

Peter Wadhams

Abschied vom Eis

Ein Weckruf aus der Arktis

SACHBUCH

EBOOK INSIDE



Springer

Abschied vom Eis

Peter Wadhams

Abschied vom Eis

Ein Weckruf aus der Arktis

Aus dem Englischen übersetzt von
Florian Neukirchen



Springer

Peter Wadhams
Cambridge, UK

Übersetzt von Florian Neukirchen, Berlin, Deutschland

ISBN 978-3-662-60661-2 ISBN 978-3-662-60662-9 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-60662-9>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Übersetzung der englischen Ausgabe: A Farewell To Ice von Peter Wadhams, erschienen bei Penguin Books Ltd, London, 2017. Text copyright © Peter Wadhams 2016. The author has asserted his moral rights. Alle Rechte vorbehalten.

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Einbandabbildung: © smallredgirl/stock.adobe.com

Planung/Lektorat: Sebastian Müller

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort

Peter Wadhams ist seit 50 Jahren Polarforscher und hat in dieser Zeit enorme Veränderungen der Meereisbedeckung in den Polarregionen beobachtet und gemessen. In diesem Buch gibt er zunächst einen kurzen Überblick über die Erde und die Entwicklung ihres Eises auf Land und Meer. Er beschreibt weiterhin die tief greifenden Veränderungen, die er in seiner Karriere erlebt hat. Die Fläche des sommerlichen Meereises der Arktis ist von mehr als acht Millionen Quadratkilometern auf weniger als die Hälfte zurückgegangen, weshalb ein bald bevorstehendes Auftreten eisfreier Sommer vorhergesagt wird.

Das Schmelzen von Meereis ist nicht nur ein seltsames Phänomen in einem entlegenen Teil unserer Welt: Es verringert die Menge der in den Weltraum zurückreflektierten Sonnenstrahlung drastisch von 60 % auf 10 % und beschleunigt so die globale Erwärmung zusätzlich. Gefrorene Sedimente, die seit der letzten Eiszeit ungestört unter der Oberfläche lagen, setzen nun Methan – ein sehr

starkes Treibhausgas – in die Atmosphäre frei. *Der Abschied vom Eis* ist sowohl ein maßgeblicher Bericht über den heutigen Zustand der Arktis als auch eine zeitgemäße Mahnung angesichts der globalen Bedrohung, die vom Verlust des Meereises ausgeht.

Walter Munk
Scripps Institution of Oceanography
La Jolla, Kalifornien, USA

Danksagung

Ich bin unzähligen Menschen dankbar, die mit Fakten, Ideen und Inspirationen geholfen haben. Dazu gehören Paul Beckwith, Peter Carter, Florence Fetterer, Martin Harrison, Chris Hope, Charles Kennel, Daniel Kieve, Seelye Martin, Walter Munk, Jon Nissen, Jim Overland, Hans Joachim Schellnhuber, David Wasdell und Gail Whiteman. Ich danke Carl Wunsch, David Wasdell und Subhankar Banerjee, dass sie das ganze Manuskript gelesen und wertvolle Ergänzungen und Änderungen vorgeschlagen haben. Ich danke dem US Office of Naval Research für die langfristige wissenschaftliche Unterstützung, die dieses Buch ermöglicht hat; ebenso Andrea Pizzuti von Grafiche Fioroni in Casette d'Ete (Fermo), Italien, für die Hilfe bei den Illustrationen. Vor allem danke ich meiner Frau Maria Pia Casarini, Direktorin des Istituto Geografico Polare „Silvio Zavatti“ in Fermo, Italien, für die lebenslange persönliche Unterstützung und Inspiration.

VIII Danksagung

Ich habe dieses Buch in Anlehnung an einen Roman von Ernest Hemingway benannt, weil es sich nicht nur mit den Auswirkungen des derzeit ablaufenden enormen Meereisverlustes auf unserem Planeten befasst, sondern diesen auch mit einigen persönlichen Geschichten aus meiner langen Karriere verschrankt. Diese werfen, wie ich hoffe, ein Licht auf die Besonderheiten der Welt des Meereises und auf die katastrophalen Folgen, die durch sein Verschwinden ausgelöst werden.

Kap. 12 stützt sich auf einen Bericht, der bereits in einem anderen Werk veröffentlicht wurde: Wadhams P (2015) Antarctic Sea Ice Changes and their Implications: The Annual Ice Cycle and its Changes. In: Letcher T (Hrsg.) Climate Change: Observed Impacts on Planet Earth, 2. Aufl., Elsevier, Amsterdam.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung: Eine blaue Arktis	1
	Literatur	8
2	Eis, der magische Kristall	9
2.1	Die Kristallstruktur von Eis	9
2.2	Gefrieren und Schmelzen	15
2.3	Die Bildung von Eis im Meer	19
2.4	Die Bedeutung der Sommerschmelze	23
2.5	Wie im Eis Rinnen und Presseisrücken entstehen	24
2.6	Eis im flachen Wasser	29
2.7	Polynjas	33
	Literatur	36
3	Eine kurze Geschichte des Eises auf der Erde	39
3.1	Das erste Eis	39
3.2	Das Paradoxon der Schneeball-Erde	41
3.3	Zwei weitere Schneebälle	45

X Inhaltsverzeichnis

3.4	Der Übergang zu astronomisch verursachten Eiszeiten	47
	Literatur	52
4	Der moderne Zyklus der Eiszeiten	53
4.1	Das Pliozän und die Eiszeiten	53
4.2	Daten über die letzten Vergletscherungen	55
4.3	Der astronomische Einfluss auf die Eiszeiten	58
4.4	Das Archiv der Eiskerne	60
4.5	Wie die letzten Eiszeit endete	66
4.6	Wie lange noch bis zur nächsten Eiszeit?	71
	Literatur	73
5	Der Treibhauseffekt	75
5.1	Der natürliche Treibhauseffekt	76
5.2	Kohlendioxid, der Bösewicht unter den Molekülen	83
5.3	Methan und Lachgas	89
5.4	Ozon und FCKW	91
5.5	Strahlungsantrieb	93
5.6	Klimasensitivität	94
5.7	Die jüngste Temperaturgeschichte der Erde	96
5.8	Arktische Verstärkung	97
	Literatur	100
6	Das Meereis beginnt zu schmelzen	103
6.1	Meereis im 19. Jahrhundert	103
6.2	Wir treten in die Neuzeit ein	106
6.3	Der Eiskollaps der letzten zehn Jahre	111
6.4	Ein persönliches Zwischenspiel, 2007	115
6.5	Der nächste Schritt abwärts für das Eis, 2012	121

	Inhaltsverzeichnis	XI
6.6	Die letzten Jahre des sommerlichen Eises	123
6.7	Wellen im offenen Wasser	126
Literatur		130
7	Die Zukunft des arktischen Meereises – die Todesspirale	133
7.1	Wie geht es für das Meereis weiter?	133
7.2	Haben wir einen Kippunkt überschritten?	139
7.3	Woher wissen wir, dass all das passieren wird?	141
7.4	Unmittelbare Folgen des Eisrückzugs – Navigation in der Arktis	147
7.5	Unmittelbare Folgen des Eisrückzugs – Öl und der Meeresboden	154
7.6	Das Problem der Ölverschmutzung und wie man damit umgeht	158
7.7	Wahrscheinlicher Verlauf eines weiteren Eisrückzugs in diesem Jahrhundert	163
Literatur		164
8	Die Beschleunigung durch arktische Rückkopplungen	167
8.1	Das Konzept der klimatischen Rückkopplungen	167
8.2	Eis-Albedo-Rückkopplung	169
8.3	Rückkopplung durch Rückgang der Schneegrenze	173
8.4	Wasserdampfrückkopplung	175
8.5	Schmelzende Eisschilde und Meeresspiegelanstieg	176
8.6	Rückkopplung bei arktischen Flüssen	185
8.7	Rückkopplung durch Ruß	185
8.8	Rückkopplung bei der Ozeanversauerung	187

XII Inhaltsverzeichnis

8.9	Welche Rückkopplungen sind am stärksten?	189
	Literatur	192
9	Arktisches Methan, eine Katastrophe kündigt sich an	193
9.1	Submariner Permafrost und warmes Wasser	193
9.2	Globale Auswirkungen der Methanfreisetzung in der Arktis	200
9.3	Sofort handeln!	203
9.4	Die Bedrohung durch tauenden Permafrost an Land	207
9.5	Das Gebiet weitet sich aus	209
	Literatur	212
10	Seltsames Wetter	215
10.1	Das Wetter und der Strahlstrom	216
10.2	Ist dieser Mechanismus real?	219
10.3	Wetterereignisse und Nahrungsproduktion	224
10.4	Das Problem des Wassers	228
	Literatur	229
11	Die geheimnisvollen Konvektionsschloten	231
11.1	Die globale thermohaline Zirkulation	232
11.2	Die Konvektion in der Grönlandsee	235
11.3	Das Geheimnis der Schloten	242
11.4	Die Zukunft im Kino	249
11.5	Die Zukunft	252
	Literatur	253

	Inhaltsverzeichnis	XIII
12 Was passiert in der Antarktis?		255
12.1 Die seltsame Geschichte des antarktischen Meereises		255
12.2 Warum das antarktische Eis anders ist		257
12.3 Schnee auf dem Eis		262
12.4 Der jährliche Eiszyklus und wie er sich ändert		263
12.5 Was passiert mit dem Eis?		269
12.6 Reaktion der Antarktis auf Veränderungen anderswo		271
Literatur		275
13 Der Zustand der Erde		279
13.1 Was können wir tun?		284
13.2 Kann uns das Pariser Abkommen von 2015 retten?		307
Literatur		311
14 Aufruf zum Kampf		313
14.1 Stärkung der Wissenschaft		315
14.2 Kriegsgefahr		318
14.3 Die Leugner des Klimawandels		320
14.4 Zeit zu kämpfen		330
Literatur		335
15 Nachtrag zur deutschen Ausgabe		337
15.1 Internationale Organisationen		338
15.2 Methan im Arktischen Ozean		341
15.3 Der Meereisrückzug		343
15.4 Die nächste Eiszeit		344
15.5 Schifffahrtsrouten in der Arktis		344

XIV Inhaltsverzeichnis

15.6	Meeresspiegelanstieg	345
15.7	Absenkung der Kohlendioxidkonzentration	345
15.8	Abschließende Gedanken	348
Anhang		349
Stichwortverzeichnis		353



1

Einführung: Eine blaue Arktis

Seit 1970 bin ich Polarforscher. Die meiste Zeit hatte ich das Privileg, am Scott Polar Research Institute in Cambridge tätig zu sein, auch als Direktor. Es wurde im Gedenken an Robert Falcon Scott errichtet und war ein Rückzugsort und Treffpunkt für Polarforscher jeglicher Disziplin, von denen viele von ihren Institutionen für längere Zeit freigestellt wurden, um in der unvergleichlichen Bibliothek zu studieren. In den 1970er- und 1980er-Jahren war ich jedes Jahr in den Polarregionen (meist in der Arktis), manchmal mehrmals, und wie meine Kollegen in Europa, Amerika, Russland und Japan widmete ich mich dem Verständnis der grundlegenden physikalischen Prozesse, die im Meereis ablaufen und die bestimmen, wie es wächst, zerfällt und sich bewegt. Die Feldforschung auf Eis ist sehr schwierig und manchmal gefährlich, und nur wenige von uns konnten sich dabei vorstellen, dass sich das Objekt unserer Untersuchungen, der Arktische Ozean, vor unseren Augen ändern könnte. Es war schon schwer

genug zu versuchen, überhaupt erst einmal die grundlegenden Abläufe in der Arktis zu verstehen. Doch sie veränderte sich tatsächlich. Ich hatte das Glück, als einer der Ersten dafür eindeutige Beweise zu finden: Als ich die Eisdickenmessungen verglich, die ich 1976 und 1987 mit U-Booten durchgeführt hatte, stellte ich einen Verlust von 15 % der durchschnittlichen Dicke fest! Dieses 1990 in *Nature* veröffentlichte Ergebnis (Wadhams 1990) regte eine intensivere Forschung an, die innerhalb eines Jahrzehnts zeigte, dass diese Ausdünnung nicht nur real war, sondern dass seit den 1970er-Jahren das Meereis sogar um mehr als 40 % dünner geworden war (Rothrock et al. 1999; Wadhams und Davis 2000). Etwas wirklich Dramatisches ging hier vor sich. Polarforscher blickten von ihren eigenen spezialisierten Studien auf und begannen, das Gesamtbild zu betrachten. Sie sind zu Spezialisten für den Klimawandel geworden, geradezu zu Pionieren in dessen Erforschung, denn gerade in der Arktis scheint der globale Wandel am schnellsten und drastischsten zu verlaufen.

Mein Interesse an den Polarmeeren (s. a. die Karten im Anhang) war geweckt worden, als ich im Sommer 1970 zum ersten Mal in die Arktis fuhr, an Bord des kanadischen Forschungsschiffs *Hudson*, das die erste Umrundung Amerikas durchführte. Die *Hudson*-70-Expedition hatte Nova Scotia im kalten Herbst 1969 verlassen und war bereits zur Antarktischen Halbinsel, zum Südlichen Ozean, zu den Fjorden Chiles und durch die endlose Weite des Pazifiks gefahren (Wadhams 2009). Nun sollten wir uns auf ein Abenteuer begeben, das vor uns nur neun Schiffe vollbracht hatten: Eine Fahrt durch die Nordwestpassage (Headland 2016). Das Schiff hatte einen Eisschutz, und den brauchte es auch. Entlang der Nordküsten Alaskas und der Nordwest-Territorien reichte das Meereis des Arktischen

Ozeans bis nahe ans Land und ließ uns nur einen wenige Kilometer breiten Kanal mit offenem Wasser, um unsere Untersuchungen durchzuführen. Manchmal drängte sich das Eis bis an die Küste, und wir mussten uns durch dicht gehäufte Schollen aus schwerem, dickem, mehrjährigem Eis brechen (Abb. 1.1). Schlussendlich mussten wir, als wir mitten in der Nordwestpassage waren, von einem schweren Eisbrecher der kanadischen Küstenwache gerettet werden, der John A. Macdonald. Damals galt ein Kampf mit Meereis in der kanadischen Arktis als normal. In den Jahren 1903 bis 1906 brauchte Amundsen drei Jahre, um die Nordwestpassage zu befahren, und das zweite Schiff, das die Passage schaffte, der Schoner St. Roch der Royal Canadian Mounted Police, benötigte von 1942 bis 1944 zwei Sommer.



Abb. 1.1 Das kanadische Forschungsschiff Hudson im August 1970 vor der Nordküste Alaskas, umgeben von mehrjährigem Eis (vom Hubschrauber aus gesehen)

Heute findet ein Schiff, das im Sommer von der Beringstraße in die Arktis einfährt, ein Meer mit offenem Wasser vor. Dieses blaue Wasser erstreckt sich weit nach Norden, fast bis zum Nordpol. Bis zur Veröffentlichung dieses Buches ist es möglich – und nach vielen Vorhersagen wahrscheinlich –, dass der Pol selbst zum ersten Mal seit Zehntausenden von Jahren eisfrei sein wird. Die Nordwestpassage ist heute leicht zu befahren, bis Ende 2015 haben sie insgesamt 238 Schiffe durchquert. Im September 2012 bedeckte das Meereis nur 3,4 Mio. km² der Oberfläche des Arktischen Ozeans, gegenüber 8 Mio. km² in den 1970er-Jahren. Die Bedeutung dieses Wandels für den Planeten Erde ist gewaltig und unübersehbar: Er hat seine Farbe verändert. Wir alle erinnern uns an das erste schöne Foto der Erde, die hinter dem Mond aufsteigt, aufgenommen von den Astronauten von Apollo 8. Eine zarte blaue Kugel, die im Kosmos isoliert ist, die alles enthält, was wir über das Leben wissen. Diese Kugel war an beiden Seiten weiß. Heute sieht der obere Teil der Welt im nördlichen Sommer aus dem All blau statt weiß aus. Wir haben ein Meer geschaffen, wo es einst eine Eisdecke gab. Es ist die erste große „Errungenschaft“ des Menschen bei der Umgestaltung des Gesichts unseres Planeten, wenn auch natürlich unbeabsichtigt und mit zweifelhaften und möglicherweise katastrophalen Folgen.

Es ist sogar noch schlimmer, als es der Anschein vermuten lässt. Meine Sonarmessungen zeigten, dass die durchschnittliche Eisdicke zwischen 1976 und 1999 um 43 % abgenommen hat (Rothrock et al. 1999). Aber sie zeigten auch andere Dinge. In der Vergangenheit war das meiste Eis in der Arktis mehrere Jahre alt, das sogenannte mehrjährige Eis. Es hatte eine zerklüftete und beeindruckende Topografie mit riesigen Presseisrücken, die die Wege der Entdecker blockierten, mit Kielen, die 50 m oder mehr in den Ozean ragten (Abb. 1.2). In den letzten

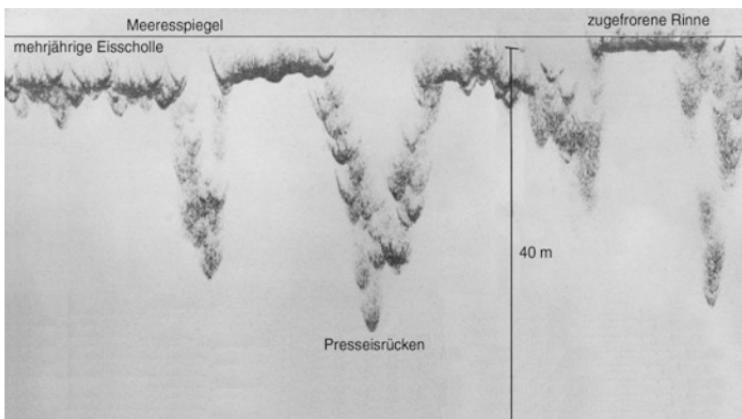


Abb. 1.2 Presseisrücken im mehrjährigen Packeis, aufgezeichnet durch ein aufwärtsgerichtetes Sonar eines U-Bootes. Der größte reicht 30 m tief

zehn Jahren hat ein sich änderndes Strömungssystem den größten Teil dieses Eises aus der Arktis verdrängt, und es wurde durch einjähriges Eis (Abb. 1.3) ersetzt, das während einer einzigen Wintersaison wächst und eine maximale Dicke von nur 1,5 m erreicht. Dieses Eis weist nur vereinzelt Rücken auf, die sich nur wenig über die sehr flache Oberfläche erheben. Eis, das in einem einzigen Winter zu dieser geringeren Dicke heranwächst, kann in einem einzigen Sommer aufgrund der wärmeren Luft- und Meerestemperaturen auch wieder vollständig abschmelzen. Es wird nicht lange dauern, bis die Sommerschmelze das Winterwachstum überall in der Arktis übertrifft, und wenn das passiert, wird die gesamte verbleibende sommerliche Eisbedeckung kollabieren. Wir sind in die sogenannte „arktische Todesspirale“ eingetreten, wie der US-Klimatologe Mark Serreze es nannte:

„Das Eis ist in einer ‚Todesspirale‘ und könnte in wenigen Jahrzehnten im Sommer verschwinden.“ (Serreze 2008)



Abb. 1.3 Eine typische Winterlandschaft mit glattem, schneebedecktem einjährigem Eis. Dessen Dicke liegt zwischen 1 und 1,5 m. Rechts befindet sich ein wieder zugefrorener Riss, dessen Eis in Aussehen und Dicke der übrigen Eisscholle ähnelt

„Von bestimmten Kreisen wird behauptet, das Meereis der Arktis würde sich erholen und wieder dicker werden. Das ist schlicht falsch. Es geht weiter abwärts in einer Todesspirale.“ (Serreze 2010)

In naher Zukunft, wie ich in Kap. 7 darlege, wird diese uns einen eisfreien September in der Arktis bescheren, und wenige Jahre später wird sich die eisfreie Saison auf vier oder fünf Monate ausweiten.

Die Folgen eines Zusammenbruchs der sommerlichen Meereisbedeckung der Arktis werden dramatisch sein, weil dadurch zwei gewaltige Effekte entfesselt werden: Erstens sinkt, wenn das sommerliche Meereis dem offenen Wasser Platz macht, die Albedo – der Anteil der einfallenden Sonnenstrahlung, der direkt in den Weltraum reflektiert wird – von 0,6 auf 0,1, was die Erwärmung der

Arktis und des gesamten Planeten weiter beschleunigen wird. Die Änderung der Albedo durch den Verlust der letzten 4 Mio. km² Meereis wird auf der Erde eine ähnliche erwärmende Wirkung haben wie die Kohlendioxidemissionen der letzten 25 Jahre. Zweitens wird durch die Entfernung der Eisdecke eine wichtige „Klimaanlage“ für die Arktis wegfallen. Solange im Sommer etwas Eis vorhanden ist – so dünn es auch ist –, kann die Meeresoberflächentemperatur nicht über 0 °C steigen, da jegliches wärmere Wasser seine Wärme verliert, wenn es einen Teil des darüber liegenden Eises schmilzt. Wenn das Eis jedoch verschwunden ist, kann sich das Oberflächenwasser im Sommer um mehrere Grad erwärmen (Satellitenbeobachtungen haben 7 °C ergeben), und an einem flachen Kontinentalschelf breitet sich diese Wärme durch windbedingte Vermischung bis zum Meeresboden aus. Dabei taut die Oberflächenschicht des submarinen Permafrostes auf, Meeresbodensedimente, die dort seit der letzten Eiszeit ungestört liegen. Dieser auftauende submarine Permafrost wird die Freisetzung riesiger Methanfahnen aus dem Zerfall von im Sediment eingeschlossenen Methanhydraten auslösen. Und als Treibhausgas ist Methan pro Molekül 23-mal wirksamer als Kohlendioxid. Eine jährlich durchgeführte russisch-amerikanische Expedition in die Ostsibirische See hat bereits beobachtet, wie solche Methanfahnen aus dem Meeresboden aufsteigen, genauso wie andere Expeditionen Methanfahnen in der Laptewsee und der Karasee fanden. Wenn diese Freisetzung dazu führt, dass der Methangehalt in der Atmosphäre steigt, wird sie der globalen Erwärmung sofort einen weiteren Schub geben. Ich habe dieses Buch geschrieben, um diese dramatischen Veränderungen zu erklären – und wie und warum der Verlust von arktischem Eis uns alle bedroht und nicht nur eine „interessante Veränderung“ in einem entlegenen Teil der Welt ist.

Seit ich 21 Jahre alt war, habe ich mein ganzes wissenschaftliches Leben damit verbracht, mich mit der Wissenschaft des Meereises und der Polarmeere zu beschäftigen. Was bedeuten diese Veränderungen für mich, wenn ich mich persönlich von dieser magischen Landschaft verabschieden muss? Ich selbst habe das überwältigende Gefühl, dass dies nicht nur materiell eine Katastrophe für die Menschheit ist, sondern auch für eine geistige Verarmung steht. Unsere eigene Gier und Dummheit nimmt uns die schöne Welt des Meereises im Arktischen Ozean, das uns einst vor den Auswirkungen der klimatischen Extreme geschützt hat. Jetzt besteht dringender Handlungsbedarf, wenn wir uns vor den schwerwiegenden Konsequenzen bewahren wollen.

Literatur

- Headland RK (2016) Transits of the Northwest Passage to end of the 2013 navigation season. *Atlantic Ocean – Arctic Ocean – Pacific Ocean*. Il Polo, 71 (3), (im Druck)
- Rothrock DA, Yu Y, Maykut GA (1999) Thinning of the Arctic sea-ice cover. *Geophys Res Lett* 26:3469–3472
- Serreze, M (2008) National geographic news, 17. September
- Serreze M (2010) Stellungnahme. In: Climate Progress, 9. September. <https://thinkprogress.org/serreze-arctic-is-continuing-down-in-a-death-spiral-every-bit-of-evidence-we-have-says-the-ice-is-4e061fec87e8/>
- Wadhams P (1990) Evidence for thinning of the Arctic ice cover north of Greenland. *Nature* 345:795–797
- Wadhams P (2009) *The great ocean of truth*. Melrose Books, Ely
- Wadhams P, Davis NR (2000) Further evidence of ice thinning in the Arctic ocean. *Geophys Res Lett* 27:3973–3975



2

Eis, der magische Kristall

2.1 Die Kristallstruktur von Eis

Warum spielt das Eis eine so wichtige Rolle im Energiesystem unseres Planeten, ja sogar jedes Planeten, der Leben enthalten kann? Die Antwort liegt in den einzigartigen Eigenschaften des Eiskristalls, die wiederum aus den einzigartigen Eigenschaften des Wassermoleküls resultieren, die es zum Schlüssel des Lebens machen.

Ein isoliertes Wassermolekül, H_2O , hat eine nahezu perfekte Tetraederform, das heißt die Form einer Dreieckspyramide (Abb. 2.1). Ein Elektron, das normalerweise das Proton im kleinen Sonnensystem eines Wasserstoffatoms umkreist, wird zwischen dem Proton und dem Sauerstoffkern geteilt, wodurch eine sogenannte kovalente Bindung entsteht. Es gibt zwei solcher H–O-Bindungen im Molekül, und sie bilden eine geknickte Geometrie, wobei der Winkel zwischen den beiden Bindungen $104,5^\circ$ beträgt (bei einem perfekten Tetraeder wären es $109,5^\circ$).

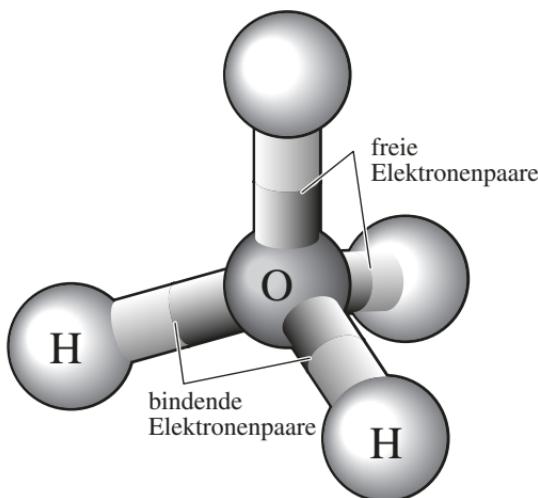


Abb. 2.1 Tetraederstruktur eines Wassermoleküls

Das Tetraeder wird durch zwei freie Elektronenpaare aus dem Sauerstoffatom vervollständigt, die nicht an etwas anderes gekoppelt sind, sondern für die Bildung einer Bindung zur Verfügung stehen. Was passiert, wenn diese in flüssigem Wasser frei beweglichen Moleküle zu festem Eis gefrieren? Das wissen wir erst seit 1935, als der bedeutende Chemiker Linus Pauling die dreidimensionale Struktur des festen Eises aufklärte (Pauling 1935).

Der Grundbaustein von Eis ist das Tetraeder, das vom freien Wassermolekül geerbt wird. Jedes Sauerstoffatom befindet sich im Zentrum eines Tetraeders, das an den 0,276 nm (Nanometer, 10^{-9} m) entfernten Eckpunkten an vier weitere Sauerstoffatome gebunden ist. Diese Sauerstoffatome sind nahe einer Reihe von parallelen Ebenen konzentriert, die als Basisebenen bezeichnet werden. Die Hauptachse oder *c*-Achse der Elementarzelle des Kristallgitters liegt senkrecht zur Basisebene, und die gesamte Struktur erinnert an Bienenwaben: Sie besteht

aus Schichten, die aus höckerigen Sechsecken zusammengesetzt sind (Abb. 2.2).

Diese Struktur bewirkt, dass Eis anisotrop ist, das heißt, es hat Eigenschaften, die in verschiedene Richtungen variieren. Wenn ein Eiskristall wächst, indem Wassermoleküle an ihm festfrieren, ist es energetisch günstiger, weitere Sauerstoffatome zu einer bestehenden Bienenwabe hinzuzufügen, als eine ganz neue Wabenplatte zu beginnen – so müssen nur zwei neue Bindungen anstelle von vier geschaffen werden. Eiskristalle wachsen daher leichter entlang der Achsen in der Basisebene als entlang der c-Achse – die Wachsplatten im Bienenstock werden auch eher seitlich größer, als dass eine neue Platte hinzukommt. Diese bevorzugten Wachstumsrichtungen entpuppen sich als die Richtungen der Arme von Schneeflocken, die aus Dampf in Wolken wachsen, und der Arme der zarten

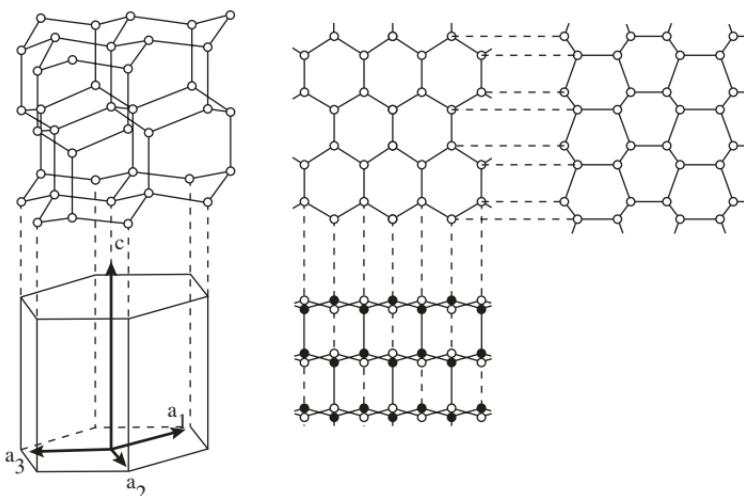


Abb. 2.2 Die Struktur eines Eiskristalls mit einer verzerrten wabenförmigen Anordnung von Sauerstoff- und Wasserstoffatomen. Die c-Achse ist die Symmetriearchse, und die anderen drei bilden die Basisebene des Kristalls. (Nach Pauling 1935)

Eiskristalle, die sich auf einer neu gefrierenden Meeres- oder Seeoberfläche bilden. Zum Verständnis des Meer-eises ist es am wichtigsten, dass eine davon die bevorzugte Wachstumsrichtung der Meereiskristalle in einer durch Anfrieren an der Unterseite dicker werdenden Eisscholle ist.

Das schnelle Wachstum in diese Richtungen können wir am deutlichsten beobachten, wenn eine dünne Wasserschicht auf einer Fensterscheibe gefriert und Eisblumen entstehen. Der erste Eiskristall, der sich bildet, streckt Arme aus, die in einem Winkel von 60° zueinander über das Glas schießen, und füllt dann die Lücken wie die Äste eines Baumes mit neuen Armen. In jedem Fall beträgt der Winkel 60° , und die Arme wachsen sehr schnell. Das nennt man dendritisches Wachstum, vom griechischen Wort für Baum.

Dies ist die Struktur für Eis bei Temperaturen und Drücken, wie sie auf der Erdoberfläche auftreten. Bei sehr hohen Drücken und bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt ($-273,16^\circ\text{C}$) gibt es andere, dichter gepackte Eisformen – tatsächlich sind 17 Modifikationen bekannt (Hobbs 1974; siehe auch Petrenko et al. 1999; Chaplin 2016), dies nennt man Polymorphie. Die uns vertraute und unter normalen Bedingungen auf der Erde auftretende Form ist das sogenannte Eis I_{h} . Einige der Hochdruckformen existieren wahrscheinlich tief im Inneren der Planeten, die weit weg von ihren Sonnen sind, und wir können sie im Labor herstellen. Tief temperaturmodifikationen sind für einige sehr spezielle Prozesse im Weltraum verantwortlich. So bildet beispielsweise Eis den äußeren Teil der meisten Kometen, und es bedeckt die winzigen Staubkörner im Weltraum, die Sterne zum Funken bringen, selbst wenn ein Astronaut sie von oberhalb der Erdatmosphäre aus beobachten würde. Der Astronom Fred Hoyle schlug vor, dass das Leben möglicherweise

im Weltraum auf so winzigen Körnern entstanden sein könnte. Sie bilden ein Substrat, das Moleküle dicht genug zusammenhält, um chemische Reaktionen hervorzurufen, die schließlich zu Leben führen könnten. Vor wenigen Jahren hat die spannende Mission der Raumsonde Rosetta der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) zum Kometen Tschurjumow-Gerassimenko gezeigt, dass Eis verdampfte und in kleinen „Jets“ ins All flog, während sich der Komet der Sonne näherte und sich seine Eisdecke erwärmte.

Das Netz der Sauerstoffatome wird durch „Brücken“ zusammengehalten, bei denen jeweils ein H-Atom zwei O-Atome verbindet. Das H-Atom ist mit einem O mit einer engen kovalenten Bindung und mit dem anderen O mit einer Wasserstoffbrückenbindung (mit geringerer Anziehungskraft) verbunden. In jeder „Brücke“ liegt das H-Atom näher an dem einen O als an dem anderen, wobei es Zufall ist, welches es bevorzugt. Jedes O hat zwei benachbarte H-Atome, aber es kann in jeder „Brücke“ nur ein H geben. Vorbehaltlich dieser beiden Regeln, die sich aus der Quantenmechanik ableiten, können die Wasserstoffatome beliebig angeordnet werden. Es ist die Länge der Wasserstoffbrücke, die die offene Struktur des Eises erzeugt. Wenn das Eis schmilzt, werden einige der Wasserstoffbrücken gebrochen, was zu einem Zusammenbruch in eine ungeordnete Struktur von durcheinandergewürfelten, zufällig angeordneten H_2O -Molekülen mit einer höheren Dichte als im festen Zustand führt. Daher ist Wasser ein sehr ungewöhnliches Molekül: Die feste Form ist weniger dicht als die Flüssigkeit, anders als beispielsweise bei Metallen. Die Dichte des reinen Wassers beträgt 1000 kg m^{-3} (Kilogramm pro Kubikmeter) – das war die ursprüngliche Definition des Kilogramms – und die des reinen Eises $917,4 \text{ kg m}^{-3}$. Meerwasser hat eine höhere Dichte als reines Wasser, typischerweise 1025 kg m^{-3} ,

sodass im Meer der Dichteunterschied zwischen Wasser und Eis etwa 10 % beträgt. Deshalb ragen auch 10 % der Masse einer Eisscholle oder eines Eisbergs über die Meeresoberfläche.

Stellen wir uns einmal vor, was passieren würde, wenn der Dichteunterschied, wie in den meisten Substanzen, umgekehrt wäre und Eis im Wasser versinkt. Erstens würden Seen, Flüsse und sogar das Meer fast vollständig durchfrieren. Sobald sich an der Oberfläche einer Wassermasse, zum Beispiel an der Meeresoberfläche, aufgrund einer niedrigen Lufttemperatur, Eis bildet, würde dieses Eis bis auf den Boden sinken und dort eine Schicht aufbauen. Das ganze Bodenleben würde ausgelöscht, und im Falle eines Sees würde sich die Eisschicht am Boden verdicken, bis am Ende des Winters nur noch eine kleine Schicht ungefrorenes Wasser an der Oberfläche wäre oder vielleicht gar keines, wodurch alles Leben dort ausgelöscht würde. Das Gleiche würde auch mit dem Meer geschehen, wobei nicht klar ist, ob der Winter lang genug wäre, um auf dem Meeresboden eine ausreichend dicke Eisschicht aufzubauen, um den Ozean bis zur Meeresoberfläche zu füllen. Sicherlich wäre das Wachstum schnell: In der realen Welt bildet das Meereis eine dünne Schicht an der Oberfläche, die das Meer vor weiterem Einfrieren schützt. In unserer alternativen Welt würde das Meer jedoch die Kälte aus der Atmosphäre ungehindert den ganzen Winter über aufnehmen und eine immer dickere Eisschicht auf dem Meeresboden bilden. Ich glaube nicht, dass irgendjemand schon einmal modelliert hat, ob ein solcher Ozean bis an die Oberfläche gefrieren würde, aber wenn das der Fall wäre, würde darin alles Leben enden, vielleicht mit der Ausnahme winziger Mikroorganismen. Das Leben im Ozean würde sich auf einen Streifen entlang des Äquators beschränken, wo das Meer nicht komplett durchfrieren

kann; in höheren Breitengraden hätten wir nur feste Eismassen, die bis zum Meeresboden reichen.

Auch ein paar andere Dinge wären anders. In der realen Welt dehnt sich das gefrierende Wasser aus, sodass sich das Wasser beim Einfrieren in einem Riss ausdehnt, etwa in einem Straßenriss oder in einer Felsspalte. Das umgebende Material bricht auf und es kommt zu Frostschäden. Das würde in unserer alternativen Welt aufhören. Außerdem wäre Schlittschuhlaufen unmöglich, wenn das Eis dichter wäre als Wasser. In der realen Welt senkt der intensive Druck der Kufe auf die Eisoberfläche den Schmelzpunkt, und das Eis direkt unter der Kufe schmilzt und schmiert sie. Wäre das Wasser weniger dicht als Eis, würde der Druck auf das Eis stattdessen den Schmelzpunkt erhöhen.

2.2 Gefrieren und Schmelzen

Kehren wir in die reale Welt zurück und schauen wir uns sehr kaltes Wasser an. Normalerweise denken wir, dass Flüssigkeiten keine Struktur haben und aus zufällig angeordneten Molekülen bestehen, die umherwirbeln und -taumeln. Aber kaltes flüssiges Wasser enthält einen Teil der kleinräumigen Ordnung von Eis, wobei die kristallartig gebundene Struktur in Molekülgruppen für Sekunden oder Minuten besteht, bis sie durch thermische Bewegung wieder zerstört wird. Das ist wie eine Gruppe von Menschen auf einem belebten Bahnhof, die versuchen, im Gespräch beisammenzustehen, aber durch die wirbelnde Menge getrennt werden. Dies verursacht das seltsame Dichteverhalten von Süßwasser, das seine maximale Dichte bei $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ hat. Das bedeutet: Wenn in den hohen Breiten ein Fluss oder See im Herbst durch kalte Lufttemperaturen gekühlt wird, kühlt das Oberflächen-

wasser ab und sinkt zunächst ab (normalerweise ist das wärmere Wasser weniger dicht als das kühlere Wasser). Dabei wird es durch wärmeres Wasser aus größerer Tiefe ersetzt, ein Prozess, der als Konvektion bezeichnet wird. Dies geht so lange weiter, bis das gesamte Wasser im See auf 4 °C gekühlt ist. Jenseits dessen wird das Oberflächenwasser jedoch, wenn es weiter abgekühlt wird, weniger dicht und bleibt an der Oberfläche, sodass die Konvektion aufhört. Das Oberflächenwasser kann dann schnell auf 0 °C abkühlen und gefrieren, während die tieferen Bereiche des Sees nahe 4 °C bleiben. So gefriert eine Seeoberfläche im Herbst schnell, aber es dauert viel länger, bis der See bis zum Grund durchfriert, und in den meisten Fällen endet der Winter, bevor dies geschieht.

Meerwasser hat diese Temperatur der maximalen Dichte nicht, beim Abkühlen wird das Wasser immer dichter bis zum Gefrierpunkt. Der Übergang vom Süßwasser- zum Meerwasserverhalten erfolgt, wenn der Salzgehalt 24,7 ‰ an gelöstem Salz im Wasser überschreitet. Das meiste Meerwasser hat einen Salzgehalt von 32 bis 35 ‰, nur wenige isolierte Meere wie die Ostsee und Regionen in der Nähe der Mündungen großer arktischer Flüsse weisen einen Salzgehalt unter 24,7 ‰ auf. Der Begriff „Brackwasser“ – umgangssprachlich für Wasser, das etwas salzig ist, aber nicht so sehr wie das Meer – hat in der Ozeanografie eine strenge Definition: Er steht für Wasser, das einen Salzgehalt von weniger als 24,7 ‰ hat und somit eine Temperatur von maximaler Dichte aufweist. Das bedeutet, dass beim Abkühlen von richtigem Meerwasser im Herbst Konvektion stattfindet, bis das gesamte Wasser den Gefrierpunkt erreicht. Der Gefrierpunkt selbst liegt unter 0 °C, da die Anwesenheit von Salz ihn senkt: bei typischem Meerwasser auf −1,8 °C

(die Gefrierpunktterniedrigung ist der Hauptgrund, warum im Winter Salz auf Straßen verteilt wird). Der einzige Grund, der verhindert, dass die gesamte Tiefe des Ozeans abkühlen muss, bevor die Meeresoberfläche gefrieren kann, ist die Tatsache, dass der Ozean aus Schichten verschiedener Arten von Wasser unterschiedlicher Herkunft besteht, die sich alle mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten in verschiedene Richtungen bewegen. Zwischen den einzelnen Schichten gibt es eine schnelle Dichteänderung (die sogenannte Pyknokline), sodass sich die Konvektion tatsächlich nur bis zur Basis der Oberflächenschicht erstrecken muss – in der Arktis nennt man dies Arktisches Oberflächenwasser (*Polar Surface Water*) und die darunterliegende Schicht Atlantisches Wasser (*Atlantic Water*), da diese vom Atlantik aus die Arktis erreicht.

Dass Eis im Wasser schwimmt, bedeutet, dass Meereis eine dünne, schwimmende Decke auf der Meeresoberfläche bildet, die es ermöglicht, dass die Zirkulation des Ozeans darunter weitergeht und Leben möglich ist – im tiefen Ozean und vor allem in der Nähe oder sogar im Inneren des Meereises, wo dem pflanzlichen Plankton (Phytoplankton) Licht zur Verfügung steht, das es für die Fotosynthese benötigt. In der unteren Schicht des antarktischen Meereises befinden sich beispielsweise winzige, mit flüssiger Sole gefüllte Kanäle, die Plankton enthalten, das für etwa 30 % der jährlichen biologischen Produktion im gesamten Antarktischen Ozean verantwortlich ist. Eine weitere besondere und sehr bedeutende Eigenschaft von Eis ist seine außergewöhnlich hohe Schmelzwärme von 80 kcal kg^{-1} (Kilokalorien pro Kilogramm). Schmelzwärme (ein Fall von latenter Wärme) ist die Wärmemenge, die bereitgestellt werden muss, um ein

Kilogramm Eis zu schmelzen, das sich bereits am Schmelzpunkt befindet – im Gegensatz zu spezifischer Wärme, die Wärme, die benötigt wird, um die Temperatur eines Kilogramms einer Substanz um 1 °C zu erhöhen. Die spezifische Wärme (oder Wärmekapazität) des Wassers beträgt nur 1 kcal kg⁻¹ – dies war die Grundlage für die ursprüngliche Definition der Kalorie, einer häufig verwendeten Wärmeeinheit: Eine Kalorie ist die Wärme, die benötigt wird, um die Temperatur von 1 g Wasser um 1 °C zu erhöhen (also wurde Wasser als Grundlage für die Definition von zwei wichtigen physikalischen Einheiten verwendet, dem Kilogramm und der Kalorie). Aber während man nur 1 kcal Wärme benötigt, um 1 kg Wasser um 1 °C aufzuwärmen, muss man 80 kcal bereitstellen, um 1 kg Eis zu schmelzen (seine latente Wärme); die gleiche Wärmemenge würde die gleiche Masse an kaltem Wasser auf 80 °C erwärmen. Das ist ein grundlegender Unterschied. Wenn Sie zwei Töpfe auf den Herd stellen, von denen der eine 1 kg Eis am Schmelzpunkt und der andere 1 kg Wasser mit 20 °C enthält, also bei Raumtemperatur, und beide Platten auf gleiche Leistung stellen, dann beginnt das Wasser im zweiten Topf zu kochen, während im ersten Topf gerade das letzte Eis schmilzt.

Global gesehen wirkt die Schmelzwärme von Wasser als riesiger Wärmespeicher, als eine Art Puffer für den Klimawandel. Ein Paradebeispiel ist das Meereis im Sommer: Es schmilzt, aber solange es nicht vollständig wegtaut, hält es sowohl die Lufttemperatur nahe der Oberfläche auf etwa 0 °C (da wärmere Luft mehr von dem Eis schmilzt und dabei selbst gekühlt wird) als auch die Wassertemperatur unter dem Eis auf etwa 0 °C (wärmeres Wasser würde mehr Eis schmelzen und dabei selbst gekühlt werden). Solange es existiert, dient das Meereis im Sommer als effektive „Klimaanlage“ für den Ozean, sowohl für das Wasser als auch die Luft darüber.

2.3 Die Bildung von Eis im Meer

Das Eis, das uns in diesem Buch am meisten beschäftigt, ist das Eis, das sich auf dem Ozean bildet, das Meereis. Betrachten wir nun, wie es entsteht und wächst, nachdem wir die besonderen Eigenschaften des Wassermoleküls und des Eiskristalls kennengelernt haben. Wir beginnen damit, dass wir über das Gefrieren von ruhigem Wasser unter ruhigen Bedingungen – ohne Wellen – nachdenken. Während die kalte Atmosphäre der Wasseroberfläche Wärme entzieht, beginnen die Moleküle der Wasseroberfläche zu gefrieren. Dabei entsteht eine Schicht aus einzelnen Eiskristallen, die zunächst die Form von winzigen Scheiben oder Sternen mit einem Durchmesser von 2 bis 3 mm haben und flach auf der Wasseroberfläche schwimmen. Jede Scheibe oder jeder Stern ist ein Kristall mit vertikaler c-Achse, und die Scheibe wächst dendritisch nach außen entlang der Oberfläche (das heißt, sie schießt in sechs Richtungen mit 60° zueinander nach außen) und dehnt ihre bienenwabenförmigen Schichten zu einer hexagonalen schneeflockenartigen Form aus. Die Arme der flachen Kristalle sind jedoch sehr fragil und brechen bald ab, sodass eine Mischung aus Scheiben- und Armfragmenten entsteht. Diese zufällig geformten Kristallstücke bilden im Oberflächenwasser eine Suspension mit zunehmender Dichte, wie eine weiße Aufschlämmung oder wie das als Magnesiamilch bekannte Medikament. Diese erste Eisart wird als Frazil-Eis bezeichnet. Bei ruhigen Bedingungen frieren Frazil-Eiskristalle schließlich zu einer kontinuierlichen dünnen Schicht aus jungem Eis zusammen, in den frühen Phasen wird es als Nilas bezeichnet. Bei einer Dicke von nur wenigen Zentimetern ist dies transparent (dunkles Nilas), aber wenn das Eis dicker wird, ist es nicht mehr durchsichtig und Nilas wird erst grau und schließlich weiß. Sobald sich Nilas gebildet hat, wird das Meer

physisch von der Atmosphäre getrennt, und so beginnt ein ganz anderer Wachstumsprozess, bei dem Wassermoleküle an der Unterseite der vorhandenen Eisfläche anfrieren. Dies führt nach weiterem Wachstum zu einjährigem Eis, das in einer einzigen Saison in der Arktis etwa 1,5 m und in der Antarktis 0,5 bis 1 m dick wird. In der Antarktis und in Gebieten mit vielen Wellen und Turbulenzen kann die Frazil-Phase viel länger dauern, und sie spielt eine wichtige klimatische Rolle (Kap. 11 und 12).

Nach der Bildung einer kontinuierlichen Nilas-Schicht wachsen die einzelnen Kristalle, die mit der Eis-Wasser-Grenzfläche in Kontakt stehen, durch das Anfrieren von Wassermolekülen auf der Kristallfläche nach unten, es entsteht Säuleneis (*congelation ice*). Dieser Gefrierprozess ist für Kristalle mit horizontaler c-Achse einfacher als für solche mit vertikaler c-Achse, da das Abwärtswachstum durch Erweitern bestehender Bienenwabenplatten erreicht werden kann. So wachsen Kristalle mit horizontalen c-Achsen auf Kosten der anderen, und wenn die Eisschicht dicker wird, verdrängen sie die anderen in einer Art Kristalldarwinismus. Nach etwa 20 cm Wachstum ist der Selektionsprozess abgeschlossen und die bevorzugten Kristalle wachsen weiter nach unten und bilden ein Gefüge aus langen, vertikalen, säulenförmigen Kristallen mit horizontalen c-Achsen. Diese säulenförmige Struktur ist ein markantes Merkmal des einjährigen Eises, das auch mit bloßem Auge sichtbar ist. Man sieht auch, dass eine solche Eisschicht mechanisch nicht sehr stabil ist, weil sie im Wesentlichen ein Bündel von Kristallen ist, die alle in die gleiche Richtung ausgerichtet sind.

Was passiert mit dem Salz, das im Meerwasser gelöst war? Die Kristallstruktur des Eises ist sehr weiträumig, aber die Zwischenräume sind nicht groß genug, um einfach andere Moleküle oder Atome darin aufzunehmen. Wenn also Eis aus Salzwasser wächst, können die

Salzionen nicht in die Kristallstruktur gelangen. Allerdings gelangt das Salz auf eine andere Weise in das Eis. Die fortschreitende Eis-Wasser-Grenzfläche ist nicht flach, sondern besteht aus parallelen Reihen von Vorsprüngen, den Dendriten, von denen jeder aus ein paar Platten von schnell (das heißt dendritisch) wachsenden „Bienenwaben“ besteht, mit schmalen, wassergefüllten Kanälen dazwischen. Von Zeit zu Zeit entstehen zwischen den nach unten wachsenden Vorsprüngen Eisbrücken, die Wasser im Zwischenraum in Form eines Solekanals (*brine cell*) einfangen (Abb. 2.3) (Weeks und Ackley 1986). Schnell gefrieren die Wände des Kanals, dessen Volumen abnimmt, bis nur ein winziger, etwa einen halben Millimeter breiter Einschluss aus hochkonzentrierter Sole übrig ist, der nicht einfriert. Diese Einschlüsse enthalten Salz, weswegen einjähriges Eis noch salzig schmeckt (junges Eis enthält etwa 10 % Salz, verglichen mit etwa 32 % im ursprünglichen Meerwasser). Diese Sole entwässert

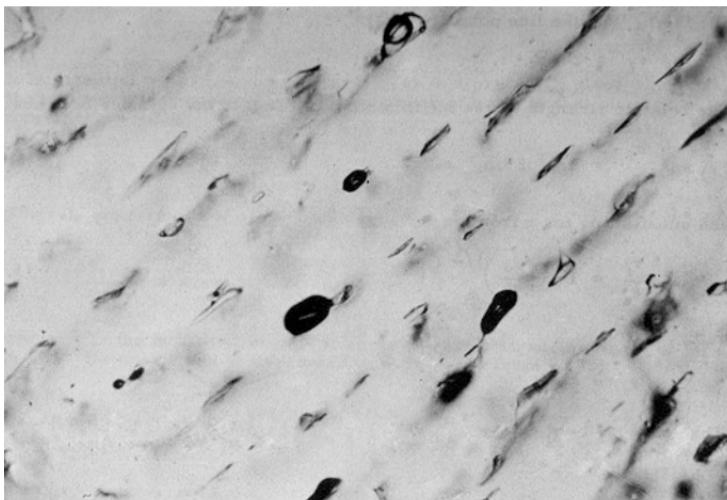


Abb. 2.3 Winzige Solekanäle im Meereis, der Abstand zwischen den Kanälen beträgt 0,6 mm. (Aus Weeks und Ackley 1986)

über den Winter langsam aus dem Eis, durch verschiedene Mechanismen wie die Migration der Solekanäle, Sole-Ausstoß und die einfache schweregetriebene Drainage. Die Migration der Solekanäle erfolgt, weil das obere Ende jedes Kanals etwas kälter ist als das untere Ende, da im Winter ein steiler Temperaturgradient zwischen der Eis-Wasser-Grenze bei $-1,8^{\circ}\text{C}$ und der Eis-Luft-Grenze bei eher -30°C besteht. Das obere Ende des Kanals gefriert, das restliche Wasser im Kanal wird salzhaltiger, und der Boden schmilzt; der gesamte Einschluss bewegt sich in der Eisschicht nach unten und trägt seine Sole mit sich. Der Sole-Ausstoß (*expulsion*) erfolgt, wenn der gesamte Kanal versucht, bei sinkender Temperatur einzufrieren. In dem winzigen verbliebenen salzreichen Tröpfchen baut sich ein Druck auf, bis es explodiert und die Sole nach außen und unten gepresst wird. Die schweregetriebene Drainage (*gravity drainage*) ist am effizientesten. Sie läuft ab, weil vorhandene Solekanäle über den Wasserspiegel gehoben werden, wenn das Eis durch weiteres Gefrieren an der Unterseite dicker wird. Die Schwerkraft bringt die Sole dazu, Wege durch miteinander verbundene Poren zu finden und an der Unterseite des Eises abzufließen. Ähnlich wie bei Flüssen, bei denen sich Nebenflüsse zu großen Strömen vereinen, vereinigen sich dabei kleine Kanäle oft zu größeren Sole-Abflusskanälen. Im Sommer schmilzt der gesamte Oberflächenschnee auf dem Eis und auch ein Teil des Eises selbst. Süßwasser sammelt sich in Schmelztümpeln an der Oberfläche, und das Schmelzwasser arbeitet sich durch das Eis und spült den größten Teil der verbleibenden Sole aus, was sehr passend Ausspülung (*flushing*) genannt wird. Wenn das Eis dann den Sommer überlebt, besteht es in seinem zweiten Jahr nahezu aus Süßwasser, es schmeckt nicht nach Salz und ist zudem viel stabiler – diese Art von Eis, das sogenannte mehrjährige

Eis, war für Eisbrecher schon immer ein größeres Hindernis als einjähriges Eis.

2.4 Die Bedeutung der Sommerschmelze

Wir werden sehen, dass die Bildung von Schmelztümpeln in Hinblick auf den Klimawandel sehr wichtig ist. Im Winter, wenn eine Neuschneeschicht das Meereis bedeckt, reflektiert die Oberfläche 80 bis 90 % der auf sie fallenden Sonneneinstrahlung, sodass wir sagen, dass ihre Albedo (ihr Reflexionsvermögen) 0,8 bis 0,9 beträgt. Wenn der Schnee schmilzt und Blankeis zurückbleibt, das eine gewisse Verschmutzung durch Ruß (aus der Atmosphäre) aufweist, der sich im Winter auf dem Schnee angesammelt hat, sinkt die Albedo auf 0,4 bis 0,7. Dies geschieht im Juni bis Juli, gerade wenn die Sonneneinstrahlung mit 24 Stunden Tageslicht und der hoch am Himmel stehenden Sonne ihren Höhepunkt erreicht. Würde diese Oberfläche aus Blankeis und Schmelztümpeln im Sommer noch etwas früher geschaffen, dann würde die zusätzlich absorbierte Strahlung eine große Rolle bei der Verdünnung des Eises spielen und es vielleicht vollständig schmelzen lassen. Dies, so denken viele Polarforscher, passiert derzeit und trägt dazu bei, einen irreversiblen Verlust von sommerlichem Meereis zu verursachen.

Wenn die Schmelztümpel immer tiefer und breiter werden, können sie schließlich ins Meer abfließen, sei es über die Seitenränder von Schollen, durch bestehende Risse oder durch ein Schmelzloch, wenn das Eis an seiner dünnsten Stelle oder an der tiefsten Stelle eines Schmelztümpels einfach durchgeschmolzen ist. Das ablaufende Wasser bildet eine wenige Meter tiefe, salz-

arme Wasserschicht, in der das Meereis schwimmt, was die Schmelzgeschwindigkeit an der Eisunterseite erhöht.

2.5 Wie im Eis Rinnen und Presseisrücken entstehen

Bisher haben wir uns Gedanken darüber gemacht, wie sich das Meereis allein durch thermische Prozesse bildet und verändert, indem es an der Meeresoberfläche wächst oder schmilzt. Doch in der Arktis hat sich auf diese Weise nur etwa die Hälfte des Eisvolumens gebildet. Der Rest entstand durch die Verformung des vorhandenen Eises, wobei Eis zu langgestreckten Presseisrücken gestapelt wurde und sich an anderer Stelle breite Rinnen öffneten. Das passiert so: Die Packeisschollen, die sich durch Gefrieren und weiteres Wachstum gebildet haben, sind ständig in Bewegung, angetrieben von der Schubspannung (beziehungsweise Reibung) – einerseits durch den Wind an der Oberseite, andererseits durch Wasserströmungen an der Unterseite. Basierend auf den vorherrschenden Winden entstehen dadurch größere Bewegungsmuster der Eisdrift. In der Arktis gibt es zum Beispiel ein Wirbelsystem, das sich auf der nordamerikanischen Seite des Arktischen Beckens im Uhrzeigersinn dreht, der sogenannte Beaufort-Wirbel. Nördlich von Eurasien hingegen sammelt sich Eis aus sibirischen Gewässern, das der Wind über den Pol nach Grönland treibt, eine Strömung, die Transpolardrift genannt wird.

Der Schub durch den Wind, der dieses Meereis antreibt, addiert sich über eine große Fläche. Es wurde geschätzt, dass eine Scholle in dichtem Packeis auf den in Windrichtung über eine Entfernung von 400 km integrierten Windschub reagiert. Wenn der Wind also großflächig schwankt, kann es zu einem sogenannten divergenten

Windfeld und damit zu divergierenden Spannungen kommen, das heißt, das Windmuster wirkt so, dass die Eisdecke auseinanderreißt. Da Eis unter Zugspannung wenig Festigkeit hat, kann diese Divergenz Risse bilden, die sich zu Meereisrinnen (*leads*) ausweiten (Abb. 2.4). Im Winter gefrieren so gebildete Rinnen aufgrund des enormen Temperaturunterschieds zwischen der Atmosphäre (typischerweise $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$) und dem Meer ($-1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$) schnell wieder zu. Der Wärmeverlust einer neu geöffneten Rinne kann so stark sein (mehr als 1000 Watt pro Quadratmeter), dass die Rinne dampft, weil sich Frostrauch (Abb. 2.5) aus dem verdunstenden Oberflächenwasser bildet. Natürlich entsteht schnell Nilas und schließt die Öffnung innerhalb weniger Stunden mit einer jungen Eisschicht, was die Verdunstung stoppt. Wenn später das Windstressfeld konvergent wird, das heißt, wenn es die Kanten der Schollen zusammenschiebt, bildet das junge Eis in den zugefrorenen Rinnen den schwächsten Teil der Eisdecke und es zerbricht als Erstes. Es entstehen Haufen von zerbrochenen Eisblöcken über und unter dem Wasserspiegel. Eine solche lineare Verformungerscheinung (sie ist mit einer langen Halde vergleichbar) wird Presseisrücken genannt (*pressure ridge*) (Abb. 2.6), wobei der Teil über Wasser als Segel und der (umfangreichere) Teil unter Wasser als Kiel bezeichnet wird. Die Kiele können in der Arktis bis zu 50 m tief reichen, wobei die meisten von ihnen einen Tiefgang von etwa 10 bis 25 m haben. Entlang eines großen Rückens sind Tiefen von 30 m nur alle 100 km zu sehen. Der Kiel ist typischerweise etwa viermal tiefer als die Höhe des Segels und auch zwei- bis dreimal breiter, sodass scheinbar unverformtes Eis in der Nähe eines Druckkamms einen Teil des Kiels darunter haben kann. Dies geschieht, weil es einfacher ist, Eisblöcke gegen den Auftrieb nach unten zu drücken als nach oben gegen die Schwerkraft.

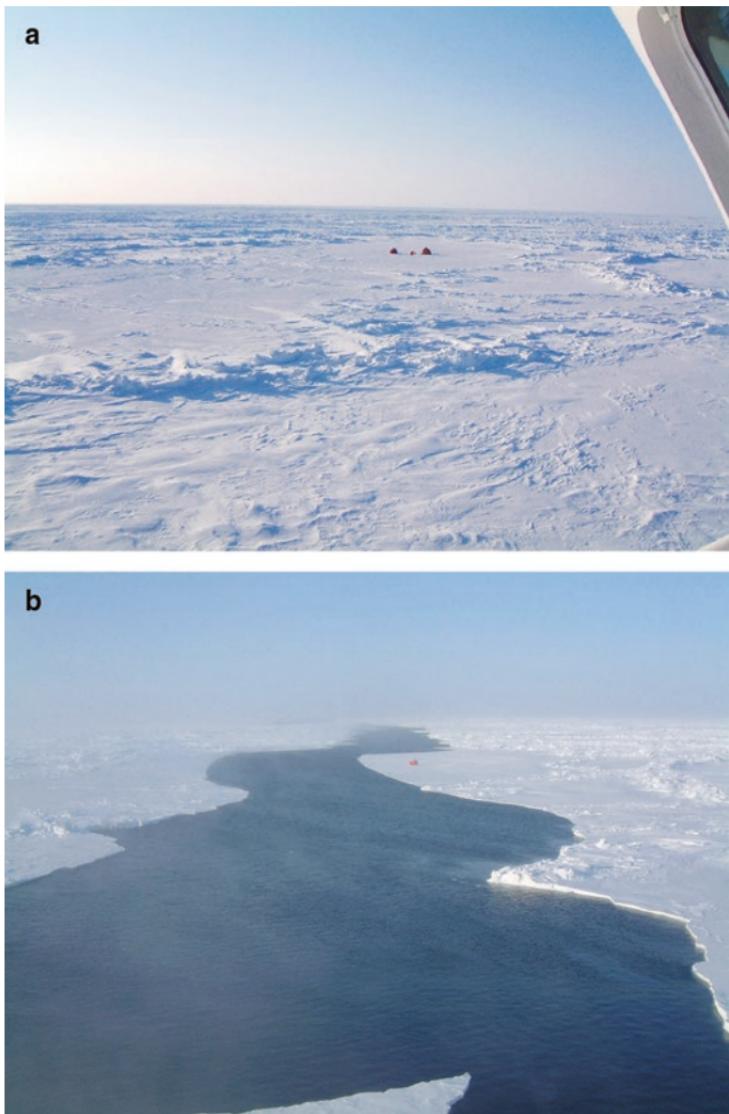


Abb. 2.4 Bildung einer Meereisrinne. **a** Eine Expedition lagerte im Winter 2003 auf dem Yermak-Plateau im Arktischen Ozean nördlich von Spitzbergen. Am nächsten Morgen bildete sich im Eis ein Riss. **b** In den nächsten Stunden öffnete und verbreiterte sich schnell eine Rinne, siehe die Zelte als Maßstab. (Fotos: Martin Doble)



Abb. 2.5 Mit Frostrauch dampfende Meereisrinnen im Winter

Presseisrücken tragen in der Arktis wesentlich zur Gesamtmasse des Meereises bei, im Durchschnitt wahrscheinlich etwa 40 % und in den Küstenregionen mehr als 60 %. Sie beginnen als einfache lineare Ansammlungen von Eisblöcken, werden aber allmählich stärker, wenn die Blöcke zusammenfrieren, sodass ein Rücken, wie eine geheilte Narbe, nach einigen Jahren eine Stärke aufweisen kann, die gleich oder größer ist als das ihn umgebende unverformte Eis. Es sind die schweren, konsolidierten Rücken im mehrjährigen Eis, die dieses Eis für alle Schiffe außer den schwersten Eisbrechern so unpassierbar machen. Einjähriges Eis ist nicht nur dünner, sondern enthält auch Presseisrücken, die sich noch nicht auf diese Weise fest verbinden konnten. Es ist daher viel schwächer und leistet einem Schiff mit Eisschutz weniger Widerstand.

In der Antarktis sind die Rücken viel flacher als in der Arktis, meist mit weniger als 6 m Tiefgang. Der Grund



Abb. 2.6 Einwöchiger Presseisrücken in der Beaufortsee, April 2007

dafür ist, dass Meereis nach einem Jahr Wachstum eine geringere Dicke erreicht als in der Arktis, nur 0,5 bis 1 m gegenüber 1,5 m. Diese dünnen Schichten können leicht direkt durch die Belastung des Windes zerfaltet werden, ohne dass zuerst eine Rinne gebildet und wieder zusammengeschoben werden muss. Somit sind die Blöcke

im Rücken oft ähnlich dick wie die Schollen auf beiden Seiten, und es gibt keine Möglichkeit, durch das fortschreitende Zerkleinern einer wieder zugefrorenen Rinne einen hohen Rücken aufzubauen. Presseisrücken scheinen in der Antarktis auch weniger zum Gesamteisvolumen beizutragen, vielleicht nur 30 bis 40 %. Mehr über das antarktische Meereis erfahren wir in Kap. 12.

2.6 Eis im flachen Wasser

Wenn sich auf dem Meer Eis bildet, passiert das sehr oft auf dem flachen Wasser in der Nähe des Strandes, da die Atmosphäre nur eine dünne Wasserschicht kühlen muss, damit die Oberfläche gefrieren kann. Dies wird als landfestes Eis oder Festeis (*fast ice*) bezeichnet, da es am Meeresboden festgefroren ist. Etwas weiter draußen, jenseits eines oder mehrerer Gezeitenrisse, schwimmt das Eis, bleibt aber an Ort und Stelle, weil es an Strukturen verankert ist, die selbst auf Grund liegen. Dies sind in der Regel Presseisrücken, die durch den auf das frei herumschwimmende Packeis einwirkenden Wind zur Küste getrieben wurden und im flacheren Wasser auf Grund gelaufen sind. Um diese gestrandeten Rücken herum wächst junges Eis, und die gesamte Region wird als Festeiszone bezeichnet. Sie erstreckt sich bis zu einer Wassertiefe, die derjenigen der tiefsten gestrandeten Presseisrücken entspricht, in der Regel 25 bis 30 m.

Während das Packeis auf offener See in Bewegung ist, bevor es durch Auflaufen auf Grund zum Stillstand gebracht wird, schürfen die Kiele der gestrandeten Rücken lange schmale Täler in die Sedimente des Meeresbodens, ein Prozess, der als Eisabscheuerung (*ice scouring*) bezeichnet wird. Diese Art von Auskolkung wurde auf meiner ersten Reise in die Arktis an Bord der Hudson im

Sommer 1970 entdeckt. Ein Team des kanadischen geologischen Dienstes ließ ein Seitensichtsonar hinter dem Schiff herschleppen, das einen fächerförmigen Schallstrahl aussendet, um den Meeresboden zu kartieren und Reflexionen von jedem Hindernis aufzunehmen. Wir alle erwarteten, dass die Karte der schlammigen küstennahen Zone ein leeres Blatt sein würde – eine große Fläche aus Schlamm ohne Hubbel oder Dellen. Stattdessen sahen wir eine komplexe Anordnung von langen schmalen Tälern im Meeresboden, als hätte ein Betrunkener mit dem Pflug gearbeitet. Es war ein faszinierendes Muster aus sich kreuzenden Linien, einige gerade wie ein Lineal und andere rund zu Kreisen und Spiralen gebogen, wie ein geharkter Zen-Garten in Japan. Alte Linien wurden durch neue Linien überschrieben. Ich erinnere mich, dass ich zum Haupteckholz eilte und feststellte, dass jeder Kolk, den das Schiff überquerte, sich als kleine Vertiefung im Meeresboden zeigte, die 2 bis 4 m tief war. Wir stellten sofort fest, dass diese Kolkspuren von in die Wintereisbedeckung eingebetteten Presseisrücken stammen müssen, die durch Wind und Strömung über den Grund geschleppt wurden, bevor sie zum Stillstand kamen. Der Kiel eines Presseisrückens mit seiner gebirgigen Form wirkt dabei wie ein Mehrfachpflug. Die Kolkspuren sind ein Risiko für alle Pläne für Offshore-Pipelines oder Bohrungen in flachen arktischen Gewässern.

Umfassendere Untersuchungen der Eisabscheuerung haben gezeigt, dass sie sich stellenweise bis in Wassertiefen erstreckt, die über diejenigen hinausgehen, die bei Presseisrücken auftreten können, manchmal bis in 65 m Wassertiefe (wie bereits gesagt, reichen Presseisrücken selten mehr als 30 m tief). Die Erklärung dürfte sein, dass es sich um uralte Kolke handelt, die während oder kurz nach der letzten Eiszeit entstanden sind, als der Meeresspiegel

wegen des in Eisschilden enthaltenen Wassers niedriger war. Aufgrund des Mangels an Plankton (dessen winzige Schalen auf den Meeresboden abregnen) lagern sich Sedimente in arktischen Gewässern sehr langsam ab und diese alten Kolke blieben bis heute erhalten, ohne ausgefüllt zu werden.

In den 1970er-Jahren, als Wissenschaftler die Seitensichtsonar-Vermessung auf tieferes Wasser ausdehnten, entdeckten sie Spuren von Eisbergen in Wassertiefen von 150 bis 300 m in der Labradorsee, der Baffin Bay, vor Grönland und in der Antarktis – alles Orte, an denen die tiefsten Unterwassergipfel eines driftenden Eisbergs durch den Meeresboden gepflügt hatten. Erstaunlicherweise war dies auch der erste Beweis dafür, dass der Mars einst fließendes Wasser besaß. Mein Freund und Kollege Chris Woodworth-Lynas, der in Neufundland lebt und arbeitet, ist ein Experte für Eisbergsspuren und hat sie auch an Land gefunden, an Orten wie King William Island in der kanadischen Arktis (wo John Franklins Expeditionsteilnehmer ums Leben kamen). Diese Insel befand sich während der letzten Eiszeit am Meeresboden und Eisberge von nahe gelegenen Gletschern schürften geschwungene Kolkmuster in die mit Felsbrocken übersäten Sedimente, die später zur heute sichtbaren Oberfläche der Insel angehoben wurden. Im Jahr 2003 blätterte Chris durch Fotos der Marsoberfläche, die mit der Kamera des Mars-Orbiters der Raumsonde Voyager aufgenommen wurden, und sah ein sehr ähnliches Muster (Woodworth-Lynas und Guigné 2003). Seine Arbeit mit seinem Kollegen Jacques Guigné war ein Durchbruch in der Marsforschung. Heute akzeptieren wir gerne, dass der Mars einst Wasser und damit vielleicht auch Leben besaß, aber 2003 war dies eine ketzerische Sichtweise. Die Kolkspuren zeigten, dass der Mars nicht nur in der Vergangenheit flüssiges Wasser hatte, sondern

dass dieses Wasser periodisch (vielleicht nur in der Wintersaison) gefroren war und Eisberge oder Presseisrücken bildete, die den vormaligen Meeresboden durchpflügten.

Die Prozesse, die im Flachwasser ablaufen, sind sehr komplex. Jenseits des stationären Festeises verlangsamt der Reibungswiderstand das sich schnell bewegende küstenferne Packeis und erzeugt die sogenannte Scherzone, einen Bereich, in dem Reibung und Druck mächtige Rücken erzeugen können, manchmal in Form einer riesigen Region von ungeordneten gebrochenen Blöcken, die als Blockfeld bezeichnet wird. Ein faszinierendes Produkt dieses Prozesses ist eine Form von riesigen isolierten Presseisrücken, bekannt unter dem russischen Namen Stamukha (Plural: Stamukhi). Ein Stamukha, der typischerweise im seichten Wasser nördlich von Sibirien zu finden ist, ist ein tiefreichender Rücken, der im Winter auf Grund läuft und Teil der Festeiszone wird, der aber im Frühjahr oder Sommer nicht aufschwimmt und wegdriftet, weil er zu fest auf Grund liegt. Das Eis um ihn herum bricht auf und hinterlässt eine isolierte, gewölbte Eisinsel in einer weiten Fläche offenen Wassers. Sie kann sehr schmutzig sein und daher wie eine echte Insel aussehen, denn zu Beginn des Frühjahrs spült das Schmelzwasser aus sibirischen Flüssen Schlamm über die gesamte Insel. Schließlich löst er sich vom Meeresboden und treibt in den Arktischen Ozean, wo er eines der gewaltigsten Hindernisse für Schiffe oder Bohrinseln darstellt. Stamukhi sind im Packeis sehr selten, aber ich hatte das Glück, im Sommer 2012 in der Framstraße zwischen Spitzbergen und Grönland einen zu entdecken und zu untersuchen. Abb. 2.7 zeigt die weite buckelige Oberfläche des Stamukha, mit einer rostroten Farbe durch eine Mischung aus Schmutz und Algen. Ich schickte ein autonomes Unterwasserfahrzeug unter das Eis, um dessen Tiefgang mit einem Mehrstrahlsonar zu erfassen. Er hatte einen Tiefgang von 28 m, was mehr



Abb. 2.7 Ein driftender Stamukha, den wir im Juli 2012 in der Grönlandsee entdeckten. Das gelbe Messgerät auf dem Gipfel wurde verwendet, um die Topografie des Grates zu scannen

als ausreichend ist, um in einer typischen Scherzone auf Grund gelaufen zu sein.

2.7 Polynjas

Schließlich gibt es Stellen entlang der Polarküste, wo es statt Festeis oder aufgetürmten Rücken offenes Wasser gibt, auch im Winter. Diese Bereiche werden nach dem russischen Namen als Polynjas bezeichnet, was Pools bedeutet. Sie können auf viele verschiedene Arten entstehen. Ein typisches Beispiel ist das Vorherrschen von ablandigem Wind. Der Wind bläst neues Eis so schnell auf das Meer hinaus, wie es entsteht, und lässt eine offene Wasserfläche an der Küste zurück, die sich über Dutzende von Kilometern meerwärts erstrecken kann. Im Winter dampft das küstennahe offene Wasser mit durch Verdunstung gebildetem Frostrauch, während sich weiter

draußen Eis als Frazil-Eis bildet und vom Wind weiter hinausgetrieben wird, bis es auf das dichte Packeis trifft. Die Küste der Antarktis wird von einer Reihe von Polynjas umringt, die durch katabatische Winde entstehen: Dies sind Winde, die sich beschleunigen, wenn sie die Hänge des gewölbten Antarktischen Eisschildes hinunter auf das Meer hinausblasen, was vor Lücken zwischen den Küstenbergen noch verstärkt wird. Jede Lücke, die in der Regel einem Gletscher entspricht, führt zu einer eigenen Polynja. Diese Polynjas treten periodisch auf und haben meist Namen. Abb. 2.8 zeigt die Lage der Terra-Nova-Bucht-Polynja im Rossmeer, wo die Italiener und jetzt auch die Südkoreaner Basen haben und wo die Nordgruppe der Expedition von Robert Falcon Scott gezwungen war, sich einen Winter lang in einem Eisloch zu verkriechen.

In der Arktis sind Polynjas weniger verbreitet, können aber sehr wichtig sein. Die Sankt-Lorenz-Insel in der Beringsee hat auf ihrer Südseite wegen der vorherrschenden Nordwinde im Winter eine Polynja, die es den örtlichen Inuit ermöglicht, den Winter über zu jagen und zu fischen. Es gibt eine berühmte Polynja zwischen Nordwestgrönland und der Ellesmere-Insel, die Nordwasser genannt wird (Abb. 2.9). Diese bildet sich auf eine andere Weise: Der Wind und die Strömung treiben Eis nach Süden durch eine sich verengende Öffnung zwischen den beiden großen Inseln, wo es stecken bleiben kann und eine bogenförmige Barriere bildet, wie nasser Sand, der in einem Trichter stecken bleibt. Das Wasser fließt weiter nach Süden, während das Eis zurückbleibt und eine winterliche Polynja bildet. Eine weitere wiederkehrende Polynja heißt Nordostwasser und befindet sich an der Nordostküste Grönlands, wo das nach Süden fließende arktische Packeis am südlichen Ende der Landspitze Nordostrundingen sozusagen nicht schnell genug

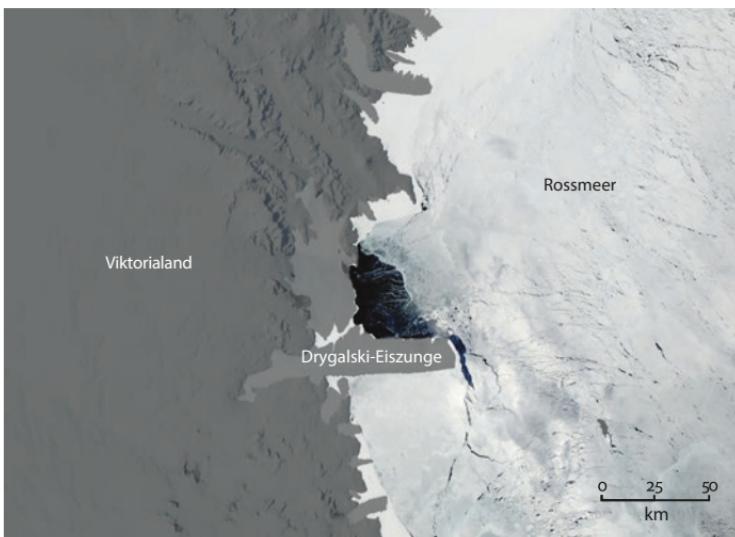


Abb. 2.8 Die Terra-Nova-Bucht-Polynja im Rossmeer im Oktober 2014. Das offene Wasser der Polynja ist dunkel, darüber sind weiße Wolkenstreifen zu sehen, die von katabatischen Winden vom benachbarten Eisschelf weggetrieben werden (NASA MODIS, 16. Oktober 2014)

um die Ecke biegen kann, sodass im Lee ein Bereich mit offenem Wasser bleibt. Hier entdeckten dänische Archäologen einen alten Umiak (ein offenes aus Fellen gebautes Boot) und Steinwerkzeuge. Das zeigt, dass die Inuit vor vielleicht tausend Jahren eine Jagdsiedlung an diesem völlig abgelegenen arktischen Vorposten bei $81^{\circ} 26' \text{ N}$ hatten, wahrscheinlich wegen der großen Populationen von Eisbären und Robben, die es hier gibt.

Dieses Kapitel hat die Eigenschaften des Eises und seine Entstehung und Entwicklung auf der Meeresoberfläche kurz zusammengefasst. Wir werden sehen, dass dieses faszinierende Material aufgrund der gravierenden Klimaauwirkungen, die mit seinem Rückzug verbunden sind, einer der wichtigsten Stoffe auf dem Planeten ist. Aber bevor wir uns damit befassen, werfen wir einen Blick auf die

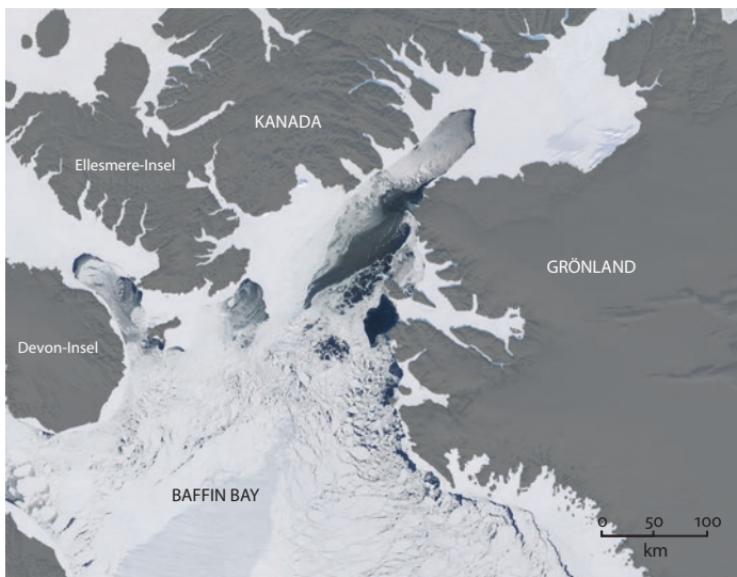


Abb. 2.9 Das Nordwasser zwischen Grönland und Ellesmere-Insel (NASA MODIS, 19. März 2015)

andere Art von Eis, die auf der Erdoberfläche anzutreffen ist, das feste reine Eis von Gletschern und Eisschilden. Auch dieses verschwindet, wenn auch langsamer als das Meereis.

Literatur

- Chaplin M (2016) Water structure and science. www.lsbu.ac.uk/water/ice_phases.html
- Hobbs PV (1974) Ice Physics. Clarendon Press, Oxford
- Pauling L (1935) The structure and entropy of ice and other crystals with some randomness of atomic arrangement. *J Am Chem Soc* 57:2680–2684
- Petrenko VF, Whitworth RW (1999) Physics of ice. Oxford University Press, Oxford

- Weeks WF, Ackley SF (1986) The growth, structure and properties of sea ice. In: Untersteiner N (Hrsg) The geophysics of sea ice. Plenum, New York, S 9–164
- Woodworth-Lynas C, Guigné JY (2003) Ice keel scour marks on Mars: evidence for floating and grounding ice floes in Kasei Valles. *Oceanography* 16:90–97



3

Eine kurze Geschichte des Eises auf der Erde

3.1 Das erste Eis

Wir wissen nicht, wann oder wie Wasser in seiner gefrorenen Form zum ersten Mal auf der Oberfläche des Planeten Erde auftrat. Nachdem die Erde vor 4,54 Mrd. Jahren aus dem Sonnennebel entstanden war, einer rotierenden Scheibe aus Gas und Staub, die sich um unsere Sonne angesammelt hatte, war sie ein extrem heißer junger Planet. Tatsächlich war die Erdoberfläche geschmolzen, teils durch vulkanische Aktivität, teils durch häufige Kollisionen mit der Masse an Staub und Gestein, die noch im Sonnennebel verblieben war. Die Atmosphäre bestand wohl aus giftigen Gasen, nahezu ohne Sauerstoff. Keine Lebensform, die wir kennen, hätte in einer so unwirtlichen Umgebung leben können. Dennoch begann das Leben in irgendeiner Form bereits vor etwa 3,8 Mrd. Jahren (einige Wissenschaftler sagen vor 4,1 Mrd.). Auch wenn die Erdoberfläche bis dahin erstarrt war und vielleicht sogar etwas flüssiges Wasser vorhanden

war, gab es damals sicherlich kein Eis. Interessanterweise wurde das älteste bekannte Fossil (es besteht aus Graphit), das auf Lebewesen zurückgeführt wird, in etwa 3,76 Mrd. Jahre alten Gesteinen in Westgrönland gefunden. Das war natürlich damals nicht Grönland, sondern ein Ozean, in dem diese primitiven Organismen in Schlammschichten lebten.

Faszinierend an der Geschichte des Lebens – schon von Anfang an – ist, dass wir immer wieder feststellen müssen, dass flüssiges Wasser für seine Entstehung und Erhaltung unerlässlich ist. Wasser ist der Hauptbestandteil der lebenden Zelle. Aber woher kam das erste Wasser auf die abkühlende Erde? Es wird angenommen, dass es sich um eine Kombination aus Entgasung aus dem Erdinneren und Einschlägen von Kometen und Asteroiden handelt, die größtenteils aus Eis bestanden.

Diese frühen Lebensformen waren winzige, mikroskopisch kleine einzellige Organismen und dabei blieb es bis vor etwa 580 Mio. Jahren. Damit machen sehr langsame Veränderungen an einzelligen Organismen etwa 80 % der Geschichte des Lebens auf der Erde aus. Dann tauchte plötzlich multizelluläres Leben auf, und die Evolution beschleunigte sich, weil es nun unendliche Möglichkeiten für Zellkombinationen, eine Spezialisierung auf verschiedenen Aufgaben und dann die Entwicklung von Organen und Gliedmaßen gab. Letztlich sind wir Menschen entstanden, unser Schaden war diese Entwicklung also nicht. Es ist erstaunlich, dass dieser kritische Schritt von einer Zelle zu mehreren Zellen so lange gedauert hat, denn schon vor 2 Mrd. Jahren waren die ersten Organismen aufgetaucht, die zur Fotosynthese fähig waren – sie absorbierten die Sonnenstrahlung und schufen mithilfe von Kohlendioxid neue Körpermasse, begleitet von der Freisetzung von Sauerstoff. Von diesem Zeitpunkt an

begann die Erdatmosphäre, sauerstoffreicher und damit gastfreundlicher für Lebensformen zu werden, wie wir sie kennen, darunter einzellige Pflanzen im Meer und an Land.

Diese ganze äußerst lange Periode, von der Entstehung der Erde bis zur Entstehung der ersten mehrzelligen Organismen, bezeichnen Paläontologen als Präkambrium, sie umfasst fast 4 Mrd. Jahre Erdgeschichte. Wo war in all der Zeit das Eis?

3.2 Das Paradoxon der Schneeball-Erde

Paläoklimaforscher haben die Klimageschichte der Erde grob in Perioden einer „Treibhaus-Welt“, in denen der Planet deutlich wärmer war als heute, und in Perioden einer „Eishaus-Welt“, in denen es deutlich kühler war, unterteilt. Während etwa 75 % der Erdgeschichte herrschte ein Treibhausklima. Doch seltsamerweise scheint es, dass es während des Präkambriums Eiszeiten gab, die weitaus eisiger waren als diejenigen der jüngeren Zeit. Die nach heutigem Wissen erste nennen Geologen Huronische Eiszeit oder, schwerer auszusprechen, Makganyene-Ver- eisung, nach einer Lokalität von Gletscherablagerungen in Südafrika. Das war vor 2,4 bis 2,3 Mrd. Jahren, als es noch keine Fotosynthese gab und die Atmosphäre kaum Sauerstoff enthielt. Die Erde war noch eine sehr feindliche Umgebung für die sich langsam weiterentwickelnden einzelligen Lebensformen. Diese Vergletscherung war äußerst heftig und lang anhaltend, viel eisiger als die letzten Eiszeiten, und sie muss einen traumatischen Effekt auf das Leben auf der Erde gehabt haben.

Es war diese Vereisung, die einige Wissenschaftler auf den Gedanken brachte, dass damals wohl der gesamte Planet eingefroren war, sowohl seine Meeres- als auch seine Landoberfläche. Somit hatte die Erde eine sehr hohe Albedo und sah aus dem Weltraum ganz weiß aus. Dieses Szenario wird „Schneeball-Erde“ (*Snowball Earth*) genannt. Seit Joseph Kirschvink vom California Institute of Technology es 1992 vorgestellt hat (Kirschvink 1992; Hoffman et al. 1998), ist es sehr umstrittenen. Inzwischen hat sich das Konzept mehr oder weniger durchgesetzt, ist aber nicht allgemein akzeptiert. Es gibt Fragen, die wir beantworten müssen: Wie kam es dazu? Wie lange hat es gedauert? Wie hat es wieder geendet? Und wie sah der Planet aus, während er ein Schneeball war? Es ist schwer, genaue Antworten zu geben, da es schwer ist, Beweise für solche alten Prozesse zu finden, aber die Geschichte geht wahrscheinlich ungefähr folgendermaßen.

Zur Zeit der Makganyene-Vereisung war die Sonne weniger hell als heute. Heute sind wir es gewohnt, an die „Solarkonstante“ zu denken, die über das Jahr gemittelte Strahlungsmenge, die von der Sonne auf die Erde trifft, und dies als echte Konstante mit nur winzigen Schwankungen zu betrachten (obwohl diese Schwankungen nach Ansicht einiger weniger Menschen ausreichen, um den Klimawandel zu verursachen). Die heutige Solarkonstante ist jedoch das Ergebnis eines sehr langsam, aber stetigen Anstiegs der Sonnenhelligkeit, die über Milliarden von Jahren um etwa 6 % zugenommen hat. Mit einer gegenüber heute um 15 % weniger hellen Sonne wurde die Erde vor 2,3 Mrd. Jahren durch die großen Mengen an Kohlendioxid und anderen Treibhausgasen wie Methan, die durch starke vulkanische Aktivitäten freigesetzt werden, warm gehalten – und zwar wärmer als heute. Falls sich diese Aktivität plötzlich

verlangsamt hat, könnte die ganze Erde leicht in einen viel kälteren Zustand abgeglitten sein als heute. Die in Südafrika gefundenen Gletscherablagerungen, die dieser Vergletscherung ihren Namen geben, wurden in der Nähe des Äquators abgelagert, was bedeutet, dass die Vergletscherung weltweit stattfand, sodass das Konzept einer Verlangsamung der vulkanischen Aktivität durchaus der Mechanismus sein könnte. Natürlich gibt es auch heute am Äquator Gletscher – zum Beispiel auf dem Gipfel des Kilimandscharo –, aber die Makganyene-Ab- lagerungen befanden sich in geringer Höhe, was auf eine völlig vergletscherte Welt hindeutet.

Eine weitere Erklärung für diese Eiszeit wäre, dass sich tatsächlich bereits die ersten fotosynthetischen Organismen entwickelten und damit begannen, die Atmosphäre zu verändern und mehr Sauerstoff zu produzieren. Sauerstoff reagiert mit Methan zu Kohlendioxid, das selbst ein Treibhausgas ist, aber viel weniger effektiv als Methan (um den Faktor 23 pro Molekül). So wären die erheblichen Mengen an Methan in der Atmosphäre durch Oxidation vermindert worden, sobald dieser freie Sauerstoff auftrat. Dies wäre ein an Gaia erinnernder Fall von Leben, das die Umwelt des Planeten verändert, indem es die Atmosphäre von Methan reinigt und sie damit abkühlt – wobei die daraus resultierende Eiszeit kaum als gutartig für das Leben beschrieben werden kann.

Wie würde nun das Leben auf der Schneeball-Erde aussehen und wie lange hat der Zustand gedauert? Bis zu einem gewissen Grad wäre die Vereisung selbstverstärkend. Die Bedeckung der Oberfläche mit Schnee und Eis hätte die durchschnittliche planetarische Albedo auf etwa 0,8 erhöht (der heutige Wert ist 0,3), sodass die meiste einfallende Sonnenstrahlung wieder in den Weltraum reflektiert worden wäre. Als Ergebnis, so wurde berechnet,

betrug die Durchschnittstemperatur der Schneeball-Erde etwa -50°C , wobei der Äquator mit -20°C noch am wärmsten war. In der Tat unwirtliche Bedingungen. Eine der Unbekannten ist, wie dick das Eis auf den Ozeanen wurde. Es ist wahrscheinlich, dass es sehr mächtig war, vielleicht 1 km, ähnlich dem schwimmenden Schelfeis der Antarktis heute, obwohl es auf See und nicht an Land entstanden war. Die Dicke wäre am Äquator wegen der wärmeren Temperatur geringer gewesen, sodass dickeres Eis in höheren Breitengraden in Richtung Äquator geflossen wäre, wie ein heutiger Gletscher. Doch diese Strömung lief in einer Eisschicht ab, die auf dem Ozean schwamm, und nicht in einem Eisschild an Land. Und im Zentrum, am Äquator selbst, reichen die Schätzungen der Eismächtigkeit von Hunderten von Metern bis hinunter zu nur 1 m. Das macht einen großen Unterschied. Bei 1 m Dicke gäbe es viele Risse und offene Rinnen, wo Gas und Wärme zwischen Ozean und Atmosphäre ausgetauscht werden könnten und wo die Fotosynthese durch Meeresorganismen fortgesetzt werden könnte, um den Sauerstoffgehalt des Planeten zu erhöhen. Doch auch der Vulkanismus hätte sich fortgesetzt, durch submarine Ausbrüche entlang mittelozeanischer Rücken und Gasemissionen an heißen Quellen, wodurch Kohlendioxid und Methan wieder in die Atmosphäre zurückgeführt wurden. Auf die eine oder andere Art nahm die Konzentration der Gase so weit zu, dass der Treibhauseffekt ausreichte, um die Eisschilde zu schmelzen und die Erde wieder in einen warmen Zustand zu versetzen. Dies könnte sehr schnell geschehen sein, vielleicht in nur 2000 Jahren, nach Millionen von Jahren als Schneeball. Das einzellige Leben in seinen unzähligen Formen ist extrem belastbar, und viele Arten haben die lange Zeit der Kälte überlebt.

3.3 Zwei weitere Schneebälle

Die Geschichte des ersten Schneeballs ist so nicht ganz vollständig und Gegenstand von Meinungsverschiedenheiten zwischen Geologen und Klimamodellierern. Aber es scheint, dass dieser Zustand der Erde nach einem sehr langen Intervall von 1,5 Mrd. Jahren in Form der Sturischen Vereisung vor nur 710 Mio. Jahren erneut auftrat. In diesem Fall wird angenommen, dass Kohlendioxid verantwortlich war. Die Erde war schon immer dem Prozess der Plattentektonik unterworfen, bei dem sowohl kontinentale als auch ozeanische Krustengesteine in Form von Platten bewegt werden. Entlang ihrer Ränder interagieren sie, indem sie sich gegenseitig überlagern, während anderswo frische Kruste aus aufsteigenden Schmelzen entsteht, die aus dem Erdmantel stammen. Dabei geschah es, dass sich vor 710 Mio. Jahren die Platten, die die Landmassen trugen, zu einer einzigen riesigen Landmasse namens Pangäa zusammengeschlossen hatten, die sich um den Äquator konzentrierte. Dies beschleunigte einen Prozess, der als Silikatverwitterung bekannt ist. Zum Beispiel reagiert Magnesiumsilikat in Gesteinen mit Kohlendioxid zu Bikarbonat und gelöster Kieselsäure (kürzlich wurde dies als Möglichkeit vorgeschlagen, um den CO_2 -Gehalt in der Atmosphäre zu senken, indem Silikatgesteine in kleine Fragmente zerbrochen und an Stränden verteilt werden, Kap. 13). Die Silikatgesteine an der Erdoberfläche waren warm, was das Ganze beschleunigte. Bald wurden sie auch nasser, weil Pangäa anfing, in kleinere Fragmente zu zerbrechen, die als neue Kontinente wegdrifteten. Die Küstenregionen, in denen Regen die Verwitterung antrieb, nahmen zu und das Kontinentinnere, das größtenteils Wüste war, nahm eine kleinere Fläche ein.

Offensichtlich wurde Kohlendioxid durch den Verwitterungsprozess verbraucht, wodurch die Erde sich abkühlte und eine neue Schneeball-Phase einsetzen konnte, die etwa 60 Mio. Jahre dauerte.

Schließlich scheint vor 635 Mio. Jahren die dritte und letzte Schneeball-Vereisung aufgetreten zu sein, die als Marinoische Vereisung bezeichnet wird und kurz nach dem Ende der Sturtischen folgte (beide Eiszeiten sind nach Orten in Südaustralien benannt). Diese dauerte zwischen 6 Mio. und 12 Mio. Jahre. Wiederum wird angenommen, dass Kohlendioxid und Verwitterung beteiligt waren, es wurden aber auch viele andere Mechanismen vorgeschlagen, einschließlich astronomischer Phänomene wie einer massiven Wolke aus kosmischem Staub, die die Sonneneinstrahlung blockierte.

Das Konzept der Schneeball-Erde ist so neu, und die Beweise sind nach derart langen Zeiträumen so schwer zu finden, dass es möglich ist, dass sich die gesamte Idee am Ende als falsch erweisen wird. Dies entkräftet jedoch nicht die Tatsache, dass es in der präkambrischen Zeit drei – und soweit wir wissen nur drei – besonders starke und langlebige Vereisungen gab, selbst wenn sie keinen Schneeball verursachten. Das bedeutet, dass der natürliche Zustand der Erde während dieser immensen Zeitspanne unvergletschert und in der Tat oft wärmer als heute gewesen sein dürfte, wobei die sehr seltenen Vergletscherungen plötzliche Ausfälle des globalen Thermostats darstellen. Was ist seitdem passiert, wie haben wir eine Welt der sich endlos wiederholenden Eiszeiten erreicht, die unser Planet in den letzten 6 Mio. Jahren erlebt hat?

3.4 Der Übergang zu astronomisch verursachten Eiszeiten

In den meisten der letzten 600 Mio. Jahre der Erdgeschichte hatten wir eine „Treibhaus-Welt“, im Gegensatz zu einer „Eishaus-Welt“. Die Paläoklimaforschung ist eine sehr junge Wissenschaft, und bisher wurde nur in kleinen Teilen der Welt gründlich nach Beweisen für solche dramatischen Veränderungen in der fernen Vergangenheit gesucht. Wir können daher nicht sicher sein, ob es in diesem Zeitraum nicht doch viele, vielleicht kurzlebige, Eiszeiten gegeben hat. Das Bild der Erdgeschichte ist noch sehr grob, aber es sieht im Großen und Ganzen so aus, als wäre die Erde während der meisten Zeit recht warm gewesen.

Dies ist kein Buch über Geologie und es versucht auch nicht, die ganze Geschichte der Klimaveränderungen auf unserem Planeten zu beschreiben. Mein Hauptanliegen ist es, dass wir uns mit dem Eis befassen, damit, welche Rolle es spielt – und welche Auswirkungen es hat, wenn diese endet. Aber um das zu tun, müssen wir uns andere Perioden der Erdgeschichte ansehen, in denen der Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre sehr schnell anstieg, und herausfinden, was das für den Planeten bedeutet. Eine der Lehren aus der Klimgeschichte ist, dass es in der Erdgeschichte keine uns bekannte Periode gibt, in der die Anstiegsrate des atmosphärischen CO_2 so groß war wie heute. Der Mensch macht hier wirklich ein globales Experiment, das eine beispiellose Beeinträchtigung des natürlichen Systems zur Folge hat.

Ein großes Naturereignis ereignete sich vor 65 Mio. Jahren, als der berühmte Meteoriteneinschlag an der Kreide-Tertiär-Grenze (K-T-Grenze) auf der mexikanischen

Halbinsel Yucatan eine globale Katastrophe verursachte. Die Schockwelle und Flutwellen rasten um die Erde, und die gewaltige Menge an Erde, Gestein und Staub, die in die Atmosphäre gesprengt wurde, brachte Dunkelheit und Tod. Es muss eine Reihe von sehr kalten Wintern gegeben haben, vergleichbar mit dem „nuklearen Winter“, der als Ergebnis eines Atomkriegs vorhergesagt wurde (Turco et al. 1983). Die Dinosaurier starben aus, sie konnten ihre Körpertemperatur kaum kontrollieren und waren daher nicht in der Lage, den schnellen Wandel zu bewältigen. Aber einige Tausend Jahre später, als die unmittelbaren Auswirkungen nachgelassen hatten, war die Folge tatsächlich eine Erwärmung. Es gab einen Anstieg des CO₂-Gehalts um mehr als 2000 ppm (*parts per million*) und einen Temperaturanstieg um 7,5 °C über einen Zeitraum von etwa 10.000 Jahren (eine Rate von 0,2 ppm pro Jahr und 0,00075 °C pro Jahr). Während der Katastrophe wurden etwa 4500 Mrd. t (oder 4,5 Gt; Gigatonnen, entsprechen 10⁹ t) Kohlenstoff aus den betroffenen Karbonaten und Schiefern, aus entfachten Buschfeuern und aus der Erwärmung der Ozeane freigesetzt, was den Anstieg verursachte. Dennoch war die Anstiegsrate des CO₂ immer noch eine Größenordnung niedriger als die aktuelle Rate von 3 ppm pro Jahr. Wir emittieren Treibhausgase also viel schneller in die Atmosphäre als jedes bekannte Naturereignis, selbst ein so extremes wie ein Meteoriteneinschlag.

Zehn Millionen Jahre später führte eine großflächige Freisetzung von Methan aus einer Quelle in Sibirien (deren Ursache ungewiss ist) zu einer klimatischen Erwärmung, bei der auch das atmosphärische CO₂ auf fast 1800 ppm bei einem Temperaturanstieg um etwa 5 °C anstieg. Aber das alles dauerte 10.000 Jahre, sodass die Anstiegsraten nur 0,18 ppm CO₂ und 0,0005 °C im

Jahr betrugen. Auch bei diesem Ereignis der Erdgeschichte kam es zum Aussterben von Arten und zu Umweltveränderungen, aber dennoch war die Anstiegsrate des CO_2 -Gehalts geringer als diejenige, die wir heute unserem Planeten antun.

Nach diesen sehr warmen Episoden sank die Temperatur der Erde allmählich in einer Reihe von Schritten über einen Zeitraum von 50 Mio. Jahren. Dies zeigt sich beispielsweise in den Temperaturdaten von Tiefseewasser (Abb. 3.1, Kurvenabschnitt 2), die sich aus dem Verhältnis der Sauerstoffisotope Sauerstoff-18 zu Sauerstoff-16 in den Schalen von benthischen Foraminiferen (das sind winzige Meerestiere), die in Sedimenten abgelagert wurden, ableiten lassen. Dieses Verhältnis zwischen normalem Sauerstoff-16 und dem Isotop Sauerstoff-18, das zwei zusätzliche Neutronen aufweist, ändert sich mit den Temperaturänderungen im Wasser, in dem die Foraminiferen wachsen. Wissenschaftler sind sich über die Gründe für diesen langfristigen Temperaturrückgang nicht sicher, außer dass wahrscheinlich Treibhausgase beteiligt sind und dass sich die Verteilung der Kontinente über 50 Mio. Jahre änderte, wobei sich die Antarktis zu hohen Breitengraden bewegte und einen Eisschild entwickelte.

Dies führt uns schließlich in die „moderne“ Ära der sich wiederholenden Eiszeiten. Seit etwa 6 Mio. Jahren ist die Durchschnittstemperatur der Erde so niedrig, dass kleine Veränderungen der Erdumlaufbahn um die Sonne und damit kleine Änderungen in der Verteilung der Einstrahlung auf die Erdoberfläche reichen, um die Durchschnittstemperatur zu ändern und den periodischen Vorstoß und Rückzug der Gletscher – die Eiszeiten – zu bewirken. Es ist erstaunlich, dass Geologen erst in der

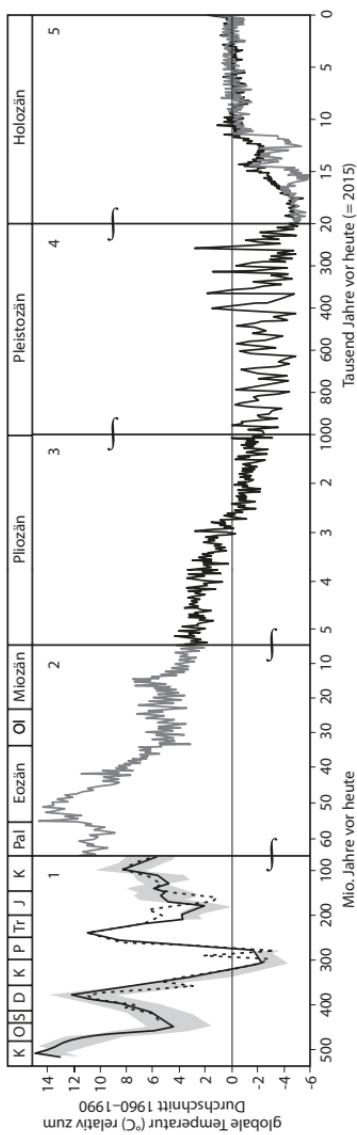


Abb. 3.1 Rekonstruierte Temperaturen der Erde. Kurvenabschnitt 1, vor 500 bis 80 Mio. Jahren, mit warmer Temperatur. Abschn. 2, vor 60 bis 6 Mio. Jahren, wurde aus Isotopenverhältnissen in Tiefseesedimenten berechnet, er zeigt einen schrittweisen Temperaturabfall ab dem Eozän. Abschn. 3 zeigt einen weiteren Rückgang in Richtung der heutigen Temperaturen, die vor etwa 3 Mio. Jahren erreicht wurden. Abschn. 4 zeigt abwechselnde Eiszeiten und Interstadiale und Abschn. 5 die jüngste Erholung seit der letzten Eiszeit. (Nach Glen Fergus, Wikimedia Commons)

zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts feststellten, dass in der Erdgeschichte „eine“ Eiszeit – zunächst bekannt als *die* Eiszeit – stattgefunden hatte. Dabei war das ein Ereignis der jüngsten Zeit, das nur wenige Zehntausend Jahre dauerte und vor gerade einmal rund 12.000 Jahren endete. Jetzt wissen wir, dass dies einfach die letzte Eiszeit in einer periodischen Abfolge von Eiszeiten und warmen Interglazialen (auch Zwischeneiszeiten oder Warmzeiten genannt) war, die 6 Mio. Jahre zurückreicht. Davor war die Erde, wie bereits beschrieben, für Eiszeiten zu warm, mit Ausnahme einer kleinen Zahl von außergewöhnlichen Ereignissen (Schneeball-Erde), die in der frühen Erdgeschichte auftraten und möglicherweise jeweils Millionen von Jahren dauerten. Um periodische Eiszeiten zu erreichen, muss das Klima kalt genug sein, damit astronomische Schwankungen den Vorstoß und Rückzug der Gletscher verursachen können, aber nicht so kalt, dass wir eine dauerhafte Eiszeit haben. Die an Sägezähne erinnernden Schwankungen, also die eiszeitliche Temperaturgeschichte der Erde, ist wohl ein junges Phänomen der letzten paar Millionen Jahre; der Wechsel von Kalt- und Warmzeiten ist keineswegs ein Merkmal des größten Teils der Erdgeschichte. Einige Wissenschaftler glauben, dass das CO₂ und andere Gase, die wir durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe in die Atmosphäre freisetzen, ausreichen, um den Beginn der nächsten Eiszeit zu unterdrücken. Möglicherweise reichen sie sogar aus, um ganz aus dem Eiszeitzzyklus auszubrechen, sodass wir zu der dauerhaft warmen Erde zurückkehren werden, die wir vor etwas mehr als 10 Mio. Jahren hatten.

Betrachten wir nun diesen bemerkenswerten Zyklus von Eiszeiten, der das Klima unseres Planeten in jüngster Zeit bestimmt hat.

Literatur

- Hoffman PF, Kaufman AJ, Halverson GP, Schrag DP (1998) A neoproterozoic snowball earth. *Science* 281:1342–1346
- Kirschvink JL (1992) Late proterozoic low-latitude global glaciation: the snowball earth. In: Schopf JW, Klein C (Hrsg) *The proterozoic biosphere – a multidisciplinary study*. Cambridge University Press, Cambridge, S 51–52
- Turco RP, Toon OB, Ackerman TP, Pollack JB, Sagan C (1983) Nuclear winter: global consequences of multiple nuclear explosions. *Science* 222:1283–1292

4

Der moderne Zyklus der Eiszeiten

4.1 Das Pliozän und die Eiszeiten

Das Pliozän (vor 5,3 bis 2,6 Mio. Jahren) war die Epoche, in der die Welt in die „moderne“ Klimgeschichte mit Eiszeiten eintrat. Die globalen Temperaturen waren im Pliozän im Durchschnitt 2 bis 4 °C wärmer als die vor-industriellen modernen Temperaturen und der Meeresspiegel lag 25 m höher. Das bedeutet, dass weniger Wasser in den Eisschilden gebunden war. Wahrscheinlich war Grönland eisfrei, während die Antarktis einen Eisschild hatte. Es gab kein arktisches Meereis. Tatsächlich ähnelten die Bedingungen denen, auf die wir zusteuern, wenn wir unser Klima weiter verändern – auch wenn wir nicht erwarten, dass der Meeresspiegel kurzfristig so stark ansteigen wird. Die warmen Temperaturen führten zu einem intensiven hydrologischen Kreislauf mit

extremer Verdunstung und starken Niederschlägen, was ausgedehnte Regenwälder, üppige Savannen (wo es heute Wüsten gibt) und kleinere Eiskappen (etwa zwei Drittel der heutigen Fläche) mit sich brachte. Die frühen Ahnen des Menschen lebten bereits auf der Erde, waren aber zu wenige, um deren Entwicklung zu beeinflussen. Landwirtschaft wäre wegen extremer Regenfälle und Hitzewellen kaum möglich gewesen: Die Idee, Saatgut zu pflanzen und zu erwarten, dass es wächst, wäre unseren Vorfahren in einer solchen Umgebung nicht in den Sinn gekommen. Für uns ist das Wichtigste an dieser Zeitspanne, dass sie kühler war als diejenige davor, aber immer noch zu warm für einen Vergletscherungszyklus.

Doch die Abkühlung setzte sich dann während des Pliozäns fort. Bis vor Kurzem wurde angenommen, dass dabei auch das unaufhörliche Driften der Kontinentalplatten eine wichtige Rolle spielte. Diese schuf die Landenge von Panama, sodass Nord- und Südamerika nicht mehr getrennt waren. Dies brachte eine weiträumige äquatoriale Ozeanzirkulation zum Erliegen und verhinderte, dass warmes Pazifikwasser in den Atlantik gelangte, der dadurch viel kälter wurde. Peter Molnar von der University of Colorado hat diese Vorstellung jedoch entkräftet. Er konnte nachweisen, dass die Landenge bereits vor 20 Mio. Jahren statt vor 3 Mio. Jahren entstand, sodass sie nicht eine der Hauptursachen für die Abkühlung gewesen sein kann. Wir müssen also nach anderen Ursachen suchen. Die Klimadaten zeigen jedoch deutlich, dass vor etwa 3 Mio. Jahren, gegen Ende des Pliozäns, das Weltklima kühl genug wurde, damit sich auf Grönland ein Eisschild bildete. Die Weichen für die oszillierenden Eiszeiten der jüngeren Erdgeschichte waren gestellt.

4.2 Daten über die letzten Vergletscherungen

In dieser Phase geschah etwas Neues mit dem Weltklima. Wie wir in Kap. 3 gesehen haben, hatte sich das Klima der Erde 2 Mrd. Jahre lang kaum geändert. Es war im Allgemeinen wärmer als heute und nur in seltenen Ausnahmen kam es zu einem schnellen Wechsel in eine rauhe und langlebige Eiszeit, die jeweils möglicherweise den gesamten Planeten zu einer „Schneeball-Erde“ gefroren hat. Was wir bisher nicht hatten, war ein Wechsel von warmen und kalten klimatischen Phasen über einen Zeitraum von einigen Zehntausenden von Jahren, aber genau dies begann nun. Wir wissen nicht, wie lange dies noch dauern wird – und vielleicht haben wir den Zyklus durch unsere gegenwärtigen Aktionen bereits gestoppt.

Wir haben ein hervorragendes Archiv dieser Klimaveränderungen in Form von Eiskernen aus dem Grönländischen und dem Antarktischen Eisschild. Fällt Schnee auf einen bestehenden Eisschild, bildet er eine Schicht, die in den Folgejahren vom Neuschnee bedeckt und so komprimiert wird. Die Dicke einer solchen Jahresschicht nimmt ab und ihre Dichte zu, wenn sie von den neuen, darüber liegenden Schichten zusammenpresst wird. Frisch gefallener Schnee mag eine Dichte von nur $0,3 \text{ g cm}^{-3}$ ($= 300 \text{ kg m}^{-3}$) haben, aber wenn er zusammengedrückt wurde, sodass er 50 m unter der neuen Eisfläche liegt, ist seine Dichte auf 800 kg m^{-3} gestiegen. Während er komprimiert wird, ändert sich seine Beschaffenheit: von der ursprünglichen leichten, flockigen Schneestruktur zu einer Firn genannten, körnigeren Struktur und schließlich zu Eis. Die offizielle Dichte, bei der komprimierter Schnee zu Eis wird, beträgt 800 kg m^{-3} . Bei geringerer Dichte sind die Firnkristalle noch so weit getrennt, dass

Luft und Schmelzwasser sich frei zwischen ihnen bewegen können. Bei 800 kg m^{-3} werden die Kristalle durch Druck miteinander verschweißt und das Material wird zu einem Kontinuum, wobei die Luftkanäle teilweise als geschlossene Lufteinschlüsse erhalten bleiben, die mit zunehmender Kompression allmählich kleiner werden. Tief im Inneren des Eisschildes befinden sich nur sehr kleine Luftblasen, die unter hohem Druck stehen. Direkt an der Oberkante des Eisschildes ist jede Jahresschicht von messbarer Dicke, und sie ist deutlich zu sehen, wenn eine vertikale Fläche freigelegt wird, wie beispielsweise an der Seite eines tafelförmigen Eisbergs. In der Tiefe werden die komprimierten Schichten immer dünner, bis einzelne Jahre nicht mehr unterschieden werden können und wir aus unserem Wissen über die Kompressibilität von Eis das Alter berechnen müssen.

Die Natur schafft für uns also ein geschichtetes Archiv aus Eis, das etwa 1 Mio. Jahre zurückreicht. Ungefähr so weit kommen wir, wenn wir den Eisschild bis zum Felsuntergrund durchbohren. Deshalb sind wir uns nicht ganz sicher, wann genau der Zyklus der Eiszeiten begann.

Wie können wir diese Aufzeichnung lesen? Glücklicherweise gibt es eine ausgezeichnete Möglichkeit, die Temperatur zu berechnen, bei der der Schnee fiel, der die Schichten gebildet hat. Wie wir in Kap. 3 gesehen haben, gibt es Sauerstoff in zwei Atomarten, sogenannten Isotopen, den „normalen“ Sauerstoff-16 (O^{16}) mit acht Protonen und acht Neutronen und den selteneren „schweren“ O^{18} mit zwei zusätzlichen Neutronen. Normalerweise ist O^{18} mit etwa einem Teilchen von 500 vorhanden. Wenn Wasser von der Meeresoberfläche verdampft, verdunsten die leichteren Wassermoleküle (H_2O^{16}) leichter als die schweren Moleküle (H_2O^{18}). Dieser Wasserdampf mit erhöhtem Sauerstoff-16-Gehalt kondensiert dann in Wolken zu Eiskristallen, wobei eine weitere Fraktionierung stattfindet.

Es wurden Experimente durchgeführt, um das Verhältnis O¹⁸:O¹⁶ im gefallenen Schnee mit der Lufttemperatur zum Zeitpunkt der Schneebildung in Beziehung zu setzen. Dies ist ein perfektes Thermometer für vergangene Klima. Die Wissenschaftler werden auch immer geschickter dabei, die winzigen Luftmengen aus den hochverdichteten Blasen im Eis zu entnehmen und auf Kohlendioxid- und Methangehalt zu analysieren. Wir kennen also nicht nur die Temperaturen der letzten Millionen Jahre, sondern auch die Treibhausgaskonzentrationen der Atmosphäre. Darüber hinaus können uns die Staubkonzentrationen etwas darüber sagen, wie trocken das Klima war, und damit auch, wie viele Wüsten die Erde besaß. Und schließlich hinterlassen große Vulkanausbrüche Ascheschichten, die darauf hinweisen, wann möglicherweise klimawirksame Eruptionen stattgefunden haben. In einer aktuellen Studie wurden 116 Vulkanausbrüche aus den letzten 2000 Jahren identifiziert, wobei der größte ein mysteriöser Ausbruch im Jahr 1257 war, der das Klima zwei oder drei Jahre lang beeinflusst haben muss und schließlich auf den Vulkan Samalas in Indonesien zurückgeführt wurde. Der zweitgrößte war 1458 in der Nähe von Vanuatu, der dritte war die Explosion des Tambora im Jahr 1815, die 71.000 Menschen tötete und Europa 1816 ein „Jahr ohne Sommer“ bescherte, was unmittelbar nach der Niederlage Napoleons zu schlechten Ernten und damit zu großen sozialen Unruhen führte (Stothers 1984).

Forscher begannen, in diesen Aufzeichnungen zu lesen, als in den 1950er- und 1960er-Jahren die ersten Eiskerne aus dem Grönländischen und dem Antarktischen Eisschild gebohrt wurden. Im Laufe der Zeit haben sich die Analysetechniken enorm verbessert: Während es zunächst nur eine grobe Dokumentation von Vereisungen und Interglazialen gab, gibt es heute detaillierte Daten der Temperaturen und Gase. Diese zeigen auch eine Vielzahl von

ungeklärten Ausschlägen der Temperaturkurve, zusammen mit einer wunderbar detaillierten Aufzeichnung, wie wir in eine Eiszeit eintreten und wie wir sie verlassen, und vor allem, wie ähnlich die letzten vier Eiszeiten zueinander waren, als ob die Erde einer regelmäßigen Schwingung ausgesetzt wäre. Was könnte das verursacht haben?

4.3 Der astronomische Einfluss auf die Eiszeiten

Der Schlüssel zum zyklischen Muster der Eiszeiten wird dem jugoslawischen Wissenschaftler Milutin Milankovitch im Jahr 1920 zugeschrieben, obwohl auch einiges für James Croll spricht, ein bemerkenswerter schottischer Wissenschaftler und Autodidakt, der als Hausmeister in einer wissenschaftlichen Bibliothek in Glasgow (im Andersonian College and Museum) arbeitete und sich sein Wissen aneignete, indem er die dortigen Bücher las. Er schlug diesen Mechanismus 1867 vor, und seine Arbeit – auch in anderen Bereichen – wird erst heute langsam anerkannt (Croll 1875).

Die Idee ist, dass, obwohl die Gesamtmenge der Strahlung, die über ein Jahr auf die Erde trifft, im Wesentlichen gleich bleibt (die Solarkonstante), ihre Verteilung nach Jahreszeiten und Breitengraden aufgrund von drei Arten von Schwankungen der Erdumlaufbahn variiert (Abb. 4.1).

Die erste ist die Variation der Exzentrizität der Ellipse der Erdumlaufbahn um die Sonne. Diese Umlaufbahn ist fast ein Kreis, aber nicht ganz. Wenn sie einem Kreis am nächsten ist, fällt das ganze Jahr über die gleiche Menge an Sonnenstrahlung auf den Planeten, und wenn die Exzentrizität am größten ist, durchläuft die Einstrahlung jedes Jahr ein deutliches Maximum und Minimum. Im Moment beträgt

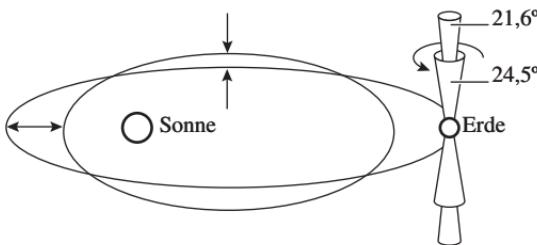


Abb. 4.1 Die drei Arten von Schwankungen der Erdumlaufbahn.
(Nach Houghton 1997)

die Exzentrizität 0,0167. Das bedeutet, dass die große Halbachse der Umlaufbahn eine Länge von 1,0167-mal der durchschnittlichen Entfernung der Erde von der Sonne hat, während die minimale Entfernung 0,9833-mal der Durchschnitt ist. Die Zeit, die die Erdumlaufbahn benötigt, um einen Zyklus der Formänderung von maximaler zu minimaler Exzentrizität und wieder zurück zu vollziehen, beträgt 100.000 Jahre.

Die zweite Schwankung betrifft den Winkel zwischen der Erdumdrehung und der Achse der Erdumlaufbahn. Im Moment beträgt dieser Winkel $23,5^\circ$ und er definiert die Grenzen für die Breitengrade, an denen die Sonne vollständig im Zenit stehen kann (die Wendekreise des Krebses und des Steinbocks bei $23,5^\circ$ nördlicher und südlicher Breite) und die Breitengrade, jenseits derer es mindestens einen Tag im Jahr gibt, an dem die Sonne nie untergeht oder aufgeht (nördlicher und südlicher Polarkreis bei $66,5^\circ$ nördlicher und südlicher Breite). Dieser Neigungswinkel der Rotationsachse verändert sich wie in einem Gyroskop und variiert zwischen $21,6^\circ$ und $24,5^\circ$ bei einer Periode von 41.000 Jahren. Wir sind es gewohnt, die Tropen und die Polarkreise als unveränderliche Orte auf der Erdoberfläche zu betrachten, aber das sind sie nicht; sie bewegen sich tatsächlich nach Norden und Süden über eine Entfernung von 270 km.

Schließlich geht es bei der dritten Schwankung darum, wann im Jahr die Erde auf ihrer elliptischen Umlaufbahn der Sonne am nächsten ist (Perihel). Dieses Datum, derzeit im Dezember, variiert mit einer Periode von 23.000 Jahren. Für die Bewohner der nördlichen Hemisphäre mag es kaum zu glauben sein, dass der tiefste Winter die Zeit ist, in der die Erde der Sonne am nächsten ist.

Jede dieser drei Schwankungen verändert die Verteilung der Einstrahlung über das Jahr und über verschiedene Breitengrade. Die Unterschiede sind gering, aber sie wirken sich aus, weil die Erde ein unsymmetrischer Planet ist, der die meisten seiner Landmassen in der nördlichen Hemisphäre und die meisten Ozeane im Süden hat. Die unterschiedliche Absorption von Strahlung durch Land und durch Wasser ermöglicht es, dass die mit den Milankovitch-Zyklen schwankende Einstrahlung Veränderungen des Weltklimas bewirkt. Daher würden wir erwarten, dass die Durchschnittstemperatur der Erde eine gleichmäßig variierende Kurve durchläuft, die der Summe der drei Zyklen mit Wellenlängen von Zehntausenden von Jahren entspricht. Das ist allerdings nicht der Fall. Zwar variiert der astronomische Einfluss auf das Klima durch die Summe der Milankovitch-Zyklen gleichmäßig, nicht aber der Temperaturverlauf der Erde. Schauen wir uns an, warum das so ist.

4.4 Das Archiv der Eiskerne

Abb. 4.2 zeigt die Klimaaufzeichnung der vergangenen 400.000 Jahre, wie sie durch Analyse von Eiskernen auf Temperatur (nach O^{18} - O^{16} -Verhältnissen), Kohlendioxid- und Methangehalt (in Lufteinschlüssen) ermittelt wurden. Zwei Ergebnisse fallen ins Auge. Erstens sind die Änderungen im Takt: Warme Temperaturen während eines

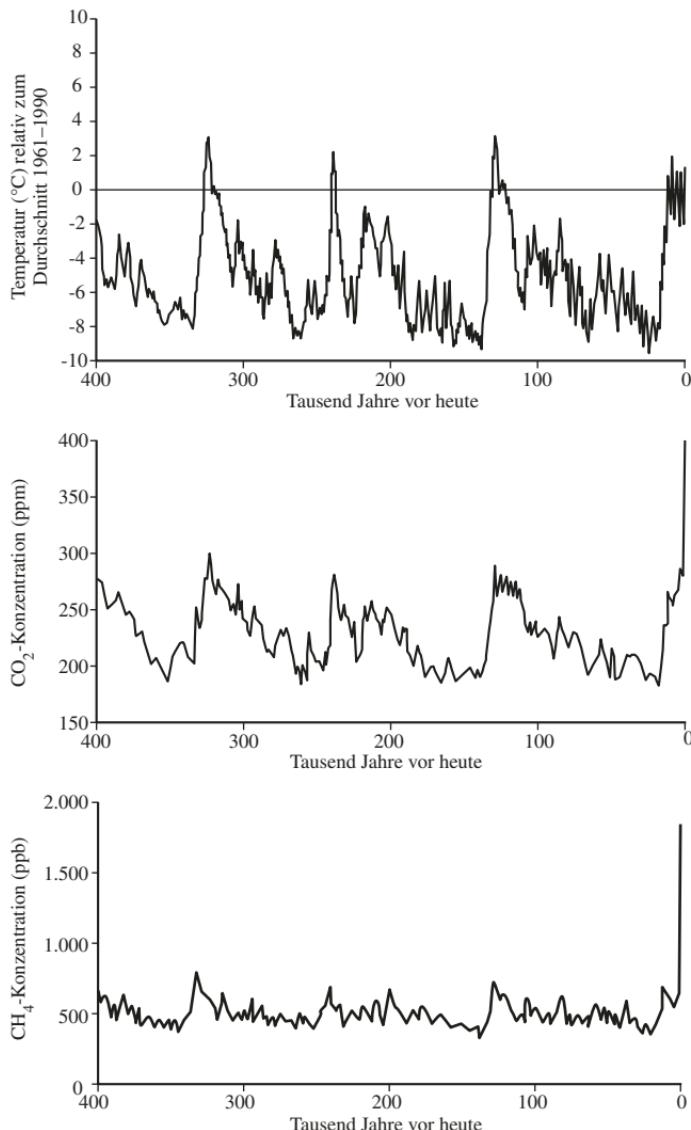


Abb. 4.2 Klimadaten der vergangenen 400.000 Jahre ermittelt aus Eiskernen. Man beachte die Ähnlichkeit der Kurvenformen der globalen Temperatur und der Treibhausgaskonzentrationen (Petit et al. 2001)

Interglazials entsprechen hohen Kohlendioxid- (CO_2) und Methankonzentrationen (CH_4), und niedrige Temperaturen entsprechen niedrigen Kohlendioxid- und Methanwerten. Zweitens sind die Daten keine gleichmäßig schwankende Variation der Milankovitch-Zyklen, sondern sehen wie Sägezähne aus. Die Erde taucht mit einem Ruck aus einer Eiszeit auf, erwärmt sich schnell um vielleicht 10 °C in 1000 bis 2000 Jahren und erreicht ein Interglazial, dann beginnt sie allmählich wieder abzukühlen, und sie benötigt etwa 100.000 Jahre für langsame und ziemlich gleichmäßige Abkühlung, um die Tiefen der nächsten Eiszeit zu erreichen. Bemerkenswert ist, dass die vier Eiszeiten, die von dieser 400.000 Jahre langen Aufzeichnung erfasst werden, sich in der Dauer unterscheiden, aber einen sehr ähnlichen Verlauf der Temperatur- und Gaskurven aufweisen. Die Temperatur fällt langsam und – vom Rauschen abgesehen – ziemlich linear bis zum Minimum der nächsten Eiszeit ab. Der CO_2 -Gehalt sinkt dabei von etwa 280 ppm auf 180 ppm und die Methankonzentration von 700 auf 400 ppb (*parts per billion*). Nach der Erholung kehren diese drei Größen zu den Werten zurück, die sie im vorherigen Interglazial hatten. Wir befinden uns heute in einem Interglazial, das mindestens drei früheren ähnelt. Wie und warum passiert das?

Diese bemerkenswerten Klimadaten werfen viele Fragen auf, einige davon sind noch unbeantwortet. Erstens: Warum schwanken die CO_2 - und CH_4 -Werte zwischen so genau definierten Grenzen? Als wir uns die Hinweise auf Eiszeiten in der frühen Erdgeschichte ansahen, handelte es sich um einzelne Ausreißer mit verschiedenen möglichen Ursachen, die aber alle zu einem Ausnahmereignis führten. Seit mindestens 1 Mio. Jahren haben wir stattdessen eine vorhersagbare Geschichte der Eiszeiten (die dem Antrieb durch die Milankovitch-Zyklen entspricht, mit Ausnahme des resultierenden Sägezahnmusters

der Kurven), und jede davon hat uns durch den gleichen Temperaturzyklus und den gleichen Zyklus der CO_2 - und CH_4 -Werte geführt. Auf dieser Grundlage können wir mithilfe der Milankovitch-Zyklen vorhersagen (wenn wir einen Moment lang die irreversiblen Dinge beiseitellen, die wir derzeit unserem Planeten antun), wann die nächste Eiszeit eintritt, wie lange sie dauern wird, wie die globale Temperatur sein wird und dass die Konzentrationen von CO_2 und CH_4 in der tiefsten Eiszeit 180 ppm beziehungsweise 400 ppb betragen werden. Wir können von der Wiederholung ausgehend argumentieren, dass dieser Zyklus fortgesetzt wird. Doch natürlich gab es einen Anfang, und das bringt uns zur nächsten Frage: Wann und warum begann der Zyklus der astronomisch verursachten Eiszeiten? Wie ich gerade erwähnt habe, reichen die Eiskerndaten leider nur 1 Mio. Jahre zurück, denn die letzten Zentimeter eines Eiskerns, direkt am Felsuntergrund, wurden nicht nur extrem gequetscht, sondern auch durch Erdwärme leicht angeschmolzen, sodass wir auf diese Weise nie weiter als 1 Mio. Jahre in die Vergangenheit kommen können. Die ältesten Teile dieser Archive sind weniger vertrauenswürdig, weil das Eis derart gequetscht wurde. Den besten Beweis für die Regelmäßigkeit der Klimaschwankungen liefern die vergangenen 400.000 Jahre mit vier Vergletscherungen (Abb. 4.2), obwohl die älteren Daten zu zeigen scheinen, dass sich dieses Muster fortsetzt.

Es muss einen Zeitpunkt gegeben haben, ab dem das Erdklima in einen Zustand überging, in dem die Milankovitch-Zyklen gerade ausreichten, um einen Wechsel von einer Eiszeit zu einer Warmzeit und umgekehrt zu bewirken. Davor war es vermutlich zu warm um größere Gletscher zu bilden, selbst in einem Milankovitch-Minimum. Es sieht so aus, als ob dieser Ausgangspunkt für die modernen Eiszeiten am Ende des Pliozäns lag, und wir sind uns nicht ganz sicher, wie

viele Eiszeiten es gegeben hat. Das 1 Mio. Jahre zurückreichende Archiv der Eiskerne enthält sechs oder sieben Eiszeiten, sodass es insgesamt vielleicht bis zu 20 gab, auch wenn wir keine Möglichkeit haben herauszufinden, ob die früheren mit dieser regelmäßigen Wiederholung übereinstimmten, wie sie die letzten vier gezeigt haben.

Die nächste Frage ist, warum die Sägezahne? Wir können dies qualitativ beantworten: Es ist einfacher eine Eisschicht zu zerstören als eine aufzubauen. Wenn die Lufttemperatur einer zunächst eisfreien Erde aufgrund der astronomischen Ursache sinkt, beginnt der im Winter gefallene Schnee auf in großer Höhe oder in hoher Breite gelegenen Flächen den folgenden Sommer über liegen zu bleiben. Dann häuft sich der Schnee des nächsten Winters auf den Überresten des vorhergehenden Winters, und es bilden sich dauerhafte Schneefelder, die allmählich dicker werden und sich in Gletscher und Eisschilde verwandeln. Dies passiert langsam, führt aber allmählich zu einer negativen Albedo-Rückkopplung, die den Kühleffekt verstärkt. Langsam entwickelt sich eine vergletscherte Welt. Dann kommt eine Umkehrung der astronomischen Ursache, die Lufttemperatur erwärmt sich. Nun kann die Gletscheroberfläche recht schnell abtauen, während sie zuvor nur langsam mit einer Schneedecke pro Jahr wachsen konnte. Die Gletscherwachstumsrate ist physikalisch begrenzt, die Gletscherschmelzrate jedoch nicht. Wenn die Eisschilde einem Sägezahnmustern folgen, dann auch das Klima, wobei die Lufttemperatur von der Menge des vorhandenen Eises beeinflusst wird, sodass auch die Lufttemperatur einem Sägezahnmustern folgt. Somit ist der Auslöser des Sägezahnmusters das Volumen der Eisschilde oder zumindest deren Oberfläche.

Die nächste Frage ist: Warum halten die CO_2 - und CH_4 -Werte mit Erwärmung und Ankühlung Schritt? Lenkt eine Größe die anderen? Heute sind wir an das Konzept

gewöhnt, dass das zusätzliche CO_2 , das wir in die Atmosphäre abgeben, das Klima erwärmt und unter anderem zu einer weiteren Reduzierung der Eisschilde führt. Das CO_2 ist die Ursache und der Klimawandel die Wirkung. Aber ist während der Eiszeit-Interglazial-Zyklen beispielsweise das CO_2 zuerst angestiegen und hat dies die Eisschilde zum Schmelzen gebracht? Oder sind die Eisschilde nur als Reaktion auf den Lufttemperaturanstieg geschmolzen, wobei dieser Anstieg – trotz vermehrtem Pflanzenwachstum – zu einer Zunahme der CO_2 -Konzentration geführt hat? Experimente zur Prüfung der Zeitverzögerung zwischen Temperatur, CO_2 - und CH_4 -Konzentrationen, um festzustellen, was Ursache und was Wirkung ist, liefern widersprüchliche Ergebnisse: Wir sind uns noch nicht sicher, welche Größe sich zuerst ändert und welche folgt. Und in der Tat ist die Situation komplizierter, als wir es uns zunächst vorgestellt haben. Wenn das Pflanzenwachstum mit zunehmender Erwärmung zunimmt (was sehr wahrscheinlich ist, wenn die Erwärmung über Land erfolgt), dann wird Kohlenstoff aus der Atmosphäre zunehmend in Biomasse eingebaut. Dann gibt es einen jährlichen Kreislauf, der im Frühjahr CO_2 aus der Atmosphäre entnimmt, das Sonnenlicht nutzt und es in Zucker, Lignin und andere kohlenstoffbasierte Stoffe umwandelt, die lange halten und nicht schnell abgebaut werden. Das Rätsel hier ist also, dass zumindest anfangs trotz des Pflanzenwachstums wahrscheinlich CO_2 freigesetzt wurde. Nach einer Theorie, die inzwischen als recht glaubwürdig gilt, führen die leichten Temperaturschwankungen zu einer Ausgasung an der Meeresoberfläche: Mit steigender Temperatur beginnen die Meeresoberflächen, CO_2 auszusagen, was den Treibhauseffekt antreibt, die Wasserdampfkonzentration erhöht und in einer Rückkopplung weiter erhöhte Temperaturen erzeugt.

Eine weitere und äußerst beunruhigende Frage lautet: Stellen die Temperaturen, Kohlendioxid- und Methangehalte

der Kaltzeiten und der Interglaziale zwei natürliche Endpunkte für den schwankenden Zustand des Klimasystems dar? Wenn ja, dann gibt es eine „natürliche“ Klimasensitivität gegenüber CO_2 , die berechnet werden kann, indem man den Temperaturanstieg zwischen einem kalten und einem warmen Extrem durch den Anstieg der CO_2 -Konzentration teilt. Sagt uns diese Sensitivität, wie sich unser Klima über viele Jahrzehnte oder gar Jahrhunderte hinweg an das zusätzliche CO_2 anpassen wird, das wir unglücklicherweise der Atmosphäre hinzugefügt haben? Was wäre das Ergebnis, wenn wir die so ermittelte Sensitivität anwenden, um abzuschätzen, wie sich das Klima – wenn es ausreichend Zeit dafür hat – sich vollständig daran anpassen würde, was wir ihm antun? Das Ergebnis ist erschreckend, und ich werde in einem späteren Kapitel darauf näher eingehen. Im Moment genügt es zu sagen, dass die so berechnete Empfindlichkeit nicht weniger als $7,8^\circ\text{C}$ für eine Verdopplung des CO_2 beträgt (Wasdell 2015), was reichen würde, um allein aufgrund unserer derzeitigen CO_2 -Konzentration einen Temperaturanstieg von $3,6^\circ\text{C}$ zu erzeugen. Das ist offensichtlich noch nicht passiert, könnte aber mit der Zeit geschehen. Dieser hohe Wert wird als Erdsystem-Klimasensitivität bezeichnet, er ist viel höher als die kurzfristige Empfindlichkeit des Klimas gegenüber einem Anstieg des CO_2 -Gehalts. Er zeigt, was mit unserem Klima langfristig geschehen könnte, vielleicht über Hunderte von Jahren hinweg, wenn die erhöhten CO_2 -Werte nicht gesenkt werden.

4.5 Wie die letzten Eiszeit endete

Die lange Geschichte des Eises auf der Erde nähert sich nun dem heutigen Tag, wenn wir uns die letzten 12.000 Jahre – nur ein kurzer Moment im Rahmen der Erdgeschichte – ansehen, in denen der Planet aus der

letzten Eiszeit hervorgegangen ist und ein (vorübergehend) stabiles Klima entwickelt hat. Während dieses Zeitraums war die immer einfallsreiche Menschheit in der Lage, die Landwirtschaft zu erfinden und darüber hinaus Städte, Architektur, Geld, Mathematik, Armeen und Wissenschaften zu entwickeln. Kunst und wahrscheinlich Musik gab es schon in der Eiszeit, die anderen Segnungen (oder Flüche) gehen letztlich auf landwirtschaftliche Überschüsse zurück und auf die Notwendigkeit, ortsfeste Felder vor Eindringlingen zu schützen.

Der Übergang unterschied sich in gewisser Weise von früheren Eiszeiten, da es vorübergehend so schien, als würden wir in die Eiszeit zurückkehren, aus der wir gerade hervorgegangen waren. Dieses Ereignis wird nach einer alpinen Pflanze namens Dryas als Jüngere Dryas bezeichnet, im Unterschied zu einem früheren Ereignis, das entsprechend Ältere Dryas heißt. Die letzte Eiszeit erreichte ihren Höhepunkt vor etwa 20.000 Jahren und begann dann mit der schnellen Schmelze, die den steilen Teil des Sägezahnmusters darstellt. Vor 12.800 Jahren brachte uns das nahe an die modernen Temperaturen heran, aber dann gingen plötzlich die Temperaturen in der nördlichen Hemisphäre und den Tropen für etwa 1300 Jahre in Richtung Vereisung zurück, bevor wir uns schnell wieder aus der Affäre zogen. In antarktischen Eiskernen gibt es keine Hinweise auf dieses Ereignis, sodass es sich eindeutig um ein Phänomen der nördlichen Hemisphäre handelte. Es senkte die Temperatur Grönlands auf 15 °C unter den derzeitigen Zustand. Es gibt viele Theorien darüber, was dieses Ereignis verursacht hat. Eine von ihnen ist, dass ein riesiger Gletschersee existierte, der Agassizsee, der sich im heutigen Kanada zwischen der Hudson Bay und dem Oberen See befand. Ein Eisschild, der die Baffin-Insel bedeckte und von dieser abwärts floss, hinderte den See demnach daran, in den Ozean zu entwässern. Im Zuge der Erwärmung

nach der Eiszeit zog sich dieser Eisschild zurück, der Damm öffnete sich und eine riesige Süßwassermenge floss in den Atlantik. Dies fügte dem Ozean eine Frischwasserschicht hinzu, was die Konvektion in der Grönland- und Labradorsee stoppte und so die thermohaline Zirkulation verlangsamte (Kap. 11) und das Klima wieder in Richtung Kälte brachte. Dies ist eine schöne und plausible Geschichte, aber es gibt keine beobachtbaren Beweise dafür. Wally Broecker von der Columbia University, der sich das ausgedacht hat, sprach davon, dass eine „Armada von Eisbergen“ von diesem auslaufenden See in den Atlantik geschwemmt wurde, was ein ansprechendes Bild ist – wahrscheinlich aber nicht viel mehr.

Nach dem Zwischenspiel der Jüngeren Dryas erwärmte sich das Klima schnell auf ein etwas wärmeres Niveau als heute, das es vor etwa 8000 Jahren erreichte, und von da an war das Klima außerordentlich stabil. Natürlich wissen wir heute, dass wir uns in einem Interglazial befinden und dass diese Stabilität trügerisch ist. Tatsächlich kühlte das Klima vom Jahr 1000 bis zur Industriellen Revolution langsam ab, wie das berühmte „Hockeyschläger-Diagramm“ (Abb. 4.3) der globalen Temperaturen von Mann und Bradley (Mann et al. 1999) zeigt. Dabei repräsentiert der lange Griff des Hockeyschlägers die langsame Abkühlung und die kurze gekrümmte Keule die schnelle Erwärmung seit Mitte des 19. Jahrhunderts. Dennoch war das Klima stabiler und hielt länger als bei den letzten vier Interglazialen, und dies gab dem *Homo sapiens*, der die letzte Eiszeit durch die Jagd überlebt hatte, die Möglichkeit zu lernen, wie man Pflanzen anbaut und an einem Ort bleibt, während sie wachsen. Um zu vermeiden, dass andere in das Gebiet eindringen, in dem er seine Samen gepflanzt hatte, brauchte der neue Landwirt eine Organisation, die sein Recht auf dieses Land anerkennt, es vermisst (so entwickelt er die Mathematik), Berechtigungsurkunden schreibt (damit erfindet

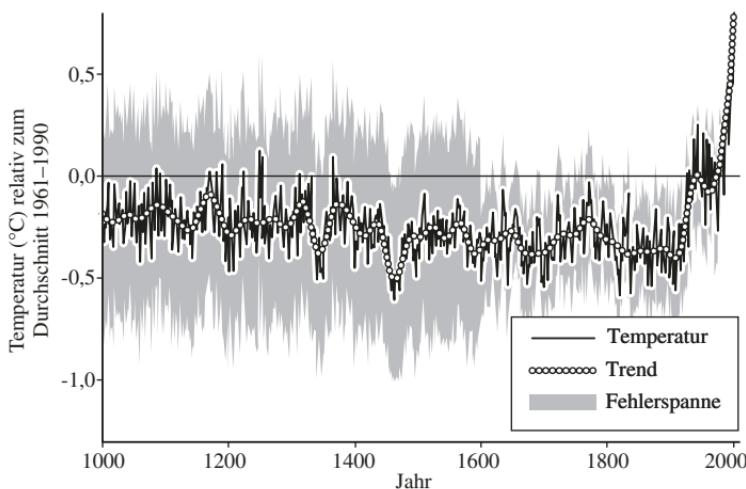


Abb. 4.3 Das Hockeyschläger-Diagramm von Mann und Bradley mit den Temperaturen der nördlichen Hemisphäre in den vergangenen 1000 Jahren (Mann et al. 1999)

er das Schreiben) und seine Rechte gegen Eindringlinge und Invasoren schützt (so erfindet er Polizei und Armeen). Ein Jäger und Sammler der Eiszeit benötigte keine dieser Erfindungen. Und für den Menschen, der diese Saat pflanzte, gab es jedes Jahr mehrere Monate mit sehr wenig Arbeit, und so konnte er im Namen der Organisation, die seinen Schutz sicherte, den Bau von Monumenten, megalithischen Tempeln und Gräbern bewerkstelligen. Er hatte auch Zeit, über Kunst und Philosophie und schließlich über Wissenschaft nachzudenken. Unsere moderne Welt entstand, als zum ersten Mal Samen vom Gras des Vorjahres ausgesät wurden, um Nahrung für das nächste Jahr zu liefern. Alles Gute und alle Missstände – die gesamte menschliche Zivilisation verdanken wir der Stabilität unseres interglazialen Klimas.

Ich sollte an dieser Stelle daran erinnern, dass es nicht ausgemacht ist, dass diese bedeutsame Entwicklung

von einem Mann eingeleitet wurde. In einer Jäger-und-Sammler-Gesellschaft (wie heute die Inuit) gehen die Männer auf die gefährliche Jagd, während die Frauen Beeren und andere essbare Pflanzen sammeln. Es können also die Frauen gewesen sein, die bemerkt haben, dass essbare Gräser immer an denselben Stellen gediehen und bewusst kultiviert werden konnten.

Nach dem Ende der Eiszeit stieg der Meeresspiegel rapide an, sodass frühe Küstensiedlungen überflutet wurden und deren Reste vor der Küste gesucht werden müssen. Die Landmasse, die Großbritannien mit dem Rest Europas verband, von Archäologen Doggerland genannt, war um 4200 v. Chr. überflutet, was die Nordsee und den Ärmelkanal schuf. Dieser Prozess war vor 5000 Jahren im Wesentlichen abgeschlossen, danach blieb der Meeresspiegel bis zum 20. Jahrhundert bemerkenswert konstant, bevor er langsam wieder zu steigen begann. Das bedeutet, dass die gesamte Geschichte der Zivilisation mit einem stabilen Meeresspiegel abließ. Wir können dies an den Ufern des Mittelmeers sehen (Arenson 1990), wo sich antike Küstenstädte befinden und wo römische Fischfallen – Steinbecken, in die Wasser zum Fangen von Fischen eingelassen wurde – noch immer verwendet werden können.

In den nördlichen Meeren waren die Bedingungen deutlich wärmer als heute, was als „mittelalterliche Warmzeit“ bezeichnet wird. Die Wikinger besiedelten Grönland kurz vor dem Jahr 1000 und konnten dort für ihre Tiere Heu anbauen. Aber ab 1400 setzte eine klimatische Verschlechterung ein, die manchmal als „Kleine Eiszeit“ bezeichnet wird, und schließlich verschwand die Kolonie. Dafür wird das Klima verantwortlich gemacht, aber wir kennen die Details nicht. Es scheint, dass die nordischen Siedler ihre europäischen Bräuche und Methoden nicht aufgeben wollten, und so versuchten sie, weiterhin Haustiere zu halten, anstatt die Lebensweise der Inuit

nachzuahmen, die mit ihnen in Kontakt kamen und die vom Robbenfang lebten. Das Festhalten an vertrauten Gewohnheiten angesichts sich ändernder Bedingungen könnte für die Siedler aus Europa fatal gewesen sein.

4.6 Wie lange noch bis zur nächsten Eiszeit?

Schätzungen, die sich aus der Projektion der Milankovitch-Zyklen in die Zukunft ergeben, deuten darauf hin, dass wir es in etwa 23.000 Jahren deutlich kälter haben werden und uns mitten in der nächsten Eiszeit befinden. Aber könnte es sein, dass die massive zusätzliche Erwärmung, die wir jetzt auf dem Planeten verursachen, die nächste Eiszeit nicht nur verzögern, sondern auch unterdrücken wird? Bis vor Kurzem verneinten die Klimatologen das. Aber jetzt, da wir sehen, wie schnell sich die Erwärmung vollzieht und wie viele Rückkopplungen ablaufen, glauben immer mehr, dass wir möglicherweise nicht nur den kurzfristigen Zustand des Planeten, sondern seine gesamte Zukunft verändert haben. Es ist gut möglich, dass zukünftige Eiszeiten von uns abgeschafft oder zumindest verschoben wurden. Eine Studie deutet darauf hin, dass die nächsten Milankovitch-Zyklen keine Vereisung hervorrufen werden und wir vielleicht für eine halbe Million Jahre keine weitere Eiszeit haben werden (Tzedakis et al. 2012). Eine neuere Studie (Ganopolski et al. 2016), die sich eingehend damit beschäftigt, wie Milankovich-Zyklen sich auf den nördlichen Sommer auswirken, legt nahe, dass eine moderate Fortsetzung der Kohlenstoffemissionen die nächste Eiszeit um mindestens 100.000 Jahre verschieben wird. Einer der Autoren, Hans Joachim Schellnhuber, kommentierte:

„Das zeigt sehr deutlich, dass wir längst in eine neue Ära eingetreten sind und dass die Menschheit im Anthropozän selbst zu einer geologischen Kraft geworden ist. Tatsächlich könnte das eine neue Epoche einleiten, die als Enteisung (*deglacial*) bezeichnet werden könnte.“

Den Begriff „Anthropozän“ hat im Jahr 2000 der Nobelpreisträger Paul Crutzen geprägt, um zu verdeutlichen, dass wir uns wirklich in einem neuen geologischen Zeitalter befinden (welches das Holozän ablöst), in dem der *Homo sapiens* einen signifikanten und beobachtbaren Einfluss auf den Planeten ausübt.

Das alles erscheint einleuchtend: Bis vor 2,6 Mio. Jahren war die Erde noch etwa 2 bis 4 °C wärmer als heute, zu warm für die durch Milankowitsch-Zyklen ausgelösten Eiszeiten. Wenn dies die Temperatur ist, die benötigt wird, um Eiszeiten abzuschalten (beziehungsweise deren Einschalten zu verhindern), dann nähern wir uns ihr schnell. Denn das ist der Wert, auf den wir bis 2100 zurückkehren werden, wenn wir auf unserem derzeitigen Weg bleiben. Selbst im Pliozän brauchte der Planet eine zusätzliche Kühlung, um in einen Zustand versetzt zu werden, in dem das Klima den Milankovitch-Zyklen folgen konnte. Es könnte also wirklich der Fall sein, dass das, was wir als die endlos zyklischen Eiszeiten – das Muster des Gletscherwachstums, des Gletscherflusses, dann des Schmelzens und der Erwärmung des Planeten – betrachten, tatsächlich ein kurzlebiges Phänomen ist, das davon abhängt, dass der Planet bei einer bestimmten Verteilung von Land und Meer eine bestimmte mittlere Temperatur hat. Es könnte sein, dass die Zahl der Eiszeiten der vergangenen 2 bis 3 Mio. Jahren vorerst alles war, da unsere Beeinflussung des Klimas die Erde aus einem Zustand herausgeholt hat, in dem es zu periodischen Vereisungen kommen kann.

Ist das nun gut oder schlecht? Instinktiv fühle ich, dass jeder künstliche Eingriff in das Klima schlecht ist. Aber ein Fan der fossilen Brennstoffe könnte sagen, dass unser ungehemmtes Verbrennen des fossilen Kohlenstoffs der Welt zu begrüßen ist, wenn das die nächste Eiszeit stoppt, denn erst in der warmen, stabilen Zeit seit der letzten Eiszeit hat es der Mensch geschafft, sich niederzulassen, die Landwirtschaft zu erfinden und die großen Zivilisationen der letzten paar Tausend Jahre hervorzubringen. Dieses Argument könnte einen gewissen Wert haben, aber das Problem ist, dass wir eindeutig zu weit gehen. Wie ich in den nächsten Kapiteln zeigen werde, hört unsere Intervention nicht mit dem möglicherweise gutartigen Ergebnis einer Verhinderung oder Verschiebung der nächsten Eiszeit auf, sondern wird nur allzu wahrscheinlich eine schnellere Erwärmung hervorrufen, als sie jemals in der Erdgeschichte vorkam.

Literatur

- Arenson S (1990) The encircled sea: The mediterranean maritime civilisation. Constable, London
- Croll J (1875) Climate and time in their geological relations; a theory of secular changes of the earth's climate. Cambridge University Press, Cambridge Library Collection, Cambridge (Reprint 2013)
- Ganopolski A, Winkelmann R, Schellnhuber HJ (2016) Critical insolation – CO₂ relation for diagnosing past and future glacial inception. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/nature16494>
- Houghton J (1997) Global warming: the complete briefing. Cambridge University Press, Cambridge
- Mann ME, Bradley RS, Hughes MK (1999) Northern hemisphere temperatures during the past millennium: inferences, uncertainties and limitations. *Geophys Res Lett* 26:759–762

- Petit JR et al (2001) Vostok Ice core data for 420,000 years, IGBP PAGES/world data center for paleoclimatology data contribution series #2001-076. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder
- Stothers RB (1984) The great tambora eruption in 1815 and its aftermath. *Science* 224:1191–1198
- Tzedakis PC, Charnell JET, Hodell DA, Kleinen HF, Skinner LC (2012) Determining the natural length of the current interglacial. *Nat Geosci.* <https://doi.org/10.1038/ngeo1358>
- Wasdell D (2015) Facing the harsh realities of now. www.apollo-gaia.org

5

Der Treibhauseffekt

In Kap. 4 haben wir uns den natürlichen astronomischen Zyklus angesehen, der uns über Zeiträume von Zehntausenden von Jahren führt – durch Eiszeiten, in denen ein Großteil der Nordhalbkugel mit Eis bedeckt ist, und durch Interglaziale, in denen sich diese Eisschilde bis auf Reste in Grönland und auf hohen Bergen zurückziehen. Die Antarktis bleibt dabei durchwegs vereist. Das vorherige Interglazial vor dem jetzigen war vor etwa 130.000 Jahren. Der *Homo sapiens*, der sich gerade erst aus früheren menschlichen Arten in Afrika entwickelt hatte, war noch nicht in der Lage, einen großen Nutzen daraus zu ziehen. Immerhin konnte er seine überlegene Intelligenz nutzen, um sich weltweit zu verbreiten und Lebensräume zu besiedeln, die sich von denen seiner Herkunft deutlich unterscheiden. Er stellte Steinwerkzeuge her und war ein Jäger und Sammler, aber er war noch nicht entwickelt oder nicht zahlreich genug, um Landwirtschaft und eine Lebensweise mit festem Wohnort hervorzubringen. Dann

kam eine weitere Vereisung und damit in höheren Breitengraden die Herausforderung, einfach nur zu überleben. Erst in der gegenwärtigen Interglazialzeit konnte der Mensch seine Umwelt durch Technologie verändern, und erst in den letzten 200 Jahren ging diese Technologie mit dem massiven Einsatz fossiler Brennstoffe einher. Wir, die Menschen, befinden uns in einer beispiellosen Situation. Unsere Umweltveränderungen beinhalten natürlich weit aus mehr als die Freisetzung von CO_2 . Dazu gehören (und das seit mehreren Jahrtausenden) die Rodung und Zerstörung von Wäldern, die Nutzung (und Erschöpfung) von Wasserressourcen und der Anbau von Nutzpflanzen. Die größten Auswirkungen hat aber unsere vergleichsweise sehr junge Erfindung von Maschinen, die für uns arbeiten können und dazu Energie benötigen. Sehen wir uns einmal an, wie die Gase, die wir freisetzen, die Klimaänderung verursachen. Aber lassen Sie uns zunächst den natürlichen Treibhauseffekt betrachten, von dem wir abhängig sind, um auf diesem Planeten zu existieren.

5.1 Der natürliche Treibhauseffekt

Der Treibhauseffekt basiert auf sehr einfacher Physik. Aus einer einzigen Gleichung (deren Grundlagen schon seit 1884 bekannt sind) können wir die Gleichgewichtstemperatur ableiten, die die Erde annehmen würde, wenn sie nur ein Materieball ohne Atmosphäre wäre, der in der derzeitigen Entfernung die Sonne umkreist. Dann fügen wir eine Atmosphäre hinzu und sehen, was das mit der Temperatur macht. Wir werden sehen, dass die natürliche Atmosphäre die Erde erwärmt – der so genannte „natürliche Treibhauseffekt“ – und dass die Gase, die wir heute der Atmosphäre hinzufügen, sie noch mehr erwärmen.

Beginnen wir damit, uns die Erde als eine Kugel im Weltraum ohne Atmosphäre vorzustellen, die nur durch Strahlung der Sonne erwärmt wird. Wenn die Erde sich erwärmt, strahlt sie ihrerseits Energie aus, aufgrund ihrer eigenen Temperatur. Das Gleichgewicht zwischen diesen beiden sagt uns, welche Temperatur die Erde erreicht. Angenommen dies ist T , gemessen in Kelvin (K), also Grad über dem absoluten Nullpunkt, was der Temperatur in °C addiert mit 273,16 entspricht.

Gehen wir davon aus, dass die Sonne Strahlung mit konstanter Intensität abgibt. Diese ist genau genommen eine Funktion der Oberflächentemperatur der Sonne, die etwa 6000 °C beträgt, die aber aufgrund der wechselnden Auswirkungen der Sonnenfleckenaktivität im Laufe der Zeit leicht variiert und zudem über Milliarden von Jahren einen sehr langsam zunehmenden Trend aufweist. Der Einfachheit halber gehen wir jedoch davon aus, dass auf der Erde eine dem Abstand der Erde von der Sonne entsprechende konstante Strahlungsintensität pro Quadratmeter trifft (im rechten Winkel zu den Sonnenstrahlen). Dies ist die Solarkonstante S und sie beträgt 1,37 kW pro Quadratmeter (kW m^{-2}). Mit anderen Worten, wenn man eine Solarzelle mit einem Wirkungsgrad von 100 % auf einem Satelliten hätte, der direkt der Sonne zugewandt ist, könnte die Zelle $1,37 \text{ kW m}^{-2}$ erzeugen, etwas mehr als ein einziger elektrischer Heizstab verbraucht. Dies ist die maximal mögliche Leistung, die jemals durch Solarenergie erreicht werden kann, weshalb Solarenergie so große Kollektoren erfordert.

Wir haben also 1,37 kW Energie pro Quadratmeter in den Sonnenstrahlen, die auf die Erde treffen. Wie viel Energie wird insgesamt von der Erde aufgefangen? Wir müssen die Solarkonstante S mit der Querschnittsfläche der Erde multiplizieren, das heißt mit πR^2 , wobei R der Radius der Erde ist. Ein Teil dieser Energie wird sofort

wieder in den Weltraum zurückgestrahlt, da die Erde kein perfekter schwarzer Körper ist (der im sichtbaren Bereich die gesamte Strahlung, die auf ihn fällt, absorbieren würde). Ein Anteil α wird direkt zurückreflektiert. Dies ist die Albedo der Erde als Ganzes und sie liegt bei etwa 0,30. Damit bleibt $\pi R^2 S (1 - \alpha)$ als die gesamte von der Erde absorbierte Strahlung übrig.

Die Erde wird durch diese Strahlung erwärmt, aber sobald sie warm ist, gibt sie zugleich selbst Strahlung ab. Das Stefan-Boltzmann-Gesetz von 1884 (entdeckt von zwei genialen österreichischen Physikern, Josef Stefan und seinem Schüler Ludwig Boltzmann) beschreibt, wie viel Strahlung pro Quadratmeter Fläche von jedem Körper emittiert wird, dessen absolute Temperatur T ist. Diese ist proportional zu T^4 , der vierten Potenz der Temperatur, mit einer Proportionalitätskonstante σ , die $5,67 \cdot 10^{-8}$ beträgt (Einheiten sind Watt pro Quadratmeter mal K⁻⁴). Deshalb strahlt ein heißer Körper weitaus mehr ab als ein kalter Körper. Es gibt ein weiteres Gesetz, das 1893 der Deutsche Wilhelm Wien entdeckt hat und das beschreibt, wie diese Strahlung über den Bereich der möglichen Frequenzen der elektromagnetischen Strahlung verteilt ist. Bei der Temperatur der Sonne liegt das Maximum im sichtbaren Bereich – also sieht die Sonne weiß aus und ist tatsächlich weißglühend – während kühлere Oberflächen nur rotglühend sind und bei der niedrigen Temperatur der Erde können wir die Strahlung überhaupt nicht sehen, aber wir können sie messen und feststellen, dass sie im Mikrowellenbereich liegt.

Die Erde emittiert also σT^4 Wärmestrahlung pro Quadratmeter (wir gehen davon aus, dass die Erde bei diesen niedrigen Frequenzen tatsächlich ein schwarzer Körper ist) über ihre gesamte Oberfläche, die $4 \pi R^2$ beträgt (der Faktor 4 entspricht dem Verhältnis zwischen der gesamten Erdoberfläche und der die Sonnenstrahlen einfangenden

Querschnittsfläche). Wir können, wenn wir wollen, die Emissionen mit einem Faktor ε (zwischen 0 und 1) multiplizieren, dem Emissionsgrad. Bei normalen Temperaturen strahlt die Erde fast wie ein „schwarzer Körper“, wie ein perfekter Kühler, aber wenn wir den Emissionsgrad hinzufügen, können wir sehen, wie sich die Zugabe von Treibhausgasen auswirkt.

Diese beiden Energien müssen im Gleichgewicht sein, wenn die Erde eine isolierte Kugel im Weltraum ist – die Erde strahlt gerade so viel Energie ab, wie sie von der Sonne empfängt, sodass sie auf einer konstanten Temperatur T bleibt, der Gleichgewichtstemperatur der Erde. Um T zu finden, müssen wir die folgende Gleichung lösen:

$$4 \pi R^2 \varepsilon \sigma T^4 = \pi R^2 S (1 - \alpha)$$

Durch leichtes Umstellen bekommen wir:

$$T^4 = S \frac{1 - \alpha}{4 \sigma \varepsilon}$$

Dies ist die einzige Gleichung, die ich in diesem Buch verwende, aber sie ist wichtig, denn diese einfache Balance zwischen ein- und ausgehender Energie definiert die Bewohnbarkeit der Erde.

Die überraschende Lösung der Gleichung ist $T=255$ K, also -18 °C. Mit anderen Worten, wenn die Erde keine Atmosphäre hätte, wäre die Durchschnittstemperatur an ihrer Oberfläche deutlich unter dem Gefrierpunkt. Wir hätten eine gefrorene, tote Welt. Außerdem sehen wir, dass die Temperatur überhaupt nicht vom Radius der Erde abhängt, sondern nur von ihrer Entfernung zur Sonne. Die Durchschnittstemperatur auf dem Mond beträgt also auch -18 °C, da er keine Atmosphäre hat und etwa so weit von der Sonne entfernt ist wie wir.

Wie wir wissen, ist die Erde wärmer als -18°C . Verantwortlich ist die Tatsache, dass sie von einer Atmosphäre umhüllt ist, die Gase enthält, die einen Teil der von der Erdoberfläche ausgehenden langwelligen (Mikrowellen-) Strahlung absorbieren und gleichzeitig die gesamte oder nahezu gesamte von der Sonne einfallende kurzwellige (sichtbare) Strahlung durchlassen. Es ist wirklich wie in einem Treibhaus, wo das Glas die Sonneneinstrahlung einlässt, die das Gewächshaus erwärmt, aber zugleich einen Großteil der langwelligen Strahlung davon abhält, es wieder zu verlassen. Die Wirkung dieser Gase wird daher als Treibhauseffekt bezeichnet.

Wenn wir uns die Gase ansehen, die diese Funktion erfüllen, sehen wir, dass nur bestimmte Gase wichtig sind. Abb. 5.1 zeigt die Abstrahlung der Erde, gemessen von einem Satelliten, der über dem Mittelmeer fliegt. Die gleichmäßige gestrichelte Kurve zeigt die theoretische Verteilung der Energie, die bei einer Temperatur von 7°C nach dem Wien'schen Gesetz emittiert wird, das ist die ungefähre Temperatur auf dem Niveau in der Atmosphäre, aus dem die Strahlung in den Weltraum abgegeben wird. Die durchgezogene Kurve ist jedoch das, was der Satellit tatsächlich gemessen hat. Zusammen zeigen die Kurven, dass die Atmosphäre unter dem Satelliten gewissermaßen Energie abgibt, als ob sie bei etwa 7°C wäre, aber mit riesigen Löchern in verschiedenen Teilen des Spektrums, in denen die abgestrahlte Energie viel geringer ist als nach dem Wien'schen Gesetz erwartet. Diese werden als Absorptionsbanden bezeichnet, und sie entstehen, weil Moleküle höhere Energieniveaus erreichen können, indem ein Elektron Energie gewinnt oder die gesamte Drehung oder Vibration des Moleküls in einen höheren Zustand übergeht. Nach der Quantentheorie können diese Veränderungen nur in diskreten Schritten erfolgen, bei denen das Molekül ein Quant der elektromagnetischen Energie

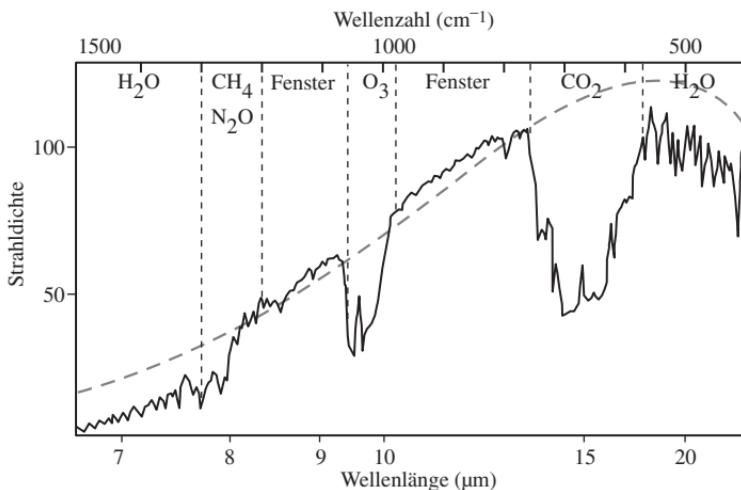


Abb. 5.1 Abstrahlung der Erde am oberen Rand der Atmosphäre, beobachtet von einem Satelliten über dem Mittelmeer. Im Bereich 8 bis 14 μm ist die Atmosphäre (in Abwesenheit von Wolken) weitgehend transparent, abgesehen von einer Ozon-Absorptionsbande bei 9,5 bis 10 μm , es handelt sich um einen „Fensterbereich“. In anderen Bereichen gibt es Absorptionsbanden durch CO_2 , Wasserdampf, Methan und Lachgas. Die gestrichelte Kurve zeigt die Schwarzkörperstrahlung bei 7 °C. Die Strahleneinheiten sind Watt pro Quadratmeter pro Steradian pro Wellenzahl. (Nach Houghton 1997)

mit einer bestimmten Frequenz absorbiert. Bei entsprechenden konstanten Frequenzen oder etwas breiteren Frequenzbändern (da der Effekt durch die Komplexität des Moleküls erweitert wird) absorbiert das Molekül also einen Teil der auf es einfallenden Energie und weniger Energie wird weitergeleitet. Wenn wir uns die von unseren Planeten nach außen abgegebene Energie ansehen, stellen wir fest, dass in diesen Frequenzbändern bestimmte Gase einen Teil dieser Energie absorbieren, sodass weniger hindurch und zum Weltraum gelangen kann. Dies ist die Grundlage für den natürlichen Treibhauseffekt.

Welche sind nun die wirksamen Gase? Es stellt sich heraus, dass Sauerstoff und Stickstoff, die beiden Gase, aus denen die Atmosphäre hauptsächlich besteht, keine Absorptionsbanden im Bereich der Frequenzen haben, die von der Erde abgegeben werden. Wirksam sind, wie Abb. 5.1 zeigt, Wasserdampf (H_2O), Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4), Lachgas (N_2O) und Ozon (O_3). Diese werden als Treibhausgase bezeichnet, und sie sind, obwohl sie nur geringfügige Bestandteile der Atmosphäre sind, von entscheidender Bedeutung für die Erwärmung des Klimas bis zu dem Punkt, an dem es auf der Erde flüssiges Wasser geben kann und somit Leben möglich ist.

Wie Abb. 5.1 zeigt, weist Wasserdampf bei niedrigen und hohen Frequenzen breite Absorptionsbande auf, während Methan, Lachgas und Ozon bei mittleren Frequenzen schmalere Bande aufweisen. Die Absorptionsbande von Kohlendioxid ist am tiefsten und tritt direkt an der Spitze des Spektrums auf, wo am meisten Energie versucht, von der Erde in den Weltraum zu gelangen. Allein anhand der Aussage dieser Abbildung können wir daher erwarten, dass Kohlendioxid das wichtigste Treibhausgas von allen sein wird, wie es tatsächlich der Fall ist.

Und wie hoch ist die Gesamtwirkung all dieser Treibhausgase? Wir sehen aus Abb. 5.1, dass ihre Wirkung darin besteht, die Menge der von der Erde in den Welt Raum emittierten langwelligen Strahlung zu reduzieren. Addiert man ihre Effekte über alle Wellenlängen hinweg, ist es dasselbe, als ob die Erde Strahlung mit einer Rate emittieren würde, die geringer ist als die Rate, die ein perfekter Emitter erreichen würde, ein schwarzer Körper. Der effektive Emissionsgrad der Erde, ϵ , ist also kleiner als 1 und wird umso kleiner, je mehr Treibhausgas vorhanden ist. Wenn wir uns unsere einzige Gleichung noch einmal ansehen, sehen wir, dass die linke Seite kleiner wird, weil die emittierte Strahlung geringer ist als die nach dem

Stefan-Boltzmann-Gesetz prognostizierte Menge. Aber die rechte Seite, der von der Sonne erhaltene Betrag, bleibt gleich. Die einzige Möglichkeit, wie diese beiden Seiten im Gleichgewicht bleiben können, ist, dass T steigt. Unsere Gleichung zeigt uns, dass T^4 proportional zu $1/\varepsilon$ ist. Entsprechend nimmt T zu, wenn ε abnimmt. Die Erde muss sich aufwärmen, um wieder die gleiche Menge an Strahlung ins All abstrahlen zu können. Dies ist der natürliche Treibhauseffekt und es genügt, T von $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ zu erhöhen, die Temperatur, die wir so gut kennen und mit der wir gut leben können, die Durchschnittstemperatur unseres gastfreundlichen Planeten (Houghton 2015).

5.2 Kohlendioxid, der Bösewicht unter den Molekülen

So weit, so gut. Der natürliche Treibhauseffekt hat das Leben möglich gemacht. Ohne diese Gase in der Atmosphäre hätten wir eine tote, gefrorene Welt. Aber was passiert, wenn wir die Zusammensetzung der Atmosphäre verändern? Was passiert insbesondere, wenn wir die Menge an Kohlendioxid in der Atmosphäre erhöhen und so die Absorption im Band um $15\text{ }\mu\text{m}$ Wellenlänge verstärken (Abb. 5.1)? Erstens reduzieren wir den Emissionsgrad der Erde noch mehr, sodass T noch weiter steigen muss, um das Gleichgewicht zu halten. Die Zugabe von Kohlendioxid in die Atmosphäre führt zu einem Temperaturanstieg. Es gibt keinen Ausweg aus dieser Schlussfolgerung. Das ist grundlegende Physik. Es zu leugnen, ist wie die Schwerkraft zu leugnen oder zu behaupten, dass die Erde eine Scheibe sei. Dennoch gibt es immer noch sogenannte Klimaskeptiker, die einen Zusammenhang zwischen Kohlendioxidkonzentration

und Temperatur verneinen. Formulieren wir es also mit mehr Nachdruck: Die Zugabe von Kohlendioxid in die Atmosphäre führt zwangsläufig zu einer Erwärmung. Und je mehr wir hinzufügen, desto größer ist der Temperaturanstieg. Dies folgt eindeutig aus der genannten einfachen Gleichung.

Der Mensch begann im 19. Jahrhundert, der Atmosphäre ernsthafte Mengen an Kohlendioxid zuzuführen, da die Bedürfnisse der Industriellen Revolution die Wasserkraft überstiegen und zur Entwicklung von Kohlebergwerken, Eisenbahnen und der Verbrennung von Kohle in Dampfmaschinen führten. Es war mit Kohlefeuer erzeugter Dampf, der die Industrielle Revolution antrieb, bis gegen Ende des 19. Jahrhunderts Erdöl und elektrische Energie antraten (die erste moderne Ölquelle wurde erst 1858 in Kanada gebohrt). Und selbst das neu entstehende Stromnetz wurde überwiegend von kohlegefeuerten Kraftwerken versorgt. Erdöl zu verbrennen, wurde erst mit dem Aufkommen des Verbrennungsmotors und der unerbittlichen Zunahme der Straßenfahrzeuge bedeutsam, seit dem ersten Auto von Carl Benz im Jahr 1886. Wie der Zufall es will, war das zwei Jahre nach der Formulierung des Stefan-Boltzmann-Gesetzes, das uns die Werkzeuge an die Hand gab, um zu erkennen, dass beim Verbrennen freigesetztes Kohlendioxid den Planeten erwärmt.

Wir hätten sehen können, was auf den Planeten zukommt, aber es gibt Ausreden für unsere Ignoranz. Rückblickend sehen wir, dass der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre ab Mitte des 19. Jahrhunderts von seinem nacheiszeitlichen Niveau von 280 auf mehr als 300 ppm (und inzwischen über 400 ppm, fast 50 % über dem vor-industriellen Niveau) nach oben schoss (Abb. 5.2). Wir wissen das nur, weil wir jetzt den Kohlendioxidgehalt von Luftblasen in Eiskernen analysieren können. Im 19. Jahrhundert gab es keine Überwachung des Kohlendioxids,

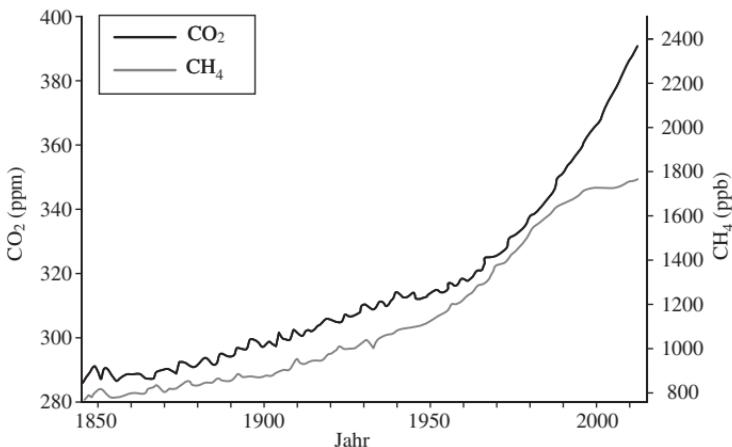


Abb. 5.2 Global gemittelte Kohlendioxid- und Methankonzentrationen in der Atmosphäre (Aus dem 5. Bericht des Weltklimarats, IPCC 2014a)

diese begann erst 1958, als die Scripps Institution of Oceanography eine Kohlendioxidmessstation auf dem Vulkan Mauna Loa auf Hawaii baute.

Warum haben wir den vom Menschen verursachten Treibhauseffekt übersehen, bis seine Auswirkungen Ende des 20. Jahrhunderts so deutlich wurden? Nun, anfangs gab es keine Theorie, um globale Temperaturen mit der Treibhauskonzentration zu verknüpfen. Erst 1884 und 1893 haben Stefan, Boltzmann und Wien die grundlegenden Strahlungsgesetze entdeckt, woraufhin der schwedische Wissenschaftler Svante Arrhenius (1859–1927) im Jahr 1896 die erste Theorie über den Treibhauseffekt und die globale Erwärmung vorlegen konnte (Arrhenius 1896). So verbrachten wir das 19. Jahrhundert damit, Kohle zu verbrennen, ohne die geringste Ahnung zu haben, dass dies klimatische Auswirkungen haben könnte.

Zweitens hatten wir keine guten Daten über die globalen Temperaturen. Das britische Wetteramt wurde 1854 von Admiral Fitz Roy gegründet (dem Kommandant der

HMS Beagle während der Reise von Charles Darwin), und bald darauf entstanden ähnliche Behörden in anderen Nationen. Ihr Hauptgeschäft war aber der Versuch, Wettervorhersagen zu erstellen, sodass es lange dauerte, bis selbst lokale Klimastatistiken erstellt wurden (in England haben dies Landpfarrer gemacht, die handschriftliche Berichte aus ihren Dörfern schickten). Eine der ältesten kontinuierlichen Aufzeichnungen hat seit 1767 die Radcliffe Meteorological Station in Oxford geführt, anhand derer unter anderem gezeigt werden konnte, dass der Januar 2014 der nasseste Januar in Oxford seit Beginn der Aufzeichnungen war. Natürlich benötigen wir sowohl für Niederschläge als auch für Temperaturen weltweite Daten, um Rückschlüsse auf Durchschnittswerte zu ziehen, und ein angemessenes Netzwerk hat sich nur langsam entwickelt.

Arrhenius hatte Vorgänger, aber sie konnten nur qualitative Gedanken über die Wirkung von Gasen auf das Klima entwickeln. Einer davon war Joseph Fourier (1768–1830) in Frankreich, wir erinnern uns heute an ihn als Entdecker der Fourier-Reihe, mit der sich jede Funktion in eine Reihe von Wellenfunktionen aufteilen lässt. Auch John Tyndall (1820–1893) in Großbritannien hatte relevante Ideen, und zu seinen Ehren hat das Vereinigte Königreich sein jüngstes Forschungsinstitut zum Klimawandel nach ihm benannt, das Tyndall Centre an der Universität von Ostanglien in Norwich.

Arrhenius kannte, im Gegensatz zu seinen Vorgängern, die Strahlungsgesetze und konnte mit ihnen arbeiten, und seine Vorhersagen waren überraschend genau. Er ignorierte die Auswirkungen von Wolken, weil er keine Ahnung hatte, wie er mit ihnen umgehen sollte. Aber er leitete unsere besagte Gleichung her und kam auf eine weitere zutreffende Analyse, die aus dieser Gleichung abgeleitet wurde. Über das Ausmaß der Erwärmung, die

durch die Zugabe verschiedener Mengen von CO_2 erzeugt wird, schrieb er:

„Steigt die Menge an Kohlensäure (CO_2) in geometrischer Progression, steigt die Temperaturerhöhung nur in einer arithmetischen Progression.“

Mit anderen Worten: Wenn wir den CO_2 -Gehalt in der Atmosphäre verdoppeln, erhöhen wir die Temperatur um einen bestimmten Betrag, um n Grad. Wenn wir ihn dann noch einmal verdoppeln (ein viel größerer Anstieg), erhöhen wir die Temperatur um den gleichen Betrag, weitere n Grad. Das ist ein kleiner Trost in einer Zeit, in der unsere CO_2 -Emissionen immer noch schnell steigen. Die Erwärmung durch die CO_2 -Verdoppelung wird als Klimasensitivität bezeichnet. Arrhenius schätzte diese auf 4 °C; die derzeitigen Schätzungen reichen von 2 °C bis 4,5 °C, wobei, wie wir gesehen haben, einige Schätzungen viel höher sind und bis zu 7,8 °C reichen, wenn wir zulassen, dass die Temperaturkurve mit der Treibhausgaskonzentration „aufholt“ (Wasdell 2014). Arrhenius dachte, dass die Ozeane fünf Sechstel des CO_2 -Anstiegs absorbieren (tatsächlich sind es etwa 40 %), und dass die Konzentration in der Atmosphäre so langsam ansteigen würde, dass sie sich in einem Zeitraum von 3000 Jahren verdoppeln würde. Wir wissen heute, dass sie sich bei unserer derzeitigen Wachstumsrate tatsächlich alle 75 bis 100 Jahre verdoppelt. Abgesehen von seiner groben Unterschätzung der CO_2 -Zunahme dachte Arrhenius, dass es sich positiv auswirken würde, indem es das Klima in hohen Breitengraden verbessert (er dachte nicht an die Eisschmelze) und den Anbau von mehr Getreide ermöglicht, um eine wachsende Industrievölkerung zu ernähren. Er dachte auch, dass die globale Erwärmung

die nächste Eiszeit abwenden würde, was, wie wir gesehen haben, heute noch eine viel diskutierte Frage ist.

So wurde schließlich CO_2 als Hauptakteur des Klimawandels identifiziert, und zwar ist es unser Bösewicht Nummer 1. Aber eine seiner bösartigen Eigenschaften wurde erst in jüngster Zeit richtig erkannt, nämlich seine Beständigkeit in der Atmosphäre. Es ist nicht so, dass das bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehende Gas in der Atmosphäre in einem reinen, inerten Zustand verbleibt. Tatsächlich ist es reaktiv und nimmt an einer komplexen Reihe von Reaktionen teil, die als Kohlenstoffzyklus bekannt sind. Es wird von grünen Pflanzen und ozeanischem Phytoplankton aufgenommen, die es in der Fotosynthese (mithilfe von Chlorophyll) in Biomasse verwandeln und lebenspendenden Sauerstoff abgeben. Dies ist die Reaktion, die tierisches Leben erst ermöglicht, also ist sie buchstäblich die wichtigste chemische Reaktion auf der Erde. Nach dem Einbau in die Struktur von Pflanzen und Bäumen kann der Kohlenstoff wieder freigesetzt werden, wenn der Baum oder die Pflanze stirbt und verrottet oder gefällt wird oder verbrennt. CO_2 wird von den Ozeanen aufgenommen, aber bei Änderungen von Temperaturen und Strömungen wieder abgegeben. Die einzige Möglichkeit, CO_2 tatsächlich aus der Umwelt zu entfernen, besteht darin, das daraus hergestellte Material dauerhaft im Erdinneren zu vergraben. Der klassische Fall ist der Meeresboden: Winzige Karbonatschalen einer verbreiteten Art von tierischem Plankton, den Foraminiferen, sinken nach dem Tod der Tiere kontinuierlich durch den Ozean und bilden eine Sedimentschicht. Dabei wird Kohlenstoff aus dem System entfernt.

Wir wissen immer noch nicht genau, wie lang die Verweildauer von Kohlendioxid im Klimasystem ist. Wenn wir eine Tonne CO_2 durch Verbrennung von Kohle oder Öl freisetzen, wie lange wird diese noch das Klima beeinflussen,

und wie wird ihr Einfluss mit der Zeit abnehmen? Die Standardschätzung liegt bei 100 Jahren, aber dies ist eine verdächtig vage Zahl, die auf einem unvollständigen Verständnis des Kohlenstoffkreislaufs beruht. Aktuell werden Schätzungen von Tausenden von Jahren gemacht, wobei alle möglichen Wege von der Freisetzung eines CO₂-Moleküls aus dem Auspuff eines Autos bis zur endgültigen Versenkung des darin enthaltenen Kohlenstoffatoms im tiefen Ozean beziehungsweise Gestein berücksichtigt werden. Aber selbst wenn wir die niedrigste Schätzung von 100 Jahren nehmen, ist es klar, dass wir durch die sorglose Verbrennung fossiler Brennstoffe Probleme für zukünftige Generationen, für unsere Kinder, Enkelkinder und Urenkel aufhäufen. Sie werden eine anhaltende Erwärmung durch das CO₂ erleben, das wir jetzt freisetzen, so wie wir immer noch eine Erwärmung durch Fabriken im Ersten Weltkrieg und durch Benzin schluckende Autos der 1950er-Jahre erleben.

5.3 Methan und Lachgas

Bis vor Kurzem galt Kohlendioxid als Hauptverantwortlicher für die globale Erwärmung, und wie wir gesehen haben, besteht ein sehr klarer Zusammenhang zwischen der Verbrennung fossiler Brennstoffe, der Zunahme von Kohlendioxid und der Erwärmung. Aber auch die anderen Treibhausgase tragen wesentlich dazu bei, zusammengekommen machen sie etwa 45 % der gesamten aktuellen Erwärmungsrate aus. Eines davon ist Methan (CH₄). Seine Konzentration in der Atmosphäre schnellte zeitgleich mit CO₂ in die Höhe (Abb. 5.2), relativ gesehen sogar noch schneller, da sein heutiger Wert von 1800 ppb mehr als doppelt so hoch ist wie der vorindustrielle Wert von 700 bis 800 ppb, während der CO₂-Gehalt nur 50 % höher ist. Methan ist komplex und seltsam, weil es viele natürliche

Quellen hat. Dazu gehören der Abbau von organischem Material in Feuchtgebieten (daher wird es auch Sumpfgas genannt) und chemische Reaktionen durch die Wirkung von Termiten sowie bei der Verdauung bei pflanzenfressenden Tieren, wie jeder Besucher einer Schweinezucht bestätigen kann. Eine wichtige Methanressource liegt unter den Ozeanen in Form von Methanhydraten (eine Hochdruckverbindung aus Methan und Wasser), und natürlich ist Methan der Hauptbestandteil von Erdgas. Aber auch andere Quellen sind auf das Handeln des Menschen zurückzuführen: Lecks an Erdgaspipelines, Emissionen im Zusammenhang mit Kohle- und Ölförderung einschließlich Fracking, der Anbau von Reis (wegen verrottender Vegetation in den Reisfeldern) und die Zunahme der Anzahl an Nutzieren (wegen eines Anstiegs des Fleischkonsums weltweit, vor allem aber in Schwellenländern wie China). Deponien und Müllentsorgungsanlagen sind ebenfalls Methanquellen. Doch trotz all dieser anthropogenen Quellen, die mit zunehmender Bevölkerungszahl wachsen, hat sich der Methangehalt in der Atmosphäre um das Jahr 2000 eingependelt und blieb bis etwa 2008 konstant, dann begann er wieder zu steigen. Wir vermuten, dass der neue Anstieg auf die Emissionen aus der Arktis zurückzuführen ist (mehr dazu später), aber wir verstehen die Abflachung nicht. Eine Möglichkeit besteht darin, dass die Russen sich mehr um ihre Gasleitungen kümmern, die bisher wegen großer Lecks berüchtigt waren, eine andere könnte sein, dass natürliche Feuchtgebiete entwässert und eingedeicht werden.

Trotz seiner viel geringeren Konzentration in der Atmosphäre im Vergleich zu CO_2 trägt Methan wesentlich zum gesamten Klimawandel bei, da es ein viel stärkeres Treibhausgas ist. Pro Molekül ist Methan 23-mal so stark wie CO_2 , wenn über einen Zeitraum von 100 Jahren gemessen wird.

Dies nennt man sein Treibhauspotenzial (*global warming potential*, GWP). Da Methan nach der Emission nur etwa sieben bis zehn Jahre in der Atmosphäre verbleibt und zu Kohlendioxid oxidiert oder durch andere chemische Prozesse abgebaut wird, ist sein Treibhauspotenzial, gemessen über einen kleineren Zeitraum (die ersten Jahre nach der Emission), weitaus größer als 23: Werte von 100 bis 200 wurden angegeben. Es ist klar, dass eine plötzliche Freisetzung einer großen Menge Methan enorme, wenn auch kurzzeitige Auswirkungen auf das Klima hätte. Wir kommen später darauf zurück bei der Frage, was passieren könnte, wenn der submarine Permafrost der Arktis auftaut.

Lachgas (N_2O) ist ein weniger wichtiges Treibhausgas mit einer sehr geringen Konzentration in der Atmosphäre von 300 ppb und einer langen Lebensdauer von 120 Jahren. Es entsteht hauptsächlich durch den Einsatz von Kunstdünger.

5.4 Ozon und FCKW

Wenn wir über den Einfluss von Gasen auf das Klima nachdenken, dürfen wir Ozon und Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) nicht vernachlässigen. Ozon ist die sehr reaktive Version von Sauerstoff, die drei statt zwei Atome in einem Molekül hat, die chemische Formel ist O_3 . Es ist ein Treibhausgas mit einer Absorptionsbande (Abb. 5.2), aber 1985 wurde es aus einem weiteren Grund berühmt, nämlich weil ein „Ozonloch“ über der Antarktis mit Instrumenten entdeckt wurde, die Joe Farman vom British Antarctic Survey dort montiert hatte (Farman et al. 1985). Neben der Absorption eines Teils der von der Erde ausgehenden langwelligen Strahlung absorbiert Ozon sehr gut die kürzesten Wellenlängen der einfallenden

Sonnenstrahlung. Dies ist die ultraviolette (UV-)Strahlung, die Sonnenbrand und Hautkrebs verursacht. Es stellte sich heraus, dass eine nur 10 %ige Zunahme der kurzweligen Strahlung eine Zunahme von 19 % beim Auftreten von Melanomen verursachen kann, der schwerwiegendsten und manchmal sogar tödlich verlaufenden Form von Hautkrebs (Norval et al. 2011). Obwohl Mario Molina und Sherwood Rowland (die sich für die Entdeckung einen Nobelpreis mit Paul Crutzen teilten) den Ozonabbau durch FCKW bereits vorhergesagt hatten (Molina und Rowland 1974; Rowland und Molina 1975), zeigten Farmans Messungen, dass der Ozonverlust in der Antarktis bis zu 70 % betrug, was zu einem sehr starken Anstieg der UV-Gefährdung für diejenigen führte, die unter diesem „Ozonloch“ wohnten (das sich über Australien, Neuseeland, Patagonien und Südafrika erstreckte). Der Bösewicht war dabei eine Gruppe von Chemikalien, die künstlich in die Umwelt eingebracht wurden. Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) werden zur Klimatisierung und als Aerosoltreibmittel eingesetzt und reagieren mit Ozonmolekülen in der Atmosphäre und zerstören diese. Sobald das Ozonloch entdeckt wurde, bewegte sich die Menschheit ausnahmsweise einmal schnell, und mit dem Montrealer Protokoll von 1987 begann der Ausstieg aus der Produktion von FCKW zugunsten eines weniger schädlichen (aber nicht harmlosen) Ersatzstoffs, der teilhalogenierten Fluorchlorkohlenwasserstoffe (HFCKW). Böse Zungen behaupten, dass dies nur passierte, weil der Ersatz leicht verfügbar war, aber zumindest befindet sich das Ozonloch, das sich bis auf die nördliche Hemisphäre ausgebreitet hatte, nun auf dem Rückzug. Trotz dieses Erfolgs gegen den Ozonabbau haben sich HFCKW selbst als starke Treibhausgase erwiesen (Abb. 5.3 zeigt ihren signifikanten Beitrag zur globalen Erwärmung).

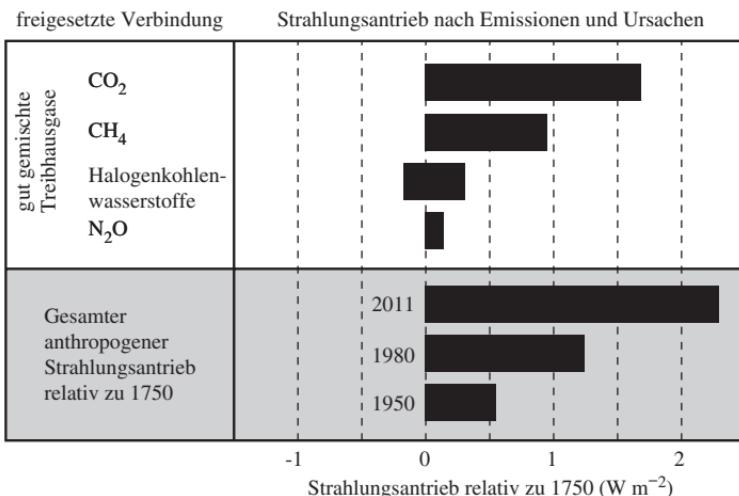


Abb. 5.3 Strahlungsantrieb durch verschiedene Atmosphärenbestandteile. (Aus dem 5. Bericht des Weltklimarats, IPCC 2014b)

5.5 Strahlungsantrieb

Um die klimatischen Auswirkungen all dieser Gase und anderer Faktoren zu vergleichen, haben Wissenschaftler das Konzept des Strahlungsantriebs entwickelt. In unserer einzigen Gleichung (Abschn. 5.1) haben wir die Strahlungsbilanz des Planeten Erde betrachtet – die direkte Einstrahlung der Sonne balanciert durch die aufgrund der Albedo der Erde und ihrer Oberflächentemperatur abgegebenen Strahlung. Treibhausgase reduzieren die ausgehende langwellige Strahlung, sodass wir ihre Stärke vergleichen können, indem wir beurteilen, wie sehr jedes von ihnen die ausgehende Strahlung reduziert. Alternativ könnte man sich vorstellen, dass das hinzugefügte Treibhausgas bei konstanter ausgehender Strahlung die Sonneneinstrahlung verstärkt – mit anderen Worten: Wenn man den Strahlungsantrieb mit der Solarkonstante vergleicht, sagt uns das, wie sehr wir das

natürliche thermische Gleichgewicht unseres Planeten stören. Wenn der Strahlungsantrieb positiv ist, bedeutet das, dass er zur Erwärmung unseres Klimas führt. Manche Aktivitäten des Menschen verursachen negative Strahlungsantriebe, zum Beispiel die Injektion von Aerosolen in die Atmosphäre, die einen Teil der einfallenden Sonnenstrahlung reflektieren.

Abb. 5.3 zeigt die beste Schätzung aus dem aktuellen (5.) Bericht des Weltklimarats (IPCC 2014b). Es zeigt einen gesamten anthropogenen Strahlungsantrieb von $2,3 \text{ W pro Quadratmeter (W m}^{-2}\text{)}$, was weltweit etwa 0,7 % zur durchschnittlichen Sonneneinstrahlung hinzuaddiert. Etwa 55 % des Strahlungsantriebs stammen von CO_2 und 45 % aus allen anderen Quellen, von denen Methan die wichtigste ist. Dieser Strahlungsantrieb hat sich seit 1980 fast verdoppelt (wiederum selbst eine Verdoppelung gegenüber 1960), was zeigt, wie zügellos und unkontrolliert unsere Emissionen immer noch sind, trotz Jahrzehntelanger Aufrufe von Politikern, Klimaaktivisten und einigen prominenten Wissenschaftlern.

5.6 Klimasensitivität

In Kap. 4 habe ich die außergewöhnliche Ähnlichkeit zwischen Temperatur- und CO_2 -Kurve über einen Zeitraum von 400.000 Jahren mit aufeinanderfolgenden Eiszeiten und Interglazialperioden beschrieben, wie es Daten aus Eiskernen zeigen. Dies deutet darauf hin, dass die Erde zumindest während dieser langen Zeitspanne zwei natürliche CO_2 -Konzentrationen hatte, etwa 180 und 280 ppm, je nachdem, ob sie sich in einer Kalt- oder Warmzeit befand. Sie hatte auch zwei Gleichgewichtstemperaturen, die für tiefste Eiszeiten beziehungsweise warme Interglazialzeiten charakteristisch sind, und diese unterscheiden sich um etwa

6 °C. Daraus können wir eine natürliche Klimasensitivität für die Erde definieren, indem wir den Temperaturanstieg und die Änderung der CO₂-Konzentration zwischen Eiszeiten und Interglazialen nutzen, um eine Temperaturänderung für eine Verdopplung von CO₂ zu berechnen. Dies entspricht dem sehr hohen Wert von 7,8 °C (Wasdell 2015). Es ist verlockend, diese Zahl auf unsere moderne Welt anzuwenden und sich zu fragen, warum der Weltklimarat 2 bis 4,5 °C als aktuelle Klimasensitivität angibt, obwohl sie auf dieser Grundlage viel höher sein sollte. Es muss gesagt werden, dass ein Grund, warum diese „Eiszeit-Klimasensitivität“ trotz ihrer Einfachheit kaum berücksichtigt wurde, einfach darin besteht, dass sie so hoch ist. Wäre sie für moderne Bedingungen geeignet, würde dies bedeuten, dass bisher nur ein kleiner Teil der potenziellen Erwärmung durch die aktuellen CO₂-Emissionen erfolgt ist, ein beängstigender Gedanke.

Ob wir nun eine niedrige oder hohe Zahl für die Sensitivität annehmen, wir können deutlich sehen, dass die Erde sich noch nicht ausreichend erwärmt hat, um ihrer eigenen Klimasensitivität zu entsprechen. Der Temperaturanstieg seit 1850 betrug weltweit etwa 0,9 °C, während die CO₂-Werte um fast 50 % gestiegen sind, was nach Angaben des Weltklimarats zu einer Erwärmung um 1 bis 2,25 °C und nach dem Eiszeit/Interglazial-Verhältnis um 3,9 °C führen würde. Warum diese Diskrepanz? Die Antwort ist das Konzept der bereits erfolgten Temperaturerhöhung. Die Erde hätte sich dem Strahlungsantrieb entsprechend viel mehr erwärmen müssen, als sie es getan hat, und wenn wir jetzt in der Lage wären, die Konzentration aller Treibhausgase konstant zu halten, würde die Temperatur weiter steigen, bis sie den Wert erreicht hat, der durch die Klimasensitivität vorgegeben ist. Aber im Moment hinkt sie hinterher – sie scheitert ständig, mit dem zunehmenden Strahlungsantrieb Schritt zu halten.

Was verlangsamt die Erwärmung? In erster Linie ist es eine Verlangsamung der globalen Lufttemperaturerhöhung durch die vom Ozean absorbierte Wärme. Die langwierigen thermohalinen Prozesse (Kap. 11) wälzen das Tiefenwasser der Ozeane langsam um, es wird allmählich wärmer, absorbiert aber einen Großteil der zusätzlich einfallenden Strahlung in seiner riesigen Masse. Und 72 % der Oberfläche unseres Planeten sind Meeresoberflächen. Die gute Nachricht ist also, dass die Erde sich nicht so schnell erwärmt, wie sie es sonst könnte. Die schlechte Nachricht ist, dass die Temperaturerhöhung irgendwann unerbittlich aufschließen wird – der Ozean fungiert als ein großes planetarisches Schwungrad, das dafür sorgen wird, dass die Erwärmung noch Jahrzehnte andauert, auch wenn wir sehr schnell durch übermenschliche Anstrengungen aufhören, Treibhausgase auszustoßen. Es macht einen Unterschied, welchen Wert die Klimasensitivität hat. Wenn sie 2 bis 4,5 °C beträgt, wie der Weltklimarat angibt, dann bleibt die Lufttemperatur nicht allzu weit hinter dem Strahlungsantrieb zurück. Aber wenn sie 7,8 °C beträgt, hat die Lufttemperatur kaum begonnen, auf den Antrieb zu reagieren, und es wird noch einiges auf uns zukommen, selbst wenn wir unsere Emissionen reduzieren.

5.7 Die jüngste Temperaturgeschichte der Erde

Es lohnt sich, genauer hinzuschauen, was mit unseren globalen Temperaturen passiert ist, seit sich die anthropogene Erwärmung um 1850 zu zeigen begann. Abb. 5.4 zeigt die letzten 160 Jahre der berühmten Kurve von Mann und Bradley. In diesem Zeitraum weist sie kleinere Fehlerbalken auf als für die vorherigen 1000 Jahre, weil

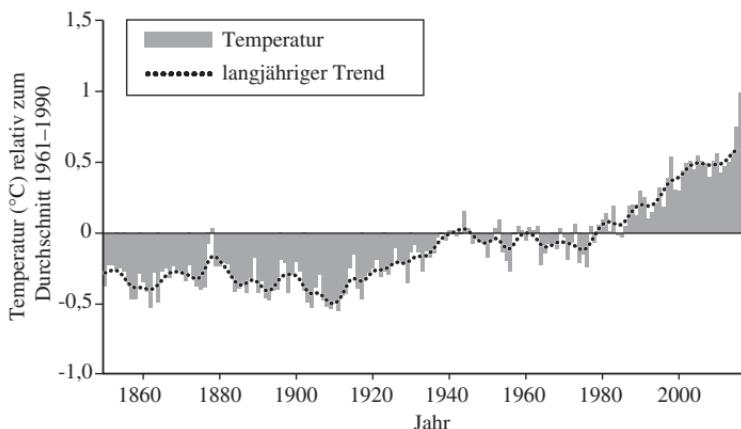


Abb. 5.4 Erderwärmung der letzten 160 Jahre. (Nach Mann et al. 1999)

wir zu diesem Zeitpunkt in die Ära des Thermometers eingetreten sind und der Aufbau eines globalen meteorologischen Netzwerks begonnen hat. Wir sehen ein interessantes Muster, das aus einem schnellen Temperaturanstieg ab der Mitte des 19. Jahrhunderts, dann einer Pause oder sogar einem leichten Rückzug in den Jahren 1920 bis 1960, dann einem erneuten Anstieg besteht. Modellstudien deuten darauf hin, dass dies durch einen schnellen Anstieg des Kohleverbrauchs in der Zeit der Pause erklärt werden kann, was große Mengen an Aerosolen in die Atmosphäre brachte und die globale Erwärmung vorübergehend bremste.

5.8 Arktische Verstärkung

Wenn wir uns die Kurve der letzten 160 Jahre nach Mann und Bradley noch einmal ansehen (Abb. 5.4) und sie mit einer Temperaturkurve nur von arktischen Wetterstationen vergleichen, sehen wir, dass sie die gleiche Form hat.

Abb. 5.5 zeigt die jährlichen oberflächennahen Durchschnittstemperaturen für 19 Wetterstationen zwischen 60 und 90° N, und wir sehen, dass der globale Trend, mit Erwärmung, gefolgt von einer Pause und leichtem Rückgang und dann einer weiteren Erwärmung, durch die arktischen Daten nachgezeichnet wird. Betrachtet man jedoch das Ausmaß, so stellt man fest, dass die globalen Temperaturen zwischen Beginn und Ende dieser Periode um 0,8 °C gestiegen sind, während die Temperaturen in der Arktis um 2,4 °C kletterten; Die Arktis hat sich auf ähnliche Weise wie der Rest der Welt erwärmt, aber in einem viel größeren Umfang. Dies wird als arktische

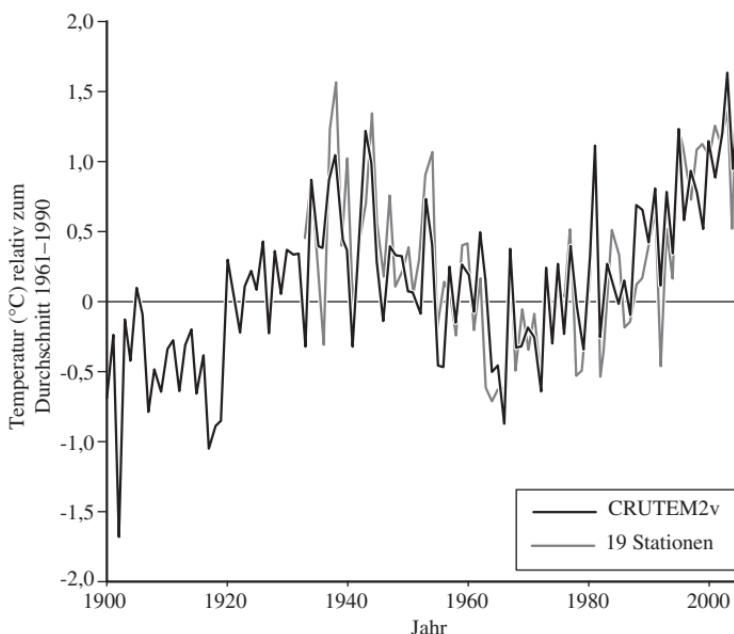


Abb. 5.5 Temperaturdaten der Arktis ab 1900, nur mit Messungen nördlich von 60° N. Durchschnittliche Werte von 19 arktischen Wetterstationen sind zusammen mit gerasterten regionalen Mittelwerten (CRUTEM2v) dargestellt. (Nach Richter-Menge et al. 2006)

Verstärkung bezeichnet und in diesem Fall beträgt der Verstärkungsfaktor etwa 3; andere Schätzungen reichen von 2 bis 4.

Die arktische Verstärkung ist sehr wichtig, weil sie der Hauptgrund dafür ist, warum von der globalen Erwärmung ausgelöste Veränderungen zuerst in der Arktis stattfinden und warum die Arktis ein Indikator für die Zukunft des Planeten ist. Zwei Fragen stellen sich sofort: Was verursacht die arktische Verstärkung? Und hat sie in den letzten Jahren zugenommen?

Veränderungen der Wolkendecke, eine Zunahme des atmosphärischen Wasserdampfs, ein stärkerer atmosphärischer Wärmetransport von niederen Breiten und abnehmendes Meereis wurden als Faktoren vorgeschlagen, die zur arktischen Verstärkung beitragen. Das Problem bei diesen Erklärungen ist, dass, wie Abb. 5.5 zeigt, die Verstärkung seit 1900 besteht, sodass sie nicht in erster Linie auf einen neuen Effekt zurückgeführt werden kann. Ein Artikel von James Screen und Ian Simmonds in Nature aus dem Jahr 2010 behauptet dennoch, dass das abnehmende Meereis der Treiber der arktischen Verstärkung ist (Screen und Simmonds 2010). Ihr Argument ist, dass, wenn von niederen Breiten transportierte atmosphärische Wärme der Hauptgrund für die Erwärmung wäre, eine stärkere Erwärmung in größeren Höhen über dem Meeresspiegel zu erwarten wäre. Wenn stattdessen der Rückgang von Schnee und Meereisbedeckung die Hauptursache sei, wäre eine maximale Erwärmung an der Oberfläche zu erwarten. Sie zeigten, dass die Erwärmung tatsächlich hauptsächlich im unteren Teil der Atmosphäre zu finden ist und stark mit dem Rückzug des Meereises korreliert. Das Problem ist, dass die Autoren nur den Zeitraum ab 1989 betrachteten, als das sommerliche Meereis bereits messbar zurückging. Das Beste, was wir aus ihrer Analyse schließen können, ist, dass der Rückzug des Meereises in den letzten Jahren

den arktischen Verstärkungsfaktor erhöht haben mag, aber diese Verstärkung bereits vorher stattfand.

Im nächsten Kapitel sehen wir, dass die Ausdehnung des Meereises in der Arktis aufgrund der arktischen Verstärkung rapide abnimmt, was uns mit ziemlicher Sicherheit sehr bald einen weitgehend eisfreien Ozean bescheren wird.

Literatur

- Arrhenius S (1896) On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Philos Mag J Sci* 41:237–276
- Farman JC, Gardiner BG, Shanklin JD (1985) Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. *Nature* 315:207–210
- Houghton J (1997) Global warming: the complete briefing. Cambridge University Press, Cambridge
- Houghton J (2015) Global warming: the complete briefing, 5. Aufl. Cambridge University Press, Cambridge
- IPCC (2014a) Summary for policymakers, fifth assessment synthesis report. Intergovernmental Panel on Climate Change, Genf
- IPCC (2014b) Summary for policymakers, fifth assessment WG1 report. Intergovernmental Panel on Climate Change, Genf
- Mann ME, Bradley RS, Hughes MK (1999) Northern hemisphere temperatures during the past millennium: inferences, uncertainties and limitations. *Geophys Res Lett* 26:759–762
- Molina MJ, Rowland FS (1974) Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature* 249:810–812
- Norval M, Lucas RM, Cullen AP, de Grulli FR, Longstreth J, Takizawa Y, van der Leun JC (2011) The human health effects of ozone depletion and interactions with climate change. *Photochem Photobiol Sci* 10:199–225

- Richter-Menge J et al (2006) State of the Arctic report, October 2006. NOAA OAR Special Report, NOAA, Seattle
- Rowland FS, Molina MJ (1975) Chlorofluoromethanes in the environment. *Rev Geophys Space Phys* 13:1–35
- Screen JA, Simmonds I (2010) The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *Nature* 464:1334–1337
- Wasdell D (2014) Sensitivity and the carbon budget: the ultimate challenge of climate science. www.apollo-gaia.org
- Wasdell D (2015) Facing the harsh realities of now. www.apollo-gaia.org



6

Das Meereis beginnt zu schmelzen

6.1 Meereis im 19. Jahrhundert

Neben den Ureinwohnern der Arktis waren Walfänger und Robbenfänger, die in der Grönlandsee arbeiteten, die ersten Reisenden, die die Ausmaße des arktischen Eises und ihre Unterschiede von Jahr zu Jahr im Auge behielten. Einer der bedeutendsten von ihnen und der einzige, der die Geschicklichkeit im Walfang mit wissenschaftlichem Interesse verband, war William Scoresby Jr. (1789–1857), der aus Whitby in Yorkshire stammte. Scoresby schrieb 1820 das allererste Buch über die Bedingungen im Arktischen Ozean und insbesondere die Variabilität des Meerereises (Scoresby 1820), ein Klassiker der Polarwissenschaft.

Natürlich hat das britischen Establishment Scoresby angesichts seiner Tätigkeit ignoriert, obwohl er Fellow der Royal Society wurde. Die Regierung nahm es jedoch 1818 interessiert zur Kenntnis, als Scoresby bekannt gab, dass

sich das Eis nördlich der Framstraße öffnete (die Meerenge zwischen Spitzbergen und Grönland). Und weiter:

„In diesen beiden Sommern der Jahre 1817 und 1818 war das Meer offener als bei jeder anderen Gelegenheit, an die sich die ältesten Fischer erinnerten. Eine Meeresfläche von etwa 2000 Quadratmeilen, die zwischen den Breitengraden von 74° und 80° N eingeschlossen wird und normalerweise mit Eis bedeckt ist, ist nahezu eisfrei.“

Dies könnte für ein Forschungsschiff die Möglichkeit bieten, den Nordpol zu erreichen, ausgehend von den relativ hohen Breitengraden (80–81° N), die östlich von Grönland in offenem Wasser erreicht werden könnten. Scoresby selbst hatte in der früheren Saison 1806 einen Rekordbreitengrad erreicht:

„Während ich auf der Resolution of Whitby als Erster Offizier diente, unter dem Kommando meines Vaters (dessen außerordentliche Ausdauer allen Personen im Grönlandshandel wohlbekannt ist), gelang es uns durch äußerste Anstrengungen und unter unmittelbaren Gefahren, bis zu 81° 30' nördliche Breite vorzudringen.“

Die Napoleonischen Kriege waren gewonnen, die Königliche Marine – die mit Abstand größte der Welt – war arbeitslos, und große Ehre könnte ihr zufallen, wenn sie den Pol erreicht oder eine Passage in den Orient entdeckt. Die Regierung verlor daher keine Zeit, eine Expedition zu starten. Sie gingen über den Arktisveteranen Scoresby hinweg und gaben das Kommando über die Expedition mit den Schiffen Dorothea und Trent an einen unerfahrenen Kapitän der Royal Navy, David Buchan. Sein Stellvertreter, ein junger Leutnant namens John Franklin, war für eine längere und letztlich verheerende arktische Karriere

bestimmt. Die Expedition in die Framstraße war ein trauriger Misserfolg, denn sie fanden heraus, dass die Eisdrift sie schneller nach Süden trug, als sie sich durch sie hindurch nach Norden arbeiten konnten. Dies war ein Faktor, den selbst Scoresby nicht erwartet hatte.

Die Forschungsinteressen der Marine verlagerten sich auf die kanadische Arktis und die Nordwestpassage, aber die Walfänger von Dundee zogen weiterhin jedes Jahr in das nördliche Grönlandmeer, und norwegische Robbenfänger arbeiteten an und um den Eisrand der sogenannten Odden-Eiszunge bei 75° N, einer östlichen Ausbuchtung der Eiskante vor Ostgrönland, wo im Frühjahr Sattelrobben mit ihren Welpen auftauchen (dieses wichtige kleine Gebiet, das für die Meereskonvektion unerlässlich ist, wird in Kap. 11 behandelt). 1872 wurde das Dänische Meteorologische Institut gegründet, und zum ersten Mal hatten Walfänger, Robbenfänger und Entdecker einen Ort, an den sie ihre Beobachtungen schicken konnten. Das Institut erstellte ein Jahrbuch, das für jeden Monat Karten der Eisgrenzen in der europäischen Arktis enthielt, die inzwischen digitalisiert und analysiert wurden (Kelly 1979). Sie zeigen keine langfristigen Trends, es gab jedoch außergewöhnliche Jahre, wie 1881, als eine riesige Eismasse aus dem Arktischen Ozean in den nördlichen Nordatlantik ausbrach und sich fast bis zur norwegischen Küste ausbreitete.

Die Daten waren natürlich sehr grob. Die Eisgrenze der gesamten Halbkugel wurde aus einzelnen Beobachtungen von Wal- und Robbenfängern sowie viel Erfahrung darüber abgeleitet, wo sie normalerweise verläuft. Dieser klimatologische Ansatz dauerte sogar bis in die Ära der Satelliten. Ich erinnere mich, dass mir in den 1980er-Jahren gezeigt wurde, wie die tägliche Eiskarte erstellt wurde, die das Dänische Meteorologische Institut an die Schifffahrt herausgab. Der einzige verfügbare Satellit nahm im sichtbaren Bereich auf, war also von wolkenfreien Bedingungen abhängig

(heute verwenden wir Mikrowellensatelliten, die durch Wolken und bei Dunkelheit sehen). Wolkenfreie Tage sind in der Grönlandsee selten, und wenn es einen bewölkten Tag gab, legte das Institut einfach die Karte des Vortages neu auf. Ihre Faustregel lautete, die Eisgrenze erst dann zu verschieben, wenn neue Beobachtungsdaten zeigten, dass sie verschoben werden muss. So konnte eine Woche oder mehr vergehen, währenddessen die Eisgrenze als stationär dargestellt wurde, obwohl sie tatsächlich einfach von Wolken verdeckt war.

Es war nicht verwunderlich, dass die Schwankungen der Meereisausdehnung aus diesen Daten nicht leicht zu erkennen waren und dass angenommen wurde, dass das Meereis einen stetigen jährlichen Zyklus durchläuft mit nur zufälligen Schwankungen von Jahr zu Jahr. Es war Teil der folgenschweren und ungerechtfertigten Annahme der Meereswissenschaftler, dass alles im Ozean konstant sei, sodass wir nur die unbekannten Teile des Ozeans genauer erforschen und die Daten zu großen Ozeanatlanten hinzufügen müssen, die uns am Ende ein vollständiges Bild geben werden. Als ich 1969 zum ersten Mal zur See fuhr, war dies noch immer der Fall, und die ozeanografischen Daten, die mein Schiff, die Hudson, in abgelegenen Teilen des Südlichen Ozeans gesammelt hat, wurden den ozeanografischen Atlanten hinzugefügt. Aber schon bald darauf begannen die Wissenschaftler zu vermuten, dass der Ozean einer enormen Variabilität unterliegt – dass er sowohl ein Wetter als auch ein Klima hat – und das Konzept dieser Atlanten wurde allmählich aufgegeben.

6.2 Wir treten in die Neuzeit ein

Nach dem Zweiten Weltkrieg hörte die Arktis auf, eine Bühne für dramatische heroische Entdecker zu sein, sie wurde zu einem Ort, an dem die Menschen routinemäßig

arbeiten mussten. Der Kalte Krieg brachte Flugplätze und Langstrecken-Radarstationen mit sich, und die Militärs begannen, sich Globen anstelle von Mercator-Karten anzusehen. Zu ihrem Entsetzen stellten sie fest, dass der kürzeste Weg für Flugzeuge und Raketen zwischen Russland und den USA über die Arktis verlief. Die Überwachung des Meereises mit militärischen und zivilen Flugzeugen begann. Anfang der 1950er-Jahre gab es noch keine Satelliten, aber die Beobachtungen der alten Robbenfänger wurden nun durch Luftbildaufnahmen ergänzt und die US Navy schickte regelmäßig ein Flugzeug entlang der eurasischen Eiskante („Project Birdseye“). Die kanadische Arktis wurde von Flugzeugen des zivilen Atmospheric Environment Service durchkreuzt, mit denen ich in den frühen 1970er-Jahren in ihren alten noch aus Kriegszeiten stammenden DC-4 zu Eisexperimenten geflogen bin. Damals waren sie in Gander in Neufundland stationiert, und das Flugzeug hatte eine Cockpitkugel eines alten Sabre-Jagdflugzeugs an der Oberseite des Rumpfes angeschweißt, damit der Eisbeobachter während des Flugs darin sitzen und seine Karte zeichnen konnte. Die einzige Unterhaltung in Gander war eine Spelunke namens „The Flyers‘ Club“, in der eine Oben-ohne-Band spielte, und hier saßen der Pilot der DC-4 und die Crew jede Nacht, bevor sie am frühen Morgen starteten. Dennoch wurde die Arbeit erledigt, und die Diagramme waren von enormem Wert.

Die luftgestützten Vermessungen gaben erste Hinweise darauf, dass möglicherweise das Meereis begann, sich zurückzuziehen (Abb. 6.1). Der Rückzug war nur im Sommer spürbar; in anderen Jahreszeiten füllte das Meereis das gesamte Arktische Becken bis an die Küsten, und es würde noch viele Jahre dauern, bis sich das Eis im Herbst, Winter oder Frühjahr messbar von der Küste lösen konnte.

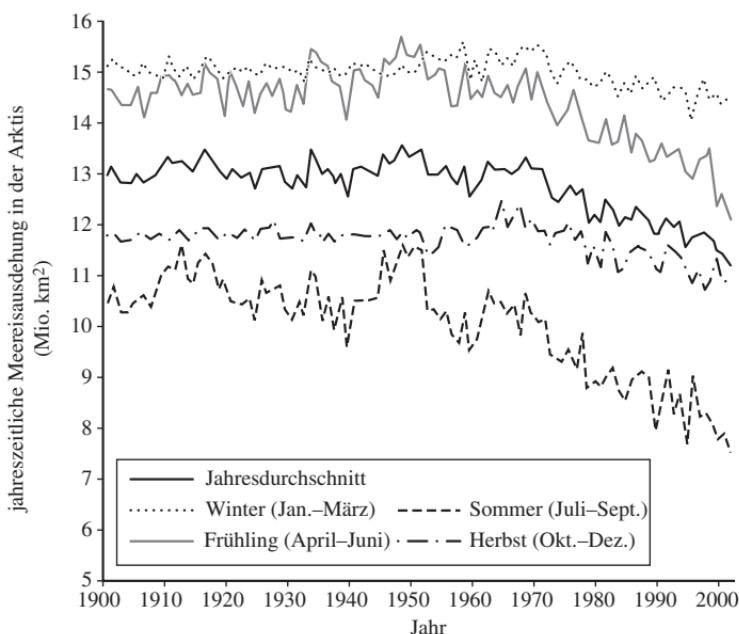


Abb. 6.1 Meereisausdehnung während der vier Jahreszeiten ab 1900. (Nach Arctic Climate Impact Assessment 2004)

Ende der 1980er-Jahre erkannte man den Rückzug des sommerlichen Meereises mithilfe der neuen Mikrowellen-satelliten (Parkinson et al. 1987) und schätzte diesen als etwa 3 % pro Jahrzehnt, was dem Eis noch eine lange Lebensdauer verleiht. An dieser Stelle konnte ich einen Beitrag leisten, indem ich auf die dritte Dimension aufmerksam machte – die Dicke. Das Meereis wird sowohl dünner als auch kleiner. Seit vielen Jahren hatte ich die Dicke des Meereises im Arktischen Ozean von britischen Atom-U-Booten aus gemessen, indem ich mit einem Sonar (einem Echolot) auf die Unterseite des Eises schaute und ein Profil des Tiefgangs (die in Wasser eingetauchte Tiefe des Eises) aufzeichnete, was 10 % weniger ist als die Eisdicke. Ich hatte 1976 an Bord der HMS Sovereign

und 1987 an Bord der HMS Superb auf Einladung der Royal Navy lange Reisen durch die ganze Arktis unternommen. In beiden Fällen organisierte ich luftgestützte Fernerkundungsmissionen mit kanadischen und US-amerikanischen Flugzeugen, um Daten über die Beschaffenheit der Eisoberfläche zu liefern, die mit den Daten unter dem Eis zusammenpassen (Wadhams 1981; Cosimo et al. 1991). Als ich die Daten von 1987 mit denen von 1976 verglich, die beide entlang eines ähnlichen Streckennetzes von der Framstraße bis zum Nordpol erstellt wurden, stellte ich fest, dass es signifikante Unterschiede gab. Im Durchschnitt über die gesamte vom U-Boot erfasste Region (Abb. 6.2) war das Eis 1987 etwa 15 % dünner als 1976. Ich habe 1990 in *Nature* einen Artikel über dieses Phänomen geschrieben (Wadhams 1990). Wir lieferten damit den ersten Beweis, dass der per Satellit erkannte Rückzug des Meereises von einer Ausdünnung des Meereises begleitet wurde. Der wissenschaftliche Fortschritt war hier völlig abhängig von U-Booten, da keine Satelliten-technik die Eisdecke durchdringen und die Dicke des Eises anzeigen konnte, nur die Ausdehnung war mit Satelliten messbar.

Diese Arbeit führte zu einem Jahrzehnt weiterer Anstrengungen, durch mich im Vereinigten Königreich und durch Kollegen in den USA, die die regelmäßigeren amerikanischen U-Boot-Missionen analysierten, die normalerweise einen anderen Teil der Arktis, die Region der Beaufortsee, abdeckten. Am Ende erhielten wir das erstaunliche Ergebnis, dass das Eis in den 1990er-Jahren im Vergleich zu den 1970er-Jahren um 43 % ausgedünnt war, über die gesamte Arktis und das ganze Jahr gemittelt. Die Artikel von Drew Rothrock (University of Washington) und seiner Gruppe im Jahr 2000 mit US-Daten (Rothrock et al. 1999) und von mir und Kollegen mit neuen Daten britischer Expeditionen

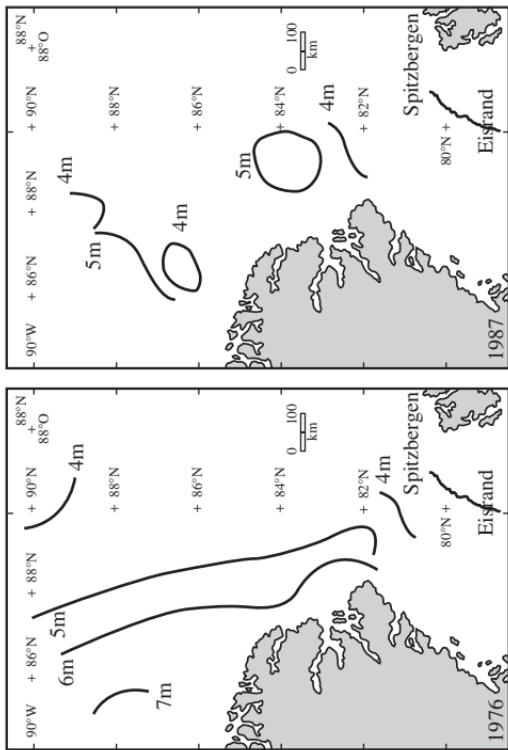


Abb. 6.2 Konturen der mittleren Eisdicke von Grönland bis zum Nordpol, 1976 und 1987

(Wadhams und Davis 2000) waren sich bei diesem Prozentsatz einig, obwohl sie verschiedene Teile der Arktis abdeckten – den europäischen Sektor durch meine Daten und den amerikanischen Sektor durch Rothrock.

Die Folgerungen aus dieser Entdeckung waren von großer Bedeutung, die Klimamodellierer erkannten sie damals aber im Allgemeinen nicht an. Da auch das sommerliche Meereis schrumpfte, bedeutete dies, dass die sommerliche Eisbedeckung zwischen den 1970er- und 1990er-Jahren etwa 60 % ihres Volumens verloren hatte, ein weitaus dramatischerer Verlust, als man ohne Berücksichtigung der Eisdicke angenommen hätte. Bei dieser Geschwindigkeit würde das sommerliche Meereis ziemlich früh im 21. Jahrhundert verschwinden. Die Welt musste gewarnt werden, und wir haben unser Bestes getan, um sie zu warnen. Aber nicht nur die Politiker und Industriellen wollten nichts davon hören, auch die wissenschaftlichen Modellierer nicht. Sie erstellten weiterhin unrealistische Modellierungen, die voraussagten, dass das Meereis bis zum Ende des 21. Jahrhunderts weitgehend unvermindert bleiben würde. Das britische Wetteramt hält noch immer an diesen nicht haltbaren Vorhersagen fest. Die Natur wird bald beweisen, dass sie sich irren.

6.3 Der Eiskollaps der letzten zehn Jahre

Die Meereisdecke in der Arktis durchläuft einen jährlichen Zyklus (Abb. 6.3), bei dem das größte Ausmaß im Februar und das kleinste Ausmaß Mitte September erreicht wird. Sie hinkt dem Zyklus der Sonneneinstrahlung zwei bis drei Monate hinterher, weil es Zeit braucht, bis die Sonneneinstrahlung ihre Arbeit beim Schmelzen von Eis

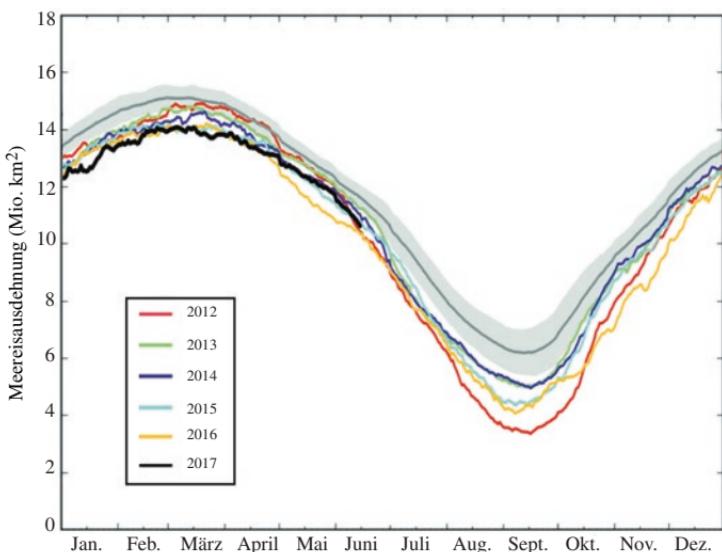


Abb. 6.3 Der saisonale Zyklus der Meereisausdehnung in der Arktis. Das graue Band mit seiner Mittellinie stellt den Variationsbereich der Eisausdehnung in der Zeit 1981–2010 dar (OSI SAF © 2017 EUMETSAT)

und beim Erwärmen von Meer und Land verrichtet. Im letzten Jahrzehnt hat sich die Aufmerksamkeit auf das September-Minimum konzentriert, da dieses 2005 im Vergleich zu früheren Jahren einen großen Rückgang erfuhr: Zum ersten Mal wurde die sommerliche Eisbedeckung vollständig von den Landmassen Sibiriens und Alaskas abgelöst, auch wenn sie immer noch fest an den Küsten Grönlands und des kanadischen Archipels hing (Abb. 6.4). Der Nördliche Seeweg (Russlands Name für die Nordostpassage) war völlig eisfrei, während die kanadische Nordwestpassage noch weitgehend blockiert war. Die Gesamteisfläche betrug im September 2005 nur 5,3 Mio. km^2 , verglichen mit 8 Mio. km^2 in den 1970er- und 1980er-Jahren, als der „saisonale Mittelwert“ festgelegt

wurde (in rosa auf Abb. 6.4 dargestellt). Ich hatte 2004 eine weitere U-Boot-Reise durchgeführt und sah eine anhaltende Ausdünnung, sodass ich erkannte, dass der beschleunigte Eisrückzug einfach die Reaktion der Eisdecke auf die Ausdünnung durch zusätzliche Erwärmung war und dass dies der Beginn eines Kollapses war.

Im Jahr 2007 kam es – nach einer teilweisen Erholung im Jahr 2006 – zu einem noch größeren Sprung nach unten, was die Fläche angeht (Abb. 6.4). Diesmal wurde ein riesiger „Biss“ aus dem Eis nördlich von Alaska und Ostsibirien genommen, was einen blauen Ozean von beträchtlicher Größe schuf, wo bisher immer Eis war. Die Eisfläche schrumpfte auf 4,1 Mio. km^2 . Seltsamerweise verteilt sich das Eis nun so, dass diesmal die Nordwestpassage völlig frei war, während der Nördliche Seeweg an der Wilkizkistraße nördlich von Sibirien blockiert war.

Die einfachste Erklärung dafür sind eine weitere Ausdünnung und ein fortgesetzter Kollaps aufgrund der Eisschmelze. Aber ein dynamischer Faktor kam zusätzlich ins Spiel. Im Frühsommer waren die Winde über Alaska von Süden und Westen gekommen und bliesen das noch verbliebene Eis über die Beaufortsee und die Framstraße. Dies zeigten die Spuren der driftenden Bojen des International Arctic Buoy Programme (IABP). Dieses Forschungsprogramm ist eine echte internationale Zusammenarbeit, bei der jedes Jahr eine Reihe von driftenden Bojen über der Arktis abgeworfen werden, die ihre Positionen an Satelliten übertragen. Im Jahr 2007 bewegte sich das Eis schnell nach Osten, wobei einige der Bojen vom Eisrückzug überholt wurden, sodass sie ins Meer fielen, und das verbliebene Eis drängte sich in die Framstraße. Der Ausgang aus dem Arktischen Ozean war wie die Drängelei an den Kinotüren, wenn jemand „Feuer“ ruft!

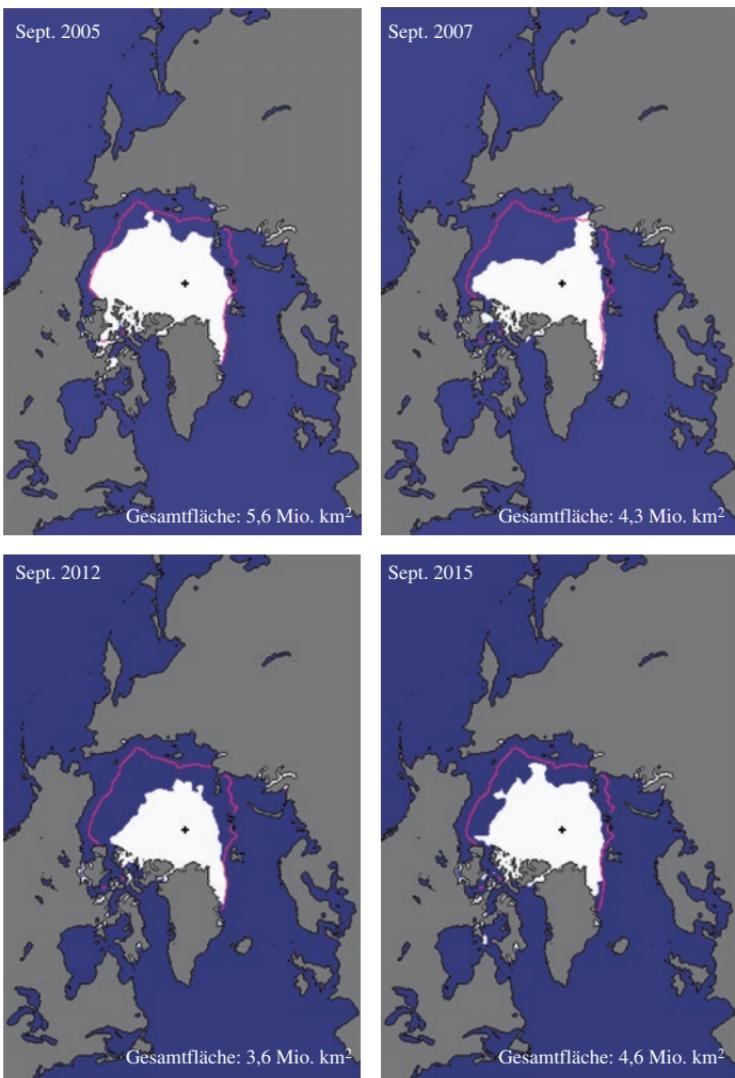


Abb. 6.4 Meereisausdehnung im September 2005, 2007, 2012 und 2015. Die rosa Linie ist die langfristige mittlere Eisausdehnung der Vergangenheit im September (NSDIC)

Dieses neue Bewegungsmuster wurde im Laufe der 2000er-Jahre häufiger. Anstatt wie ein großer Kreisel zu rotieren, wie in Kap. 2 beschrieben, bewirkt das neue vorherrschende Windmuster regelmäßig, dass Eis durch die Framstraße austritt, ohne im Ozean eine Kreisbewegung zu durchlaufen. Das ältere, mehrjährige Eis hat an dieser neuen Gesamtbewegung teilgenommen und ist durch die Framstraße aus der Arktis herausgetrieben, anstatt im ehemaligen Beaufort-Wirbel zu zirkulieren. So war jedes Jahr der Anteil des mehrjährigen Eises in der Arktis geringer als im Vorjahr, und so ging es weiter, bis es fast kein Eis mehr gab. Neues Eis hat sich gebildet, ist zur Framstraße getrieben und hat den Arktischen Ozean wieder verlassen, sodass wenig übrig bleibt, um mehrjähriges Eis zu bilden. Dieser dramatische Rückgang des mehrjährigen Eises in den 2000er-Jahren wurde mithilfe eines Mikrowellensatelliten mitverfolgt, der zwischen ein- und mehrjährigem Eis unterscheidet (Polyakov et al. 2012). Die Dominanz des jungen Eises in der Arktis ist selbst ein Faktor, der die durchschnittliche Eisdicke verringert, wobei die klimabedingt reduzierte Wachstumsrate von größerer Bedeutung ist.

6.4 Ein persönliches Zwischenspiel, 2007

Meine Erlebnisse in der Arktis im entscheidenden Jahr 2007 waren ziemlich extrem. Im März unternahm ich eine neue transarktische Reise im U-Boot HMS Tireless, um die Eisdicke zu messen, aber diesmal mit einem Mehrstrahlsonar, das eine wunderbare dreidimensionale Sicht auf die Eisunterseite bietet (Abb. 6.5). Es war das erste Mal, dass dies in großem Stil unter Eis eingesetzt wurde.

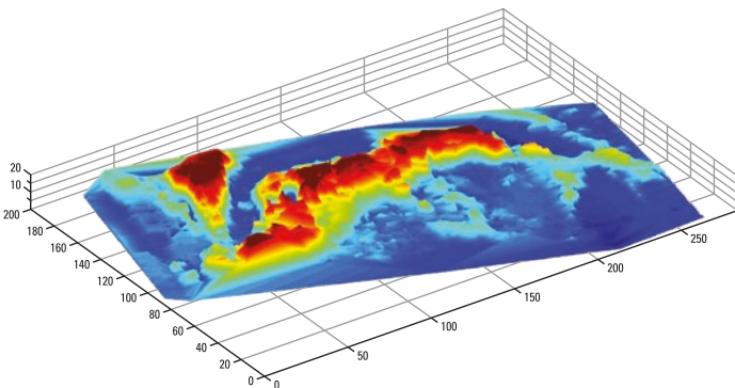


Abb. 6.5 Ein mehrjähriger Presseisrücken, der mit dem Mehrstrahlsonar an Bord der HMS Tireless im März 2007 kartiert wurde. Die Abstände und Höhen sind in Metern angegeben

Wir durchquerten die gesamte Arktis: Wir liefen in Faslane in Schottland aus, durchfuhren die Framstraße und umschifften den Norden Grönlands zur Beaufortsee. Dort stellten wir fest, dass fast das gesamte Eis über uns einjähriges Eis war. Wir verbrachten einige Tage damit, ein Gebiet mit einer von der Universität von Washington eingerichteten Forschungsstation namens Applied Physics Laboratory Ice Station (APLIS) zu durchkreuzen, wo eine Gruppe von Wissenschaftlern damit beschäftigt war, die Oberseite des Eises zu erkunden: mit Bohrungen, mit elektromagnetischen Methoden zum Durchleuchten des Eises und mit Messungen von Flugzeugen, die mit Lasern ausgestattet waren, um die Eisoberfläche zu vermessen. Sehr wichtige Daten wurden bei der Zusammenarbeit zwischen U-Boot und Station gesammelt, als es am 20. März plötzlich zu einer Katastrophe kam. Ich hielt am frühen Abend mit meinem Sonar Ausschau, als es einen enormen Knall gab, unglaublich laut, begleitet von einer Schockwelle und einer Menge braunen Rauchs, der unten auf dem Deck mit enormer Geschwindigkeit den Korridor

entlangrollte und dann die Treppe hinauf in den Kontrollraum wogte, begleitet vom Kapitän, der die Treppe hinaufstürmte und Befehle rief: „Notfallstationen! Masken aufsetzen!“

Jeder war vor Angst erstarrt. Dann eilten alle zu den nächsten Masken. Ich war nach achtern gegangen, um aus dem Weg zu gehen, und wurde in den Funkraum gerufen, wo mir der Funker eine Maske gab und sie an die Sauerstoffleitung anschloss. Er war wirklich besorgt: „Das ist ernst. So etwas habe ich noch nie erlebt!“

Niemand wusste, was passiert war. Eine Kollision? Ein nuklearer Unfall? Ich erwartete, dass ich innerhalb weniger Sekunden sterben würde – Explosionen in U-Booten bedeuten normalerweise das Ende des Bootes – und wir alle setzten Sauerstoffmasken auf und warteten auf unseren letzten Moment. Und doch fühlte ich mich absolut ruhig. Ich war derart jenseits des Schreckens, dass ich überhaupt nicht in Panik geriet. Ich setzte einfach meine Maske auf, setzte mich in das Abteil und wartete auf den Tod. Ich glaube nicht einmal, dass meine Herzfrequenz gestiegen ist. Niemals sonst war ich in der Arktis dem Tod so nahe, und seltsamerweise hat es mich nicht gestört. Aber die Lichter blieben an und das Boot bewegte sich weiter.

Jede Abteilung erstattete Bericht, bis festgestellt wurde, dass die Explosion im vorderen Fluchtraum stattgefunden hatte und dass ein *self-contained oxygen generator* (SCOG) explodiert war, der auf U-Booten als „Kerze“ bekannt ist. Ein U-Boot versorgt sich durch Elektrolyse von Wasser mit Sauerstoff, damit die Besatzung atmen kann, aber wenn die Elektrolyseure eines Bootes ausfallen, zum Beispiel weil sie einfrieren, muss es seinen Sauerstoff auf andere Weise erneuern, und zwar indem ein Kanister Kaliumchlorat in eine Vorrichtung gefüllt wird, in der eine katalytische Reaktion stattfindet, die Sauerstoff freisetzt. Einer dieser Kanister war explodiert, als er in die SCOG

geladen wurde, und die Folgen waren verheerend. Das Boot war mit giftigen Gasen (Kohlenmonoxid in hoher Konzentration sowie Kohlendioxid) und Rauch gefüllt.

Mit dem Schrei „Feuer! Feuer!“ wurde es dann noch schlimmer. Dies ist die größte Angst aller U-Boot-Fahrer: Feuer auf See – oder noch schlimmer, Feuer unter dem Eis, ohne Möglichkeit aufzutauchen. Das Feuer wurde gelöscht, teils, indem die betroffene Abteilung unter Wasser gesetzt wurde, teils durch Brandbekämpfung durch die Besatzung. Zweimal flackerte das Feuer wieder auf, begleitet von weiteren „Feuer!“-Rufen, bevor es schließlich gelöscht wurde.

Die unmittelbare Notwendigkeit war nun, aufzutauchen. Zu unserem enormen Glück waren wir in der Nähe einer Polynja. Wir hatten jede Polynja kartiert, die wir passierten hatten, und die letzte war nicht weit. Wir drehten um, fuhren direkt hinein, hielten an, überprüften jedes der aufwärtsgerichteten Sonargeräte (Bug, Finne und Heck) auf Eis und kamen, sobald der Weg frei war, direkt nach oben. Dank der Geschicklichkeit des Kapitäns waren wir fast vollständig in der Polynja. Nach weiteren Manövern und dann angespanntem Warten, während wir zur Oberfläche aufstiegen, kamen die beruhigenden Worte über den Lautsprecher: „Wir sind in einer Polynja aufgetaucht. Bereithalten zum Öffnen.“ Die Luke wurde geöffnet und die Ventilatoren bliesen frische Luft durch das Boot, um den giftigen Qualm zu entfernen.

In der Zwischenzeit wurde von einem oder mehreren Verletzten gesprochen, die zur Behandlung durch den Stabsarzt in die Messe der niedrigen Dienstgrade (die in eine Krankenstation umgewandelt werden kann) gebracht wurden. Am Anfang klang es gar nicht so schlecht. Aber dann ging das schreckliche Gerücht im Boot herum und erreichte auch uns: „Da sind zwei Tote!“

Ein junger Matrose stürmte in den Funkraum, er weinte und erzählte die Geschichte schluchzend dem Funker.

Er hatte die Leichen gesehen. Erst später erfuhr ich die volle, schreckliche Wahrheit. Es gab tatsächlich zwei Tote, zwei Matrosen, einer war achtzehn, der andere zweiunddreißig Jahre alt. Der ältere Matrose hatte erst am Vortag seine Verlobung gefeiert. Die beiden waren geschickt worden, eine „Kerze“ in Gang zu setzen. Sie explodierte dabei, und das Metallgehäuse des SCOG-Geräts wirkte wie Granatsplitter und tötete sie. Teile der Vorrichtung waren in die Decke der Abteilung eingedrungen und die Platten des Decks durch die Explosion verbogen. Die Matrosen hatten keine Chance. Und ihre Körper blockierten die Luke, sodass es für die Brandbekämpfer schwer war, hineinzukommen. Ein drittes Opfer hatte noch Glück gehabt – er hatte bei der Explosion viel Rauch eingeatmet, ihm ging es aber halbwegs gut.

Wir hatten bereits einen Notruf an APLIS gesendet, und kurz darauf tauchte in der Dunkelheit eine Gruppe von Amerikanern auf, die mit dem Schneemobil von der Station kamen und weitere medizinische Ausrüstung mitbrachten. Der Verletzte wurde evakuiert und in mondloser Dunkelheit mit einem Hubschrauber direkt nach Prudhoe Bay geflogen, wo eine C-130 wartete, die ihn zur Behandlung in die Luftwaffenbasis Elmendorf im Süden Alaskas brachte. Die beiden Leichen wurden hinaus und in die Station gebracht.

Die ganze sichere, ritualisierte Welt, an die ich mich auf sechs U-Boot-Reisen gewöhnt hatte, war aufgelöst und ließ Schrecken und Horror an ihrer Stelle zurück. Jede irrationale Angst, die ich auf vergangenen Reisen gehabt hatte, war nun Wirklichkeit geworden, und doch fand ich mich jetzt, da das Schlimmste passiert war, trotzdem furchtlos und völlig ruhig. Mein Kollege Nick Hughes, der auch dabei war, fühlte dasselbe. Wir übernachteten an Bord und wurden am Morgen abgeholt. Viele Male hatten mir die Offiziere der U-Boote scherhaft gesagt, wie sicher ich

gerade sei – ich sei in einer noch gesünderen Umgebung als an der Oberfläche, weil der Reaktor des U-Boots gut abgeschirmt sei, während unsere Tiefe unter Wasser bedeutete, dass wir niedrigeren Dosen kosmischer Strahlung ausgesetzt sind als die vermeintlich Unglücklichen, die auf der Erdoberfläche leben. Das Leben in einem U-Boot erscheint irreführend sicher – man arbeitet in Hemdsärmeln, isst ausgezeichnetes Essen und sitzt auf mit Chintz überzogenen Stühlen in einer komfortablen Messe. Doch meine fünfzig arktischen Exkursionen mit sehr unbequemen Zelten, Hütten, Schiffen, Flugzeugen, Hubschraubern, Hundeschlitten und Schneemobilen brachten mich dem Tod nie so nahe wie dieser eine Vorfall in einem U-Boot.

Das Ende der Geschichte ist nicht sehr erhebend. Es gab das Reglement, dass SCOG-Kanister auf Risse untersucht werden müssen, da an Bord der russischen Raumstation Mir genau ein solcher Brand in einer SCOG begonnen hatte, verursacht durch Öl, das durch einen Riss in den Kanister gelaufen ist und ein explosives Gemisch erzeugte. Die Schiffsbesatzung hatte pflichtgemäß mehrere defekte Kanister zurückgeschickt, doch um Geld zu sparen hatte die Marinebasis sie wieder auf das U-Boot gebracht und die Besatzung angewiesen, sie zu benutzen. Danach gab es einen Untersuchungsausschuss, der am 12. Juni 2008 die Ergebnisse vortrug. Seither hat es keine weitere britische U-Boot-Expedition in die Arktis mehr gegeben.

Trotz dieser Umstände bin ich erstaunlicherweise für eine Woche nach Großbritannien zurückgeflogen und dann in die APLIS-Station zurückgekehrt, um ein weiteres Experiment am Ort dieser Katastrophe durchzuführen, wobei ich mit einem autonomen Unterwasserfahrzeug (AUV) eine kleine Anzahl von Presseisrücken sehr detailliert kartieren konnte. Einer davon (Abb. 6.6) war ein junger Presseisrücken, der sich erst sieben Tage zuvor gebildet hatte, sodass ich die Form eines gerade neu gebildeten Rückens sehen konnte, bei dem

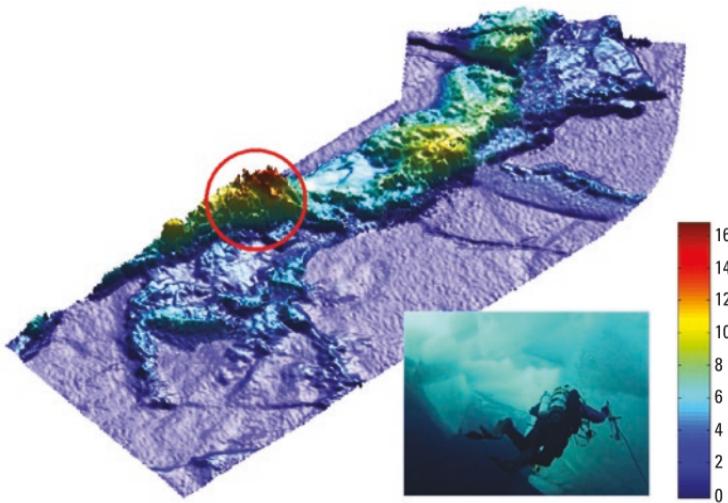


Abb. 6.6 Der Presseisrücken aus Abb. 2.6 in der Beaufortsee, kartiert mit einem Mehrstrahlsonar von einem kleinen autonomen Unterwasserfahrzeug. Die Farbskala ist in Metern. Der rot umkreiste Bereich wurde vom Taucher besucht (siehe kleines Bild)

die Eisblöcke einfach locker wie auf einer längs gestreckten Halde gestapelt sind, mit geringer oder nahezu keiner Festigkeit. Diese Art von Rücken ist heute in der Arktis weit verbreitet, und die alten massiven mehrjährigen Rücken, die ein großes Hindernis für Eisbrecher waren, sind inzwischen fast verschwunden. Die AUV-Studie war eine gute Therapie: Körperlich hatte ich danach noch viele Monate lang einen schweren Husten, aber mental schien es mir gut zu gehen.

6.5 Der nächste Schritt abwärts für das Eis, 2012

Obwohl der Trend der arktischen Meereisausdehnung unerbittlich rückläufig ist und sich beschleunigt, ist er nicht einheitlich. Zufällige Wetterfaktoren können eingreifen und

den Rückzug des Sommermeereises entweder beschleunigen oder verzögern. Wenn ein zufälliger Faktor in einem bestimmten Jahr eine teilweise Erholung erlaubt, bejubeln die sogenannten Klimaskeptiker dies immer als Zeichen dafür, dass das arktische Meereis überhaupt nicht zurückgeht. Der anschließende verstärkte Rückzug im folgenden Jahr wird ignoriert.

Die Karten der jeweiligen Eisausdehnung im September (Abb. 6.4) zeigen diese großen Schwankungen, aber auch den deutlichen Trend (Abb. 6.3). Nach dem dramatischen Jahr 2007 lag die Eisausdehnung leicht über dem Minimum von 2007, bis im Sommer 2012 mit nur 3,4 Mio. km^2 ein neuer Rekordtiefstand erreicht wurde. Diesmal war der Verlust über alle Längengrade verteilt, ein wirklich zirkumpolarer Eisrückzug und nicht ein „Einbiss“ durch eine dominante Windrichtung. In diesem Fall wurde das Erreichen des Rekordtiefstands durch einen Sturm unterstützt, der später „Großer Arktischer Wirbelsturm“ (Morello 2013) genannt wurde und der am 6. August die Arktis traf. Es war der stärkste Sommersturm seit Beginn der Satellitenüberwachung des Klimas im Jahr 1979. Das Meereis näherte sich bereits seinem sommerlichen Minimum, als laut einer auf Satellitendaten beruhenden Studie von Claire Parkinson und Joey Comiso vom NASA Goddard Space Flight Center (Parkinson und Comiso 2013) der Sturm 400.000 km^2 von der Eisschicht ablöste und bei Wind und Wellen zerbrach, und das Eis schließlich schmolz. Nach der Modellierung einer anderen Studie von Jinlun Zhang und Mitarbeitern von der Universität von Washington (Zhang et al. 2013) gingen bescheidenere 150.000 km^2 als direkte Sturmfolge verloren, aber beide Studien waren sich einig, dass der Sturm zu einem kritischen Zeitpunkt messbare Auswirkungen hatte.

6.6 Die letzten Jahre des sommerlichen Eises

Im Jahr 2013 gab es im Sommer weniger Sturmaktivität und die Windrichtungen der Stürme führten oft kalte Luft in die Arktis, wo frischer Schnee auf das Eis fiel, was die Schmelze verlangsamt und die Albedo erhöhte. Auch das Jahr 2014 war ein Jahr, in dem das Eis um frühere Werte schwankte und sich sogar leicht erholte. Sein verwundbarer Zustand war jedoch sehr deutlich. Ich war im August an Bord des Eisbrechers Healy der US-Küstenwache in der Eisrandregion der südlichen Beaufortsee unterwegs und stellte fest, dass die Eisdecke extrem zerfallen und kurz davor war, völlig zu schmelzen (Abb. 6.7). Der unerbittliche Abwärtstrend zeigt, dass diese Teil-erholungen – oder besser gesagt, diese Schwankungen auf



Abb. 6.7 Typisches zerfallenes Eis in der südlichen Beaufortsee im August 2014, beobachtet während einer Expedition an Bord der USCGS Healy

dem Weg nach unten – für den Eisrückgang charakteristisch sind, und wir erwarteten für 2015 einen weiteren Abwärtstrend, zumal 2015 ein Jahr war, in dem es einen „El Niño“ gab, eine Veränderung der Windmuster und Strömungen im Pazifik, die den Nettoeffekt hat, im Ozean gespeicherte Wärme freizusetzen und die Atmosphäre schneller zu erwärmen.

Tatsächlich gab es im September 2015 die viertkleinste Eisfläche (Abb. 6.3 und 6.4), und der El Niño setzte sich mit größerer Intensität fort, sodass der Sommer 2016 ein möglicher Kandidat für einen neuen Rekord schien. Nachdem die Eisfläche für die meiste Zeit des Jahres 2016 niedriger als in jedem anderen Jahr war, konnte sie keinen neuen Rekord aufstellen, aber nach dem Minimum im September war die herbstliche Erholung sehr langsam. Modellierer behaupten immer noch, dass ein eisfreier Sommer erst in den Jahren 2050 bis 2080 stattfinden wird, aber die Beobachtungsdaten zeigen etwas anderes. Ein Modellierer, der ein schnelles Verschwinden des sommerlichen Eises voraussagt, ist Wieslaw Maslowski von der Naval Postgraduate School in Monterey (Maslowski et al. 2012). Er kommt mit zwei Vorzügen daher: Sein Modell kann sehr kleine Prozesse darstellen (es hat einen Rastermaßstab von 2,4 km), und er hat Zugriff auf einen der leistungsfähigsten Computer der Welt, den die US Navy in Monterey betreibt. Er legt auch Wert auf Prozesse, die in anderen Modellen ignoriert oder grob behandelt werden, insbesondere welche Rolle die Wärme im oberen Teil des Ozeans beim Schmelzen von Eis und bei Veränderungen in der obersten Wasserschicht (*mixed layer*), direkt unter der Eis-Wasser-Grenze, spielt.

Welche Bedeutung zufällige Faktoren von Jahr zu Jahr haben, lässt sich anhand einer Karte der Eiskonzentration zum Zeitpunkt des maximalen Rückzugs erkennen.

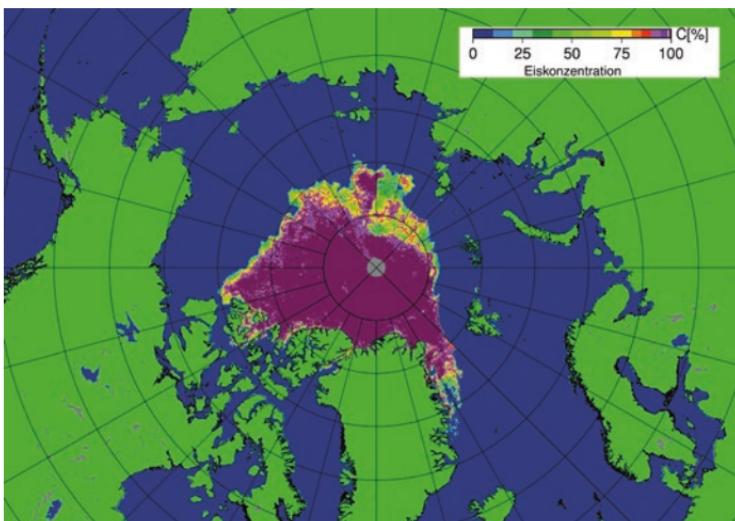


Abb. 6.8 Eisausdehnung und -konzentration Mitte September 2012, wie sie von der Universität Bremen ermittelt wurden, mit sehr niedrigen Eiskonzentrationen am Rande (Universität Bremen)

Abb. 6.8 zeigt eine Satellitenkarte der Eisausdehnung am 20. September 2012, dem Tag des maximalen Rückzugs. Die Karte wurde von der Universität Bremen mit einer anderen Technik erstellt als die bekannteren Karten vom National Snow and Ice Data Center (NSIDC) in Boulder, Colorado; sie zeigt die Eiskonzentration innerhalb der Eisgrenzen und nicht nur eine weiße Fläche. Wir können aus der Karte entnehmen, dass es am Eisrand in der Beaufortsee und den Meeren der russischen Arktis einen breiten Rand mit niedrig konzentriertem Eis gab, sodass bei zwei oder drei weiteren Tagen Eisschmelze, die leicht durch zufällige Wetterfaktoren hätten auftreten können, eine weitere riesige Fläche abgeschmolzen wäre, was einen Rekord mit deutlich weniger als den tatsächlich aufgetretenen 3,4 Mio. km² dargestellt hätte.

6.7 Wellen im offenen Wasser

Einer der zufälligen Wetterfaktoren sind die Wellen, und das galt sicherlich auch für den großen Sturm von 2012. Wellen werden in Zukunft sicherlich noch wichtiger, wenn im Sommer das Meereisgebiet weiter schrumpft, aber schon ein flüchtiger Blick auf die Karten 2007, 2012 und 2015 zeigt uns, dass im Sommer bereits riesige offene Wasserflächen am Rande des Eises existieren. Der enorme Rückzug des Meereises schafft genügend offene Wasserfläche, damit der Wind in zuvor geschützten Meeren wie der Beaufortsee am Eisrand eine hohe Wellenenergie erzeugen kann. Dies kann reichen, um das Eis aufzubrechen und seine Schmelze zu beschleunigen, womit es sich noch weiter zurückzieht. Mit anderen Worten, die Erwärmung verursacht den Rückzug des Meereises, was eine große freie Wasserfläche öffnet, die wachsende Wellen zulässt, die mit dem Eis interagieren, es aufbrechen und zerfallen lassen, womit sich das Eis noch weiter öffnet. Dies ist die erste der großen Rückkopplungen im arktischen Meereis, auf die ich in Kap. 8 näher eingehen werde.

Die Untersuchung von Wellen und ihren Auswirkungen auf das Eis ist relativ neu, und ich war schon in der Anfangsphase dabei. Tatsächlich war es das Thema meiner Doktorarbeit 1973. Ich kam 1970 als Forschungsstudent an das Scott Polar Research Institute in Cambridge. Der Direktor, Dr. Gordon Robin, hatte sowohl Gletscher als auch Meereis erforscht, und er erklärte sich bereit, mir ein Meereisprojekt zu geben. Mit dem Projekt, auf das ich mich eingelassen hatte, wollten wir verstehen, was passiert, wenn Meereswellen in das Packeis eindringen. Damals war darüber nur sehr wenig bekannt, nur wenige Ozeanografen arbeiteten an Fragestellungen der Polargebiete, sodass jeder, der das Feld betrat, aus einer großen

Bandbreite unerklärlicher Phänomene wählen konnte. Dr. Robin hatte eine Schiffsreise in die Antarktis mit einem Wellenschreiber an Bord unternommen und die Wellenenergie in verschiedenen Entfernung innerhalb der Eisgrenze gemessen, und er sandte einen wissenschaftlichen Assistenten aus, um dasselbe zu tun. Aber das war alles – zwei Datensätze und keine Theorie darüber, was vor sich ging.

Glücklicherweise war ein zweiter, gesunder Aspekt dieser Tage, dass die Computermodellierung in den Kinderschuhen steckte und der Schwerpunkt darauf lag, wissenschaftliche Fragen zu lösen, indem man hinausging und Messungen vor Ort anstellte. Ich wünschte, das wäre auch heute noch der Fall. Gordon Robin war eifrig dabei, für mich Möglichkeiten für Expeditionen zu finden. Im Februar 1971, nur vier Monate nach meiner Ankunft, nutzte er die Kontakte zur Marine (er hatte während des Krieges auf U-Booten gedient), um mich loszuschicken, die Wellen im Eis vom dieselelektrischen U-Boot HMS Oracle aus zu studieren. Es fuhr zum Eisrand in der Grönlandsee, um das erste britische Atom-U-Boot, die HMS Dreadnought, auf dem Weg in den Arktischen Ozean zu begleiten.

Ich hatte eine wunderbare Zeit in der Oracle. Es war außergewöhnlich eng, schmutzig und stinkend, aber faszinierend. Alles war eine einzige Röhre, ohne getrennte Decks – Kontrollraum, Dieselmotoren, Batterieabteil und Torpedorohre lagen in einer Reihe wie in U-Boot-Filmen über den Zweiten Weltkrieg. Auch diesmal, genau wie im Krieg, trug die Crew fettige weiße Wollpullover, wusch sich nie und schlief in Kojen, die jede freie Ecke des ganzen Bootes füllten. Meine eigene Koje war auf Höhe des Decks direkt vor der Tür der Messe, und es gab eine weitere Koje ein paar Zentimeter über meiner Nase. In dieser schlief der Steward der Messe, und sie wurde am frühen

Morgen in einen Tisch verwandelt, an dem er das Frühstück aus der Kombüse auf die Teller austeilte. Wenn wir an der Oberfläche waren und das Boot rollte, wurde das Frühstück oft verschüttet und lief an der Seite meiner Koje herunter. Der inspirierende Kapitän Hugo White (später Admiral Sir Hugo White, Oberbefehlshaber der Flotte) tauchte mit uns unter die Eisgrenze ab und mehrere Dutzend Kilometer innerhalb des Packeises wieder auf, ein kühnes Manöver für ein Diesel-U-Boot, das die Batterien aufladen muss. Der Kapitän überreichte den Besatzungsmitgliedern in einer Zeremonie auf einer Eisscholle Medaillen für lange Dienstzeiten.

Für meine wissenschaftliche Arbeit wandte ich ein Verfahren an, das einige Jahre zuvor mein wissenschaftliches Vorbild Walter Munk vom Scripps Institution of Oceanography vorgeschlagen hatte: Im Schwebezustand unter dem Eis in unterschiedlichen Entfernung vom Eisrand den nach oben gerichteten Echolot des U-Boots zu benutzen, um die Entfernung bis zur Meeresoberfläche zu messen und damit eine Zeitreihe der Wellen aufzuzeichnen. Das U-Boot dient dabei als stabile Plattform, wenn es tief genug ist, wird es nicht von der Wellenbewegung beeinflusst (Macovsky und Mechlin 1963). Ich bekam einige ausgezeichnete Daten über das Abklingen der Wellen im Eis (Wadhams 1978). Es waren die ersten wirklich genauen Feldmessungen, und sie zeigten, dass die Wellen mit der Entfernung exponentiell abklingen. Dies zeigte, dass Wellen von den Eisschollen reflektiert werden, wobei die reflektierte Energie in alle Richtungen geht und die Stärke der Wellen abnimmt, die noch versuchten, weiter in das Packeis einzudringen. Ich entwickelte eine Theorie für diesen Prozess, die als Streuung bezeichnet wird, machte weitere Feldarbeit mit einem Laser von einem Flugzeug aus und schrieb meine Doktorarbeit 1973.

Einige Jahre später, zurück in Cambridge, nach einem Aufenthalt in Kanada und einem Jahr als Gastprofessor an der US Naval Postgraduate School in Monterey, erhielt ich vom US Office of Naval Research (ONR) ein Stipendium, um das Abklingen von Wellen im Eis intensiv in einem Projekt namens MIZEX, dem Marginal Ice Zone Experiment, zu untersuchen (MIZEX Group 1986). Viel später, nämlich 2012, erneuerte das ONR sein Interesse an Wellen im Eis, als sie, wie viele Polarforscher, vermuteten, dass die im Sommer im offenen Wasser erzeugten Wellen tatsächlich ausreichen könnten, um das Gleichgewicht in Richtung Zerstörung des sommerlichen Eises zu kippen. Ich habe mich nun einer großen Gruppe von wissenschaftlichen Partnern angeschlossen, um das Wellen-Eis-Phänomen mit modernen Methoden zu untersuchen. Wir verwenden durch Satelliten getrackte Wellenbojen, um die Wellenenergie im Eis zu erfassen. Einige driften über weite Teile des Arktischen Ozeans, während andere nur für kurze Zeiträume während einer Reise im Oktober und November 2015 mit dem neuen Eisbrecher Sikuliaq der University of Alaska in Eisrandgebieten ausgelegt wurden.

Unsere Erfahrungen auf dem Sikuliaq zeigten einen weiteren klimatischen Aspekt der Wellen-Eis-Interaktion. Wir fanden heraus, dass das Wiedergefrieren im frühen Herbst, wenn die Eisgrenze normalerweise schnell von der südlichen Beaufortsee hinunter in die Beringstraße und in die Beringsee fortschreitet, einfach nicht so abließ, wie es die Lehrbücher beschreiben. Zwar rückte die Eisgrenze voran, indem sich aufgrund der Wellen zunächst neues Eis in der Form von Pfannkucheneis bildete (mehr zu diesem Eistyp in Kap. 11), aber dann kam ein echter Sturm auf und das neue Eis verschwand wieder, geschmolzen durch die Hitze in der Wassersäule, die von den Wellen an die Oberfläche gebracht wurde. Diese Wärme hatte sich im Wasser während des eisfreien

Sommers angesammelt. Den Kampf zwischen dem vorrückenden Eis und dem widerstandsfähigen Meer gewann am Ende zwangsläufig das Eis, aber das Meer kämpfte mit einer Verzögerungstaktik und das Ergebnis war, dass die Eisausdehnung für einen Großteil des Jahres 2016 auf einem Rekordminimum blieb. Es ist auch bedeutsam, dass der Februar 2016 weltweit der saisonabhängig wärmste Monat seit Beginn der Aufzeichnungen war, ganze $1,35^{\circ}\text{C}$ wärmer als der Februar durchschnitt von 1950 bis 1980. Diesen Rekord brach dann jeder Monat des Frühjahrs 2016.

So haben wir festgestellt, dass die Wellen-Eis-Rückkopplung zwei Formen annimmt. Im Hochsommer ermöglicht die riesige offene Wasserfläche an den Rändern des Arktischen Ozeans, dass Wellen entstehen, die in das Eis eindringen und von diesem gestreut werden, wodurch große Schollen in kleinere Fragmente zerlegt werden und ihre Schmelze sich beschleunigt. Im Herbst führen die stärkeren Stürme zu einer welleninduzierten Vermischung der oberen Wasserschichten, was im Sommer aufgenommene Wärme nach oben bringt und das Vorrücken der Eisgrenze behindert, indem neues Eis, das sich zu bilden versucht, wieder schmilzt.

Im nächsten Kapitel folgen wir dem Rückgang des Eises bis zu seinem endgültigen Abschluss, der ein Ende der sommerlichen Meereisdecke sein wird. Dann greifen wir in Kap. 8 das Problem der Rückkopplungen wieder auf und beschreiben andere schwerwiegende Auswirkungen des Eisrückzugs auf globale Prozesse.

Literatur

Arctic Climate Impact Assessment (2004) Impacts of a warming climate. Cambridge University Press, Cambridge

- Comiso JC, Wadhams P, Krabill WB, Swift RN, Crawford JP, Tucker WB (1991) Top/bottom multisensor remote sensing of Arctic sea ice. *J Geophys Res* 96(C2):2693–2709
- Kelly PM (1979) An Arctic sea ice data set 1901–1956. *Glaciological Data* 5:101–106, World Data Center for Glaciology, Boulder, Colorado
- Macovsky ML, Mechlin G (1963) A proposed technique for obtaining directional wave spectra by an array of inverted fat-hometers. In: *Ocean wave spectra, Proceedings of a Conference held at Easton, Maryland, 1–4 May 1961*. S 235–245. Prentice-Hall, Englewood Cliffs
- Maslowski W, Kinney JC, Higgins M, Roberts A (2012) The future of Arctic sea ice. *Ann Rev Earth Planet Sci* 40:625–654
- MIZEX Group (1986) MIZEX East: The summer marginal ice zone program in the Fram Strait/Greenland Sea. *EOS Trans Am Geophys Union* 67:513–517
- Morello S (2013) Summer storms bolster Arctic ice. *Nature* 500:512
- Parkinson CL, Comiso JC (2013) On the 2012 record low Arctic sea ice cover. Combined impact of preconditioning and an August storm. *Geophys Res Lett* 40:1–6
- Parkinson CL, Comiso JC, Zwally HJ, Cavalieri DJ, Gloersen P, Campbell WJ (1987) Arctic Sea Ice, 1973–1976: satellite passive-microwave observations. National Aeronautics and Space Administration, SP-489, Washington, DC
- Polyakov IV, Walsh J, Kwok R (2012) Recent changes of Arctic multiyear sea-ice coverage and the likely causes. *Bull Am Meteor Soc*. <https://doi.org/10.1175/bams-d-11-00070.1>
- Rothrock DA, Yu Y, Maykut GA (1999) Thinning of the Arctic sea-ice cover. *Geophys Res Lett* 26:3469–3472
- Scoresby W Jr (1820) *An Account of the Arctic Regions With a History and Description of the Greenland Whale-Fishery*. 2 Bände. Constable, London (Reprint 1968, David and Charles, Newton Abbot)
- Wadhams P (1978) Wave decay in the marginal ice zone measured from a submarine. *Deep-Sea Res* 25:23–40

- Wadhams P (1981) Sea-ice topography of the Arctic Ocean in the region 70°W to 25°E. *Phil Trans Roy Soc, Lond A*302(1464):45–85
- Wadhams P (1990) Evidence for thinning of the Arctic ice cover north of Greenland. *Nature* 345:795–797
- Wadhams P, Davis NR (2000) Further evidence of ice thinning in the Arctic Ocean. *Geophys Res Lett* 27:3973–3975
- Zhang J, Lindsay R, Schweiger A, Steele M (2013) The impact of an intense summer cyclone on 2012 Arctic sea ice extent. *Geophys Res Lett* 40:720–726



7

Die Zukunft des arktischen Meereises – die Todesspirale

7.1 Wie geht es für das Meereis weiter?

Ein kluger und bescheidener Analytiker geophysikalischer Daten, Andy Lee Robinson, hat eine neue Methode entwickelt, das arktische Eisvolumen darzustellen. Sie zeigt sehr deutlich, wie schnell der Rückgang der sommerlichen Eisausdehnung zum völligen Verschwinden führt und wie die anderen Monate des Jahres dem Abwärtstrend folgen werden. Wir beginnen mit Abb. 7.1, welche die Volumenanomalie (das heißt das Eisvolumen im Vergleich zu einem Durchschnitt von 1976 bis 2015) im Laufe der Zeit darstellt. Dies baut insofern auf dem in Abb. 6.1 dargestellten Rückgang der Fläche auf, indem auch Daten zur Eisdicke verwendet werden. Wenn wir die Dicke mit der Fläche multiplizieren, um das Volumen zu erhalten, nimmt die relative Rate des Rückgangs zu, da gleichzeitig sowohl

die Fläche als auch die Dicke schrumpfen. Die Grafik zeigt eine gemittelte Ausgleichsgerade des Trends, aber die Daten ab 2002 deuten auf eine beschleunigte Abnahme hin. Durch die Ausdünnung wird das Eis wahrscheinlich schneller verschwinden, als ein Blick nur auf die Flächen-daten nahelegt.

Die beiden Datentypen, die in Abb. 7.1 zusammen-geführt wurden, sind unterschiedlich genau. Die Eisfläche ist sehr exakt bekannt – die Daten stammen aus Satelliten-bildern, die uns sowohl die Ausdehnung (die Fläche innerhalb der äußeren Eisgrenze) als auch die Fläche liefern (die tatsächliche Fläche, die vom Meereis bedeckt ist, das heißt ohne offenes Wasser innerhalb des Packeises). Die in Abb. 7.1 verwendete Dicke ist dagegen nicht so genau bekannt. Sie wird aus einem einfachen Modell abgeleitet, da die Dicke nicht über die gesamte Arktis aufgezeichnet wurde. Es gibt jetzt einen Satelliten, der für diesen Zweck

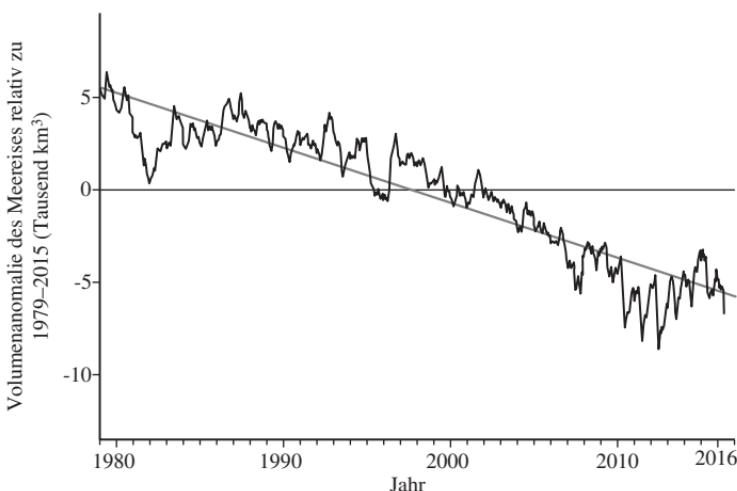


Abb. 7.1 Der Rückgang des arktischen Eisvolumens in den letzten 30 Jahren (PIOMAS, Polar Science Center, University of Washington)

gebaut wurde. Er heißt CryoSat-2 (CryoSat-1 stürzte kurz nach dem Start ab), wurde 2010 von der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) gestartet und verwendet einen Radarhöhenmesser, um die Höhe der Eisoberfläche über der Wasserlinie zu messen – den sogenannten Freibord: Ein Radarstrahl wird von der Eisoberfläche reflektiert und eine genaue Entfernungsmessung ergibt den Freibord. Ein Umrechnungsfaktor, der auf dem Wissen über die Dichte von Eis und Schnee basiert, kann dann angewendet werden, um den Freibord in die Dicke umzurechnen. Dieser Faktor variiert mit der Jahreszeit, der Position in der Arktis und der Art des Eises, sodass es – kaum überraschend – umstritten ist, welchen Faktor man verwenden sollte. Die aus CryoSat-2 gewonnenen Eisdickenwerte wurden veröffentlicht (Laxon et al. 2013), aber erst ab 2012, und sie wurden stark kritisiert. Ich interessiere mich für den gesamten Trend dessen, was seit 1979 passiert ist, und deshalb ziehe ich es vor, die lückenhaften Daten aller mit U-Booten in der Arktis aufgezeichneten Profile zu verwenden. In den USA haben diese Profile hauptsächlich Drew Rothrock von der Universität von Washington und sein Kollege Mark Wensnahan (Rothrock et al. 2008) erstellt und in Großbritannien ich. Ein Projekt namens PIOMAS an der Universität von Washington (Pan-Arctic Ice Ocean Modeling and Assimilation System) nimmt die Dickendaten und wendet sie auf ein sehr einfaches Modell an. Es berechnet die mittlere Eisdicke für den gesamten Arktischen Ozean, basierend auf den von U-Booten aufgezeichneten Daten, die durch das Wissen über die Verteilung von Eistypen, -alter und Faktoren wie der Lufttemperatur interpoliert werden. Anders als andere Modellierungen gibt uns PIOMAS also keine mehr oder weniger willkürlichen Zahlen, sondern die beste Näherung, die wir mit minimalen Modellierungseingriffen in den Datenanalyseprozess erreichen können. In dieser Hinsicht steht es

im diametralen Gegensatz zu den vom Weltklimarat verwendeten Eis-Ozean-Klimamodellen.

Andy Lee Robinson war sehr geschickt darin, diese Ergebnisse zu visualisieren. Er nahm die monatlichen Daten, die zum Plotten von Abb. 7.1 verwendet worden waren, und verpackte die Daten in eine Uhrform, wobei wir mit 1979 bei 12 Uhr beginnen und den Zeiger im Uhrzeigersinn bis zur Gegenwart um kurz vor 12 Uhr laufen lassen. Die Entfernung vom Zentrum entspricht dem mittleren Eisvolumen in einem bestimmten Monat dieses Jahres. Das Ergebnis ist ein Satz von zwölf Kurven (Abb. 7.2), die konzentrische Kreise wären, wenn dem arktischen Eis nichts passiert wäre. Aber die Kurven

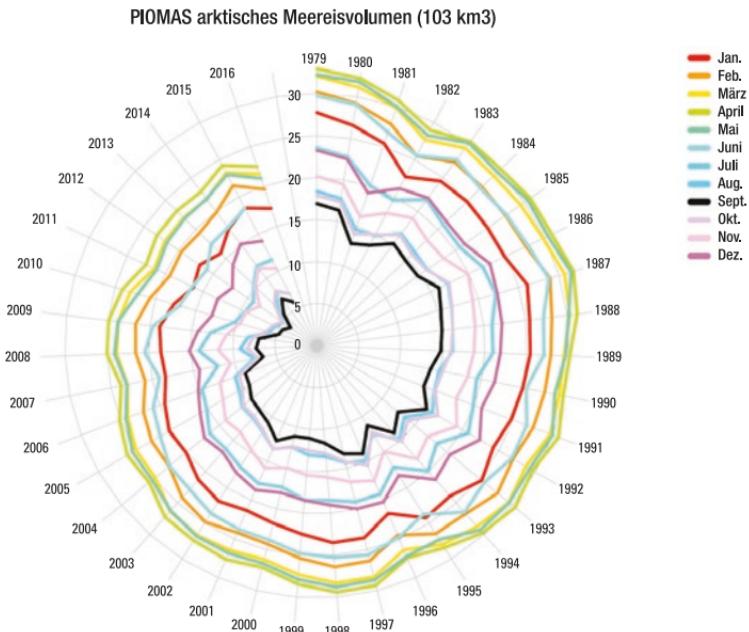


Abb. 7.2 Die „arktische Todesspirale“: Das Eisvolumen für jeden Monat eines jeden Jahres seit 1979 in einem Polarkoordinatensystem. Das abnehmende Eisvolumen wird als eine Spirale gezeigt, die auf das Zentrum der Grafik zuläuft. (© Andy Lee Robinson)

schrauben sich alle in Richtung Zentrum, und die Kurve für September ist schon fast am Ziel. Als er dies sah, nannte der Glaziologe Mark Serreze, Leiter des National Snow and Ice Data Center (NSIDC) in Boulder, die Kurve die „arktische Todesspirale“.

Wenn wir uns die arktische Todesspirale ansehen, ist klar, dass es das sommerliche Meereis der Arktis nicht mehr lange geben wird. Extrapoliert bringt der Abwärts-trend die Eisbedeckung in den Sommermonaten 2016 mit einem eisfreien September und Oktober auf null, 2017 werden August bis Oktober eisfrei und 2018 Juli bis November. Somit hatten die Trendlinien zwei eisfreie Monate im Jahr 2016, drei Monate im Jahr 2017 und fünf Monate im Jahr 2018 vorausgesagt. Die Kurven für die anderen sieben Monate des Jahres hinken dieser Entwickelung hinterher, aber sie gehen alle mit zunehmender Geschwindigkeit nach unten, alle auf das Zentrum der Todesspirale zu. Natürlich sollte diese einfache Art der Hochrechnung nicht verwendet werden, um Vorhersagen über die Wintermonate zu treffen, denn in den nächsten Jahrzehnten kann viel passieren und den Zustand der Arktis im Winter verändern. Es ist auch klar, dass sich der Sommertrend verlangsamt hat, denn im September 2016 und 2017 ist das Meereis nicht verschwunden. Das Volumen nimmt jedoch sowohl im Winter als auch im Sommer weiterhin tendenziell ab, und im Sommer sind wir nicht weit davon entfernt, dass es wirklich verschwindet. Das heißt, der Rückgang muss nur noch sehr wenige Jahre andauern, bevor die September-Eisausdehnung wirklich bei null ist.

Wir haben das „Rauschen“ in den Daten von Kap. 6 gesehen, das besagt, dass ein klarer und starker langfristiger Trend in jedem Jahr durch zufällige Faktoren gestört werden kann, die mit Wetterereignissen in kritischen Phasen des Meereiswachstums und -zerfalls verbunden sind. Aber

die Ausschläge sind vorübergehend, während der Trend unerbittlich ist. Es besteht kein Zweifel, dass die Zeitreihe von Abb. 7.1 einen starken Trend darstellt, der dazu führen wird, dass das Meereis im September sehr bald verschwindet. Mit dem Begriff „verschwinden“ meinen die Wissenschaftler, dass der größte Teil der Eisbedeckung nicht mehr da und dass der Arktische Ozean von Amerika bis Eurasien ein offenes Meer sein wird. Es werden sicherlich noch kleinere Eisflächen bleiben, vor allem entlang der Küsten und in Wasserstraßen wie in der Nordwestpassage, die sich zusammengenommen auf etwa eine Million Quadratkilometer belaufen werden. Es geht hier um den Hauptteil des Eises. Wie wir im nächsten Kapitel sehen werden, ist in der Arktis jede uns bekannte Rückkopplung positiv, wir kennen keinen Prozess, der den Rückgang des sommerlichen Meereises verlangsamen oder stoppen wird. Möglicherweise wird der erste wichtige Schritt hin zum Verschwinden des Meereises darin bestehen, dass der Nordpol und eine Route zu ihm im September eisfrei werden. Für viele dürfte dies bereits dem Bild einer eisfreien Arktis entsprechen.

Erinnern wir uns, was zu diesem beschleunigten Rückgang beigetragen hat. Das mehrjährige Eis ist fast vollständig verschwunden, und selbst wenn sich die arktische atmosphärische Zirkulation plötzlich ändert, bleibt innerhalb der nächsten ein bis zwei Jahre keine Zeit, um das in der Arktis verbliebene Eis wesentlich dicker zu machen. Die Erwärmung des eisfreien Ozeans im Sommer hält unvermindert an und wird das Einfrieren im Herbst weiter verzögern, was den Zerfall des bestehenden Meereises durch Schmelze im warmen Wasser und durch Wellenwirkung verstärkt.

7.2 Haben wir einen Kipppunkt überschritten?

In den letzten Jahren hat sich das Konzept der „Kippunkte“ auch in Bereichen durchgesetzt, die nichts mit Klima zu tun haben, und ist zu einem sehr lockeren Begriff geworden. Ich werde mich an eine strenge Definition halten: Demnach tritt ein Kipppunkt ein, wenn ein System, das über ein bestimmtes Maß hinaus belastet wurde, nicht in seinen ursprünglichen Zustand zurückkehrt, wenn diese Beanspruchung wegfällt, sondern in einen neuen Zustand übergeht. Viele von uns wurden in der Schule mit dem Hooke'schen Gesetz konfrontiert: Ein Draht oder eine Feder wird durch ein Gewicht gedehnt und die Dehnung ist proportional zum aufgebrachten Gewicht. Die Länge springt auf ihren ursprünglichen Wert zurück, sobald das Gewicht entfernt wird. Aber wenn das Gewicht zu groß ist, überschreitet es die sogenannte Elastizitätsgrenze des Drahtes. Er dehnt sich bei gleichbleibendem Gewicht immer mehr. Wenn nun das Gewicht entfernt wird, kehrt der Draht nicht zu seiner ursprünglichen Länge zurück und wird es auch nie, weil sich die kristalline Struktur des Metalls verändert hat. Er hat einen Kipppunkt erreicht. Hat das arktische Meereis ebenfalls einen Kipppunkt erreicht? Ich glaube, das ist der Fall, und zwar aus folgendem Grund.

Wir wissen, dass die Fläche des mehrjährigen Eises in der Arktis im Winter von Jahr zu Jahr abnimmt (Kwok 2009; Polyakov et al. 2012). Dies ist zum Teil eine Folge des atmosphärischen Druckfeldes, das nun Eis von den Entstehungsgebieten auf direktem Wege aus dem Arktischen Becken heraustreibt, anstatt es im großen Beaufort-Wirbel über lange Zeiträume rotieren zu lassen. Wenn sich dieses Druckfeld weiterhin durchsetzt, wird von Jahr zu

Jahr eine größere Fläche des Meereises vollständig schmelzen, da das Eis in seinem ersten Jahr langsamer wächst als in der Vergangenheit, weil es schneller schmilzt und da jedes Jahr eine größere Fläche des erwärmenden Wassers eisfrei ist. Sobald die Eisbedeckung in einem bestimmten Sommer vollständig verschwunden ist, wird das Eis im folgenden Winter nur noch einjähriges Eis sein und im nächsten Sommer wieder schmelzen. Es besteht also keine Chance, dass sich wieder eine nennenswerte mehrjährige Eisbedeckung bildet. Der Kippunkt für Meereis ist überschritten, wenn die Schmelzrate im Sommer im Vergleich zur Wachstumsrate im Winter so groß wird, dass im Sommer das gesamte einjährige Eis schmilzt. Wenn kein Eis seinen ersten Sommer überdauert, um ab Oktober (wenn das Gefrieren beginnt) zu mehrjährigem Eis zu werden, kann der Anteil an mehrjährigem Eis in der Arktis nicht zunehmen, sondern muss im Gegenteil weiter abnehmen, bis keines mehr übrig ist. Ab dann wird die Arktis für immer (oder zumindest, bis das Klima wieder kühler wird) nur noch eine saisonale Eisbedeckung haben.

Ein Artikel von Steffen Tietsche und Kollegen erregte im Jahr 2011 in der Öffentlichkeit viel Aufmerksamkeit (Tietsche et al. 2011). Daraus wurden die unterschiedlichsten Schlussfolgerungen abgeleitet, aber die Argumente in ihrem Artikel sind völlig irreführend. Die Autoren entfernten in einer Modellierung mit einem Handgriff die gesamte arktische Eisbedeckung und stellten fest, dass sich im Modell die Eisbedeckung innerhalb von zwei Jahren auf ihr früheres Niveau erholte. Dies wiederholten sie in zwanzigjährigen Abständen, während gleichzeitig die Fläche der Eisbedeckung als Reaktion auf die modellierte Erwärmung abnahm, und in jedem Fall erholte sich die Eisbedeckung und kehrte zu ihrem früheren Zustand zurück. Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass der Eisrückzug reversibel ist und dass wir nur die Kohlenstoffemissionen so

weit reduzieren müssen, dass der Strahlungsantrieb nicht mehr wirkt, damit sich die Eissecke nach ihrem Rückzug regenerieren kann. Dies ist aus zwei Gründen eine ungerechtfertigte Schlussfolgerung. Erstens ist es realitätsfern, in einem Computermodell die Eisbedeckung zu entfernen, ohne andere Faktoren zu verändern. Natürlich neigt das Eis dann im Modell dazu, in seinen vorherigen Zustand zurückzukehren. Zweitens bleiben bei der Schlussfolgerung, dass der natürliche Eisverlust reversibel sei, die bekannten Zeitverzögerungen beim CO_2 -verursachten Strahlungsantrieb unberücksichtigt. Eine bestimmte Menge an CO_2 , die in die Atmosphäre freigesetzt wird, wirkt sich noch weit mehr als 100 Jahre lang auf das Klimasystem aus. Selbst eine massive Reduzierung der CO_2 -Emissionen würde beispielsweise nicht dazu führen, dass die Lufttemperaturen über viele Jahre oder gar Jahrzehnte hinweg sinken, erst recht nicht die Meerestemperaturen.

7.3 Woher wissen wir, dass all das passieren wird?

Eines der seltsamen und entmutigenden Dinge, denen ich als praktizierender Feldforscher begegnet bin, ist der Wandel in der Einstellung zu Daten. Als ich jünger war, stand außer Frage, dass Beobachtungen und Messungen arktischer Phänomene automatisch als gültig akzeptiert wurden, und Extrapolationen aus beobachteten Trends wurden als die beste Möglichkeit angesehen, zumindest kurzfristig vorherzusagen, was passieren wird. Das scheint nicht mehr der Fall zu sein. Wenn eine auf Beobachtungen basierende Prognose ein Ergebnis liefert, das für Wissenschaftler, die sich hauptsächlich mit Modellierung befassen, alarmierend erscheint, dann scheinen einige Wissenschaftler diese zu

ignorieren. Sie setzen Vorhersagen eines Computermodells dagegen, das möglicherweise bereits versagt hat. Ich stieß erstmals 2012 auf dieses Phänomen, als ich vor dem Umweltauditausschuss des britischen Unterhauses über den schnellen Rückgang des arktischen Meereises berichtete. Zwei Wochen später widersprach mir Julia Slingo, Chefwissenschaftlerin des britischen Wetteramts, direkt. Sie lehnte sich weit aus dem Fenster und versicherte dem Ausschuss, dass ihre Modellierer sagten, dass das Meereis noch lange erhalten bleiben würde und dass in der Arktis das Verschwinden des sommerlichen Meereises innerhalb der nächsten Jahre völlig ausgeschlossen sei. Und als ich 2014 vor dem Sonderausschuss des Oberhauses zum raschen Rückgang des arktischen Eises berichtete, widersprach mir ein neben mir sitzender Modellierer mit der Aussage, dass die Modelle voraussagen, dass das sommerliche Meereis bis 2050 bis 2080 erhalten bleibe. Das Außergewöhnliche ist, dass selbst ein Laie, der die Kurven in Abb. 7.2 betrachtet, leicht anhand der Daten erkennen kann, dass es unmöglich ist, dass sich das sommerliche Eis so lange halten kann. Doch der Rat, den solche Modellierer den politischen Entscheidungsträgern geben, hat dazu beigetragen, sie angesichts einer Klimakatastrophe, die wie ein Schnellzug auf uns zukommt, in Untätigkeit zu versetzen.

Tatsächlich gibt uns der Trend in den PIOMAS-Daten etwa 2020 als Datum für das Ende des sommerlichen Meereises. Wer dieses Datum leugnen und durch ein viel späteres ersetzen will, muss zeigen, warum das Eisvolumen über dem Trend liegen sollte. Das müsste es tun, damit das Eis auch in mehr als ein oder zwei Jahren den September überdauern kann. Aber es ist kein Mechanismus in Sicht, der dies ermöglichen könnte. Wer dieses Datum nicht leugnet, sondern die PIOMAS-Daten als beste Grundlage für eine Vorhersage akzeptiert, für den führt diese Prognose nicht nur sehr bald zu einem eisfreien September, sondern

auch zu einem eisfreien Zeitraum Juli bis November wenige Jahre später. Gefährlich für die Welt ist, dass die Leugner dieses Trends nicht nur die normalen Verdächtigen wie fehlgeleitete Regierungswissenschaftler oder womöglich gekaufte Anhänger fossiler Brennstoffe sind, sondern auch eine Einrichtung, die 1992 mit großen Hoffnungen gegründet wurde, eine wissenschaftlich fundierte Warnung geben zu können, was auf uns zukommt, wenn wir unsere CO₂-Emissionen weiter erhöhen. Ich meine hier den Weltklimarat (IPCC), dessen 5. Sachstandsbericht 2013 (AR5) nicht vor dem vorzeitigen Ende des arktischen Eises warnt. Stattdessen vertritt er die Auffassung, das Eis werde erst viel später in diesem Jahrhundert verschwinden. Für diesen Konsens wurden Beobachtungsdaten bewusst ignoriert, zugunsten der Akzeptanz von Modellen, die sich bereits als falsch erwiesen haben.

Ich erhebe hier eine schwere Anklage gegen ein Gremium, vor dem die meisten Wissenschaftler großen Respekt haben, aber sie ist gerechtfertigt, wenn wir uns die Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger des Sachstandsberichts 2013 ansehen (IPCC 2013), und darin insbesondere Abbildung SPM.7 auf S. 21. Abb. 7.3 zeigt Teil (b) dieser Abbildung, die aus vier Gründen irreführend ist. Erstens gibt es im Jahr 2005 eine dicke schwarze Linie. Ein normaler Mensch würde davon ausgehen, dass die schwarze Kurve mit ihren grauen Fehlerbalken, die links davon liegt, historische Daten über die Ausdehnung des Meereises im September darstellt, zumindest sagt das die Beschriftung. Schließlich umfasst sie den Zeitraum von 1950 bis 2005, der sicher abgeschlossen ist und alle Daten dürften bereits ausgewertet sein. Aber in Wirklichkeit ist es die „modellierte historische Evolution unter Verwendung historisch rekonstruierter Antriebe“.

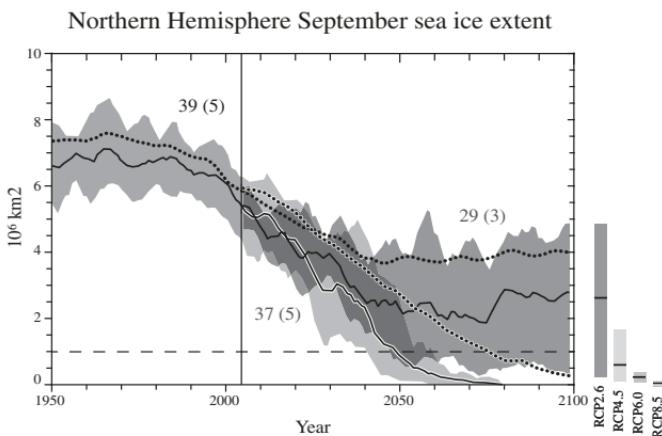


Abb. 7.3 Die irreführende Abbildung SPM.7(b) aus der Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger des AR5 des Weltklimarats (IPCC 2013)

Mit anderen Worten, selbst wenn die Daten verfügbar sind, zieht das IPCC es vor, die Vergangenheit zu modellieren, zweifellos weil es einen sanfteren Rückgang des Eises zeigt als die Realität. Das Stoppen der historischen Kurve im Jahr 2005 ist ernsthaft irreführend, denn erst ab 2007 kam es zum katastrophal schnellen Rückgang des Meereises, was in der Grafik nicht ausgelassen werden sollte. Der AR5-Bericht soll bis 2012 veröffentlichte Daten berücksichtigen, und die Ausdehnung des Meereises bis zu diesem Zeitpunkt wurde ohne Frage veröffentlicht. Aber warum auch immer, in dieser Grafik stoppt die Geschichte 2005, dem Übergangsdatum des vorherigen Berichts AR4, der 2007 veröffentlicht wurde. Kommen wir zu den Zukunftsprognosen, auch wenn diese im Jahr 2005 beginnen, was ja schon damals 8 Jahre zurücklag. Wir sehen zwei Kurven mit jeweils einem Fehlerbalken. Die eine ist eine Prognose für das Szenario RCP8.5 der zukünftigen CO_2 -Emissionen und die andere eine Prognose für das Szenario RCP2.6.

Ich muss diese neue und unnötig komplexe Sichtweise auf den Treibhauseffekt kurz erläutern. RCP steht für

representative concentration pathways. Die Zahl stellt den ungefährten gesamten anthropogenen Strahlungsantrieb im Jahr 2100 im Vergleich zu demjenigen vor der Industriellen Revolution im Jahr 1750 dar. 8,5 steht für 8,5 Watt pro Quadratmeter, was allgemein als das Niveau angenommen wird, das wir in einem *business-as-usual*-Szenario erreichen werden, bei dem wir uns nicht viel um die CO₂-Emissionen kümmern (die Welt folgt diesem Szenario im Moment und übertrifft es sogar). RCP2.6 ist ein beschämendes Szenario, da es 2,6 W m⁻² für 2100 vorsieht, ein Zustand, den wir schon etwa 2030 überschreiten werden. Warum wurde dies einbezogen, wenn es für uns absolut unmöglich ist, es zu erreichen, auch wenn wir uns noch so bemühen? Der anthropogene Strahlungsantrieb erreichte im Jahr 2011 bereits 2,29 W m⁻², nachdem er von 0,57 im Jahr 1950 auf 1,25 im Jahr 1980 gestiegen war. Er scheint sich etwa alle dreißig Jahre zu verdoppeln, und es gibt keine Möglichkeit, dies so unter Kontrolle zu bringen, dass er bis 2100 nur bei 2,6 liegt. Das Szenario RCP2.6 ist also völlig irreführend. Es sieht ganz so aus, als ob es in die Analyse aufgenommen wurde, um den Leser in einem falschen Sicherheitsgefühl zu wiegen, in dem Gefühl, dass wir, wenn wir uns anstrengen, die Erwärmung unter Kontrolle bringen können. So scheinen die komfortabel aussehenden Vorhersagen gegenüber den unangenehmeren in den Vordergrund zu rücken. Der Weltklimarat hat bereits zugegeben, dass das RCP2.6-Szenario nur erreicht werden kann, wenn Kohlendioxid aus der Atmosphäre entfernt wird – also indem Methoden eingesetzt werden, die wir erst noch erfinden müssen –, anstatt einfach nur unsere Kohlendioxidemissionen zu reduzieren (wozu wir ohnehin nicht in der Lage zu sein scheinen).

Kehren wir zu Abbildung SPM.7 und ihren Vorhersagen zurück. Beide Prognosen sind höchst zweifelhaft. RCP8.5 zeigt, dass die Ausdehnung des sommerlichen

Meereises stetig abnimmt und bis 2050 praktisch null erreicht (das heißt unter 1 Mio. km² fällt). Die Kurve beginnt jedoch im Jahr 2005, und ich habe schon darauf hingewiesen, wie peinlich es ist, sie mit realen Daten zu vergleichen. Tatsächlich war die reale Fläche im September 2012 bereits auf 3,4 Mio. km² gesunken, ein Wert, der laut RCP8,5-Szenario erst 2030 erreicht wird. Wir sind schon jetzt so weit! Warum also ein Modell zeigen, das überhaupt keine echten Daten enthält? Und vergessen wir nicht, dass diese Prognose vorgibt, das Szenario mit hohen Emissionen zu zeigen. Das unmögliche Szenario mit niedrigen Emissionen, RCP2,6, zeigt, dass die Ausdehnung des Meereises niemals null erreicht und sich später im Jahrhundert sogar erholt, sodass sie im Jahr 2100 bei respektablen 3 Mio. km² liegt, nicht viel weniger als heute. Wo kommt dieses clevere Ausweichmanöver her? Als dies zum ersten Mal veröffentlicht wurde, riefen mich zwei Journalisten an, die, nachdem sie diese Kurven gesehen hatten, sagten: „Oh, ich sehe, dass der Weltklimarat eine Erholung des Meereises in diesem Jahrhundert voraussagt. Das bedeutet, dass wir nichts gegen die globale Erwärmung tun müssen, nicht wahr?“ Wer auch immer diese Abbildung gezeichnet hat, hat sicherlich seinen Zweck erfüllt. Es ist eine brillante Vorführung in der Kunst der wissenschaftlichen Zaubertricks.

Tatsache ist, dass der Weltklimarat mit dem „Konsens“, der sich in seinem Machtgefüge durchgesetzt hat, die Frage, die ich zu Beginn dieses Kapitels gestellt habe, nicht beantworten kann. Seine Modelle können nicht einmal erklären, wo wir heute stehen, geschweige denn, wohin wir in Zukunft gehen. Und es geht nicht darum, dass wir beweisen müssten, dass etwas passieren wird. Angesichts der vorhandenen Daten liegt die Beweislast bei den Leugnern. Wir sprechen nicht einmal über Vorsorge, wie im Falle von Methan (Kap. 9), wegen dem wir vorsichtshalber

ebenfalls handeln sollten. Beim Meereisrückgang ist der Fall völlig klar, und das sollte die Grundlage für das Handeln sein, nicht etwas, das geleugnet und versteckt wird. Wenn ein falscher „Konsens“ uns dazu verleitet, die bereits ablaufenden schnellen Veränderungen und ihre Auswirkungen zu ignorieren, werden wir einen hohen Preis zahlen müssen.

7.4 Unmittelbare Folgen des Eisrückzugs – Navigation in der Arktis

Die Arktis der Zukunft wird auf jeden Fall eine stark reduzierte Eisbedeckung haben, insbesondere in den Sommermonaten. Im nächsten Kapitel werden wir zeigen, dass dies enorme Auswirkungen auf das Klimasystem hat, mit potenziell verheerenden Folgen aufgrund der Rückkopplungen, die durch diesen Eisrückzug ausgelöst wurden. Aber es gibt auch Auswirkungen auf zwei alltägliche wirtschaftliche Aktivitäten des Menschen, die Schifffahrt und die Ölexploration.

Die Schifffahrt in einer eisfreien Arktis bringt drei neue Möglichkeiten mit sich: die kommerzielle Nutzung der Nordwestpassage um den Norden Amerikas, des Nördlichen Seewegs entlang der Nordküste Russlands und die mögliche Entwicklung einer echten Transpolarroute von der Beringstraße zur Framstraße.

Wie ich bereits in Kap. 1 erwähnt habe, war der Versuch, die Nordwestpassage zu durchqueren, immer ein Kampf gegen das Eis. Frühe Entdecker wurden dabei mit zwei unmöglichen Herausforderungen gleichzeitig konfrontiert: das außergewöhnlich komplexe Kanalnetz zwischen Baffin Bay und Bering Strait zu erforschen, was

aber in der sehr kurzen Sommersaison erfolgen musste, in der das Eis schwächer wird und so weit zerfällt, dass ein Segelschiff vorwärtskommen kann. Beide Anforderungen konnten kaum gemeinsam erfüllt werden. Einer der Gründe, warum die Royal Navy langwierige Bemühungen unternahm, war die Tatsache, dass einer ihrer ersten Versuche sehr erfolgreich war. Im Jahr 1819 wurde Leutnant (später Admiral) William Edward Parry mit den Schiffen *Hecla* und *Griper* losgeschickt, und durch reines Glück und einen für diesen Zweck außergewöhnlich guten Sommer gelang es ihm, durch den Viscount-Melville-Sund zu segeln und nach Melville Island zu gelangen, wo er den Winter verbrachte und dann zurückkehrte. Dies stellte eine fast vollständige Durchquerung der Nordwestpassage dar. Parry war nie in der Lage, dieses Kunststück bei späteren Expeditionen zu wiederholen, und auch sonst schaffte das niemand – nicht wegen mangelnden Geschicks, sondern weil es zu viel Eis gab. Die Navigation in der Nordwestpassage ist von Jahr zu Jahr sehr unterschiedlich. Damit eine Durchquerung möglich ist, muss das Eis im Sommer zerbrechen und Wind und Strömungen müssen die Bruchstücke dann aus den miteinander verbundenen Kanälen heraustreiben. Parry kam dem Ziel am nächsten, aber niemand im 19. Jahrhundert fand eine wirklich eisfreie Passage vor, und so wurde die Nordwestpassage nie mit einem Segelschiff befahren.

Mit dem Aufkommen der Dampfkraft für Schiffe hätte dies einfacher werden können, aber die ersten Dampfmaschinen für arktische Erkundungsschiffe waren sehr schwach und konnten wegen des hohen Kohleverbrauchs nur für kurze Zeit eingesetzt werden. Die Admiraliät schickte 1845 Sir John Franklin auf eine Expedition, die das Problem der Nordwestpassage ein für alle Mal lösen sollte. Seine Schiffe, *Erebus* und *Terror*, hatten jeweils eine Eisenbahnlokomotive im Laderaum,

die durch ein hochgepriesenes Gummiband mit einer Schraube verbunden war. Aber diese waren nur 25 PS stark, kaum genug, um die Schiffe durch das Wasser zu bewegen (Höchstgeschwindigkeit war vier Knoten). Es ist nicht verwunderlich, dass er trotzdem vor King William Island im Eis festsaß. Nach Franklins Tod (wahrscheinlich aus natürlichen Gründen) verließ sein Stellvertreter tragischerweise die im Eis eingeschlossenen Schiffe und führte die Besatzung auf eine hoffnungslose Überlandtour nach Süden, bei der alle 128 starben. Schließlich schaffte Amundsen zwischen 1903 und 1906 die erste erfolgreiche Durchquerung der Nordwestpassage. Er brachte wie auch sonst skandinavisches Können und gesunden Menschenverstand in das Problem ein und benutzte ein kleines, einmastiges Heringsfischerboot, die *Gjøa*, ausgestattet mit einem Glühkopfmotor, einer frühen Form des Benzinmotors. Der Hauptvorteil dieses Schiffes war seine geringe Größe und sein geringer Tiefgang, was es ihm ermöglichte, in Landnähe im flachen Wasser zu fahren, wo im Sommer im Eis eine Lücke zwischen den gebrochenen Eisblöcken und der Küste besteht. Franklin musste sich wegen des Tiefgangs seiner Schiffe von den Küsten fernhalten und blieb daher im Eis stecken. Amundsen verbrachte zwei Winter auf King William Island, an einem Ort, der heute als *Gjoa Haven* bekannt ist, um magnetische Messungen durchzuführen und (in mehrfacher Hinsicht) mit der lokalen Inuit-Bevölkerung zu kommunizieren. Er erlernte ihre Art von Reisen, Kleidung und Jagd, quasi seine arktische Universitätsausbildung.

Nach Amundsen wurde die Nordwestpassage fast vergessen. Die Lorbeeren waren vergeben, aber es war eindeutig kein praktischer Schifffahrtsweg. Das nächste erfolgreiche Schiff war der Motorschoner *St. Roch* der Royal Canadian Mounted Police auf Patrouille in den Jahren 1940 bis 1942, unter der Leitung des legendären

Sergeants Henry Larsen. Nach dem Krieg fuhren erstmals große Schiffe hindurch, zuerst 1954 der militärische Eisbrecher HMCS Labrador (ich hatte das große Vergnügen, 1978 an Bord dieses Schiffs zu einer Meereisstudie vor Neufundland zu fahren, kurz bevor es verschrottet wurde). Dann kam der riesige Tanker Manhattan mit 105.000 t Leergewicht, der von seinen Eigentümern, der irreführend benannten Humble Oil Inc., dafür gedacht war, arktisches Öl aus der Prudhoe Bay an der Nordküste Alaskas zu den Märkten an der Ostküste und in Europa zu transportieren. Er hatte einen speziell verstärkten Bug, aber nicht genug Kraft für seine Größe. Mehrmals blieb er stecken, und der starke Eisbrecher John A. Macdonald der kanadischen Küstenwache musste ihn befreien. Durch den ständigen Aufprall aufs Eis bekam er auch noch ein Leck und das Frischwasser in den Tanks wurde dadurch allmählich salzig. Seine beiden Fahrten fanden 1969 und 1970 statt, und als Ergebnis dieser Fehlschläge wurde die Trans-Alaska-Pipeline als alternative, wenn auch sehr teure Möglichkeit gebaut, um das Öl der Region North Slope auf den Markt zu bringen.

Ebenfalls 1970 waren wir an der Reihe, die Nordwestpassage mit der CSS Hudson zu versuchen, begleitet von unserem Schwesterschiff CSS Baffin. Dies war ein Teil der Expedition „Hudson-70“, mit der ich dieses Buch begonnen habe. Unser Kapitän wählte den direkten, nördlichen Weg durch die Prince-of-Wales-Straße und den Parry-Kanal, also den Kurs der St. Roch von 1940, der Labrador 1954 und der Manhattan 1969, aber nördlich von Amundsens Passage durch Peelsund, Franklinstraße und Coronation Gulf. Wir kamen in der Prince-of-Wales-Straße gut voran, aber als wir an deren nördlichen Ende in den südlichsten Teil der McClure-Straße einfuhren (sie ist der westlichste Abschnitt des Parry-Kanals), wurden wir von unpassierbarem Eis eingeschlossen. Dies

hat schon in der Vergangenheit häufig zu einer Blockade der Passage geführt. Echtes Polareis aus dem Arktischen Ozean kann durch die McClure-Straße nach Süden driften und eine unpassierbare Barriere aus schwerem, mehrjährigem Eis bilden. Das war der Grund, warum das Schiff von McClure, die HMS Investigator, sank, als er 1855 nach Franklin suchte – das Wrack des Schiffes fanden kanadische Taucher 2013, während Erebus und Terror 2014 und 2016 entdeckt wurden. Wie viele unserer Vorgänger musste uns der Eisbrecher John A. Macdonald aus unserem Gefängnis im Eis befreien. Er kam, um uns zu helfen, sicher in Halifax anzukommen – rechtzeitig zu unserem offiziellen Empfang als erstes Schiff, das Amerika umrundet hat (Wadhams 2014).

Seither durchquerten immer häufiger Schiffe die Nordwestpassage, aber niemand schlug sie als Route für Frachtschiffe vor. Staatliche Eisbrecher machten die Reise, gelegentlich schlüpfte eine Jacht mit Abenteurern hindurch, und es gab den Versuch, eine Kreuzfahrtroute durch die Passage zu etablieren, bei der ich eine kleine Rolle als Reiseleiter spielte. Mein Schiff war die Frontier Spirit, ein ziemlich kleines Schiff von nur 6000 t, aber mit Eisschutz. Als sie 1991 versuchte, von Westen nach Osten zu fahren, kam sie nicht weiter als an die Nordküste Alaskas. Im nächsten Jahr, in die andere Richtung, lief es besser, und sie kam durch, benötigte aber die Hilfe von zwei kanadischen Eisbrechern, der Terry Fox und der Franklin. Sie blieb direkt vor der Westküste von King William Island stecken, fast genau an der Stelle, an der Franklins Schiffe 1845 eingeschlossen wurden und schließlich sanken. Auch diesmal lag es daran, dass Eis des Arktischen Ozeans durch die McClure-Straße und noch weiter nach Südosten gedriftet war, was sehr schweres, altes, mehrjähriges Eis in das Gebiet brachte.

Selbst mit den milderen Eisverhältnissen der letzten Jahre wurde die Nordwestpassage nicht automatisch schiffbar. Wie wir den Karten in Abb. 6.4 entnehmen können, war sie 2007 vollständig offen, aber nicht 2005. Auch wenn im Sommer viel weniger Eis übrig bleibt und auch wenn das Eis immer zu Schollen zerbricht, ist es noch nicht garantiert, dass Wind und Strömungen alle Eisblöcke aus der Passage treiben und einen freien Weg hinterlassen. Aus diesem Grund vermute ich, dass es noch einige Jahre dauern wird, bis die Route für Frachtschiffe etabliert ist, auch wenn bereits Erzfrachter das östliche Ende der Passage befahren, um Eisenminen auf der Baffininsel zu erreichen. Ein großes Kreuzfahrtschiff, die *Crystal Serenity*, fuhr 2016 ebenfalls durch die Passage, nachdem ein kleineres Kreuzfahrtschiff, die *The World*, bereits 2012 erfolgreich war.

Der Nördliche Seeweg (*Northern Sea Route*, NSR) nördlich von Russland, auch Nordostpassage genannt, erweist sich dagegen als wirtschaftliche Erfolgsgeschichte. Die Geografie ist viel einfacher; alles, was passieren muss, ist, dass sich das Eis im Sommer etwas nach Norden zurückzieht, um eine übersichtliche Passage nahe der Festlandküste zu ermöglichen. Am problematischsten ist heute die Wilkizkistraße nördlich von Sibirien, wo die Küste einen Bogen nach Norden macht und die Neusibirischen Inseln im Weg sind, um die herum sich das Eis im Sommer manchmal hält. Wenn wir uns Abb. 6.4 ansehen, stellen wir fest, dass der Nördliche Seeweg 2005 eisfrei war, aber nicht 2007. In den letzten Jahren war sie jeden Sommer eisfrei, und abenteuerlustige Reedereien haben begonnen, Frachtschiffe und Tanker hindurchzuschicken. Im Jahr 2013 gab es 49 Durchquerungen während einer 154-tägigen Saison mit 1.355.897 t Ladung, die Häfen am östlichen und westlichen Ende des Seewegs ansteuerten (Humpert 2014; siehe auch Arctic Council 2009). Im Jahr 2014 sank die Tonnage durch den Ausfall von ein

oder zwei regulären Spediteuren auf 274.000 t. Dennoch scheint es vielversprechende Perspektiven für Flüssigerdgas-Tanker (*liquefied natural gas*, LNG) zu geben, die arktisches Gas auf den Markt bringen, für Öltanker, die dasselbe mit Öl machen, für Frachtschiffe, die sibirische Gemeinden bedienen, und für verschiedene Spezialschiffe. So wurde beispielsweise vorgeschlagen, dass japanische Gefrierschiffe, die Lachs und anderen Fisch von US-Fischern in den Aleuten kaufen, ihn direkt über den Nördlichen Seeweg nach Europa liefern könnten. Sie wurde auch für den Transport abgebrannter Kernbrennstoffe vorgeschlagen, damit die Schiffe jedes Risiko vermeiden, von Piraten angegriffen zu werden. Aber merkwürdigerweise wird die Route für die Containerschifffahrt nicht als vielversprechend angesehen, weil der Containerfrachtverkehr eine Reihe von Zwischenstopps zwischen Ladepunkt und Ziel erfordert, was auf dem Nördlichen Seerweg nicht möglich ist. Das hat begeisterte lokale Behörden auf Orkney (an der Bucht Scapa Flow) und auf Island nicht davon abgehalten, ihre Gemeinden als Standorte für große arktische Containerterminals vorzuschlagen. Das alles ist nichts Neues: Zwischen den Weltkriegen wurden Teile des Nördlichen Seewegs benutzt, um bedauernswerte politische Gefangene zu den abscheulichsten Teilen des Gulag-Archipels zu transportieren. Es gab auch einen regen Handel mit Häfen entlang der Route, der nur eine Teilpassage erforderte. Vor vielen Jahren, nachdem ich in Cambridge einen Vortrag gehalten hatte, kam ein ehemaliger Seemann britischer Handelsschiffe zu mir und sagte, dass er in den 1930er-Jahren auf britischen Holzs Schiffen gearbeitet habe, die Igarka ansteuerten. Neu ist, wie zuverlässig die Schifffahrt im Sommer abläuft, aufgrund der hohen Wahrscheinlichkeit, dass die gesamte Strecke eisfrei ist.

So haben wir im Sommer bereits eine zuverlässige transarktische Schifffahrtsroute, für eine zweite fehlt nicht mehr

viel. Das ultimative Ziel, das von einem weiteren Rückzug des Meereises abhängt, wird eine echte transpolare Schiffahrtsroute sein, die Schiffe vom Nordpazifik über die Beringstraße und dann direkt über den Nordpol über die Framstraße zum Atlantik führt. Die Einsparungen sind enorm: Yokohama nach Hamburg beträgt 6600 Seemeilen durch den Nördlichen Seeweg und 11.400 Seemeilen über Suez, die Einsparungen bei einer direkten Transpolarroute wären noch größer. Die weiteren Vorteile einer Transpolarroute sind tiefes Wasser über den größten Teil der Strecke und die Unabhängigkeit von Regulierungsbehörden und deren Gebühren, insbesondere in Russland. Es wird weiterhin Sicherheitsvorschriften und auch Vereinbarungen über einen Such- und Rettungsdienst im Falle eines Unfalls geben, was der Arktische Rat organisiert, der Verband der acht Nationen, die arktisches Territorium besitzen (Russland, USA, Kanada, Schweden, Finnland, Norwegen, Dänemark und Island). Schiffe mit Eisschutz, die in der Lage sind, ohne Eisbrecherbegleitung Fracht durch einjähriges Eis zu transportieren, werden derzeit begeistert von Schiffbaunationen wie Südkorea entworfen. Solche Schiffe könnten der Norilsk Nickel ähneln, einem Frachtschiff für arktisches Nickel mit einem für den Eisgang verstärkten Heck, das im Eis mithilfe eines Azipod-Antriebs, der um 360° drehbar ist, mit dem Heck voraus fährt.

7.5 Unmittelbare Folgen des Eisrückzugs – Öl und der Meeresboden

Eine weitere unmittelbare Folge des Meereisrückgangs ist, dass die Arktis offener für die Ölexploration ist als in der Vergangenheit. Bis vor Kurzem fand die Ölexploration

in der Arktis vor allem im Flachwasser statt. In der Beaufortsee zum Beispiel befanden sich die ersten Offshore-Bohrungen in sehr flachem, nur wenige Meter tiefem Wasser, bei Prudhoe Bay und im Mackenzie-River-Delta. Man schüttete einfach Sand zu einer Berme auf – einer künstlichen Insel – und stellte darauf den Bohrturm auf. Dann ging die Suche im etwas tieferen Wasser weiter, einige Dutzend Meter tief, was noch immer mit einer am Grund montierten Struktur bewältigt werden kann. Auch in der russischen Arktis wurden die Bohrungen vor der Jamal-Halbinsel und vor Sachalin in ähnlicher Wassertiefe mithilfe am Grund befestigten Bohrinseln durchgeführt. Diese flachen Gewässer waren Teil der saisonalen Eiszone, die einen Teil des Jahres eisfrei ist.

Aber dann weiteten sich die Suche nach Öl und das Wissen über Ölvorkommen auf immer tieferes Wasser aus. In nicht arktischen Gebieten führte dies zu Bohrungen in sehr tiefen Gewässern vor Brasilien und, mit katastrophalen Folgen, im Golf von Mexiko, wo sich die Tragödie der Deepwater Horizon in 1800 m Tiefe ereignete. Die Ölindustrie hat nun die tieferen Gewässer der Arktis ins Auge gefasst, jenseits der sehr flachen und gut umrissenen Kontinentalschelfe. Aber hier trifft Wirtschaft auf Politik: Das Seerecht für den Arktischen Ozean ist noch nicht vereinbart. Im Prinzip handelt es sich bei dem Gebiet jenseits von 200 Meilen vor der Küste um internationale Gewässer, die unter die Zuständigkeit der Internationalen Meeresbodenbehörde der Vereinten Nationen (ISA) fallen. Wenn sich der Kontinentalschelf weiter erstreckt (wie es bei sehr breiten arktischen Schelfen der Fall ist), dann kann der nächstgelegene Küstenstaat seinen Einflussbereich bis zur Schelfkante ausdehnen, aber nicht weiter. Jeder weitere Anspruch wird einer intensiven Prüfung unterzogen.

Das Problem ist, dass die Arktis ein Merkmal besitzt, das Gegenstand endloser rechtlicher Argumente sein kann, den Lomonossow-Rücken (Abb. 7.4). Dieser Rücken beginnt nördlich der Grenze zwischen Grönland und Ellesmere-Insel und verläuft quer durch den Arktischen Ozean, nahe am Nordpol vorbei, bis zum sibirischen Kontinentschelf. Als Erweiterung des sibirischen Schelfs wird er von Russland beansprucht. Da das andere Ende auf der Grenze Kanada-Grönland liegt, beanspruchen ihn zugleich sowohl Kanada als auch Dänemark. Aber die meisten anderen Länder sagen, dass es internationale Gewässer sein sollten. Der Rücken selbst ist eigentlich ein Fragment mit sibirischen Kontinentalgesteinen, das abgespalten wurde, als vor etwa 80 Mio. Jahren in der Arktis ein mittelozeanischer Rücken entstand und damit begann, neue Meereskruste zu bilden. Der Lomonossow-Rücken wanderte von Sibirien

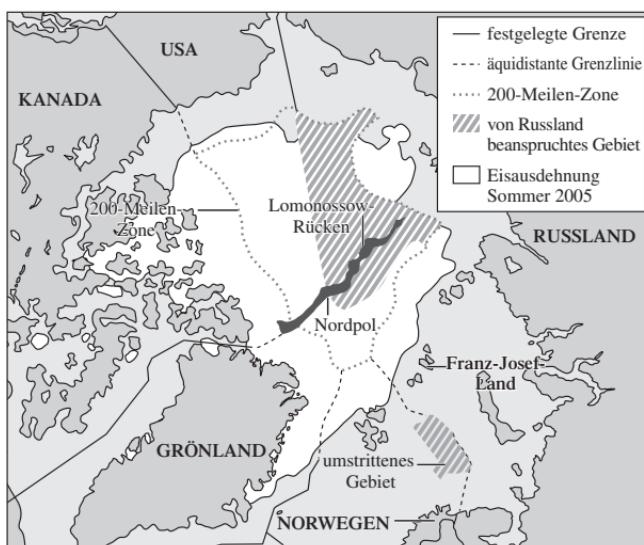


Abb. 7.4 Der Lomonossow-Rücken, mit dem Russland seine Ansprüche auf arktische Gewässer begründet. (Nach University of Durham, UN, Marum)

weg und hat nun die Mitte des Arktischen Ozeans erreicht. Er ist in der Tat nicht mit Sibirien, Kanada oder Grönland verbunden, sodass alle drei Behauptungen ins Leere laufen sollten. Die Enden des Rückens bestehen aus anderen Gesteinen als die benachbarten Kontinentschelfe. Er ist auch nicht wirklich ein Schelf, er war nur einmal Teil eines Schelfs, aber an einer ganz anderen Stelle als dem Bereich, in dem er sich heute befindet. Eigentlich sollte er unter die Zuständigkeit der Vereinten Nationen fallen, aber Russland, Kanada und Dänemark sind entschlossen, nationale Forderungen zu stellen. In einem kindischen Auftritt stellte Russland im Jahr 2007 mit einem Tauchboot am Nordpol in 4200 m Wassertiefe Metallflaggen auf.

Sobald der Besitz des Meeresbodens festgelegt ist, kann die Ölexploration in tiefem Wasser weitergehen, und der Rückzug des Meereises wird dies wesentlich erleichtern. Die nächste Phase der Bohrungen im einige Dutzend Meter tiefen Wasser wird mit Bohrschiffen erfolgen, die dynamisch positioniert sind und um die unermüdlich Eisbrecher ihre Kreise ziehen und das Eis in kleine Fragmente zerlegen, um die Bohrschiffe vor der Kraft des Eises zu schützen, damit sie nicht aus ihrer Position geschoben werden. Ein solches sommerliches Szenario wird einfacher sein, wenn das Eis dünner oder noch besser gar nicht vorhanden ist und wenn die Bohrsaison verlängert werden kann und einen möglichst großen Teil des Jahres umfasst. Wenn die Ölförderung beginnt, kann dies, wie es die Russen in der Petschorasee tun, mit einer verstärkten Bohrinsel erfolgen, die gegen das Eis verstärkte Tanker füllt. Die von Klimaforschern vorgeschlagene Idee, noch nicht geförderte fossile Brennstoffe im Boden zu belassen, da wir die zulässige Kohlendioxidbelastung der Erdatmosphäre bereits überschritten haben, werden Ölkonzerne und nach Steuereinnahmen gierende Politiker

heftig bekämpfen. Abgesehen von ideologischen Gründen erkennt die Ölindustrie, dass eine globale Entscheidung, die neue Exploration einzustellen, die Vermögenswerte jeder Ölgesellschaft sofort abwertet und somit zu einem finanziellen Zusammenbruch führt, sowohl der Unternehmen als auch des fragilen globalen Finanzsystems.

7.6 Das Problem der Ölverschmutzung und wie man damit umgeht

Eine allgemein anerkannte Bedrohung für die arktische Umwelt ist die Gefahr, dass bei einem Blowout am Meeresboden Öl austritt und sich ausbreitet. Dies war Gegenstand eines Berichts, den ein Gremium des Nationalen Forschungsrates der USA verfasst hat, an dem ich beteiligt war (National Research Council of the National Academics 2014). Wir kamen zu dem Schluss, dass es keine bekannte Methode gibt, um nach einem Blowout auf dem Meeresboden eine Sanierung durchzuführen. Das Öl würde als Teil einer Öl-und-Gas-Fahne vom Meeresboden aufsteigen und die Unterseite des Meereises mit Öltröpfchen besprühen, die sich zu einem Ölteppich ansammeln würden. Das Eis bewegt sich ständig, sodass sich bei einem Blowout das eingeölte Eis vom Unfallort weg bewegt, während ständig sauberer Eis nachkommt und mit Öl besprührt wird. Im Winter würde schnell neues Eis unter der Ölschicht wachsen und ein „Ölsandwich“ entstehen, in dem das Öl für den Rest des Winters im Eis eingeschlossen ist. Während dieser Zeit kann sich die Eisscholle mehr als 1000 km bewegen und in einem ganz anderen Teil der Arktis landen. Wenn die Oberflächenschmelze im Frühjahr beginnt, fängt das Öl an,

zur Oberseite des Eises aufzusteigen, indem es sich durch Soleabflusskanäle nach oben bewegt (Kap. 2). Im Frühjahr schmelzen diese an, öffnen sich und bieten einen Weg zur Oberseite des Eises. Plötzlich treten überall an den Ausritten dieser Kanäle kleine Ölflecken auf, die meist zu klein sind, um entfernt oder verbrannt zu werden. Später im Sommer, wenn die ganze Scholle schmilzt, landet das Öl im Wasser. Dann wird Ölverschmutzung im offenen Wasser der sommerlichen Arktis weit verbreitet sein. Dies ist besonders gefährlich für das marine Ökosystem und für Millionen von wandernden Seevögeln.

Ein guter Teil dieses Wissens liegt bereits seit einem Forschungsprogramm der kanadischen Regierung in den Jahren 1974 bis 1976 vor, dem Beaufort Sea Project, an dem ich ebenfalls gearbeitet habe (Wadhams 1976). Die kanadische Regierung wollte verstehen, wie sich die Gefahr durch Öl unter Eis auswirkt, bevor sie Bohrungen in eisbedeckten Gewässern erlaubte. Sie ließ es tatsächlich zu, dass in der Arktis ziemlich große Ölverschmutzungen verursacht wurden, nur um festzustellen, was dann passieren würde, einschließlich einer Verschmutzung unter landfestem Eis, die über einen Winter andauerte. Ich erinnere mich gut an ein Offshore-Experiment im Arktischen Ozean, bei dem wir Öl unter einen Presseisrücken pumpten, wobei Taucher den Fortschritt verfolgten. Meine Aufgabe war es zu pumpen, ich spritzte mit einer Handpumpe Rohöl unter das Eis, aber auch über meinen Parka, den ich danach wegwerfen musste, da der Gestank nicht mehr entfernt werden konnte. Seitdem ist der Fortschritt der Wissenschaft so langsam wie ein Gletscher. Es gilt nun als politisch inkorrekt, wenn Öl auch nur zu Versuchszwecken in der Arktis verschüttet wird. Die Sorge um die Umwelt verhindert jeden Fortschritt, die Auswirkungen einer Ölpest auf die Umwelt zu erforschen. Als wir an dem genannten Bericht von 2014 arbeiteten, stellten wir

erstaunt fest, dass das kanadische Projekt von 1974 bis 1976 immer noch die beste Datenquelle war.

Unsere Schlussfolgerung im Jahr 2014 war, dass ein großer Blowout unter Eis tatsächlich verheerender wäre als der Blowout der Deepwater Horizon, da das Eis dafür sorgt, dass Öl in niedrigen Konzentrationen weit über den Arktischen Ozean verteilt wird, was die Reinigung erschwert. Wir kamen auch zu dem Schluss, dass das Bohren eines Entlastungsbohrlochs (eine häufig empfohlene Methode zum Stoppen des Blowouts) zu lange dauern würde, weshalb jeder Betreiber über eine geeignete Glocke verfügen sollte, um einen Blowout zu überdecken und ihn schneller zu verschließen. Das erste Opfer dieser neuen Sichtweise war Shell im Jahr 2012. Man baute eine neue Art von Verschlussmechanismus, der schon beim ersten Test versagte. Shell verfolgte die Pläne weiter und begann 2015 mit den Bohrungen in der Tschuktschensee, gab aber noch im ersten Sommer auf. Das Gremium des Nationalen Forschungsrates der USA hofft, dass die Regulierungsbehörden unsere Schlussfolgerungen akzeptieren werden, wenn es darum geht, festzulegen, wie arktische Bohrungen durchgeführt werden sollen. Die Gründung des Gremiums war von der Angst vor einem arktischen Ölboom infolge des Eisrückgangs motiviert, bei dem der Umweltschutz aus Eile, neue Standorte abzusuchen und Öl zu fördern, vergessen würde. Aber das ist nicht geschehen. Die Unternehmen waren sehr zurückhaltend. Der wahrscheinliche Grund dafür ist, dass BP die enormen Kosten der Deepwater-Horizon-Katastrophe tragen musste (geschätzte 54,6 Mrd. Dollar an Bußgeldern, Reinigungskosten und Vergleichszahlungen) und der Konzern fast bankrottging. Der Verursacher zahlt. Und wenn es zu einem Blowout in der Arktis kommt, insbesondere wenn das in US-amerikanischen Hoheitsgewässern passiert, werden die Kosten ebenfalls vom Verursacher getragen, und sie

könnten sogar noch höher sein als im Golf von Mexiko. Unter diesen Umständen haben sich die Ölgesellschaften zurückgehalten, und sie finden es attraktiver, sich am Frackingboom zu beteiligen.

Die Angst der Industrie und der Regulierungsbehörden vor einem teuren Unfall hat zu einigen überraschenden Entscheidungen geführt. Die kürzlich abgewählte kanadische Regierung von Stephen Harper war nicht gerade bekannt für ihre Sorge um Umweltfragen: Sie war verantwortlich dafür, dass eine große Zahl Umweltwissenschaftler auf Bundesebene gefeuert wurde, während sie in Alberta die Ausweitung des Teersandabbaus vorantrieb. Es handelt sich dabei um eine der verschwenderischsten Formen fossiler Brennstoffe, allein wegen der Energie, die benötigt wird, um sie zu „kochen“ und nützliche Kohlenwasserstoffe zu gewinnen. Doch am 2. April 2014 hörten wir, dass sich Kanadas Bundesverkehrsministerin Lisa Raitt unverblümt gegen Öltransporte durch den Norden Kanadas ausgesprochen hatte. Kanada hat einen arktischen Hafen an der Hudson Bay in Churchill, Manitoba, der per Bahn mit dem südlichen Kanada verbunden ist. Eine Firma namens Omnitrax Ltd. hatte den Plan, Öl per Eisenbahnwaggon nach Churchill zu schicken und es dann per Schiff durch die östliche Hälfte der Nordwestpassage nach Europa zu exportieren. Die Ministerin sagte dazu:

„Ich kann Ihnen sagen: Eine Ölpest oder ein Unfall in der Arktis ist ein Bild, das wir unter keinen Umständen haben wollen ... Es geht nicht immer nur um die Wirtschaft. Ich kann nicht glauben, dass ich das als Konservative gesagt habe. Aber es geht nicht immer um die Wirtschaft. Man muss es mit dem, was in Bezug auf die Sicherheit und die Umwelt geschieht, in Einklang bringen.“

Die Provinzregierung von Manitoba hatte zuvor versucht, die Ufer der Hudson Bay zu einem Schutzgebiet zu machen, zum Teil, weil sie derzeit ein Zufluchtsort für Eisbären sind, die sich, von ihren normalen Lebensräumen durch die globale Erwärmung vertrieben, in Churchill versammeln, um aus Mülltonnen zu schllemmen. Aber sie wollten damit auch die seltenen Beluga-Wale in den Küstengewässern der Umgebung schützen. Es war ungewöhnlich, aber ermutigend, dass die Bundesregierung dies unterstützte.

Der Rückzug des arktischen Meereises sorgt dafür, dass ein ganzjähriger Blowout tatsächlich traurige Folgen hätte. Im in den 1970er-Jahren untersuchten Blowout-Szenario wird Öl, das sandwichartig in Eisschollen transportiert und in der Arktis verteilt wurde, im Sommer aus den Schollen freigesetzt, die am Eisrand schmelzen. Damit bildet sich um den Rand des sommerlichen Meereises ein Saum aus schwimmendem Öl. In Zukunft wird es im Sommer keine Eisgrenze mehr geben, weil es kein Eis mehr geben wird. Das eingelöste Eis schmilzt dann vollständig ab und erzeugt Ölteppiche, die sich über dem offenen Wasser im gesamten Arktischen Ozean ausbreiten können. Der Schaden und die Kosten der Sanierung werden enorm sein.

Abschließend möchte ich auf eine eng damit zusammenhängende Frage eingehen, nämlich die nach der sich verändernden Meeresökologie der Arktis im Zuge des Eisrückzugs. Es besteht die Möglichkeit, dass es neue Fischgründe geben wird, da die besseren Lichtverhältnisse in der Wassersäule im Frühjahr zu einer höheren und früheren Planktonproduktion führen. Es ist schwierig vorherzusagen, wie genau sich die Meeresökologie verändern wird, aber es ist sicher, dass der Rückzug des Meereises es den Fangflotten ermöglichen wird, ihre Aktivitäten geografisch und saisonal auszuweiten, um die verfügbaren lebenden Ressourcen zu nutzen.

7.7 Wahrscheinlicher Verlauf eines weiteren Eistrückzugs in diesem Jahrhundert

Es ist äußerst schwierig, Vorhersagen von Modellierern zu finden, wie sich die Dauer der Saison mit offenem Meer im Laufe des Jahrhunderts ändern wird. Der Hauptgrund ist das völlige Versagen der meisten Modelle, auch nur den aktuellen Zustand des sommerlichen Eises der Arktis zu reproduzieren. Die Debatte darüber, ab welchem Jahr die Arktis im September eisfrei sein wird, hat die Aufmerksamkeit von der wichtigeren Frage abgelenkt, nämlich wie schnell und in welcher Weise das arktische Meereis zu jeder Jahreszeit zurückgehen wird. Die arktische Todesspirale zeigt, dass sich die eisfreie Saison innerhalb weniger Jahre nach dem ersten Verschwinden der Eisdecke im September auf etwa fünf Monate ausgedehnt haben wird, nämlich von Juli bis November. Aber wird es damit aufhören? Die Antarktis hat eine saisonale Eisbedeckung, bei der die meisten Bereiche des Südlichen Ozeans vier bis fünf Monate lang eisfrei sind und dann für den Rest des Jahres mit einjährigem Eis bedeckt sind. Ist das stabil? Wärmeres Bedingungen werden sicherlich dazu führen, dass die eisfreie Jahreszeit durch die Sonneneinstrahlung in Verbindung mit wärmeren Lufttemperaturen länger wird, aber es ist wahrscheinlich, dass auch nach einem eisfreien Sommer, in dem sich das offene Wasser erwärmt, eine Jahreszeit kommen wird, wahrscheinlich im Dezember, bei der sich durch die Kombination von Dunkelheit, kälteren Lufttemperaturen und der Freisetzung gespeicherter Sommerwärme an der Meeresoberfläche wieder Eis bildet, das bis zum folgenden Frühjahr oder Frühsommer bestehen bleibt.

Es ist schwer vorstellbar, dass der Arktische Ozean das ganze Jahr über eisfrei sein könnte, auch wenn die

Todesspirale einen solchen Endzustand für die Wintermonate vorhersagt –, denn auch das winterliche Eisvolumen schwingt langsam nach innen. Eine Arktis, die auch im Winter eisfrei ist, würde einen völlig anderen Wasserumlauf und Wärmekreislauf entwickeln als eine saisonal eisbedeckte Arktis. Das mag innerhalb eines Jahrhunderts geschehen, aber bis dahin dürften weitaus einschneidendere Veränderungen auf unserem Planeten stattgefunden haben, die ihn für den Menschen vielleicht unbewohnbar gemacht haben. Ich behandle diese Veränderungen, die durch den Rückzug des arktischen Meereseises verursacht werden oder damit zusammenhängen, im nächsten Kap. 8. Und wir müssen erkennen, dass ein Großteil der Schäden bereits angerichtet wurde: Der sibirische Schelf ist bereits im Sommer eisfrei, und dies führt zur Bedrohung durch eine massive Freisetzung von Methan, wie ich in Kap. 9 beschreiben werde.

Literatur

- Arctic Council (2009) Arctic marine shipping assessment 2009 report
- Humpert M (2014) Arctic shipping: an analysis of the 2013 Northern Sea Route season. Arctic yearbook. Arctic Institute of North America, Calgary
- IPCC (2013) The physical science basis. Working group 1 contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Summary for policy-makers. Cambridge University Press, Cambridge, S 21
- Kwok R (2009) Outflow of Arctic Ocean sea ice into the Greenland and Barents Seas: 1979–2007. *J Clim* 22:2438–2457
- Laxon SW et al (2013) CryoSat-2 estimates of Arctic sea ice thickness and volume. *Geophys Res Lett* 40:732–737

- National Research Council of the National Academies (2014) Responding to oil spills in the U. S. Arctic marine environment. National Academies Press, Washington, DC
- Polyakov IV, Walsh J, Kwok R (2012) Recent changes of Arctic multiyear sea-ice coverage and the likely causes. Bull Am Meteor Soc. <https://doi.org/10.1175/bams-d-11-00070.1>
- Rothrock DA, Percival DB, Wensnahan M (2008) The decline in Arctic sea-ice thickness: separating the spatial, annual and interannual variability in a quarter century of submarine data. J Geophys Res Oceans 113:C05003
- Tietsche S, Notz D, Jungclaus JH, Marotzke J (2011) Recovery mechanisms of Arctic summer sea ice. Geophys Res Lett 38:L02707
- Wadhams P (1976) Oil and ice in the Beaufort Sea. Polar Rec 18(114):237–250
- Wadhams P (2014) The „Hudson-70“ voyage of discovery: first circumnavigation of the Americas. In: Nettleship DN, Gordon DC, Lewis CFM, Latremouille MP (Hrsg) Voyage of discovery, fifty years of marine research at Canada’s Bedford Institute of Oceanography. BIO- Oceans Association, Dartmouth, S 21–28

8

Die Beschleunigung durch arktische Rückkopplungen

8.1 Das Konzept der klimatischen Rückkopplungen

In Kap. 7 haben wir untersucht, wie sich der Rückzug des arktischen Meereises direkt auf die Zukunft des Arktischen Ozeans und die Vorstellung, die wir von ihm haben, auswirkt. Auf den ersten Blick ist der arktische Meereisrückzug in wirtschaftlicher Sicht ein Segen für die Arktis. Wir können den Arktischen Ozean als eine mögliche Handelsroute betrachten anstelle eines Hindernisses, zumindest im Sommer. Wir können ihn als einen Ort ansehen, an dem wir leichter nach Öl und Gas suchen und dessen Meereslebewesen wir nutzen können. Alle diese Veränderungen sind oberflächlich betrachtet positiv, aber sie beruhen nur auf dem direkten Effekt des Eisrückzugs, der menschliche Aktivitäten in den arktischen Meeren während eines längeren Teils des Jahres ermöglicht. Wir haben dabei nicht

berücksichtigt, wie der Rückzug des Meereises andere Aspekte des globalen Klimasystems verändern wird. Dieses Kapitel wird zeigen, dass die indirekten Auswirkungen des Rückzugs des arktischen Meereises für den Planeten als Ganzes überwältigend negativ sind – und zwar in einem solchen Maße negativ, dass der Rückzug des arktischen Meereises als eine totale Katastrophe für die Erde angesehen werden muss.

Der Grund ist eine positive Rückkopplung. Der Rückzug des arktischen Meereises, der direkt durch die Erwärmung durch Treibhausgase hervorgerufen wird, hat seine eigenen Auswirkungen, die wiederum die globalen Veränderungen auf dem Planeten verstärken und katastrophale Folgen haben werden, die in keinem Verhältnis zum ursprünglichen Wandel stehen. Diese Rückkopplungen und Zusammenhänge bestehen im gesamten Klimasystem. Wie der Dichter und Mystiker Francis Thompson es ausdrückte:

Du kannst an einer Blume nicht rühren,
ohne einen Stern zu stören.

In Kap. 6 haben wir bereits eine Rückkopplung kennengelernt, die von großer Bedeutung sein kann, die Wellen-Eis-Rückkopplung in der Beaufortsee. Dabei ermöglicht der Eisrückzug im Sommer zunehmend größere Wellen, was in Wechselwirkung mit dem Eis zu einem stärkeren Zerbrechen und schnellerer Schmelze und im Herbst zu einem verzögerten Eiswachstum führt. Die anderen wichtigen Rückkopplungen, die wir in diesem Kapitel betrachten werden, sind die

- Eis-Albedo-Rückkopplung,
- Rückkopplung durch Rückgang der Schneegrenze,
- Wasserdampfrückkopplung,

- Rückkopplungen beim Abschmelzen der Eisschilde,
- Rückkopplung bei arktischen Flüssen,
- Rückkopplung durch Fuß und die
- Rückkopplung bei der Ozeanversauerung.

Die potenziell gefährlichste Rückkopplung von allen – die Methanfreisetzung durch Auftauen des submarinen Permafrosts – wird ein eigenes Kapitel erhalten (Kap. 9). Darüber hinaus hat sich in jüngster Zeit gezeigt, dass der Rückzug des arktischen Eises mit Veränderungen in der Position des Strahlstroms (auch Jetstream genannt) verbunden ist oder diese sogar verursachen kann. Das führt zu neuen Mustern extremer Wetterbedingungen, die in den landwirtschaftlich wichtigen Gebieten der nördlichen Hemisphäre zu kritischen Zeiten des Jahres auftreten und eine Bedrohung für die globale Nahrungsmittelversorgung darstellen (Kap. 10).

8.2 Eis-Albedo-Rückkopplung

Wir haben in Kap. 2 festgestellt, dass die Albedo des offenen Wassers, das heißt der Anteil der einfallenden Sonneneinstrahlung, der direkt in den Weltraum reflektiert wird, nur etwa 0,1 beträgt, während die Albedo des Meereises von etwa 0,5 bis zu 0,9 reichen kann. Neuschnee, der auf glattes Meereis fällt, hat eine Albedo von 0,9. Sind Sie im März oder April, wenn die Sonne relativ hoch steht und die Tage lang sind, auf einer solchen Schneefläche unterwegs, können die blendenden Reflexionen reichen, um Schneebblindheit zu verursachen. Diese ist sehr schmerhaft und viele frühe Forscher litten daran, etwa Captain Scott und seine Männer.

Sobald es irgendwelche Rücken oder andere geneigte Flächen im Eis gibt, oder wenn der Schnee sich allmählich

umwandelt oder vom Wind zu Hügeln und Rillen verweht wird, die Sastrugi genannt werden, sinkt die Albedo auf 0,8. Kommt dann der Frühling, sinkt die Albedo noch mehr: Wenn die Lufttemperatur über 0 °C steigt und sich im oberflächlichen Schnee kleine Schmelzmengen bilden, wird das Weiß matter und die Albedo nimmt ab. Sie sinkt weiter, wenn der Schnee tatsächlich schmilzt. Es entsteht ein feuchter Matsch, der Ruß enthalten kann, der im Laufe des Winters abgelagert, aber durch aufeinanderfolgende Schneefälle verdeckt wurde. Der tiefste Wert ist erreicht, wenn die Oberfläche aus Blankeis besteht, das mit Schmelztümpeln durchsetzt ist. Die Schmelztümpel selbst haben eine dunkle Oberfläche und absorbieren die Sonnenstrahlung bevorzugt, sodass sie immer tiefer ins Eis schmelzen – oft schmelzen sie durch das ganze Eis hindurch und das Eis gleicht einem Schweizer Käse, was ihm eine sehr geringe mechanische Festigkeit verleiht (Abb. 8.1). Die durchschnittliche Albedo der Fläche kann zu diesem Zeitpunkt 0,5 oder sogar weniger betragen. Eine noch größere Veränderung mit einem endgültigen Rückgang der Albedo auf 0,1 ist, wenn das Eis vollständig verschwindet.

Es war schon immer problematisch, die sommerliche Albedo zu messen und zu modellieren. Wir kennen die Albedo von Neuschnee sehr genau (0,9), aber sie hat keinen großen Einfluss auf den Wärmehaushalt der Arktis, da es im Winter wenig Sonneneinstrahlung gibt. Im Sommer, wenn die Strahlungsintensität am höchsten ist, müssen wir die durchschnittliche Albedo einer Oberfläche abschätzen, die aus schmelzendem, matschigem Schnee, Eis und Schmelztümpeln zusammengesetzt ist und sich bei steigenden oder fallenden Oberflächentemperaturen innerhalb von Stunden verändern kann. Die ersten erfolgreichen Modellierer der arktischen Thermodynamik, Gary Maykut und Norbert Untersteiner, mussten sich 1971



Abb. 8.1 Im Sommer gebildete Schmelztümpel auf dem Meer-eis, die teilweise zu Schmelzlöchern durchgeschmolzen sind, aufgenommen im Arktischen Ozean (NASA)

diesem Problem stellen und zum Teil ziemlich willkürliche Werte für die sommerliche Albedo wählen. In den vergangenen Jahren haben Leute wie Don Perovich vom US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory einen starken Schwerpunkt auf sorgfältige Feldbeobachtungen gelegt, die gezeigt haben, wie groß die Variabilität ist (Perovich und Polashenski 2012).

Die Albedoänderung hat also zwei Aspekte in Bezug auf den Klimawandel. Bei einem wärmeren Klima beginnt die Schmelze an der Oberfläche früher im Jahr, und der Rückgang der Albedo von einem Wert mit Schneedeckung (0,8 oder 0,9) auf einen Wert für schmutziges Eis mit Schmelztümpeln (etwa 0,5) erfolgt früher und ermöglicht so eine höhere Strahlungsabsorption während der kritischen Hochsommermonate. Hinzu kommt der Rückzug des Meereises, eine einfache Veränderung mit noch größerer Auswirkung: von einer mit sommerlichem Eis

bedeckten Oberfläche, so schmutzig sie auch ist, zu einer freien Wasserfläche. Damit sinkt die Albedo von 0,5 auf 0,1. Daher sind die Details darüber, wie die Albedo im Sommer abnimmt, weniger wichtig als gute Werte für die Fläche der Eisbedeckung, damit wir wissen, wie viel offenes Wasser das bisherige Meereis ersetzt hat. Wir können an dem „Einbiss“ ins Meereis mit offenem Wasser im Jahr 2007 (Abb. 6.4) sehen, wie groß dieser Albedoverlust sein kann – und ein Albedoverlust ist ein Strahlungsgewinn, eine Zunahme bei der Erwärmung des Planeten.

Wie ernst ist dieser Albedoverlust für die Erwärmung des Planeten? Eine Studie von Kristina Pistone und Kollegen am Scripps Institution of Oceanography (Pistone et al. 2014) schätzt, dass der Flächenverlust von sommerlichem Meereis zwischen den 1970er-Jahren und 2012 dazu geführt hat, dass der Rückgang der durchschnittlichen Albedo eine Erwärmungsleistung hat wie ein zusätzliches Viertel der Menge an Kohlendioxid, die der Mensch in diesem Zeitraum der Atmosphäre zugeführt hat. Dies wird als „schnelle Rückkopplung“ bezeichnet, da sie sofort wirksam ist. Die Reduzierung der reflektierten kurzweligen Energie führt zu einem weltweiten zusätzlichen Strahlungsantrieb, der die globalen Temperaturen erhöht. Die Studie umging das Problem, in der gesamten Arktis am Boden die tatsächliche Albedo zu messen, mithilfe eines Satelliten namens CERES, der Strahlungswerte direkt misst. Sie fanden heraus, dass die Albedo, gemittelt über die gesamte Arktis und das ganze Jahr, zwischen 1979 und 2011 von 0,52 auf 0,48 fiel. Das scheint nicht viel zu sein, aber es entspricht $6,4 \text{ W m}^{-2}$ zusätzlicher Strahlung, die in der gesamten Arktis absorbiert wird, oder $0,21 \text{ W m}^{-2}$ über die gesamte Erde gemittelt.

8.3 Rückkopplung durch Rückgang der Schneegrenze

Warme Luft über einer eisfreien Arktis lässt auch die Schneegrenze zurückgehen. Wenn das Meereis zurückgeht, verstärkt eine schnellere Schneeschmelze im Frühjahr in den arktischen Küstenregionen die Eis-Albedo-Rückkopplung. Das liegt wahrscheinlich an erwärmten Luftmassen, die sich vom eisfreien Meer über die Küstengebiete bewegen. Betrachtet man den Monat Juni, wenn die Sonneneinstrahlung maximal ist, dann hat sich bis 2012 eine 6 Mio. km^2 große negative Flächenanomalie der Schneebedeckung gegenüber 1980 entwickelt (Abb. 8.2). Das heißt, im Vergleich zum spä-

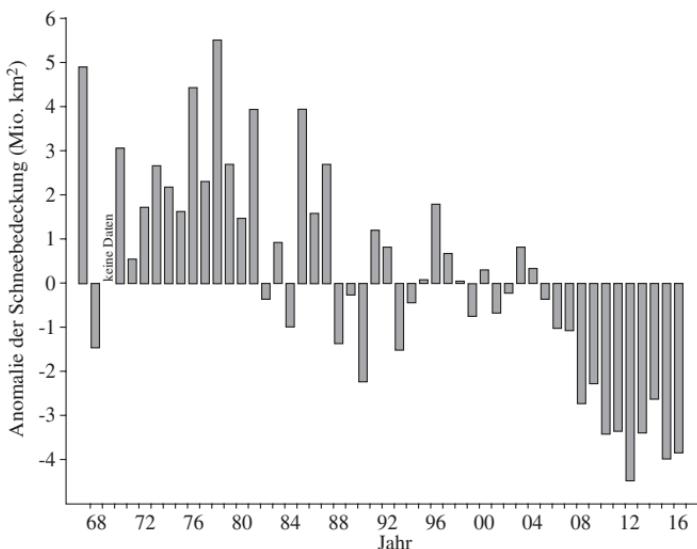


Abb. 8.2 Änderung der schneebedeckten Fläche auf der Nordhalbkugel im Juni im Zeitraum 1967–2016 (Global Snow Lab, Rutgers University)

ten 20. Jahrhundert ist die Schneedecke im Hochsommer um 6 Mio. km² kleiner. Dies ist von der gleichen Größenordnung wie die negative Anomalie der Meereisbedeckung im gleichen Zeitraum, und die Veränderung der Albedo von schneedecktem Land zu schneefreier Tundra ist ungefähr die gleiche wie von Meereis zu offenem Wasser. Noch hat niemand Berechnungen für die Tundra veröffentlicht, wie Pistone und ihre Kollegen es für das Meereis getan haben, aber die Ähnlichkeit der Werte bedeutet, dass der Rückzug der Schneegrenze und der Meereisrückzug jeweils etwa im gleichen Maß zur globalen Erwärmung beitragen. Die gesamte Eis- und Schne-Albedo-Rückkopplung fügt somit 50 % (nicht nur 25 %) zur durch CO₂-Emissionen ausgelösten Erderwärmung hinzu. Das zeigt, wie die Arktis nicht nur auf den globalen Klimawandel reagiert, sondern ihn auch antreiben kann.

Dies ist von größter Bedeutung, wird aber oft übersehen: Wenn die globale Rückkopplung durch die arktischen Schnee- und Eisrückgänge die durch CO₂-Emissionen verursachte Erwärmung um 50 % erhöht, sind wir an dem Punkt angelangt, an dem wir nicht mehr einfach sagen sollten, dass die Freisetzung von CO₂ in die Atmosphäre unseren Planeten erwärmt. Stattdessen müssen wir sagen, dass das CO₂, das wir der Atmosphäre hinzugefügt haben, unseren Planeten bereits so weit erwärmt hat, dass Eis- und Schneerückkopplungsprozesse die Wirkung um weitere 50 % verstärken. Wir sind nicht weit von dem Punkt entfernt, ab dem die Rückkopplungen den Klimawandel selbst vorantreiben werden – das heißt, wir müssen der Atmosphäre dann überhaupt kein weiteres CO₂ hinzufügen, die Erde erwärmt sich auch so schon von selbst. Dies ist eine Phase der sogenannten galoppierenden Erwärmung (*runaway warming*), die möglicherweise auch zur Umwandlung

der Venus in einen heißen, trockenen, leblosen Planeten führte. Wenn Jimi Hendrix auf der Gitarre spielte, hatte er die Fähigkeit, Passagen nur mit Rückkopplungen zu spielen – seine Finger zupften nicht die Saiten, sondern er manipulierte die elektronischen Rückkopplungen, um die Klänge zu erzeugen. Wir nähern uns schnell der Phase, in der der Klimawandel für uns die Musik spielen wird, während wir hilflos zusehen und unsere Reduzierung der CO_2 -Emissionen ohne Wirkung bleibt.

8.4 Wasserdampfrückkopplung

Die Wasserdampfrückkopplung hängt direkt von einer Änderung der Lufttemperatur ab. Wir addieren zum Wasserdampfgehalt der Atmosphäre etwa zusätzliche 7 % für jedes Grad, um das wir die Luft erwärmen, was wiederum etwa $1,5 \text{ W m}^{-2}$ Strahlungsantrieb bedeutet, da Wasserdampf ein Treibhausgas ist. Derzeit erwärmt sich die Arktis mit ihrem arktischen Verstärkungsfaktor sehr schnell, während sich die weltweiten Lufttemperaturen in den letzten zehn Jahren nur langsam erwärmt haben, wahrscheinlich aufgrund einer erhöhten Wärmeaufnahme durch die Tiefsee. In der Arktis gibt es somit eine starke lokale Wasserdampfrückkopplung, die abgestrahlte langwellige Strahlung zurückhält und deren Energie nahe der Eis- und Meeresoberfläche hält. Wenn die lokale arktische Temperatur um $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ gestiegen ist, wie in den vergangenen Jahren, dann ist die Wasserdampfkonzentration um über 20 % gestiegen und hat die polare Erwärmung über dem Arktischen Becken um etwa $4,5 \text{ W m}^{-2}$ erhöht. Diese lokale Rückkopplung ist spezifisch für die Arktis, aber sie hat eine große Wirkung und muss in globale Erwärmung einbezogen werden.

8.5 Schmelzende Eisschilde und Meeresspiegelanstieg

Die Albedorückkopplung dürfte die größte Bedrohung für unseren Fortbestand auf der Erde sein. Ein weiterer Faktor, der das Leben für uns in den kommenden Jahrzehnten immer unangenehmer machen wird, ist der mit dem Rückzug der Eisschilde verbundene Meeresspiegelanstieg.

Bis in die 1980er-Jahre war die gängige Meinung der Meeresspiegelforscher, dass zwei Faktoren, die jeweils etwa gleich groß sind, zum globalen Meeresspiegelanstieg beitragen. Der erste ist die Erwärmung des Ozeans. Während sich das Meer erwärmt, weil es aus der wärmeren Atmosphäre Wärme aufnimmt und weil zugleich durch die Blockade der ausgehenden Strahlung durch Treibhausgase die nach unten gerichtete Einstrahlung zunimmt, dehnt sich das Meerwasser aus und der Meeresspiegel steht höher. Zuerst wurde nur Oberflächengewässer erwärmt, aber inzwischen breitet sich die Erwärmung auf tiefere Ozeanschichten aus. Dies wird als sterischer Meeresspiegelanstieg bezeichnet, bei dem kein zusätzliches Wasser in den Ozean gelangt. Der zweite Faktor ist ein Anstieg durch Wasser, das aus Quellen an Land in den Ozean fließt, und als wichtigste Quellen wurden Gletscher außerhalb der Polargebiete ausgemacht – in den Alpen, im Himalaja, die Gletscher von Alaska und Chile und in Norwegen sowie die wenigen hoch gelegenen Gletscher in niedrigen Breitengraden, wie beispielsweise auf dem Gipfel des Kilimandscharo. Wir haben eine ziemlich gute Vorstellung davon, wie schnell diese Gletscher an Masse verlieren, weil die Gletscherforscher sie jahrzehntelang kartiert haben. Zunächst nutzten sie traditionelle Methoden, etwa indem sie Stangen in den Gletscher steckten und beobachteten, wie schnell

die Oberfläche abnahm. In jüngster Zeit werden Satelliten eingesetzt, um die Höhe der Eisoberfläche zu messen. Schon in den 1980er-Jahren zogen sich fast alle Gletscher der Welt zurück – wir alle haben dramatische Bilder von fast verschwundenen Alpengletschern gesehen. Ich besuchte das berühmte Columbia Icefield in den Rocky Mountains 1970 und erneut 2008. 1970 reichte die Gletscherzungue bis direkt an den Trans-Canada-Highway, aber 2008 war eine lange Busfahrt nötig, um sie zu erreichen. Heute sind alle Gletschersysteme der Welt auf dem Rückzug, wie Abb. 8.3 beweist. Dass in den 1980er-Jahren einzelne Gletscher vorrückten, war selbst ein Ergebnis der globalen Erwärmung – die Küstengletscher Norwegens gewannen an Masse, weil wärmere,

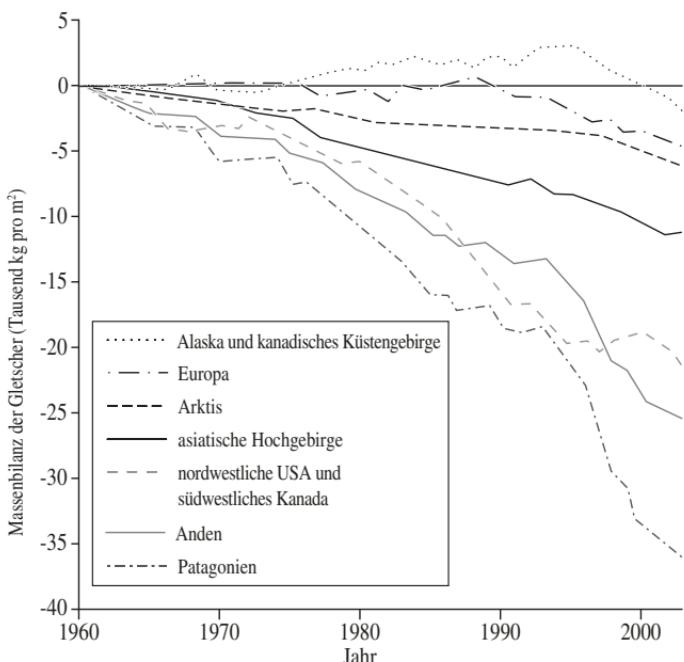


Abb. 8.3 Veränderungen in der Massenbilanz von Gletschern in verschiedenen Regionen der Welt (Dyurgerov und Meier 2004)

feuchtere Winde über sie wehten. Aber jetzt sind auch sie auf dem Rückzug.

Der Gletscherrückzug sowie kleinere Beiträge etwa von Staudämmen und Wasserkraftwerken tragen zur sogenannten eustatischen Komponente des Meeresspiegelanstiegs bei, bei der den Weltmeeren Wasser zugeführt wird. Inzwischen kommt aber noch Schmelzwasser von den beiden großen Eisschilden der Polargebiete, die Grönland und die Antarktis bedecken, hinzu und übertrifft den sonstigen Beitrag durch Gletscherrückzug sogar. Das ist eine reale Bedrohung. Der Grönländische Eisschild mit seinen hohen Breitengraden und seiner enormen Höhe von 2 bis 3 km war früher das ganze Jahr über vollkommen gefroren, bis auf eine geringe Schmelze an den Rändern. Dann bildete sich seit Mitte der 1980er-Jahre jeden Sommer für kurze Zeit Schmelzwasser auf der Oberseite des Eisschildes. Diese kurze Zeitspanne wurde länger und die Schmelzfläche vergrößerte sich. Im Jahr 2012 brach die Eisschmelze alle Rekorde, im Zeitraum vom 1. bis 11. Juli breitete sie sich auf 97 % der Oberfläche des Eisschildes aus (Abb. 8.4). Selbst das beunruhigte die Modellierer damals nicht. Sie berechneten, dass der größte Teil des Schmelzwassers Ende des Sommers wieder gefrieren würde, sodass die Verluste des Eisschildes gering sein würden, und dass es mehrere Tausend Jahre dauern würde, bis der Eisschild vollständig abschmilzt und sein Wasser ins Meer abgibt – womit der Meeresspiegel um 7,2 m ansteigen würde. Aber dann entwickelte sich ein Phänomen, mit dem sie nicht gerechnet hatten – die Gletschermühlen. Dabei handelt es sich um riesige Entwässerungslöcher im Eis, die von der Oberfläche durch das Eis hindurch direkt nach unten führen, in vielen Fällen bis zum 3 km tiefer liegenden Gestein. Das Schmelzwasser kann von der Oberfläche in einem beängstigenden Schwall durch diese Gletschermühlen abfließen. Auf

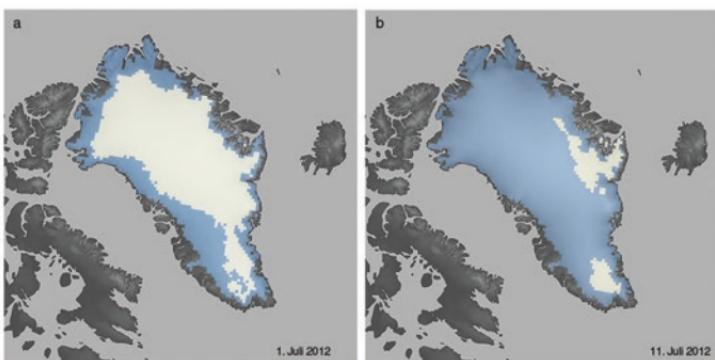


Abb. 8.4 Extremes Schmelzereignis im Juli 2012 auf dem Grönlandischen Eisschild. Die gesamte blau schattierte Fläche wurde per Satellit als nass erkannt (NOAA, Special Sensor Microwave/Imager an Satelliten aus dem Defence Meteorological Satellite Program, Daten bereitgestellt von Thomas Mote, University of Georgia)

dem Weg nach unten durch das Eis gibt das Wasser seine Wärme auf verschiedenen Niveaus ab und erwärmt den gesamten Eisschild bis an den Schmelzpunkt. Am Boden findet das Wasser durch Kanäle unter dem Eis seinen Weg ins Meer und schmiert dabei die Eisunterseite, sodass der Eisschild und insbesondere seine Auslassgletscher schneller fließen. Eric Rignot von der NASA hat mithilfe von Satellitenbildern festgestellt, dass viele grönlandische Gletscher doppelt so schnell fließen wie in der Vergangenheit (Rignot und Kanagaratnam 2006). Das bedeutet, dass sie doppelt so viel Süßwasser in Form von Eisbergen in den Ozean abgeben. Der Verlust zeigt sich in der Schrumpfung des Eisschildes. Wir können inzwischen die Masse des Eisschildes genau messen, indem wir ein Satellitenpaar der NASA namens *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE) verwenden. Diese messen leichte Veränderungen der Schwerkraft mit hoher Genauigkeit und damit, wie sich die Eismasse unter ihnen verändert.

Sie haben gezeigt, dass der Grönlandische Eisschild jetzt 300 km^3 Wasseräquivalent pro Jahr verliert, eine Rate, die weiter zunimmt und bereits so hoch ist wie der Verlust aller anderen Gletscher zusammen.

Es gibt noch einige kleinere Faktoren, die ebenfalls für den Anstieg des eustatischen Meeresspiegels verantwortlich sind. Einer davon ist der Transfer von fossilem Grundwasser aus Aquiferen in den Wasserkreislauf. Da Grundwasser aus unterirdischen Grundwasserleitern gepumpt wird, in denen es seit vielen Jahrtausenden von der Atmosphäre abgeschirmt war, fließt es, nachdem es genutzt wurde, in Flüsse, verdampft in die Atmosphäre und wird schließlich der Wassermasse des Ozeans zugeführt. Dies trägt positiv zum Anstieg des Meeresspiegels bei. Andere vom Menschen verursachte Effekte, zum Beispiel das Zurückhalten von Wasser in Staudämmen, wirken sich netto negativ aus, da die Zahl der Staudämme weltweit ständig zunimmt.

Eine weitere kleine Rückkopplung ist mit der Änderung der Eishöhe auf den Eiskappen verbunden. Die Gesamthöhe des Grönlandischen Eisschildes selbst beginnt langsam zu sinken, und je niedriger sie wird, desto höher ist die Oberflächentemperatur der Eiskappe (da die Temperaturen in größeren Höhen niedriger sind), sodass im Sommer umso mehr abschmilzt. Dies führt dazu, dass die Höhe der Eisoberfläche schneller abnimmt, was zu einer stärkeren Erwärmung führt, und so weiter in einer Rückkopplungsschleife. Dieser Effekt ist bisher wahrscheinlich gering, könnte aber in späteren Phasen des Eisschildrückgangs an Bedeutung gewinnen und den endgültigen Untergang beschleunigen.

Bis vor Kurzem wurde davon ausgegangen, dass sich der Antarktische Eisschild in einer annähernd neutralen Massenbilanz befindet, da jede Schmelze durch verstärkten Schneefall ausgeglichen werde, insbesondere

in den Bergen um die antarktische Küste. Aber seit die GRACE-Satelliten auch die Antarktis überwachen, hat man beobachtet, dass sich auch der Antarktische Eisschild definitiv im Rückzug befindet, wenn auch noch nicht so schnell wie Grönland (McMillan et al. 2014). Die neueste Schätzung lautet, dass der Antarktische Eisschild 84 km^3 pro Jahr verliert, verglichen mit mindestens 300 km^3 für Grönland. Doch auch das ist alarmierend, denn es gibt in der Antarktis viel mehr Eis, das abschmelzen kann, was einem Meeresspiegelanstieg um 60 m entspricht. Außerdem gehen Glaziologen davon aus, dass ein Teil des Antarktischen Eisschildes weniger stabil ist als bisher angenommen: das Westantarktische Eisschild im Bereich der Antarktischen Halbinsel. Nach einer substantiellen Schmelze könnte es sich von seiner Basis lösen, was zu einem plötzlichen Meeresspiegelanstieg von mehreren Metern führen würde.

Angesichts dieser besorgniserregenden Gefahren blieb der Weltklimarat (IPCC) selbstzufrieden – vor allem im Jahr 2007 in seinem 4. Bewertungsbericht (AR4). Da sie Schwierigkeiten hatten, den eustatischen Meeresspiegelanstieg abzuschätzen, gaben die Autoren des Berichts einfach nur den sterischen Anstieg an und extrapolierten diesen bis zum Ende des Jahrhunderts auf gerade mal 30 cm Meeresspiegelanstieg bis 2100. Sie wiesen zwar darauf hin, dass dieser Wert nur einen Teil ausmacht und dass die Gletscherschmelze nicht mit einbezogen wurde, aber die meisten Nichtwissenschaftler und Politiker lasen das Kleingedruckte nicht. Für den Hochwasserschutz zuständige Behörden legten ihren Planungen zum Teil sehr schwerwiegende Unterschätzungen des Meeresspiegelanstiegs zugrunde, beispielsweise die Stadtverwaltung von Shanghai. Der Weltklimarat korrigierte diesen Fehler 2013 in seinem 5. Bewertungsbericht (AR5), wählte aber immer noch einen niedrigen Wert für seine

Schätzung für Ende des Jahrhunderts (52 bis 98 cm für RCP8.5, das *business-as-usual*-Szenario), während die meisten Glaziologen glauben, dass der Anstieg deutlich über 1 m liegen wird und sogar 2 m betragen kann. Die Zahl des Weltklimarats basiert auf einer linearen Projektion, wobei davon ausgegangen wird, dass die Rate des Meeresspiegelanstiegs über das ganze Jahrhundert hinweg mehr oder weniger konstant bleiben wird. Aber wir wissen, dass Rückkopplungsschleifen zu nichtlinearen Veränderungen führen. Beim Rückgang des Meereises beispielsweise nimmt das Volumen des sommerlichen Meereises immer schneller in einer exponentiellen Kurve ab und nicht in einer geraden Linie. Das macht einen großen Unterschied. Die Rückkopplungen beim Rückgang der Eisschilde, die den eustatischen Meeresspiegelanstieg bestimmen, sind ebenfalls exponentielle oder zumindest beschleunigende Prozesse. Wenn wir einen beschleunigten Anstieg des Meeresspiegels zulassen, wird der Gesamtanstieg bis 2100 viel größer sein als nach linearen Schätzungen. James Hansen, ehemaliger Direktor des NASA Goddard Space Sciences Institute, schätzte, dass sich die Rate des Meeresspiegelanstiegs alle zehn Jahre mindestens verdoppelt, sodass die selbstgefälligen Prognosen des Weltklimarats über den Gesamtanstieg in überraschend kurzer Zeit ernsthaft überflügelt werden könnten.

Ich habe mich 2004 an dieser Debatte beteiligt, ausgelöst durch eine Frage, die noch immer nicht beantwortet wurde. Die Frage stammt nicht von mir, mein wissenschaftliches Vorbild, Walter Munk von der Scripps Institution of Oceanography, stellte sie. Damals, kurz bevor die Mission GRACE die Erfassung des Eisschildes erleichterte, schlug der Ozeanograf Sid Levitus eine geniale Methode zur Berechnung des eustatischen Meeresspiegelanstiegs vor. Er unternahm eine Art Zensus

der Hydrografie des Weltmeeres. Die vielen Millionen ozeanografischen Messungen, die jemals auf der Welt durchgeführt wurden, gruppierte er auf einer gerasterten Weltkarte – und betrachtete, wie sich der durchschnittliche Salzgehalt des Ozeans, verteilt über alle Ozeane und Tiefen, in 50 Jahren verändert hatte. Er ging davon aus, dass jede Veränderung auf Gletscherschmelzwasser zurückzuführen ist, der die Ozeane verwässern und den durchschnittlichen Salzgehalt verringern würde. Seine Berechnungen für den eustatischen Meeresspiegelanstieg entsprachen dem, was von anderen Methoden bekannt war, sodass alles in Ordnung schien. Walter Munk jedoch, mit seinem unvergleichlichem wissenschaftlichen Tiefblick kombiniert mit entwaffnender Einfachheit, erinnerte mich daran, dass ich den Rückzug und die Ausdünnung des Meereises seit 1976 gemessen hatte und dass es, wenn das Meereis schmilzt, zur Verdünnung des Ozeans beiträgt, ohne zu einem Anstieg des Meeresspiegels beizutragen (das ist das Prinzip des Archimedes – das Meereis schwimmt bereits im Wasser, wie die Eiswürfel in einem Gin Tonic). Die von mir gemessene Schmelzmenge betrug etwa 300 km^3 pro Jahr, was in etwa dem Verlust durch den Gletscherrückgang entspricht. Dennoch entsprach die mit der Methode von Levitus gemessene Verdünnung des Ozeans den Beobachtungen zum Gletscherrückgang – ganz ohne das Abschmelzen des Meereises zu berücksichtigen. Warum war das so? Irgendwas stimmte nicht. Die Veränderung des Salzgehalts im Meer entspricht dem Beitrag der Gletscherschmelze, damit blieb kein Platz für das zusätzliche Süßwasser aus dem schmelzenden Meereis. Walter und ich schrieben gemeinsam einen Artikel über diesen Widerspruch, der in einer angesehenen Zeitschrift veröffentlicht wurde (Wadhams und Munk 2004). Wir warteten auf eine Antwort

und auf Vorschläge der zum Meeresspiegel arbeitenden weltweiten Forschungsgemeinschaft – schließlich ist Munk ein weltweit bekannter Ozeanograf. Und es ging ganz klar um einen Widerspruch, den es zu lösen galt. Dennoch haben wir keine einzige Antwort oder Stellungnahme zu unserem Artikel erhalten. Ich habe das Problem sogar auf einer globalen Meeresspiegelkonferenz in Paris vorgestellt, aber die Präsentation wurde ohne Kommentare oder Fragen aufgenommen. Walter bemerkte milde: „Diese Meeresspiegelforscher leben in ihrer eigenen Welt.“ Wir warten noch immer auf eine Antwort auf unseren Artikel von vor einem Jahrzehnt, aber auf jeden Fall wurde die Methode von Levitus seither durch Messungen mit GRACE ersetzt. Der einzige relevante Vorschlag, den ich von einem physischen Ozeanografen erhalten habe, ist, dass Schmelzwasser aus dem Meereis möglicherweise viele Jahre lang in der Arktis verbleibt, da es an der Drehbewegung des Beaufort-Wirbels teilnimmt und so vor der Mittelungstechnik von Levitus versteckt wurde – Ozeandaten aus hohen arktischen Breitengraden wurden bei dieser kaum verwendet.

Die genaue Größe des Meeresspiegelanstiegs, der mit einer bestimmten Menge an Meereisrückzug verbunden ist, wurde nicht bestimmt. Qualitativ gesehen ist jedoch deutlich zu erkennen, dass mit dem Rückzug des Meereises im Sommer wärmere Luft über den Grönlandischen Eisschild strömt. Das sommerliche Meereis war in der Vergangenheit eine Art Klimaanlage, sowohl für die Atmosphäre als auch für den Ozean. Es hielt die Wassertemperatur im Sommer auf 0 °C – und, wie wir in Kap. 9 sehen werden, hat das Fehlen dieses Temperaturreglers eine katastrophale Wirkung. Das Meereis hielt auch die sommerlichen Lufttemperaturen nahe 0 °C. Ohne die mäßigende Wirkung des sommerlichen Meereises steigen

die Lufttemperaturen über dem Arktischen Ozean und damit über dem nahe gelegenen Land deutlich über 0 °C an, wodurch die Oberfläche des Eisschildes schmilzt.

8.6 Rückkopplung bei arktischen Flüssen

Eine weitere Rückkopplung ist die höhere Wasser-temperatur von Flüssen, die nach Norden in den Arkti-schen Ozean fließen. Während sich die Schneegrenze an Land zurückzieht, sinkt die Albedo der Landoberfläche im Frühsommer dramatisch ab. Dies führt zu einer viel stärkeren Erwärmung der nördlichen Tundra, und das Wasser aus der Schneeschmelze fließt durch wärmere Landstriche, bevor es in das inzwischen eisfreie Schelf-meer am Rand des Arktischen Ozeans gelangt, ihn weiter erwärmt und den Rückgang des Meereises beschleunigt. Dies wiederum beschleunigt den Rückgang der Albedo, was die Erwärmung der Küstenzone erhöht, die Schneegrenze weiter nach hinten treibt, die Erwärmung der Tun-dra beschleunigt, die Temperatur der Flüsse erhöht und so weiter. Der Effekt ist wahrscheinlich geringer als bei vielen anderen hier diskutierten Rückkopplungen, aber es ist ein klassischer Fall einer positiven Rückkopplung, die sich in mehreren Stufen entwickelt.

8.7 Rückkopplung durch Ruß

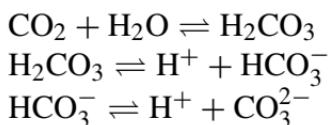
In jüngster Zeit wurde eine weitere Rückkopplung identifiziert und inzwischen als bedeutsamer ein-gestuft, als ursprünglich angenommen – der Einfluss von abgelagertem Ruß, der aus Waldbränden, Brandrodungen,

Dieselverbrauch und industriellen Aktivitäten stammt, auf das Reflexionsvermögen von Schnee und Eis und auf die Schmelzgeschwindigkeit (Quinn et al. 2011). Glaziologen waren es gewohnt, Schmutz auf Gletschern zu sehen, der von den umliegenden Bergen dorthin geblasen wurde. Sie fanden heraus, dass er in der Lage ist, ein erstaunliches kleines, in sich geschlossenes Ökosystem zu schaffen. Ein kleiner Schmutzfleck, der sich im Frühsommer auf einem Gletscher angesammelt hatte, absorbiert bevorzugt die Sonneneinstrahlung, wird wärmer als das umgebende Eis und schmilzt in dieses ein kleines Loch, in dem er versinkt. Unten im Loch können Bakterien gedeihen und eine Algenmatte bilden, wobei das Schmelzwasser Salze aus dem Schmutz löst und Nährstoffe liefert. Das Ergebnis wird als Kryokonit bezeichnet, und ich empfehle es als Beispiel dafür, wie unerbittlich sich auf der Erde Leben an den aussichtslosesten Orten etablieren kann. Kryokonite können einem Gletscher eine schwarze, grüne oder sogar rosa Färbung verleihen.

Abgesehen von den Kryokoniten bildet sich zu Beginn der Schmelzsaison eine Schmutzschicht auf dem Meereis, wenn der Oberflächenschnee schmilzt und die Summe aller im Winter abgelagerten Verunreinigungen freigelegt wird. Bis vor Kurzem wurde dies tendenziell vernachlässigt oder in die Berechnungen der sommerlichen Albedo einbezogen. Bis zu einem gewissen Grad können wir dies weiterhin tun, indem wir unsere Abschätzungen nach unten korrigieren. Wenn wir versuchen, den Fuß isoliert zu betrachten, scheinen seine globalen Auswirkungen ziemlich gering zu sein. Der Weltklimarat schätzt den Strahlungsantrieb durch Fuß auf $0,04 \text{ W m}^{-2}$. Beobachtende Studien zeigen, dass seine Konzentration in der arktischen Atmosphäre seit 1990 zurückgegangen zu sein scheint, vielleicht weil die schlimmsten Luftverschmutzer, wie China, beginnen, ihre Abgase zu filtern.

8.8 Rückkopplung bei der Ozeanversauerung

Wir wissen, dass der Ozean saurer wird, und dass dies auf einen erhöhten Gehalt an CO_2 zurückzuführen ist, das sich im Meerwasser unter Bildung von Kohlensäure löst. Die chemische Reaktion ist



und es besteht ein komplexes Gleichgewicht zwischen den verschiedenen Ionen. Das H^+ ist das saure Wasserstoffion. Wenn der Atmosphäre mehr CO_2 zugeführt wird, löst sich ein Teil davon im Ozean auf, was als wertvoller Puffer zur Reduzierung der globalen Erwärmung dient. Das gelöste CO_2 nimmt jedoch an den genannten Reaktionen teil, die zu einem höheren Säuregehalt im Ozean führen. Das wird letztendlich schwerwiegende Folgen haben, weil es zur Auflösung der Schalen von Meerestieren führt (die aus Kalziumkarbonat bestehen), insbesondere der Kalkschalen winziger einzelliger Organismen, die Foraminiferen heißen und die im gesamten Ozean vorkommen (Abb. 8.5). Die Schalen von abgestorbenen Foraminiferen bilden im Ozean eine Art Regen und lagern sich auf dem Meeresboden ab, wo sie einen sehr typischen Sedimenttyp bilden, der als Kalkschlamm bezeichnet wird. Dies ist eine der wenigen Möglichkeiten, wie Kohlenstoff, der durch unsere Verbrennung fossiler Brennstoffe in das Energiesystem der Erde eingreift, tatsächlich dauerhaft aus dem System entfernt werden kann. Wenn ich also mit meinen SUV einkaufen fahre, löst sich ein Teil des von mir produzierten CO_2 (etwa 41 %) im Meer auf, und

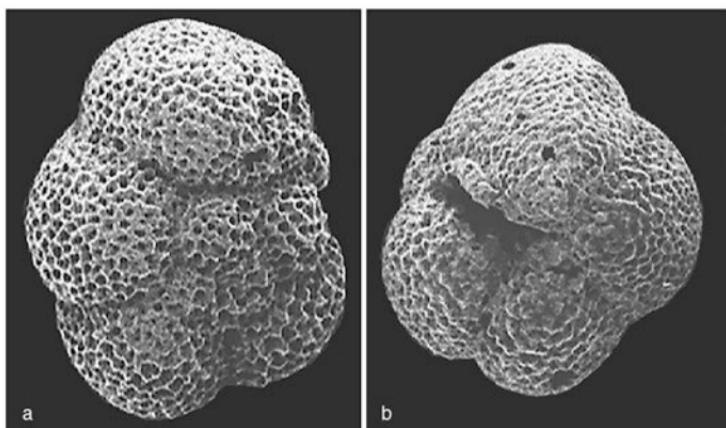


Abb. 8.5 Zwei Foraminiferenarten aus dem Arktischen Ozean. Die Schalen sind winzig, nur 0,06 bis 1 mm breit

Mikroorganismen nehmen einen Teil davon auf, um ihre Biomasse aufzubauen. Das planktische Lebewesen stirbt, sinkt auf den Meeresboden, und mein CO_2 wird ganz harmlos aus dem Klimasystem der Erde entfernt. Das Problem ist, dass, wenn der Ozean sauer wird, es einen Punkt gibt, an dem sich die Schale auf ihrem 4000 m langen Fall bis zum Meeresboden wieder auflöst. Wir alle wissen aus der Schulchemie, was passiert, wenn Säure und Kalk vermischt werden. Der Kohlenstoff der Schale wird wieder in den Ozean zurückgeführt und bleibt Teil des Klimasystems. Noch schlimmer ist, dass einige ziemlich große Meerestiere, die Schalen aufbauen, wie zum Beispiel Pteropoden (Meeresschnecken), ebenfalls ihre Schalen verlieren und zu formlosen Kreaturen werden, einer leichten Beute für Raubtiere. Dies wurde in Laborstudien mit angesäuertem Wasser nachgewiesen. Wenn dies geschieht, könnten wir erwarten, dass der Anteil des im Ozean in Lösung gehenden CO_2 abnimmt, und tatsächlich ist der Anteil nach jüngsten Schätzungen in 30 Jahren von 41 auf 40 % gesunken. Dies ist kein großer

Rückgang, aber groß genug, um darüber besorgt zu sein – vor allem, wenn wir sehen, dass er sich zu beschleunigen beginnt.

Was hat das mit dem Meereis zu tun? Der Rückgang des Meereises setzt den Ozean der Versauerung aus, weil ein Ozean, der noch kein zusätzliches CO_2 aufgenommen hat, in den Kontakt mit der Atmosphäre kommt. Entsprechend verstärkt der Rückzug des Meereises diese CO_2 -Senke tatsächlich. Im Hinblick auf das atmosphärische CO_2 ist dies eine negative Rückkopplung, die um den Preis einer verstärkten Versauerung des Arktischen Ozeans gekauft wurde. Dies ist ein seltener Fall einer negativen Rückkopplung, auch wenn durch die zusätzliche Versauerung des Ozeans und den daraus resultierenden Verlust der Kohlenstoffsenke die Rückkopplung auf lange Sicht positiv sein könnte.

8.9 Welche Rückkopplungen sind am stärksten?

Wenn wir die sieben Arten von Rückkopplungen in diesem Kapitel betrachten, wirkt sich wahrscheinlich die Albedorückkopplung sowohl im direkten Zusammenhang mit Meereis als auch beim Rückzug der Schneegrenze am stärksten aus (der Rückzug der Schneegrenze in den Küstengebieten um die Arktis ist zum Teil selbst eine Folge des Meereisrückzugs und der Erwärmung der Winde). Wenn wir die beiden Albedoveränderungen addieren und den Beitrag von Fuß in die Albedoberechnung einbeziehen, ist die Wirkung etwa doppelt so groß wie von Pistone et al. (2014) beschrieben, das heißt, die gesamte Albedorückkopplung addiert 50 % zum Strahlungsantrieb hinzu, den von uns in die Atmosphäre abgegebenes CO_2 .

erzeugt. Ein Werbetexter könnte schreiben: „Liefert sie dem Klimawandel zwei Moleküle – sie bekommen eines gratis dazu.“

Die beschleunigte Schmelze des Grönlandischen Eisschildes steht ebenfalls in direktem Zusammenhang mit dem Rückzug des Meereises. Sie führt zu einem globalen Meeresspiegelanstieg, der sich beschleunigt und in diesem Jahrhundert 1 m überschreiten wird. Viele Leute denken, dass 1 m eine Kleinigkeit ist, und dass wir nur unsere Hochwasserschutzanlagen um 1 m erhöhen müssen. Das ist vielleicht in Großbritannien, in den Niederlanden und in anderen reichen Ländern der Welt möglich (zu einem bestimmten Preis), aber kaum in Bangladesch, wo 20 Mio. Menschen, meist arme Bauern, weniger als 2 m über dem Meeresspiegel leben. Und es gibt eine unheimliche statistische Eigenheit, die sich aus der Form der Glockenkurve der Gauß-Verteilung ergibt (Abb. 8.6). Angenommen, die Glockenkurve von Abb. 8.6 stellt die Verteilung der Höhe des Meeresspiegels an einem bestimmten Ort dar, unter Berücksichtigung der Variabilität aufgrund von Gezeiten, Winden und so weiter. Das kleine Stück der Kurve auf der rechten Seite stellt die Höhe dar, die eine Katastrophe auslöst – ein Versagen der Deiche bei einer Sturmflut, wie in Großbritannien und den Niederlanden im Januar 1953, als das Haus meiner Großeltern in Tilbury überschwemmt wurde. Dieser Bereich unter der Kurve stellt eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit dar. Aber dann verschieben wir die Spitze der Verteilung um 1 m, weil der durchschnittliche Meeresspiegel um diesen Betrag steigt. Wenn wir keine Hochwasserschutzmaßnahmen ergreifen, nimmt die Fläche unter der Kurve im problematischen Bereich um einen großen Betrag zu. Mit anderen Worten: Ein geringer Anstieg des Meeresspiegels führt zu einem

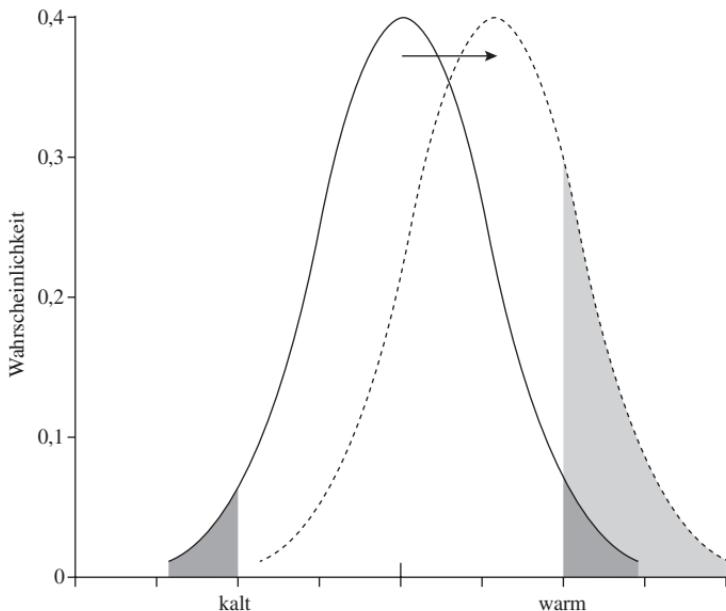


Abb. 8.6 Eigenschaften der Gauß-Verteilung. Wird der Mittelwert um einen kleinen Betrag erhöht, nimmt der Anzahl der Katastrophenereignisse (hellgrau) um einen großen Betrag zu

starken Anstieg der Wahrscheinlichkeit katastrophaler Überschwemmungen.

Rückkopplungen zeigen uns, dass der Rückzug des arktischen Meereises, wenn er die heutige Geschwindigkeit erreicht hat, nicht nur eine Reaktion auf den Klimawandel ist, sondern den Klimawandel auch antreibt. Aber von allen Bedrohungen, die diese Situation mit sich bringt, gibt es eine, die potenziell noch viel schlimmer ist – eine schlagartige Freisetzung von untermeerischem Methan. Dies besprechen wir in Kap. 9.

Literatur

- Dyurgerov MB, Meier MF (2004) Glaciers and the changing earth system. Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado, Boulder
- Maykut GA, Untersteiner N (1971) Some results from a time-dependent thermodynamic model of Arctic sea ice. *J Geophys Res* 76:1550–1575
- McMillan M, Shepherd A, Sundal A, Briggs K, Muir A, Ridout A, Hogg A, Wingham D (2014) Increased ice losses from Antarctica detected by CryoSat-2. *Geophys Res Lett* 41:3899–3905
- Perovich DK, Polashenski C (2012) Albedo evolution of seasonal Arctic sea ice. *Geophys Res Lett* 39(8). <https://doi.org/10.1029/2012gl051432>
- Pistone K, Eisenman I, Ramanathan V (2014) Observational determination of albedo decrease caused by vanishing Arctic sea ice. *Proc Natl Acad Sci* 111:3322–3326
- Quinn PK, Stohl A, Arneth A, Berntsen T, Burkhardt JF, Christensen J, Flanner M, Kupiainen K, Lihavainen H, Shepherd M, Shevchenko V, Skov H, Vestreng V (2011) The Impact of Black Carbon on Arctic climate. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo
- Rignot E, Kanagaratnam P (2006) Changes in the velocity structure of the Greenland ice sheet. *Science* 311:986–990
- Wadhams P, Munk W (2004) Ocean freshening, sea level rising, sea ice melting. *Geophys Res Lett* 31:L11311. <https://doi.org/10.1029/2004GLO20039>



9

Arktisches Methan, eine Katastrophe kündigt sich an

9.1 Submariner Permafrost und warmes Wasser

Der potenziell katastrophale Rückkopplungseffekt, den ich gleich beschreiben werde, ergibt sich aus der Kombination zweier Phänomene: Das Meereis zieht sich zurück, während weiterhin submariner Permafrost in flachen arktischen Meeren vorhanden ist.

Ich habe bereits den schnellen Rückgang der sommerlichen Meereisgrenze beschrieben, womit das Meereis aus großen Teilen der arktischen Schelfmeere verschwunden ist. Das betrifft insbesondere die Meere nördlich von Sibirien, wo es breite Kontinentschelfe mit Wassertiefen von nur 50 bis 100 m gibt. Was passiert mit der Wassersäule in diesen neuerdings eisfreien Meeren?

Die Wassersäule im tiefen Arktischen Ozean besteht aus drei Schichten. Die obere Schicht, das sogenannte Arktische Oberflächenwasser, reicht etwa 150 m tief und

befindet sich am oder nahe dem Gefrierpunkt. Die darunter liegende Schicht, das sogenannte Atlantische Wasser, erstreckt sich bis in etwa 900 m Tiefe und enthält Wärme, die von warmem Wasser aus dem Nordatlantik stammt, das an der Eisgrenze absinkt und sich in mittlerer Tiefe in die Arktis bewegt. Darunter befindet sich eine weitere kalte Schicht, das Bodenwasser, das sich bis zum Meeresboden erstreckt. Wenn ein Kontinentalschelf also nur 50 bis 100 m tief ist, ist nur eine einzige Wasserschicht vorhanden, Arktisches Oberflächenwasser – das wärmere, tiefere Atlantische Wasser bleibt jenseits der Schelfkante. In der „guten alten Zeit“, nämlich vor etwa 2005, war diese Arktische Oberflächenwasserschicht auch im Sommer mit Meereis bedeckt, und dies stellte eine Art Klimaanlage dar, da die einfallende Sonneneinstrahlung das Wasser nicht erwärmen konnte, da sie erst einmal einen Teil des Eises schmelzen musste. Ebenso hielt das vorhandene Eis die lokalen Lufttemperaturen bei etwa 0 °C. Seit 2005, seitdem das Meereis im Sommer vollständig abschmilzt, kann die Sonneneinstrahlung in dieses Schelfwasser eindringen und es erwärmen. Anstatt durch das Eis den ganzen Sommer über auf 0 °C gehalten zu werden, kann nun die Temperatur des Arktischen Oberflächenwassers während des eisfreien Sommers zunehmen. Im Sommer 2011 hat ein NASA-Satellit in der Tschuktschensee eine Oberflächentemperatur von 7 °C gemessen (so warm wie die Nordsee im Winter). Während einer Reise, an der ich im August 2014 teilnahm, verzeichnete der Eisbrecher Healy der US-Küstenwache ebenfalls außergewöhnliche Meeresoberflächentemperaturen in der Tschuktschensee. Auf unserem Weg nach Norden zur Beringstraße erlebten wir vor Nome Lufttemperaturen von 19 °C und Meeresoberflächentemperaturen von 17 °C. Abb. 9.1 zeigt die starke Erwärmung des Oberflächenwassers in der Ostsibirischen See, die im September 2007 auftrat.

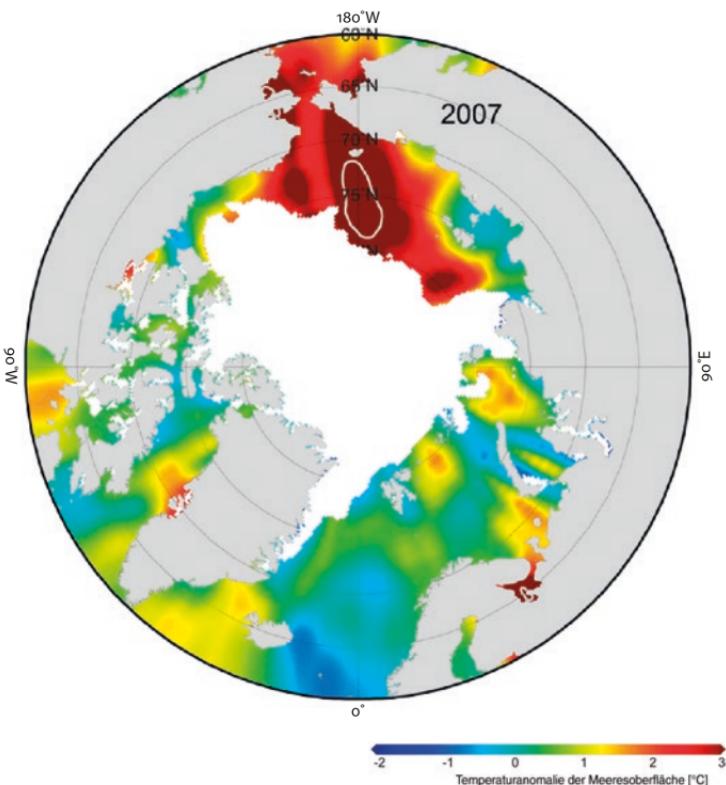


Abb. 9.1 Konturen der Meeresoberflächentemperaturen im Sommer 2007 über den Schelfmeeren nördlich von Sibirien (NOAA: Optimum Interpolation SST V2 product provided by the NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado)

Winde können auf diesen weiten eisfreien Wasserflächen nun signifikante Wellen erzeugen, die das erwärmte Wasser bis zum Boden durchmischen, sodass wir nun zum ersten Mal seit Zehntausenden von Jahren am arktischen Meeresboden wieder Wasser über dem Gefrierpunkt haben.

Auf dem Meeresboden trifft das wärmere Wasser auf das zweite Element der Geschichte, gefrorene Sedimente. Es handelt sich um Relikte der letzten Eiszeit, die eine Fortsetzung des an Land auftretenden Permafrostes unter dem Meer dar-

stellen. In ihnen ist Methan in Form von Methanhydraten (einem sogenannten Clathrat) eingebettet. Dieser außergewöhnliche Feststoff sieht aus wie Eis, brennt aber. Es handelt sich um eine Verbindung aus Methangas (CH_4) und Wasser in einer offenen Kristallstruktur, die nur unter Bedingungen von hohem Druck und/oder niedriger Temperatur stabil ist. Methanhydrate kommen in verschiedenen Sedimenten des Ozeans vor, meist im tiefen Wasser, wo der hohe Wasserdruck für Stabilität sorgt. Die Menge an Methan, das in Methanhydraten weltweit im Meeresboden gespeichert ist, wird auf mehr als das 13-fache der Kohlenstoffmenge in der Atmosphäre geschätzt und beträgt 10.400 Gigatonnen (Gt). In den arktischen Schelfgebieten wären die Hydrate normalerweise aufgrund der geringen Wassertiefe instabil, aber das gefrorene Sediment erzeugt einen ausreichenden Druck, um sie an Ort und Stelle zu halten. Das warme Sommerwasser, das durch den jüngsten Meereisverlust entsteht, lässt diese Sedimente auftauen, sodass sie die Methanhydrate nicht mehr dicht versiegeln. Die gefrorenen Sedimente bildeten sich ursprünglich während der Eiszeit, als der Meeresspiegel niedriger war, und wurden vor 7000 bis 15.000 Jahren überflutet, als sich die flache Ostsibirische See in der sogenannten „holozänen Transgression“ bildete, weil die Eisschilde schmolzen und der Meeresspiegel stieg. Wenn jetzt die Sedimente auftauen, zerfallen die Methanhydrate, die seit Zehntausenden von Jahren im gefrorenen Sediment eingeschlossen sind, und setzen reines Methangas frei. Dieses tritt aus den Sedimenten aus und steigt in großen Fahnen aus Gasblasen an die Wasseroberfläche auf. Methan wird im Wasser oxidiert. Wenn eine Methanfahne im tiefen Wasser aufsteigt, wie es vor der Küste von Spitzbergen in 400 m beobachtet wurde (Westbrook et al. 2009), löst sie sich auf und verschwindet, bevor sie die Oberfläche erreicht. Aber in Wasser, das nur 50 bis 100 m tief ist, hat das Methan dafür keine Zeit und es tritt fast unverehrt an der Meeresoberfläche in die Atmosphäre aus. Wir müssen uns daran erinnern – das vergessen leider auch viele

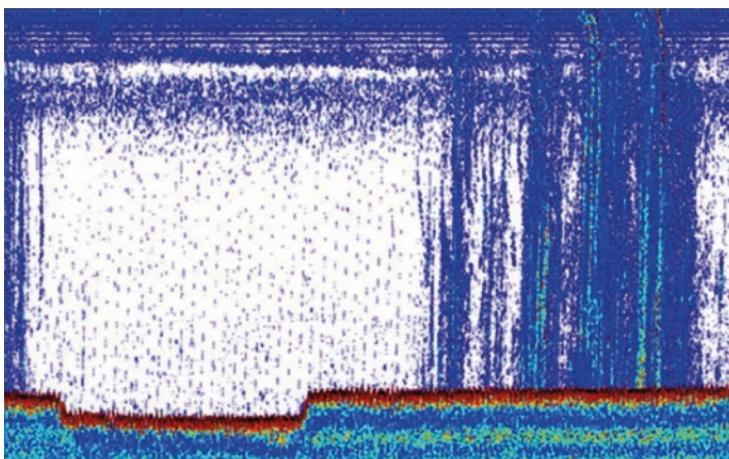


Abb. 9.2 Fahne mit aufsteigende Gasblasen auf dem ost-sibirischen Schelf in einer Wassertiefe von 70 m, erfasst durch einen Sonar (Shakhova et al. 2010)

Wissenschaftler –, dass es erst seit 2005 in den arktischen Schelfgebieten im Sommer große offene Wasserflächen gibt. Wir befinden uns in einer völlig neuen Situation, in der ein ganz neues Schmelzphänomen stattfindet.

Das Methan bildet riesige Wolken aus Gasblasen (Abb. 9.2), die durch die Wassersäule aufsteigen. Oft ist eine Reihe von Fahnen zu erkennen, die von unterschiedlichen Punkten am Meeresboden aufsteigen und an einen untermeerischen Blowout mit Erdöl und Erdgas erinnern (Kap. 7). Das Schelfmeer der ostsibirischen Arktis ist außergewöhnlich flach – mehr als 75 % seiner Gesamtfläche von 2,1 Mio. m² sind flacher als 40 m –, sodass der größte Teil des Methangases nicht in der Wassersäule oxidiert, sondern in die Atmosphäre abgegeben wird. Man stellte fest, dass in diesen Bereichen die atmosphärischen Methankonzentrationen über der Meeresoberfläche bis zu viermal höher sind als die normalen atmosphärischen Werte. Man ging allgemein davon aus, dass in der Winterperiode, in der das Meer mit Eis bedeckt ist, kein Methan aus dem arktischen Schelfmeer freigesetzt

werden kann. Neue Beobachtungen deuten jedoch darauf hin, dass Methanaustritte und andere Emissionen jetzt das ganze Jahr über auftreten. Die Methanemissionen aus Polynjas der europäischen Arktis erwiesen sich als 20- bis 200-mal größer als im Meeresdurchschnitt, was auf winterliche Emissionen hindeutet. Es wurde auch beobachtet, dass sich Methan direkt unter dem winterlichen Meereis ansammelt. Dies alles deutet darauf hin, dass Methan, sobald die Versiegelung aus gefrorenen Sedimenten durch die Sommerschmelze entfernt ist, zu jeder Jahreszeit entweichen kann.

Die Entdeckung und Beobachtung dieser gewaltigen im Sommer im ostsibirischen Schelfmeer auftretenden Fäden aus Methanblasen erfolgte erstmals durch eine jährlich von den USA und Russland gemeinsam durchgeführte Expedition unter der Leitung von Natalia Shakhova und Igor Semiletov (Shakhova et al. 2010), die einige dramatische Unterwasserbilder lieferten (Abb. 9.3). Sie schätzen, dass 400 Gt Methanäquivalent in diesen Sedimenten enthalten sind und 50 Gt aus dem obersten Teil des Sediments – bis in eine Tiefe von Dutzenden von Metern – innerhalb weniger Jahre nach diesem Erwärmungsprozess freigesetzt werden könnten. Modellierer wie Igor Dmitrenko



Abb. 9.3 Methanblasen an der Unterseite des Meereises nehmen eine abgeflachte Form an. Das Meereis, im Hintergrund erkennbar, ist 2,2 m dick (Shakhova et al. 2010)

von der Universität Manitoba haben die küstennahen Sedimente in nur 10 m Wassertiefe untersucht und geschätzt, dass die Zeitskalen für das Auftauen des submarinen Permafrosts und für die Methanfreisetzung langsamer sind, eher in der Größenordnung von 1000 Jahren (Dmitrenko et al. 2011). Aber weiter draußen auf See spielen sich ganz andere Dinge ab.

Natalia Shakhova selbst und auch andere haben auf die verstärkende Rolle der Taliks bei der Methanfreisetzung aus den Sedimenten hingewiesen (Shakhova et al. 2013; Frederick und Buffett 2014). Taliks sind Unregelmäßigkeiten in den Permafrostschichten, die durch Verwerfungen oder lokalisierte Unregelmäßigkeiten verursacht werden und nicht gefroren sind. Sie ermöglichen eine Freisetzung von Methan aus tief in den Sedimenten eingebetteten Hydraten und einen Weg nach oben in Richtung Meeresboden. Shakhova fand heraus, dass viele der in der Ostsibirischen See beobachteten Methanfahnen aus Methan bestanden, das an der Oberfläche eines Taliks freigesetzt wurde. Hier gibt es eine Parallele zur Rolle der Gletschermühlen auf dem Grönländischen Eisschild – sie ermöglichen es, dass thermische Prozesse tiefer im Material ablaufen, als es Modellierer vermuten. Ein Talik bietet Methanmolekülen einen Weg, um aus ihrem Hydratkäfig zu entkommen und sich an der Barriere vorbeizubewegen, die angeblich der Permafrost im Meeresboden bildet, um schließlich am Meeresboden freigesetzt zu werden. Die Emissionsrate hängt daher nicht von der Vorstellung ab, dass beim Auftauen des Permafrosts das Methan Schicht für Schicht aus dem Sediment freigesetzt wird.

Methan ist als Treibhausgas außergewöhnlich stark. Wie ich in Kap. 5 sagte, ist sein Treibhauspotenzial pro Molekül 23- oder 100-mal so stark wie CO_2 (je nachdem, wie man es berechnet). Die Emissionen aus dem Arktischen Ozean könnten die Hauptursache dafür sein, dass die globale Methankonzentration in der Atmosphäre nach einer Stabilisierung um das Jahr 2000 seit 2008 wieder ansteigt

(der andere wahrscheinlich verantwortliche Kandidat sind Lecks beim Fracking, was aber erst etwas später begann). Wie viel Methan wartet darauf, auf diese Weise freigesetzt zu werden? Und wann wird das passieren? Was wird das für das Klima bedeuten? Wir erwarten, dass es den Rückzug des Meereises weiter beschleunigt, die Reflexion der Sonnenenergie verringert und auch den Anstieg des Meeresspiegels beschleunigt, weil die Schmelze des Grönländischen Eisschildes beschleunigt wird. Aber auch weit weg von den Polen werden die Auswirkungen des verschwindenden Eises zu spüren sein.

9.2 Globale Auswirkungen der Methanfreisetzung in der Arktis

Mit zwei Kollegen, Gail Whiteman und Chris Hope, habe ich modelliert, was eine Freisetzung von 50 Gt Methan über zehn Jahre für das Klima bedeuten würde, sowohl in Bezug auf die Temperatur als auch die Kosten (Whiteman et al. 2013). Erinnern wir uns daran, dass dies zwar eine riesige Gasmenge ist und es vielleicht unmöglich erscheint, dass diese auf der Welt freigesetzt werden kann (unsere gesamten jährlichen CO_2 -Emissionen betragen nur 35 Gt), dass es sich aber immer noch um weniger als 10 % des gesamten Methans handelt, von dem angenommen wird, dass es in den Sedimenten der Ostsibirischen See eingeschlossen ist. Um die Auswirkungen eines großen arktischen Methanpulses auf die Weltwirtschaft zu quantifizieren, haben wir das integrierte Bewertungsmodell PAGE09 verwendet, das es ermöglicht, die Auswirkungen der zusätzlichen Emissionen zu verfolgen, bis hin zu Veränderungen des Meeresspiegels, der regionalen Temperaturen sowie regionaler und globaler Auswirkungen wie Überschwemmungen, Gesundheitsproblemen und Wetterextremen unter Berücksichtigung der jeweiligen Unsicherheiten (Hope 2013).

PAGE09 berechnet den Betrag, um den der zwischen heute und 2200 kumulierte Kapitalwert (*net present value*, NPV) der Auswirkungen steigt, wenn eine weitere Tonne CO₂ emittiert wird, oder sinkt, wenn eine Tonne CO₂ eingespart wird – gewissermaßen die sozialen Kosten der CO₂-Emissionen. PAGE09 ist die neueste Version des PAGE-Modells, das Chris Hope am Judge Institute in Cambridge entwickelt hat. Im von der britischen Regierung herausgegebenen Stern-Report (Stern 2006) wird es verwendet, um die Auswirkungen des Klimawandels zu berechnen. Alle Ergebnisse basieren auf 10.000 Durchläufen des Modells, um Unsicherheiten zu ermitteln, wodurch ein vollständiges Bild der Risiken entsteht.

Wir haben zwei Standardemissionsszenarien getestet. Erstens das *business-as-usual*-Szenario, bei dem davon ausgegangen wird, dass die Welt ihren derzeitigen Kurs mit Jahr für Jahr steigenden Emissionen von Kohlendioxid und anderen Treibhausgasen fortsetzt, ohne geeignete Klimaschutzmaßnahmen. Zweitens berechneten wir ein Szenario mit niedrigen Emissionen, mit einer 50%igen Wahrscheinlichkeit, den Anstieg der globalen Durchschnittstemperaturen unter 2 °C zu halten (das Szenario „2016r5low“ des britischen Wetteramts). In beiden Fällen überlagerten wir die Emissionen mit einem jahrzehntelangen Impuls von 50 Gt Methan, das zwischen 2015 und 2025 in die Atmosphäre freigesetzt wird. Wir untersuchten auch die Auswirkungen späterer, länger anhaltender oder kleinerer Methanpulse.

Der zusätzliche Temperaturanstieg bis 2040 durch das Methan beträgt 0,6 °C, ein wesentlicher Zusatzbeitrag (Abb. 9.4). Das wäre eine Katastrophe für die Menschheit, auch weil es so schnell passiert. Es würde alle anderen Auswirkungen der globalen Erwärmung beschleunigen, und es gäbe nichts, was wir tun könnten, um die Methanfreisetzung stoppen – außer die Wassersäule zu kühlen (das heißt, das Meereis zurückzubringen), was kaum vorstellbar ist. Ein solcher Methanpuls würde den Zeitpunkt, an dem

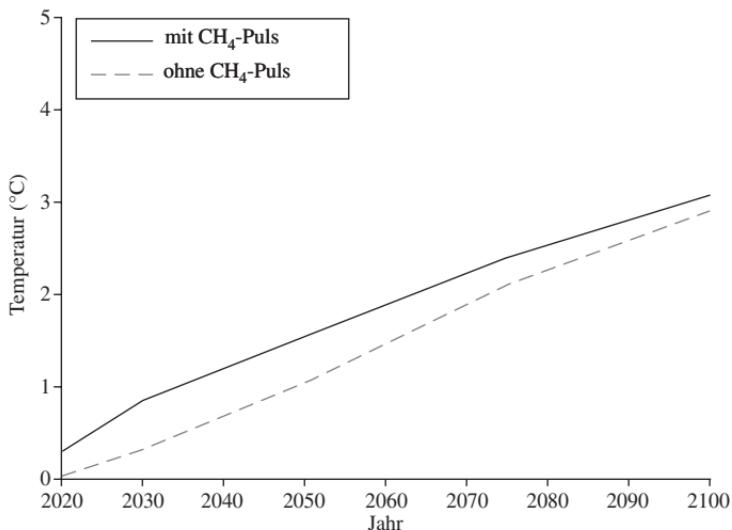


Abb. 9.4 Modellierte Änderung der globalen Durchschnittstemperatur durch einen Methanpuls von 50 Gt zwischen 2015 und 2025. (Nach Whiteman et al. 2013)

der globale mittlere Temperaturanstieg 2 °C über dem vor-industriellen Niveau liegt, um 15 bis 35 Jahre vorverlegen – auf 2035 für das *business-as-usual*-Szenario oder 2040 für das Szenario mit niedrigen Emissionen. Beachten Sie, wie schnell das Methan seine klimatische Wirkung entfaltet, denn obwohl der Spitzenwert von 0,6 °C erst 25 Jahre nach Beginn der Emissionen erreicht wird, tritt innerhalb weniger Jahre ein Anstieg von 0,3 bis 0,4 °C ein.

Gemessen an den Kapitalwerten betragen die zusätzlichen Kosten dieser Erhöhung für das *business-as-usual*-Szenario 60 Billionen Dollar über einen Zeitraum von einem Jahrhundert. Wir hatten erwartet, dass die Veränderungen in der Arktis trotz kurzfristiger wirtschaftlicher Gewinne für die arktischen Nationen und für bestimmte Industrien einen stolzen Preis haben würden, aber es war eine Überraschung zu entdecken, *wie* hoch er sein dürfte. Der Betrag beträgt 15 % der insgesamt

400 Billionen Dollar, den nach dem gleichen Modell geschätzten Gesamtkosten, die der Welt durch alle Auswirkungen des Klimawandels im gleichen Zeitraum entstehen. Für das Szenario mit niedrigen Emissionen werden die Kosten immer noch 37 Bio. Dollar zusätzlich betragen. Diese Kosten sind unabhängig davon, ob sich der Methanpuls um bis zu zwanzig Jahre verzögert, also um 2035 statt 2015 einsetzt, oder ob er sich über zwei oder drei Jahrzehnte statt über ein Jahrzehnt erstreckt. Ein Puls von 25 Gt Methan wirkt sich ziemlich genau halb so stark aus wie ein Puls mit 50 Gt.

Das Modell teilt den Planeten in acht Regionen auf, um zu modellieren, wo Veränderungen eintreten würden. In beiden Szenarien spiegelt die globale Verteilung der zusätzlichen Auswirkungen die Gesamtauswirkungen des Klimawandels wider: 80 % der zusätzlichen Auswirkungen, in Kapitalwerten gemessen, treten in den ärmeren Volkswirtschaften Afrikas, Asiens und Südamerikas auf. Überschwemmungen in tief gelegenen Gebieten, extreme Hitzebelastung, Dürren und Stürme werden durch die zusätzlichen Methanemissionen verstärkt. Ein nur in der Arktis ablaufender Prozess, der durch den von der Erderwärmung verursachten Rückgang des Meereises aus den arktischen Schelfmeeren aktiviert wurde, hat also globale Auswirkungen. Und wie immer sind es die ärmsten der Welt, die am meisten darunter leiden werden.

9.3 Sofort handeln!

Beim Thema Umwelt- und Klimawandel sollten bei einer möglichen Bedrohung zwei Kriterien als Grundlage für das Handeln oder Nichteingreifen dienen. Das Vorsorgeprinzip besagt, dass wir Maßnahmen ergreifen sollten, um eine plausible Bedrohung zu bekämpfen, auch wenn wir

nicht sicher sind, ob sie eintreten wird. Als beispielsweise 1992 die erste Bewertung des Weltklimarats veröffentlicht wurde, lag noch kein schlüssiger Beweis dafür vor, dass wir das Klima durch unsere Emissionen verändern. Aber die Annahme, dass dies der Fall war, war schwerwiegend genug, um einen Handlungsbedarf zu erzeugen. Risikoanalyse hilft uns, das Ausmaß der Bedrohung zu quantifizieren. Mathematisch kann das Risiko einfach definiert werden als die Wahrscheinlichkeit, dass ein Effekt eintritt, multipliziert mit dem negativen Effekt, falls er eintritt. Besonders schwer einzuschätzen sind Risiken, bei denen die Wahrscheinlichkeit sehr gering ist, die Auswirkungen aber sehr groß wären, wie zum Beispiel die Gefahr, dass ein Asteroid die Erde trifft. Im Falle eines Methanpulses aus dem submarinen Permafrost der Arktis steht außer Frage, dass das Risiko riesig ist. Erstens ist die Wahrscheinlichkeit, dass dieser Puls auftritt, hoch, mindestens 50 % nach der Analyse der Sedimentzusammensetzung und -stabilität durch diejenigen, die sich damit am besten auskennen, Natalia Shakhova und Igor Semiletov. Zweitens sind die katastrophalen Auswirkungen gigantisch, allein mit wirtschaftlichen Kosten von 60 Billionen Dollar und einer erhöhten menschlichen Sterblichkeit. Daher ist das Risiko eines Methanpulses am arktischen Meeresboden nach jeder Definition eines der größten unmittelbaren Risiken für die Menschheit.

Warum tun wir dann nichts dagegen? Warum wird dieses Risiko von Klimawissenschaftlern generell ignoriert und im neusten Bericht des Weltklimarats kaum erwähnt? Ich fürchte, es ist ein kollektives Versagen derjenigen, deren Aufgabe es wäre, sich zu äußern und für Maßnahmen einzutreten. Anscheinend sind nicht nur die Leugner des Klimawandels betroffen, die jede Bedrohung durch arktisches Methan verbergen wollen, sondern auch viele Polarforscher, darunter auch sogenannte „Methanexperten“.

Für einige dieser Spezialisten, die nur an kleinere arktische Methanaustritte gewöhnt sind, bei denen es sich nur um eine von vielen natürlichen und anthropogenen Methanquellen handelt, gibt es eine Ausrede. Ihnen ist noch immer nicht bewusst, dass die Umweltbedingungen heute beispiellos sind: Erst seit 2005 sind die Schelfmeere der russischen Arktis regelmäßig über einen Großteil ihrer Fläche direkt der Atmosphäre ausgesetzt, sodass die Wassertemperatur weit über den Schmelzpunkt ansteigt. Für Wissenschaftler, die keine Polarforscher sind, ist es vielleicht schwierig zu begreifen, dass dies eine völlig neue Situation ist und frühere Konzepte nicht mehr passen. Einige andere Wissenschaftler begreifen deutlich, was vor sich geht, aber in einem psychologischen Verdrängungsprozess versuchen sie lieber, es wegzuwünschen. So hat beispielsweise der Methanexperte Gavin Schmidt (Direktor des NASA Goddard Institute for Space Studies) auf einer Sitzung der Royal Society am 22. September 2014 öffentlich das ganze Konzept verspottet, dass große Mengen Methan aus dem Meeresboden emittiert werden könnten, gerade als neue Ergebnisse aus der Laptewsee bekannt gegeben wurden, die einen starken Anstieg der Emissionen zeigten. Sogar die Integrität und Genauigkeit der Feldforscher wurde infrage gestellt, wobei Shakhova und Semiletov persönlich angegriffen wurden, nur weil sie Russen sind und eine von ihnen eine Frau ist. Dies ist ein ziemlicher Tiefpunkt, den die wissenschaftliche Gemeinschaft erreicht hat, aber es ist auch deshalb passiert, weil die Auswirkungen dieser Entdeckung wirklich folgenreich sind. Auch wenn wir bei der Reduzierung der CO₂-Emissionen lieber die Hände in den Schoß legen und herumtrödeln, können wir kaum still sitzen, während wahrscheinlich 50 Gt Methan in die Atmosphäre abgegeben werden und einen schnellen Anstieg der globalen Temperaturen um 0,6 °C verursachen. Und das ist nur die erste Rate: In

diesen Sedimenten verbleibt viel, viel mehr Methan, das in den folgenden Jahrzehnten freigesetzt wird, wenn die Sedimente weiter auftauen, während langfristig der terrestrische Permafrost (Abschn. 9.4) sogar noch mehr Methan freisetzen wird.

Was können wir tun? Zunächst einmal ist eine sofortige Forschung im Notfallmodus notwendig, denn es gibt immer noch zu vieles, das wir einfach nicht wissen. Es ist wahr und leicht dahergesagt, dass, wenn wir die globale Erwärmung auf irgendeine Weise, zum Beispiel durch Geoengineering, stoppen und rückgängig machen könnten, die sommerliche Meereisdecke in der Arktis zurückkehren und das Wasser der Schelfmeere auf sein vorheriges Temperaturniveau von 0 °C zurückkehren würde. Der Permafrost würde nicht weiter tauen und die Methanemissionen würden aufhören. Aber da schon heute Methanfahnen austreten und bereits einen Strahlungsantrieb erzeugen, sehe ich nicht, wie wir es selbst mit großen Anstrengungen schaffen könnten, die Temperaturen so weit abzusenken, dass weitere Methanemissionen verhindert werden. Wenn es uns möglich gewesen wäre, hätten wir den Klimawandel bereits überwunden und hätten nicht viel zu befürchten. Nein, der einzige wirksame Weg wäre, den Austritt des Methans aus den Sedimenten des Meeresbodens heute und in naher Zukunft direkt zu verhindern, und hier fehlen uns Lösungen. Es wurde vorgeschlagen, Methan in Plastikkuppeln oder -planen aufzufangen und zum Abfackeln an einen zentralen Ort zu leiten. Aber da Methan anscheinend am gesamten Meeresboden austritt, müssten die Plastikplanen den gesamten ostsibirischen Meeresboden bedecken, was unmöglich ist. Der einzige Vorschlag, der bisher plausibel erscheint, kommt aus der Ölindustrie selbst, nämlich eine Art Fracking durchzuführen. Demnach wird ein Bohrloch bis unter die aktive Sedimentschicht gebohrt,

horizontale Bohrungen verbinden dann das Bohrloch mit Hohlräumen, die unter den Sedimenten entstehen. Das in diesen Hohlräumen angesammelte Methan könnte abgepumpt und abgefackelt werden. Das Abfackeln ist sinnvoll, denn wenn ein Methanmolekül verbrennt, produziert es ein CO_2 -Molekül, das nur ein Zwanzigstel des Treibhauspotenzials von Methan hat. Wenn das Methan aufgefangen und genutzt werden kann, umso besser. Diese Lösung würde ein Netz von Bohrungen erfordern, das die gesamte Ostsibirische See abdeckt. Niemand hat genau berechnet, wie viele Bohrungen das sein müssten und was das gesamte Unternehmen kosten würde. Aber in Ermangelung einer anderen Lösung muss diese Möglichkeit dringend erforscht werden, und wenn es machbar ist, sollten wir bereit sein, sie umzusetzen. Es wäre ironisch, wenn ausgerechnet die Ölindustrie die Welt durch ihre fortschrittliche Technologie retten würde. Ich bin sicher, dass Gott darüber lächeln würde.

9.4 Die Bedrohung durch tauenden Permafrost an Land

Methan aus dem submarinen Permafrost der Arktis ist unsere größte unmittelbare Bedrohung, aber die Bedrohung durch Methan- und CO_2 -Emissionen aus tauendem Permafrost an Land ist ebenso real und unaufhaltsam. Aus der sorgfältigen Arbeit der arktischen Biologen wissen wir, dass beim Auftauen des terrestrischen Permafrostes die verrotteten Vegetationsreste, die aufgetaut werden, eine Reihe von chemischen und biologischen Prozessen durchlaufen, die letztlich sowohl Methan als auch CO_2 produzieren. Dies unterscheidet sich vom submarinen Permafrost der Arktis, wo das Methan bereits da

ist und nur darauf wartet, beim Auftauen der Sedimente freigesetzt zu werden. Im terrestrischen Permafrost muss das Methan erst durch eine lange und langsame Abfolge von chemischen Prozessen erzeugt werden, aber schließlich wird es dann doch freigesetzt.

Schauen wir uns einige Statistiken an. Die Fläche des terrestrischen Permafrostes beträgt heute weltweit etwa 19 Mio. km², darunter sowohl kontinuierlicher als auch diskontinuierlicher (das heißt lückenhafter) Permafrost. Er taut auf: Permafrostgebiete haben sich seit den 1980er-Jahren um 2 bis 3 °C erwärmt. Beim Auftauen emittiert der Permafrost ein Gemisch aus Methan, Kohlendioxid und kleinen Mengen Lachgas (N₂O), alles Treibhausgase. Nach Angaben des Weltklimarats beträgt die im terrestrischen Permafrost enthaltene Kohlenstoffmenge 1400 bis 1700 Gt. Es wird geschätzt, dass davon 110 bis 230 Gt (als CO₂ und CH₄) bis 2040 und 800 bis 1400 Gt bis 2100 verloren gehen werden, bei einer Emissionsrate von 4 bis 8 Gt pro Jahr vor 2040, danach von 10 bis 16 Gt pro Jahr.

Bitte schauen Sie sich diese Zahlen genau an. Das bedeutet, dass bis zum Ende des Jahrhunderts die Menge an Kohlenstoff, die aus dem auftauenden terrestrischen Permafrost freigesetzt wird, etwa 30-mal so hoch ist wie der Methanpuls von 50 Gt aus dem submarinen Permafrost, den wir im nächsten Jahrzehnt befürchten. Es ist nicht klar, wie viel von diesem Kohlenstoff in Form des besonders schädlichen Methans vorliegt, aber es ist wahrscheinlich ein beträchtlicher Teil. Daher ist es unvermeidlich, dass Methan der Klimaerwärmung kräftig Schwung gibt. Das könnte schnell passieren, weil der submarine Permafrost eingeschlossenes Methan freisetzt, es kann langsam passieren, aufgrund der Methanbildung beim Auftauen des terrestrischen Permafrosts, oder beides passiert, erst ein Puls aus dem submarinen Permafrost, gefolgt

von einer langsameren, aber noch größeren Freisetzung aus dem terrestrischen Permafrost. Wir können uns sicher sein, dass diese Beschleunigung der Erwärmung spätestens Ende des Jahrhunderts eintritt.

Ein außergewöhnlicher Aspekt des Berichts des Weltklimarates von 2013 ist wieder einmal, dass diese Zahlen über Methanemissionen aus terrestrischem Permafrost zwar genannt werden, aber den Auswirkungen einer beschleunigten Klimaerwärmung nicht nachgegangen wird, obwohl diese genauso schlimm oder gar schlimmer sind als die Auswirkungen der Methanfreisetzung aus submarinem Permafrost.

9.5 Das Gebiet weitet sich aus

Nach den Entdeckungen von Shakhova und Semiletov in der Ostsibirischen See hat sich das Tempo erhöht, in dem arktische Schelfgebiete erkundet werden, woraufhin auch in anderen Schelfmeeren warmes Wasser und Methanaustritte entdeckt wurden.

Semiletov und Shakhova erweiterten ihr Forschungsgebiet auf Regionen außerhalb der Ostsibirischen See, indem sie sich im Sommer 2014 der Expedition „SWE-RUS-C3“ des schwedischen Eisbrechers Oden zur Laptewsee anschlossen. Das Schiff fand auf dem äußeren Schelfbereich eine Zone mit mehreren Kilometern Durchmesser, in der in einer Wassertiefe von 200 bis 500 m große Mengen an Methanblasen ausgestoßen wurden. In Küstennähe fanden sie 100 Methanquellen in einer Tiefe von 60 bis 70 m auf dem Meeresboden, darunter einen besonders intensiven Methanausbruch in 62 m Tiefe, den der Chefwissenschaftler Örjan Gustafsson als „Megamethanfackel“ bezeichnete. Diese große Emission wurde am 22. Juli 2014 entdeckt; es wurde bekannt gegeben,

dass das Team in der umliegenden Wassersäule erhöhte Methanwerte beobachtete, die etwa zehnmal höher waren als im normalen Meerwasser. An einer Bohrung durch das Sediment trat Methan aus (Overduin et al. 2015).

Im Januar 2016 deckte ein Bericht des Laptewsee-Programms, einem russisch-deutschen Feldforschungsprojekt, das seit den 1990er-Jahren läuft, eine außergewöhnliche Entwicklung auf (Janout et al. 2016). Seit 2007 gibt es im Schelfmeer eine in einer Wassertiefe von 40 bis 50 m verankerte Forschungsplattform, die Wassertemperaturen von der Oberfläche bis zum Boden und die Dicke des Eises misst. Im bemerkenswerten Sommer 2012 verzeichneten die Instrumente einen frühen Rückzug der Eisdecke, gefolgt von einer Erwärmung des Wassers in mittlerer Tiefe, verursacht durch die Wärme des Flusswassers der Lena und durch eindringende Sonnenstrahlung. Die Wärme breitete sich durch Durchmischung nach unten in Richtung Meeresboden aus, brauchte aber einige Zeit dafür. So war es bereits Winter, bevor sich das Wasser am Meeresboden im Januar 2013 auf 0,6 °C erwärmt und 2,5 Monate bei dieser Temperatur verblieb. Das kann zum Auftauen der Sedimente führen, was einen Zusammenhang zwischen dem wärmeren Wasser und dem von SVERUS-C3 beobachteten Methan herstellt. Modellstudien sind sich einig, dass die Laptewsee eine größere Methanquelle sein könnte als die Ostsibirische See (Nicol'sky 2012).

Die Stärke der Methanaustritte in diesem zweiten Schelfmeer der Arktis lässt den Schluss zu, dass die Methanemissionen aus dem Meeresboden nicht auf die Ostsibirische See beschränkt sind, sondern auch in anderen, möglicherweise in allen arktischen Schelfmeeren auftreten. Unsere Schätzungen der Methanemissionen sind daher wahrscheinlich noch viel zu gering. Die Überwachung des lokalen Methangehalts der Atmosphäre

hat in der Arktis gelegentlich Spitzenwerte ergeben, die weit über dem Hintergrund liegen. Jason Box vom geologischen Survey von Dänemark und Grönland bezeichnet sie als „Drachenatem“, da jedes einzelne Ereignis eine außergewöhnliche Emission aus einer einzigen Quelle zu repräsentieren scheint. Die Spitzenwerte können in einzelnen, unbeobachteten „Megamethanfackeln“ entstehen. Die Aufzeichnung einer Methanmessstation in Alert an der Nordspitze der Ellesmere-Insel (Abb. 9.5) zeigt, dass der Methangehalt, der sich im Jahr 2000 bei etwa 1852 ppb stabilisiert hatte, in den letzten Jahren immer schneller gestiegen ist und nun 1940 ppb erreicht hat, wobei der größte Teil des Anstiegs in den letzten drei bis vier Jahren erfolgte.

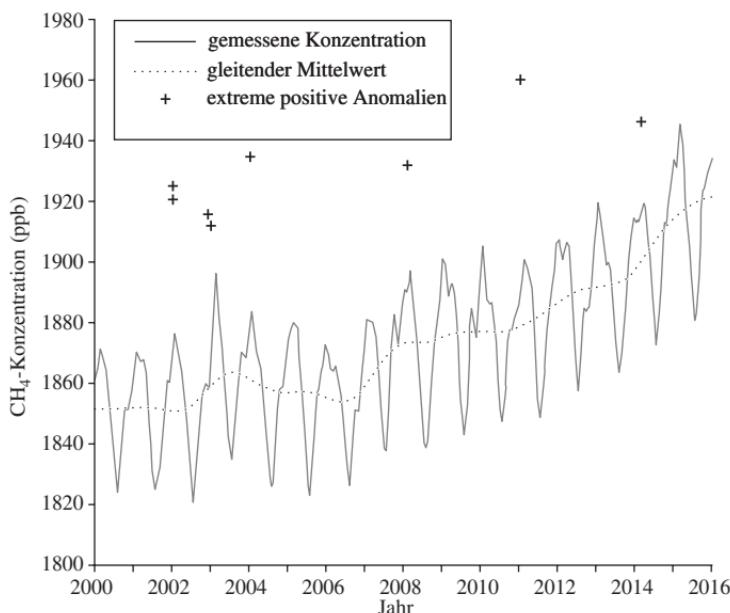


Abb. 9.5 Methangehalt in der Atmosphäre 2000 bis 2016, gemessen bei Alert auf der Ellesmere-Insel, Kanada (NOAA)

Möglicherweise ist in diesem Zusammenhang auch das Auftreten von drei mysteriösen Kratern in der nord-sibirischen Tundra im August 2014 relevant. Sie hatten glatte vertikale Seitenwände und waren von abgelagertem Bodenmaterial umgeben. Die plausibelste Erklärung ist, dass sie durch unterirdische Methanexplosionen entstanden sind. Der auftauende Permafrost ermöglichte die Bildung von Methan unter einer Sedimentschicht, bis schließlich die Überdeckung in einer großen Explosion ausgeworfen wurde.

All diese Ereignisse deuten darauf hin, dass in den arktischen Küstenregionen bereits eine erhöhte Methanemission stattfindet, durch Mechanismen, die noch nie zuvor beobachtet wurden. Es ist wichtig, dass wir die Gefahr erkennen, die dies für das Klima darstellt. Es handelt sich um eine unmittelbare Bedrohung, auch wenn sie der Weltklimarat in seinem 5. Bewertungsbericht herunterspielte.

Literatur

- Dmitrenko IA, Kirillov SA, Tremblay LB, Kassens H, Anisimov OA, Lavrov SA, Razumov SO, Grigoriev MN (2011) Recent changes in shelf hydrography in the Siberian Arctic: potential for subsea permafrost instability. *J Geophys Res* 116:C10027. <https://doi.org/10.1029/2011jc007218>
- Frederick JM, Buffett BA (2014) Taliks in relict submarine permafrost and methane hydrate deposits: Pathways for gas escape under present and future conditions. *J Geophys Res Earth Surf* 119:106–122. <https://doi.org/10.1002/2013jf002987>
- Hope C (2013) Critical issues for the calculation of the social cost of CO₂: why the estimates from PAGE09 are higher than those from PAGE2002. *Clim Change* 117:531–543

- Janout M, Hölemann J, Juhls B, Krumpen T, Rabe B, Bauch D, Wegner C, Kassens H, Timokhov L (2016) Episodic warming of near bottom waters under the Arctic sea ice on the central Laptev Sea shelf. *Geophys Res Lett* 43:264–272. <https://doi.org/10.1002/2015gl066565>
- Nicolsky DJ, Romanovsky VE, Romanovskii NN, Kholodov AL, Shakhova NE, Semiletov IP (2012) Modeling sub-sea permafrost in the East Siberian Arctic shelf: The Laptev Sea region. *J Geophys Res* 117:F03028. <https://doi.org/10.1029/2012jf002358>
- Overduin PP, Liebner S, Knoblauch C, Günther F, Wetterich S, Schirrmeyer L, Hubberten HW, Grigoriev MN (2015) Methane oxidation following submarine permafrost degradation: Measurements from a central Laptev Sea shelf borehole. *J Geophys Res. Biogeosci* 120:965–978. <https://doi.org/10.1002/2014jg002862>
- Shakhova N, Semiletov I, Salyk A, Yusupov V (2010) Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf. *Science* 327:1246
- Shakhova N, Semiletov I, Leifer I, Sergienko V, Salyuk A, Kosmach D, Chernykh D, Stubbs C, Nicolsky D, Tumskoy V, Gustafsson Ö (2013) Ebullition and storm induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf. *Nat Geosci* 7:64–70. <https://doi.org/10.1038/NGEO2007>
- Stern N (2006) The economics of climate change. HM Treasury, London
- Westbrook GK et al (2009) Escape of methane gas from the seabed along the West Spitsbergen continental margin. *Geophys Res Lett* 36:15. <https://doi.org/10.1029/2009gl039191>
- Whiteman G, Hope C, Wadhams P (2013) Vast costs of Arctic change. *Nature* 499:401–403



10

Seltsames Wetter

Die Winter 2009/2010, 2010/2011, 2014 (Januar), 2014/2015 und 2015/2016 brachten außergewöhnlich kaltes Wetter in den Osten der USA und nach Westeuropa. Dies hatte schwerwiegende Auswirkungen auf die Maisernte in den USA, was zum Verlust von Nahrungsreserven führte, die der Bekämpfung von Hungersnöten in Afrika dienen sollten. Es wurde deutlich, dass eine Störung der Landwirtschaft in den hochproduktiven mittleren Breitengraden der Nordhalbkugel – wenn diese über einen längeren Zeitraum andauern sollte – zu massiven Hungersnöten und politischen Unruhen in gefährdeten Ländern führen könnte. Ein einziger außergewöhnlicher Winter kann als eine rein zufällige Schwankung des sich ständig ändernden Wetters betrachtet werden, aber wenn sich das über einen Zeitraum von sieben Jahren wiederholt, fängt es an, nach einem ganz neuen Klimamuster auszusehen. Es stellt sich die Frage, ob dies mit anderen beobachtbaren Veränderungen im Erdsystem

zusammenhängt. Da die Anomalien in den nördlichen mittleren Breiten rund um die Welt auftreten und weil aufeinanderfolgende Anomalien, die sich um den Globus bewegen, wechselnd entgegengesetzte Signale geben (warm, dann kalt und dann wieder warm), ist eine mögliche Ursache, dass sich der Strahlstrom verändert (auch Jetstream genannt). Ein plausibler Mechanismus, der erstmals in einem Artikel von Jennifer Francis von der Rutgers University und Stephen Vavrus von der University of Wisconsin beschrieben wurde (Francis und Vavrus 2012), verknüpft eine Verschiebung des Strahlstroms und geschwächte zonale Winde (in Ost-West-Richtung) mit dem Verlust von sommerlichem Meereis in der Arktis. Sollte das stimmen, wäre die Wetterveränderung wirklich ein Klimawandel mit schwerwiegenden wirtschaftlichen Auswirkungen auf die Volkswirtschaften in mittleren Breitengraden – aufgrund des schlechten Wetters im Winter und im Frühling und wegen des häufigeren Auftretens von Extremereignissen wie dem Hurrikan Sandy von 2012.

Neben den Witterungseinflüssen kann der Eisrückgang einen weiteren Effekt haben, der unsere Fähigkeit beeinträchtigt, die Weltbevölkerung zu ernähren: Der Verlust von Eis und Schnee in Gebirgen reduziert die Zufuhr von Quellwasser in den Anbaugebieten.

10.1 Das Wetter und der Strahlstrom

Die in den vergangenen Jahren aufgezeichneten extremen Wetterereignisse konzentrieren sich auf die nördlichen mittleren Breiten. Im Winter 2014/2015 beispielsweise erlebte San Francisco inmitten einer anhaltenden Dürre in Kalifornien seinen ersten regenfreien Januar, im Middle-

ren Westen und im Nordosten der USA herrschte extreme Kälte und in New England gab es enorme Schneemengen.

Das Wetter der Nordhalbkugel wird durch eine kontinuierliche und komplexe Wechselwirkung zwischen zwei großen Luftmassen angetrieben, der polaren Luftmasse rund um den Nordpol und der warmen tropischen Luftmasse in niedrigeren Breiten. Die Veränderung der globalen Temperatur mit dem Breitengrad ist nicht allmählich und gleichmäßig, sondern sprungartig über die Grenze zwischen der Luft der niederen Breitengrade und der Polarluft hinweg. An dieser Grenze, der Polarfront, entstehen die atlantischen Tiefdruckgebiete, deren Bahn weitgehend durch die Position der Polarfront bestimmt ist. Die steilen Druckgradienten, die in der Atmosphäre als Begleiterscheinung der Polarfront auftreten, führen zu einem schmalen Band von sehr starken Höhenwinden, die Geschwindigkeiten von mehr als 300 km/h erreichen können und knapp unter der Tropopause auftreten (die Tropopause ist die Höhe, ab der die Atmosphäre mit zunehmender Höhe nicht mehr kühler wird, sondern wärmer, in den Polargebieten etwa 9 km über der Erdoberfläche). Solche Bänder treten in beiden Hemisphären auf und heißen Strahlströme. Der Begriff „polarer Strahlstrom“ bezieht sich in der Regel auf denjenigen auf der Nordhalbkugel, der mit der Polarfront verbunden ist. Je größer der Temperaturunterschied an der Polarfront ist, desto stärker ist der Strahlstrom: Aus diesem Grund ist er typischerweise in den Wintermonaten am stärksten, wenn der Kontrast zwischen der kalten, sonnenlosen Arktis und den mittleren Breitengraden normalerweise am größten ist. Transatlantische Fluggäste sind mit dem Strahlstrom vertraut, denn er ist ein starker Rückenwind für Flüge von den USA nach Europa und starker Gegenwind für Flüge in die andere Richtung.

Der Strahlstrom ist keine gerade Linie, sondern krümmt sich zu großen Mäandern (Rossby-Wellen), weil der große Geschwindigkeitskontrast zwischen den beiden Seiten für Instabilität sorgt. Je langsamer der Strahlstrom, desto größer und langsamer sind die Mäander. In den vergangenen Jahren haben wir eine Größenzunahme der Mäander des Strahlstroms beobachtet, das heißt, die Nord-Süd-Ausdehnung der Mäander nahm zu. Dies treibt eine weitere Rückkopplung an: Die nordwärts gerichteten Luftmassen auf der tropischen Seite des Strahlstroms bringen wärmere Luft in die Arktis, während die südlich gerichteten Luftmassen auf der Polarseite kältere Luft aus der Arktis in niedrigere Breiten bringen, jeweils weiter als in der Vergangenheit. Allein die Vergrößerung der Mäander des Strahlstroms beschleunigt also den Wärmetransport von mittleren zu höheren Breiten. Dies wiederum beschleunigt die arktische Erwärmung, verringert die Temperaturdifferenz zwischen der arktischen Luftmasse und der Luftmasse mittlerer Breite und verlangsamt so den Strahlstrom weiter, was wiederum seine Mäander weiter vergrößert und damit die Rückkopplung des Wärmeaustauschs verstärkt. Der von Francis und Vavrus identifizierte Mechanismus kann daher durchaus als Strahlstromrückkopplung bezeichnet werden, da die Auswirkung des Meereisrückzugs in der Arktis auf die Position des Strahlstroms sich wieder auf den Meereisrückzug auswirkt und ihn verstärkt.

Neben der größeren Amplitude bewegen sich die Mäander in Strömungsrichtung (nach Osten) viel langsamer, was zu länger anhaltenden Wetterverhältnissen und damit zur Intensivierung von Extremereignissen wie Dürre, Überschwemmungen, Hitzewellen und Kälteperioden führt, bei denen die Dauer ein wichtiger Faktor ist.

Diese vergrößerten Mäander können aufgrund der verschobenen Luftmassen noch viel weiter südlich das Klima

beeinflussen. So wird vermutet, dass im tropischen Atlantik häufiger Hurrikane auftreten werden, weil weniger Wärme nach Norden in Richtung Arktis transportiert wird (da sich die Arktis im Vergleich zu niedrigen Breiten schneller erwärmt, nimmt die Temperaturdifferenz ab). Die Tropen werden wärmer, und warmes Oberflächenwasser im tropischen Atlantik und im Golf von Mexiko ist für die Entstehung der Hurrikane verantwortlich.

10.2 Ist dieser Mechanismus real?

Der von Francis und Vavrus vorgeschlagene Effekt ist plausibel, aber er ist nicht der einzige Mechanismus, durch den der Verlust von arktischem Meereis das Wetter in mittleren Breiten beeinflussen kann. Tatsächlich hat James Overland vom Pacific Marine Environmental Laboratory in Seattle drei Gründe genannt, warum wir vorsichtig sein sollten, bevor wir einen direkten Zusammenhang zwischen der Erwärmung der Arktis und den Wetterbedingungen in niedrigeren Breiten akzeptieren (Overland 2016).

Erstens ist die natürliche Vorsicht zu nennen, die Wissenschaftler dazu veranlasst, ein neues Phänomen erst dann einer bestimmten Ursache-Wirkung-Kette zuzuordnen, wenn es so oft auftritt, dass ein solcher Zusammenhang statistisch gültig ist. Die Zunahme der arktischen Verstärkung der Erwärmung und der signifikante Rückzug des Meereises sind in den letzten zehn Jahren erfolgt, während anomale Wetterereignisse seit sieben Jahren im Vordergrund stehen. Eine Laufzeit von sieben Jahren wird nicht als ausreichend angesehen, um die Wirkung von arktischen Ursachen von anderen zufälligen Ereignissen in unserem Wettersystem mit Sicherheit zu unterscheiden. Atmosphärenforscher lernen von Beginn an den Unterschied zwischen Klima – dem langfristigen

Muster der atmosphärischen Prozesse – und Wetter – dem lokalen kurzfristigen Effekt einer Vielzahl zufälliger Ursachen. Selbst die besten Wettervorhersagen haben nur eine gewisse Prognosegenauigkeit. Bis zu 14 Tage im Voraus sind sie besser als wahllose Angaben. Dies ist in der Tat eine ultimative Grenze für die Wettervorhersage, da ab dem 14. Tag die atmosphärischen Bewegungen im Vergleich zum ersten Tag derart vom Zufall abhängen, dass sie nicht mehr berechnet werden können. Wissenschaftler, die sich Bilder ansehen, sei es die Marsoberfläche oder eine Atmosphärendruckkarte, werden auch vor Pareidolie gewarnt, unserer angeborenen Tendenz, beim Betrachten eines zufälligen Bildes ein Muster zu sehen, das es nicht gibt. Das „Gesicht“ auf dem Mars oder in der Psychologie die Tendenz, eine Bedeutung in einem Rorschacher-Tintenkleckstest zu sehen, sind Fälle von Pareidolie. Wir sehen das Muster des Eisrückzugs, wir sehen das Muster extremer Wetterereignisse, und wir glauben, dass das eine das andere verursacht.

(In einem ganz anderen Zusammenhang hatte ich 1994 einen persönlichen Fall von arktischer Pareidolie. Ich half damals, eine private Expedition nach King William Island zu unternehmen, um, wie wir glaubten, Franklins Grab zu untersuchen, das ein englischer Marineoffizier vermeintlich entdeckt hatte. Der Offizier hatte viel Zeit damit verbracht, die Westküste der Insel abzusuchen, in der Nähe der Stelle, wo Franklins Schiffe im Eis eingeschlossen waren. Gerade als ihm das Essen ausgegangen war und er ausgeflogen werden sollte, stieß er auf einen „Grabhügel“ (in Wirklichkeit ein Gletscher-Drumlin), auf dem er die perfekte Form eines Grabs fand: eine doppelte Reihe von flachen quadratischen Steinen, die ein 2 m langes und 1 m breites Pflaster bildeten. Seit Franklins Tod im Jahr 1847 konnte sein Grab nie gefunden werden. Könnte es das sein? Mit viel Mühe und Aufwand machten wir uns

im nächsten Jahr auf den Weg. Da war es, definitiv ein Grab, es sah ganz genau so aus wie jedes Grab auf einem städtischen Friedhof. Wir hämmerten auf die Steine, und es gab einen Hall, was auf einen Hohlraum darunter hindeutete. Aufgeregt riefen wir einen kanadischen Archäologen an, der in einem Twin-Otter-Flugzeug ankam und die Steine heben durfte. In seiner Gegenwart zogen wir sanft die Steine hoch und blickten neugierig auf ... die Wohngänge von Lemmingen! Ich war noch nie so enttäuscht wie an diesem Tag. Nach langer Untersuchung kamen wir zu dem Schluss, dass vermutlich ein mehr oder weniger quaderförmiger Gesteinsblock, den ein Gletscher abgelagert hatte, auf dem Drumlin gelegen hatte. Frost führte dazu, dass nacheinander dünne Steinplatten vom Block abbrachen, abwärts glitten und durch die Wirkung der Schwerkraft oder durch Zufall eine doppelte Reihe bildeten, die wie ein perfektes, menschgemachtes Grab aussah. Lemminge hatten dies genutzt, um darunter ihren Bau zu graben.)

Das wäre also eine Nullhypothese: Es gibt extreme Wetterereignisse in sechs aufeinanderfolgenden Wintern und zufällig zugleich den Rückzug des arktischen Meereises. Wenn die Ereignisse weiterhin diesem Muster folgen, wird diese Hypothese natürlich immer weniger unglaublich.

Das zweite, ziemlich ähnliche Argument ist, dass der Strahlstrom, den Francis und Vavrus als direkte Ursache der Wetterereignisse identifizierten, eigentlich ein sehr chaotischer Luftstrom ist, der leicht zufällige Effekte erzeugen könnte, die als etwas Deterministisches erscheinen.

Drittens gibt es andere Ursachen, die auf die Luftzirkulation der mittleren Breitengrade einwirken. Die Akademie der Wissenschaften der USA veranstaltete am 12. und 13. September 2013 einen Workshop, der viele an

diesem Problem interessierte Wissenschaftler zusammenbrachte und dessen Ergebnisse in einem umfassenden Bericht veröffentlicht wurden (National Academy of Sciences 2014). Dabei rückte jeder Wissenschaftler seinen eigenen Lieblingsmechanismus in den Vordergrund. Die vollständige Liste der verschiedenen möglichen Prozesse ist:

- Zunehmende Erwärmung der Arktis → geringerer Temperaturgradient → schwächerer und stärker määandrierender Strahlstrom und → länger andauernde Wettermuster in den mittleren Breiten (der ursprüngliche Mechanismus von Francis und Vavrus 2012)
- Arktischer Meereisrückgang → zunehmende herbstliche Schneedecke in hohen Breiten → ausgedehntere und stärkere Hochdruckgebiete über Sibirien im Herbst und Winter → weitere Ausweitung der Rossby-Wellen nach oben → plötzliche Erwärmung der Stratosphäre → geschwächter Polarwirbel und schwächerer und stärker määandrierender Strahlstrom (Cohen et al. 2014; Ghatak et al. 2012)
- Arktischer Meereisrückgang → Änderungen regionaler Wärmeströme und anderer Energieströme → instabiler Polarwirbel → kalte Polarluft, die sich in die mittleren Breiten bewegt (Overland und Wang 2010)
- Arktischer Meereisrückgang → ein määandrierender Strahlstrom und winterliche atmosphärische Zirkulationsmuster ähnlich einer negativen Phase der winterlichen Arktischen Oszillation → häufige Episoden atmosphärischer „Blockaden“ (Liu et al. 2012)
- Arktischer Meereisrückgang → im Sommer Verlagerung der Strahlstromposition über Europa nach Süden → erhöhte Häufigkeit von bewölkten, kühlen und nassen Sommern über Nordwesteuropa (Screen und Simmonds 2013)

- Arktischer Meereisrückgang → im Winter Reaktion der atmosphärischen Zirkulation, ähnlich einer negativen Phase der Arktischen Oszillation → Extremregen im Mittelmeerraum im Winter (Grassi et al. 2013)
- Arktischer Meereisrückgang → negative Phase des dreipoligen Windmusters → im Winter verstärkte Niederschläge und sinkende Temperatur in Ostasien (Wu et al. 2013).

Die Zusammenhänge sind eindeutig weniger offensichtlich als bei anderen Rückkopplungen, die wir in Betracht gezogen haben. Hier besteht noch ein erheblicher Forschungsbedarf. Aber es ist auffällig, dass alle beschriebenen Mechanismen den Ursprung der Wetterereignisse in mittleren Breiten auf den Wandel in der Arktis zurückführen, insbesondere auf den Verlust des Meereises, und dass es sich bei allen um Rückkopplungen handelt, auch wenn nur beim Mechanismus von Francis und Vavrus die Rückkopplung einfach und direkt ist.

Bei zwei Wetterphänomenen gibt es wirklich handfeste Beweise dafür, dass sie kausal mit der Erwärmung der Arktis und dem Eisrückzug zusammenhängen. Das erste betrifft Ostasien, der Verlust von Meereis in der Barentssee und der Karasee führt zu einer Stärkung des Sibirienhochs (ein anhaltendes Hochdruckgebiet über Sibirien), das zu Ausbrüchen von kalter Luft nach Ostasien führt. Der zweite Fall ist in den Südosten der Vereinigten Staaten vordringende Kaltluft, was mit einer Verschiebung des langwelligen atmosphärischen Windmusters zusammenhängt, die durch wärmere Temperaturen westlich von Grönland verstärkt wird.

10.3 Wetterereignisse und Nahrungsproduktion

Extreme Wetterereignisse beeinträchtigen bereits heute die landwirtschaftliche Produktion, da sie sich auf die hochproduktiven landwirtschaftlichen Regionen der mittleren Breiten der Nordhalbkugel auswirken. Wenn es einen kausalen Zusammenhang zwischen diesen und dem Rückzug des arktischen Meereises gibt, können wir erwarten, dass diese Extremereignisse zur neuen Norm werden, zu einem revidierten jährlichen Klimazyklus der Erde. Das arktische Meereis wird in naher Zukunft nicht von selbst zurückkehren, und die anhaltende Zunahme der Treibhausgaskonzentrationen wird über die arktische Verstärkung sicherstellen, dass es auch in Zukunft viele Jahrzehnte lang zu einer raschen Erwärmung der Arktis kommen wird. Die Auswirkungen extremer, oft verheerender Wetterereignisse auf die Ernte in einer Welt, in der die Bevölkerung weiterhin rasch zunimmt, können nur katastrophal sein. Früher oder später wird es eine unüberbrückbare Kluft zwischen dem globalen Nahrungsmittelbedarf und unserer Fähigkeit geben, in einem instabilen Klima Lebensmittel zu produzieren. Eine Hungersnot wird unvermeidlich die Weltbevölkerung reduzieren. Viele Wissenschaftler hoffen daher verzweifelt, dass es keinen direkten Zusammenhang zwischen der globalen Erwärmung und dieser möglichen Veränderung der Wetterverhältnisse gibt. Vielleicht halten sie deshalb lieber daran fest, dass es sich um eine Nullhypothese handle, selbst wenn es immer mehr Hinweise für einen Zusammenhang gibt.

Die Vorstellung, dass Veränderungen in der Arktis das Wetter in niedrigeren Breiten beeinflussen können, ist nicht neu, aber noch nie zuvor wurde dies in Form eines direkten Mechanismus ausgedrückt. Die Arktis

als Anzeiger für das Wetter der Welt war für den Polarforscher Sir Hubert Wilkins die Motivation in Leben und Werk. Wilkins wurde auf einer Schafzucht in Australien geboren und sah selbst die verheerenden Folgen der Dürre für die Lebensgrundlage der Bauern. In seinem 1928 erschienenen Buch *Flying the Arctic* (Wilkins 1928), in dem er seinen Pionierflug über den Arktischen Ozean von Alaska nach Spitzbergen beschreibt, schrieb er:

„Die Leute fragen mich oft, warum ich in die Polargebiete gehe ... Aus den vor vielen Jahren gesammelten Erkenntnissen leiteten wissenschaftliche Meteorologen die Theorie ab, dass Daten, die in Polargebieten gesammelt und mit meteorologischen Informationen aus anderen Breitengraden korreliert werden, es uns ermöglichen würden, die Jahreszeiten mit vergleichsweise hoher Genauigkeit vorherzusagen. Die Aufrechterhaltung meteorologischer Stationen in den Polargebieten in den letzten Jahren hat gezeigt, dass es einen direkten Zusammenhang zwischen der Arktis, der Antarktis und den davon abhängenden Bedingungen in den großen Anbaugebieten der Welt gibt.“

Es sind diese „großen Anbaugebiete“, die durch die an Veränderungen der Arktis gekoppelte Verlagerung des Strahlstroms am stärksten gefährdet zu sein scheinen. Und es gibt Länder, die das, wofür der Westen blind ist, anscheinend sehen und die Maßnahmen ergreifen, um sich selbst zu schützen. So kauft oder pachtet China landwirtschaftliche Flächen rund um den Globus, vor allem in Südamerika und Afrika. Sie führen industrielle landwirtschaftliche Praktiken ein und heben damit eine kleine Zahl von Landwirten aus der Armut, während der Rest verarmt. Langfristig schädigen sie auch den Boden, die Biodiversität, das Trinkwasser sowie die Ökosysteme in Flüssen und Meeren. Aber China positioniert sich für

den absehbaren Kampf, für den Kampf um ausreichende Nahrung. Durch die Kontrolle über Land in anderen Staaten werden sie auch die Nahrungsmittelversorgung dieser Staaten kontrollieren.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Nahrungsmittelproduktion sind im Lebensmittelpreisindex (Food Price Index, FPI) zu sehen, einem internationalen Maß für die weltweiten durchschnittlichen Nahrungsmittelpreise, das die Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation (FAO) der Vereinten Nationen erhebt. Von einem für 2002 bis 2004 als 100 definierten Wert stiegen die Lebensmittelpreise ab 2004 rapide an, bis auf 240 im Jahr 2014, woraufhin sie auf 170 (2017) gesunken sind. Wenn wir den Index mit politischen Ereignissen vergleichen, sehen wir, dass dem enormen Anstieg der Arabische Frühling 2011 folgte, der als Protest gegen die Lebensmittelpreise und die Art und Weise begann, wie sie die städtischen Arbeitslosen trafen. Es ist fast immer der Fall, dass Spitzenwerte im FPI mit sozialen Unruhen in den Ländern der Dritten Welt verbunden sind, in denen die Lebensmittelkosten einen großen Teil der Ausgaben der Menschen ausmachen. Die Kosten für Lebensmittel und nicht das absolute Fehlen von Lebensmitteln sind oft der Schlüsselfaktor für Verknappung und mögliche Hungersnot. Während des Höhepunkts der Großen Hungersnot in Irland im Jahr 1845 exportierte Irland sogar Lebensmittel nach England. Die Bauern hungerten, weil sie es sich nicht leisten konnten, Lebensmittel zu den lokalen Preisen zu kaufen, was durch den Verlust der Kartoffelernte verstärkt wurde. Es gab absolut gesehen genug Nahrung, um alle am Leben zu erhalten. Die Menschen verhungerten, weil sie kein Geld hatten, um sie zu kaufen.

Neben „natürlichen“ Faktoren wie extremen Wetterereignissen (die menschgemacht sind, wenn wir sie auf

die wahre Ursache zurückverfolgen) verschlechtern wir bewusst unsere Ernährungssituation, indem wir Nahrungsmittelpflanzen in Biokraftstoffe umwandeln. Der bekannteste Fall ist Mais, der nicht nur ein Grundnahrungsmittel ist, sondern auch die Grundlage für die Nahrungsmittelhilfe der USA für Afrika bei einer Hungersnot. Präsident George W. Bush begrüßte begeistert die Idee, Mais zu Biokraftstoff zu verarbeiten, was heute mit 40 % der Maisernte der USA geschieht. Wie zu erwarten war, hat dies zu einem Zusammenbruch der weltweiten Nahrungsreserven geführt, die zur Verfügung stehen, um Hungersnöte zu lindern. Die Europäische Union wollte den USA folgen, bis gerade rechtzeitig ein Bericht eines Ausschusses der Europäischen Umweltagentur, dem ich angehörte, im Jahr 2012 zeigte, dass Biokraftstoffe nicht einmal effizient in Bezug auf die Reduzierung der Treibhausgase sind, geschweige denn gut für die menschliche Ernährung (Haberl et al. 2012).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass wir Folgendes wissen:

- Die Witterungsverhältnisse auf der Nordhalbkugel im Winter und Frühjahr haben sich spürbar verändert, wobei extreme Bedingungen häufiger auftreten.
- Dies hat zu Störungen in der Nahrungsmittelproduktion in einer Zeit geführt, in der die Weltbevölkerung schnell wächst. Dies ist mit einem Anstieg des Lebensmittelpreisindex verbunden, der, wenn er wieder steigen wird, zu neuen Episoden von Nahrungsmangel und Unruhen in Ländern führen könnte, die Schwierigkeiten haben, ihre Bevölkerung zu versorgen.
- Wenn der Mechanismus tatsächlich mit dem Verlust von sommerlichem Meereis zusammenhängt, können wir keine natürliche Verbesserung erwarten.

10.4 Das Problem des Wassers

Mit dem Problem, ausreichend Nahrung für die Menschheit zu sichern, ist das Problem der Wasserversorgung verknüpft. Es war die Dürre in Australien, die Hubert Wilkins zu seinem Lebenswerk über das Polarklima inspirierte. Mit zunehmender Bevölkerung nimmt weltweit auch die Zahl der Menschen zu, die mit unzureichender Wasserversorgung leben. Dies wird als Wasserstress bezeichnet. Davon sind laut Definition (Arnell und Lloyd-Hughes 2014) jene Regionen oder Länder betroffen, in denen das verfügbare Wasser weniger als 1700 m^3 pro Person und Jahr beträgt, um alle Zwecke einschließlich der Landwirtschaft abzudecken. Zwischen 1000 und 1700 m^3 werden als „moderate Wasserknappheit“ bezeichnet, 500 bis 1000 m^3 als „chronisch“ und weniger als 500 m^3 als „extrem“. Es ist kaum zu glauben, aber im Jahr 2010 lebten $3,6$ Mrd. Menschen von einer Weltbevölkerung von $6,9$ Mrd. unter einem gewissen Grad an Wasserstress – mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung. Die beiden Regionen mit dem größten Anteil der Bevölkerung, der unter extremer Wasserknappheit leidet, sind Nordafrika mit 94 Mio. von 209 Mio. Menschen und der Mittlere Osten mit 71 Mio. von 214 Mio. Menschen. Diese Zahlen sind sehr hoch und werden bis 2050 noch viel schlechter ausfallen, da in beiden Regionen die Bevölkerung schnell zunimmt (Nordafrika 216 Mio. von 329 Mio.; Mittlerer Osten 190 Mio. von 379 Mio.). Die Wasserverfügbarkeit pro Kopf ist eindeutig stark mit dem Bevölkerungswachstum verbunden, aber sie ist auch eine Funktion des Klimawandels, wobei die Erwärmung im Allgemeinen (aber nicht immer) zu zunehmender Trockenheit führt. Viele andere Faktoren greifen ebenfalls ein, da wir ohne nachzudenken Bäume fällen und Wasser-einzugsgebiete zerstören.

Eis oder das Fehlen von Eis trägt auch auf ganz direkte Weise zum Wasserstress bei. In einigen Teilen der Welt, wie Nordindien, in Tibet und auf dem Altiplano in Bolivien, stammt die Wasserversorgung aus der Schneeschmelze im Frühjahr im nahen Hochgebirge sowie aus Schmelzwasser von Gletschern. Fällt diese regelmäßige Wasserversorgung aus, weil überhaupt nicht genügend Schnee oder Eis vorhanden ist, kommt es zu Wasserstress. Es gibt hier keinen direkten Zusammenhang mit dem Meereis, es geht einfach nur um die globale Erwärmung. Wasser- und Nahrungsmittelknappheit sind zwei der uns bedrohenden apokalyptischen Reiter, und sie treten tendenziell gemeinsam auf.

Literatur

- Arnell NW, Lloyd-Hughes B (2014) The global-scale impacts of climate change on water resources and flooding under new climate and socio-economic scenarios. *Clim Change* 122(1–2):127–140. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0948-4>
- Cohen J, Screen JA, Furtado JC, Barlow M, Whittleston D, Coumou D, Francis J, Dethloff K, Entekhabi D, Overland J, Jones J (2014) Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nat Geosci* 7:627–637. <https://doi.org/10.1038/ngeo2234>
- Francis JA, Vavrus SJ (2012) Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes. *Geophys Res Lett* 39:L06801. <https://doi.org/10.1029/2012gl051000>
- Ghatak D, Frei A, Gong G, Stroeve J, Robinson D (2012) On the emergence of an Arctic amplification signal in terrestrial Arctic snow extent. *J Geophys Res* 115:D24105
- Grassi B, Redaelli G, Visconti G (2013) Arctic sea-ice reduction and extreme climate events over the Mediterranean region. *J Clim* 26:10101–10110. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-12-00697.1>

- Haberl H, Sprinz D, Bonazountas M, Cocco P, Desaubies Y, Henze M, Hertel O, Johnson RK, Kastrup U, Laconte P, Lange E, Novak P, Paavolam I, Reenberg A, van den Hove S, Vermeire T, Wadhams P, Searchinger T (2012) Correcting a fundamental error in greenhouse gas accounting related to bioenergy. *Energy Policy* 45:18–23
- Liu J, Curry CA, Wang H, Song M, Horton RM (2012) Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall. *Proc Natl Acad Sci* 109:4074–4079. <https://doi.org/10.1073/pnas.1114910109>
- National Academy of Sciences (2014) Linkages between Arctic warming and mid-latitude weather patterns. National Academies Press, Washington, DC
- Overland JE (2016) A difficult Arctic science issue: mid-latitude weather linkages. *Polar Sci* 10:210–216
- Overland JE, Wang M (2010) Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice. *Tellus A* 62:1–9
- Screen JA, Simmonds I (2013) Exploring links between Arctic amplification and mid-latitude weather. *Geophys Res Lett* 40:959–964. <https://doi.org/10.1002/grl.50174>
- Wilkins H (1928) Flying the Arctic. Grosset and Dunlap, New York
- Wu B, Handorf D, Dethloff K, Rinke A, Hu A (2013) Winter weather patterns over northern Eurasia and Arctic sea ice loss. *Mon Weather Rev* 141:3786–3800. <https://doi.org/10.1175/mwr-d-13-00046.1>



11

Die geheimnisvollen Konvektionsschlote

Die Entdeckung der rätselhaften schlottförmigen Konvektionsströme in der Grönlandsee und ihre Rolle beim Klimawandel sind eine besonders interessante Geschichte. Es geht darin um Veränderungen in der Atmosphäre, im Meer und im Eis, die alle miteinander interagieren und eine deutliche Veränderung in der Temperaturverteilung auf unserem Planeten bewirken. Zugleich ist dies eine Geschichte, die mein eigenes Land direkt betrifft.

Was ist ein Konvektionsschlot (*convective chimney*)? Es handelt sich um einen tief reichenden, rotierenden, vertikalen Wasserzylinder, der kaltes Wasser von der Meeresoberfläche in große Tiefen von bis zu 2500 m transportiert. Dies widerspricht allem, was wir über die Stabilität des Ozeans zu wissen glauben. Normalerweise stellen wir uns vor, dass der Ozean sich aus verschiedenen Wassermassen zusammensetzt, die horizontale Schichten bilden, vertikal getrennt durch Unterschiede im Salzgehalt und in der Temperatur, was ihnen unterschiedliche

Dichten verleiht. Der Ozean als Ganzes ist stabil: Wasserschichten mit niedriger Dichte liegen auf Wasserschichten mit höherer Dichte, bis hinab zum Meeresboden. Mit Sicherheit kann Wasser an der Meeresoberfläche nie dazu gebracht werden, 2500 m abzusinken und diese Stabilität zu beeinträchtigen, oder? Nun, genau das passiert, aber nur an einigen wenigen ganz entscheidenden Stellen. Eine davon ist die Grönlandsee. Und obwohl solche Konvektionsströme sehr instabil sein sollten, können sie in der Tat jahrelang bestehen. Niemand weiß, warum.

11.1 Die globale thermohaline Zirkulation

Beginnen wir mit der thermohalinen Zirkulation. Dies ist die langsame Umwälzung des Wassers des gesamten globalen Ozeans in einer weltumspannenden Strömung. Diese wird nicht, wie die meisten Meeresströmungen, vom Wind angetrieben, sondern von Dichteänderungen, die durch Temperatur- und Salzgehaltsunterschiede verursacht werden. Der Hauptantrieb liegt in den Polarmeeren, wo der Salzgehalt im oberflächennahen Meerwasser durch die Bildung von Meereis zunimmt (da das meiste Salz, wie in Kap. 2 beschrieben, wieder ins Meer zurückgeleitet wird). Die Dichte nimmt zu und es sinkt ab. Dadurch wird in einer langsamen Strömung Wasser aus den Tropen zu den Polen gesaugt, was Wärme und Salz transportiert. Die Strömung wird durch die Form der Kontinente und durch die Corioliskraft der rotierenden Erde beeinflusst, aufgrund der sich bewegendes Wasser auf der Nordhalbkugel nach rechts und auf der Südhalbkugel nach links dreht.

Wenn wir uns die Oberflächenströme (Abb. 11.1) ansehen, sehen wir eine langsame Strömung (rot), die vom

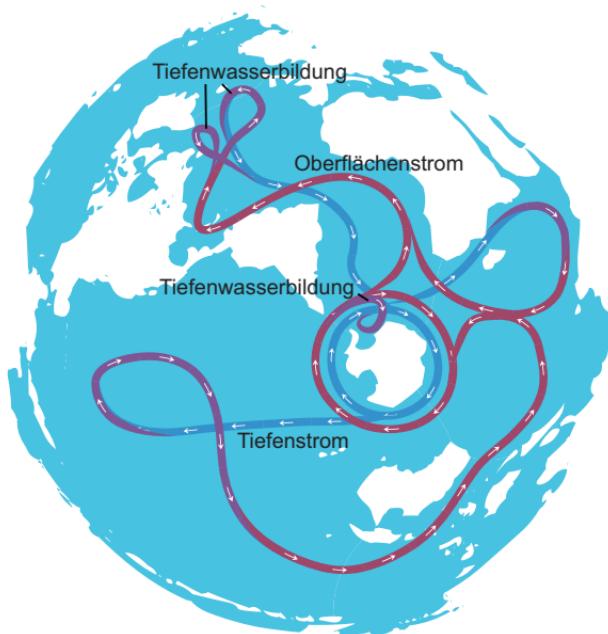


Abb. 11.1 Die auch als „globales Förderband“ bezeichnete globale thermohaline Zirkulation mit oberflächlichen und tiefen Komponenten der Strömung und lokaler Tiefenwasserbildung. (Nach Avsa)

Wind angetriebene Strömungsmuster in mancherlei Hinsicht nachahmt, mit der Ausnahme, dass sie auch ohne Wind weitergehen würde. Beginnen wir mit einem Blick auf die beiden großen Auftriebsgebiete im nördlichen Indischen Ozean und im Nordpazifik. Diese bringen tiefes Wasser (blau) an die Oberfläche, das nun langsam nach Süden und dann nach Westen fließt. Das pazifische Wasser fließt an den südostasiatischen Inseln vorbei und trifft im südlichen Indischen Ozean auf das im nördlichen Indischen Ozean aufsteigende Wasser. Die resultierende Strömung fließt um das Kap der Guten Hoffnung und dann nach Norden bis zum tropischen Atlantik. Hier sammelt

die Strömung weiteres Wasser und Wärme aus dem Golf von Mexiko auf und bewegt sich nach Nordosten über den Nordatlantik, genau wie der Golfstrom und der Nordatlantikstrom. Der Strom fließt weiter nach Norden in Richtung des Arktischen Ozeans, aber dann verschwindet er. Irgendwo sinkt das Wasser ab. Wir können dann eine langsame, tiefe Strömung durch den Nordatlantik und den Südatlantik zurück nach Süden erkennen, bis es wieder den Indischen Ozean und den Pazifik erreicht und das „globale Förderband“ vervollständigt – eine Reise, die etwa 1000 Jahre dauert. Wally Broecker vom Lamont-Doherty Earth Observatory hat diese Strömung „globales Förderband der Ozeane“ (*Great Ocean Conveyor Belt*) getauft, was ein sehr zutreffender Name ist, auch wenn andere Wissenschaftler, wie Carl Wunsch von der Woods Hole Oceanographic Institution, sagen würden, dass die Strömung viel komplexer ist und in eine Reihe von Zellen zerlegt werden muss. Aber Abb. 11.1 gibt einen guten Eindruck davon, ein unaufhaltsamer langsamer Wasserstrom, angetrieben durch Erwärmen, Abkühlen, Verdampfen und die Erdrotation – alles sehr grundlegende Antriebskräfte.

Ein Förderband muss angetrieben werden. Die Zahnräder, die das globale Förderband antreiben, sind die Auftriebskräfte, die tiefes Wasser im Indischen Ozean und im Pazifik an die Oberfläche bringen, und die Abtriebskräfte, die das Oberflächenwasser absinken lassen. Da wir uns auf Veränderungen in den Polarregionen konzentrieren, werden wir den breiten Auftrieb ignorieren und die Zahnräder untersuchen, die das viel kleinräumigere Absinken im Nordatlantik verursachen. Wo und warum läuft das ab?

Wissenschaftler stellten fest, dass dies nur an zwei Orten passiert, und diese Regionen sind überraschend klein (Marshall und Schott 1999). Der eine ist ein kleines Gebiet im Zentrum der Labradorsee, wo das Oberflächenwasser im Winter durch die kalten Winde vor

Labrador und Grönland gekühlt wird. Die Dichte des abgekühlten Wassers nimmt im Laufe des Winters zu und wird schließlich so groß, dass es in große Tiefen absinkt. Die Menge des absinkenden Wassers hängt entscheidend von den Lufttemperaturen im Winter ab und variiert von Jahr zu Jahr stark. Der zweite Bereich ist interessanter, da Meereis an diesem Prozess beteiligt ist. Es handelt sich um ein winziges Gebiet im Zentrum der Grönlandsee, bei 75° N, 0° W. Wir werden uns hier auf diesen entscheidenden Bereich konzentrieren, da die dortigen Veränderungen die ganze Welt betreffen.

11.2 Die Konvektion in der Grönlandsee

Die Grönlandsee ist eine Meeresregion von einzigartiger Bedeutung, die in der Nähe von Europa liegt und eng mit dem europäischen Klima zusammenhängt. Dank der Wärme, die von den Meeresströmungen bis in die Grönlandsee transportiert wird, ist Westeuropa 5 bis 10°C wärmer als die Durchschnittstemperatur für den entsprechenden Breitengrad (Abb. 11.2). Sollte dieser Wärmetransport aufhören, hätten Großbritannien und Westeuropa ein Klima wie Labrador.

Das Zentrum der Grönlandsee ist ein Fenster zur Tiefsee. Der Bereich in der Grönlandsee mit absinkendem Wasser nimmt nicht einmal ein Tausendstel der Fläche der Weltmeere ein, und dennoch ist er für die Ozeanzirkulation von grundlegender Bedeutung, da nur durch dieses Absinken (auch „Ventilation“ genannt) eine vollständige vertikale und horizontale Zirkulation des Ozeans stattfinden kann, womit im Oberflächenwasser gelöste Gase und Nährstoffe der Tiefsee zugeführt werden. Durch

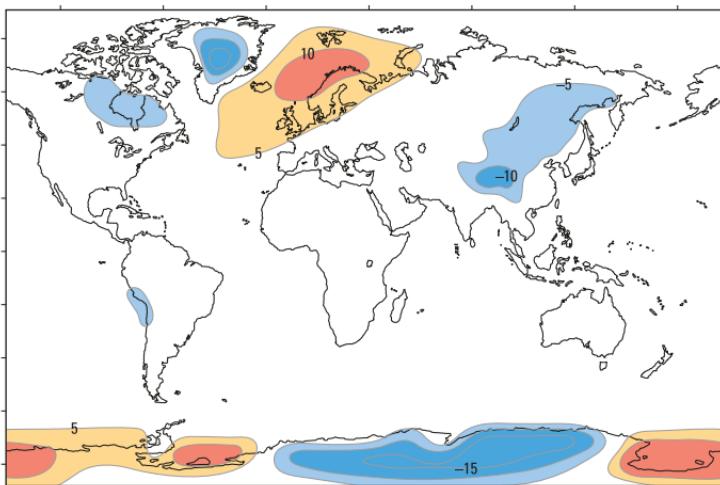


Abb. 11.2 Konturen der Temperaturanomalien für 1999. Gezeigt sind die Lufttemperaturen relativ zum zonalen Mittel (der mittleren Temperatur für diesen Breitengrad). Die warme Anomalie in Nord- und Westeuropa ist auf das warme Wasser zurückzuführen, das durch den Golfstrom und den atlantischen Teil der thermohalinen Zirkulation transportiert wird (Rahmstorf und Ganopolski 1999)

dieses Absinken wird auch gelöstes Kohlendioxid in die Tiefe eingetragen. Das hat einen großen Einfluss auf die Fähigkeit des Ozeans, einen erheblichen Teil des zusätzlichen Kohlendioxids aufzunehmen, das wir jedes Jahr in die Atmosphäre abgeben. Es wird vermutet, dass Veränderungen dieser Konvektion in der Vergangenheit für einige der in Sedimenten und Eiskernen nachgewiesenen plötzlichen Klimaschwankungen verantwortlich waren. Später in diesem Kapitel werden wir sehen, dass einige Klimamodelle, die einen Rückgang der Konvektion in der Grönlandsee vorhersagen, auch eine daraus folgende Abkühlung des westeuropäischen Klimas vorhersagen.

In der Grönlandsee findet die Konvektion im Zentrum eines großen Meereswirbels statt (der sich wie alle

Wirbel auf der Nordhalbkugel gegen den Uhrzeigersinn dreht). Im Westen wird dieser Wirbel von einer kalten Strömung begrenzt, dem Ostgrönlandstrom, der aus dem Arktischen Becken polares Eis und Wasser in das System bringt, im Osten durch einen warmen, nach Norden fließenden Strom, dem Westspitzbergenstrom, der ein Ausläufer des Golfstroms ist, und im Süden durch den kalten Jan-Mayen-Strom, einem Abzweig des Ostgrönlandstroms, der bei etwa 72 bis 73° N vom Hauptteil des Ostgrönlandstroms nach Osten abgelenkt wird, weil es hier unter Wasser eine Bergkette gibt, den Jan-Mayen-Rücken (Abb. 11.5). Das Grönlandmeer stellt auch die Hauptschlagader für den Wasser- und Wärmeaustausch zwischen dem Arktischen Ozean und dem Rest der Welt dar, denn die Framstraße, die das Grönlandmeer mit dem Arktischen Ozean verbindet, ist der einzige tiefe Zugang in die Arktis. Das Eis wird aus dem Arktischen Ozean in die Grönlandsee transportiert und schmilzt auf seinem Weg nach Süden, sodass die Grönlandsee im Durchschnitt, wenn über ein Jahr gemittelt wird, eine „Eissenke“ und damit eine „Süßwasserquelle“ ist. Schmelzendes Eis bringt jährlich rund 3000 km³ Süßwasser in die Grönlandsee.

Im Winter kann sich aber auch lokal innerhalb der Grönlandsee selbst Eis bilden, in der Region in der sich kaltes Wasser im Jan-Mayen-Strom nach Osten bewegt. Das Wasser ist bereits kalt, weil es aus dem Ostgrönlandstrom stammt. Es lässt seine Bedeckung mit polarem Meereis, das an der grönlandischen Küste weiter nach Süden treibt, hinter sich. Dadurch ist das kalte, aber eisfreie Wasser im Winter einer weiteren intensiven Abkühlung durch eine kalte Atmosphäre ausgesetzt, insbesondere in Klimaphasen, in denen die vorherrschenden Winde im Winter nach Westen ziehen und über den Grönlandischen Eisschild blasen. Durch die intensive Kühlung bildet sich auf diesem kalten offenen Wasser neues

Meereis. Doch das neue Eis kann aufgrund der hohen Wellenenergie, die im Winter in der Grönlandsee vorhanden ist, keine kontinuierliche Schicht bilden. Stattdessen folgt es dem klassischen Zyklus über Frazil-Eis und Pfannkucheneis. Zunächst bildet sich in der Wassersäule eine wie Magnesiamilch aussehende Suspension von Frazil-Eiskristallen. Dann bilden sich kleine, nur 1 bis 5 m breite Pfannkuchen, die durch ihre häufigen Kollisionen erhöhte Ränder erhalten (Abb. 11.3, 11.4 und 11.5). Die Pfannkuchen werden durch Wellen gebildet, die dazu führen, dass sich die Kristalle der Frazil-Suspension zusammenklumpen. Diese Pfannkuchen und das Frazil-Eis, in dem sie schwimmen, bedecken die Meeresoberfläche im Bereich des Jan-Mayen-Stroms mit seinem kalten polaren Wasser vollständig. Dies ist auf Satellitenbildern zu sehen (Abb. 11.5), und das neue Eis bildet eine zungenförmige Ausbuchtung, die sogenannte Odden-Eiszunge, die eine Fläche von bis zu 250.000 km² einnehmen kann. Robbenfänger haben diese im 19. Jahrhundert entdeckt und benannt. Sattelrobben nutzen die kleinen Pfannkuchen, um im Frühjahr aus dem Wasser zu kommen und ihre Welpen zu gebären. Norwegische Robbenfänger folgten dem äußeren Eisrand der Zunge, um die jungen Welpen für ihr wertvolles weißes Fell zu schlachten und nannten das Gebiet Odden (norwegisch für Landzunge). Auch die frühen Walfänger kannten das Gebiet, da die teilweise geschützte Bucht mit offenem Wasser westlich der Odden-Eiszunge, die Nordbukta („Nordbucht“), ein Gebiet war, das von langsam schwimmenden Glattwalen (insbesondere Grönlandwalen) besucht wurde. Der große Walfänger und Wissenschaftler William Scoresby Jr., der uns bereits in Kap. 6 begegnet ist, schrieb über diese Eiszunge und die Bucht in seinem klassischen Buch von 1820, *An Account of the Arctic Regions With a History and Description of the Greenland Whale-Fishery* (Scoresby 1820).

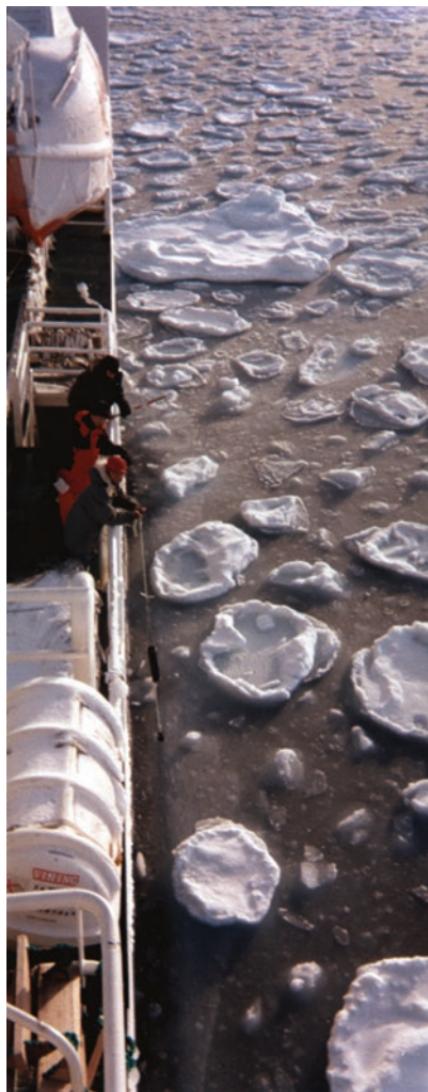


Abb. 11.3 Pfannkucheneis in der Odden-Eiszunge in der Grönlandsee. Hier werden dicke, alte Pfannkuchen von einem Schiff aus beprobt



Abb. 11.4 Dünneres, jüngeres Pfannkuchen wird mit einer Wellenboje untersucht

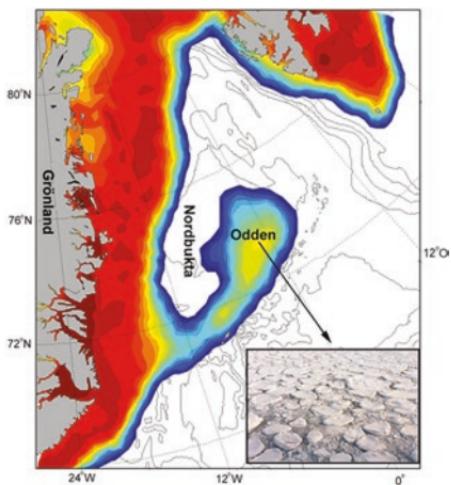


Abb. 11.5 Die Odden-Eiszunge im Winter 1997. Rote Farben repräsentieren dickes polares Meereis, das aus dem Arktischen Ozean kommt. Blaue und gelbe Konturen sind jüngere, lokal gewachsene Eisflächen in der Odden-Eiszunge in der Form von Pfannkucheneis (kleines Bild)

Das Spannende bei der Bildung von Pfannkuchen-eis ist, dass der größte Teil des im gefrierenden Wasser enthaltenen Salzes nicht in das Eis gelangt, sondern im Meerwasser verbleibt. In Experimenten meiner Forschungsgruppe haben wir Pfannkuchen mit dem Kran auf das Deck eines Schiffes gehoben und aufschnitten. Wir fanden heraus, dass dünnere Pfannkuchen einen Salzgehalt von etwa 10 ‰ haben (im Vergleich zu 35 ‰ für Meerwasser), während in dickeren der Salzgehalt auf bis zu 4 ‰ sinken kann. Sie haben fast 90 % ihres Salzes verloren. Die Freisetzung der Sole erhöht die Dichte des Oberflächenwassers, was zum Effekt durch Abkühlung noch hinzukommt. Die Oberflächenschicht wird destabilisiert und das Oberflächenwasser sinkt ab (Wilkinson und Wadhams 2003). Dies ist ein viel stärkerer Effekt als in der Labradorsee, da das Salz die Dichte zusätzlich erhöht. Tatsächlich ist die schnelle Wachstumsrate des Pfannkucheneises und damit der schnelle Anstieg des Salzgehalts im Oberflächenwasser entscheidend für die starke Konvektionsströmung in der Grönlandsee und damit für die Aufrechterhaltung der thermohalinen Zirkulation. Aus diesem Grund ist es spannend, dass Pfannkucheneis nahezu kein Salz aufnimmt. Es handelt sich um einen schnellen Prozess, da das Pfannkucheneis rasch wächst, und das geschieht genau dort, wo es die Stabilität der Ozeanschichtung stark beeinflussen kann.

Aufgrund der Bedeutung der Odden-Eiszunge für skandinavische Robbenfänger wurde ihr Umfang seit 1855 fast jedes Jahr erfasst, sogar bevor das Dänische Meteorologische Institut gegründet wurde und mit der Veröffentlichung monatlicher Eisberichte begann. Die Eiszunge bildete sich fast jeden Winter im November und hatte bis April oder sogar bis Mai Bestand, sodass wir davon ausgehen können, dass die Konvektion immer während dieses Zeitraums stattfand. Aber seit den 1990er-Jahren

ist etwas passiert, das dies stört. In den Jahren 1994 bis 1995 und von 1998 an bis heute hat sich die Odden-Eiszunge nicht mehr vollständig entwickelt. Das ist eine große Veränderung in der Natur der Grönlandsee. Warum ist das passiert? Zum Teil, weil das Klima in eine neue Phase eintrat, in der die vorherrschenden Winde über dem Odden-Gebiet von Osten kamen und wärmer waren (dieser Wechsel zwischen zwei atmosphärischen Zirkulationssystemen wird als Nordatlantische Oszillation oder NAO bezeichnet). Das Problem ist aber noch ernster: Die Odden-Eiszunge kam beim Wechsel der NAO in ihre frühere Phase deshalb nicht zurück, weil die globale Erwärmung die Lufttemperaturen über dem Meer so stark erhöht hatte, dass sie ihre Entstehung verhindern konnten.

11.3 Das Geheimnis der Schlote

Was bedeutet das? Wie hat es sich auf die Konvektion, das Absinken des Oberflächenwassers in große Tiefen ausgewirkt? Um das beurteilen zu können, müssen wir untersuchen, wie die Konvektion abläuft. Es stellte sich heraus, dass es einen weiteren faszinierenden Prozess gibt, den wir noch nicht vollständig verstehen, die Bildung sogenannter Konvektionsschlote. Eine solche Strömung wurde erstmals 1970 in einem warmen Teil des Ozeans, im Golfe du Lion („Löwengolf“) im nordwestlichen Mittelmeer, während eines großen ozeanografischen Experiments namens *Mediterranean Ocean Circulation Experiment* (MEDOC) entdeckt (MEDOC Group 1970). Wenn im Winter der Mistral, ein starker und kalter Nordwestwind, aus den Seealpen über das Meer blies, kühlte die kalte Luft das Oberflächenwasser so stark ab, dass es absank. Das passierte nicht als zufällig geformte Wassermasse, sondern in Form von kleinen Wirbeln, die zylinderförmig in die

Tiefe reichen und als Schläuche (*chimneys*) bezeichnet wurden. Ein solcher Schlot besteht nicht lange – nur wenige Tage –, weil die Winde ihre Richtung ändern, und sie galten lange als eine amüsante Kuriosität. In den 1990er-Jahren vermuteten Wissenschaftler, die in der Grönlandsee arbeiteten, erstmals, dass eine derartige Konvektion auch unter der Odden-Eiszunge ablief. Ich leitete damals ein Projekt der Europäischen Union mit dem Namen European Sub Polar Ocean Programme (ESOP), das dann in ein zweites Forschungsprogramm mit dem Namen Convection mündete, das ebenfalls die Europäische Union finanzierte. Dank dessen und der Beteiligung vieler ozeanografischer Institutionen, die Schiffe besaßen, darunter das Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven und das Norwegische Polarinstitut in Tromsø, war es möglich, im tiefsten Winter Reisen in das Zentrum der

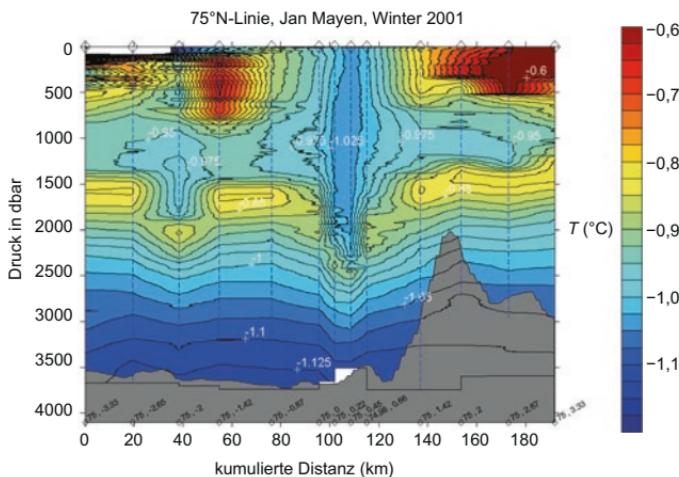


Abb. 11.6 Ein Temperaturprofil durch den Konvektionsschlot in Abb. 11.7, mit einem zweiten, kleineren Schlot in der Nachbarschaft (der Druck in Decibar ist fast identisch mit der Tiefe in Metern) (Wadhams et al. 2002)

Odden-Region zu unternehmen, um zu sehen, wie die Konvektion ablief.

Was wir dort fanden, war äußerst bemerkenswert (Abb. 11.6 und 11.7). Auf engstem Raum, mit einem Durchmesser von nur 20 km, bildete das Oberflächenwasser einen zylinderförmigen Wirbel, der sich – fast wie ein Festkörper – im Uhrzeigersinn drehte (also der Rotation des großen Wirbels der Grönlandsee entgegengesetzt) und das Wasser abwärts strömen ließ. Er reichte bis in die erstaunliche Tiefe von 2500 m, in einem nur 3500 m tiefen Ozean (Wadhams et al. 2002). Das Oberflächenwasser, dessen Dichte durch Eisbildung und Abkühlung deutlich erhöht wird, sinkt ab, bis seine Dichte derjenigen des Ozeanwassers in der Umgebung des Wirbels ent-

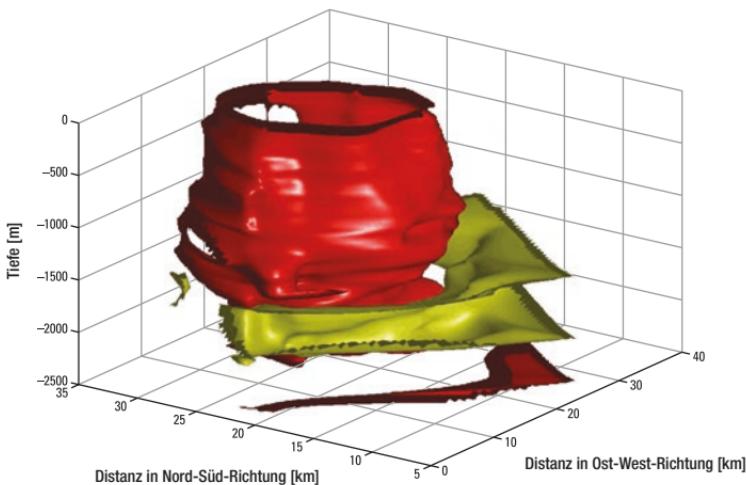


Abb. 11.7 Die Temperaturstruktur eines winterlichen Konvektionsschlots in der Grönlandsee. Seine Schlotform wird durch die Temperaturkontur mit $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ hervorgehoben. Man beachte die große Tiefe, in die er absinkt (2500 m) und seine perfekte zylindrische Struktur. Er durchschneidet eine etwas wärmere Schicht, die durch die gelb dargestellte Kontur mit $-0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ sichtbar wird (Wadhams et al. 2002)

spricht. Während das Wasser in diese Tiefe absinkt, durchschneidet der zylinderförmige Wirbel alles, was ihm im Weg steht, einschließlich einer tiefen Schicht wärmeren Wassers, die das absinkende Wasser einfach durchbohrt. Die Form des Konvektionsschlots in Abb. 11.7 wird durch die Temperaturkontur von $-1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ deutlich sichtbar (sehr passend rot gezeichnet, damit sie wie ein Schornstein wirkt). Er schneidet durch eine gelb dargestellte tiefe Schicht mit etwas wärmerem Wasser ($-0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$). Die Form des Schlots kann nachverfolgt werden, indem wir Temperatur, Salzgehalt oder Dichte darstellen. In der Nähe des Schlots aus Abb. 11.7 gab es einen kleineren Schlot, der zu diesem Zeitpunkt erst eine geringere Tiefe erreicht hatte. Abb. 11.6 zeigt die beiden Schlote in einem Temperaturprofil. Es wurde aufgenommen, indem das Schiff entlang einer Linie wiederholt Station machte und eine Sonde abgesenkt wurde, um Temperatur und Salzgehalt zu messen – auch mitten in den Schlotten.

Die erstaunlich kohärente Beschaffenheit dieses rotierenden Zylinders ist in Abb. 11.8 dargestellt. Das Schiff Polarstern des Alfred-Wegener-Instituts wurde über einem Schlot positioniert und die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers mit einem akustischen Gerät gemessen, einem Ultraschall-Doppler-Profil-Strömungsmesser (*Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP*) (Budéus et al. 2004). Wir sehen, dass sich das Wasser im Zylinder mit einer Geschwindigkeit dreht, die proportional zum Abstand vom Zentrum ist – mit anderen Worten: wie ein rotierender Festkörper. Und vergessen wir nicht, dass diese Drehung im Uhrzeigersinn erfolgt (in der Ozeanografie als antizyklonisch bezeichnet) und der großräumigen Rotation der Strömungen in der Grönlandsee, die sich gegen den Uhrzeigersinn dreht, direkt entgegengesetzt ist. Auch aus diesem Grund waren wir erstaunt, dass dieser Wirbel sich bilden und fortbestehen konnte.

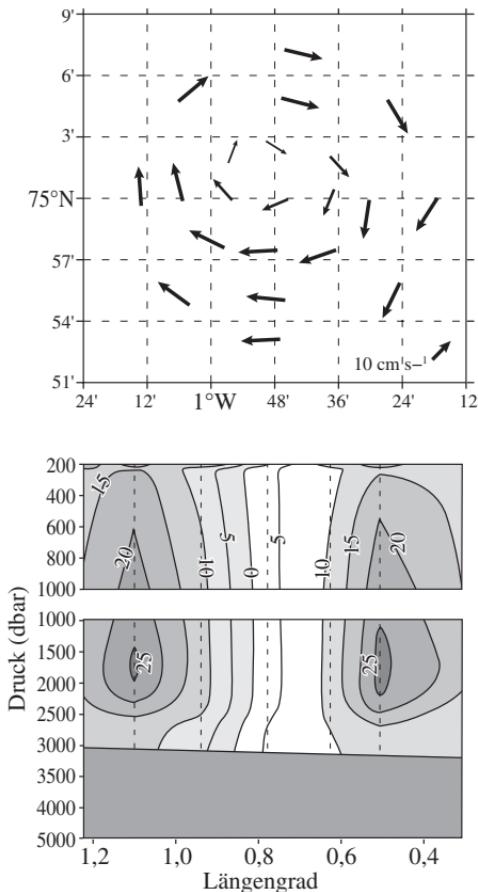


Abb. 11.8 Wasserströmungsgeschwindigkeiten um das Zentrum eines Schlots der Grönlandsee. Die Bewegung ähnelt der Rotation eines Festkörpers. Das obere Diagramm ist eine Oberflächenansicht mit Blick senkrecht nach unten. Der Querschnitt darunter zeigt, dass die einem rotierenden Festkörper ähnelnde Bewegung den gesamten zylinderförmigen Wirbel umfasst. Im Bereich auf der linken Seite zeigt die Strömungsrichtung aus der Ebene des Papiers heraus, auf der linken Seite in die Ebene des Papiers hinein. (Nach Budéus et al. 2004)

Wie viele Schlote gibt es? Wir nutzten die kleinen norwegischen Forschungsschiffe Lance und Jan Mayen und unser Problem war dabei, dass wir, nachdem wir einen

Schlot gefunden hatten, den Rest der Expedition damit verbrachten, ihn angemessen zu kartieren. Das schlechte Wetter in der Grönlandsee im Winter bedeutete, dass wir oft die Arbeit einstellen und beidrehen mussten. Ich werde nicht vergessen, wie sich einmal das Auge eines Sturms direkt über uns hinwegbewegte. Während einer trügerisch ruhigen Stunde senkte sich der Luftdruck auf nur 917 mbar ab, bevor sich die zweite Hälfte des Sturms mit Windstärke 12 über uns stürzte. In den meisten Jahren fanden wir nur einen einzigen Konvektionsschlott, der immer bei genau 75° N, 0° W lag. Die größte Zahl von Schlotten, die wir bei einer einzigen Expedition fanden, waren gerade mal zwei, und das war in einer außergewöhnlich ruhigen Winterperiode, in der wir das Gefühl hatten, dass unsere Stationen nahe genug beieinanderlagen, um jeden eventuell vorhandenen zu erkennen (Wadhams et al. 2004). Wir vermuten daher, dass es in diesem Jahr in der Tat nur zwei Schlotte in der zentralen Grönlandsee gab. Eine erneute Analyse von Studien aus früheren Jahren deutet jedoch darauf hin, dass es früher viel mehr davon gab: Jean-Claude Gascard von der Université Pierre et Marie Curie in Paris setzte 1997 eine Reihe von auftriebsneutralen Schwimmern ein, deren Gewicht so eingestellt war, dass sie in festgelegten Tiefen treiben. Er stellte damals fest, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt vier von ihnen auf engen Kreisbahnen in Tiefen von 240 bis 530 m rotierten. Erst später wurde uns klar, dass sie in Schlotten gefangen waren. Somit gab es in den 1990er-Jahren viel mehr Konvektionsschlote als in den 2000er-Jahren. Es ist kein Zufall, dass es früher auch mehr Eis gab.

Während des Forschungsprojekts Convection besuchten wir das Zentrum des Wirbels der Grönlandsee in drei aufeinanderfolgenden Wintern (2001 bis 2003), während unsere Kollegen vom Alfred-Wegener-Institut

in den dazwischenliegenden Sommern dorthin fuhren. Was wir fanden, war äußerst spannend. Ein Konvektionsschlot ist sehr langlebig. Ein aktiver Schlot, der im ersten Winter gefunden wurde, befand sich im folgenden Sommer noch in der gleichen Position, war aber von einer 50 m dicken Schicht des salzärmeren und weniger dichten Wassers bedeckt: das durch Schmelzen von Meereis und Gletschern gebildete sommerliche Oberflächenwasser der Grönlandsee. Unter dieser Schicht bestand der rotierende Zylinder noch immer. Im folgenden Winter hatte er sich wieder bis an die Meeresoberfläche geöffnet und funktionierte wieder als Zentrum der Konvektion. Dieser Prozess wiederholte sich im folgenden Sommer und Winter bis zum Ende des Forschungsprojekts, sodass wir ihm nicht weiter folgen konnten. Dies ist der langlebigste Konvektionsschlot, der je untersucht wurde (Wadhams 2004). Eine solche Langlebigkeit einer so kleinräumigen Strömung ist ansonsten im Ozean völlig unbekannt. Normalerweise verliert ein Wirbel durch Reibung Energie und Schwung und wird innerhalb von ein paar Tagen oder Wochen abgebremst. Wir wissen nicht, was einen Konvektionsschlot in einem so schnell rotierenden, kleinräumigen Zustand hält. Warum wird er nicht abgebremst? Wir wissen auch nicht, warum ein Schlot sich nicht vom Fleck bewegt – unser langlebigster Konvektionsschlot bewegte sich in drei Jahren nur 10 km weit, obwohl es auf dem Meeresboden keine Möglichkeit gibt, ihn an einem Ort zu verankern, wie es bei Meereswirbeln oft der Fall ist. Konvektionsschloten bleiben in vielerlei Hinsicht ein Rätsel. Nach diesen wichtigen Entdeckungen mit enormer Bedeutung für das Klima waren wir zutiefst enttäuscht, dass unsere wiederholten Versuche, vom Natural Environment Research Council (NERC) des Vereinigten Königreichs eine weitere Förde-

rung der Forschungsarbeit an den Schloten zu erhalten, alle abgelehnt wurden.

Wir wissen, dass es heute weniger dieser bemerkenswerten Strukturen gibt, was mit dem Eisverlust der Odden-Eiszunge zusammenfällt. Dieser Rückgang der Konvektion in der Grönlandsee wird ernste Auswirkungen auf das Klima des gesamten Weltmeeres haben. Modelle deuten darauf hin, dass zwischen sechs und zwölf Schlotte pro Jahr entstehen und vergehen müssen, um das Volumen der Tiefenwasserbildung zu erklären. Wo sind diese Schlotte jetzt? Gibt es sie noch, trotz der Schwierigkeit, sie ohne Eis zu bilden? Verlangsamt sich oder stoppt die Tiefenwasserbildung? Oder läuft diese auf eine andere Weise oder an einem anderen Ort ab?

11.4 Die Zukunft im Kino

Im Jahr 2004 kam ein dramatisch unrealistischer Film mit dem Titel *The Day After Tomorrow* in die Kinos. In diesem führt eine Abnahme der Ozeankonvektion, ausgelöst durch Schmelzwasser, das die Polarmeere bedeckt, zu einem Klimawandel, der New York innerhalb weniger Tage in eine eisige Polarwüste verwandelt. Bloß nicht an der thermohalinen Zirkulation herumpfuschen, war die Botschaft. Aber genau das machen wir. Es gibt bereits Hinweise darauf, dass der Rückgang der Konvektion in hohen Breiten zu einer Verringerung des Wärmetransports im Atlantik führt. Die Gesamtstärke der atlantischen thermohalinen Zirkulation wird auf 15 bis 20 Sverdrup (Millionen Tonnen Wasser pro Sekunde) geschätzt, die 1 Petawatt (PW, 10^{15} W, eine Billiarde Watt) Wärme nach Norden transportieren. Bei tiefen Strömungen, die an den Färöern vorbei nach Süden fließen, wurden beobachtet,

dass sie an Stärke verlieren. Das zeigt, dass ein Teil des globalen Förderbandes – der Teil, der in der Tiefe das Wasser von der Arktis fortführt – bereits geschwächt ist. Möglicherweise werden wir eine Schwächung der thermohalinen Zirkulation an der Oberfläche des Nordatlantiks erst einmal nicht bemerken, da die Strömung von dem windgetriebenen Golfstrom und dem Nordatlantikstrom dominiert wird. Aber ein beständiger Rückgang der Strömung in diesem warmen Abschnitt des Förderbandes könnte irgendwann bemerkt werden.

Wird dadurch das Klima kühler? Zumaldest das Klima an der europäischen Atlantikküste? Ja, das wird es, wenn auch nicht so schnell und nicht so sehr, wie es im Film zu sehen ist. Tatsächlich wird es wahrscheinlich nur bedeuten, dass sich unsere Region langsamer erwärmt als Kontinentaleuropa. Abb. 11.9 zeigt die Vorhersagen eines Klimamodells der Europäischen Umweltagentur, bei dem ein normales *business-as-usual*-Szenario in weiten Teilen Europas bis 2100 eine erwartete (und angstinföllende) Erwärmung um 4 °C mit sich bringt – eine Erwärmung, die das Klima Südeuropas in ein Klima verwandeln wird, das dem heutigen Nordafrika ähnelt. Aber in dieser Modellsimulation wurde eine Abnahme der atlantischen thermohalinen Zirkulation angenommen, was die erwartete Erwärmung in Großbritannien, Irland, Island, den Niederlanden und entlang der Atlantikküste in Norwegen und Frankreich stark reduzierte. In Großbritannien wird die Erwärmung auf 2 °C halbiert. Leider bedeutet die Speicherung von mehr Wärme in niedrigen Breiten natürlich eine schnellere Erwärmung des Oberflächenwassers des tropischen Atlantiks, was wahrscheinlich zu Hurrikanen von viel größerer Intensität führen wird.

Mit der Abnahme der Konvektion in der Grönlandsee ist möglicherweise verbunden, dass 2003 ein neuer

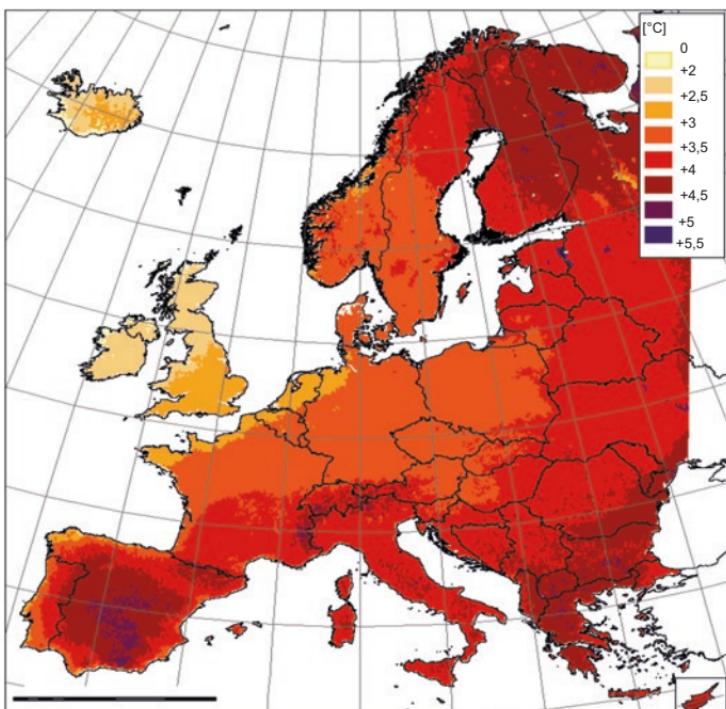


Abb. 11.9 Prognosen der Europäischen Umweltagentur von 2008 für die Erwärmung Europas bis zum Jahr 2100 (EUA)

Konvektionsstandort in der Irmingersee östlich der Südspitze Grönlands entdeckt wurde (De Jong et al. 2012). Die Konvektion ist dort viel flacher als in der Grönlandsee und erreicht in den meisten Wintern nur 400 m, in besonders kalten Wintern 1000 m. Die Form der Konvektion ist ganz anders – keine akkuraten, mysteriösen Zylinder, nur eine diffuse Masse von absinkendem Wasser, die eine relativ große Fläche einnimmt. Sie strömt danach weiter Richtung Südwesten und interagiert mit dem Wasser der Labradorsee. Es scheint sich um eine Art Vorläufer der Konvektion in der Labradorsee zu handeln. Meereis spielt bei diesem Prozess keine Rolle.

11.5 Die Zukunft

Die unmittelbaren Auswirkungen der Forschungsergebnisse aus der Grönlandsee sind bereits klar. Die Klimamodelle müssen angepasst werden, um den im Rahmen des Convection-Projekts entdeckten Mechanismen Rechnung zu tragen. Aber wir müssen auch daran erinnern, dass es ein rein physikalisches Forschungsprojekt war, das darauf abzielte, das physikalische Verhalten eines Teils des Ozeans zu verstehen. Dieser ist jedoch auch ein Lebensraum. Weitere Forschung durch Biologen und Chemiker muss an die Ergebnisse des Projekts anschließen. Jan Backhaus von der Universität Hamburg hat entdeckt, dass in einem Konvektionsschlot im Winter die Planktonmenge pro Flächeneinheit der Meeresoberfläche etwa so groß ist wie normalerweise im Frühjahr und Sommer. Der Grund dafür ist, dass die gesamte, 2500 m tief reichende Wassersäule die gleiche Dichte hat. Plankton kann darin auf der Suche nach Nahrung ohne Anstrengung zur Oberfläche aufsteigen oder in große Tiefe absinken. Obwohl es im Winter dunkel ist, kann ein Konvektionsschlot so mehr Leben ernähren als eine entsprechende Fläche normalen Ozeans.

Die verbleibenden Herausforderungen bestehen darin, die Entwicklungen in der zentralen Grönlandsee zu verfolgen, wo die bisherigen Strukturen sich auflösen und neue entstehen, und die Auswirkungen des Klimawandels auf die Mengen und Tiefen der Konvektionsströmungen vorherzusagen. Wie in so vielen Bereichen der Klimaforschung ist weitere Forschung dringend notwendig, um böse Überraschungen zu vermeiden, und wie in so vielen Bereichen wird diese Forschung trotzdem nicht finanziert. Dies ist ein weiterer Aspekt der mentalen Selbstzensur, die

bei einigen Klimawissenschaftlern und den meisten Trägern der Wissenschaftsförderung zu erfolgen scheint. Zahlreiche Anträge für Projekte in der zentralen Grönlandsee wurden in den vergangenen Jahren abgelehnt, nicht nur von den Briten. Dabei wird allgemein anerkannt, dass die thermohaline Zirkulation ein wesentlicher Bestandteil unseres Klimasystems ist und ihre Veränderung oder Störung große globale Auswirkungen hätte. Deshalb ist es wichtig, wieder Wissenschaftler dorthin zu schicken.

Literatur

- Budéus G, Cisewski B, Ronski S, Dietrich D, Weitere M (2004) Structure and effects of a long lived vortex in the Greenland sea. *Geophys Res Lett* 31:L053404. <https://doi.org/10.1029/2003gl017983>
- De Jong MF, Van Aken HM, Våge K, Pickart RS (2012) Convective mixing in the central Irminger sea: 2002–2010. *Deep-Sea Research I* 63:36–51
- Marshall J, Schott F (1999) Open-ocean convection: observations, theory and ideas. *Rev Geophys* 37:1–63
- MEDOC Group (1970) Observations of formation of deep-water in the Mediterranean sea, 1969. *Nature* 227:1037–1040
- Rahmstorf S, Ganopolski A (1999) Long-term global warming scenarios computed with an efficient coupled climate model. *Clim Change* 43:353–367
- Scoresby W (1820) An account of the Arctic regions with a history and description of the Greenland whaling, Bd 2. Constable, London (Reprint 1968, David and Charles, Newton Abbot)
- Wadhams P (2004) Convective chimneys in the Greenland sea: a review of recent observations. *Oceanography and Marine Biology. An Annual Review* 42:1–28

- Wadhams P, Holfort J, Hansen E, Wilkinson JP (2002) A deep convective chimney in the winter Greenland sea. *Geophys Res Lett* 29 (10). <https://doi.org/10.1029/2001gl014306>
- Wadhams P, Budéus G, Wilkinson JP, Loynan T, Pavlov V (2004) The multi-year development of long-lived convective chimneys in the Greenland sea. *Geophys Res Lett* 31:L06306. <https://doi.org/10.1029/2003gl019017>
- Wilkinson JP, Wadhams P (2003) A salt flux model for salinity change through ice production in the Greenland sea, and its relationship to winter convection. *J Geophys Res* 108(C5):3147. <https://doi.org/10.1029/2001jc001099>



12

Was passiert in der Antarktis?

12.1 Die seltsame Geschichte des antarktischen Meereises

Mein Fokus lag in diesem Buch bisher auf der Arktis. Und das aus einem triftigen Grund: Die Arktis liegt im Hinterland der meisten hoch entwickelten Industrieländer Eurasiens und Nordamerikas, und die dort stattfindenden schnellen Veränderungen betreffen uns sofort. Aus Sicht von Großbritannien beginnt das Meereis in der Grönlandsee nur 650 km von den Shetlandinseln entfernt. Für Kanada, Russland und die USA ist das Meereis Teil ihrer Hoheitsgewässer. Im Gegensatz dazu ist die Antarktis weit weg, sie ist sogar weit entfernt von jeglicher Landmasse. An ihrer engsten Stelle ist die Drakestraße zwischen der Antarktis und Südamerika immerhin 800 km breit. Ist es wichtig, was dort unten passiert?

Es ist wichtig, und zwar aus mindestens zwei Gründen. Zum einen muss die Albedorückkopplung des Schnee- und

Eisrückgangs für den gesamten Planeten berechnet werden. Wir haben in den vorangegangenen Kapiteln diskutiert, dass sich das arktische Meereis sehr schnell zurückzieht. Wir wissen, dass die Geschwindigkeit dieses Rückzugs weit über den Prognosen der meisten Klimamodelle liegt, die einen langsameren Rückzug im Einklang mit der allgemeinen globalen Erwärmung voraussagen. In dieser Hinsicht ist das arktische Meereis eine Anomalie. Aber das antarktische Meereis ist eine noch größere Anomalie, es hat sich nämlich weiter ausgebreitet. Nicht sehr schnell, aber im Durchschnitt ist seine Fläche etwas größer geworden, trotz einer allgemeinen Erwärmung über dem antarktischen Kontinent. Wenn das Ausbreiten des antarktischen Meereises anhält, wird dies dazu beitragen, die globale Albedoreduktion, ausgelöst durch den Rückzug des Meereises und der Schneegrenze in der Arktis, teilweise auszugleichen. Zweitens ist ein Vordringen des antarktischen Meereises für globale Klimamodelle ebenso eine Herausforderung wie der schnelle Rückzug des arktischen Meereises – Computermodelle prognostizieren einen langsamen Rückzug in beiden Polarregionen, sodass sie an beiden Seiten falsch liegen. Im September 2013 erreichte die antarktische Eisausdehnung ein Rekordmaximum von 19,47 Mio. km², wie Daten vom US National Snow and Ice Data Center (NSIDC) in Boulder belegen. Das sind rund 30.000 km² mehr als im Durchschnitt zwischen 1981 und 2010. In den letzten Jahren ist die Fläche etwas zurückgegangen, auf 18,83 Mio. km² im Jahr 2015 (NSIDC o. D.), möglicherweise verbunden mit dem Beginn eines El Niños – einer zyklischen Änderung von Strömungen in der Atmosphäre und im Ozean auf der Südhalbkugel. In den Jahren 2016 und 2017 gab es einen noch viel stärkeren Rückzug. Es bleibt abzuwarten, ob dies der Beginn eines Abwärtstrends ist.

Der generelle langsame Vormarsch des antarktischen Meereises, den Satelliten mit passiven Mikrowellensensoren aufgezeichnet haben, erfolgte, obwohl sich zumindest ein Teil der Antarktis – die Antarktische Halbinsel – sehr schnell erwärmt (Rignot et al. 2008). Das führte 2002 zu einem spektakulären Ereignis, dem Kollaps des Larsen-B-Schelfeises auf der Ostseite der Halbinsel. Der weitaus größte Teil dieses Schelfeises, eine Fläche von 3250 km^2 und mindestens 200 m dick, zerbrach in eine Armada von Eisbergen, die dann wegdrifteten. Inseln und Küsten waren zum ersten Mal seit Beginn der Aufzeichnungen für die Schifffahrt zugänglich.

Wie konnte sich das Meereis in der Antarktis angesichts eines sich erwärmenden Klimas und des Verlusts von Schelfeisgebieten ausbreiten? Um diese Frage zu beantworten, müssen wir verstehen, wie sich das Meereis der Antarktis von demjenigen der Arktis unterscheidet. Natürlich unterscheidet sich die Antarktis von der Arktis allein schon dadurch, dass die Arktis aus einem von Land umgebenen Ozean besteht, während die Antarktis eine riesige Landmasse am Pol ist, die von einem riesigen Ozean umgeben ist. Interessanterweise sind Größe und Form des Arktischen Ozeans und des antarktischen Kontinents sehr ähnlich. Windmuster und Meeresströmungen neigen dazu, die Antarktis von globalen Wettermustern zu isolieren, sodass sie Trends aufweisen kann, die von denen der Arktis abgekoppelt sind.

12.2 Warum das antarktische Eis anders ist

Das Meereis der Antarktis ist nicht dasselbe wie dasjenige der Arktis. Natürlich entstehen beide, indem Wasser gefriert, das antarktische Meereis bildet sich jedoch

auf eine andere Weise und hat andere Eigenschaften, und es sieht anders aus als das arktische Eis. Im frühen Winter beginnt sich in der Nähe der Küste der Antarktis neues Meereis zu bilden, und der Eisrand rückt im Laufe des Winters nach Norden in den Südlichen Ozean vor, wo er der ganzen Kraft des größten Ozeans der Welt ausgesetzt ist. Wie das Meereis genau entsteht, wurde erst verstanden, als eine Expedition im frühen Winter in der Packeiszone arbeiten konnte, während der Eisrand vorwärtsrückt. Dies geschah erstmals 1986 mit dem deutschen Forschungsschiff *Polarstern*, im Rahmen des *Winter Weddell Sea Project* im Weddellmeer. Ich war bei dieser denkwürdigen Expedition an Bord des Schiffes, zusammen mit 50 anderen Wissenschaftlern. Als wir die Eisrandregion durchquerten, untersuchten wir sorgfältig die Eisverhältnisse und -eigenschaften und identifizierten den sogenannten Frazil-Eis-Pfannkucheneis-Zyklus als Quelle für den größten Teil des einjährigen Meereises, das im Inneren des Packeises vorherrschte (Wadhams et al. 1987; Lange et al. 1989).

Wir haben in Kap. 2 gesehen, dass Eis, das bei ruhigem Wasser wächst, zunächst eine Suspension bildet, die sich zu einer dünnen transparenten Schicht verfestigt, dem Nilas. Wassermoleküle frieren an der Unterseite des Nilas an und verlängern damit das Eis nach unten, wobei es zu einer Auslese kommt, die Kristalle mit horizontaler c-Achse bevorzugt. Schließlich erhalten wir eine Schicht aus einjährigem Eis. Unter den extremen Bedingungen am antarktischen Eisrand kann sich keine kontinuierliche Nilas-Schicht bilden. Aufgrund der hohen Energie und der Turbulenzen im Wellenfeld des Südlichen Ozeans bleibt das neue Eis eine Suspension von Frazil-Eis. Diese erfährt aufgrund der Partikelbahnen im Wellenfeld eine zyklische Kompression, und während der Kompressionsphase können die Kristalle zu kleinen

zusammenhängenden Matschklumpen gefrieren. Durch Anwachsen aus dem Frazil-Eis werden sie größer und durch anhaltendes Einfrieren zwischen den Kristallen fester. Das Ergebnis wird als Pfannkucheneis bezeichnet. Kollisionen zwischen den Pfannkuchen häufen die Frazil-Eis-Suspension auf die Ränder, dann läuft das Wasser ab und hinterlässt einen erhöhten Rand aus Frazil-Eis, der jeder Scholle das Aussehen eines Pfannkuchens verleiht. An der Eiskante haben die Pfannkuchen nur einen Durchmesser von wenigen Zentimetern, aber sie wachsen mit zunehmendem Abstand von der Eiskante allmählich im Durchmesser und in der Dicke: Sie können einen Durchmesser von 3 bis 5 m und eine Dicke von 50 bis 70 cm erreichen. Das umgebende Frazil-Eis wächst weiter und versorgt die wachsenden Pfannkuchen mit Material, da die Wasseroberfläche nicht vollständig durch Eis abgeschlossen ist und ein großer Wärmestrom zwischen Ozean und Atmosphäre möglich ist, der die latente Wärme ableiten kann. Dies ist genau der gleiche Mechanismus, der wie in Kap. 11 beschrieben die seltsame Odden-Eiszunge in der Grönlandsee erzeugt. Wenn sich das Eis weiterentwickelt treten aber Unterschiede auf.

Innerhalb des Packeises in größerer Entfernung von der Eisgrenze – und durch den Wellenenergieverlust am Eisrand besser vor Wellen geschützt – beginnen die Pfannkuchen in Gruppen zusammenzufrieren. Während unserer Winterexpedition 1986 war das Wellenfeld stark genug, um das allgemeine Einfrieren zu verhindern, bis wir etwa 270 km in das Packeis eingedrungen waren. Hier vereinigten sich die Pfannkuchen zu ersten großen Schollen und dann schließlich zu einer durchgehenden Eisschicht. Ab diesem Punkt, an dem das Wasser von der Atmosphäre abgeschirmt war, sank die Wachstumsrate auf ein sehr niedriges Niveau, geschätzt auf 0,4 cm pro Tag (Wadhams et al. 1987). Die endgültige Dicke, die einjähriges Eis

erreichte, war nur wenige Zentimeter dicker als bei den Pfannkuchen zu dem Moment, als sie sich vereinigten (Wadhams et al. 1987).

Das so gebildete einjährige Eis wird als konsolidiertes oder als verfestigtes Pfannkucheneis bezeichnet. Seine Unterseite hat eine ganz andere Form als das Meer-eis der Arktis. Die Pfannkuchen werden zum Zeitpunkt der Konsolidierung durcheinandergewirbelt und über-einandergeschoben, und sie frieren in dieser Konfiguration zusammen, wobei das Frazil-Eis als „Klebstoff“ fungiert. Das Ergebnis ist eine sehr rau, zerklüftete Eisunterseite, wobei randlich übereinandergeschobene Pfannkuchen die normale Eisdicke verdoppeln oder verdreifachen (Über-schub-eis). Die Ränder der Pfannkuchen, die oben aus der Eisoberfläche herausragen, formen eine Landschaft, die ich in einem Artikel als „steiniges Feld“ bezeichnet habe. Sie ähnelt einer Landschaft mit winzigen Feldern, die von Trockenmauern umgeben sind. Der Kontrast zwischen solchem Eis und unter ruhigen Bedingungen gebildetem Meereis ist in Abb. 12.1 dargestellt. Sie zeigt Profile, die durch im Abstand von 1 m gebohrte Löcher aufgezeichnet wurden. Das Bohren von Löchern ist zwar mühsam, war aber unsere beste Methode, um die Form der Eisunterseite zu kartieren, da der Antarktisvertrag von 1959 es U-Booten nicht erlaubt, in antarktischen Gewässern zu arbeiten.

Die Eisunterseite des konsolidierten Pfannkucheneises hat durch die überschobenen Pfannkuchen eine sehr große Oberfläche pro Flächeneinheit der Meeresoberfläche, und sie bietet ein hervorragendes Substrat für das Algen-wachstum und eine Zuflucht für Krill. Das dünne Eis lässt viel Licht eindringen, sodass Phytoplankton Fotosynthese betreiben und auf der Unterseite des Eises leben kann. Das Ergebnis ist ein fruchtbare Ökosystem unter dem winter-lichen Meereis, das geschätzt etwa 30 % der gesamten bio-logischen Produktion des Südlichen Ozeans ausmacht.

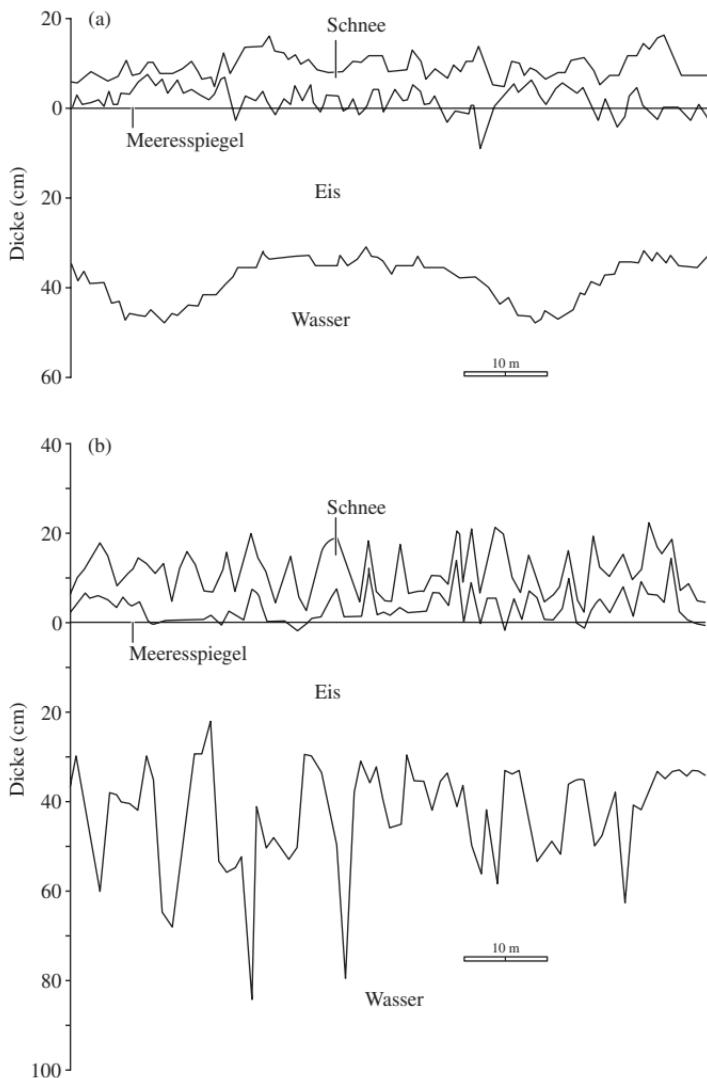


Abb. 12.1 Eisdickenprofile von winterlichem Meereis der Antarktis, aufgezeichnet durch Bohrungen in Abständen von 1 m. Sie zeigen den Unterschied zwischen **a** Meereis, das unter ruhigen Bedingungen mit glatter Unterseite gewachsen ist, und **b** verfestigtem Pfannkucheneis, bei dem die Pfannkuchen durcheinandergewirbelt und zusammengefroren sind, mit einer zerklüfteten Unterseite, wobei die Eisdicke in überschobenen Bereichen der Dicke von zwei bis drei Pfannkuchen entspricht. (Nach Wadhams und Crane 1991)

In den seither vergangenen 30 Jahren haben nur wenige Schiffe im tiefsten Winter im antarktischen Packeis gearbeitet. Das Alfred-Wegener-Institut führte 1989 eine Expedition unter dem Namen *Winter Weddell Gyre Study* durch (Wadhams und Crane 1991), an der ich teilnahm, und es gab weitere Experimente im Weddellmeer, bei denen ein Schiff in Kombination mit einem Camp auf dem Eis arbeitete – 1992 mit der Station Weddell-1 (Ackley et al. 1992) und 2004 bis 2005 mit der Station ISPOL (Ice Station Polarstern) (Hellmer et al. 2008). Wir haben noch nicht genügend Beweise, um sicher zu sein, ob die Frazil-Eis-Pfannkucheneis-Sequenz des Eisschwundes in der gesamten Peripherie der Antarktis bestimmt. Sollte das der Fall sein, dann dürfte die Fläche, die das Pfannkucheneis in der Antarktis im frühen Winter einnimmt, bis zu 6 Mio. km² groß sein. Es ist damit ein bedeutender Bestandteil der Erdoberfläche, den bisher nur wenige Menschen gesehen haben. Es ist schon außergewöhnlich, dass diese erstaunliche Landschaft mit ihren wogenden weißen Pfannkuchen eine so große Fläche einnimmt und doch kaum bekannt ist. Wahrscheinlich haben dies bisher weniger als tausend Menschen mit eigenen Augen gesehen.

12.3 Schnee auf dem Eis

Der jährliche Schneefall auf das Meereis ist in der Antarktis viel größer als in der Arktis, weil die Nähe des riesigen Südlichen Ozeans mehr Feuchtigkeit und damit mehr Niederschläge bringt. In Küstenregionen wird Schnee auch durch katabatische Winde (Winde, die von den Gipfelregionen aus den Hang des Antarktischen Eisschildes hinabblasen) von den Höhen der Schelfeise auf das Meereis geblasen. Während der Expedition der

Polarstern im östlichen Weddellmeer von Juli bis September 1986 fanden wir eine mittlere Schneedicke von 14 bis 16 cm auf der Oberfläche des einjährigen Eises. Da das Eis selbst so dünn ist, reichte dies aus, um die Eisoberfläche in 15 bis 20 % der gebohrten Löcher unter den Meerespiegel zu drücken. Daher kann Meerwasser in den darüber liegenden Schnee einsickern und es bildet sich entweder eine nasse matschige Schicht auf dem Eis oder, wenn das Wasser gefriert, eine „Schnee-Eis-Schicht“ zwischen dem nicht benetzten Schnee und der ursprünglichen Eisoberfläche. Im September und Oktober 1989 war der Schnee noch dicker, besonders über mehrjährigem Eis im westlichen Weddellmeer, in das wir uns wagten. Dies reichte, um die Eisoberfläche in fast allen Fällen unter den Meerespiegel zu drücken. Abb. 12.2a und b zeigen den Kontrast zwischen diesen beiden Arten von Eisbedeckung. Der dicke Schnee isoliert das Eis und seine matschige Nässe bedeutet, dass Radarverfahren mit Satelliten zur Kartierung der Eisdicke nicht gut funktionieren, da der nasse Schnee den Radarstrahl reflektiert. Es besteht kein Zweifel daran, dass Schnee und das matschige Eis, das durch Eindringen von Wasser in den Schnee gebildet wurde (sogenanntes „meteorisches Eis“), im antarktischen Meereis eine viel größere Rolle spielen als in der Arktis (Massom et al. 2001; Eicken et al. 1994).

12.4 Der jährliche Eiszyklus und wie er sich ändert

Wie ich zu Beginn dieses Kapitels schrieb, nahm die Ausdehnung des antarktischen Meereises entgegen der Prognosen der Klimamodelle in den vergangenen Jahren langsam zu, jedoch mit einer hohen regionalen Variabilität.

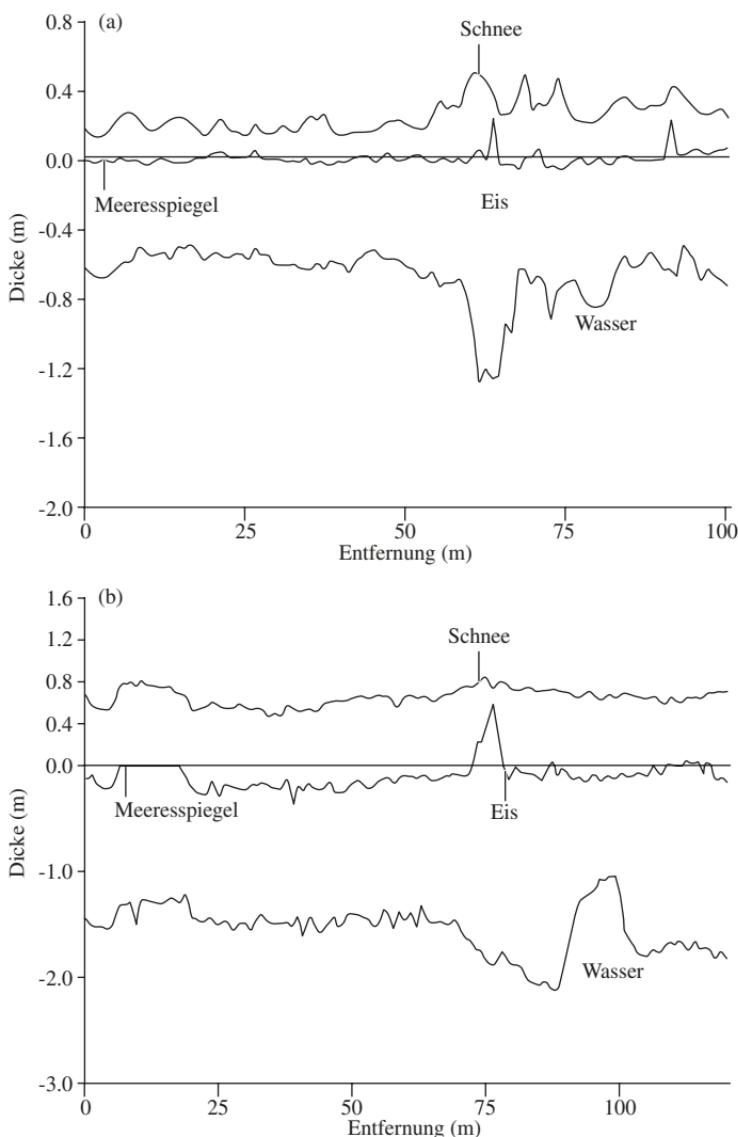


Abb. 12.2 Eisdickenprofile von winterlichem Meereis im westlichen Weddellmeer, die den Unterschied zwischen **a** einjährigem Eis und **b** mehrjährigem Eis zeigen. Das Gewicht der Schneedecke drückt die Eisoberfläche unter den Meeresspiegel, insbesondere bei mehrjährigem Eis (Wadhams und Crane 1991)

Abb. 12.3 zeigt den jährlichen Zyklus der Meereisausdehnung für den Zeitraum 1978 bis 2011 (Parkinson und Cavalieri 2012). Im Sommer gibt es nur zwei größere Bereiche mit Meereis, das westliche Weddellmeer und das Rossmeer. Nur in diesen Regionen gibt es größere Mengen mehrjähriges Eis, den Eistyp, der bis vor Kurzem in der Arktis dominierte. Das Minimum der Ausdehnung variiert von Jahr zu Jahr kaum. Mit Beginn des Winters bildet sich nördlich der Eisgrenze neues Eis und die Eisgrenze rückt nach Norden vor, bis sie gegen Ende des Winters (August bis September) ein Maximum zwischen 55° S und 66° S erreicht, woraufhin sie sich wieder zu ihrem Ausgangspunkt zurückzieht. Die nördliche Grenze liegt im Indischen Ozean im Sektor um 15° O etwa bei 55° S, in der Umgebung der restlichen Ostantarktis bei etwa 60° S und biegt dann noch weiter nach Süden ab bis 65° S vor dem Rossmeer. Die Kante bewegt sich wieder leicht nach Norden bis 62° S bei 150° W, dann wieder nach Süden bis 66° S vor der Amundsensee, bevor sie schließlich nach Norden abbiegt, wo das Eis die Südlichen Shetlandinseln und die Südlichen Orkneyinseln vor der Antarktischen Halbinsel einschließt, was den Kreis schließt. Die Variation der Breitengrade des Wintermaximums rund um die Antarktis beträgt daher etwa 11°.

Die absolute Grenze des nördlichen Eisvorstoßes ist der Rand des antarktischen Zirkumpolarstroms, wo sich die Temperatur des Oberflächenwassers in der Polarfront oder antarktischen Konvergenz abrupt ändert. Auch sonst ändert sich hier alles – auf dem Weg nach Süden in einem Schiff ist es der Punkt, ab dem man auf eine Unmenge an Eisbergen, Pinguinen, Albatrossen, Raubmöwen und anderen antarktischen Vögeln trifft. Außerdem gibt es reichhaltiges Plankton (darunter den berühmten garnelenähnlichen Krill) und die großen Wale, die es fressen.

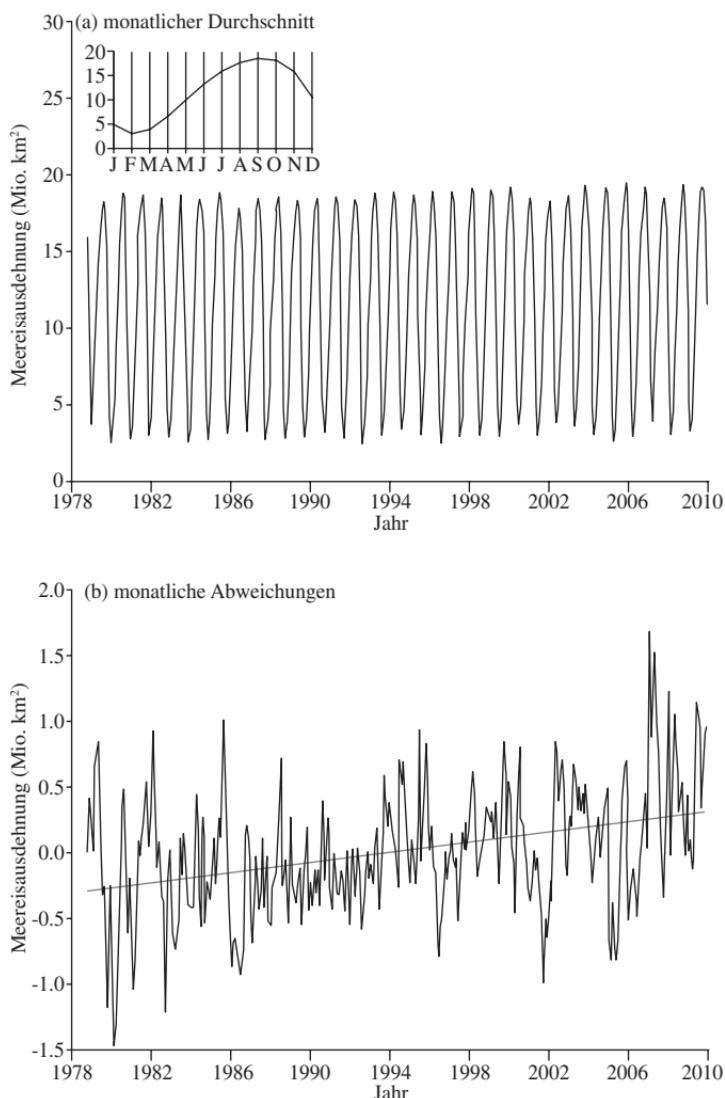


Abb. 12.3 a Monatliche durchschnittliche Meereisausdehnung auf der südlichen Hemisphäre für den Zeitraum November 1978 bis Dezember 2011. Das kleine Bild zeigt den durchschnittlichen Jahreszyklus. b Monatliche Abweichungen der Meereisausdehnung. (Nach Parkinson und Cavalieri 2012)

Das Meer färbt sich grün und es liegt ein Geruch nach Leben in der Luft. Das Eis erreicht diese natürliche Grenze im Ozean jedoch nur selten, da sein Vorstoß sowohl durch ozeanische Prozesse (Stürme, Meereswirbel), die es aufbrechen, als auch durch Lufttemperaturen eingeschränkt wird: Jay Zwally von der NASA und seine Kollegen (Zwally et al. 1983) zeigten, dass der Vorstoß der Eisgrenze im Winter dem Vorstoß der Oberflächenluft, die kälter ist als der Gefrierpunkt des Meerwassers ($-1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$), sehr nahe kommt. Zum Zeitpunkt des maximalen Vorstoßes fällt die Eisgrenze fast mit dieser Temperaturlinie (oder Isotherme) zusammen. Die in jährlichen Zyklen schwankende Eisausdehnung (definiert als das Gebiet südlich der Hauptgrenze) kann leicht von Satelliten gemessen werden, insbesondere mit den sehr nützlichen passiven Mikrowellensensoren von Satelliten der NASA (genannt SMMR, SSM/I und SSMIS). Abb. 12.3 zeigt Ergebnisse, die von der Gruppe am NASA Goddard Space Flight Center in Greenbelt, Maryland, im Zeitraum 1978 bis 2011 erzielt wurden. Die durchschnittliche maximale und minimale Eisausdehnung betrugen in diesem Zeitraum 18,5 Mio. km^2 und 3,1 Mio. km^2 (Bromwich et al. 2013).

Wie Abb. 12.3 zeigt, gibt es für die gesamte Antarktis eindeutig einen langsamen Aufwärtstrend im Wintermaximum, der sich auf 17.100 km^2 pro Jahr beläuft. Der Trend verbirgt jedoch erhebliche regionale und saisonale Schwankungen. Das schnellste Wachstum verzeichnete das Rossmeer (13.700 km^2 pro Jahr), geringere Beiträge der Indische Ozean und das östliche Weddellmeer, während die Bellingshausen- und die Amundsensee der Westantarktis einen Rückgang von 8200 km^2 pro Jahr verzeichnen. Eric Steig von der Universität von Washington fand heraus, dass sich die Lufttemperaturen über dem pazifischen

Sektor des antarktischen Kontinents (Antarktische Halbinsel bis zum Rossmeer) doppelt so schnell gestiegen sind wie über dem Rest des Kontinents (Steig et al. 2009), und eine Analyse des Temperaturrekords an der Byrd-Station (120° W Länge) zeigt von 1958 bis 2010 eine Erwärmung um einen Wert zwischen 1,6 und 3,2 °C, was ein sehr starker Anstieg ist (Bromwich et al. 2013). Die schnelle Erwärmung des pazifischen Sektors der Antarktis (Westantarktis) spiegelt sich in einer Verkürzung der Zeit mit Eisbedeckung (die Zahl der Tage pro Jahr, in denen ein bestimmter Standort eine Eisbedeckung aufweist) um ein bis drei Tage pro Jahr zwischen 1979 und 2010 wider (Maksym et al. 2012), während die Sektoren am Atlantik und dem Indischen Ozean eine langsamere Verlängerung der Zeit mit Eisbedeckung verzeichneten. Das Gesamtbild wird deutlich: Der große Sektor der Ostantarktis hat eine Eisdecke, die langsam wächst, während der schmale Sektor der Westantarktis eine Eisdecke hat, die schnell schrumpft. Das Nettoergebnis ist ein sehr langsames Wachstum.

Im Detail gibt es weitere Eisvariationen, die mit lokalen topografischen Faktoren zusammenhängen und normalerweise im Frühjahr oder Sommer sichtbar sind. Im Sektor vor Enderbyland bei 0° bis 20° O öffnet sich im Dezember ein großer Golf, der sich an eine Küstenregion mit reduzierter Eiskonzentration anschließt, die sich im November öffnet. Dies ist eine stark abgeschwächte Version einer mysteriösen Winterpolynja, die in diesem Sektor in den Jahren 1974 bis 1976 mitten im Packeis entdeckt (Zwally und Gloersen 1977; Steig et al. 2009), aber seitdem nicht mehr beobachtet wurde, zumindest nicht als völlig offenes Wasser. Sie war als Weddell-Polynja bekannt und lag über dem Maud Rise, einem Plateau mit geringer Wassertiefe. Das Gebiet wurde im Winter 1986 mit dem Forschungsschiff Polarstern untersucht, und man stellte fest, dass die Region Teil der sogenannten antarktischen Divergenz ist,

in der wärmeres Tiefenwasser aufsteigen kann. Auf diese Weise gelangt genügend Wärme an die Oberfläche, um die Region im Winter eisfrei zu halten (Bagriantsev et al. 1989; Gordon und Huber 1990). Da dies seit 1976 nicht mehr passierte, ist die Region vermutlich in Bezug auf ihre winterliche Eisbedeckung in einem Gleichgewicht am Rande der Instabilität. Die Eisbedeckung im Winter 1986 war von hoher Eiskonzentration, aber sehr dünn (NSIDC o. D.). Im Dezember gibt es auch im Rossmeer eine periodisch auftretende offene Wasserfläche innerhalb des Meereseises, die sogenannte Rossmeer-Polynja. Im November und Dezember ist eine Reihe von kleinen Küstenpolynjas zu beobachten, die sich entlang der Küste der Ostantarktis öffnen. Meist entstehen sie durch ablandige Winde (katabatische Winde), die das Eis so schnell von der Küste wegtreiben, wie es entstehen kann.

12.5 Was passiert mit dem Eis?

Ein Großteil des Eises im winterlichen Packeis geht auf Pfannkucheneis zurück und ist ziemlich dünn. Da sich das Klima eines Großteils der Antarktis erwärmt, warum bewegt sich die Eisgrenze eher vorwärts als zurück, mit dem beschriebenen regionalen Muster?

Eine einfache Erklärung für die zirkumpolare Zunahme der Meereisausdehnung (das heißt über die gesamte Antarktis gemittelt) kam von Jinlun Zhang von der Universität von Washington. Er schlug vor, dass es das Ergebnis stärkerer Winde um den antarktischen Kontinent ist (Zhang 2014). Der Schlüssel ist der große zirkumpolare Westwindgürtel, auch Polarwirbel genannt. Satelliten konnten die Stärke dieser Winde seit den 1970er-Jahren messen, und sie wurden immer stärker. Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit ist höher, und der Wind

kommt hauptsächlich aus dem Westen. Stellen wir uns eine typische Eisscholle vor. Sie wird durch die direkt auf die Oberfläche einwirkende Kraft des Windschubs nach Osten geblasen, aber während sie sich bewegt, erfährt sie zugleich eine Kraft, die versucht, sie nach links zu drehen, das heißt, ihr eine Bewegungskomponente in Richtung Norden zu geben. Dies ist die berühmte Corioliskraft, die durch die Rotation der Erde verursacht wird: Sie wirkt auf der Nordhalbkugel nach rechts, auf der Südhalbkugel nach links und am Äquator beträgt sie null. Der Grund ist, dass wir alle unsere Messungen an sich bewegenden Objekten relativ zu einem in fester Position über die Erdoberfläche gelegten Bezugsrahmen durchführen (zum Beispiel Nord-Süd- und Ost-West-Richtung), aber weil die Erde sich dreht, ist ihre Oberfläche eigentlich ein sich beschleunigendes Bezugsystem. Ein Objekt bewegt sich daher nicht geradlinig, sondern biegt nach links oder nach rechts ab.

Die Corioliskraft ist proportional zur Geschwindigkeit des Objekts relativ zur Erdoberfläche, sodass mit einer höheren Windgeschwindigkeit die auf die Eisscholle in Richtung Norden einwirkende Corioliskraft zunimmt. Die Scholle wird schneller nach Norden bewegt, auch wenn die Hauptkomponente ihrer Bewegung nach Osten gerichtet ist. Zwar erreicht sie einen Breitengrad, an dem die wärmere Atmosphäre das Eis schmelzen lässt, sie wird aber durch die höhere Geschwindigkeit in Nordrichtung weiter nach Norden gebracht, bevor dies geschieht. So ist die gesamte antarktische Packeiszone wie ein großes Karussell, das vom Wind angetrieben wird und das Eis weiter nach Norden in wärmeres Wasser treibt. Der beschriebene Mechanismus beruht auf einfacher Physik und der Beobachtung, dass die zirkumpolaren Windgeschwindigkeiten tatsächlich zugenommen haben. Dies dürfte jedoch eine zu vereinfachte Sichtweise sein. Ersstens würde der Mechanismus zwar zu einer Zunahme

der Eisausdehnung führen, aber nicht unbedingt zu einer Zunahme der Eisfläche, da er sich nur mit der Dynamik des vorhandenen Eises befasst. Wir könnten dieses Problem lösen, indem wir sagen, dass Eis, das sich im Winter nach Norden bewegt, offenes Wasser hinterlässt, das unter Winterbedingungen schnell gefriert. Zweitens wird der Eisvorstoß nur vorübergehend sein, da die globale Erwärmung letztendlich über die höheren Windgeschwindigkeiten siegen wird. Das Eis wird dann die niedrigeren Breitengrade nicht mehr erreichen.

Meine eigene Erklärung basiert auf dem beschriebenen Frazil-Eis-Pfannkucheneis-Zyklus und dessen Interaktion mit den verstärkten Winden. Wenn die stärkeren Winde um die Antarktis wehen, erzeugen sie immer größere und längere Meereswellen. Die längeren Wellen können weiter in die Randeiszone eindringen und das Eis bis zu einem größeren Abstand vom Eisrand im Zustand von Frazil- und Pfannkucheneis halten. Wir wissen, dass Frazil- und Pfannkucheneis viel schneller wachsen als eine kontinuierliche Eisschicht, weil die Atmosphäre nicht vom darunterliegenden Wasser abgeschirmt ist. Die Meereswärme kann leichter an die Atmosphäre abgegeben werden, was ein schnelleres Eiswachstum ermöglicht. Könnte es einfach sein, dass wir in einer Ära stärkerer Winde und größerer Wellen eine breitere Zone mit Frazil- und Pfannkucheneis haben, in der das Eis schneller wächst?

12.6 Reaktion der Antarktis auf Veränderungen anderswo

Um den regionalen Charakter der Meereistrends zu erklären, brauchen wir eine Modellierung, die berücksichtigt, ob eine Ursache in anderen Gegenden regionale Auswirkungen auf das antarktische Meereis haben kann.

Einen offensichtlichen Einfluss, auch wenn die Auswirkungen langfristig sind, hat der Antarktische Eisschild selbst, der allmählich an Masse verliert (Jacobs et al. 2012), wenn auch langsamer als der Grönländische Eisschild. Nach einer Schätzung, die im Mai 2016 auf dem ESA Living Planet Symposium in Prag vorgestellt wurde, beträgt der Nettoverlust an antarktischem Eis derzeit etwa 84 Gt pro Jahr, im Vergleich zu mindestens 300 Gt in Grönland. Steigt die Rate des antarktischen Eisverlustes, werden das Filchner-Ronne-Schelfeis und das Ross-Schelfeis vermutlich zerfallen, sodass die antarktischen Gletscher (etwa im Transantarktischen Gebirge) direkt in den Ozean fließen. Dies wird die Rate der Massenverluste in der Antarktis rasch beschleunigen, was zu einer Beschleunigung des globalen Meeresspiegelanstiegs führt, sich aber auch auf das antarktische Meereis auswirken wird (sofern es bis dahin noch existiert). Solche schwerwiegenden Veränderungen werden für die nächsten Jahrhunderte nicht vorhergesagt. Möglicherweise kollabiert aber das Schelfeis um die Pine Island Bay und eine Region der Ostantarktis ist gefährdet, wo der Eisschild als potenziell instabil angesehen wird, falls ein „Stopfen“ aus Eis an der Küste zerfällt (Mengel und Levemann 2014).

Für unmittelbarere Effekte, die auch die gegenwärtige regionale Variation des Vorrückens oder Rückzugs des antarktischen Meereises bestimmen, müssen wir nach Fernverbindungen suchen, die mit den Ozeanen und der Atmosphäre der niederen Breiten oder sogar mit der Nordhalbkugel bis in die Arktis bestehen können. Es gibt viele Kandidaten für solche Verknüpfungen.

Reg Peterson und Warren White von der Scripps Institution of Oceanography fassten die sogenannte Antarctic Circumpolar Wave ins Auge (Peterson und White 1998), ein Wellensystem auf dem antarktischen Zirkumpolarstrom, das sich langsam nach Osten ausbreitet

(beziehungsweise relativ zur Strömung nach Westen) und mit dem tropischen System der Südlichen Oszillation und dem El-Niño-Phänomen interagieren kann (El Niño–Southern Oscillation, ENSO). Der El Niño („Christuskind“) ist eigentlich ein warmer Meeresstrom variabler Intensität, der sich Ende Dezember (daher der Name) entlang der Küste Ecuadors und Perus entwickelt und manchmal katastrophale Wetterbedingungen verursacht. Inzwischen steht sein Name für eine den gesamten Südpazifik umfassende Anomalie von Winden und Meeresströmungen. Neuere Forschung beschäftigt sich mit dem Southern Annular Mode (SAM), einem weiteren komplexen Modus in der Variabilität der atmosphärischen Zirkulation in hohen Breiten (Comiso et al. 2011). Es gibt auch die Vermutung (Rind et al. 2001), dass ein El-Niño-Jahr zu mehr Meereis im Weddellmeer und zu weniger Meereis im Pazifik führt, und ein La-Niña-Jahr zum Gegenteil. „La Niña“ bezieht sich auf eine Abkühlung der Meeresoberfläche vor der Westküste Südamerikas, die unregelmäßig wiederkehrend alle vier bis zwölf Jahre auftritt und die Wetterbedingungen im Pazifikraum beeinflusst; sie ist das Gegenteil von einem El Niño. Der Zusammenhang mit dem ENSO-System wird dadurch komplizierter, dass eine Variante des El-Niño-Phänomens im Zentralpazifik entdeckt wurde (Wilson et al. 2014). Noch weiter reichende Fernverbindungen könnten sich aus dem Zusammenhang zwischen der Erwärmung der Arktis und Extremwetterereignissen in niederen Breiten aufgrund von Verzerrungen im Strahlstrom ergeben (Francis und Vavrus 2012), was wiederum Auswirkungen auf Zirkulationsmuster in den Tropen und auf der Südhalbkugel haben könnte.

Jede vollständige Erklärung dafür, warum sich das Verhalten von antarktischem und arktischem Meereis unterscheidet, muss auch von den grundlegenden Unterschieden

zwischen arktischem und antarktischem Meereis ausgehen. Die Antarktis wird sich langsamer erwärmen als die Arktis, allein schon wegen der größeren Meeresfläche mit ihrer hohen Wärmekapazität und aufgrund des antarktischen Zirkumpolarstroms, der den Kontinent gegenüber dem wärmeren Meer nach Norden isoliert.

Außerdem hat der Eisrand in der Antarktis ganz andere Eigenschaften als in der Arktis: Im Sommer zieht sich das Meereis in der Antarktis in Richtung Land zurück und hinterlässt nur in ein paar großen Buchten wie dem Weddellmeer größere Eismengen, während die Wintergrenzen thermodynamisch und durch die Bedingungen im offenen Meer bestimmt sind. In der Arktis ist die Situation genau umgekehrt: Die Wintergrenze legen die den Arktischen Ozean umgebenden Landmassen fest, während sich das Meereis im Sommer auf eine thermodynamisch und dynamisch festgelegte Grenze im Meer zurückzieht. Zudem ist die Albedorückkopplung in der Antarktis weniger wichtig als in der Arktis, da sich das antarktische Meereis Ende Dezember zum Zeitpunkt der maximalen Sonneneinstrahlung bereits fast bis an die Küste zurückgezogen hat, während dem arktischen Meereis beim Sommermaximum der Sonneneinstrahlung (im Juni) noch ein langer Rückzug auf sein Septemberminimum bevorsteht. Die Arktis ist somit anfälliger für Veränderungen.

Ein letzter Punkt zur Klimaerwärmung ist, dass die schnelle Erwärmung der Arktis Rückkopplungen erzeugt, die zu einer weiteren Beschleunigung der Erwärmung führen. Neben der Eis-Albedo-Rückkopplung gehören auch die Albedorückkopplung durch den Rückzug der Schneegrenze an Land und die potenziell dramatische zusätzliche Erwärmung dazu, die eine Freisetzung von Methan aus neuerdings eisfreien arktischen Schelfmeeren bewirken kann (Whiteman et al. 2013). Die mit der Schneegrenze

und dem Methan verknüpften Rückkopplungen können in der Antarktis nicht auftreten – weil entsprechende Schelfmeere fehlen und weil die Fläche der terrestrischen Schneedecke nicht flexibel ist. Die arktische Verstärkung und die starken arktischen Rückkopplungen bedeuten, dass es – unabhängig von den Wechselwirkungen zwischen dem antarktischen Meereis und den gemäßigten Ozeanen – in den nächsten Jahrzehnten immer der Fall sein wird, dass die Arktis die Rate der globalen Erwärmung stärker bestimmen wird als die Antarktis. In diesem Sinne ist die Arktis bei der Erderwärmung ein Motor und die Antarktis eher wie ein bei diesem wahnsinnigen Autorennen passiv mitgezogener Anhänger.

Literatur

- Ackley SF, Lytle VI, Elder B, Bell D (1992) Sea-ice investigations on ice station weddell. 1: ice dynamics. *Antarct J US* 27:111–113
- Bagriantsev NV, Gordon AL, Huber BA (1989) Weddell Gyre – temperature maximum stratum. *J Geophys Res* 94:8331–8334
- Bromwich DH, Nicolas JP, Monaghan AJ, Lazzara MA, Keller LM, Weidne GA, Wilson AB (2013) Central west Antarctica among the most rapidly warming regions on earth. *Nat Geosci* 6:139–145
- Comiso JC, Kwok R, Martin S, Gordon AL (2011) Variability and trends in sea ice extent and ice production in the Ross sea. *J Geophys Res* 116:C04021. <https://doi.org/10.1029/2010jc006391>
- Eicken H, Lange MA, Hubberten H-W, Wadhams P (1994) Characteristics and distribution patterns of snow and meteoric ice in the Weddell sea and their contribution to the mass balance of sea ice. *Ann Geophys* 12:80–93

- Francis JA, Vavrus SJ (2012) Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes. *Geophys Res Lett* 39:L06801. <https://doi.org/10.1029/2012gl051000>
- Gordon AL, Huber BA (1990) Southern ocean winter mixed layer. *J Geophys Res* 95:11655–11672
- Hellmer HH, Schröder M, Haas C, Dieckmann GS, Spindler M (2008) Ice Station Polarstern (ISPOL). *Deep-Sea Res II* 55:8–9
- Jacobs S, Jenkins A, Hellmer H, Giulivi C, Nitsche F, Huber B, Guerrero R (2012) The Amundsen sea and the Antarctic ice sheet. *Oceanography* 25:154–163
- Lange MA, Ackley SF, Wadhams P, Dieckmann GS, Eicken H (1989) Development of sea ice in the Weddell sea Antarctica. *Ann Glaciol* 12:92–96
- Maksym T, Stammerjohn SE, Ackley S, Massom R (2012) Antarctic sea ice – a polar opposite? *Oceanography* 25:140–151
- Massom RA, Eicken H, Haas C, Jeffries MO, Drinkwater MR, Sturm M, Worby AP, Wu X, Lytle VI, Ushio S, Morris K, Reid PA, Warren SG, Allison I (2001) Snow on Antarctic sea ice. *Rev Geophys* 39:413–445
- Mengel M, Levemann A (2014) Ice plug prevents irreversible discharge from east Antarctica. *Nat Clim Change* 4:451–455. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE2226>
- NSIDC (o. D.) Sea ice index. https://nsidc.org/data/seacie_index/archives
- Parkinson CL, Cavalieri DJ (2012) Antarctic sea ice variability and trends, 1979–2010. *Cryosphere* 6:871–880. <https://doi.org/10.5194/tc-6-871-2012>
- Peterson RG, White WB (1998) Slow oceanic teleconnections linking the Antarctic circumpolar wave with the tropical El Niño – southern oscillation. *J Geophys Res* 103:24573–24583
- Rignot E, Bamber JL, van den Broeke MR, Davis C, Li Y, van de Berg WJ, van Meijgaard E (2008) Recent Antarctic ice mass loss from radar interferometry and regional climate modelling. *Nat Geosci* 1(2):106–110

- Rind D, Chandler M, Lerner J, Martinson DG, Yuan X (2001) Climate response to basin-specific changes in latitudinal temperature gradients and implications for sea ice variability. *J Geophys Res* 106:20161–20173
- Steig EJ, Schneider DP, Rutherford SD, Mann ME, Comiso JC, Shindell DT (2009) Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 international geophysical year. *Nature* 457:459–462
- Wadhams P, Crane DR (1991) SPRI participation in the winter weddell gyre study 1989. *Polar Record* 27(160):29–38
- Wadhams P, Lange MA, Ackley SF (1987) The ice thickness distribution across the Atlantic sector of the Antarctic ocean in midwinter. *J Geophys Res* 92(C13):14535–14552
- Whiteman G, Hope C, Wadhams P (2013) Vast costs of Arctic change. *Nature* 499:401–403
- Wilson AB, Bromwich DH, Hines KM, Wang S-H (2014) El Niño fl avors and their simulated impacts on atmospheric circulation in the high-southern latitudes. *J Clim* 27:8934–8955. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-14-00296.1>
- Zhang J (2014) Modeling the impact of wind intensification on Antarctic sea ice volume. *J Clim* 27:202–214
- Zwally HJ, Gloersen P (1977) Passive microwave images of the polar regions and research applications. *Polar Record* 18:431–450
- Zwally HJ, Comiso JC, Parkinson CL, Campbell WJ, Carsey FD, Gloersen P (1983) Antarctic sea ice 1973–1976: Satellite Passive-Microwave Observations. Rept. SP-459. NASA, Washington, DC



13

Der Zustand der Erde

Bisher haben wir uns auf den Wandel in den Polarregionen konzentriert, aber jetzt ist es an der Zeit, den Planeten als Ganzes zu betrachten und uns über dessen gegenwärtigen Zustand Gedanken zu machen.

Erstens geht die Rate, mit der Treibhausgaskonzentrationen zunehmen, noch immer nicht zurück. Trotz all der schönen Worte der Politiker und der Bemühungen einiger Länder, ihre Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu verringern, überwiegt der Effekt des Wirtschaftswachstums in China und Indien, dessen Energieverbrauch die Kohlendioxidkonzentration weiter nach oben treibt. Da die Werte, die inzwischen (Mitte 2017) 409 ppm erreicht haben, bereits zu hoch sind, um Störungen durch den Klimawandel zu vermeiden, ist die Tatsache äußerst beunruhigend, dass sich die Emissionsraten weiterhin beschleunigen. Sie fangen nicht einmal an, sich zu verlangsamen. Vergessen wir nicht, dass jedes CO₂ potenziell einen Strahlungsantrieb erzeugt. Ob es nun für

eine Weile im Ozean oder in Pflanzen aufgenommen wird, sobald der Kohlenstoff aus dem Boden genommen wurde, haben wir ihn in das Klimasystem eingebracht und er ist in der Lage, als Treibhausgas zu wirken und die Erde jetzt oder in Zukunft zur erwärmen. Wie wir in Kap. 9 gesehen haben, ist Methan ein noch beunruhigenderes Gas. Als die Konzentration in der Atmosphäre Ende der 1990er-Jahre nicht weiter zunahm, waren die Menschen erleichtert und dachten, es würde sich um ein Naturgesetz handeln. Das war aber nicht der Fall, und ab 2008 begannen die Konzentrationen wieder zuzunehmen, und nun nähern sich die Wachstumsraten denen der 1980er-Jahre. Es ist möglicherweise von größter Bedeutung, dass der Wiederanstieg der Methankonzentration mit einem starken Rückgang des sommerlichen Meereises und der damit verbundenen Erwärmung am Grund des arktischen Schelfmeeres zusammenfiel. Der Zusammenhang zwischen Prozessen im arktischen Schelfmeer und den globalen Methankonzentrationen wird immer deutlicher, was bedeutet, dass es noch viel schlimmer kommen wird.

Zweitens ist jeder Indikator für den Zustand des Planeten negativ. Die heute 7 Mrd. Menschen sollen bis 2050 auf 9,7 Mrd. zunehmen (Ehrlich und Ehrlich 2014), bis 2100 auf 11,2 Mrd. (UN 2015). Es ist schwer vorstellbar, wie all diese Menschen ernährt werden können, denn schon jetzt erleben wir schwerwiegende Klimaveränderungen, die auch die Brotkörbe der Welt bedrohen. Die Klimaerwärmung reduziert die Anbaufläche in Regionen wie beispielsweise in Afrika südlich der Sahara, während theoretisch denkbare höhere Erträge in hohen Breiten aufgrund extremer Wetterereignisse nicht realisiert werden können. Wir zerstören Wälder. Uns gehen die Wasserressourcen aus. Und die Landwirtschaft, die eine intensive und energiehungrige Industrie sein muss, um so viele Menschen ernähren zu können, ist empfind-

lich gegenüber der Verknappung wichtiger Rohstoffe. So hat der Nobelpreisträger Paul Crutzen auf den immer größeren Mangel an Phosphor aufmerksam gemacht, der ein wesentliches Element bei der Herstellung von Kunstdünger ist. Die Bevölkerungsprognosen der UN für 2100 (Tab. 13.1) sind besonders beunruhigend, weil sie nach Kontinenten angegeben sind: Die meisten Kontinente weisen ein großes Bevölkerungswachstum auf, das vielleicht noch bewältigt werden kann, während Europa einen Rückgang verzeichnet. Afrika weist jedoch eine Vervierfachung der Zahlen auf, von 1,1 auf 4,4 Mrd.

Da Afrika sich schon heute nicht selbst ernähren kann, wie soll es das mit viermal so vielen Mündern schaffen, insbesondere wenn zugleich die globale Erwärmung die Nahrungsmittelversorgung stört und zur Wüstenbildung führt? Die Antwort ist, dass es nicht möglich ist. Der Rest der Welt wird Afrika ernähren müssen. Da der Rest der Welt sich aber wahrscheinlich mit seinen eigenen Problemen herumschlagen wird, kann man einen Mangel an Mitgefühl und Hilfe voraussehen. Die Folge wird zwangsläufig eine massive Hungersnot sein. Wie wird die Welt auf diesen Beweis für ihren eigenen Egoismus reagieren? Der Gedanke, wie bösartig die Menschheit werden kann und welche Ausreden sie sich für ihre Untätigkeit ausdenken wird, macht mir Angst.

Tab. 13.1 Aktuelle und prognostizierte Bevölkerungszahlen nach Kontinenten (Millionen von Menschen) (UN 2015)

	2015	2100
Nordamerika	358	500
Südamerika	634	721
Europa	738	646
Asien	4393	4889
Ozeanien	39	71
Afrika	1186	4387

Das Problem des Bevölkerungswachstums ist nicht nur die Ernährung. Jeder Mensch setzt Kohlendioxid frei, und so wird das Problem, die globalen Kohlendioxidemissionen zu reduzieren, viel schwieriger, wenn es mehr Menschen gibt. Jeder Mensch braucht Land, auf dem jemand für ihn Nahrung anbauen kann. Das wird weltweit zu einer massiven Zerstörung der Wälder führen, in einer Zeit, in der wir dringend mehr Aufforstung brauchen, um die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre zu senken. Jeder Mensch braucht Wasser, um zu trinken, und die Süßwasserressourcen werden knapper, sodass wir möglicherweise mehr auf Meerwasserentsalzung angewiesen sind – ein energieintensiver Prozess, der Kohlendioxid freisetzt. Die Gleichung kann kaum geleugnet werden: mehr Menschen = mehr Kohlenstoffemissionen. Dennoch scheinen wir der Bevölkerungsexplosion eine viel geringere Bedeutung zu geben als die Analysten der 1970er-Jahre, etwa die Autoren von *Die Grenzen des Wachstums* (Meadows et al. 1972). Das Problem ist nicht verschwunden und nicht gelöst, außer – mit drastischen Mitteln – in China.

Wirtschaftlich gesehen erfordert die wackelige Finanzstruktur der Welt immer noch ein andauerndes Wachstum, um die Stabilität zu erhalten, mit einem Bankensystem, das immer offensichtlicher parasitär für die Gesellschaft ist. Innerhalb des gegenwärtigen kapitalistischen Systems, wie es von allen praktiziert wird, auch von China, gibt es keine Möglichkeit, dass eine in einem nachhaltigen Gleichgewicht lebende Gesellschaft toleriert werden kann. Jeder weiß, dass ein allgemeines exponentielles Wachstum nicht fortgesetzt werden kann und nur zu einer Katastrophe führen wird. Aber jeder Finanzminister versucht, das Wirtschaftswachstum zu fördern, um sein Land aus den finanziellen Schwierigkeiten herauszuholen, die er oder seine Vorgänger verursacht haben, ohne einen

Gedanken daran zu verschwenden, dieses Wachstum in nachhaltige Kanäle zu lenken.

Am traurigsten ist die individuelle Lähmung, die in der Gesellschaft zu beobachten ist. In den 1960er-Jahren waren die Jugendlichen im Westen in großen Kampagnen vereint – gegen Rassismus, gegen den Vietnamkrieg – was zeigte, dass sie sich wirklich um den Zustand der Welt sorgten. Jetzt, wo die Bedrohung noch größer und die Notwendigkeit noch dringender ist, sind sie passiv. Wähler jeglichen Alters, Unternehmen und Regierungsstellen zeigen mangelndes Interesse am Aufbau eines nachhaltigen Planeten und interessieren sich nur für persönlichen Reichtum und Komfort. Solange wir in Luxus schwelgen, unsere Autos fahren und für ein paar weitere Jahre an die Ferienstrände fliegen können, sind wir durchaus bereit, die Augen vor der Gewissheit zu verschließen, dass in Zukunft Krankheiten, Armut, Krieg und Kriminalität sowie ultimative Nahrungsmittel- und Ressourcenverknappung und Hunger auf uns zukommen, alles eine Folge des sich schnell verändernden Klimasystems. Die Jungen hören nicht zu oder lassen sich nicht zum Handeln inspirieren, und die Alten leiten oder lehren nicht.

Wenn wir Herrn Micawber aus *David Copperfield* konsultieren würden, würde er uns sagen, dass schon noch etwas auftauchen wird, um uns vor uns selbst zu retten. Aber was könnte das sein? Hier sind ein paar mehr oder weniger unwahrscheinliche Szenarien:

- Gott könnte entscheiden, dass es Zeit für die Wiedergekehr ist (diese Vorstellung wird von einem Teil der US-Bevölkerung ernsthaft vertreten, um nichts gegen den Klimawandel zu unternehmen).
- UFOs stellen sich als Realität heraus, und das anhaltende Interesse der Außerirdischen an uns seit

1947 könnte darauf hindeuten, dass sie planen, den Planeten zu unserem eigenen Wohl zu übernehmen.

- Es wird ein wunderbares Gerät erfunden, das unbegrenzt saubere Energie bietet. Dies könnte auf einer neuartigen Physik beruhen, wie die „kalte Fusion“, oder auf allgemein anerkannter Physik, wie die heiße Kernfusion, die schon immer angeblich 20 Jahre vor dem Durchbruch stand.

Oder umgekehrt:

- Ein gigantischer Asteroid könnte uns treffen, der alles Leben auslöscht.
- In einem abgelegenen afrikanischen Waldgebiet könnte ein neuer Virusstamm auftauchen, der sich weltweit ausbreitet und alle oder die meisten Menschenleben auslöscht.
- Wir könnten in einen großen Atomkrieg taumeln.

Meiner Meinung nach ist bei einer Politik des Wartens, darauf, dass irgendeine Lösung erscheint, viel wahrscheinlicher, dass etwas Schlechtes als etwas Gutes entsteht. Unsere Rettung kann daher nur in unseren eigenen Händen und unserem eigenen Handeln liegen.

13.1 Was können wir tun?

13.1.1 Emissionsminderung

In der Vergangenheit und auch heute noch haben Umweltorganisationen betont, was wir als Einzelpersonen tun können, um den Klimawandel durch die Reduzierung unserer CO₂-Emissionen zu bekämpfen. Wir können

unseren Müll recyceln, unsere Häuser isolieren, kleinere Autos fahren, mehr Gemüse und weniger Fleisch essen. All dies hilft, und es vermittelt auch ein Gefühl einer Art weltbürgerlichen Bewusstseins, indem wir uns der Bedürfnisse des globalen Dorfes bewusst sind und nicht nur unserer eigenen individuellen Wünsche. Aber wenn jeder Mensch im Vereinigten Königreich in seinem normalen Leben alle möglichen Energiesparmaßnahmen anwendet, führt das (bei denen, die es ausprobiert haben) zu einer Reduzierung des Energieverbrauchs um nur etwa 20 %. Nützlich, aber, wie der verstorbene Professor Sir David MacKay, der leitende wissenschaftliche Berater der britischen Regierung für Energie und Klima, sagte: „Wenn jeder ein wenig tut, werden wir nur ein wenig erreichen“ (MacKay 2009).

Es besteht kein Zweifel daran, dass, um mehr als nur ein wenig zu erreichen, politische Entscheidungen über die Energieerzeugung getroffen werden müssen – und das bedeutet, dass die Regierungen politischen Mut zeigen müssen. Hier setzt Verzweiflung ein, wenn man im Rückblick die Diskussionen der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) betrachtet. Der frühe Optimismus des Kyoto-Protokolls (1997) machte dem kläglichen Scheitern der Konferenzen in Kopenhagen (2009) und Durban (2011) Platz. Leider besteht die erste Reaktion eines typischen Politikers auf die Klimakrise darin, nur Voraussagen für dieses Jahrhundert oder einen noch kürzeren Zeitraum zu berücksichtigen und davon auszugehen, dass der Klimawandel von selbst aufhört, sobald die Grafiken des Weltklimarats (IPCC) die Grenze von 2100 überschreiten. Der ehemalige britische Minister für Umwelt, Ernährung und Landwirtschaft, Owen Paterson, sagte am 29. September 2013 mit erstaunlicher Zufriedenheit:

„Ich denke, die Erleichterung an diesem jüngsten Bericht besteht darin, dass er einen wirklich recht bescheidenen Temperaturanstieg zeigt, von dem die Hälfte bereits erfolgt ist. Sie sprechen von ein bis zweieinhalb Grad.“ (Paterson 2013)

Zunächst einmal meinte er mit „sie“ natürlich nicht den Weltklimarat selbst, sondern einen ziemlich unkundigen Zeitungsbericht, auf dem anscheinend sein ganzes Wissen beruhte. Der Anstieg um 1 bis 2,5 °C wird aktuell für 2050 vorhergesagt. Die Aussage „von dem die Hälfte bereits erfolgt ist“ zeigt, dass er sich vorgestellt hat, dass der Klimawandel am Ende der Prognosen des Weltklimarats einfach aufhört, anstatt weiterzumachen. Und natürlich ist das Wort „Erleichterung“ ein untrügliches Zeichen: Er war zweifellos erleichtert von seinem Gedanken, dass er davonkommen könnte, ohne irgendwelche Maßnahmen zu ergreifen.

Die zweite Antwort eines typischen Politikers ist, dass es reicht, wenn wir unsere CO₂-Emissionen irgendwann in der Zukunft reduzieren (typischerweise 30 % bis 2032 oder eine ähnliche Zahl), um zu verhindern, dass der Klimawandel außer Kontrolle gerät. Damit sind die heutigen Politiker ordentlich aus dem Schneider. Aber es ist nicht wahr. Zum einen wirkt das bereits in die Atmosphäre geblasene CO₂ wie ein Schwungrad über lange Zeit – ein CO₂-Molekül verbleibt weit über 100 Jahre im Klimasystem und die Welt hinkt der mit dem bereits vorhandenen CO₂ möglichen Erwärmung noch hinterher (vielleicht wurde erst die Hälfte der Erwärmung realisiert). Die Reduzierung unserer Emissionen in der Zukunft bewirkt also viel weniger als eine sofortige Reduzierung der Emissionen. Und eine sofortige Reduzierung der Emissionen bewirkt weniger als eine tatsächliche Reduzierung des Kohlendioxidgehalts der Atmosphäre.

Am nützlichsten wäre es, die Menge an CO₂ in der Atmosphäre zu reduzieren: etwa durch CO₂-Abscheidung und -Speicherung oder eine andere noch zu erfindende Technologie, indem wir ganz auf die Emission von CO₂ zu verzichten, zum Beispiel durch eine Umstellung auf 100 % Kernenergie, was die öffentliche Meinung jedoch unmöglich macht, oder indem wir Technologien nutzen, um die Erwärmung zu verbergen, indem wir quasi ein Pflaster darauf kleben: durch Geoengineering, das uns ein wenig Zeit verschafft. Nichts anderes kann uns vor schwerwiegenden Folgen bewahren, obwohl natürlich die Reduzierung von CO₂ nach wie vor absolut notwendig ist. In diesem Fall sind die Umweltorganisationen wie Greenpeace und WWF nicht hilfreich für die Menschheit, da sie sowohl gegen die Kernkraft als auch gegen das Geoengineering sind.

Sowohl beim Kohlendioxid als auch bei der menschlichen Population gibt es eine Art Sperrklinkeneffekt, der eine schnelle Absenkung verhindert. Sehr grob ausgedrückt beträgt der „natürliche“ CO₂-Gehalt in der Atmosphäre während einer Zwischeneiszeit 280 ppm (*parts per million*) und beim derzeitigen Wert von 409 ppm gehen demnach mehr als 120 ppm auf die Verbrennung fossiler Brennstoffe durch den Menschen zurück. Angenommen, wir hören plötzlich auf, jegliches CO₂ zu emittieren. Wie schnell würden die CO₂-Werte sinken? Nun, da die Verweildauer von in das Energiesystem der Erde freigesetztem CO₂ mindestens 100 Jahre beträgt, könnten wir davon ausgehen, dass pro Jahr maximal 1 % des von uns hinzugefügten CO₂ aus dem System herausfällt, sodass die CO₂-Werte im ersten Jahr der Kohlenstoffabstinenz nur um 1,2 ppm abnehmen würden. Es wird 45 Jahre dauern, bis das Niveau auf 350 ppm gesenkt ist, ein Wert, den die meisten Wissenschaftler für „sicher“ halten. Ebenso würde es bei einer

menschlichen Population von 7 Mrd. und einer durchschnittlichen Lebensdauer von etwa 70 Jahren, wenn der Mensch seine Fortpflanzung vollständig einstellen würde, zehn Jahre dauern, bis die Bevölkerung durch natürlichen Rückgang auf 6 Mrd. abnimmt. Wenn also eine Krise in der Nahrungsmittelproduktion aufgrund des Klimawandels eintritt und unsere Fähigkeit, die Bevölkerung zu ernähren, um 1 Mrd. Menschen reduziert, wird es unmöglich sein, die Bevölkerung allein durch Geburtenkontrolle schnell an das niedrigere Niveau der Nahrungsmittelproduktion anzupassen – stattdessen wird es eine massive Hungersnot geben.

Wenn wir auf unserem jetzigen Weg weitermachen, werden eines Tages alle Kohlenwasserstoffe auf der Erde gefördert und verbrannt sein und unsere Liebe für Öl endlich enden. Aber zu diesem Zeitpunkt wird die globale Erwärmung so extrem geworden sein, dass das Leben unerträglich, wenn nicht gar unmöglich sein wird. Wir brauchen ein neues Manhattan-Projekt, um unsere Atmosphäre zu reinigen, eine Anstrengung, die größer ist als alles, das die Menschheit jemals unternommen hat, und sie muss weltweit sein, weil wir alle die gleiche Luft atmen. Ohne eine solche Anstrengung werden die Auswirkungen des Klimawandels in naher Zukunft sehr deutlich werden – in 20 oder 30 Jahren wird die Welt ein anderer und ein viel schlimmerer Ort sein als heute. Es wird nie wieder eine Ära für den Menschen geben, wie diejenige, die mit der Wirtschaftskrise von 2007 endete. Die Menschen werden zwangsläufig an ihre persönliche Zukunft denken und versuchen, in kühlen Ländern wie Norwegen oder Kanada zu leben, mit geringer Bevölkerung und vielen Ressourcen. Dies führt zu der ernsten Frage, ob es bereits zu spät ist, unseren Planeten durch Reduzierung oder Beseitigung der Kohlenstoffemissionen zu retten, weil wir zu lange gewartet haben und weil wir in einer Gesellschaft leben,

in der hohe Kohlenstoffemissionen ein fester Bestandteil des sozialen und physischen Gefüges sind. Was können wir tun? Es gibt nur zwei Möglichkeiten: entweder technische Methoden zu verwenden, um die Erwärmungsrate trotz gleichzeitig steigendem CO₂-Gehalt zu senken, oder noch fortschrittlichere technische Mittel zu entwickeln, um CO₂ tatsächlich aus der Atmosphäre zu entfernen.

Die Royal Society hat in ihrem Bericht über Geoengineering (Royal Society 2009) zwei Ansätze definiert:

- Sonneneinstrahlungsmanagement (*solar radiation management*, SRM) versucht, die Auswirkungen einer erhöhten Treibhausgaskonzentration auszugleichen, indem die Erde dazu gebracht wird, weniger Sonnenstrahlung zu absorbieren.
- Kohlendioxidentfernung (*carbon dioxide removal*, CDR) befasst sich mit der eigentlichen Ursache des Klimawandels, indem es Treibhausgase aus der Atmosphäre entfernt.

Beginnen wir mit dem Sonneneinstrahlungsmanagement, dem Ansatz, durch Aufkleben eines Pflasters Wege zu finden, die Erwärmungsrate zu reduzieren, während wir weiterhin CO₂ emittieren. Diese Methoden werden allgemein als Geoengineering bezeichnet.

13.1.2 Geoengineering

Um wertvolle Zeit zu gewinnen, während wir nach dauerhaften Lösungen für die Klimakrise suchen, brauchen wir die Fähigkeiten von Ingenieuren, deren Können im Dienste der Menschheit noch nie so dringend benötigt wurde. Geoengineering umfasst eine Reihe von Techniken zur künstlichen Absenkung der Oberflächen-

lufttemperaturen, entweder durch direkte Blockade der Sonnenstrahlen oder durch Erhöhung der Albedo des Planeten, um die Strahlungsbilanz zu verändern. Für die Arktis muss das Ziel von SRM und CDR darin bestehen, das Eis, das wir verloren haben, zurückzuholen und auf diese Weise den Verlust der Methanhydrate im submarinen Permafrost zu stoppen, damit sich die Wahrscheinlichkeit einer gewaltigen Methanfreisetzung verringert. Um dies zu erreichen, müssen wir nicht nur das Tempo der Temperaturänderung verlangsamen, sondern auch ihre Richtung umkehren. Werfen wir einen Blick auf die verschiedenen vorgeschlagenen Ideen, ihre Wirksamkeit und die politischen Schwierigkeiten.

SRM ist das schnell aufgeklebte „Pflaster“, es kann schnell und kostengünstig umgesetzt werden. Es geht dabei nicht um die CO₂-Werte, und so werden Phänomene wie die Versauerung der Ozeane, die hauptsächlich von den CO₂-Werten und nicht von der Temperatur abhängt, weitergehen – mit schwerwiegenden Folgen für Korallenriffe, für das Überleben von Muscheln und sogar für das gesamte marine Ökosystem. Auch mit SRM werden die CO₂-Werte ein Problem bleiben.

Bisher wurden zwei wesentliche Arten von SRM-Methoden vorgeschlagen. John Latham von der Universität Manchester schlug 1990 vor, tiefe Wolken aufzuhellen, indem wir sehr feine Wassertröpfchen in sie hineinsprühen (Latham 1990). Dies erhöht die Albedo der Wolken und bewirkt, dass sie mehr einfallende Sonneneinstrahlung reflektieren. Der geniale Schiffssingenieur Stephen Salter von der Universität Edinburgh entwarf ein System, um diese Injektion vorzunehmen (Salter et al. 2008). Andere schlugen vor, in großen Höhen aus Ballonen oder den Nachbrennern von Düsenflugzeugen feine Feststoffpartikel zu injizieren, die Aerosole bilden würden, die die einfallende Strahlung reflektieren.

Bei der Wolkenaufhellung beziehungsweise *marine cloud brightening* (MCB) wird die Menge des Sonnenlichts erhöht, das von der Oberseite dünner, tiefliegender Wolken (marine Stratocumuli, die etwa ein Viertel der weltweiten Ozeanoberfläche bedecken) zurück in den Weltraum reflektiert wird, wodurch ein Kühleffekt entsteht. Wenn wir das Reflexionsvermögen um etwa 3 % erhöhen könnten, wird nach Schätzungen die entsprechende Abkühlung die durch erhöhtes CO₂ verursachte globale Erwärmung ausgleichen. Dazu müssen wir kontinuierlich Meerwassertröpfchen in die Wolke sprühen. Salter entwickelte Pläne für eine neuartige Methode, um Tröpfchen zu versprühen, und entwarf ein unbemanntes windbetriebenes Schiff, das ferngesteuert in Regionen geführt werden kann, in denen eine „Impfung“ (*cloud seeding*) den größten Effekt hätte (Abb. 13.1). Anstelle von Segeln könnte ein solches Schiff eine viel effizientere Antriebstechnik verwenden – sogenannte Flettner-Rotoren. Dabei handelt es sich um vertikal auf dem Deck montierte rotierende Zylinder, die nach ihrem Erfinder benannt sind, dem deutschen Anton Flettner. Sie nutzen den Magnus-Effekt, laut dem bei Wind an den Seiten eines rotierenden vertikalen Zylinders eine Druckdifferenz entsteht, die eine Kraft im rechten Winkel zur Windrichtung erzeugt. Flettner-Rotoren wurden in den 1920er-Jahren bei Schiffen eingesetzt und die Idee wurde kürzlich wieder aus der Schublade geholt, um den Kraftstoffverbrauch auf See zu senken. Das Schiff beherbergt ein Sprühsystem, das Meerwassertröpfchen vom oberen Ende der Rotoren in die Wolken spritzt. Die für das Sprühen und die Kommunikation benötigte Energie liefert Strom, der von einer im Schiff eingebauten Meeresströmungsturbine erzeugt wird. Der Schlüssel zum Design ist die feine Düse, die Partikel mit dem erforderlichen Durchmesser von etwa 1 µm (ein Millionstel Meter) erzeugt, sodass ein Tröpfchen, wenn es

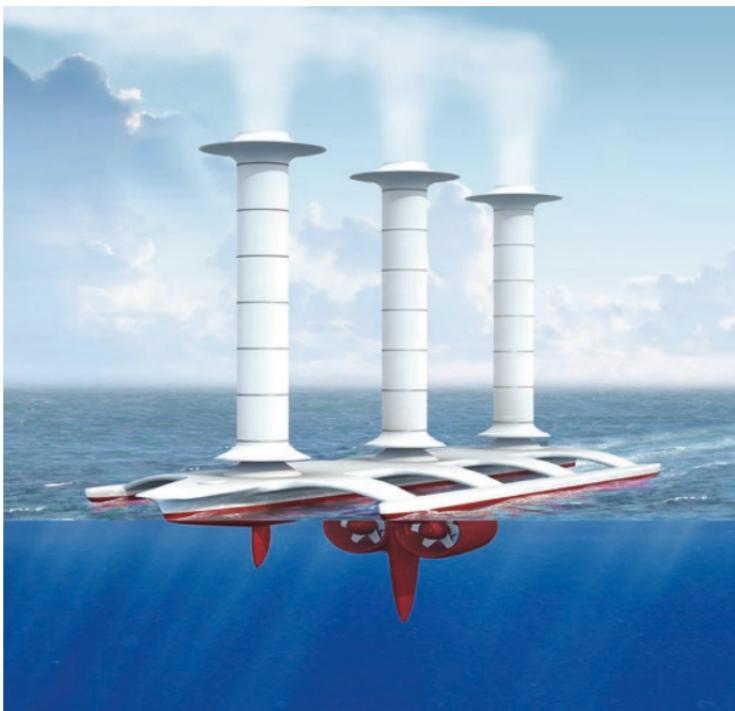


Abb. 13.1 Von Stephen Salter entworfenes Schiff zur Wolkenaufhellung. Drei Flettner-Rotoren sorgen für den Antrieb und dienen der Injektion von Wassertröpfchen in die Wolke (Gadian et al. 2009)

in der Atmosphäre verdampft, einen winzigen Salzpartikel erzeugt, der genau den richtigen Durchmesser (etwa 1 nm) hat, um die Wolke aufzuhellen. Dabei wird der sogenannte Twomey-Effekt genutzt, laut dem winzige Teilchen in einer Wolke heller sind als die gleiche Masse an größeren Teilchen. Dieser Effekt wurde bei Schiffen beobachtet, die das Äquivalent eines Kondensstreifens aus helleren Wolken hinterlassen, die auch aus dem Weltraum sichtbar sind (Abb. 13.2). Mehrere Hundert weltweit verteilte Schiffe wären erforderlich, um das Ziel zu erreichen. Die



Abb. 13.2 Kondensstreifen von Schiffsspuren im östlichen Nordatlantik, bei 44° bis 50° N, 5° bis 15° W. Diese bleiben wohl mehrere Tage erhalten, was darauf hindeutet, dass die Albedo mancher maritimer Wolken durch Injektion von Tröpfchen von Schiffen aus verstärkt werden kann (NASA)

Gesamtkosten wären zwar beträchtlich, aber im Vergleich zu den massiven Kosten der globalen Erwärmung noch immer klein – Milliarden von Dollar pro Jahr im Vergleich zu den Kosten der Erderwärmung von einigen Billionen. Ein großer Vorteil des Plans ist, dass er ökologisch unbedenklich ist, da nur Meerwasser als Rohstoff benötigt wird. Die Kühlleistung könnte über Satellitenmessungen und ein Computermodell kontrolliert werden, und im Notfall könnte das System abgeschaltet werden, sodass sich die Bedingungen innerhalb weniger Tage wieder normalisieren.

Es ist viel Arbeit erforderlich, bevor ein derartiges Wolkenaufhellungssystem in Betrieb genommen werden kann. Wir müssten die Entwicklung der Technologie

abschließen und ein begrenztes Feldexperiment durchführen, bei dem das Reflexionsvermögen von künstlich „geimpften“ Wolken mit dem von benachbarten ungeimpften verglichen wird. Wir müssten auch detaillierte Analysen durchführen, um festzustellen, ob es ernsthafte meteorologische oder klimatische Auswirkungen geben könnte (zum Beispiel Verringerung der Niederschläge in Regionen mit Wasserknappheit), und wenn das der Fall sein sollte, müssen wir eine Lösung dafür finden. Eine Frage wäre, ob wir weltweit sprühen müssen und so globale Effekte erzielen, oder ob wir ausdrücklich ein regionales Ergebnis wünschen und an bestimmten Orten oder zu bestimmten Jahreszeiten sprühen. Die sehr dringende Aufgabe, die Arktis zu kühlen, drängt sich geradezu auf. Wenn es das offene Wasser über den arktischen Schelfgebieten im Sommer ist, das die Erwärmung des submarinen Permafrostes und eine potenzielle Methankatastrophe ermöglicht, können wir dies vielleicht verhindern, indem wir das sommerliche Meereis zurückbringen, ohne gleich den gesamten Planeten kühlen zu müssen?

Dieser regionalen Frage gingen John Latham und Kollegen nach (Latham et al. 2014). Wir stellten fest, dass es in der Tat möglich ist, die Kühlung auf die Arktis zu konzentrieren und einige Fortschritte bei der Ausdehnung des Meereises zu erzielen, insbesondere in der Beaufort- und der Tschuktschensee, allerdings könnte es Probleme wie eine Verringerung der Niederschläge in Afrika südlich der Sahara geben. Immerhin macht das ein wenig Hoffnung. In einer früheren Studie wurde geschätzt, dass das Impfen von über 70 % der globalen Wolkenbedeckung die Erwärmung durch CO_2 -Verdoppelung verhindern und den Verlust des Meereises stoppen könnte (Rasch et al. 2009). Die Wolkenaufhellung reduziert im Wesentlichen die auf die Meeresoberfläche einfallende Strahlung, sodass

sie, wenn sie regional ausführt wird, auch positive Auswirkungen auf die Stärke von Hurrikanen (die von der Meeresoberflächentemperatur abhängt) und das Ausmaß der Korallenbleiche (die von der Wassertemperatur und der Ozeanversauerung abhängt) haben könnte. Schließlich könnte auch das antarktische Meereis betroffen sein: Die Studie von 2014 zeigte, dass eine weltweite Wolkenimpfung das antarktische Meereisgebiet vergrößern würde und auch die Meeresströmungen abkühlen würde, die derzeit den Kollaps der Gletscher von Thwaites und Pine Island zu bewirken drohen, was schlagartig zu einem ernsthaften Meeresspiegelanstieg um 3 m führen könnte (Rignot et al. 2014). MCB kann daher nicht nur global eine Erleichterung in Bezug auf die Erwärmung bieten, sondern auch regionale Bedrohungen bekämpfen, insbesondere in den Polarregionen.

Stephen Salter entwarf einen Entwicklungsplan, der schätzt, dass für die Weiterentwicklung des Wolkenaufhellungssystems bis zur Einsatzbereitschaft 73 Mio. Pfund (rund 87,6 Mio. Euro) an Forschungs- und Entwicklungskosten anfallen würden. Ein Vermögen im Vergleich zu normalen Wissenschaftsbudgets, aber ein Almosen in Anbetracht des dringenden globalen Bedarfs. Wenn Großbritannien es ernst meinte mit der Bekämpfung des Klimawandels, dann wäre dies ein Bereich, in dem es eine Führungsrolle übernehmen könnte.

Aerosolinjektion ist die zweite Geoengineering-Methode, die für einen Einsatz im großen Stil vorgeschlagen wurde (Jackson et al. 2014). Einige der Auswirkungen wurden in einem kürzlich von der britischen Regierung unterstützten Projekt namens Stratospheric Particle Injection for Climate Engineering (SPICE) untersucht, allerdings wurde die Finanzierung eingestellt, bevor die Wissenschaftler tatsächlich ein System ausprobieren konnten. Die Idee ist es, in großer Menge Aerosole –

winzige Partikel – in großer Höhe in der Stratosphäre zu verteilen, damit sie das Sonnenlicht direkt zurück ins All reflektieren können. Die Injektion müsste kontinuierlich erfolgen, da das Aerosol allmählich aus der oberen Atmosphäre abregnet.

Die ursprünglichen Ideen forderten, eine Sulfataerosolwolke in der Atmosphäre zu schaffen, entweder durch die Freisetzung eines sogenannten Vorläufergases – Schwefeldioxid (SO_2) – oder durch die direkte Freisetzung von Schwefelsäure (H_2SO_4). Wenn SO_2 -Gas freigesetzt wird, oxidiert es in der oberen Atmosphäre und löst sich in Wasser auf, um weit von der Injektionsstelle entfernt kleine Schwefelsäuretröpfchen zu bilden. Die Größe der Tröpfchen kann dabei nicht kontrolliert werden, aber es ist relativ leicht, das Gas freizusetzen. Bei direkter Freisetzung von Schwefelsäure würden sich die Aerosolpartikel sehr schnell bilden, und im Prinzip könnte die Partikelgröße zur Optimierung der klimatischen Wirkung gesteuert werden. Wenn das Aerosol in die untere Stratosphäre eingebracht wird, bleibt es nur für einige Wochen oder Monate in der Luft, da die Luft in dieser Region überwiegend absinkt, deshalb ist für eine längere Lebensdauer von mehreren Jahren eine Injektion in größerer Höhe erforderlich.

Wie könnte dies geschehen? Zu den vorgeschlagenen Systemen zählen Artilleriegeschosse, Höhenflugzeuge oder Ballons, die entweder ein bis zum Boden reichendes Rohr halten oder frei aufsteigen, bis sie platzen und das in ihnen enthaltene Vorläufergas freisetzen. Die billigsten Systeme scheinen existierende militärische Tankflugzeuge wie die amerikanischen KC-135 oder KC-10 zu sein. Nur neun der größeren KC-10-Flugzeuge und drei Flüge täglich würden benötigt, um 1 Teragramm (Tg, 1 Mio. t) Schwefeldioxid pro Jahr zu injizieren. Kostenmäßig sind 16-Zoll-Artilleriegeschosse vergleichbar. Das gilt auch für

eine große Zahl kleiner Ballons, die mit einer Mischung aus Schwefelwasserstoff (H_2S), einem weiteren möglichen Vorläufergas, und für Auftrieb sorgendem Wasserstoff gefüllt sind und die bei Erreichen der Stratosphäre platzen. 37.000 handelsübliche Ballons würden pro Jahr benötigt. Die Systeme sind einfacher als bei der Aufhellung von Meereswolken, aber die Mengen sind sehr groß und die Chemikalien müssen hoch in die Atmosphäre gehoben werden.

Dass Partikel in hohen Atmosphärenschichten das Klima tatsächlich beeinflussen können, wissen wir von Vulkanausbrüchen – der Ausbruch des Pinatubo 1991 zum Beispiel führte in den drei folgenden Jahren zu einer spürbaren globalen Abkühlung. Die Kosten würden sich in Grenzen halten, Paul Crutzen, der ein früher Verfechter dieser Idee war, schätzt sie auf 25 bis 50 Mrd. Dollar pro Jahr, um den Kohlendioxidemissionen des Menschen vollständig entgegenzuwirken (Crutzen 2006).

Es wurden jedoch viele potenzielle Probleme identifiziert. Die Niederschläge würden reduziert, was schwerwiegende Auswirkungen auf den asiatischen und afrikanischen Monsun haben könnte. Der Abbau der Ozonschicht könnte zunehmen, was zu einem Wiederaufleben des Ozonlochs führen würde. Es ist schwierig vorherzusagen, wie die Kühlung weltweit verteilt wäre, sodass einige Länder weniger Abkühlung als andere erleben könnten, vielleicht sogar eine Erwärmung. Und so weiter. Hinzu kommt ein Unbehagen mit der Idee, große Mengen einer unbestreitbar giftigen Chemikalie in die obere Atmosphäre zu injizieren – die Aufhellung der Meereswolken mit Meerwassertröpfchen klingt im Vergleich dazu geradezu gutartig. Ein unerbittlicher Gegner der Aerosolinjektion, Alan Robock von der Rutgers University, hat jedoch kürzlich seine Meinung geändert: Er war Mitautor eines Artikels (Xia et al. 2016), der zeigte, dass die

Aerosolwolke nicht nur die direkte Strahlung mindert, die auf den Boden trifft, sondern auch die diffuse Strahlung verstärken würde, die in Kombination mit der Kühlung zu einer Erhöhung der Fotosyntheseraten der Pflanzen führen würde. Diese Zunahme des Pflanzenwachstums würde selbst eine Rolle bei der Reduzierung des Kohlendioxidspiegels in der Atmosphäre spielen, ein unerwarteter zusätzlicher Nutzen.

Es wurden noch ein paar weitere Geoengineering-Techniken vorgeschlagen. Ein Beispiel ist ein Reflektor im Weltraum, ein sehr großer Spiegel oder ein System von Spiegeln im Orbit, um große Mengen an Sonnenlicht in den Weltraum zu reflektieren. Allerdings hat sich niemand einen realisierbaren Plan ausgedacht, nach dem so etwas im Orbit ohne kolossale Kosten zusammengebaut werden könnte.

13.1.3 Kohlenstoffabscheidung

Ich habe erklärt, warum eine Verringerung der CO_2 -Emissionen unwahrscheinlich ist, zumindest in dem Tempo, das eigentlich nötig wäre. Und wenn sie zu langsam erfolgt, was äußerst wahrscheinlich ist, wird sie ein Erbe von überschüssigem CO_2 in der Atmosphäre hinterlassen, das die zukünftige Erwärmung weiter antreiben wird. Geoengineering kann den Auswirkungen von Kohlendioxid und Methan auf die Atmosphäre entgegenwirken, das CO_2 würde aber weiterhin eine Versauerung des Ozeans bewirken, was letztendlich unser marines Ökosystem zerstören könnte (und damit unser globales Ökosystem, da der Ozean 72 % der Erdoberfläche ausmacht). Meine düstere Schlussfolgerung ist, dass wir am Ende (und dieses Ende kann nah sein) einen Weg finden müssen, CO_2 aus dem Klimasystem des Planeten herauszunehmen, wenn

wir die Erderwärmung stoppen und unsere Zivilisation retten wollen. Wie machen wir das?

Der erste Schritt wäre, dass wir das ganze Problem ernst nehmen. Es ist in der Tat das ernsthafteste Problem, mit dem die Welt konfrontiert ist – können wir den drohenden, galoppierenden Klimawandel abwenden und die Lebensgrundlage der Menschheit erhalten? Oder müssen wir uns mit dem sich beschleunigenden Klimawandel abfinden, der große Teile des Planeten lebensunfähig macht? Einen der größten Fehler in dieser Hinsicht machte der Weltklimarat. In seinem 5. Bewertungsbericht im Jahr 2013 sagte er, das Szenario RCP2.6 sei der einzige mögliche Weg, ein tragfähiges Klima zu erhalten. Ich habe bereits meinen Verdacht geäußert, dass die „RCP“-Formulierung des Strahlungsantriebs die Realität dessen verbirgt, was zur Vermeidung eines katastrophalen Klimawandels erforderlich wäre (Kap. 7). Aber das Paradoxe dabei spricht der Weltklimarat nicht aus: Der einzige Weg, uns zu retten, ist es, dem RCP2.6-Weg zu folgen – und der einzige Weg, dies zu tun, ist es, CO_2 tatsächlich aus der Atmosphäre zu entfernen, weil wir nämlich sehr bald die CO_2 -Konzentration von 421 ppm erreichen werden, die als Obergrenze für eine „akzeptable“ Klimaerwärmung dargestellt wird. Wir werden diese Grenze wahrscheinlich in etwa einem Jahrzehnt überschreiten, ohne es auch nur zu bemerken, so schnell steigen die CO_2 -Werte. Ab diesem Punkt ist Kohlenstoffabscheidung unsere einzige Hoffnung. Der Weltklimarat weiß das genau, ignoriert aber die Frage, wie wir CO_2 tatsächlich aus der Atmosphäre entfernen können. Ein weiteres wichtiges Problem sind die Auswirkungen, die eine großflächige Anwendung der CO_2 -Abscheidung auf Ökosysteme und Biodiversität haben könnte. Dies muss auf internationaler Ebene untersucht werden, bevor wir mit einer groß angelegten

CO₂-Abscheidung beginnen, auch dies ignoriert der Weltklimarat.

Zwei mögliche Techniken haben in letzter Zeit in der Diskussion an Bedeutung gewonnen (Williamson 2016). Die eine ist Bioenergie mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung (*bioenergy with carbon capture and storage*, BECCS), die andere ist Aufforstung. BECCS umfasst den Anbau von Bioenergieläppflanzen, von Gräsern bis hin zu Bäumen, deren Verbrennung in Kraftwerken, die Abscheidung des CO₂ aus den entstehenden Abgasen und die Verflüssigung des Gases unter hohem Druck, um es unterirdisch zu speichern. Die Wirkung von Aufforstung – dem Pflanzen von Bäumen – beruht ebenfalls auf Photosynthese, um CO₂ aus der Atmosphäre zu entfernen. Die Speicherung erfolgt auf natürliche Weise, in Holz und im Boden. Wenn wir den globalen Temperaturanstieg auf 2 °C begrenzen wollen, müssen wir bis zum Ende dieses Jahrhunderts etwa 600 Gt CO₂ aus der Atmosphäre entfernen. Mit BECCS müsste der Anbau von Pflanzen ausschließlich zu diesem Zweck auf einer Fläche zwischen 430 und 580 Mio. Hektar (ha) erfolgen – das ist etwa ein Drittel der derzeitigen weltweiten Ackerfläche oder etwa die halbe Fläche der Vereinigten Staaten. Das ist eindeutig unmöglich, es sei denn, wir können eine erhebliche Steigerung der landwirtschaftlichen Produktivität erreichen, die weit über den Bedarf einer schnell wachsenden Weltbevölkerung hinausgeht. Es ist wahrscheinlicher, dass wir dieses Ackerland brauchen werden, um die Menschen zu ernähren (und es wird wahrscheinlich eher weniger produktiv sein, da durch den Wandel in der Arktis extreme Wetterereignisse zu erwarten sind). BECCS müsste auch Primärwald und natürliches Grünland nutzen, die wir ebenfalls nicht entbehren können, schließlich ist Aufforstung eine der Möglichkeiten, CO₂ zu entfernen. Diese naturbelassenen Orte enthalten auch

die letzten verbliebenen Lebensräume einer großen Zahl bedrohter Arten, deren Verlust für das Weiterbestehen des weltweiten Ökosystems katastrophal sein könnte. Ein weiteres grundlegendes Problem ist, dass nicht sicher ist, ob BECCS so effektiv CO_2 aus der Atmosphäre entfernt, wie angenommen wird. Der Anbau von Nutzpflanzen in einem solchen Umfang könnte zumindest zeitweise aufgrund von Rodungen, Bodenerosion und verstärktem Düngemittel Einsatz eher eine Freisetzung als eine Aufnahme von Treibhausgasen bedeuten. Unter Berücksichtigung dieser Effekte wird die maximale Menge an CO_2 , die mit BECCS entfernt werden kann (nach dem RCP2.6-Szenario), bis 2100 auf 391 Gt geschätzt. Das ist etwa 34 % weniger als die angenommene Menge, die benötigt wird, um den Temperaturanstieg unter 2 °C zu halten. Wenn weniger optimistische Annahmen darüber getroffen werden, woher das Land für Bioenergielieferanten kommen kann, sinkt der Wert auf 135 Gt. Wir sehen bereits, dass BECCS die Aufgabe nicht allein bewältigen kann. Darüber hinaus würden wir Bioenergielieferanten in einer Welt des Klimawandels anbauen: Wie hoch wird ihr Wasserbedarf in einer wärmeren Welt sein? Wie werden sie mit der Nahrungsmittelproduktion konkurrieren, wenn die Überbevölkerung tatsächlich zu einem Wettlauf um die Anbauflächen führt? Und, was auch bei anderen Techniken ein ungelöstes Problem ist, wie scheiden wir das Kohlendioxid ab und wo speichern wir es?

Aufforstung klingt nach einer sanfteren Art und Weise, CO_2 aus der Atmosphäre zu entfernen, auch weil wir es danach nirgendwo entsorgen müssen. Jeder geht davon aus, dass eine größere Waldfläche ökologisch wünschenswert ist – trotzdem sind wir eifrig damit beschäftigt, die Wälder am Amazonas und in Südostasien für ihre Tropenhölzer absägen und zu roden, um Sojabohnen anzubauen oder Rinder zu halten. Wie können wir die

Wälder vergrößern, wenn sie derzeit so schnell abgeholt werden? Auch Aufforstung kann den Verlust natürlicher Ökosysteme bedeuten, wenn wir den Naturwald durch bewirtschaftete Monokulturen ersetzen. Wir stehen erst am Anfang der Untersuchung wichtiger Waldarten, deren Verlust entweder für die Erhaltung unseres globalen Ökosystems oder für die Bekämpfung schwerer Schädlinge wie des Borkenkäfers katastrophal sein könnte (Halter 2011). Ein Drittel aller neuen Medikamente wird aus Waldpflanzen entwickelt. Und die Anpflanzung großer bewirtschafteter Waldgebiete führt zu komplexen Veränderungen der Bewölkung, der Albedo und des Bodenwasserhaushalts, weil sich die Verdunstung und die Pflanzentranspiration ändern. Eine unerwünschte Veränderung tritt beim nördlichen borealen Wald auf. Mit der Erderwärmung bewegt sich die Baumgrenze nach Norden, was man als eine gute Sache bezeichnen könnte, außer dass während der Zeit mit Schneedeckung ein mit Bäumen bedecktes Gelände (mit nackten Ästen oder immergrünen Nadeln) dunkler ist als flaches schneedecktes Grasland oder Tundra, sodass die Albedo reduziert wird und es wieder eine Nettoerwärmung gibt. Die systematische Nutzung der Aufforstung beinhaltet das Fällen der Bäume (und das Lagern des Holzes), wenn sie eine bestimmte Wachstumsphase erreicht haben, gefolgt von der Wiederbepflanzung. Dies wird nicht funktionieren, wenn vermehrte Brände, Dürren, Schädlinge und Krankheiten dazu führen, dass die Bäume vor der Ernte sterben und umfallen.

Viele weitere Ideen für die CO_2 -Abscheidung wurden vorgeschlagen, ob mit biologischen, geochemischen oder chemischen Mitteln. Für alle diese Systeme kann die Modellierung des theoretischen Potenzials ein völlig anderes Bild vermitteln, als wenn wir die Umweltauswirkungen betrachten – von der Durchführbarkeit, Steuerbarkeit

und der Akzeptanz ganz zu schweigen. Ein gutes Beispiel dafür ist die lange Geschichte der Diskussion, Forschung und Politik zum Thema Ozeandüngung, einer weiteren Methode, um CO_2 aus der Atmosphäre zu entfernen. Als zum ersten Mal ein Zusammenhang zwischen natürlichen Veränderungen des Staubeintrags in den Ozean, der Meeresproduktivität und den klimatischen Bedingungen hergestellt wurde, gab es hohe Erwartungen daran, wie effektiv die Ozeandüngung sein könnte, um eine von Menschen verursachte Erderwärmung zu vermeiden. In den 1990er-Jahren postulierten die Forscher, dass für jede Tonne Eisenpulver, die dem Meerwasser zugesetzt würde, Zehntausende Tonnen Kohlenstoff (und damit CO_2) durch die daraus resultierenden „Blüten“ des Phytoplanktons gebunden werden könnten. Diese Schätzung wurde im Laufe der Jahre und nach 14 kleinen Feldexperimenten erheblich reduziert. Die Planktonblüten können entweder durch Zugabe von Eisen oder anderen Nährstoffen zum Meerwasser oder durch Verbesserung des Auftriebs durch mechanische Mittel angeregt werden. Doch der größte Teil des von solchen Planktonblüten aufgenommenen Kohlendioxids wird beim Abbau des Phytoplanktons wieder in die Atmosphäre abgegeben. Darüber hinaus könnte eine groß angelegte Steigerung der Planktonproduktivität in einer Region (zum Beispiel über dem Südlichen Ozean) die Erträge der Fischerei an anderer Stelle verringern, indem sie andere Nährstoffe verbraucht, oder die Wahrscheinlichkeit eines Sauerstoffmangels in mittlerer Wassertiefe erhöhen. Solche Risiken haben dazu geführt, dass Gremien wie die Biodiversitätskonvention (Convention on Biological Diversity, CBD) die Meeresdüngung als Klimaintervention nahezu einstimmig ablehnen.

In jüngster Zeit wurden andere ozeanbasierte Methoden zur CO_2 -Abscheidung vorgeschlagen, wie beispielsweise

der Anbau von Algen, der bis zu 9 % des globalen Ozeans bedecken soll. Die spezifischen Umweltauwirkungen dieser Methode müssen noch bewertet werden. Ein solcher Ansatz würde jedoch eindeutig bestehende marine Ökosysteme mit hohem wirtschaftlichen Wert, insbesondere in flachen Gewässern, beeinträchtigen und möglicherweise verdrängen.

Um ans Land zurückzukehren: Es gibt weitere Möglichkeiten, um die Menge an Kohlenstoff, der im Boden gebunden ist, zu erhöhen, zum Beispiel durch Einpflügen von organischem Material wie Stroh, durch Reduzieren des Pflügens (um Bodenerosion zu begrenzen) oder durch Hinzufügen von Biokohle. Biokohle hat eine interessante eigene Geschichte, dank der Bemühungen einer Gruppe begeisterter Anhänger, die Welt davon zu überzeugen, dass dies die Antwort auf die globale Erwärmung ist. Pflanzenmaterial oder landwirtschaftliche Abfälle werden einem Prozess namens Pyrolyse ausgesetzt, der eine Flüssigkeit produziert und ein holzkohleartiges schwammiges Material hinterlässt, das in den Boden gegraben werden kann und ihm angeblich besondere Eigenschaften verleiht. Es wird nie richtig erklärt, wie all dies CO_2 entsorgt. Eine weitere von einigen Enthusiasten verfolgte Idee ist es, die Verwitterung zu verstärken, bei der bestimmte Silikatgesteine CO_2 aus der Atmosphäre absorbieren, insbesondere Olivin. Das Material muss zerkleinert werden, um eine möglichst große Oberfläche zu erhalten, und müsste daher auf Stränden und anderen Oberflächen wie feiner Sand verteilt werden. Es folgt eine langsame chemische Reaktion, die CO_2 verbraucht und Sauerstoff abgibt. Es stimmt, dass dies, wie die Enthusiasten sagen, der chemische Prozess auf der frühen Erde war, der zu einer ersten Freisetzung von Sauerstoff aus Gesteinen geführt hat. Um die Menge an CO_2 in der Atmosphäre um 50 ppm zu reduzieren und von unseren derzeitigen 400 ppm zurück

auf 350 ppm zu kommen, müssten jedoch jedes Jahr 1 bis 5 kg Silikatgestein pro Quadratmeter auf 2 bis 6,9 Mrd. ha Land (15 bis 45 % der gesamten Landoberfläche), verteilt werden, vor allem in den Tropen. Das Volumen des Gesteins, das abgebaut und verarbeitet werden muss, würde die Menge der derzeit weltweit produzierten Kohle übersteigen, wobei die Gesamtkosten der Umsetzung auf 60 bis 600 Bio. Dollar geschätzt werden, weit mehr als bei den Geoengineering-Techniken. Wie beim Geoengineering müsste die Anwendung kontinuierlich sein, denn sobald die chemische Reaktion abgelaufen ist, nützt der Sand nichts mehr und muss mit frischen Schichten überdeckt werden. Offensichtlich ist die ganze Sache nicht machbar. Es ist aber wichtig, die Kohlenstoffspeicherung mit biologisch basierten Methoden weiter zu erforschen und mehr über die Umweltauswirkungen zu erfahren, die sich ergeben könnten, wenn solche Ansätze in großem Maßstab eingesetzt werden. In diese Richtung ist ein breites Spektrum an Forschung erforderlich.

Alle diese Methoden haben daher schwerwiegende, wenn nicht sogar fatale Nachteile. Uns bleibt etwas, das erst noch erfunden werden muss, das aber Gegenstand eines Forschungsprogramms im Maßstab des Manhattan-Projekts sein sollte: *direct air capture* (DAC). Dabei wird Luft durch ein System gepumpt, das CO_2 entfernt und entweder verflüssigt und speichert oder es chemisch in etwas anderes umwandelt, hoffentlich etwas Nützliches. Wenn ich sage, dass es noch nicht erfunden wurde, dann meine ich ein System, das nicht unbrauchbar teuer ist. Prinzipiell kann DAC dadurch erfolgen, dass Luft durch Anionenaustauscherharze geleitet wird, die Hydroxid- oder Karbonatgruppen enthalten. Diese nehmen im trockenen Zustand CO_2 auf und geben es im feuchten Zustand ab. Das extrahierte CO_2 kann dann komprimiert, in flüssiger Form gespeichert und unterirdisch

deponiert werden, ganz ähnlich wie bei der Technologie der CO₂-Abscheidung und -Speicherung. Die Betriebskosten für DAC liegen jedoch in einer ähnlichen Größenordnung wie bei der Silikatverwitterung, sie belaufen sich derzeit auf mehr als 100 US-Dollar pro Tonne Kohlenstoff, auch wenn ein jüngster (2016) Durchbruch 40 US-Dollar pro Tonne verspricht. Der Gewinnungsprozess würde auch Land und wahrscheinlich Wasser benötigen, und wie bei BECCS besteht die Gefahr, dass CO₂ aus geologischen Speichern austritt. Diese Risiken können minimiert werden, wenn das verflüssigte CO₂ im Meeresboden eingelagert wird oder indem geochemische Reaktionen zwischen CO₂ und bestimmten Gesteinsarten *in situ* ausgenutzt werden. Theoretisch könnte statt chemischer Reaktionen auch die zur Verflüssigung des CO₂ notwendige Kühlung genutzt werden, um CO₂ aus der Umgebungsluft abzutrennen. Die technische Machbarkeit, die Kosten und die möglichen Umweltauswirkungen dieses Ansatzes – eventuell mit dem Bau von Anlagen auf polaren Hochplateaus in der Antarktis oder in Grönland – müssen noch untersucht werden. Ich selbst bin davon überzeugt, dass DAC alles ist, was uns bleibt, um die Welt auf lange Sicht in ihrem jetzigen Zustand zu erhalten. Wenn wir ernsthafte Forschungen durchführen, in einem Umfang, der mit dem Manhattan-Projekt während des Zweiten Weltkriegs vergleichbar ist, könnten wir die Kosten so senken, wie in den vergangenen Jahren die Kosten der Solarenergie mit Fotovoltaik eingebrochen sind.

Eine berechtigte Kritik am Geoengineering oder an der CO₂-Abscheidung ist, dass sie uns ermutigt, wenig oder gar nichts zur Reduzierung unserer Kohlendioxidemissionen zu tun, und dass sich unser rasches Handeln auf die Emissionsminderung konzentrieren sollte und nicht auf eine Strategie mit ungewissem Ausgang, „jetzt emittieren, später entfernen“. Aber die unglückliche Reali-

tät ist, dass die Weltbevölkerung, insbesondere im Westen, außerordentlich zögerlich ist, auf den Komfort und die Bequemlichkeiten zu verzichten, die das Leben in einer Welt der fossilen Brennstoffe ermöglicht. Irgendwann wird uns nichts anderes mehr übrig bleiben. Aber wir sehen nicht, warum wir das jetzt tun sollten. Nur noch ein weiterer Ryanair-Flug, und ist dieser SUV nicht eine gute Möglichkeit, die Kinder zur Schule zu bringen? Aber selbst wenn drastische und sofortige Anstrengungen zur Emissionsenkung unternommen werden, müssen um das Jahr 2020 herum Geoengineering und CO₂-Abscheidung im großen Stil beginnen, mit bis zu 20 Gt CO₂ pro Jahr bis 2100, um den globalen Temperaturanstieg unter 2 °C zu halten. Nur wenn wir wissen, ob das machbar ist, können wir die nächste Frage beantworten.

13.2 Kann uns das Pariser Abkommen von 2015 retten?

Im Dezember 2015 haben die 195 Vertragsparteien der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) in Paris auf der COP21 („21. Konferenz der Vertragsparteien“) eine historische Einigung erzielt. Sie verständigten sich darauf, eine Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen irgendwann zwischen 2050 und 2100 zu erreichen. Diese Verpflichtung (die verschiedene Nationen im April 2016 unterzeichneten) soll den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf „deutlich unter 2 °C“ und vorzugsweise auf 1,5 °C über dem vorindustriellen Niveau begrenzen. Ein ausgeglichenes Treibhausgasbudget erfordert entweder, dass Industrie und Landwirtschaft keine Emissionen produzieren, oder eine

aktive Entfernung von Treibhausgasen aus der Atmosphäre (zusätzlich zu deutlichen und schnellen Emissionsenkungen). In den meisten modellierten Szenarien, die die Erwärmung auf 2 °C begrenzen, müssen jedes Jahr mehrere Gigatonnen Kohlendioxid aus der Atmosphäre entnommen und sicher gelagert werden. Für ehrgeizigere Ziele müssen Dutzende von Gigatonnen pro Jahr entfernt werden. Daher der Zusammenhang zu unseren bisherigen Diskussionen in diesem Kapitel.

Die Vereinbarungen lassen sich wie folgt zusammenfassen. Die Regierungen einigten sich auf:

- ein langfristiges Ziel, den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2 °C über dem vorindustriellen Niveau zu halten;
- zu versuchen, den Anstieg auf 1,5 °C zu begrenzen, da dies die Risiken und Auswirkungen des Klimawandels erheblich verringern würde;
- die Notwendigkeit, dass die globalen Emissionen so schnell wie möglich ihren Höchstwert erreichen, in dem Bewusstsein, dass dies für die Entwicklungsländer länger dauern wird; und
- danach die Emissionen so schnell abzusenken, wie es technisch möglich ist.

Vor und während der Pariser Konferenz reichten die Länder „national festgelegte angestrebte Beiträge“ (*intended nationally determined contributions*, INDC) ein. Dies sind individuelle Selbstverpflichtungen zur Reduzierung der Kohlenstoffemissionen. Diese reichen noch nicht aus, um die globale Erwärmung unter 2 °C zu halten, aber das Abkommen öffnet einen Weg, um dieses Ziel zu erreichen, da die Regierungen zugestimmt haben, dass sie:

- alle fünf Jahre zusammenkommen, um ehrgeizigere Ziele festzulegen, als es die Wissenschaft verlangt;
- einander und der Öffentlichkeit darüber berichten, wie gut sie bei der Umsetzung ihrer Ziele vorgehen;
- die Fortschritte auf dem Weg zum langfristigen Ziel durch ein robustes Transparenz- und Rechenschaftssystem verfolgen;
- die Fähigkeit der Gesellschaften stärken, mit den Auswirkungen des Klimawandels umzugehen; und
- weitere und verstärkte internationale Hilfszahlungen an die Entwicklungsländer für die Anpassung bereitstellen, mit einem Ziel von 100 Mrd. Dollar pro Jahr bis 2025.

Die Vereinbarung erkennt an:

- wie wichtig es ist, Verluste und Schäden im Zusammenhang mit den negativen Auswirkungen des Klimawandels abzuwenden, zu minimieren und zu bekämpfen; und
- dass die Zusammenarbeit verstärkt und Verständnis, Maßnahmen und Unterstützung in verschiedenen Bereichen wie Frühwarnsystemen, Notfallvorsorge und Risikoversicherung verbessert werden müssen.

Was bedeutet das alles? Die positiven Aspekte sind sehr deutlich. Es ist das erste wirklich globale Klimaabkommen, das erreicht wurde. Es hat die USA wieder an den Verhandlungstisch gebracht und Indien, China und andere große Emittenten einbezogen. Es hat den „Handlungsstrang“ derart verändert, dass anstelle der Bitterkeit und des Herumwindens auf früheren Treffen in Kopenhagen und Durban, bei denen die Länder versuchten, das absolute Minimum oder gar nichts zu tun, jetzt alle eifrig und ehrlich sind und sich einem

gemeinsamen Ziel widmen. Es besteht die Chance auf eine echte internationale Partnerschaft und nicht nur auf Beeinflussung. Das Abkommen war also in vielerlei Hinsicht ein diplomatischer und politischer Triumph, was im Lichte des Vorangegangenen eindeutig positiv ist.

Aber kann es uns retten? Lassen Sie uns einige der Dinge betrachten, die nicht in der Vereinbarung enthalten sind. Erstens reichen die Vereinbarungen für einen Weg zu einem akzeptablen Klima nicht aus. Ziel ist es, die Erwärmung unter 2 °C zu halten, aber die bisher vorgestellten INDC werden uns, selbst wenn sie vollständig eingehalten werden, eine Erwärmung von mindestens 2,7 °C bringen. Es ist gar nicht möglich, nahe an 1,5 °C heranzukommen, außer durch den massiven Einsatz von Geoengineering und Kohlenstoffabscheidung, die nicht im Abkommen erwähnt werden, in dem es nur um Emissionen geht. Auch die Luftfahrt, die ein wesentlicher Faktor für die Erderwärmung ist, wird nicht erwähnt. Es gibt keine Pläne für Sofortmaßnahmen und kein Datum, ab dem die CO₂-Bilanz ausgewogen sein soll, außer „zwischen 2050 und 2100“. Das ist gefährlich vage, da der spätere Zeitpunkt bedeuten würde, dass dies mit einer sehr hohen Kohlendioxidkonzentration erfolgt. Kurz gesagt, das Abkommen ist stark vom guten Willen und der Ehrlichkeit der Nationen abhängig, auch wenn die Folgetreffen dabei helfen dürften. Grundsätzlich ist der Klimawandel ein sogenanntes „*stock-and-flow*“-Problem: Der Temperaturanstieg ist eng mit den im Laufe der Zeit kumulierten Emissionen verbunden (der Lagerbestand, *stock*), aber wir können nur die Geschwindigkeit kontrollieren, mit der ab sofort Kohlendioxid freigesetzt oder vielleicht entfernt wird (der Strom, *flow*). Unser Planet hat bereits eine große Menge an kumulierten Emissionen erhalten. Um die Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre zu stabilisieren oder zu reduzieren, müssen

die aktuellen Emissionen um mindestens 90 % reduziert werden, was den Einsatz von Technologien zur Emissionsminderung erfordert.

Das Abkommen ist also ein großer Schritt nach vorn, aber nur ein erster Schritt. Es gibt uns ein vereinbartes Ziel, zeigt aber nicht auf, wie wir dieses Ziel erreichen können. Ich glaube, dass das Ziel einer Stabilisierung tatsächlich nur durch Interventionen in Form von Geoengineering und CO₂-Abscheidung erreicht werden kann, und dass, falls die Welt versucht, die globale Erwärmung allein durch Absenkung der CO₂-Emissionen auf 1,5 bis 2 °C zu beschränken, das Ergebnis ein beschämender Misserfolg sein wird. Jetzt ist es an der Zeit, sich auf die Einführung dieser neuen Technologien zu konzentrieren, bevor Misserfolge bei der Emissionsabsenkung zu Streitigkeiten und einem Scheitern des Abkommens führen. Das Pariser Abkommen ist ein Schritt, der vor zehn oder 20 Jahren nötig gewesen wäre, und wir hätten längst mit der schwierigen Arbeit beginnen sollen, den Klimawandel wirklich zu bekämpfen.

Literatur

- Crutzen PJ (2006) Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: a contribution to resolve a policy dilemma? *Clim Change* 77:211–220
- Ehrlich PR, Ehrlich AH (2014) Collapse: what's happening to our chances? <http://mahb.stanford.edu/blog/collapse-whats-happening-to-our-chances?>
- Gadian A, Blyth A, Latham J, Salter S, Stevens L (2009) Whitenning the clouds. *Planet Earth Online* 14(12):2009
- Halter R (2011) The insatiable bark beetle. *Rocky Mountain Books, Victoria*
- Jackson LS, Crook JA, Jarvis A, Leedal D, Ridgwell A, Vaughan N, Forster PM (2014) Assessing the control-

- lability of Arctic sea ice extent by sulphate aerosol geo-engineering. *Geophys Res Lett* 42:1223–1231. <https://doi.org/10.1002/2014gl062240>
- Latham J (1990) Control of global warming? *Nature* 347:339–340
- Latham J, Gadian A, Fournier J, Parkes B, Wadhams P, Chen J (2014) Marine cloud brightening: regional applications. *Philos Trans R Soc A*372:20140053
- MacKay DJC (2009) Sustainable energy – without the hot air. UIT Cambridge Ltd., Cambridge. www.without-hotair.com
- Meadows DH, Meadows DL, Randers J, Behrens WW (1972) The limits to growth. Universe Books, New York
- Paterson O (2013) The state of nature: environment question time. Conservative Party fringe, Manchester, 29. September 2013
- Rasch P, Latham J, Chen CC (2009) Geoengineering by cloud seeding: influence on sea ice and climate system. *Environ Res Lett* 4:045112. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/4/045112>
- Rignot E, Mouginot J, Morlighem M, Senussi H, Scheuchi B (2014) Widespread, rapid grounding line retreat of Pine Island, Thwaites, Smith and Kohler Glaciers, West Antarctica, from 1992 to 2011. *Geophys Res Lett* 41:3502–3509. <https://doi.org/10.1002/2014gl060140>
- Royal Society (2009) Geoengineering the climate: science, governance and uncertainty. Royal Society, London
- Salter S, Sortino G, Latham J (2008) Sea-going hardware for the cloud albedo method of reversing global warming. *Philos Trans R Soc A*366:3989–4006
- UN (2015) World Population Prospects, the 2015 Revision. United Nations Population Division, Department of Economic and Social Affairs, New York
- Williamson P (2016) Emissions reduction: scrutinize CO₂ removal methods. *Nature* 530:153–155
- Xia L, Robock A, Tilmes S, Neely RR (2016) Stratospheric sulfate engineering could enhance the terrestrial photosynthesis rate. *Atmos Chem Phys* 16:1479–1489



14

Aufruf zum Kampf

Die Entdeckung im Jahr 2015, dass die Klimasensitivität des Planeten gegenüber Treibhausgasen auf lange Sicht sehr hoch ist (Wasdell 2015), ist von größter Bedeutung für die Frage, was die Priorität der Menschheit in der vor uns liegenden Krise sein sollte. Sie zeigt, dass bereits die heutige Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre reicht, um in Zukunft eine inakzeptable Erwärmung zu verursachen. Wir haben kein „Kohlenstoffbudget“ mehr, das wir noch verfeuern können, ohne uns Sorgen zu machen, dass wir einen massiven Klimawandel verursacht haben. Wir haben das Budget bereits verfeuert und verursachen schon heute den Klimawandel.

Daher reicht es nicht, die Kohlenstoffemissionen zu reduzieren. Vor 20 oder 30 Jahren, als die globale Erwärmung zum ersten Mal als ernsthafte Bedrohung eingestuft wurde, hätte eine ernsthafte, gemeinsame Anstrengung der internationalen Gemeinschaft, den Einsatz fossiler Brennstoffe zu verringern und auf erneuerbare

Energiequellen und Kernkraft umzustellen, reichen können. Es wäre noch möglich gewesen, die globale Erwärmung so weit zu verlangsamen, dass die Erde eine weiche Landung bei einer Temperatur geschafft hätte, die nicht gefährlich hoch ist. Die Regierungen und die Menschen waren aber zu kurzsichtig, ignorant und gierig, um die notwendigen Veränderungen vorzunehmen. Es war hoffnungslos, zumal wenn Länder wie China und Indien ihre Nutzung fossiler Brennstoffe, insbesondere der Kohle, beschleunigten. Inzwischen ist es zu spät. Die CO₂-Werte in der Atmosphäre sind bereits so hoch, dass, wenn ihr Erwärmungspotenzial in wenigen Jahrzehnten erreicht wird, der daraus resultierende Temperaturanstieg katastrophal sein wird.

Um ein solches Schicksal zu vermeiden, müssen wir nicht nur die Emissionen auf null reduzieren, sondern auch das Kohlendioxid aus der Atmosphäre entfernen. Nur so können wir katastrophale Folgen vermeiden. Aber wie ich in Kap. 13 gezeigt habe, ist das extrem schwierig. Die Techniken, die bisher vorgeschlagen und entwickelt wurden, sind teuer und kosten etwa 100 US-Dollar pro Tonne Kohlenstoff, und wir müssen jedes Jahr eine Menge entfernen, die unsere Emissionen übersteigt, nämlich 35 Mrd. t. Ein umfangreiches Forschungsprojekt ist dringend erforderlich, um kostengünstigere Methoden zu entwickeln. Es wurden verbesserte katalytische Methoden vorgeschlagen, die uns auf 40 US-Dollar pro Tonne bringen könnten. Es sollte möglich sein, einen noch günstigeren Preis zu erreichen, und das ist auch ein psychologisch sympathischerer Ansatz, als die Menschen aufzufordern, ihre CO₂-Emissionen sofort einzustellen, in einer Welt, deren Infrastruktur die Nutzung fossiler Brennstoffe erfordert. Gerade in den USA wäre ein großes Projekt zur Entwicklung neuer Technologien, die Kohlendioxid effektiv aus der Luft entfernen, die Art von Herausforderung,

die Amerikas „Wir schaffen das“-Mentalität so sehr schätzt.

Während diese Methoden entwickelt und umgesetzt werden, brauchen wir Geoengineering, um zunächst einmal wenigstens „ein Pflaster auf den Planeten zu kleben“. Ich bin mir voll und ganz bewusst, dass Geoengineering nichts gegen die Ursachen der globalen Erwärmung unternimmt und nichts gegen die sonstigen Auswirkungen von CO₂ wie die Ozeanversauerung. Ich weiß, dass es Nebenwirkungen haben kann, dass diese eine unerwartete geografische Verteilung haben können und dass es eine ständige Anwendung erfordert. Aber ohne diese Methoden werden der Temperaturanstieg und die damit verbundenen weiteren Rückkopplungen zu groß sein, um das Fortbestehen unserer Zivilisation zu ermöglichen.

Wir haben die Lebensgrundlage unseres Planeten durch sinnlose Entwicklung und Missbrauch von Technologie zerstört. Eine achtsame Entwicklung der Technologie, zuerst für Geoengineering, dann für die Kohlenstoffabscheidung, ist heute notwendig, um uns zu retten. Es ist die kritischste und die wichtigste Tätigkeit, die die Menschheit jetzt aufnehmen kann, und wir müssen sofort beginnen.

14.1 Stärkung der Wissenschaft

Kehren wir für einen Moment von der globalen Ebene zur Ebene der Arktis zurück und überlegen wir, wie wir unsere Forschung verbessern und insbesondere die Ökonomie in die Physik einbringen können. Dass die arktische Erwärmung in aller Welt Kosten verursacht, zeigt eindeutig, dass alle Länder, nicht nur die im hohen Norden, über die Veränderungen in diesen Regionen besorgt sein sollten. Bei der Kostenberechnung der Auswirkungen der

Methanemissionen aus der Arktis haben wir eine von vielen Umweltauswirkungen untersucht. Es muss mehr getan werden, um die wirtschaftlichen Folgen anderer arktischer Rückkopplungen festzustellen und auch, welche Regionen am stärksten betroffen sein werden. Die vollen finanziellen Auswirkungen einer sich wandelnden Arktis dürften deutlich größer sein als unsere ursprüngliche Kostenschätzung für die Methanfreisetzung, auch wenn diese bereits sehr hoch war.

Erstens brauchen wir Computermodelle, die vom PAGE-Modell noch nicht explizit berücksichtigte physische Veränderungen der Arktis und deren wirtschaftlichen Auswirkungen über Raum und Zeit besser beschreiben. Die Modelle sollten Rückkopplungen berücksichtigen, wie zum Beispiel die Verknüpfung der arktischen Meereisausdehnung mit dem Anstieg der arktischen Durchschnittstemperatur, dem globalen Meeresspiegelanstieg und der Ozeanversauerung. Sie sollten auch Rückkopplungen enthalten, die in der aktuellen Version von PAGE nicht explizit modelliert sind, wie beispielsweise die Auswirkungen von Rußablagerungen und das Auftauen des Permafrosts der Tundra. Sie sollten mit der Erwärmung und dem Meereisverlust der Arktis verknüpfte wirtschaftliche Auswirkungen untersuchen, wie zum Beispiel vermehrte Schifffahrt oder ein Anstieg des Meeresspiegels. Solche integrierten Modelle der wirtschaftlichen Kosten, die der Wandel der Arktis verursacht, sollten die weltweiten Kosten nach Ländern und Branchen aufschlüsseln. Dies könnte dazu beitragen, das Bewusstsein für die besonders hohen Risiken zu schärfen, denen bestimmte Länder wie kleine Inselstaaten oder Küstenstädte wie New York ausgesetzt sind. Diese Zusammenhänge sind nicht in der aktuellen Analyse enthalten, könnten aber Teil der zukünftigen Arbeit sein.

Zweitens müssen solche integrierten Analysen – und diejenigen, die sie durchführen – an den weltweiten wirtschaftlichen Diskussionen teilnehmen. So hat beispielsweise das Weltwirtschaftsforum (WEF) im Herbst 2012 seinen neuen *Global Agenda Council on the Arctic* ins Leben gerufen. Dabei wurde auf die Notwendigkeit eines informellen Dialogs zwischen den Staats- und Regierungschefs der Welt hingewiesen und anerkannt, dass die Arktis sowohl in Bezug auf den potenziellen wirtschaftlichen Nutzen – durch Schifffahrt und Rohstoffförderung (Emmerson und Lahn 2012) – als auch durch die ökologische Verwundbarkeit strategisch an Bedeutung gewinnt. Doch in einer Fernsehdiskussion über das Davoser Weltwirtschaftsforum 2014 wurden das Wort „Klimawandel“ nur einmal erwähnt, und die anwesenden Experten diskutierten das Thema überhaupt nicht.

Ohne das wirtschaftliche Potenzial der Arktis zu verleugnen, ist eine gründliche wirtschaftliche Analyse unerlässlich, um globale Auswirkungen und Kosten des arktischen Wandels zu erkennen. Das Weltwirtschaftsforum könnte dazu beitragen, Investitionen in diese neue Art von integriertem und systemischem Ansatz der wirtschaftlichen Bewertung anzukurbeln – ein Ansatz, der berücksichtigt, wie sich physische Veränderungen von Ökosystemen wie der Arktis auf die Weltwirtschaft auswirken werden. Das Weltwirtschaftsforum könnte seine Fähigkeit, alle an einen Tisch zu bringen, auch dazu nutzen, die Staats- und Regierungschefs der Welt aufzufordern, das gesamte Spektrum an Kosten und Nutzen der sich wandelnden Arktis zu berücksichtigen, und die wirtschaftliche Aufmerksamkeit von den kurzfristigen wirtschaftlichen Gewinnen aus Schifffahrt und Rohstoffgewinnung hin auf die langfristigen Folgen zu lenken, bei denen es sich offensichtlich um eine wirtschaftliche

und ökologische Zeitbombe handelt. Wir haben bereits in Kap. 9 gesehen, dass an einer einzigen Rückkopplung ein Preisschild mit der enormen Summe von 37 bis 60 Bio. US-Dollar für den Zeitraum eines Jahrhunderts hängt, wobei die meisten Auswirkungen in ärmeren Ländern auftreten werden. Zum Vergleich: Die Weltwirtschaft beläuft sich auf etwa 70 Bio. US-Dollar (Internationaler Währungsfonds 2013), die Kosten des arktischen Wandels bergen also enorme Risiken für die Weltwirtschaft. Wir können ein Umdenken beschleunigen, wenn wir solche Kosten in den Global Risk Report des Weltwirtschaftsforums und den World Economic Outlook des Internationalen Währungsfonds aufnehmen, die bisher beide diese potenziellen wirtschaftlichen Bedrohungen aus der Arktis nicht berücksichtigen.

Für den Klimaschutz in der Arktis müssen wir also tatsächlich einen neuen wissenschaftlichen Ansatz entwickeln, eine integrierte Arktiswissenschaft. Diese integrierte Arktiswissenschaft wäre ein strategischer Gewinn für die Gesellschaft, denn was in der Arktis geschieht, hat entscheidende Auswirkungen auf unsere biophysikalischen, politischen und wirtschaftlichen Systeme. Ohne diese Erkenntnis werden Ökonomen und Politiker weiterhin die Augen vor dem Gesamtbild verschließen.

14.2 Kriegsgefahr

Als ich 2013 begann, dieses Buch zu schreiben, erinnerte sich die Welt an den Tod von John F. Kennedy ein halbes Jahrhundert zuvor. Dies brachte erneute Aufmerksamkeit für die Kubakrise von 1962 und dafür, wie nah die Welt damals dem Atomkrieg kam. Ich erinnere mich, dass ich als 14-jähriger Junge am 27. Oktober 1962 die Nachrichten in der BBC sah und plötzlich, gleichzeitig mit

meiner Mutter und meinem Vater, erkannte, dass wir am nächsten Morgen vielleicht nicht aufwachen würden, dass die sichere kleine Welt unserer Doppelhaushälfte in Essex leicht verschwinden und zusammen mit uns und dem Großteil der britischen Bevölkerung in Asche verwandelt werden könnte. Nur wegen einer kleinen Insel, über deren Betragen Amerika verärgert war. Die Weisheit und Zurückhaltung von Kennedy und Chruschtschow wird heute wie damals gelobt, aber die Welt bewusst an den Rand der Zerstörung zu bringen, nur wegen Kubas Status, spricht nicht gerade für Weisheit – sondern für reinsten Wahnsinn. Heute beglückwünschen wir uns, dass der Kalte Krieg vorbei ist und dass sich diese Art von Konfrontation nicht wiederholen wird, trotz der riesigen Bestände an Weltuntergangswaffen, die sich weiterhin im Besitz der USA und Russlands befinden. Dabei besitzen inzwischen auch viele weitere Staaten Atomwaffen, nicht nur Großmächte mit moderater Politik, sondern auch weniger berechenbare Nationen wie Israel, Nordkorea und Pakistan – Länder, die Atomwaffen besitzen und sehr bereit zu sein scheinen, sie einzusetzen, wenn ihre religiösen oder politischen Obsessionen infrage gestellt werden. Die Bedrohung ist größer denn je. Ein Atomkrieg würde jetzt wahrscheinlich wegen einer bilateralen Angelegenheit beginnen, und der Klimawandel bringt viele neue Spannungen mit sich, die ein solches Problem hervorrufen könnten: von der Erschöpfung der Ressourcen über Wassermangel bis hin zum möglichen Zusammenbruch der Nahrungsmittelproduktion und einer drohenden Hungersnot. Die Menschen haben die Atombombe nun einmal erfunden, und die Welt wird diese nicht vollständig loswerden, solange sich die menschliche Natur nicht ändert. Es müsste dazu ein Vertrauen bestehen, dass die irrationalen Nationen den rationalen folgen und auf Atomwaffen verzichten. Doch die menschliche Natur hat sich nicht verändert, außer viel-

leicht zum Schlechten. Alexander Solschenizyn beschrieb das 20. Jahrhundert als das „Jahrhundert der Höhlenmenschen“. Vom neuen Jahrhundert, das mit unserer illegalen Invasion im Irak und dem sinnlosen Tod von 1 Mio. Menschen begann, kann man kaum behaupten, dass es sich zum Besseren entwickelt hat. Doch wenn wir die Atomwaffen nicht vollständig loswerden können, ohne die menschliche Natur zu verändern, und wenn wir die menschliche Natur nicht ändern können, dann werden Atomwaffen irgendwann einmal eingesetzt. Es könnten durchaus die durch den Klimawandel verursachten Spannungen sein, die den Funken für den Flächenbrand entzünden, der das Ende der Menschheit bedeutet. Das ist ein weiterer wichtiger Grund für die Bekämpfung des Klimawandels, und zwar, indem wir als Spezies zusammenarbeiten und nicht als eine Ansammlung von feindlichen Nationen gegeneinander. Die Zeit drängt, um eine katastrophale Veränderung des Planeten zu vermeiden, aber es ist möglich. Doch wenn ein Atomkrieg beginnt, ist für die Menschheit die Zeit mit einem Schlag vorbei.

14.3 Die Leugner des Klimawandels

Als das Phänomen der Erderwärmung erstmals in den frühen 1980er-Jahren für die Wissenschaftler deutlich wurde, herrschte allgemein der Optimismus, dass, sobald man der Öffentlichkeit und der Politik die Fakten und Mechanismen erläutert habe, eine überwältigende Mehrheit die notwendigen internationalen Maßnahmen zur Eindämmung der CO₂-Emissionen, zur Umstellung auf erneuerbare Energien und zur Rettung unseres Planeten vor den schlimmsten Auswüchsen des Klimawandels unterstützen würde. Tatsächlich gab es dafür Anzeichen. In Großbritannien zeigte die damalige Premierministerin

Margaret Thatcher, die eine Ausbildung zur Chemikerin absolviert hatte, ein sofortiges Verständnis für die damit verbundenen wissenschaftlichen Prinzipien und betonte die Notwendigkeit internationaler Maßnahmen gegen den Klimawandel als Hauptaufgabe des letzten Teils ihrer Amtszeit. Sie gründete 1990 das Hadley Centre for Climate Research and Prediction am britischen Wetteramt und drängte auf internationales Handeln. Ihre Erkenntnis, dass die Polargebiete von besonderer Bedeutung sind, spiegelte sich in einer Botschaft wider, die sie mir 1989 schickte, als ich gerade auf einem Eisbrecher in der Antarktis war. Sie bat mich um einen Bericht über die Veränderungen in den Polargebieten für die Generalversammlung der Vereinten Nationen. In ihrer Rede vom 8. November 1989 zitierte sie mich:

„Lassen Sie mich aus einem Brief von einem britischen Wissenschaftler an Bord eines Schiffes im Antarktischen Ozean zitieren, den ich vor zwei Wochen erhalten habe: „Heute sehen wir in den Polarregionen erste Anzeichen eines vom Menschen verursachten Klimawandels. Daten aus der Halley Bay und von Instrumenten an Bord des Schiffes, auf dem ich mich befinde, zeigen, dass wir in diesem Frühjahr vor einer Absenkung der Ozonkonzentration stehen, die so tief, wenn nicht sogar tiefer ist als das Minimum im bisher schlechtesten Jahr. Damit wird die 1988 beobachtete Erholung vollständig rückgängig gemacht. Die niedrigste Aufzeichnung an Bord dieses Schiffes ist nur 150 Dobson für die Ozon-Gesamtkonzentration im September, verglichen mit 300 für den gleichen Monat in einem normalen Jahr. Das ist natürlich eine sehr starke Abnahme.“

Er berichtet auch über eine signifikante Ausdünnung des Meereises, und er schreibt, dass in der Antarktis: „unsere Daten bestätigen, dass das einjährige Eis, das den größten Teil der Meereisbedeckung ausmacht, bemerkens-

wert dünn ist und daher wahrscheinlich nicht in der Lage ist, eine signifikante Erwärmung der Atmosphäre auszuhalten, ohne zu schmelzen. Auf einer Fläche von mehr als 30 Mio. km² schirmt das Meereis den Ozean von der Atmosphäre ab. Es reflektiert den größten Teil der auf sie einfallenden Sonneneinstrahlung und trägt so zur Kühlung der Erdoberfläche bei. Würde man diesen Bereich verkleinern, würde die Erwärmung der Erde durch die zusätzliche Absorption von Strahlung durch den Ozean beschleunigt.‘

„Die Lehre aus diesen Prozessen in den Polarregionen‘, fährt er fort, „ist, dass eine vom Menschen verursachte Umwelt- oder Klimaveränderung eine selbstverstärkende oder ‚unkontrollierbare‘ Qualität annehmen kann ... und unumkehrbar sein kann ...‘. Das ist die Aussage der Wissenschaftler, die auf dem Schiff arbeiten, das derzeit diesen Fragen nachgeht.

Das sind ernüchternde Anzeichen dafür, was passieren könnte, und sie haben meinen Korrespondenten dazu veranlasst, unter anderem die interessante Idee einer neuen Organisation voranzutreiben, die das Klimasystem der Welt beobachten und uns ermöglichen soll, zu verstehen, wie es funktioniert.“ (Thatcher 1989)

Die Vereinten Nationen haben auf dem Weltgipfel von Rio im Juni 1992 die Klimarahmenkonvention (Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) vertraglich festgelegt. Bereits 1988 hatten die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) und das Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) den Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) eingerichtet, der 1990 seinen ersten Bericht vorlegte (Houghton et al. 1990). In ihrer inspirierenden Rede empfahl Frau Thatcher, dass der Weltklimarat zu einer langlebigen Organisation wird, die weitere Bewertungen vornimmt. Aber dann wurde die politische Führung schwach. Im Vereinigten

Königreich wurde Frau Thatcher 1990 aus anderen Gründen aus dem Amt entlassen, gerade als sie anfing, das Problem international in den Fokus zu rücken. Ihre Nachfolger, die Herren Major, Blair, Brown und Cameron, hatten keine wissenschaftliche Ausbildung, waren oft politisch schwach und sie äußersten Plattitüden darüber, wie sie die internationalen Bemühungen um den Klimawandel leiten, während sie gleichzeitig kaum etwas taten. In den USA war es noch schlimmer, denn die beiden Präsidenten Bush lehnten jede Maßnahme ab, die die Hegemonie der Ölindustrie gefährden könnte, von der sie profitierten. Selbst die Präsidenten Clinton und Obama haben, obwohl sie inspirierende Reden gehalten haben, letztlich nur sehr wenig getan. Die USA konnten sich nicht dazu durchringen, das Kyoto-Protokoll von 1997 zu unterzeichnen, das ein erster Schritt für die Emissionsreduzierung hätte sein können, obwohl die internationale Gemeinschaft Abstriche machte, um es den USA schmackhaft zu machen. Im Kleingedruckten zum Beispiel hat das Protokoll die Militärfliegerei von der Emissionskontrolle ausgenommen, was den USA entgegenkommen sollte, die mehr Militärflüge durchführen als der Rest der Welt zusammen. Alle haben die Fiktion akzeptiert, dass ein von einem Militärflugzeug emittiertes Kohlendioxidmolekül weniger Auswirkungen auf den Planeten hat als ein von einem Zivilflugzeug emittiertes.

Schlimmer als die anhaltende internationale Trägheit und der Mangel an politischer Führung, die das Scheitern der UNFCCC-Gipfel in Kopenhagen und Durban vor Augen führt, ist die Tatsache, dass eine heimtückische Opposition gegen Maßnahmen zum Klimaschutz jetzt von gut finanzierten Gruppen bösartiger Menschen und Organisationen angeheizt wird. Diese Organisationen konzentrieren sich darauf, Geschichten in die Medien zu

bringen und schüchterne oder unkundige Politiker davon zu überzeugen, dass wir es uns nicht leisten können, etwas gegen die Erderwärmung zu unternehmen, selbst wenn sie tatsächlich existiert. Ihre Ziele und Methoden sind genau die gleichen wie die der Lobbyisten der Tabakindustrie – Zweifel an der Schädlichkeit der Auswirkungen zu wecken, bis zu dem Punkt, an dem die einfachen Menschen verwirrt sind und dazu bereit werden, jegliche Untätigkeit zu tolerieren. Sie müssen die Menschen nicht davon überzeugen, dass der Klimawandel angeblich nicht stattfindet – es reicht, Zweifel zu wecken. Da Maßnahmen zur Rettung der Welt mit Aufwand, Kosten und Unannehmlichkeiten verbunden sind, ist es immer verlockend, sich an eine Aussage zu halten, dass wir eigentlich gar nichts tun müssen. Ein sehr gutes Buch über diese Bewegung heißt passend *Merchants of Doubt*, also „Händler des Zweifels“ (Oreskes und Conway 2010).

Die Leugner des Klimawandels (sogenannte Klimaskeptiker), deren Bewegung von Elementen der Ölindustrie und geheimnisvollen Industriellen derzeit in einer Höhe von geschätzt 1 Mrd. US-Dollar pro Jahr finanziert wird, haben auf zwei Arten und Weisen gehandelt. Die eine waren bösartige persönliche Angriffe auf die Karrieren von Klimawissenschaftlern. Sie nehmen echte Klimawandelexperten ins Visier, weil diese kein Blatt vor den Mund nehmen. Ihren ersten großen Erfolg feierten die Leugner 2002. Nach einer skandalösen Bemerkung eines gewissen Randy Randol von ExxonMobil im Weißen Haus forderte Präsident Bush die US-Delegation im Weltklimarat auf, Professor Robert Watson als Vorsitzenden des Weltklimarats zu entlassen und ihn durch einen biegsameren Mann zu ersetzen. Die USA konnten dies tun, weil sie die größte Finanzierungsquelle des Weltklimarats sind. Watson, ein energischer und kluger Klimawissenschaftler, galt als gefährlich leidenschaftlich, vor allem als

er Ende der 1990er-Jahre verkündete, dass die jüngste Überarbeitung der Klimamodelle, die den Kohlenstoffkreislauf besser abbildeten, darauf hindeutet, dass sich das globale Klima um ein Drittel schneller erwärmt als bisher angenommen. Er wurde durch Rajendra K. Pachauri ersetzt, einen freundlichen Inder, der sich jedoch allmählich durch das schiere Ausmaß der Bedrohung für die Welt radikalierte. Das führte dazu, dass die Organisation 2007 den Friedensnobelpreis erhielt (gemeinsam mit Al Gore). Ich bekam als Autor des Weltklimarats aus dem Jahr 1990 ein beeindruckendes Zertifikat für meinen „Beitrag zum Friedensnobelpreis“, unterzeichnet von Pachauri und dem Sekretär des Weltklimarats, R. Christus, dessen Signatur dem Ganzen ein fast heiliges Gefühl verleiht. Ich habe auch ein Plastikabzeichen erhalten, aber es war so kitschig, dass weder ich noch ein Wissenschaftler, den ich kenne, es jemals getragen hat.

Als Nächstes traf es James Hansen, bis vor kurzem Direktor des NASA Goddard Institute for Space Studies, ein Atmosphärenforscher, der sich immer wieder öffentlich über die Gefahr des Klimawandels geäußert hat. Die Taktik war diesmal, auszunutzen, dass er ein Regierungswissenschaftler war. Was auch immer er tat oder sagte, es konnte als unangemessene Verwendung der Arbeitszeit angeprangert werden, die er an die Werkbank gefesselt allein für die Regierung verbringen sollte. Er behielt seinen Job zwar, wurde aber massiven Belästigungen ausgesetzt, auch durch seine eigenen Arbeitgeber, was in einem informativen und erschreckenden Buch über die Zensur in der Wissenschaft beschrieben wurde (Bowen 2008).

In Großbritannien war das wichtigste Instrument der Leugner eine finstere Organisation, die 2009 von Lord Lawson, einem ehemaligen Finanzminister, gegründet wurde. Sie nennt sich die Global Warming Policy Foundation und weigert sich, ihre Finanzierungsquellen

anzugeben. Direktor ist Benny Peiser, dessen bisherige Qualifikation als Klimaexperte darin bestand, dass er als Dozent für Sportwissenschaften an der Liverpool John Moores University tätig war. Trotz ihrer Geheimniskrämerei und der mangelnden wissenschaftlichen Glaubwürdigkeit der Mitarbeiter hat die Organisation außerordentliche Erfolge erzielt. Sie brachte die derzeitige britische Regierung von ihrer Absicht ab, die „grünste Regierung aller Zeiten“ sein zu wollen, bis zu dem Punkt, an dem Maßnahmen gegen den Klimawandel als „grüner Mist“ bezeichnet wurden. Dann kam im Jahr 2009 das „Climategate“. Tausende von privaten E-Mails der Climate Research Unit an der University of East Anglia, einem der angesehensten Klimaforschungszentren der Welt, wurden von einer professionellen Hackerorganisation – mit einem Büro in Russland, aber von wem auch immer finanziert – gehackt und dann schnell ausgewertet. Ein paar peinliche E-Mails wurden von der skrupellosen Presse ausposaunt, als wäre eine große Verschwörung aufgedeckt worden. Die eigentliche Verschwörung, der Hackerangriff, wurde nicht untersucht und auch nicht bestraft.

Meine eigene Erfahrung mit persönlichen Angriffen begann 2012. Im September 2012 erreichte das sommerliche Meereis sein bisheriges Minimum, und die BBC drehte einen Film über den Rückgang, in dem auch ich befragt wurde und auch Satellitenkarten des Rückzugs gezeigt wurden. Die Sendung wurde am 5. September 2012 im Fernsehen übertragen, gefolgt von einer Studio-diskussion, bei der die BBC beschloss, dass beide „Seiten“ vertreten sein sollten. Die gesamte Gruppe der Klimawissenschaftler wurde durch Natalie Bennett, die neu ernannte Vorsitzende der Grünen, vertreten, deren Herz am rechten Fleck saß, die aber keine Ahnung von der Arktis hatte. Die winzige Gruppe der Klimaleugner wurde

durch den Abgeordneten Peter Lilley vertreten, ehemals Minister der Tory-Regierung, der gerade einen von der Lawson-Stiftung finanzierten Bericht veröffentlicht hatte, in dem er empfahl, keine Maßnahmen gegen den Klimawandel zu ergreifen und den Stern-Bericht zu ignorieren. Er behauptete, dass er unter falschen Vorwänden zur BBC gebracht worden sei, dass der BBC-Bericht erfunden sei (obwohl Satellitenbilder des Eisrückzugs gezeigt wurden) und dass ich ein „bekannter Panikmacher“ sei, eine Verleumdung, die er fünfmal wiederholte. Er behauptete, er wisse mehr über den Klimawandel als ich, weil er aus dem Bericht des Weltklimarats von 2007 zitieren konnte, laut dem das sommerliche Meereis erst Ende des 21. Jahrhunderts verschwinden würde. Obwohl er Vizepräsident einer Ölgesellschaft namens Tethys Petroleum ist, die hauptsächlich mit Regimen in Zentralasien zusammenarbeitet, wurde Lilley später in den Umwelt- und Klimaausschuss des Unterhauses berufen. Von dieser vorteilhaften Position aus wirkte er auf die Klimaschutzgesetzgebung ein. So bekam die geheimnisvolle Stiftung von Lord Lawsons einen Vertreter in einem mächtigen Regierungskomitee. Lilley ist nicht der Einzige – es gibt viele andere in ähnlichen Positionen, vor allem in den Reihen der Republikanischen Partei in den USA. Aber er ist ein gutes Beispiel dafür, welche Kraft Verschleierung und Falschdarstellung entfalten, die angesichts einer großen Bedrohung für das menschliche Überleben zur Untätigkeit der Gesellschaft führen.

In den seltenen Fällen, in denen die Global Warming Policy Foundation von Lawson direkt in Diskussionen eingreift, nimmt sie nun eine Position ein, die leicht von ihrer früheren abweicht, als sie den Klimawandel einfach pauschal leugnete. Sie stimmt nun zu, dass sich das Klima ändern könnte, gesteht aber nicht ein, dass dies auf die Aktivitäten des Menschen zurückzuführen ist.

Sie sagt, dass der Umgang damit Anpassung und nicht Klimaschutz ist. Letzteres bedeutet, etwas gegen die Ursachen des Klimawandels zu unternehmen, sei es durch die Reduzierung von Emissionen, durch die Suche nach Wegen, Treibhausgase aus der Atmosphäre zu beseitigen, oder durch die Steuerung der Sonneneinstrahlung durch Geoengineering. „Anpassung“ bedeutet im Grunde genommen: „Lassen wir es auf uns zukommen und versuchen wir einfach, damit zu leben.“ Das Problem ist, dass die Erwärmung, die eintreten wird, wenn wir die Dinge einfach laufen lassen, und die selbst konservative Modelle des Klimarats auf 4 °C bis zum Ende des Jahrhunderts schätzen, für den Fortbestand des Lebens auf der Erde katastrophal sein wird. Und die Erwärmung wird nach 2100 weitergehen und ohne Maßnahmen gegen CO₂-Emissionen noch größere Höhen erreichen.

Wissenschaftler, die öffentlich über die klimatische Bedrohung der Welt berichten, fordern die nationale Sicherheit des Staates heraus und provozieren eine Reaktion. Im Vereinigten Königreich sagte Ian Boyd, der leitende wissenschaftliche Berater des Ministeriums für Umwelt, Ernährung und Landwirtschaft, dass Wissenschaftler es vermeiden sollten, „nahezulegen, was die Politik richtig oder falsch macht“, sondern ihre Ansichten äußern sollten, indem sie mit in die Politik „eingebetteten Beratern (wie mir) zusammenarbeiten und in der Öffentlichkeit die Stimme der Vernunft und nicht des Dissens sind“. Diese Aussage der erschütternden Arroganz geht davon aus, dass Boyds Weisheit allen anderen überlegen ist und dass er immer „vor den Mächtigen die Wahrheit aussprechen wird“. Aber die dahinterstehende Haltung wird durch Richtlinien für alle Wissenschaftler durchgesetzt, die bei der britischen Regierung unter Vertrag stehen. Die Regierungen von Ländern wie Kanada

und Australien gingen in der letzten Zeit in ihrer Unterdrückung der Wissenschaft sogar noch weiter, indem sie eine große Zahl von Umweltwissenschaftlern feuerten, sodass Forschung über das Ausmaß der klimabedingten Veränderungen einfach nicht mehr durchgeführt wurde. Die wichtigsten Entscheidungen, um die Welt vor dem Klimawandel zu retten, müssen natürlich von den Regierungen getroffen werden. Aber tragischerweise scheinen einige Regierungen nicht die Absicht zu haben, sie zu treffen. Sie sind mehr daran interessiert, die wissenschaftliche Forschung zu unterdrücken, wenn deren Ergebnisse ihnen nicht passen.

Die Betonung der Anpassung durch die Leugner des Klimawandels wurde von Professor Robert P. Abele mit Nachdruck beantwortet:

„Während wir dem Planeten Gewalt antun, bis hin zu seinem Tod, üben wir Gewalt gegen uns selbst aus, bis zu unserem Tod. Ein toter Planet wird zu toten Menschen führen. Eine Bevölkerung und/oder ihre Politiker, die psychologisch und/oder ethisch desensibilisiert für die Folgen dieser Gewalt gegen die Erde sind, haben keine Chance, langfristig zu überleben.“

Oder, wie Häuptling Seattle es vor mehr als einem Jahrhundert noch eloquerter formulierte:

„Alle Dinge sind miteinander verknüpft. Was der Erde geschieht, trifft auch die Kinder der Erde.“

Wenn wir unseren Planeten zerstören, zerstören wir uns selbst. Es gibt keinen anderen Ort, an den wir gehen können. Es gibt keinen Planeten B. Es wird nicht nur ein Abschied vom Eis sein, sondern auch ein Abschied vom Leben.

14.4 Zeit zu kämpfen

Ich gehe davon aus, dass die meisten Leser dieses Buches besorgte und intelligente Bürger sein werden, nicht unbedingt Wissenschaftler. Was können wir einzeln und gemeinsam tun, um zu versuchen, die Welt zu retten? Es gibt natürlich eine umfangreiche Liste, aber ich werde einige Handlungen herausgreifen, die wirklich etwas bewirken könnten.

Erstens, kontern Sie mit aller Ihnen zur Verfügung stehenden Kraft den stinkenden Strom von Lügen und Betrug, den die Leugner des Klimawandels und alle anderen abgeben, die hoffen, dass die Erwärmung einfach stoppt, wenn wir nichts tun. Sie wird nicht einfach stoppen. Seien sie besonders bei den kurvenreichen Falschdarstellungen von Politikern – von den Präsidenten abwärts – vorsichtig, und achten Sie auf eindeutige Widersprüche zwischen dem, was sie sagen, und dem, was sie tun. Wenn diese in Paris ein feierliches internationales Abkommen unterzeichnen, um die CO₂-Emissionen radikal einzudämmen, dann aber den Einspeiseturif für Solar-energie zurückziehen, Forschung und Entwicklung im Bereich der erneuerbaren Energien nicht unterstützen und lieber versuchen, die Nutzung fossiler Brennstoffe durch Fracking voranzutreiben, dann wissen Sie, dass es sich um Heuchler handelt. Sie können Ihre gewählten Vertreter darauf hinweisen, dass sie Ihre Stimme verlieren werden, wenn sie ihr Verhalten nicht ändern. Wissenschaftler, die sich mit dem Klimawandel befassen, sollten zu den Ersten gehören, die sich zu Wort melden, und sie sollten bereit sein, das Ende ihrer Karriere und das Fehlen von Auszeichnungen zu riskieren. Zumindest werden sie heute nicht mehr auf dem Scheiterhaufen verbrannt, und wenn die Realität des Klimawandels zu greifen beginnt, werden Wissenschaftler, die den Mut hatten, sich zu äußern,

vermutlich respektiert und nicht mehr misshandelt und bedroht werden.

Zweitens, ergreifen Sie in Ihrem eigenen Leben alle möglichen Maßnahmen, um unnötigen Energieverbrauch zu reduzieren, insbesondere was fossile Brennstoffe angeht. Warum haben nicht viel mehr Häuser eine gute Isolierung? Dies ist für die Energieeffizienz das Beste, das Sie mit Ihrem Haus machen können. Von Zeit zu Zeit bietet eine widerwillige Regierung sogar Zuschüsse an, um Sie zu unterstützen. Fahren Sie ein sparsames Auto oder fahren Sie mit dem Fahrrad – viele Pendelfahrten und andere Fahrten in einer Stadt können sehr effektiv mit dem Elektrofahrrad durchgeführt werden. Installieren Sie Solarmodule auf Ihrem Dach, auch wenn Sie keine Einspeisevergütung erhalten.

Drittens, auf nationaler Ebene, bestehen Sie darauf, dass die Regierung die Grundlage für die Stromerzeugung ändert. Großbritannien steht in dieser Hinsicht besonders schlecht da. Im Jahr 2015 kamen 82 % unserer Energie noch aus fossilen Brennstoffen. Wir sind weltweit führend in der Erfindung und Entwicklung von Wellen- und Meereströmungskraftwerken und sind von einem Meer umgeben, in dem wir diese neuen Ideen nutzen können, sei es unsere wellengepeitschte Westküste, die schnell fließenden Strömungen zwischen den Orkney-Inseln oder die Gezeitenwelle am Severn. Doch die Regierung unterstützt die Pioniere dieser neuen Energiesysteme nur mit kläglichen Mitteln, wie ich im Magazin *Underwater Technology* hervorgehoben habe (Wadhams 2015). Erst in jüngster Zeit mussten innovative und unterstützenswerte Wellenkraftwerke wegen mangelnder Finanzierung geschlossen werden (Merry 2016). Großbritannien verfügt über riesige Windressourcen, hat aber nie versucht, selbst Windturbinen zu bauen, was Dänemark überlassen wurde. Solarstrom aus Fotovoltaik wird immer billiger und eignet

sich nicht nur für den Heimgebrauch, sondern auch für größere Solarparks, sogar im grauen Großbritannien. Beim Problem der Energiespeicherung, das ein echtes Problem ist (die Sonne scheint nicht in der Nacht), sind wir kurz vor dem Durchbruch, sowohl mithilfe von größeren „normalen“ Batterien als auch mit Systemen wie Flüssigbatterien (Redox-Flow-Batterien), die Energie in flüssigen Chemikalien speichern, die in externen Tanks enthalten sind, und die so ähnlich wie Brennstoffzellen funktionieren. Diese könnten enorme Energiemengen speichern, die nur durch die Tankgröße begrenzt wird. Ein Harvard-Labor unter der Leitung von Professor Michael Aziz entwickelte 2014 ein erfolgreiches System, das Chinone (eine Gruppe organischer Verbindungen) als Flüssigkeiten verwendet (Huskinson et al. 2014; Lin et al. 2015). Um solche Systeme schnell bis zur Einsatzbereitschaft weiterzuentwickeln, bedarf es nur der uneingeschränkten Unterstützung durch die Regierungen. Jeder Einwand (wie im Vereinigten Königreich), dass es aus Gründen der Sparsamkeit kein Geld gibt, ist ein Schwindel, denn erneuerbare Energien sind – zwangsläufig – die Energiequelle der Zukunft. Also müssen wir uns auch darauf einstellen, und wir sollten den Wandel mit anstoßen, damit unsere eigene Industrie die neue Technologie bauen kann.

Immer noch auf nationaler Ebene, haben Sie keine Angst vor der Kernenergie. Sie ist wirklich eine leistungsstarke Quelle für die benötigte Grundlast, die unsere Lichter ohne Kohlenstoffemissionen anhält. Behalten Sie ihre Angst vor dem britischen Ansatz, der uns dazu veranlasst, veraltete und gefährliche wassergekühlte Reaktoren von den Franzosen (oder sind es die Chinesen?) zu kaufen, deren Bau ein Jahrzehnt dauern wird. Alle schrecklichen Atomunfälle, die sich in den vergangenen 40 Jahren ereignet haben – Three Mile Island, Tschernobyl und Fukushima – sind auf die komplizierten Kühlsysteme in

wassergekühlten Reaktoren zurückzuführen. Dabei gibt es zwei viel bessere Wege. Ein deutsches Konsortium hat in den 1960er-Jahren den Kugelhaufenreaktor erfunden. Im Wesentlichen handelt es sich um einen Turm, an dessen Spitze Brennelemente eingefüllt werden, die in inneren Kugeln eingeschlossen sind. Die Reaktion findet im Turm statt, mit Gaskühlung, und die verbrauchten Kugeln werden unten abgelassen. Das System ist sehr einfach, was einen Unfall unwahrscheinlich macht, und solche Reaktoren können in jeglicher Größe gebaut werden, von riesigen Kraftwerken bis hin zu kleinen lokalen Energiesystemen. Südafrika hat dieses System weiterentwickelt, damit aber wieder aufgehört, aber China macht weitere Fortschritte. Die andere Möglichkeit ist der Thoriumreaktor, der Thorium-232 als spaltbares Material verwendet. In der Anfangszeit der Kernenergie war dies ein starker Konkurrent von Uran. Uranreaktoren machten nur deshalb das Rennen, weil die ursprünglichen Konstruktionen auf militärischen U-Boot-Reaktoren basierten, die Uran verwenden mussten, um eine größere und schneller steuerbare Flexibilität bei der Leistungseinstellung zu erreichen (Martin 2012). Thorium ist billiger als Uran und hat den Vorteil, dass seine Spaltprodukte nicht militärisch genutzt werden können, sodass es kein Problem damit gibt, wenn solche Reaktoren von Regimen verwendet werden, deren Politik uns Sorgen macht.

Auf internationaler Ebene besteht, wie ich bereits sagte, die überaus wichtige Notwendigkeit darin, ein gewaltiges wissenschaftliches und technisches Forschungsprogramm zum Thema Geoengineering und zur CO₂-Abscheidung durchzuführen. Geoengineering ist notwendig, um die Erwärmung aufzuhalten, weil es unwahrscheinlich ist, dass wir unsere CO₂-Emissionen schnell genug reduzieren, aber es gibt noch große wissenschaftliche, technische und politische Fragen, die gelöst werden müssen, bevor wir sie

sicher einsetzen können. Natürlich könnten wir einfach einige Wolkenaufhellungssysteme und/oder ein Netzwerk von Aerosolverteilern bauen und ausprobieren. Stephen Salter zum Beispiel hat einen empfindlichen Test entwickelt, um zu sehen, ob ein Dampfinjektionssystem tatsächlich eine nachweisbare Wirkung hat oder nicht. Aber wenn wir auf der sicheren Seite sein wollen, müssen wir in einem Forschungsprogramm die Auswirkungen von Geo-engineering-Methoden modellieren, bevor wir beginnen, sie in großem Maßstab einzusetzen.

Am wichtigsten unter den genannten Punkten ist die Notwendigkeit, einen Weg zu finden, um Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu entfernen. Das ist der einzige Weg, um die Welt wirklich zu retten. Wir sollten uns besser darum kümmern, solange wir noch die technische Kapazität und die Zivilisation haben, um diese Aufgabe anzugehen. Ich habe alle Nachteile der verschiedenen indirekten Techniken aufgezeigt, die vorgeschlagen wurden, von zerkleinerten Gesteinen über Biokohle bis hin zu Aufforstung und BECCS. Die einzige Möglichkeit, die uns wirklich retten kann, ist die direkte Entfernung von CO_2 aus der Atmosphäre durch ein Gerät, das an einem Ende gewöhnliche Luft ansaugt und diese am anderen Ende ohne den CO_2 -Gehalt wieder abgibt, und das zu einem bezahlbaren Preis. Es ist eine Problemstellung für Chemie, Physik und Technik und sie ist äußerst schwer zu lösen. Aber sie ist nicht schwerer als die Aufgabe, aus einer Reaktion, die bisher nur bei einzelnen Atomen in einem Labor beobachtet wurde, eine riesige Bombe zu bauen. Es ist die wichtigste Aufgabe, vor der die Welt steht. Wenn wir sie lösen, kann unsere menschliche Zivilisation fortbestehen, und wir können unsere Energien für all unsere anderen unzähligen Herausforderungen einsetzen, die von Überbevölkerung über Wasser- und

Nahrungsmittelknappheit bis hin zu Krankheiten und Krieg reichen. Wenn wir sie nicht lösen, sind wir erledigt. Auf dem Weg, das Problem zu lösen, müssen wir uns eines Tages vom Eis verabschieden. Aber wenn wir unsere Atmosphäre und unser Klima stabilisieren, kann das Eis in der Zukunft zurückkehren, und unsere Nachkommen werden es betrachten und bestaunen.

Literatur

- Bowen M (2008) Censoring science: inside the political attack on Dr. James Hansen and the truth of global warming. Dutton Books, New York
- Emmerson C, Lahn G (2012) Arctic opening: opportunity and risk in the high north. Chatham House/Lloyd's Risk Report, London. www.chathamhouse.org/publications/papers/view/182839
- Houghton JT, Jenkins GJ, Ephraums JJ (Hrsg) (1990) Climate change. The IPCC scientific assessment. Cambridge University Press, Cambridge
- Huskinson B, Marshak MP, Suh C, Süleyman E, Gerhardt MR, Galvin CJ, Chn X, Asparu-Guzik A, Gordon RG, Aziz MJ (2014) A metal-free organic–inorganic aqueous flow battery. *Nature* 505:195–198
- Internationaler Währungsfonds (2013) World economic outlook, April 2013. International monetary fond, New York
- Lin K et al (2015) Alkaline quinone flow battery. *Science* 349:1529
- Martin R (2012) Superfuel. Thorium, the green energy source for the future. Palgrave Macmillan, London
- Merry S (2016) Outlook for the wave and tidal stream industry in the UK. *Underwater Technol* 33:139–140
- Oreskes N, Conway EM (2010) Merchants of doubt: how a handful of scientists obscured the truth on issues from tobacco smoke to global warming. Bloomsbury Press, London

- Thatcher M (1989) Speech to United Nations General Assembly (Global Environment). Margaret Thatcher Foundation. <https://www.margarethatcher.org/document/107817>
- Wadhams P (2015) New roles for underwater technology in the fight against catastrophic climate change. *Underwater Technol* 33:1–2
- Wasdell D (2015) Facing the harsh realities of now. www.apollo-gaia.org



15

Nachtrag zur deutschen Ausgabe

Seitdem die englische Ausgabe dieses Buches 2016 erschien, hat sich die Geschwindigkeit des Klimawandels in allen beschriebenen Bereichen beschleunigt. Das Pariser Abkommen von 2015 versprach eine Reduktion der Treibhausgasemissionen, aber in Wirklichkeit nimmt die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre weiterhin exponentiell zu (412 ppm als saisonaler Durchschnitt im Sommer 2019 im Vergleich zu 407 ppm im Sommer 2017). Zusätzlich untergruben das Abkommen die fatale Entscheidung des US-amerikanischen Präsidenten Trump daraus auszutreten und der neue brasilianische Präsident Bolsonaro, der sich anscheinend vorgenommen hat, den Amazonas-Regenwald zu zerstören.

Im Gegensatz zum deprimierenden Bild, das die USA und Brasilien abgeben, indem sie ihrer Verantwortung gegenüber der Menschheit nicht gerecht werden, gibt es neue Hoffnung, dass die Jugend den Stab in die Hand nimmt, den die alten diskreditierten Politiker fallen

gelassen haben. Das beeindruckendste Phänomen ist der große Einfluss der derzeit 16-jährigen schwedischen Schülerin Greta Thunberg, die im Dezember 2018 auf der UN-Klimakonferenz (COP 24) in Katowice (Polen) ihre erste öffentliche Rede hielt und seither eine ganze Generation junger Menschen motiviert. Ihnen wird bewusst, dass die Auswirkungen der derzeitigen katastrophalen Entwicklungen sie später direkt betreffen werden. In einer leidenschaftlichen Rede am 23. September 2019 sagte sie auf dem UN-Klimagipfel in New York, dass die Wissenschaft schon seit 30 Jahren vor einem Klimawandel warnt und sie bekräftigte: „Alle zukünftigen Generationen haben euch im Blick.“ Kampagnen, die wie *Extinction Rebellion* zivilen Ungehorsam propagieren, zapfen die gleiche Energie an, rufen wegen ihrer Missachtung der Gesetze aber zugleich Kontroversen hervor.

15.1 Internationale Organisationen

Der Weltklimarat (IPCC) veröffentlichte in den vergangenen zwei Jahren zwei Sonderberichte als Update zum 5. Bewertungsbericht von 2014, die ein großes Echo hervorriefen. Der erste behandelte das Thema „1,5 °C globale Erwärmung“. Nach dem Pariser Abkommen von 2015 sollen Emissionen so weit reduziert werden, dass die globale Erwärmung auf unter 2 °C im Vergleich zur vorindustriellen Zeit beschränkt wird, einige besonders stark betroffene Staaten wie kleine Inselstaaten setzten sich jedoch für 1,5 °C ein. Dies wäre eine wesentlich größere Herausforderung und der Sonderbericht sollte die Grundzüge herausarbeiten. Um die Erwärmung unter 1,5 °C zu halten, so stellte der Bericht klar, können wir nur noch zusätzliche 400–800 Gt (Gigatonnen) CO₂ emittieren (bei einer derzeitigen Emissionsrate von

42 Gt pro Jahr), wir müssen die Emissionen bis 2030 um 45 % senken und auf Nettonull bis 2050. Wenn wir das nicht schaffen, überschreiten wir 2052 die Deadline für 1,5 °C und erreichen 2100 eine Erwärmung um 3 °C, mit weiterer Erwärmung in der Zukunft. Es seien laut Bericht „erhebliche Emissionsminderungen“ und „schnelle, weitreichende und beispiellose Veränderungen in allen gesellschaftlichen Aspekten“ notwendig, ohne dass ausgeführt wird, wie wir diese erreichen sollen. Der Bericht gibt zu, dass vermutlich eine Abtrennung von Kohlendioxid aus der Luft notwendig wird, wendet sich jedoch gegen jede Art von Geoengineering, weil die Auswirkungen unklar sind.

Ungewollt muss der Bericht letztlich eingestehen, dass eine Beschränkung der Erwärmung auf 1,5 °C allein durch Emissionsreduktionen nicht mehr möglich ist. Die Vorstellung, dass eine entwickelte globale Wirtschaft, die noch immer stark von fossilen Brennstoffen für Transport, Elektrizität, Landwirtschaft und Industrie abhängt – mit ihrer bestehenden fossilen Infrastruktur und einer Ölindustrie mit erheblichem politischen Einfluss –, all dies verwirft und weltweit in nur 30 Jahren durch eine Welt der erneuerbaren Energie ersetzt (und die Hälfte der Änderung innerhalb von nur 11 Jahren durchführt), ist absurd. Zumal wir noch nicht einmal damit angefangen haben und die globalen Machtzentren kein Dringlichkeitsbewusstsein zeigen. Daher sollten wir aus dem Bericht folgern, dass nicht nur Geoengineering im großen Stil notwendig ist, wir müssen auch massive Anstrengungen unternehmen, um die Technologie für *direct air capture* als wichtigste Methode zur Klimarettung zu entwickeln und anzuwenden. Wie bei einem Krieg muss die Gesellschaft alle Anstrengungen auf diese Aufgabe konzentrieren. Das meinte John Kerry (der sich dafür einsetzt), als er dies im Oktober 2019 als „World War Zero“ bezeichnete.

Der zweite Sonderbericht (SROCC), der im September 2019 erschien, behandelt das Thema „Ozean und Kryosphäre im Klimawandel“. Die Autoren brüsten sich damit, dass 104 Autoren an dem 1300 Seiten starken Bericht gearbeitet haben und dass er 6981 Literaturverweise enthält. Gerade vor diesem Hintergrund ist es sehr merkwürdig, dass er ein paar wichtige Lücken aufweist. Beispielsweise ist es seltsam, dass in einem Bericht über die Kryosphäre die Methanemissionen am Meeresgrund der Arktis nicht erwähnt werden. Nicht nur ich halte dieses Phänomen, das ich in Kap. 9 beschrieben habe, für die größte Bedrohung der Menschheit. Es könnte leicht eine sprunghafte Erwärmung um 0,6 °C hervorrufen und die einzige wirksame Maßnahme dagegen wäre es, das Meer-eis der Arktis zurückzuholen. Kürzlich – ich komme darauf zurück – zeigten neue Feldergebnisse einer Schiffs-expedition, dass aus der Ostsibirischen See und der Lap-tewsee Methan in beispieloser Menge freigesetzt wird. Trotzdem wird das Thema von den 104 Autoren nicht behandelt und in den 6981 Literaturverweisen kommen die Ergebnisse von Igor Semiletov und Natalia Shak-hova nicht vor. Ich habe bereits über die Zensur und die persönlichen Anfeindungen geschrieben, die diese Feld-forscher erdulden mussten, und beides scheint sich fort-zusetzen. Das ist ein Skandal, weil die Angst und die Klüngelwirtschaft, die damit aufgezeigt werden, unsere Fähigkeit behindert, eine massive Bedrohung abzuwenden.

Im kleineren Rahmen, aber ebenfalls relevant für die Arktis, griff der US-Staatssekretär Mike Pompeo die vor-sichtige Arbeit des Arktischen Rats (s. Kap. 7) an, als er an dessen Sitzung in Rovaniemi (Finnland) teilnahm. Abgesehen davon, dass er verhinderte, dass „Klima-wandel“ in irgendeinem Statement vorkam – mit der

Folge, dass der Rat überhaupt kein Statement herausgab – machte er einige provokative Aussagen zu Sicherheit und Entwicklung. Der Arktische Rat wurde 1996 durch die Ottawa-Deklaration mit drei Zielen gegründet, die durch friedliche Verhandlungen erreicht werden sollten: Umweltschutz, nachhaltige Entwicklung und die Vermeidung von Strategiefragen. Pompeo sagte, dass gemeinsame Ziele bedeutungslos seien, sobald eine Nation sich nicht daran hält – ohne zu erwähnen, dass es sich bei dieser Nation um die USA handelt. Er wies das Ansinnen Chinas als unsinnig zurück, als „arktisnahe Nation“ angesehen zu werden (China hat im Arktischen Rat Beobachterstatus). Chinesische Investitionen seien willkommen, wurden von ihm aber im nächsten Atemzug als versteckte Aggression angeprangert: Es bestehe die Gefahr, dass Schifffahrtslinien und eine zivile Präsenz nur eine militärische Präsenz vorbereiten würden. Schließlich prahlte er mit der zunehmenden militärischen Präsenz der USA und großen Manövern in der Arktis. Eine deprimierende Antwort auf die Herausforderungen der sich wandelnden Arktis.

15.2 Methan im Arktischen Ozean

Die Feldforschung zu Methanemissionen von den Kontinentalschelfen der Arktis führte insbesondere das Team von Igor Semiletov und Natalia Shakhova durch. Sie bekamen 2019 eine Finanzierung für eine weitere Expedition an Bord des Forschungsschiffs „Akademik Mstislav Keldysh“ unter Leitung der Polytechnischen Universität Tomsk. Am 8. Oktober 2019 berichteten sie vom Schiff aus, dass sie die größte jemals beobachtete Methanfahne entdeckt hatten. Sie befand sich östlich der Bennett-Insel

in der Ostsibirischen See. Das heftig sprudelnde Wasser schien regelrecht zu kochen, und die Methankonzentration in der Luft darüber erreichte 16 ppm, mehr als das Neunfache des globalen atmosphärischen Mittelwerts. Anschaulich beschrieben sie im *Daily Telegraph*, wie sie sich dem smaragdgrünen Wasser der Methanfahne näherten und beobachteten, „wie Gas aus der schwarzen Tiefe in Tausenden sprudelnden Strängen zur Oberfläche aufstieg“. Wenig später fanden sie eine zweite, ähnlich große Methanfahne. Semiletov wies auf die große Gefahr hin, die diese Methanfahnen für Offshoreanlagen darstellt, etwa für das schwimmende Atomkraftwerk, das im August 2019 den Betrieb aufgenommen hat, um die Bergbaustadt Pewek zu versorgen. Nach einer neuen russischen Schätzung taute der submarine Permafrost mit einer Rate von 18 cm pro Jahr. Irgendwann wird es keine Barriere mehr geben, die ein Austreten von Methan aus den submarinen Methanhydraten verhindert, und das in Kap. 9 beschriebene katastrophale Szenario mit einem beschleunigten Klimawandel wird seinen Lauf nehmen.

Diese jüngsten Entwicklungen folgten einer Entdeckung im Jahre 2017, als man auf dem Meeresboden der Barentssee, zwischen Spitzbergen und der Bäreninsel, Hunderte spektakuläre Krater fand. Sie ähnelten denjenigen, die in Sibirien auf Land bekannt sind (Kap. 9). Man geht davon aus, dass die Krater auf dem Meeresboden bei Methanexplosionen entstanden, als das Gas vor etwa 12.000 Jahren am Ende der letzten Eiszeit am Meeresboden austrat. Die Krater an Land sind jedoch viel jünger – darunter eine Eruption von Feuer und Rauch im Juni 2017, die von den nächsten Bewohnern direkt mit Augen und Ohren beobachtet wurde.

15.3 Der Meereisrückzug

Im September 2019 betrug die Meereisausdehnung im monatlichen Mittel 4,32 Mio. km^2 , damit war es die dritt-kleinste Ausdehnung überhaupt (Abb. 15.1), sie wurde nur in den Jahren 2007 und 2012 untertroffen (vgl. Kap. 7, dabei ist zu beachten, dass Abb. 7.1 das Eisvolumen zeigt). Wie auch in den vorausgehenden vier Jahren lag die Ausdehnung nahe am langfristigen linearen Trend, so Walt Meier vom National Snow and Ice Data Center in Boulder, Colorado. Dieser in den vergangenen 40 Jahren deutliche Trend entspricht einem durchschnittlichen Rückgang von 82.400 m^2 pro Jahr. Auch mit den Abweichungen 2007 und 2012 können wir erwarten, dass sich dieser Trend fortsetzt. Irgendwann dürfte eine

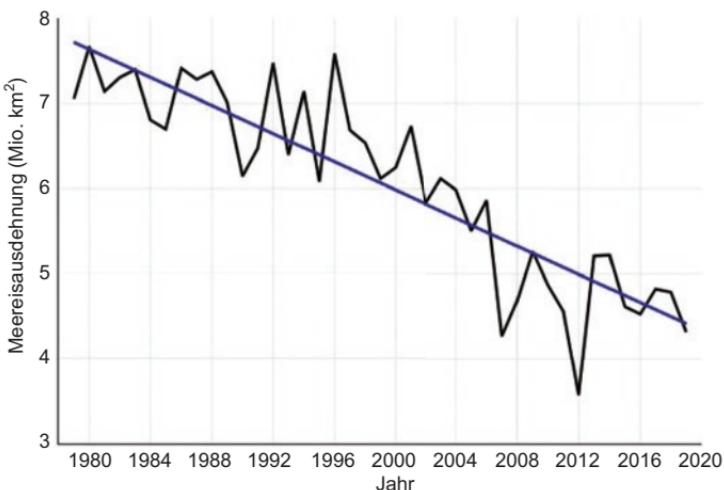


Abb. 15.1 Monatliches Mittel der Meereisausdehnung im September in den Jahren 1979–2019 (mit freundlicher Genehmigung von W. Meier, National Snow and Ice Data Center, Universität von Colorado, Boulder)

Abweichung nach unten erstmals einen September ohne Meereis bringen, noch bevor der Trend null erreicht.

15.4 Die nächste Eiszeit

Es gibt immer stärkere Anzeichen, dass unsere Aktivität die nächste Eiszeit nicht nur verschiebt (sie wäre demnach in 50.000–100.000 Jahren fällig, s. Kap. 4), sondern wahrscheinlich ganz verhindert. Es wurde berechnet, dass bereits 500 Gt von anthropogenem Kohlendioxid ausreichen, um eine Eiszeit zu verhindern, und so viel haben wir bereits emittiert (bei der heutigen Rate entspricht dies den Emissionen von 12 Jahren). Nach neuen Schätzungen beträgt die Verweildauer von Kohlendioxid im Energiesystem der Erde eher 35.000 statt (wie ich bisher in diesem Buch schreibe) „mehr als 100 Jahre“. Das bedeutet, dass ein großer Teil unserer heutigen Emissionen unser Klima noch in Tausenden von Jahren beeinflussen wird, ja sogar noch lange, nachdem wir sämtliche fossile Brennstoffe verbrannt haben.

15.5 Schifffahrtsrouten in der Arktis

Der Nördliche Seeweg ist weiterhin eine viel genutzte Schiffroute, etwa 40 Schiffe durchfuhren sie 2018 und 2019. Die Nordwestpassage hingegen zeigt noch immer die in Kap. 7 beschriebene Veränderlichkeit. Weil Eis das Kanalnetz zwischen den Inseln blockierte, schafften es 2018 nur 3 Schiffe durch die Passage, darunter das bereits in diesem Buch erwähnte Kreuzfahrtschiff Crystal Serenity. Den Nordpol besuchten 2018 und 2019 nur 7 Schiffe, wobei es sich ausschließlich um Forschungsschiffe

handelte, fast alle waren russische Atomeisbrecher. Von einer kommerziellen Transpolarroute sind wir also weit entfernt. Derweil gab die Mediterranean Shipping Company (MSC), eine der größten Containerschiff-Reedereien, bekannt, den Nördlichen Seeweg nicht nutzen zu wollen, um Umweltproblemen vorzubeugen.

15.6 Meeresspiegelanstieg

In Prognosen werden für den Meeresspiegelanstieg bis zum Ende des Jahrhunderts immer größere Werte genannt. Das liegt vor allem an neuen Erkenntnissen über die beschleunigte Schmelze des Grönlandischen Eisschildes. Ich selbst stand am 1. August 2019 auf dem Grönlandischen Eisschild. Dieser Tag ging in die Geschichte ein als derjenige mit der größten an einem einzigen Tag abgeschmolzenen Eismenge seit Beginn der Aufzeichnungen: 12,5 Mrd. t, alles davon landete im Ozean. Die Lufttemperatur erreichte 21 °C.

15.7 Absenkung der Kohlendioxidkonzentration

In Kap. 13 und 14 plädiere ich für ein gigantisches globales Forschungs- und Entwicklungsprojekt, damit wir Kohlendioxid aus der Atmosphäre entnehmen können. Wie dort beschrieben ist *direct air capture* (DAC) der effizienteste Weg dafür. Das Ziel sollte sein, die Kohlendioxidkonzentration auf das vorindustrielle Niveau abzusenken. Nur so können wir uns vor den schrecklichen Folgen des Klimawandels, die ich in diesem Buch beschrieben habe, schützen.

„Es ist die wichtigste Aufgabe, vor der die Welt steht. Wenn wir sie lösen, kann unsere menschliche Zivilisation fortbestehen, und wir können unsere Energien für all unsere anderen unzähligen Herausforderungen einsetzen ... Wenn wir sie nicht lösen, sind wir erledigt.“

So schrieb ich am Ende von Kap. 14. Diese Aussage fand bei einer zunehmenden Zahl von Forschern einen Nachhall und es wurden bereits mehrere Pilotanlagen für *direct air capture* gebaut. Diese zeigen einen enormen Einfallsreichtum und sind sehr vielversprechend, doch skandalöserweise gibt es noch immer keine ausreichende Finanzierung, um sie schnell weiterzuentwickeln (wie es auch keine Finanzierung für aussichtsreiche Geoengineering-Techniken wie Wolkenaufhellung gibt).

Drei besonders attraktive Methoden im Zusammenhang mit *direct air capture* sind:

- Umwandlung in Kalkstein,
- Verpressung in Basalt und
- Umwandlung in Flugzeugtreibstoff.

Die Umwandlung in Kalkstein wurde von Blue Planet Ltd. in Los Gatos (Kalifornien) entwickelt. Das CO₂ wird aus Luft entnommen, indem diese über eine bestimmte wasserbasierte Lösung strömt. Die Lösung wird mit Gesteinspartikeln vermischt, auf denen sich eine Karbonatschicht abscheidet. Das Ergebnis ist ein festes Material, das chemisch mit Kalkstein identisch ist. Dieses kann auf unterschiedliche Weise verwendet werden: zu Sand gemahlen als Bausand oder als Zusatz in Zement oder größere Partikel anstelle von Kies in Beton. Dies eröffnet die bemerkenswerte Möglichkeit, kohlenstoffnegativen Beton herzustellen (normalerweise wird Beton als das klimaschädlichste Baumaterial angesehen, da nicht

nur viel Energie für die Herstellung benötigt wird, sondern auch der Herstellungsprozess selbst große Mengen Kohlendioxid freisetzt). Kalkstein wird in großer Menge als Rohstoff benötigt, jedes Jahr werden 50 Gt abgebaut. Somit relativiert sich das Problem, was wir mit 40 Gt CO₂ anfangen sollen, die wir pro Jahr aus der Atmosphäre entfernen müssten: Jede Tonne des synthetischen Kalksteins enthält 440 kg Kohlendioxid.

Um die Verpressung in Basalt zu untersuchen, bauten die Schweizer Firma Climeworks und die isländische Firma CarbFix gemeinsam eine Pilotanlage am Geothermalkraftwerk Hellisheiði in Südisland. Sie scheidet mithilfe der Geothermalenergie CO₂ aus der Luft ab und das Gas wird in den Untergrund gepumpt. Innerhalb von 1–2 Jahren reagiert es mit dem Basalt zu einem festen alterierten Gestein. Ähnliche Anlagen könnten weltweit installiert werden. Eine neuere Abscheidungsanlage von Climeworks entstand in Troia in Apulien (Italien), in der das abgeschiedene CO₂ katalytisch mit Wasserstoff – durch Elektrolyse mit Solarstrom erzeugt – zu Methan reagiert, das für Straßenfahrzeuge verwendet wird. Partner dieses Forschungsprojekts unter dem Namen STORE&GO ist die Polytechnische Universität Turin.

Eine Umwandlung von CO₂ zu Flugzeugtreibstoff ist eine der Möglichkeiten, an der beispielsweise die kanadische Firma Carbon Engineering of Squamish in British Columbia arbeitet. Sie scheidet CO₂ mithilfe einer Lösung von Alkalihydroxiden ab, das Gas wird dann entweder in den Untergrund gepumpt oder mithilfe von mit Solarenergie erzeugtem Wasserstoff in synthetische Treibstoffe umgewandelt. Es handelt sich derzeit um die ehrgeizigste und am besten finanzierte Firma: Eine Anlage, die jedes Jahr 1 Mio. t CO₂ abscheiden kann, soll 2021 den Betrieb aufnehmen. Die Abscheidung soll 94–233 US\$ pro Tonne kosten (das Ziel wäre 40 US\$ pro Tonne, was den

geschätzten Kosten entspricht, die eine durch 1 t CO₂ verursachte Erwärmung verursacht). Um einen nennenswerten Anteil der Emissionen aus der Atmosphäre zu entfernen, wären mehr als 10.000 solcher Anlagen notwendig.

Zwei in den vergangen zwei Jahren zur Bekämpfung des Klimawandels gegründete Stiftungen legen einen Schwerpunkt auf *direct air capture*: die Foundation for Climate Restoration von Peter Fiekowsky in Kalifornien und das Centre for Climate Repair von Sir David King in Cambridge. Zudem kam im Mai 2019 ein von Leonardo DiCaprio produzierter Dokumentarfilm in die Kinos: *Ice on Fire* thematisiert sowohl die Gefahr durch Methan als auch die Hoffnung auf *direct air capture*.

15.8 Abschließende Gedanken

Kurz nach der Veröffentlichung des 1,5-°C-Sonderberichts des Weltklimarats erklärte Präsident Trump in einem Interview des US-Fernsehprogramms *60 Minutes*, er glaube nicht, dass der Klimawandel menschengemacht sei, dass sich vielmehr das Klima von selbst wieder normalisieren werde. „Wissenschaftler, die sagen, dass alles schlimmer wird, haben eine sehr große politische Agenda“, meinte er, und: „Es gibt Wissenschaftler, die am menschengemachten Klimawandel zweifeln“. Auch wenn man nicht politisch Stellung beziehen will – es ist schwer, der Schlussfolgerung zu widerstehen, dass in Zeiten des Klimawandels die größte einzelne Bedrohung für die Menschheit ist, dass Donald Trump im Weißen Haus sitzt. Wie der ehemalige Staatssekretär John Kerry 2019 sagte: „Aufgrund von Donald Trumps Entscheidungen werden Menschen sterben.“

Anhang

Die beiden Karten der Polargebiete (Abb. A.1 und A.2) können beim Lesen zur groben Orientierung dienen.



Abb. A.1 Karte der Arktis

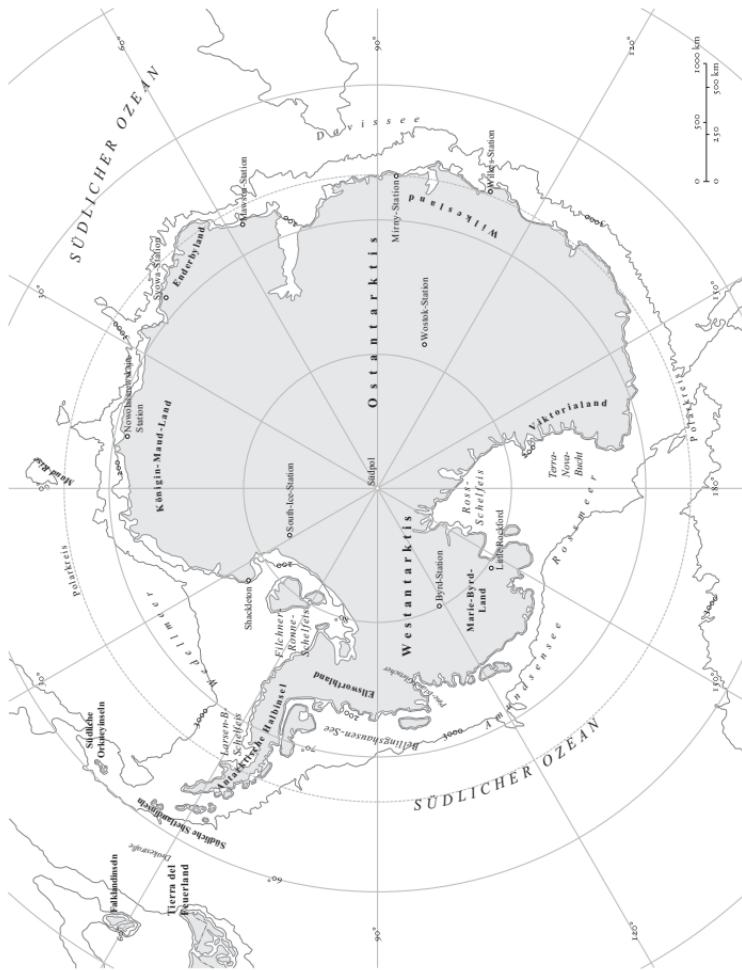


Abb. A.2 Karte der Antarktis

Stichwortverzeichnis

A

- Absorptionsbande 80, 81
Ackerfläche 300
Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) 245
Aerosol 97, 295
Aerosolinjektion 295
Agassizsee 67
Alaska 2, 112, 150, 176
Albatros 265
Albedo 6, 23, 169
der Erde 78
Landoberfläche 185
Meereis 23, 169
Modellierung 170
Rückkopplung 64, 169, 173, 255, 274
Schnee 23
Schneeball-Erde 43
Wald 302
- Alfred-Wegener-Institut 243, 245, 262
Alge 260
Alpen 176
Amundsen, Roald 3, 149
Amundsensee 265, 267
Anisotropie 11
Anpassung 328
Antarctic Circumpolar Wave 272
Antarktis 255
Eiskern 55
Erwärmung 256, 268, 274
Meereis 255, 257, 262, 263, 269
Pliozän 53
Presseisrücken 27
Schelfeis 257, 272
Antarktische Halbinsel 181, 257

- Antarktischer Eisschild 34, 55, 180, 272
Antarktisvertrag 260
Anthropozän 72
Antizyklon 245
Apollo 8 4
Aquifer 180
Arabischer Frühling 226
Archimedes 183
Archiv 55
Arktischer Ozean 103, 234
Eisdicke 1
Eisdrift 24
Meereisrückgang 4, 133, 168
Methanfreisetzung 199
Ölexploration 154
Presseisrücken 27
Schifffahrt 147
Wasserschichten 17, 193
Arktischer Rat 340
Arktisches Oberflächenwasser 17, 193
Arrhenius, Arrhenius 85
Asche 57
Atlantik 217, 233
Atlantisches Wasser 17, 194
Atlas 106
ozeanographischer 106
Atmosphäre 47, 76, 94, 217
Erdgeschichte 39, 41, 47
Kohlendioxid 47, 62, 83, 187
Methan 62, 89, 197, 210, 211
Wärmetransport 99
Wasserdampf 175
Atmospheric Environment Service 107
Atombombe 319
Atomkraftwerk 342
Atomkrieg 318
Atom-U-Boot 108
Aufforstung 300, 301
Auftriebsgebiet 233
Ausdehnung 134
Ausgasung 65
Auskolkung 29
Ausspülung 22
Auto 84
Azipod-Antrieb 154
- B**
Baffin Bay 31
Bangladesch 190
Barentssee 223
Basisebene 10
Beaufort Sea Project 159
Beaufortsee 116, 123, 129, 155
Beaufort-Wirbel 24, 115, 184
Bennett-Insel 341
Benz, Carl 84
Beringsee 34
Beringstraße 4, 129
Beton 346
Bevölkerungswachstum 224, 228, 281
Bindung, kovalente 9
Biodiversitätskonvention 303
Bioenergie 300
Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS) 300

- Biokohle 304
 Biokraftstoff 227
 Blankeis 170
 Blockade 222
 Blockfeld 32
 Blowout 158, 197
 Bodenerosion 304
 Bodenwasser 194
 Boje 113, 129
 Bolsonaro, Jair 337
 Boltzmann, Ludwig 78
 Box, Jason 211
 Brackwasser 16
 Bradley, Raymond S. 69, 96
 Brine Cell s. Solekanal
 British Antarctic Survey 91
 Broecker, Wally 68, 234
 Buchan, David 104
 business-as-usual-Szenario 182
 Byrd-Station 268
- C**
 c-Achse 10, 19
 Carbon Capture and Storage 300
 Carbon Dioxide Removal (CDR) 289
 CERES 172
 Chile 176
chimney s. Konvektionsschlott
 China 225
 Clathrat 196
 Climategate 326
 Columbia Icefield 177
 Comiso, Joey 122
- Congelation Ice s. Säuleneis
 Containerschifffahrt 153
 Convection-Programm 243
 Convective Chimney s. Konvektionsschlott
 COP21 307
 Corioliskraft 232, 270
 Croll, James 58
 Crutzen, Paul 72, 297
 CryoSat-2 135
- D**
 Dänisches Meteorologisches Institut 105
 Deepwater Horizon 155, 160
 Deich 190
 Deponie 90
 Dinosaurier 48
 Direct Air Capture (DAC) 305, 345
 Dmitrenko, Igor 198
 Doggerland 70
 Drachenatem 211
 Drainage 22
 schweregetriebene 22
 Drakestraße 255
 Dreadnought (U-Boot) 127
 Drumlin 220
 Dryas 67
 Dundee 105
 Dürre 216, 225
- E**
 Echolot 108, 128
 Einfluss, astronomischer 58

- Eisabscheuerung 29
Eis-Albedo-Rückkopplung 169
Eisberg 31, 257, 265
Eisblume 12
Eis
 Dichte 13, 55
 einjähriges 5, 20, 258
 Eis I_h 12
 junges 19
 Komet 12
 Kristallgitter 10
 landfestes s. Festeis
 mehrjähriges 4, 22, 115, 265
 meteorisches 263
 Modifikationen 12
 Schmelzwärme 17
 zerfallenes 123
Eisdrift 24
Eishaus-Welt 41, 47
Eiskern 55, 60
Eiskollaps 111
Eiskonzentration 125
Eiskristall 9, 19
Eisrand 258
Eisschelf s. Schelfeis
Eisschild 176
Eisscholle 270
Eiszeit 41, 49, 53, 62
 Ablauf 64
 Anzahl 64
 Kohlendioxid 64
 letzte 66
 nächste 63, 71, 344
 Pleistozän 62
 Schneeball-Erde 41, 45
 und Methanhydrate 196
Elektrolyse 117
Elementarzelle 10
Ellesmere-Insel 34, 211
El Niño 124, 256, 273
Emissionsgrad 79, 82, 83
Emissionsminderung 284
Enderbyland 268
Energieverbrauch 331
ENSO (El Niño–Southern Oscillation) 273
Erderwärmung 97
Erdgas 90, 153
Erdöl 84, 150, 154, 158
Erdsystem-Klimasensitivität 66
Erdumlaufbahn 58
Ernährung 282
Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation 226
Ernte 224
Erwärmung, galoppierende 174
Erwärmungspotenzial 314
Europäische Umweltagentur 250
European-Sub-Polar-Ocean-Programm (ESOP) 243
expulsion 22
Extremregen 223
Extremwetterereignis 216
Exzentrizität 58
- F
- FAO 226
Farman, Joe 91
Fast Ice 29

- FCKW 91
Feedback s. Rückkopplung
Festeis 29
Festeiszone 29
Feuchtgebiet 90
Feuchtigkeit 262
Filchner-Ronne-Schelfeis 272
Firn 55
Fischgrund 162
Fleischkonsum 90
Flettner-Rotor 291
Flugzeugtreibstoff 347
Fluorchlorkohlenwasserstoff (FCKW) 91
teilhalogenierter (HFCKW) 92
flushing 22
Fluss 185, 210
arktischer 185
Flüssigbatterie 332
Flüssigerdgas 153
Food Price Index (FPI) 226
Foraminifere 49, 88, 187
Förderband, globales s. Zirkulation, thermohaline
Fossil 40
Fourier, Joseph 86
Fracking 90, 161, 206, 330
Framstraße 104, 109, 115, 237
Francis, Jennifer 216
Franklin, John 31, 104, 148, 220
Frazil-Eis 19, 238, 258, 271
Frazil-Eis-Pfannkuchen-Zyklus 258, 271
Freibord 135
Frequenzband 81
Frostrauch 25, 33
- G**
Gander 107
Gas 153
Gasblase 196
Gascard, Claude 247
Gauß-Verteilung 190
Gefrieren 15, 19, 259
Gefrierpunkterniedrigung 17
Geoengineering 206, 289, 315, 333
Gezeitenwelle 331
Gjøa 149
Glattwal 238
Gleichgewichtstemperatur 79, 94
Gletscher 176, 229, 272
Schmelzrate 64
Wachstumsrate 64
Gletschermühle 178
Global Warming Policy Foundation 325
Global Warming Potential (GWP) 91
Glockenkurve 190
Golfe du Lion 242
Golfstrom 234, 250
Golf von Mexiko 219
GRACE 179
Gravity Drainage 22
Great Ocean Conveyor Belt 234
Grönland 34, 40, 223
Eiskern 55

- Pliozän 53
Wikinger 70
Grönlandischer Eisschild 55, 178, 179, 237, 345
Grönlandsee 103, 231, 243
Grönlandwal 238
Große Hungersnot 226
Großer Arktischer Wirbel-
sturm 122
Grundwasser, fossiles 180
Guigné, Jacques 31
Gustafsson, Örjan 209
- H**
Hackerangriff 326
Hadley Centre for Climate
Research and Prediction
321
Hansen, James 182, 325
Hautkrebs 92
Hawaii 85
Healy (Eisbrecher) 123
Herbst 129
HFCKW 92
Himalaja 176
Hitzewelle 218
Hochdruckgebiet 222
Hochwasserschutz 181, 190
Hockeyschläger-Diagramm
69
Hooke'sches Gesetz 139
Hope, Chris 200
Hoyle, Fred 12
Hudson (Forschungsschiff) 2, 29, 150
Hughes, Nick 119
- Hungersnot 215, 224, 226
Huronische Eiszeit 41
Hurrikan 216, 219
- I**
Ice Scouring 29
Impfung 291
Indischer Ozean 233
Industrielle Revolution 84
Interglazial 62, 68
International-Ar-
ctic-Buoy-Programm
(IABP) 113
Internationaler Währungs-
fonds 318
Inuit 34, 71
IPCC s. Weltklimarat
Irland 226
Irmingersee 251
Isolierung 331
Isotop 49, 56
ISPOL-Station 262
- J**
Jäger-und-Sammler-Gesell-
schaft 70
Jahresschicht 56
Jahr ohne Sommer 57
Jamal-Halbinsel 155
Jan Mayen (Forschungsschiff)
246
Jan-Mayen-Rücken 237
Jan-Mayen-Strom 237
Jetstream s. Strahlstrom

John A. Macdonald (Eisbrecher) 3, 150
 Judge Institute 201
 Jüngere Dryas 67

K
 Kalkschale 187
 Kalkschlamm 187
 Kalorie 18
 Kälte 217
 Kälteperiode 218
 Kalter Krieg 107
 Kaltzeit s. Eiszeit
 Kalziumkarbonat 187
 Kapitalwert 201
 Karasee 7, 223
 Kelvin 77
 Kernenergie 332
 Kerze 117
 Kiel 25
 King William Island 31, 149, 220
 Kino 249
 Kippunkt 139
 Kirschvink, Joseph 42
 Kleine Eiszeit 70
 Klima 219
 Klimadaten 61
 Klimamodellierung 111, 140, 141, 200, 250, 316
 Klimarahmenkonvention 285, 307, 322
 Klimasensitivität 66, 87, 94, 313
 Klimaskeptiker 83, 122, 324
 Klimaszenario 144

Klimawandel 65, 86, 174, 249, 279
 und Kohlendioxid 88, 313
 und Methan 90
 und Schmelzwärme 18
 Kohle 84, 97
 Kohleförderung 90
 Kohlendioxid 83, 187
 Absorptionsbande 82
 Anstiegsrate 47
 Eiskern 57, 62
 Freisetzung 84, 157
 in der Atmosphäre 62, 83, 85, 94, 279, 287, 313
 Messstation 85
 und Eiszeiten 64
 und Ozeanversauerung 187
 Verweildauer 88, 344
 Kohlensäure 187
 Kohlenstoffabscheidung 298, 334
 Kohlenstoffzyklus 88
 Kolk 29
 Komet 12, 40
 Kontinentalschelf 156, 193, 341
 Konvektion 16, 68
 Konvektionsschlot 231, 242
 Konvergenz, antarktische 265
 Körper, schwarzer 78
 Kosten 293, 306, 315
 Kreide-Tertiär-Grenze 47
 Krieg 318
 Krill 260, 265
 Kristallgitter 10
 Kubakrise 318

Kugelhaufenreaktor 333
Kunstdünger 91
Küstengletscher 177
Küstenpolynja 269
Kyoto-Protokoll 285, 323

L

Labrador (Eisbrecher) 150
Labradorsee 31, 234, 251
Lachgas 91
Absorptionsbande 82
Lance (Forschungsschiff) 246
Landwirtschaft 215, 224
La Niña 273
Laptewsee 7, 205, 209
Larsen-B-Schelfeis 257
Latham, John 294
Lawson 325
lead s. Rinne
Leben 40
Lebensmittelpreisindex 226
Leck 90
Lemming 221
Lena 210
Levitus, Sid 182
Lobby 324
Lomonossow-Rücken 156
Löwengolf 242
Luftbildaufnahme 107
Lufteinschluss 56, 60
Luftmasse 217
 polare 217
 tropische 217
Lufttemperatur 14, 57, 170,
 175, 184, 217, 267

M

Mäander 218
Mackenzie-River-Delta 155
Magnus-Effekt 291
Mais 227
Makganyene-Vereisung 41
Mann, Michael E. 69, 96
Marginal Ice Zone Experiment (MIZEX) 129
Marine Cloud Brightening (MCB) 291
Marinoische Vereisung 46
Mars 31
Maslowski, Wieslaw 124
Matsch 170
Mauna Loa 85
Maykut, Gary 170
McClure-Straße 150
Meereis 17, 19
 Albedo 23, 169
 Antarktis 255, 258
 Ausdehnung 134, 263,
 343
 Bildung 19, 257
 Dicke 1, 108, 113, 134,
 261, 264
 einjähriges Eis 5, 20, 258
 Eisdrift 24
 Fläche 4, 108, 112, 121,
 134
 im 19. Jh. 103
 mehrjähriges Eis 4, 23,
 115, 265
 meteorisches 263
 und arktische
 Verstärkung 99

- und Konvektion 232, 238, 248
und Permafrost 193
und Salz 20
und Schmelzwärme 18
Volumen 133
zerfallenes 123
Zyklus 111
- Meereisrinne s. Rinne
Meeresboden 195, 204, 210
Meeresoberflächentemperatur 7, 195
Meeresspiegel 200, 345
Eiszeit 70
historisch 70
Pliozän 53
Meeresspiegelanstieg 176, 272
eustatischer 178
sterischer 176
Meeresströmung 232
Meeresströmungskraftwerk 331
Meereswirbel 236
Meerwasser
Dichte 13
Gefrierpunkt 16
Salzgehalt 16
Megamethanfackel 209, 211
Mehrstrahlsonar 115
Melanom 92
Melville Island 148
Menschheit 67, 76, 281, 287
Meteoriteinschlag 47
Methan 89, 193, 207
Absorptionsbande 82
als Treibhausgas 90
Eiskern 57, 62
Freisetzung 193, 200, 207, 341
in der Atmosphäre 62, 85, 89, 211, 280
Permafrost 193, 207
und Eiszeiten 64
Methanfahne 7, 197, 342
Methanhydrat 7, 90, 196
Methanpuls 200, 204
Mikrowellensatellit 108
Mikrowellensensor 257, 267
passiver 257, 267
Milankovitch, Milutin 58
Milankovitch-Zyklus 58, 62, 71
Mistral 242
Mittelmeer 242
MIZEX (Marginal Ice Zone Experiment) 129
Modellierung 111, 124, 127, 140, 141, 200, 250, 316
Albedo 170
Molekülgruppe 15
Molina, Mario 92
Molnar, Peter 54
Montrealer Protokoll 92
Müllentsorgungsanlage 90
Munk, Walter 128, 182
- N
- Nahrungsmittelproduktion 224
Nahrungsmittelversorgung 281

- NASA 122
Goddard Institute for Space Studies 205
Goddard Space Flight Center 267
Natural Environment Research Council (NERC) 248
Naval Postgraduate School 124, 129
Navigation 147
Neigungswinkel 59
Net Present Value (NPV) 201
Niederschlag 262
Nilas 19, 258
Nordatlantikstrom 234, 250
Nordbukta 238
Nördlicher Seeweg 112, 152, 344
Nordostpassage 112, 152
Nordostrundingen 34
Nordostwasser 34
Nordpol 157
Nordwasser 34
Nordwestpassage 2, 112, 147, 344
Nordwest-Territorien 2
Norwegen 177
Norwegisches Polarinstitut 243
NSIDC (National Snow and Ice Data Center) 125
Nullhypothese 221
Nutztier 90
- Odden-Eiszunge 105, 238, 243, 259
Oden (Eisbrecher) 209
Office of Naval Research (ONR) 129
Offshore-Bohrung 155
Ökonomie 147, 315
Öl 150, 154, 158
Ölexploration 154
Ölflecken 159
Ölförderung 90
Olivin 304
Ölpest 159
Ölverschmutzung 158
Oracle (U-Boot) 127
Orkney-Inseln 331
Ostantarktis 268, 272
Ostgrönlandstrom 237
Ostsibirische See 196, 342
Oszillation
 arktische 222
 südliche 273
Overland, James 219
Ozean 187
 Absorption von Wärme 96
 Konvektion 231
 Salzgehalt 183
 Schichtung 17, 231
 und Kohlendioxid 87, 187
 und Schmelzwasser 179
Ozeandüngung 303
Ozeanversauerung 187
Ozeanzirkulation 232
 Pliozän 54

- Ozon 91
Absorptionsbande 82
Ozonloch 91
- P**
Pachauri, Rajendra K. 325
Pacific Marine Environmental Laboratory 219
Packeis 126, 258
PAGE-Modell 200
Panama 54
Pangäa 45
Pareidolie 220
Pariser Abkommen 307, 337
Parkinson, Claire 122
Parry, Edward 148
Parry-Kanal 150
Pauling, Linus 10
Pazifik 233, 273
Perihel 60
Permafrost 193, 207, 212
 submariner 7, 193, 342
 terrestrischer 207
Perovich, Don 171
Peterson, Reg 272
Petschorasee 157
Pfannkucheneis 129, 238, 258, 271
 konsolidiertes 260
 verfestigtes 260
Pflanze 88
Pflügen 304
Photosynthese 40, 88, 260
Photovoltaik 306, 331
Phytoplankton 17, 88, 260, 303
Pinatubo 297
Pine Island Bay 272
Pinguin 265
PIOMAS 135
Pipeline 90
Pistone, Kristone 172
Plankton 88, 252, 260
 im Eis 17
 Mangel 31
Pliozän 53
Polarfront 217, 265
Polarkreis 59
Polarstern (Forschungsschiff) 245, 258, 268
Polar Surface Water 17
Polarwirbel 222, 269
Politik 284
Polymorphie 12
Polynja 33, 118, 198, 268
Pompeo, Mike 340
Präkambrium 41
Presseirücken 5, 24, 29, 116, 120
Pressure Ridge s.
 Presseirücken
Prince-of-Wales-Straße 150
Prinzip des Archimedes 183
Prognosegenauigkeit 220
Project Birdseye 107
Prudhoe Bay 155
Pteropoden 188
Puffer 187
Pyknokline 17
- Q**
Quant 80

R

Radcliffe Meteorological Station 86
Raubmöwe 265
Redox-Flow-Batterie 332
Reis 90
Rignot, Eric 179
Rinne 24
Rio 322
Risiko 204
Risikoanalyse 204
Robbenfänger 103, 238
Robin, Gordon 126
Robinson, Andy Lee 133
Robock, Alan 297
Rosetta 13
Rossby-Wellen 218, 222
Rossmeer 34, 265, 267
Rossmeer-Polynja 269
Ross-Schelfeis 272
Rotationsachse 59
Rothrock, Drew 109, 135
Rowland, Sherwood 92
Roy, Fitz 85
Rückkopplung 167
Albedo 64, 169, 173, 256, 274
auftauender Permafrost 193
Ausgasung 65
durch arktische Flüsse 185
durch Ruß 185
Eishöhe 180
Strahlstrom- 218, 223
und Ozeanversauerung 187
und Schneegrenze 173

Wasserdampf 175
Wellen 126, 130
Runaway Warming 174
Ruß 23, 170, 185
Russland 125, 156

S

Sachalin 155
Sägezahnmuster 62
Salter, Stephen 290
Salz 16, 20, 241
Salzgehalt 183, 232, 241
Samalas 57
Sandy 216
Sankt-Lorenz-Insel 34
Sastrugi 170
Satellit 105, 108, 134, 172, 179, 257, 267
Sattelrobbe 105
Sauerstoff 39
Isotope 49, 56
und U-Boot 117
Säuleneis 20
Schale 187
Schelfeis 257, 272
Schelfmeer 193, 280
Schellnhuber, Hans Joachim 71
Scherzone 32
Schifffahrt 147, 344
Schlittschuhlaufen 15
Schlot 231, 242
Schmelzen 15
Schmelzloch 23
Schmelztümpel 22, 23, 170
Schmelzwärme 17

- Schmelzwasser 178
Schmidt, Gavin 205
Schnee 123, 262
 Albedo 23, 169
 Dichte 55
 Dicke 263
 Matsch 170
Schneeball-Erde 41, 45
Schneedeckung 173, 222
Schneebblindheit 169
Schneefeld 64
Schneegrenze 173, 185
Schneeschmelze 185, 229
Scholle 259
Schwefeldioxid 296
Schwefelsäuretröpfchen 296
SCOG (Self-Contained Oxygen Generator) 117
Scoresby, William 103, 238
Scott, Robert Falcon 1, 34
Scott Polar Research Institute 1, 126
Screen, James 99
Scripps Institution of Oceanography 85, 128
Seealpen 242
See
 Gefrieren 16
Seerecht 155
Segel 25
Seitensichtsonar 30
Semiletov, Igor 198, 204, 341
Serreze, Mark 5, 137
Shakhova, Natalia 198, 204, 341
Shanghai 181
Sibirien 112, 193, 223
Sibirienhoch 223
Sikuliaq (Eisbrecher) 129
Silikatverwitterung 45
Simmonds, Ian 99
Slingo, Julia 142
Solarkonstante 42, 58, 77, 93
Solar Radiation Management (SRM) 289
Soleabflusskanal 22, 159
Sole-Ausstoß 22
Solekanal 17, 21
Solschenizyn, Alexander 320
Sommerschmelze 23
Sonar 108
Sonnenbrand 92
Sonnenfleckenaktivität 77
Southern Annular Mode 273
Sovereign (U-Boot) 108
Spannung, divergierende 25
Spitzbergen 196
Stamukha 32
Staub 57, 303
Stefan, Josef 78
Stefan-Boltzmann-Gesetz 78
Stern-Report 201
Stock and Flow 310
Strahlstrom 216, 222, 273
 polarer 217
Strahlung, ultraviolette 92
Strahlungsantrieb 93, 95
Stratosphäre 222
Stratospheric Particle Injection for Climate Engineering (SPICE) 295
Streuung 128
Sturm 122, 123, 126, 129

- Sturmflut 190
Sturtische Vereisung 45
Südliche Orkneyinseln 265
Südlicher Ozean 258, 260
Südliche Shetlandinseln 265
Sumpfgas 90
Superb (U-Boot) 109
Suspension 258
Süßwasser 179
Sverdrup 249
SWERUS-C3 209
System, kapitalistisches 282
- T
- Talik 199
Tambora 57
Tankflugzeug 296
Teersande 161
Temperatur
der Arktis 97, 175, 194
der Erde 50, 53, 60, 76, 83, 96
der maximalen Dichte 15
Luft- 14, 57, 170, 175, 184, 217, 267
Wasser- 15, 184, 185, 205, 210
Temperaturerhöhung, erfolgte 95
Temperaturprofil 245
Termiten 90
Terra-Nova-Bucht-Polynja 34
Tetraeder 10
Thatcher, Margaret 321
The Day After Tomorrow 249
Thermometer 57
- Thoriumreaktor 333
Thunberg, Greta 338
Tiefdruckgebiet 217
Tiefenwasser 96
Tiefenwasserbildung 233, 249
Tietsche, Steffen 140
Tireless (U-Boot) 115
Todesspirale 5, 137, 163
arktische 5, 137, 163
Transantarktisches Gebirge 272
Transgression 196
holozäne 196
Transpolardrift 24
Treibhauseffekt 75, 80
anthropogener 85
natürlicher 76
Treibhausgas 48, 79, 82, 279, 307, 313
FCKW 91
Kohlendioxid 83, 208
Lachgas 91, 208
Methan 7, 89, 90, 199, 208
Ozon 91
Präkambrium 42
Wasserdampf 175
Treibhausklima 41
Treibhauspotenzial 91, 199, 207
Treibhaus-Welt 41, 47
Tropen 219
Tropopause 217
Tschuktschensee 160, 194
Tschorjumow-Gerassimenko 13

Tundra 174, 185, 212

Twomey-Effekt 292

Tyndall, John 86

U

Überschubeis 260

Überschwemmung 191, 218

U-Boot 108, 115, 127, 260

Ultraschall-Doppler-Pro-
fil-Strömungsmesser
245

Umiak 35

Umwälzung 232

Unruhen 215

Untersteiner, Norbert 170

Unterwasserfahrzeug, autono-
mes 32, 120

Ursache-Wirkung-Kette 219

US National Snow and Ice
Data Center 256

UV-Strahlung 92

V

Vanuatu 57

Vavrus, Stephen 216

Verdauung 90

Verpressung 347

Verstärkung
arktische 97
polare s. Verstärkung,
arktische

Verweildauer 88, 344

Verwitterung 304

Viscount-Melville-Sund 148

Vorläufergas 296

Vorsorgeprinzip 203

Vulkanausbruch 57, 297

W

Wachstum 282

dendritisches 12, 19

Wachstumsrichtung 11

Wal 265

Wald 301

Walfänger 103, 238

Wärme 18

latente 17

spezifische 18

Wärmekapazität 18, 274

Wärmetransport 99, 218

Warmzeit s. Interglazial
mittelalterliche 70

Wasser 9, 15

Albedo 172

Dichte 13

Mars 31

maximale Dichte 15

Molekül 9

Schmelzwärme 17

und Leben 40

Wasserdampf 99, 175

Absorptionsbande 82

Wasserdampfrückkopplung
175

Wasserknappheit 228

Wasserstoff 347

Wasserstoffbrückenbindung
13

Wasserstress 228

Wassertemperatur 15, 184,
185, 205, 210

- Wasserversorgung 228
Watson, Robert 324
Weddell-1 262
Weddellmeer 258, 274
Weddell-Polynja 268
Wellen 126, 195, 258
 planetarische s.
 Rossby-Wellen
Wellenkraftwerk 331
Weltgipfel 322
Weltklimarat 85, 93, 95, 143,
 181, 204, 209, 285,
 299, 322, 338
Weltwirtschaft 317
Weltwirtschaftsforum 317
Wendekreis 59
Wensnahan, Mark 135
Westantarktis 267, 268
Westantarktischer Eisschild
 181
Westspitzbergenstrom 237
Westwindgürtel, zirkumpola-
 rer 269
Wetter 215, 220
Wetteramt, britisches 85,
 142, 201, 321
Wetteranomalie 216
Wetterextrem 216
Wetterfaktor 121, 125
Wettervorhersage 220
White, Warren 272
Whiteman, Gail 200
Wien, Wilhelm 78
Wien'sches Gesetz 80
Wikinger 70
Wilkins, Hubert 225
Wilkizkistraße 113, 152
Wind 113, 123
 ablandiger 33
 katabatischer 34, 262
 Kühlung 237, 242
 Schub 24, 269
 und Wellen 126, 195
Windfeld, divergentes 24
Windturbine 331
Winter, nuklearer 48
Winter 215
Winter Weddell Gyre Study
 262
Winter Weddell Sea Project
 258
Wissenschaftsförderung 253
Wolkenaufhellung 290, 291
Wolkendecke 99
Woodworth-Lynas, Chris 31
Wunsch, Carl 234
Wüste 57
- Z
- Zement 346
Zhang, Jinlun 122, 269
Zirkulation
 atmosphärische 138
 thermohaline 68, 232, 249
Zirkumpolarstrom, antarkti-
 scher 265, 272, 274
Zivilisation 69
Zwally, Jay 267
Zwischeneiszeit s. Interglazial