

Warnsignale aus den Polarregionen: Einen Überblick

JOSÉ L. LOZÁN, HARTMUT GRASSL, PETER HUPFER & DIETER PIEPENBURG

Die Arktis und die Antarktis stellen zwei geographisch isolierte Regionen dar, die aufgrund der negativen Strahlungsbilanz durch extreme Klimabedingungen charakterisiert und größtenteils vereist sind. In Verbindung mit dem Wechsel zwischen Eiszeiten und Warmzeiten unterlagen beide Polarregionen und polnahe Gebiete seit Beginn des Pleistozäns vor Millionen von Jahren vor allem bezüglich der Eisbedeckung starken Schwankungen.

Das Polareis

Es ist zwischen den großen Eisschilden über Grönland und Antarktika, dem Meereis und dem Schelfeis (Abb. 1) sowie Fluss- und Seeeis zu unterscheiden. Während die Meereisdecke nur wenige Meter dick ist und einer starken Schwankung zwischen Sommer und Winter unterliegt, beträgt die Mächtigkeit der Eisschilde bis über 4.000 m.

Von den riesigen **Eisschilden** hoher Breiten zum Höhepunkt der Vereisung vor ca. 20.000 Jahren sind nur das Eisschild über Grönland mit einer Fläche von 1,7 Mio. km² sowie einem Volumen von etwa 3,1 Mio. km³ und das noch mächtigere Eisschild über dem antarktischen Kontinent mit einer Fläche von 13,8 Mio. km² sowie einem Volumen von 26,4 Mio. km³ übrig geblieben (s. Kap. 2.6). Während das Eis auf Grönland bis 3.500 m mächtig ist, liegt die größte Eisdicke auf dem Festland der Antarktis bei über 4.700 m. Im Mittel ist das Eis des antarktischen Kontinents ca. 2.500 m dick, und eisfrei sind nur etwa 2% seiner Fläche wie die steilen Flanken von Bergen und vereinzelt am Rande liegende flache Regionen wie die Schirmacher-Oase.

Der ost-antarktische Eisschild erreicht eine Höhe von über 4.000 m und eine Eisdicke von über 4.700 m. Dort gibt es deutliche Hinweise auf eine Zunahme des Eises. Das Gebiet westlich des Transantarktischen Gebirges ist dagegen anders. Der Felsunter-

grund liegt in weiten Teilen unter dem Meeresspiegel. Die Oberflächentopographie des Eises erreicht nie mehr als 2.400 m. Trotz Unsicherheiten deuten die letzten Studien hier auf ein Gleichgewicht zwischen Ablation durch Kalbung von Tafelberg und Akkumulation (Eisbildung). Die Zunahme der Temperatur des Meerwassers kann jedoch in den nächsten Jahren zu einem schnellen Schmelzen des Schelfeises und zur Beschleunigung der Eisströme zum Weddellmeer und Rossmeer führen. Auf der Antarktischen Halbinsel, die am weitesten nach Norden reichen, überwiegen deutlich die Eisverluste.

Auf Grönland haben wir ein anderes Bild. Allein seine Jahresmitteltemperatur ist 10–15° C höher als die der Antarktis. Dort sind die Ablation des Inlandeises in niedrigen küstennahen Gebieten sowie die Kalbung von Eisbergen und die erhöhte mittlere Akkumulation in höheren Lagen nicht mehr in Gleichgewicht. In der jüngsten Zeit gibt es deutliche Hinweise, dass die Eisverluste überwiegen (s. *Tafel 1*).

Das **Schelfeis**, die schwimmende Verlängerung großer Inlandeissströme, entsteht aufgrund natürlicher dynamischer Bewegungsprozesse der kontinentalen Eisschilde. Tafelberge bilden sich durch Abbrüche vom Schelfeis; sie können in der Antarktis eine enorme Mächtigkeit von mehreren hundert Metern und eine Fläche von Hunderten bis Tausenden von Quadratkilometern aufweisen.

Im Gegensatz zu den kontinentalen Eisschilden und dem Schelfeis ist das **Meereis** nicht Folge von Schneeniederschlag, sondern des Gefrierens von Meerwasser. Seine räumliche Ausdehnung schwankt stark innerhalb eines Jahres. In beiden Polarregionen kühlt sich das aus den anderen Ozeanen einströmende Meerwasser an der Oberfläche stark ab. Durch Zunahme der Wasserdichte werden nicht nur eine intensive Konvektion zum Teil mit Tiefenwasserbildung eingeleitet, sondern am Gefrierpunkt von -1,8° C auch Eiskristalle gebildet, die spezifisch leichter als Wasser sind, aus denen schließlich eine Eisdecke entsteht.

Auch im globalen Strahlungshaushalt hat das polare Eis eine herausragende Bedeutung. Die Albedo des Eises, d.h. das Reflexionsvermögen gegenüber der Sonneneinstrahlung im sichtbaren Wellenlängenbereich (0,4–0,7 µm), liegt zwischen 0,5 (schneefreies bzw. schmelzendes Eis) und 0,85 (mit Neuschnee bedecktes Eis), während die Albedo des eisfreien Ozeans unter 0,1 liegt. Das bedeutet, dass die Eisdecke den Eintrag an kurzwelliger Strahlungs-



Abb. 1: Eisberg, Disko-Bucht, Grönland (Foto: P. Prokosch, WWF Frankfurt).

energie um mehr als den Faktor 5 bzw. 8,5 senkt. Die Eis-Albedo-Temperatur-Rückkopplung ist von ausschlaggebender Bedeutung für die beobachtete schnellere Erwärmung in der Arktis.

Im Süßwasserbereich wird in den letzten Jahrzehnten eine Abkürzung der Eisbedeckung von **Flüssen und Seen** beobachtet. Diese Gewässer frieren später zu und das Eis schmilzt nach dem Winter früher ab. Die Reduktion der Zeit mit Eisbedeckung hat bereits je nach arktischer Region 1-3 Wochen erreicht.

Sowohl in Gebieten ohne Eisbedeckung auf dem Festland als auch in küstennahen Bereichen im Meer sind Böden in Polargebieten oft permanent gefroren (**Permafrost**). Man unterscheidet zwischen kontinuierlichem, diskontinuierlichem und submarinem Permafrost. In Sibirien und Zentralasien kommen besonders ausgedehnte Permafrostgebiete vor, die sich bis in mittlere Breiten erstrecken. Man schätzt, dass derzeit insgesamt ein Viertel der Kontinentalfläche Permafrostböden sind. In besonders kalten Gebieten mit geringen Winterniederschlägen kann ein tiefgreifendes Gefrieren des Erdbodens bis in Tiefen von mehreren hundert Metern beobachtet werden.

Wegen der Erwärmung der Polarregionen wird nicht nur ein Abschmelzen der Eisschilde und des Meereises, sondern auch ein Auftauen des Permafrostes beobachtet. Die Folgen sind vielfältig. Beispielsweise werden alle Typen von Infrastrukturen wie Straßen, Gebäude, Bauwerke, Gas- und Ölförderanlagen beeinträchtigt (Abb. 2). In gebirgigen Regionen nimmt die Stabilität der Hänge ab und die Gefahr von Erdbeben nimmt zu.

Globale Erwärmung

Auf der Basis von direkten Messungen kann die globale Klimaentwicklung seit der Mitte des 19. Jh. recht gut zurückverfolgt werden. Die Erwärmung erreichte in den 1940er Jahren einen ersten Höhepunkt. Nach einer Phase der Stagnation und teilweise eines Rückgangs der Lufttemperatur steigt die Kurve seit den 1970er Jahren weiter an. Seit den 1980er Jahren liegen die Werte immer öfter und immer höher über dem langjährigen Mittel 1961–1990. Die beiden wärmsten Jahre seit Beginn der direkten

Messungen mit Thermometern waren 1998 und 2005, und die zehn bisher wärmsten Jahre sind in abnehmender Reihenfolge: 1998, 2005, 2002, 2003, 2004, 2001, 1997, 1995, 2000 und 1999. Alle genannten Jahre kamen nach 1994. Nur 1996 war nicht so warm, weil 1995/96 die mit La Niña bezeichnete kalte Wasserzunge im tropischen Ostpazifik besonders ausgeprägt war und die Lufttemperatur auch im globalen Mittel merklich absenkte (s. Abb. 4.6-1, S. 196).

Einige Erkenntnisse wurden in den letzten Jahren so weit erhärtet, dass sie unter den Klimaforschern allgemein als gesichert gelten und nicht umstritten sind. Zu diesen Fakten gehören:

- Die Konzentration von CO_2 in der Atmosphäre ist seit ca. 1850 stark angestiegen, von dem seit mindestens 700.000 Jahren typischen Wert von 280 ppm in Zwischeneiszeiten auf inzwischen 380 ppm.
- Für den Anstieg ist der Mensch verantwortlich, in erster Linie wegen der Verbrennung fossiler Brennstoffe, in zweiter Linie durch Abholzung.
- CO_2 ist ein klimawirksames Gas, das den Strahlungshaushalt der Erde verändert: Ein Anstieg der Konzentration führt zu einer Erhöhung der Temperatur in der Troposphäre.
- Das Klima hat sich deutlich erwärmt. Die mittlere globale Temperatur seit 1990 liegt immer höher als der Referenzmittelwert 1961–1990.
- Der überwiegende Teil der Erwärmung ist auf die gestiegene Konzentration von CO_2 und anderen anthropogenen Gasen zurückzuführen, ein kleinerer Teil hat natürliche Ursachen, u.a. die Schwankungen der Sonnenaktivität.

Als Grundlage für diese Aussage dienen unzählige Daten und wissenschaftliche Erkenntnisse. In den letzten Jahren sind keine Forschungsergebnisse publiziert worden, die den Einfluss der Menschheit auf das Klima in Frage stellen. Im Gegenteil, die o.g. Fakten werden weiter erhärtet. Gelegentlich werden in der Presse gegenteilige Aussagen verbreitet, die jedoch nicht in begutachteten wissenschaftlichen Fachzeitschriften veröffentlicht worden sind. Außerdem finden oft auch »Gespensterdiskussionen« in den Medien statt, die losgelöst von den wissenschaftlichen Fakten sind und zur Verwirrung und Desinformation der Öffentlichkeit führen.



Abb.2: Durch Thermokarst verbogene Treibhausruine in Tiksi (sibirische Arktis). Foto: H. Lantuit (AWI-Potsdam).

Die Polarregionen erwärmen sich schneller

Seit Vorliegen relativ zuverlässiger Messungen mit Satelliten im Jahre 1978 wird eine Abnahme der sommerlichen Eisbedeckung in der Arktis von etwa 8% pro Jahrzehnt beobachtet, wobei sich dieser Trend in den letzten Jahren verstärkte. So lag die mittlere Eisbedeckung in den letzten 4 Jahren im September um 20% unterhalb des September-Mittels der Jahre 1978–2000, im September 2005 sogar um 25%. Dieser Rückgang entspricht etwa der 5-fachen Fläche Deutschlands. Im Jahr 2005 war die Nordostpassage, d.h. der Seeweg entlang der sibirischen Küste, vom 15. August bis zum 28. September total eisfrei. Die ungewöhnlich große Schmelzrate im Sommer 2005 wurde durch eine großflächige Erwärmung der Arktis verursacht, die 2–3° C über dem langjährigen Mittelwert lag (Tafel 4 und 5 im Klappentext).

Modellrechnungen mit einer neuen Version des Klimamodells des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg haben ergeben, dass die Arktis im Sommer gegen Ende des 21. Jh. völlig eisfrei sein wird, wenn der Ausstoß von CO₂ und anderen Treibhausgasen unvermindert anhalten sollte. In diesem Szenario erwärmt sich die Erde bis zum Ende des 21. Jh. um etwa 4° C, wobei sich die Landgebiete stärker aufheizen als die Ozeane. Besonders ausgeprägt ist die Erwärmung in hohen nördlichen Breiten. Als Folge der Erwärmung schmilzt ein Teil der Schnee- und Meereisflächen. Damit werden helle Oberflächen (Schnee, Eis) durch dunklere ersetzt (schneefreies Land, Wasser), womit ein größerer Anteil der Sonnenstrahlung die Oberfläche erwärmt. Dieser sich selbstverstärkende Effekt (die sogenannte Eis-Albedo-Temperatur-Rückkopplung) ist der Hauptgrund für die besonders großen Temperaturänderungen in hohen nördlichen Breiten (Abb. 4.14-1, S. 237) sowie für den Eisverlust, der offenbar schon verstärkt in den letzten Jahren eingesetzt hat.

In einem moderateren Szenario, in dem die CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2050 gegenüber heute zwar um weitere 50% ansteigen, aber danach bis zum Jahr 2100 auf die Hälfte der heutigen Emissionen zurückgehen, wird eine globale Erwärmung von 2,5° C prognostiziert. In diesem Szenario ist die Meereis-schmelze geringer, so dass gegen Ende des 21. Jh. noch etwa ein Drittel der heutigen sommerlichen Eisbedeckung vorhanden sein dürfte.

Erderwärmung: Natürliche Faktoren?

Als weitere Ursache lang- und kurzfristiger Schwankungen des Klimas kommen auch Änderungen der Strahlungsintensität der Sonne selbst in Betracht. Die veränderliche **Solaraktivität** führt zu den weit-hin bekannten Änderungen in der Anzahl der Son-

nenflecken, die schon seit Jahrhunderten beobachtet werden, sowie zu Änderungen in der Konzentration von ¹⁴C- und ¹⁰Be-Isotopen in der Luft. Aufzeichnungen der Sonnenfleckenzahl sowie Isotopenanalysen von Eisbohrkernen und Baumringen können daher zur Rekonstruktion der Solaraktivität verwendet werden. Starke Vulkanausbrüche wie der des Pinatubo 1991 beeinflussen heute wie früher das regionale und globale Klima, allerdings nur vorübergehend für einige Jahre. Die Ursache dafür ist eine im wesentlichen aus Schwefelsäuretröpfchen bestehende Aerosolschicht in der Stratosphäre, die sich aus dem Schwefeldioxid in der Gasfahne des Vulkans bildet. Diese Schicht ändert den Strahlungshaushalt der Atmosphäre in der Weise, dass im Mittel an der Erdoberfläche eine Abkühlung erfolgt. Man erkennt in Abb. 3 deutlich die Schwankungen des Strahlungsflusses auf die Erde durch Änderungen der Sonnenintensität sowie durch Vulkanismus (kurzfristige Minima). Eine mit diesen Schwankungen angetriebene Klimasimulation zeigt (Abb. 3), dass die in vielen Klimarekonstruktionen zwischen dem 11. und 13. Jh. erkennbare »mittelalterliche Warmzeit« und die dann folgende »Kleine Eiszeit« vom 16. bis zum 19. Jh. durch dieses Zusammenspiel von Sonnenaktivität und Vulkanismus hervorgerufen worden sind. Die im 20. Jh. beobachtete Erwärmung kann nur zu einem Teil auf diese

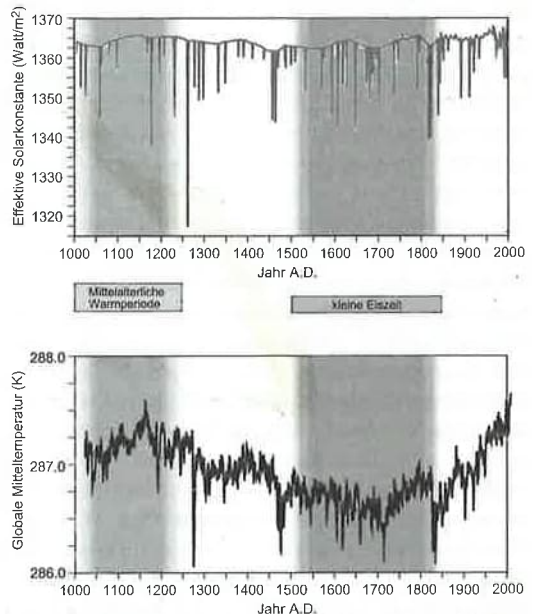


Abb. 3: Die Veränderung des Strahlungsflusses durch Sonnenintensitätsschwankungen (Sonnenflecken) sowie Vulkanismus (kurzfristige Minima) (oben) sowie die mit einem Klimamodell (Modell ECHO-G) berechnete Auswirkung auf die globale Mitteltemperatur (unten) (M. WIDMANN, GKSS).

Weise erklärt werden und ist hauptsächlich auf die erhöhten Konzentrationen von anthropogenen Treibhausgasen zurückzuführen. Diese beeinflussen gegen Ende des 20. Jh. den Strahlungshaushalt der Erde deutlich stärker als die natürlichen Änderungen des Strahlungsflusses.

Die Polarregionen: Gebiete höchster Empfindlichkeit mit weltweiter Wirkung

Die Ausdehnung der Kontinente Asien, Europa und Nordamerika bis in die südlichen Bereiche der Arktis ermöglicht nicht nur die Existenz vieler Pflanzen- und Tierarten sondern damit auch eine menschliche Besiedlung. Heute leben dort rund 4 Mio. Menschen, wovon ca. 50% im russischen Teil ansässig sind.

Gegenüber Umweltkatastrophen und Veränderungen ihrer Wirtschaftsbasis hat sich die **Urbevölkerung** der polaren Regionen in der Vergangenheit meist als belastbar und flexibel erwiesen. Dennoch sind immer wieder Bevölkerungsgruppen, die z.B. aus Asien nach Grönland eingewandert waren, Klimaveränderungen und ihren Auswirkungen zum Opfer gefallen und ausgestorben. Der gegenwärtige Klimawandel, vor allem der weltweite Temperaturanstieg, wird die beiden wichtigsten Wirtschaftszweige der polaren Urbevölkerung, die Rentierhaltung und den Fang von Meeressäugern, nachhaltig beeinflussen. Insbesondere wird das schnelle und tiefe Auftauen des Dauerfrostbodens im Binnenland eine große Rolle spielen und die Mobilität der Bevölkerung und Weidemöglichkeiten der Rentierherden einschränken. An den Küsten wird die Verringerung der Eisdecke und Verkürzung der Vereisungsdauer die traditionellen saisonalen Fangmöglichkeiten stark einschränken und das Leben der Jäger gefährden. Hinzu kommen Veränderungen in der Tierwelt durch allmähliche, nicht vorhersehbare Abwanderungen bestimmter Tierarten oder Veränderungen ihrer Wanderwege als Reaktion auf einen geringen Anstieg der Meerestemperatur. Nicht immer kann, wie in Grönland zu Beginn des 20. Jh., eine Einschränkung der Jägerkultur durch staatlich geförderte Fischereiaktivitäten ersetzt werden. Weiterhin ist noch nicht abzusehen, welche Auswirkungen der Ozonabbau in der Stratosphäre auf die Tundravegetation und die marinen Nahrungsketten haben wird. Wenn der Mensch so weiter macht wie bis jetzt, konnte bis 2100 das Nordpolarmeer eisfrei sein (s.o.). Das bedeutet, dass der Lebensraum von Ringelrobben und Eisbären zerstört sein wird und damit auch der traditionelle Robbenfang der Inuit. Während in der westlichen Welt, z.B. in Alaska oder Grönland, die Urbevölkerung im Notfall mit staatlichen Hilfsmaßnahmen

rechnen kann, dürfte das im Bereich des russischen Fernen Ostens, z.B. in Chukotka, kaum der Fall sein. In den letzten Jahrhunderten sind die einzigartigen Kulturen der Polarvölker durch Missionierung, Alkoholmissbrauch und eingeschleppte Krankheiten nicht nur nachhaltig verändert, sondern z.T. auch vernichtet worden. Es wäre bedauerlich, wenn dieses Zerstörungswerk indirekt durch den von den Industriestaaten initiierten Klimawandel fortgesetzt würde.

... doch mehr als alle Zahlen bewegt mich, was zwei Vertreter der Inuit in kleiner Runde über die Vorgänge in ihrer Heimat erzählen. Seen verschwinden, weil der Permafrostboden taut und das Wasser versickert. Stürme erodieren ihre Küste, weil der Schutz durch die Eisdecke fehlt - die Ortschaft Shihmaref muss deshalb bereits umgesiedelt werden. Sie berichten von Freunden, die ihre Beine oder auch ihr Leben verloren haben, weil sie auf seit Generationen benutzten Jagdrouten durch das Eis gebrochen sind. Auch ihre Jagdbeute hat sich verändert - Karibus machen einen kranken Eindruck und ihre Felle sind zu dünn geworden, um sie für Kleidung zu verwenden. Eisbären sind immer seltener anzutreffen und weniger gesund (RAHMSTORF 2005).

Große Flächen in beiden Polarmeeren sind von Meereis bedeckt (s. Kap. 2.7). Auf, im und unter dem Meereis finden sich erstaunlich viele **Organismen**, die diesen extremen Lebensraum besiedeln. Zu den prominentesten Oberflächen-Bewohnern gehört in der Antarktis der Kaiserpinguin. Er brütet ausschließlich auf dem Festeis, zieht dort seine Jungen auf und ist deshalb auf stabile Eisverhältnisse über einen Zeitraum von etwa sieben Monaten angewiesen (s. Kap. 3.8). Mehrere antarktische Robbenarten (vor allem Weddellrobbe, Krabbenfräserrobbe und Seeleopard) suchen ebenfalls das Meereis als Platz für die Geburt und Aufzucht ihrer Jungen auf (s. Kap. 3.9a). In der Arktis sind es vor allem Eisbär und Ringelrobbe (s. Kap. 3.9b), die für Nahrungserwerb und Fortpflanzung auf das Meereis angewiesen sind. Auch das Innere des Meereises, das von einem ausgedehnten System von kleinen Kanälen und Taschen durchzogen ist, wird von einer Vielzahl von Organismen als Lebensraum genutzt. So sind von den wichtigsten Primärproduzenten in diesem Habitat, den Kieselalgen (Diatomeen), aus der Arktis etwa 300 und aus der Antarktis etwa 200 Arten beschrieben worden (s. Kap. 3.4).

Da die meisten Organismen in den unteren Zentimetern des Eises konzentriert sind, herrschen an der Eisunterseite fast das ganze Jahr hindurch gute Nahrungsbedingungen vor. In der Arktis gibt es sogar fädige Kolonien von Kieselalgen, die mehrere Meter lang werden können. Die auffälligsten tierischen Bewohner des Lebensraums unter dem Eis

sind Amphipoden (Flohkrebse) (Abb. 3.4-3, S. 119) (s. Kap. 3.4). Verschiedene Umweltgefährdungen bedrohen die Existenz der polaren Meereis-Lebensgemeinschaften. So würde nach einem möglichen Ölunfall in der marinen Arktis (s. Kap. 5.9) ausgetretenes Öl an der Unterseite des Eises akkumulieren und zu einer lokalen Zerstörung der Meereishabitate führen. Die wahrscheinlich größte und weitreichendste Bedrohung für alle Organismen, die auf, im oder direkt unter dem Eis leben, ist aber die klimabedingte Abnahme der Fläche und Dicke des Packeises.

In den polaren Regionen kommen viele endemische Tierarten vor; d.h. sie sind nur dort anzutreffen, daher stark der polaren Kälte angepasst und vom Eis abhängig. Der Vergleich zwischen der Arktis und Antarktis ergibt auch in der Biodiversität erhebliche Unterschiede. Pinguine, die wir im Süden massenhaft finden, fehlen in der Arktis. Stattdessen findet man dort z.B. Eisbären, Walrosse und eine sehr artenreiche Vogelwelt (s. Kap. 3.11).

Im Süden ernähren sich Pinguine, Robben und teilweise auch die anderen Vogelarten vorwiegend vom Krill. Dieser Krebsart hat daher eine Schlüsselstellung im antarktischen Nahrungsnetz. Von Interesse ist daher, welche Folge die Erderwärmung für diese Krebsart haben kann. Im Bereich der Antarktischen Halbinsel, welche das Gebiet mit dem größten Krillvorkommen ist, wird tatsächlich ein Bestandsrückgang beobachtet. Diese negative Entwicklung wird im Zusammenhang mit dem Rückgang des dortigen Meereises diskutiert (s. Kap. 3.5).

Im Norden sind durch den Klimawandel vor allem die Endkonsumenten wie die Eisbären, Robben und Seevögel betroffen. Nach dem Winter hängt der Jagderfolg bei der Eisbären vom Eisverhältnis ab. Nimmt das Eis ab, so verringern sich die Anzahl der Beutetiere rapide. In südlichen arktischen Gebieten wird bereits heute ein schlechter Ernährungszustand bei den Eisbären beobachtet. Dies wird durch den Rückgang und die späte Bildung des Meereises erklärt. Das gleiche gilt für die Ringelrobben, Bartrobben und Bandrobben. Sie verbringen die meiste Zeit ihres Lebens auf dem Eis, z.B. ruhend und für die Aufzucht ihrer Nachkommen. Sie gehen auf Nahrungssuche am Eisrand. Es ist unwahrscheinlich, dass sich der Eisbär und die arktischen Robben an eine Umwelt ohne Eis anpassen werden können (s. Kap. 3.9b).

Die **Ozonschicht** in der Stratosphäre (in 10–50 km Höhe über dem Meeresspiegel) ist für das Leben auf der Erde unverzichtbar. Der sehr kleine Anteil von Ozon an der Gesamtatmosphäre reicht aus, um die Biosphäre vom Großteil der schädlichen ultravioletten Sonnenstrahlung abzuschirmen. So schützt das stratosphäri-

sche Ozon beispielsweise den Menschen vor Hautkrebs, Schwächungen des Immunsystems und Mutationen des Erbguts. Es erhält außerdem das Phytoplankton als Grundlage der Nahrungsketten in den Ozeanen. Mögliche Effekte einer erhöhten **UV-Strahlung** auf die Biosphäre werden in Kap. 5.3 behandelt.

Die ersten dramatischen Rückgänge der stratosphärischen Ozonkonzentration wurden bereits in den frühen 1980er Jahren bei bodengebundenen Routinemessungen auf dem antarktischen Kontinent beobachtet. Durch genauere Analysen der Satellitendaten wurde kurz danach das sogenannte »Ozonloch« deutlich sichtbar. In den folgenden Jahren zeigten die Satellitendaten zudem eine Verstärkung und räumliche Ausdehnung des Phänomens »Ozonloch«. Seit Anfang der 1990er Jahre weiß man, dass auch die Arktis in kalten Wintern von erheblichen Ozonverlusten in der Stratosphäre betroffen sein kann. Bei einem ausgebildeten Ozonloch dringt die UV-Strahlung der Sonne verstärkt bis zur Erdoberfläche durch und schädigt beispielsweise das Plankton im Polarmeer. Nach einigen Wochen verschwindet das Ozonloch dann aufgrund sich ändernder meteorologischer Bedingungen wieder (s. Kap. 5.2).

Mitte der 1980er Jahre wurden im antarktischen Frühjahr stark erhöhte Mengen ozonzerstörender Chlorsubstanzen (Cl und ClO) in der Stratosphäre entdeckt, die nach chemischer Umwandlung anthropogener FCKWs entstehen und sich als Ursache des Ozonlochs erwiesen. Heute weiß man auch, dass die bei sehr niedrigen Temperaturen entstehenden polaren Stratosphärenwolken (PSC) dabei eine wichtige Rolle spielen. Da die Temperaturen in der Antarktis viel niedriger als in der Arktis sind, ist die PSC-Bildung dort intensiver. Diese und andere dynamische Prozesse (Polarwirbel) sind die Ursache, dass das »Ozonloch« in der Antarktis häufiger und stärker auftritt.

Die Reduktion und Kontrolle ozonzerstörender Substanzen durch das Montrealer Protokoll (1987) und seine Folgeprotokolle von London (1990), Kopenhagen (1992) und Peking (1999) sind zwar eine Erfolgsgeschichte der Umweltpolitik, dennoch wurde im Winter 2004/05 eine der ausgeprägtesten Ozonzerstörungen über der Arktis beobachtet (s. Abb. 5.2-6, S. 259). Aufgrund der großen Verweilzeit anthropogener FCKW in der Stratosphäre wird die anthropogene Chlorbelastung erst Mitte dieses Jahrhunderts wieder auf das Niveau vor 1980 absinken (s. Kap. 5.2).

Meeresströmungen und Tiefenwasserbildung

Bezüglich des großräumigen Musters der Meeresströmungen gibt es zwischen den Polarregionen ebenfalls

erhebliche Unterschiede. Bei der Tiefenwasserbildung spielen beide Regionen eine globale Rolle.

Das Nordpolarmeer (der arktische Ozean) steht mit den großen Ozeanen über mehrere flache Nebenmeere (u.a. Beringstraße, Baffinbai, Barentssee) in Verbindung. Der bedeutende Wasseraustausch findet nur durch die zwischen Nordgrönland und Svalbard (Spitzbergen) liegende, ca. 2,5 km tiefe Framstraße mit dem Nordatlantik statt.

Der antarktische Kontinent ist dagegen von einer Ringströmung umgeben. Dieser antarktische Wasserring (das Südpolarmeer) verbindet die drei größten Ozeane Pazifik, Atlantik und Indischen Ozean zu einem globalen Zirkulationssystem. Eine weitere Funktion des antarktischen Wasserrings ist die Unterstützung des großen marinen Förderbandes. Sie erfolgt durch Abkühlung von Wassermassen, die zur Bildung von Tiefenwasser durch Konvektion führt.

Maximale Konvektion findet man im hohen Nordatlantik und in der Antarktis. Die Bildung neuen Tiefenwassers treibt die globale Tiefenzirkulation an. Dabei entsteht ein riesiger ozeanischer Kreislauf in der Art eines »Förderbandes« (*»oceanic conveyor belt«*, s. Abb. 2.1, S. 62), dessen Umlaufperiode in der Größenordnung von 1.000 Jahren liegt. Gespeist wird dieser ozeanische Kreislauf vor Norwegen aus dem System Golfstrom-Nordatlantikstrom. Er ist dafür verantwortlich, dass vor allem im Winter die Temperaturen in Europa um einige Grad höher sind als auf vergleichbaren Breiten etwa an der Westküste Kanadas. Modellrechnungen für das 21. Jh. zeigen generell eine Abschwächung des marinen Förderbandes im Atlantik, je nach Modell bis zu 50%. Ein völliges Abreißen des Nordatlantikstroms ist zum Glück unwahrscheinlich, ganz ausschließen lässt sich diese Gefahr jedoch nicht. Entscheidend für die Zukunft der Strömung ist die Frage, wie schnell der grönländische Eisschild abschmelzen wird und welche Süßwassermengen dadurch in den Nordatlantik gelangen – ein Faktor, der in heutigen Modellrechnungen noch nicht ausreichend genau berücksichtigt werden kann.

Wirtschaftliche Nutzung und ihre Risiken

Sowohl die Arktis, aber auch die Antarktis gelten als Regionen mit großem Rohstoffpotenzial für die Zukunft. Es geht dabei nicht nur um Gas und Öl, sondern auch um andere mineralische Rohstoffe. So entwickelte sich Kanada seit den 1950er Jahren zu einem bedeutenden Produzenten von Uran, Kupfer, Nickel, Blei, Zink, Asbest, Eisenerz sowie Gold auf dem Weltmarkt.

Der Abbau der arktischen **Kohlenwasserstofflagerstätten** erschließt auf der einen Seite ein bedeu-

tendes, noch weitgehend ungenutztes Energiereservoir, bildet auf der anderen Seite aber ein erhebliches Gefährdungspotenzial für die dortige Umwelt. Dabei spielen Ölunfälle in eisbedeckten Meeresgebieten eine besonders wichtige Rolle. Meereis behindert und verlangsamt einerseits den natürlichen Abbau eingetragenen Öls, andererseits führt die großräumige Bewegung des Eises im arktischen Ozean dazu, dass einmal eingetragenes Öl über eine Fläche verteilt wird, die weit über die vom Ölunfall direkt betroffene Fläche hinausgeht. Außerdem laufen die natürlichen Selbstreinigungsprozesse, die in mittleren Breiten zu einem relativ raschen Abbau des Öls führen, in der Arktis erheblich langsamer ab (s. Kap. 5.9).

Gashydrate sind feste, eisähnliche Verbindungen aus Gasmolekülen und Wasser, welche in Abhängigkeit von Temperatur und Druck im Ozean an den Kontinentalrändern in Wassertiefen von 300–700 m, hauptsächlich in Form von Methanhydraten vorkommen (s. Abb. 4.15-1, S. 242). Auch andere Gase, wie Kohlenstoffdioxid, Stickstoff und weitere Kohlenwasserstoffe können bei höheren Drücken und niedrigen Temperaturen ebenfalls enthalten sein. Die Menge an in Gashydraten gebundenem Kohlenstoff ist groß, etwa 10.000 Gt. Dieser Wert übersteigt die Kohlenstoffmenge der zurzeit bekannten Vorkommen fossiler Brennstoffe bei weitem.

Obwohl Gashydrate schon seit fast 200 Jahren bekannt sind, tritt ihre große Bedeutung auf unserem Planeten erst langsam in unser Bewusstsein. Im Vordergrund stehen dabei Fragen nach einer möglichen wirtschaftlichen Nutzung der riesigen Lagerstätten und nach ihrer Rolle im Klimawandel.

Hinsichtlich der Klimarelevanz steht die Vermeidung von unkontrollierten Methan-Emissionen in die Atmosphäre im Vordergrund. Methan wirkt ähnlich wie Kohlenstoffdioxid als Treibhausgas – allerdings pro Molekül weit stärker – und ist deshalb an der globalen Erwärmung der Atmosphäre beteiligt. Der Kohlenstoff-Speicher der Atmosphäre ist mit 760 Gt zwar von beträchtlicher Größe, könnte aber durch die Freisetzung selbst von relativ geringen Mengen Methan aus dem gewaltigen globalen Gashydratvorkommen rasch und drastisch zunehmen.

Die Zahl der Menschen, die sich innerhalb eines Jahres als **Touristen** in den Polarregionen aufhalten, ist in den letzten Jahrzehnten rapide angewachsen. In Spitzbergen stieg die Zahl der Übernachtungsgäste von 17.482 (1991) auf 45.100 (1997), in Grönland von 3.300 (1987) auf 31.351 (2000) (s. Abb. 5.7-2, S. 282). Seit einigen Jahrzehnten nimmt auch der Tourismus in die Antarktis stark zu. Die meisten Besucher kommen im Sommer. Das ist eine empfindliche

Zeit, da sich Robben und Vögel dann fortpflanzen und ihre Jungen säugen oder füttern. Der Sommer ist auch die Entwicklungszeit der kärglichen Landvegetation. Nutzungskonflikte sind daher vorprogrammiert, wenn nicht strenge Regeln angewandt und so die Art und Intensität des Tourismus begrenzt wird. Ein nachhaltiges Tourismuskonzept bietet auch die Möglichkeit, das Bewusstsein für die Erhaltung von Arktis und Antarktis zu stärken und generell für den Umweltschutz zu werben. Tourismus und Naturschutz müssen sich nicht gegenseitig ausschließen (s. Kap. 5.7)

Mit dem Verschwinden der traditionell genutzten **Fischbestände** breitet sich die kommerzielle Fischerei heute in immer entlegene Gebiete und in immer größere Tiefen aus. Von dieser Tendenz bleiben auch die polaren Gebiete nicht verschont. Ihre Ressourcen haben sich trotz des mit der Ausbeutung verbundenen hohen Aufwands als lukrativ erwiesen. Die Fischerei in der Subarktis, am Rande der Packeiszone, zielt u.a. auf die dort vorkommenden Bestände von mit dem Dorsch verwandten Fischarten wie dem Alaska-Seelachs. Die Fischerei am nördlichen Rand der Antarktis konzentriert sich auf Schwarzen Seehecht, Marmorfisch, Bändereisfisch und Krill. Verschiedene biologische Eigenschaften polarer Arten erschweren allerdings eine nachhaltige Fischerei. Aufgrund der niedrigen Wassertemperaturen wachsen die Organismen sehr langsam und werden erst sehr spät geschlechtsreif. Beispielsweise laicht der Schwarze Seehecht erst im Alter von 8–10 Jahren. Für den Fang werden auf den Hochseetrawlern zudem unselektive Methoden angewendet, die zu hohen Beifangraten von Bodentieren und Kaltwasserkorallen in der Netzfischerei oder zum Tod von Seevögeln, Haien und Rochen in der Langleinenfischerei führen.

Die genutzten Bestände der Polarregionen unterliegen deshalb mittlerweile einem enormen Fischereidruck und gelten, wie für manche Arten in der Beringsee, schon als überfischt. Problematisch erweist sich auch der zunehmende Einfluss des Klimawandels auf die Bestandsentwicklung polarer Fischarten. Die internationalen Abkommen, die für ein ausbalanciertes Ressourcenmanagement sorgen sollen, können nur wirksam werden, wenn sie auf alle polarnahen Gebiete ausgeweitet werden. Außerdem ist es wichtig, dass schärfer überwacht und das Vorsorgeprinzip konsequenter angewandt wird (s. Kap. 3.7).

Mit über 110 Mrd. m³ macht der **Holzvorrat** borealer Wälder etwa ein Drittel dieser Ressource weltweit und 80% des gesamten Nadelholzvorkommens aus. Neben der Schnittholzproduktion ist vor allem die Zellstoff- und Papierfabrikation die wichtigste Nutzungsform; z.B. stammt über die Hälfte des

Zeitungs-papiers weltweit aus borealen Regionen. Wegen dieser scheinbar unermesslichen Ressourcen an Wald und Holz existiert – mit einer gewissen Ausnahme in Skandinavien – oft keine nachhaltige Forst- und Holzwirtschaft. Eine bis heute häufig angewandte Wirtschaftsweise in Nordamerika und Russland ist die des großflächigen Einschlags ohne nachfolgende Wiederaufforstung. Trotz der in den letzten Jahren beobachteten Verminderung des Einschlagvolumens in Russland ist die Gefahr der Übernutzung der borealen Wälder weiterhin gegeben.

Die Gebiete mit den gegenwärtig größten Gefahren für boreale Wälder durch Holzgewinnung liegen im Ostsibirien, wo ausländische Konzerne die Nutzungsrechte ohne große Umweltschutzaufgaben haben. Hier stocken etwa 20,4 Mrd. m³ Holz. Etwa 70% des eingeschlagenen Holzes wird in die benachbarten ostasiatischen Staaten exportiert (s. Kap. 5.11).

Gefährdungen und Schutz der Polarregionen

Die Polargebiete galten lange als nahezu schadstofffrei und wurden als »reinste« Gebiete der Erde betrachtet. Dass diese Auffassung der Revision bedarf, ist bereits seit einigen Jahrzehnten bekannt und besonders eindrucksvoll in den Berichten des »Arctic Monitoring and Assessment Programme« (AMAP) der arktischen Anrainerstaaten dargestellt.

Als lokale Quellen für **persistente organische Schadstoffe** (persistent organic pollutants, POPs) wurden in der Arktis vor allem militärische Einrichtungen (Frühwarnsysteme, Übungsgebiete) und in der Antarktis die Forschungsstationen identifiziert. POPs gelangen aber vornehmlich durch Ferntransport über die Atmosphäre, die arktischen Flüsse oder Meeresströmungen aus den industriellen Zentren der Nordhalbkugel in die arktische Umwelt und werden hier durch die transpolaren Eisbewegungen über die ganze Arktis verteilt (s. Kap. 5.4). Im Rahmen von AMAP sind seit Beginn der 1990er Jahre umfangreiche Messungen zur zeitlichen und räumlichen Verteilung von ausgewählten persistenten organischen Schadstoffen durchgeführt worden. Sie zeigen vergleichsweise geringe Konzentrationen sowohl in der Luft als auch im Meer- und Süßwasser.

Dennoch werden regelmäßig hohe Konzentrationen der oben genannten Stoffe in Lebewesen gefunden, die an der Spitze der Nahrungsnetze stehen (s. Abb. 5.5-1, S. 273). Zu den hochbelasteten Arten gehören Eismöwen, Eissturmvögel, Eisbären, Ringelrobben und die arktischen Zahn- und Bartenwale. Auch in der Urbevölkerung der Arktis, den Inuits in Grönland und West-Kanada, die immer noch weitge-

hend im Einklang mit der Natur leben und sich vor allem von Fisch, Robben und Walen ernähren, sind alarmierend hohe Konzentrationen von POPs nachgewiesen worden. Die Muttermilch der Inuits gehört zur höchstbelasteten der Welt. Bei den Eisbären ist der Hormonhaushalt wegen der Schadstoffbelastung schon so beeinträchtigt, dass es zu Veränderungen der äußerlichen Geschlechtsmerkmale kommt.

Man sollte deshalb so bald wie möglich globale Maßnahmen zur Kontrolle und Begrenzung der Nutzung und Ausbreitung dieser Substanzen in Verbindung mit dem UNECE-Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverschmutzung von 1979 und dem internationalen Stockholmer Übereinkommen über persistente organische Schadstoffe von 2001 mit höchster Priorität vorantreiben.

Das Nordpolarmeer war im Kalten Krieg stets eine Region mit starken militärischen Aktivitäten. Im Namen der Abschreckung belauerten sich hier sowjetische und US-amerikanische **Atom-U-Boote**. Die sowjetische Nordmeerflotte hatte in der Region von Murmansk ihre eisfreien Heimathäfen und Operationsbasen. Auf der Insel Nowaja Semlja fanden Nukleartests statt, und die Flüsse Sibiriens trugen radioaktive Produkte des Nuklearkomplexes in die arktischen Meere. Immer wieder kam es seit Ende des Ost-West-Konfliktes zu spektakulären U-Boot-Havarien, die die Befürchtung umfassender radioaktiver Kontaminationen nährten. Abgelagerter Atommüll und die »Abrüstung« der großen russischen Nordmeerflotte stellen immer wieder die Frage nach der radioaktiven Verseuchung in der Barentssee, der Karasee und dem Weißen Meer. Nach dem Ende der Konkurrenz der Supermächte stellt sich die Frage, wie der Abbau der nuklearen Kapazitäten in der arktischen Region voranschreitet und ob die radioaktive Verseuchung eine direkte Gefahr für Mensch und Umwelt darstellt (s. Kap. 5.10)

Auch die **Erforschung** sowie der **Schutz der Arktis** waren durch die Periode des Kalten Krieges behindert. Sie wurden erst in den 1980er Jahren mit den vorangegangenen politischen Veränderungen in der Sowjetunion ermöglicht. 1989 wurde das *International Arctic Science Committee* (IASC) und 1990 die *Arctic Environmental Protection Strategy* (AEPS) mit Beteiligung der Umweltminister der acht Anrainerstaaten sowie Vertretern der Urbevölkerung (Inuit, Samen u.a.) gegründet. Seitdem ist die Arktis die größte Region in der Welt mit einer zwischenstaatlichen Zusammenarbeit, in der das wichtigste Thema der **Umweltschutz** ist. Diese hat den Weg für die Einführung neuer Umwelt- und Naturschutzkonzepte geebnet. Beispielsweise er-

weiterte Russland in den 1990er Jahren die Fläche seiner Naturschutzgebiete in der Arktis auf etwa die Größe von Deutschland (s. Abb. 5.13-3, S. 320).

Schlussbetrachtung

Immer mehr wissenschaftliche Studien zeigen, dass der Klimawandel eine wachsende Herausforderung für die ganze Welt ist. Die ausgesuchten Fallbeispiele mögen genügen, um darauf aufmerksam zu machen, wie fortgeschritten der Klimawandel in den Polarregionen bereits ist.

Tiere und Pflanzen, die auf Eis angewiesen sind, stellen die Gruppe der größten Verlierer beim Klimawandel dar, weil sie ihre Lebensräume ohne Ausweichmöglichkeit höchstwahrscheinlich verlieren werden. Die indigenen Völker im Norden müssen gewaltige Umstellungen durchmachen. Ansiedlungen an der Küste sind gefährdet, da das Meer aufgrund des Meeresspiegelanstieges und der sich durch zunehmende Stürme verstärkenden Küstenerosion auf dem Vormarsch ist. Der Schutz der Küste durch das Meereis und den Permafrost nimmt immer mehr ab.

Der Rückgang des Meereises im Nordpolarmeer wird neue Schiffrouten und Erschließungen anderer Gebiete möglich machen. Gleichzeitig werden jedoch die Risiken von Schiffsunfällen und Ölverschmutzung in der sensiblen arktischen Region zunehmen. In diesem Zusammenhang soll das Öltankerunglück der Exxon Valdez in Alaska erwähnt werden. Infolge dieses Unfalls starben mindestens 250.000 Vögel, Robben, Wale u.a., viele Fischfanggründe mussten aufgegeben werden und das Leben im Meer leidet heute immer noch. Möglicher Gewinner der Erwärmung der Arktis kann die Landwirtschaft werden, die nach Norden ausgedehnt werden könnte.

Klimaveränderungen früherer Zeiten erfolgten, als die Erde kaum oder gar nicht besiedelt war. Für kleine Gruppen von Menschen – damals nicht sesshaft – war es relativ leicht, klimatisch ungünstigen Regionen auszuweichen. Tiere konnten lebensfeindliche Gebiete ungehindert verlassen. Dies ist heutzutage aufgrund der Präsenz des Menschen und der zugehörigen Infrastruktur (Siedlungen, Straßen, etc.) nicht ohne weiteres möglich.

Wir plädieren für mehr Klimaschutz durch Verringerung der Treibhausgasemissionen, um die Folgen des Klimawandels möglichst abzuschwächen, da die Wahrscheinlichkeit für gefährliche Veränderungen bei beschleunigter Erwärmung stark zunimmt. Ferner sind Maßnahmen zur Anpassung an den rasanten Klimawandel dringend notwendig, da er sich auch bei Klimaschutz noch lange fortsetzen wird ♦