boulder; Abb. 3.40: © ESA/C. Yakiwchuck; Abb. 3.41: nach Bell et al.; Abb. 3.42: nach Bell et al.; Abb. 3.43: nach Wikipedia; Abb. 3.44: nach Jenkins et al.; Abb. 3.45: nach Gardner et al.; Abb. 3.46: Vorlage erstellt durch Svenja Ryan/Alfred-Wegener-Institut; Abb. 3.47: Esmee van Wijk, CSIRO; Abb. 3.48: © Electron and Confocal Microscopy Laboratory, Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture; Abb. 3.49: LookatSciences/laif; Abb. 3.50: © Jeremy Harbeck Photography/NASA; Abb. 3.51: Ian Joughin, Polar Science Center, Applied Physics Lab, University of Washington, Seattle, USA; Abb. 3.52: Nick Cobbing; Abb. 3.53: nach IPCC, 2013; Abb. 3.54: nach CNES/LEGOS/CLS; Abb. 3.55: nach NOAA Climate.gov; Abb. 3.56: © Steve Nicol; S. 176/177: plainpicture/Minden Pictures/Hiroya Minakuchi; Abb. 4.1: Henri Drake; Abb. 4.2: Rob Robbins; Abb. 4.3: Online: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Icefishuk.jpg> (Stand: 12.08.2019); Abb. 4.4: Michael S. Nolan/agefotostock; Abb. 4.5: Peter Mather; Abb. 4.6: © Paul Nicklen; Abb. 4.7: David Andersson; Abb. 4.8: Museum Wiesbaden, Online: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rangifer_tarandus_02_MWNH_148.jpg (Stand: 09/2019); Abb. 4.9: nach www.asknature.org; Abb. 4.10: WRG Conservation; Abb. 4.11: Ingo Arndt/Minden Pictures; Abb. 4.12 (v.o.l.n.u.r.): feathercollector/Adobe Stock Photo; Naturecolors/Adobe Stock Photo; Naturecolors/Adobe Stock Photo; STUEDAL/Adobe Stock Photo; 巧小川/Adobe Stock Photo; Sandra Standbridge/Adobe Stock Photo; hakoar/Adobe Stock Photo; windwindwindow/Adobe Stock Photo; Abb. 4.13: © John Pohl/www.geophotography.org; Abb. 4.14: nach AMAP, Arctic Biodiversity Assessment; Abb. 4.15: nach AMAP, Arctic Biodiversity Assessment; Abb. 4.16: © 2017 Dave Clark; Abb. 4.17: Erlend Bjørtvedt, Online: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Polygonum_viviparum_IMG_3660_harerug_longyeardalen.jpg (Stand: 13.08.2019); Abb. 4.18: National Geographic Image Collection/Alamy Stock Foto; Abb. 4.19: Pixaterra/Adobe Stock Images; Abb. 4.20: David Gaspard/ArcticNet; Abb. 4.21: W. Lynch/ArcticPhoto; Abb. 4.22: © Paul Nicklen; Abb. 4.23: Andrei Savitsky/Wikimedia Commons; Abb. 4.24: nach CAFF, Life linked to ice; Abb. 4.25: Nick Caloyianis/National Geographic Image Collection; Abb. 4.26: Susumu Nishinaga/Science Photo Library; Abb. 4.27: Tomas Lundälv/Hydro-Vision; Abb. 4.28: nach CAFF, Life linked to ice; Abb. 4.29: Expedition Gombessa 3, © Laurent Ballesta; Abb. 4.30: nach Siegel; Abb. 4.31:

Stephen Lam/Reuters/dpa; Abb. 4.32: nach A. Cuadra/Science; Abb. 4.33: picture alliance/AP Photo/NOAA, Corey Accardo; Abb. 4.34: nach Polar Bear International; Abb. 4.35: Jonathan Huyer; Abb. 4.36: Lynne S. Rollin; Abb. 4.37: nach Atkinson et al.; Abb. 4.38: nach IPCC, 2014; Abb. 4.39: Flemming Dahlke/Alfred-Wegener-Institut; Abb. 4.40: nach Sina Löschke/Alfred-Wegener-Institut; Abb. 4.41: NASA Earth Observatory image by Jeff Schmaltz and Joshua Stevens, LANCE/EOSDIS Rapid Response; Abb. 4.42: David Liittschwager/National Geographic Image Collection; Abb. 4.43: nach Peck; Abb. 4.44: Larissa T. Beume/CC BY 2.0; Abb. 4.45: nach National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2017; Abb. 4.46 (links): Unbekannt/Yukon Parks; Abb. 4.46 (rechts): Isla Myers-Smith, Team Shrub, University of Edinburgh; S. 238/239: Nick Cobbing; Abb. 5.1: PAO Sovcomflot, <http://sovcomflot.ru>; Abb. 5.2: picture alliance/Tass/TASS/dpa; Abb. 5.3: picture alliance/AP Photo/Lehtikuva/Vesa Moilanen; Abb. 5.4: maribus; Abb. 5.5: Gatto Images/Getty Images; Abb. 5.6: nach IBUR/Durham University; Abb. 5.7: David Rootes/Arcticphoto/laif; Abb. 5.8: National Publicity Studios, Wellington; Abb. 5.9: picture alliance/Xinhua/Liu Shiping; Abb. 5.10: © 2018 Rio Tinto; Abb. 5.11: nach Winfried K. Dallmann; Abb. 5.12: Sergey Anisimov/Anadolu Agency/picture alliance; Abb. 5.13: Charles Xelot/Institute; Abb. 5.14: mauritius-images/Science Faction/Natalie Fobes; Abb. 5.15: Anders Anker Bjørk; Abb. 5.16: A. Läufer/Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR); Abb. 5.17: nach AMAP, 2017. Adaptation Actions for a Changing Arctic: Perspectives from the Barents Area; Abb. 5.18: nach Tengelmann et al.; Abb. 5.19: mauritius-images/Alamy/ITAR-TASS; Abb. 5.20: Teekay Corporation; Abb. 5.21: nach International Council on Clean Transportation; Abb. 5.22: bumihills/shutterstock; Tab. 5.23: IAATO. Overview of Antarctic Tourism: 2018–19 Season and Preliminary Estimates for 2019–20 Season; Abb. 5.24: nach COMNAP; Abb. 5.25: nach Hangaslammi et al.; Abb. 5.26: Bo Eide/flickr.com; Abb. 5.27: © Harry Gruyaert/Magnum Photos/Agentur Focus; Abb. 5.28: mauritius-images/Michel Therin/imageBroker; Abb. 5.29: nach CCAMLR; Abb. 5.30: nach CCAMLR; Abb. 5.31: nach CCAMLR; Abb. 5.32: Thomas Nilsen; S.332 (Karte Antarktis): maribus

Impressum

Gesamtprojektleitung: Jan Lehmköster, maribus
Redaktion und Text: Sina Löschke
Lektorat: Dimitri Ladischensky, mare
Gestaltung und Satz: Anna Boucsein, mare; Andrea Best, mare
Korrektorat: Susanne Feyke
Bildredaktion: Petra Koßmann, mare; Anastasia Hermann
Grafiken: Walther-Maria Scheid
Produktion: HS Printproduktion, Holger Schmirgalski
Druck: Ruksaldruck GmbH & Co. KG
Papier: PrimaSet, FSC®-zertifiziert

ISBN 978-3-86648-634-8
Herausgeber: maribus gGmbH, Pickhuben 2, 20457 Hamburg

www.maribus.com

Reproduktion, Übersetzung in fremde Sprachen, Mikroverfilmung und elektronische Verarbeitung sowie jede andere Art der Wiedergabe nur mit schriftlicher Genehmigung der maribus gGmbH. Sämtliche grafischen Abbildungen im „World Ocean Review“ wurden von Walther-Maria Scheid, Berlin, exklusiv angefertigt. Im Abbildungsverzeichnis sind die ursprünglichen Quellen aufgeführt, die in einigen Fällen als Vorlage gedient haben.



In der Reihe „World Ocean Review“ bisher erschienen und über www.worldoceanreview.com kostenlos bestellbar:

WOR 1, 2010
Mit den Meeren leben – ein Zustandsbericht

WOR 2, 2013
Die Zukunft der Fische – die Fischerei der Zukunft

WOR 3, 2014
Rohstoffe aus dem Meer – Chancen und Risiken

WOR 4, 2015
Der nachhaltige Umgang mit unseren Meeren – von der Idee zur Strategie

WOR 5, 2017
Die Küsten – ein wertvoller Lebensraum unter Druck

