



Polarforschungsagenda 2030

Status und Perspektiven der deutschen Polarforschung

DFG-Statusbericht des Deutschen Nationalkomitees SCAR/IASC

Polarforschungsagenda 2030

Status und Perspektiven der deutschen Polarforschung

DFG-Statusbericht des Deutschen Nationalkomitees für
Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR) und *International Arctic Science Committee (IASC)*

Deutsches Nationalkomitee SCAR/IASC

Prof. G. Heinemann (Vorsitzender)

Universität Trier, Fachbereich Raum- und Umweltwissenschaften

Postanschrift: Behringstr. 21, 54296 Trier

Telefon: +49/651/201-4630

Telefax: +49/651/201-3817

E-Mail: heinemann@uni-trier.de

www.scar-iasc.de

Juli 2017

Das vorliegende Werk wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieser Publikation darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind. All rights reserved (including those of translation into other languages). No part of this book may be reproduced in any form – by photoprinting, microfilm, or any other means – nor transmitted or translated into a machine language without written permission from the publishers. Registered names, trademarks, etc. used in this book, even when not specifically marked as such, are not to be considered unprotected by law.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Online-Ausgabe, ISBN 978-3-00-057242-5,

[<www.dfg.de/dfg_profil/gesamtliste_publicationen/sonstige/>](http://www.dfg.de/dfg_profil/gesamtliste_publicationen/sonstige/)

© 2017 Deutsches Nationalkomitee SCAR/IASC

Zitierweise der Gesamtausgabe: Heinemann, G., Braun, M. Brey, T., Damaske, D., Melles, M., Rhein, M., Willmes, S. (Hrsg.), 2017: Polarforschungsagenda 2030 - Status und Perspektiven der deutschen Polarforschung. Statusbericht des Deutschen Nationalkomitees SCAR/IASC der DFG, 160 pp.

Zitierweise von Kapiteln: Leitautor, Koautoren, Kapiteltitle. In: Heinemann, G., Braun, M. Brey, T., Damaske, D., Melles, M., Rhein, M., Willmes, S. (Hrsg.), 2017: Polarforschungsagenda 2030 - Status und Perspektiven der deutschen Polarforschung. Statusbericht des Deutschen Nationalkomitees SCAR/IASC der DFG, 160 pp.

The Layout of this document is a derivative of *The Legrand Orange book* provided under ltxtemplates.com by Mathias Legrand and Velimir Gayevskiy licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License (creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0).

Inhaltsverzeichnis

Präambel	7
----------------	---

I	Die deutsche Polarforschung	
I.1	Geschichte und Organisation	13
I.2	Werkzeuge	17
I.2.1	Infrastruktur und Logistik	17
I.2.2	Technologien	24
I.3	Einbindung	27
I.3.1	Wissenschaftliche und politische Einbindung	27
I.3.2	Logistische Einbindung	28

II	Die Polargebiete im globalen Wandel	
II.1	Eisschilddynamik und Meeresspiegel	33
II.1.1	Eisschilde, Gletscher, Massenbilanzen und Meeresspiegel	33
II.1.2	Erfassen, Verstehen, Projizieren	35
II.1.3	Schneeprozesse	38
II.2	Meereis	41
II.2.1	Was verursacht die Veränderungen in der Meereisbedeckung?	41

II.2.2	Wie wird sich das Meereis in Zukunft entwickeln?	43
II.2.3	Auswirkungen der Veränderungen des Meereises	44
II.2.4	Meereis - Beobachten, Modellieren und Verstehen	45
II.3	Permafrost	47
II.3.1	Permafrost Degradation	47
II.3.2	Kohlenstoffumsatz durch tauenden Permafrost	48
II.3.3	Submariner Permafrost und Gashydrate	50
II.4	Polare Ozeane	53
II.4.1	Rolle der polaren Ozeane für die globale Umwälzbewegung	54
II.4.2	Beitrag der Ozean-Eis-Wechselwirkung zum Anstieg des Meeresspiegels	57
II.4.3	Die Rolle des polaren Ozeans für den Kohlenstoffhaushalt	59
II.4.4	Ursache und Auswirkungen der Versauerung im polaren Ozean	61
II.5	Biodiversität	65
II.5.1	Klimaänderungen und Biodiversität	66
II.5.2	Struktur und Funktion polarer Lebensgemeinschaften	68
II.5.3	Organisation polarer Ökosysteme	69
II.5.4	Schutz polarer Ökosysteme	70
II.6	Die polare Atmosphäre	73
II.6.1	Beobachtungssysteme	73
II.6.2	Wechselwirkung der Atmosphäre mit Eis und Ozean	74
II.6.3	Telekonnektionen der Polargebiete mit mittleren Breiten	75
II.6.4	Polares Klimasystem und Ozonschicht	77

III

Die Polargebiete im Erdsystem

III.1	Geologischer Untergrund	83
III.1.1	Antarktis	83
III.1.2	Arktis	86
III.2	Paläoklima	89
III.2.1	Klimaarchive	89
III.2.2	Eisschilddynamik und Meeresspiegel	91
III.2.3	Meereisbedeckung und Stoffkreisläufe	92
III.2.4	Boden- und Tiefenwasserbildung	94
III.3	Evolution und Anpassung	97
III.3.1	Evolution und genetische Anpassung	98
III.3.2	Schlüsselarten und Nahrungsnetze unter Stress	98

III.3.3	Verbreitungsmechanismen und Bioinvasion	99
III.3.4	Beobachten, modellieren, verstehen, neue Methoden anwenden	99
III.4	Erde und Weltraum	101
III.4.1	Neutrino-Astronomie	102
III.4.2	Astrobiologie: Planetenanalogue und Exploration	105

IV Die Polargebiete: Ressourcen und Nachhaltigkeit

IV.1	Ressourcen	111
IV.1.1	Der internationale Status der Antarktis	111
IV.1.2	Vorkommen mineralischer Rohstoffe in der Arktis	113
IV.1.3	Vorkommen und Potentiale von Energierohstoffen in der Arktis	113
IV.1.4	Biologische Rohstoffe in der Arktis	115
IV.2	Sozio-ökonomische Aspekte	117
IV.2.1	Antarktis	117
IV.2.2	Arktis	118
IV.3	Völkerrecht	123
IV.3.1	Rechtslage in der Antarktis	123
IV.3.2	Rechtslage in der Arktis	124
IV.3.3	Forschungsfelder	126
IV.4	Historische und Archäologische Forschung	127
IV.4.1	Nachlässe von Polarforschern	127
IV.4.2	Lebens und Arbeitsbedingungen	128
IV.4.3	Historische Wasserfahrzeuge	128

V Umsetzung

V.1	Infrastruktur und Technologien	133
V.1.1	Infrastruktur	133
V.1.2	Technologien	135
V.2	Integration in nat. und int. Forschungsprogramme	139
V.2.1	SCAR/IASC	139
V.2.2	European Polar Board	140
V.3	Nachwuchsförderung	141
V.3.1	DFG-Schwerpunktprogramm „Antarktisforschung“	141
V.3.2	Russisch-Deutscher Masterstudiengang - POMOR	141

V.3.3	APECS	142
--------------	--------------	------------

V.4	Wissenstransfer in die Gesellschaft	143
------------	--	------------

VI	Anhang
-----------	---------------

VI.1	Glossar	147
-------------	----------------	------------

VI.2	Liste der Abkürzungen	151
-------------	------------------------------	------------

VI.3	Beteiligte Autoren	153
-------------	---------------------------	------------

VI.4	Bildnachweise	155
-------------	----------------------	------------

Präambel

Die Polargebiete sind in den letzten Jahrzehnten zunehmend in das wissenschaftliche und öffentliche Interesse gerückt. Es ist z.B. klar geworden, dass Veränderungen in der Arktis sehr viel größere Auswirkungen auf das Klima von Europa haben als man noch vor zehn Jahren angenommen hat. Deutschland kann auf eine lange und erfolgreiche Tradition in der Erforschung der Arktis und Antarktis zurückblicken. Beginnend in der Mitte des 19. Jahrhunderts haben deutsche Forscher und Forscherinnen wichtige Beiträge geleistet, die international große Anerkennung finden. Anfang des 21. Jahrhunderts gehört Deutschland mit zu den führenden Staaten im Bereich der Polarforschung und kann auf eine 40-jährige kontinuierliche Präsenz in der Antarktis zurückblicken. Dies wurde möglich durch eine langfristige institutionelle Förderung der Bundesministerien für Bildung und Forschung (BMBF) und für Wirtschaft und Energie (BMWi), aber auch durch Projektförderungen von Bundesministerien, der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und durch EU-Programme. Eine besondere Stellung für die universitäre Antarktisforschung nimmt das DFG-Schwerpunktprogramm „Antarktisforschung mit vergleichenden Untersuchungen in arktischen Eisgebieten“ (SPP1158) ein, das 1981 als Schwerpunktprogramm „Antarktisforschung“ begonnen wurde.

Im internationalen Rahmen der Polarforschung ist Deutschland in alle relevanten Organisationen eingebunden. Deutschland ist Mitglied im Wissenschaftlichen Komitee für Antarktisforschung (Scientific Committee on Antarctic Research, SCAR) und im Internationalen Wissenschaftlichen Komitee für Arktisforschung (International Arctic Science Committee, IASC). Dazu hat das Präsidium der DFG im Jahr 1978 einen deutschen Landesausschuss SCAR eingerichtet und diesen im Jahr 1992 mit dem Beitritt der DFG in IASC zum Landesausschuss für Forschung in der Antarktis und Arktis erweitert. Das heutige „Nationalkomitee SCAR/IASC“ plant und koordiniert die Aktivitäten der deutschen Hochschulforschung auf dem Gebiet der Antarktis- und Arktisforschung zusammen mit dem Alfred-Wegener-Institut sowie den betreffenden staatlichen Einrichtungen. Mitglieder des Nationalkomitees vertreten Deutschland in den internationalen Gremien und nehmen dort z.T. führende Positionen ein (<http://www.scar-iasc.de>).

Im nationalen Rahmen existieren nur wenige umfassende Forschungsprogramme und Strategien zur Polarforschung. Das letzte offizielle Polarforschungsprogramm der Bundesregierung wurde 1996 publiziert (Polarforschung, Programm der Bundesregierung, BMBF 1996). Ein Hauptziel dieses Pro-

gramms war, die Haupteckdaten auf dem Gebiet der Polarforschung zusammenzufassen und die forschungspolitischen Ziele der nächsten Jahre zu setzen. Eine ähnliche Intention wurde (mit Beschränkung auf die Antarktis) mit der in 2002 erschienenen DFG-Denkschrift „Deutsche Forschung in der Antarktis, Wissenschaftlicher Fortschritt und Perspektiven“ verfolgt. Die Fortschritte der Polarforschung in den letzten Dekaden haben das Nationalkomitee für Polarforschung SCAR/IASC dazu veranlasst, eine dem Stand der heutigen Forschung entsprechende Polarforschungsagenda zu verfassen. Ähnlich wie das BMBF-Polarforschungsprogramm (1996) sollen sowohl ein möglichst allgemein verständlicher Überblick über den Stand der Forschung gegeben als auch die Forschungsfragen der kommenden 10-15 Jahre gestellt werden. Dabei soll speziell herausgestellt werden, wo die Stärken der deutschen Polarforschung liegen und wo Beiträge in besonderem Maße geleistet werden können. Die Hintergrundinformationen zu den wissenschaftlichen Themen sollen Entscheidungsträgern in der Politik und wissenschaftlichen Gremien als Referenz dienen und Argumente zur Förderung der Polarforschung geben können. Dies betrifft die Verlängerung des Schwerpunktprogramms „Antarktisforschung“, das z.Z. bis Ende 2018 befristet ist, aber auch das MARE:N-Programm des BMBF und große Investitionen wie der Bau des Forschungsseisbrechers „Polarstern 2“.

Die vorliegende Polarforschungsagenda ist in fünf Hauptteile gegliedert.

I) Die deutsche Polarforschung widmet sich der Geschichte und Organisation der deutschen Polarforschung, stellt die bestehende Infrastruktur und Technologien dar und erläutert die wissenschaftliche politische und logistische Einbindung im internationalen Rahmen. Die Ursprünge der deutschen Polarforschung gehen zurück auf erste Expeditionen in die Arktis und in die Sub-Antarktis in der Mitte des 19. Jahrhunderts. Historische Meilensteine der deutschen Antarktisforschung waren Südpolarexpeditionen von 1901-1903, 1911-1912 und 1938/39. Nach dem Zweiten Weltkrieg trat zunächst die Deutsche Demokratische Republik (DDR) 1974 dem Antarktisvertrag bei, 1976 erfolgte die Gründung der Georg-Forster-Station in der Antarktis und 1987 wurde die DDR in die Konsultativrunde der Antarktisvertragsstaaten aufgenommen. Die Bundesrepublik Deutschland (BRD) trat dem Antarktisvertrag 1979 bei, 1980 wurde das Alfred-Wegener-Institut (AWI) gegründet und 1981 wurde die Georg-von-Neumayer-Station in der Antarktis fertiggestellt. 1979 begann auch das Forschungsprogramm der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in der Antarktis mit der Gondwana-Station als logistisches Basislager. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) hat 1991 auf der antarktischen Halbinsel die German Antarctic Receiving Station (GARS) O'Higgins errichtet.

Für die Erforschung der Arktis ist als Meilenstein die Grönlandexpedition 1930-1931 unter der Leitung von Alfred Wegener zu nennen. Der Neubeginn der deutschen Arktisforschung begann Mitte der 1980er Jahre. Im Jahr 1991 wurde vom AWI die Koldewey-Station in Ny-Ålesund auf Spitzbergen errichtet, die seit 2003 als gemeinsame Forschungsbasis AWIPEV vom AWI zusammen mit dem französischen Institut Paul Emile Victor (PEV) betrieben wird. In der sibirischen Arktis finden seit 1998 Forschungsaktivitäten an der Forschungsstation „Samoylov“ statt, die von der Russischen Akademie der Wissenschaften betreut wird. Neben den Forschungsstationen in der Arktis und Antarktis bilden der Forschungs- und Versorgungseisbrecher FS Polarstern (Inbetriebnahme 1982) und die beiden Forschungsflugzeuge Polar 5 und Polar 6 wichtige Forschungsplattformen. Im technischen und logistischen Bereich besteht eine enge internationale Zusammenarbeit.

Für eine erfolgreiche Polarforschung sind noch weitere Programme, Infrastrukturen und Technologien notwendig, insbesondere Messprogramme in Form von zielgerichteten Feldkampagnen und Langzeitmessprogrammen, Satellitenbeobachtungsprogramme und Fernerkundungsmethoden als wichtige Basis für die Beobachtung von kurz- und langfristigen Veränderungen und numerische Modellierung des polaren Klimasystems mit dem Ziel, Prozesse zu verstehen, Umweltbedingungen der Vergangenheit zu rekonstruieren und Entwicklungen in der Zukunft vorherzusagen.

II) Die Polargebiete im globalen Wandel befasst sich mit den z.T. drastischen Veränderungen des polaren Klima- und Ökosystems im Rahmen des Klimawandels der letzten Dekaden. Dies betrifft alle Komponenten des Klimasystems und ist in der Arktis besonders ausgeprägt, aber auch in der Antarktis sind grundlegende Veränderungsprozesse zu beobachten. Um Aussagen für die künftige Entwicklung machen zu können, ist ein vertieftes Verständnis von Prozessen und deren Entwicklungen in der Vergangenheit unerlässlich.

Die großen Inlandeismassen der Antarktis und Grönlands binden zusammen den größten Teil des Süßwassers der Erde und ihre Dynamik ist entscheidend für den globalen Meeresspiegelanstieg. Das Meereis der polaren Ozeane ist eine wichtige Größe für den globalen Energiehaushalt und hat große Auswirkungen auf den Ozean, die Atmosphäre und Ökosysteme. Die polaren Ozeane sind Schlüsselregionen für die Speicherung von Kohlendioxid und treiben die globale Ozeanzirkulation an. Die in den Polarmeeren ablaufenden Prozesse sind mitbestimmend dafür, wie sich das Weltklima während der kommenden Jahrzehnte bis Jahrhunderte entwickeln wird. Permafrostprozesse spielen ebenfalls eine entscheidende Rolle für den Kohlenhaushalt, aber auch für Erosionsprozesse und die Stabilität von Infrastrukturen. Die polare Atmosphäre koppelt die Polargebiete mit den mittleren Breiten über großskalige atmosphärische Zirkulationen. Die Wechselwirkungen zwischen der Atmosphäre, Ozean und Meereis sind von entscheidender Bedeutung für die polaren Klimasysteme. Mit dem rezenten und dem zu erwartenden Klimawandel sind massive Bedrohungen der Biodiversität und der Funktionalität polarer Ökosysteme verbunden, Veränderungen der Ökosysteme können aber auch auf das Klimasystem rückkoppeln.

III) Die Polargebiete im Erdsystem umfasst die Veränderungen in geologischen und paläoklimatologischen Zeitskalen sowie die Bedeutung der Polargebiete für die Astronomie. Die beiden Polargebiete unterscheiden sich fundamental in ihrem geologischen Bau und der Zusammensetzung ihres Untergrundes. Während im Zentrum der Arktis mit dem Nordpolarmeer ein von Kontinenten umgebener Ozean liegt, befindet sich die Antarktis als von ozeanischem Raum vollständig umschlossener Kontinent am Südpol der Erde. Zudem liegt die Antarktis zu etwa 99% unter Eis, so dass der geologische Kenntnisstand auf lediglich ungefähr 1% des Kontinents beruht. Gleichzeitig bilden die Eisschilde von Grönland und der Antarktis und Sedimente wertvolle Klimaarchive, die einen Rückblick in die Erdgeschichte erlauben und damit zum Verständnis der zukünftigen Klimaentwicklung beitragen. Die Lebewesen der Polarregionen haben sich über Jahrmillionen an die extremen Bedingungen der Polarregionen angepasst. Diese biologischen Prozesse und Anpassungsmechanismen in der Vergangenheit sind bedeutsam für das Verständnis der Veränderungen der polaren Ökosysteme im Rahmen des globalen Wandels. Die Polargebiete bieten auch einzigartige Bedingungen für Astrophysik, da hier Umweltbedingungen vorgefunden werden, mit denen sonst schwierig zu realisierende Beobachtungen ermöglicht sind.

IV) Die Polargebiete: Ressourcen und Nachhaltigkeit befasst sich mit biologischen, mineralischen und energetischen Ressourcen, sozio-ökonomischen und völkerrechtlichen Aspekten sowie der historischen und archäologischen Forschung. Klimawandel und politische Veränderungen haben besonders im Nordpolargebiet die Frage nach möglichen Rohstoffvorkommen und ihrer Nutzung zunehmend in den Mittelpunkt des Interesses gerückt. Insbesondere eröffnet der Rückgang des arktischen Meereises Perspektiven für eine verstärkte Exploration von Rohstoffen und für neue Transportwege durch das Nordpolarmeer, aber auch für den Zugang zu neuen Fischereigründen. Damit stellen sich in der Arktis und der Antarktis neue Fragen wirtschaftlicher, sozialer und politischer Art, die auch völkerrechtliche Regelungen betreffen und das Zusammenwirken der Natur-, Rechts- und Sozialwissenschaften erfordern. Basierend auf der Geschichte der Polarforschung trägt die historische und archäologische Forschung dazu bei, Motive für die Beteiligung an der Polarforschung zu verstehen und Ergebnisse früherer Expeditionen so aufzubereiten, dass sie von der heutigen Forschung genutzt werden können.

V) Umsetzung widmet sich den zukünftigen Notwendigkeiten für Infrastruktur und Technologien, der Integration der deutschen Polarforschung in nationale und internationale Programme, der Nachwuchsförderung und dem Wissenstransfer in die Gesellschaft. Die deutsche Polarforschung hat in den letzten Dekaden ein beachtliches internationales Ansehen erlangt. Die zukünftigen und aktuellen Forschungsfragen erfordern ein langfristiges Engagement der deutschen Forschung in den Polargebieten. Dazu gehört die langfristige Bereitstellung von Forschungsinfrastrukturen und der institutionellen Forschung, aber auch die Drittmittelförderung von Projekten. Die Fortführung von Langzeitbeobachtungen an Observatorien wie den Stationen Neumayer (Antarktis) und AWIPEV (Svalbard) wird weiterhin ein wichtiger Beitrag im Rahmen internationaler Netzwerke sein.

Neben der institutionellen Forschung leisten Universitäten bedeutende Beiträge, die in Zukunft noch verstärkt werden sollten. Dazu muss der Zugang zur deutschen Infrastruktur zur Polarforschung (v.a. Schiffe, Flugzeuge, Stationen, Rechnerinfrastruktur) für Universitäten gewährleistet werden. Wichtige Instrumente der Projektförderung von Universitäten sind BMBF-Programme und das Schwerpunktprogramm SPP1158 „Antarktisforschung mit vergleichenden Untersuchungen in der Arktis“, das in großem Maße der Nachwuchsförderung dient und damit dazu beiträgt, die kommende Generation von Polarforschern auszubilden.

Günther Heinemann

(Vorsitzender Nationalkomitee SCAR/IASC)

Das Reaktionsteam

M. Braun, T. Brey, D. Damaske, G. Heinemann (Koordination), M. Melles, M. Rhein, S. Willmes

(Liste der Leitautoren und Koautoren im Anhang)



Die deutsche Polarforschung

I.1	Geschichte und Organisation	13
I.2	Werkzeuge	17
I.2.1	Infrastruktur und Logistik	
I.2.2	Technologien	
I.3	Einbindung	27
I.3.1	Wissenschaftliche und politische Einbindung	
I.3.2	Logistische Einbindung	

I.1. Geschichte und Organisation

Die Ursprünge der deutschen Polarforschung gehen zurück auf August Petermann und Georg von Neumayer. Petermann propagierte das offene Polarmeer in der Arktis und damit die Möglichkeit, mit einem Schiff zum Nordpol vorzudringen. Die beiden von ihm initiierten deutschen Nordpolarexpeditionen (1868, 1869-1870) nach Spitzbergen und zur Ostküste Grönlands konnten zwar keinen Weg in den Arktischen Ozean entdecken, aber den riesigen Franz-Joseph Fjord in Grönland. Neumayer hingegen setzte sich für die Aussendung einer Südpolarexpedition ein, um den letzten weißen Fleck der Erde zu erforschen. Als Mitbetreiber des ersten internationalen Polarjahres (1882-1883) organisierte er nicht nur eine Expedition nach Baffin Island in der kanadischen Arktis, sondern auch eine auf die subantarktische Insel Südgeorgien.



Abbildung I.1.1: Links: Die Entdeckung des Franz Joseph-Fjordes an der Ostküste Grönlands, 1869. Quelle: Payer 1876, S. 641. Rechts: Die deutsche Station am Kingua-Fjord (Baffin Island, Kanada) während des ersten Internationalen Polarjahres, 1882-1883. Quelle: Neumayer 1891, S. 60.

Um die Wende ins 20. Jahrhundert war Erich von Drygalski der herausragendste deutsche Polarforscher, der 1892-1893 an der Westküste Grönlands überwintert hatte, um zur Erklärung der Vereisung der Norddeutschen Tiefebene erstmals vor Ort Daten für seine Theorie der Gletscherbewegung zu erheben. Später leitete Drygalski die erste deutsche Südpolarexpedition (1901-1903) auf dem ersten deutschen Polarforschungsschiff „Gauss“. Der Weg führte über die von Neumayer propagierte Rou-

te von den Kerguelen im Südindischen Ozean nach Süden, wo das Schiff am Polarkreis für ein Jahr ortsfest eingefroren wurde. Die umfangreichen biologischen Ergebnisse der Expedition stellten für die damalige Zeit einen wissenschaftlichen Meilenstein dar. Wilhelm Filchners privat finanzierte Deutsche Antarktische Expedition (1911-1912) entdeckte das Filchnerschelfeis, bevor die „Deutschland“ im Weddellmeer festfror. Die während der Drift ein Jahr lang gemessenen meteorologischen Verhältnisse der hohen Luftschichten waren damals einzigartig.

Mit der Entwicklung des Zeppelins ergaben sich ganz neue Forschungsmöglichkeiten. Die deutsche arktische Zeppelinexpedition (1910) führte 1911 zur Einrichtung eines Observatoriums in der Adventbai, das 1912 nach Ebeltoftthamna (Krossfjord) verlegt wurde und dort bis 1914 mit jährlich wechselnden Mannschaften in Betrieb war. Die Grönlandexpedition (1930-1931) unter der Leitung von Alfred Wegener stellte mit ihren drei Stationen zur gleichzeitigen Messung der Wetterbedingungen über der Eiskappe und der seismischen Eisdickenmessung einen weiteren Meilenstein in der Polarforschung dar. Die Realisierung einer Forschungsfahrt mit einem Luftschiff geschah durch die Internationale Studiengesellschaft zur Erforschung der Arktis mit Luftfahrzeugen (Aeroarctic) mit Sitz in Berlin. Die Organisation war schon ähnlich aufgebaut wie später SCAR. Im Juli 1931 fand die Fahrt des LZ 127 „Graf Zeppelin“ in die russische Arktis statt, bei der neben meteorologischen Messungen unter und über dem Luftschiff auch photogrammetrische Aufnahmen zur Erstellung von detaillierten Landkarten gemacht wurden. Während des anschließenden zweiten Internationalen Polarjahres (1932-1933) beteiligte sich Deutschland zwar an der Organisation, aber eigene Expeditionen in die Arktis waren aus finanziellen Gründen nicht möglich.

Die dritte Deutsche Antarktisexpedition 1938/39 an Bord des Katapultschiffes „Schwabenland“ diente der Vorbereitung einer Besitzergreifung in der Antarktis zur Sicherung des neuen deutschen Walfangs. Das entdeckte Neuschwabenland wurde mit den Dornier Wal-Flugzeugen „Boreas“ und „Passat“ zur Erstellung einer Landkarte erfolgreich luftphotogrammetrisch erfasst. Die Expedition glich schon heutigen Sommerkampagnen mit routinemäßigem Flugprogramm einschließlich lokaler Flugwettervorhersage. Nach dem Zweiten Weltkrieg kam die Polarforschung erst zögerlich wieder in Gang und auch diesmal gab es keine Finanzierung für deutsche Polarexpeditionen während des Internationalen Geophysikalischen Polarjahres (1957-1958), heute als Drittes Polarjahr gezählt. Ab 1959 konnten jedoch Wissenschaftler der Deutschen Demokratischen Republik (DDR) an sowjetischen Antarktisexpeditionen als Gastwissenschaftler teilnehmen. Ihre Beteiligung wurde vom Nationalkomitee für Geodäsie und Geophysik der DDR organisiert. 1969 übernahm das Zentralinstitut für Physik der Erde in Potsdam die Organisation der Antarktisforschung und 1974 trat die DDR dem Antarktisvertrag bei. 1976 erfolgte die Gründung der Georg-Forster-Station nahe der russischen Station Nowolasarewskaja in der Schirmacheroase. Seit 1985 fanden dort Ozonsondierungen der Atmosphäre statt. 1987 wurde die DDR schließlich in die Konsultativrunde der Antarktisvertragsstaaten aufgenommen.



Abbildung I.1.2: Links: Wissenschaftliche Einrichtungen an der Überwinterungsstation der „Gauss“ in Kaiser Wilhelm II Land (Antarktis), 1902. Quelle: Privatbesitz Mördel. Rechts: Pilotballonaufstieg im Weddellmeer (Antarktis) während der Filchner-Expedition, 1912. Quelle: Privatbesitz Joester.

Der Beitritt der Bundesrepublik Deutschland (BRD) zum Antarktisvertrag im Jahr 1979 führte zu einem groß angelegten Polarforschungsprogramm. Mit der Gründung des Alfred-Wegener-Instituts für Polarforschung (AWI) im Jahr 1980 in Bremerhaven, der Fertigstellung der Georg-von-Neumayer-Station auf dem Ekström-Schelfeis in der Antarktis im März 1981 und der Indienstellung des eisbrechenden Forschungs- und Versorgungseisbrechers FS "Polarstern" im Dezember 1982 waren die Voraussetzungen für den Konsultativstatus der BRD erfüllt. Im Rahmen dieser Entwicklung begann die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) bereits in der Sommersaison 1979/80 mit dem GANOVEX-Programm (German Antarctic North Victoria Land Expedition) langfristig ausgerichtete landgestützte geologische und geophysikalische Feldarbeiten. Dafür wurde im Nord-Viktoria-Land im Januar 1980 eine erste Biwak-Hütte am Lillie Glacier, die Lillie-Marleen-Hütte, errichtet. Zusammen mit dem an den Untergang der "GOTLAND II" und den Abbruch der Expedition GANOVEX II (1981/82) erinnernden Gedenkstein wurde die Lillie-Marleen-Hütte im Jahr 2005 auf der XXVIII. Konsultativtagung der Antarktis-Vertragsstaaten in Stockholm in die Liste der "Historic Sites and Monuments" aufgenommen. Im Rahmen einer Förderung durch das Bundesforschungsministerium wurde 1989 bis 1991 auf der antarktischen Halbinsel die German Antarctic Receiving Station GARS O'Higgins errichtet, die nunmehr vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Kooperation mit dem Bundesamt für Geodäsie und Kartographie (BKG) betrieben wird.

Durch die Öffnung der arktischen Regionen für die internationale Gemeinschaft Mitte der 1980er Jahre wurden die deutschen Forschungsprogramme um arktische Fragestellungen und die Einrichtung von entsprechenden Forschungsstationen erweitert. Die 1991 gegründete Koldewey-Station in Ny-Ålesund auf Spitzbergen wird seit 2003 als umfangreiche Arktis-Forschungsbasis AWIPEV vom AWI zusammen mit dem französischen Institute Paul Emile Victor (PEV) betrieben. Die 1998 errichtete deutsch-russische Forschungsstation Insel Samoylov widmet sich im Lenadelta hauptsächlich der Permafrostforschung. Nach der Wende wurde 1992 die bisher zweigleisig verlaufende deutsche Polarforschung in Form der Forschungsstelle Potsdam im AWI, heute Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, zusammengeführt. Heute ist das AWI nationales Zentrum für die deutsche Arktis- und Antarktisforschung. Es nimmt die wissenschaftlichen Aufgaben einer multidisziplinären Polar- und Meeresforschung, die Koordination der deutschen Polarforschung und deren logistische Unterstützung im nationalen und internationalen Rahmen wahr. Zu den vom AWI betriebenen Forschungsplattformen gehören neben der FS Polarstern die zwei Forschungsflugzeuge Polar 5 und Polar 6 und derzeit zwei permanent und drei nur während der Sommermonate besetzte Forschungsstationen in beiden Polargebieten, die in der Regel über das AWI für unterschiedlich ausgerichtete Forschungsprojekte zur Verfügung stehen.

Die deutsche Polarforschung wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) sowie vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) langfristig gefördert. Drittmittel werden von Bundesministerien für Verbundprojekte, von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für zeitlich begrenzte Projekte und von EU-Programmen für internationale Projekte zur Verfügung gestellt. Eine besondere Stellung für die universitäre Antarktisforschung nimmt hier das DFG Schwerpunktprogramm *Antarktisforschung mit vergleichenden Untersuchungen in arktischen Eisgebieten* ein, das 1981 als Schwerpunktprogramm „Antarktisforschung“ begonnen wurde. Anfang des 21. Jahrhunderts gehört Deutschland mit zu den führenden Staaten, die eine aufwändige Polarforschung betreiben und im Rahmen der Projektförderungen sowie der institutionellen Förderung bedeutsame Beiträge zum Vierten Internationalen Polarjahr 2007/08 geleistet hat. Im Jahr 2016 kann die deutsche Polarforschung auf den Beginn einer 40-jährigen kontinuierlichen Präsenz in der Antarktis zurückblicken. Heute erinnert eine Gedenktafel für die Georg-Forster-Station in der Schirmacher-Oase an den Standort der ersten permanent besetzten deutschen Forschungsstation, die nach der Wende aufgelöst und bis 1996 völlig abgetragen wurde. Dieser Standort und die Gedenktafel wurden auf der XXXVI. Konsultativtagung der Antarktis-Vertragsstaaten in Brüssel 2012 als Antarctic Historic Site anerkannt.



I.2. Werkzeuge

I.2.1 Infrastruktur und Logistik

Forschungs- und Versorgungseisbrecher FS Polarstern

Der Forschungs- und Versorgungseisbrecher FS Polarstern ist im internationalen Vergleich eine der herausragenden Forschungsplattformen für die eisbedeckten Polarmeere. Seit ihrer Indienststellung im Jahr 1982 führten 102 Expeditionen in die Arktis und 100 Expeditionen in die Antarktis. Während ihres ersten Vorstoßes in das zentrale Nordpolarmeer konnte sie 1987 bis zum Gakkel-Rücken vordringen und erreichte insgesamt vier mal den Nordpol (1991, 2001, 2011 und 2015).



Abbildung I.2.1: Foto: Das deutsche Forschungsschiff Polarstern in der zentralen Arktis, Aufnahme von der Sommer-Expedition 2015, Foto: Alfred-Wegener-Institut / Mario Hoppmann (CC-BY 4.0). Karte: FS Polarstern führte seit ihrer Indienststellung 1982 mehr als 200 Expeditionen in den nördlichen Atlantik, das zentrale arktische Becken und in den südlichen Ozean durch. Karte: Antonie Haas / Alfred-Wegener-Institut.

Als bislang einziges Forschungsschiff war sie bei den sogenannten Winterexperimenten 1986, 1992, 2006 und 2013 sogar während der Polarnacht im Packeis des Weddellmeeres unterwegs. Zur Ver- und Entsorgung der Neumayer-Station III werden in jedem Jahr etwa 500 t Fracht einschließlich Treibstoffe an der Eiskante des Ekström-Schelfeises umgeschlagen. FS Polarstern ist im Mittel an 310 Tagen eines jeden Jahres auf See und bietet multidisziplinäre Forschungsmöglichkeiten für jeweils 50 Wissenschaftler, die von 45 Besatzungsmitgliedern unterstützt werden. Labore und Forschungsgeräte sind für meteorologische, ozeanografische, chemische, biologische und geowissenschaftliche Arbeiten ausgelegt. An Bord können Großgeräte wie z.B. tiefseetaugliche, ferngelenkte Unterwasserfahrzeuge eingesetzt werden. Die internationale Nachfrage zur Nutzung des Schiffes ist groß. 12.840 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus der ganzen Welt haben seit Indienstellung bis einschließlich 2016 an Bord erfolgreich gearbeitet und trugen mit ihren Forschungsergebnissen wesentlich zum heutigen Verständnis der Polarmeere und des Klima- und Erdsystems bei.

Forschungsflugzeuge (AWI)

Bereits 1983 setzte das AWI Flugzeuge vom Typ Dornier 228-101 für die Polarforschung ein. Mehr als 25 Jahre waren die Polar 2 und die Polar 4 regelmäßig im Einsatz und sind jetzt durch leistungsfähigere Flugzeuge vom Typ Basler-Turbo (BT-67) ersetzt worden (Polar 5, seit 2007 und Polar 6, seit 2011).

Die Flugzeuge vom Typ Basler-Turbo (BT-67) verfügen über ein kombiniertes Ski-Radfahrwerk, leistungsfähigere Triebwerke, moderne Avionik, Enteisungssysteme und können eine Nutzlast bis zu 3 t aufnehmen. Die weiterentwickelten Messkonfigurationen für geophysikalische und glaziologische fernerkundende Flächenbefliegungen als auch für meteorologische und luftchemische in-situ Messungen können je nach wissenschaftlicher Zielsetzung an Bord eingebaut werden. Beide Maschinen sind regelmäßig, jeweils in den Sommermonaten, in der Arktis und Antarktis im Einsatz und erbringen im Mittel eine Flugleistung von 400 bis 600 Stunden im Jahr. Die Reichweite bis zu 3000 km und die Fähigkeit, an den bis zu 4100 m hoch gelegenen Stationen auf dem Inlandeis der Antarktis starten zu können, ermöglichen großräumige Flugmissionen über nahezu allen Regionen des antarktischen Inlandeises.



Abbildung I.2.2: Das Forschungsflugzeug Polar 6 steht vor der Neumayer-Station in der Antarktis und wird für den Flug vorbereitet. Foto: Alfred-Wegener-Institut / Thomas Steuer (CC-BY 4.0)

In der Arktis werden die wissenschaftlichen Flugmissionen von Spitzbergen, Grönland oder Flugplätzen in der kanadischen Arktis aus durchgeführt und von den jeweils zuständigen nationalen Behörden der Antarktis-Anrainerstaaten, häufig Kanada und Grönland, genehmigt.

In der Antarktis können die wissenschaftlichen Flugmissionen der AWI-Flugzeuge in den Dromlan-Flugbetriebs eingebettet, in dessen Struktur flugtechnische und Sicherheitsanforderungen organisiert sind (siehe Dromlan-Luftbrücke).

Forschungsstationen in der Antarktis

In der Antarktis werden vom AWI die ständig besetzte Neumayer-Station III auf dem Ekström-Schelfeis und als Sommerstation die Kohlen-Station auf dem Inlandeis betrieben. Eine weitere Plattform, das Dallmann-Labor, wird in Zusammenarbeit mit dem argentinischen Antarktisprogramm an der Carlini-Station betrieben. Darüber hinaus halten die BGR die Gondwana-Station als logistisches Basislager

und das DLR die ganzjährig besetzte Station GARS (German Antarctic Receiving Station) O'Higgins in direkter Nachbarschaft zu der chilenischen Station General Bernardo O'Higgins vor.

Forschungsstationen AWI

Die Neumayer-Station III (70°40,28' S; 08°16,60' W am 07. August 2015) ist die permanent besetzte deutsche Forschungsstation des AWI und der zentrale Standort der deutschen Polarforschung in der Antarktis. Sie wurde am 20. Februar 2009 nach einer Bauzeit von 7 Monaten verteilt über zwei antarktische Sommerperioden in Betrieb genommen. Der Bau dieser Station war logistisch das bislang aufwändigste Vorhaben in der Geschichte der deutschen Antarktisforschung. Sie ist die dritte und größte Station in Folge, die auf dem Ekström-Schelfeis gebaut wurde. Das Bauwerk besteht aus einer Sektion unterhalb und einer Plattform oberhalb der Schneeoberfläche, das eine geschützte Fläche von ca. 4.900 m² umfasst. Die ca. 2.300 t schwere Anlage steht auf hydraulischen Stützen, mit denen das Bauwerk einmal im Jahr als Ganzes angehoben und so an der ständig wachsenden Schneeoberfläche gehalten wird. Dieses innovative Konzept gewährleistet im Gegensatz zu den Vorgängerstationen eine nachhaltige Betriebszeit unabhängig von der Schneeakkumulation und dem Fließen des Schelfeises. Die Station verfügt über eine moderne Ausstattung für Forschung und Logistik und bietet großzügige Lebens- und Arbeitsbedingungen.



Abbildung I.2.3: Links: Die deutsche Antarktis-Forschungsstation Neumayer-Station III, Foto: Alfred-Wegener-Institut / Stefan Christmann (CC-BY 4.0). Rechts: Die Kohnen-Station, Foto: Reinhard Sibbers / Alfred-Wegener-Institut.

Seit 1981 erfüllen die in Folge gebauten Stationen auf dem Ekström-Schelfeis die politischen, wissenschaftlichen und logistischen Verpflichtungen Deutschlands als Konsultativstaat im Antarktischen Vertragssystem. Wissenschaftlicher Schwerpunkt sind die 1981 begonnenen Langzeitbeobachtungen der Observatorien für Meteorologie, Luftchemie, Geophysik und später auch Hydroakustik. Die erhobenen Daten werden – zum Teil in Echtzeit – in die entsprechenden internationalen Netzwerke eingegeben und weltweit für Forschung und Monitoring genutzt. Seit 2003 erfüllt die Station eine besonders wichtige politische Daueraufgabe. Im Auftrag des Auswärtigen Amtes betreiben das AWI und die BGR gemeinsam die Infraschallstation I27DE, die zu dem weltweit installierten Netzwerk zur Überwachung des Vertrages über das umfassende Verbot von Nuklearversuchen (Comprehensive Test Ban Treaty, CTBT) gehört. Die Messdaten werden kontinuierlich mit wenigen Sekunden Zeitverzögerung an das internationale Datenzentrum der CTBT-Organisation nach Wien übertragen.

Die Neumayer-Station III dient gleichzeitig als logistische Basis für die Durchführung wissenschaftlicher Projekte auf dem Ekström-Schelfeis, für große Traversen über das Inlandeis und die Versorgung der Kohnen-Station. Für den wissenschaftlichen und den logistischen Dromlan-Flugbetrieb werden an der Station die operationellen Flugwetter-Beratungen herausgegeben. Während der Überwinterung arbeiten 4 Wissenschaftler, 3 Techniker, ein Koch und ein Arzt an der Station. In der Sommersaison können bis zu 60 Wissenschaftler und Techniker zusätzlich untergebracht werden. FS Polarstern versorgt die Station in jeder Sommersaison. Das gesamte Personal und spezielle Ausrüstungen werden über

die Dromlan-Luftbrücke von Kapstadt zur Station und zurück transportiert.

Die Kohnen-Station (75°00'S, 00°04'O, 2892 m ü. NN), etwa 550 km südöstlich von der Neumayer-Station III entfernt, wurde vom AWI als logistische Basis für die Eiskernbohrungen im Rahmen des europäischen Projektes EPICA (European Project for Ice Coring in Antarctica) im Januar 2001 eingerichtet und in Betrieb genommen. Auf der anhebbaren Plattform sind in neun Modulen mit einer Gesamtfläche von ca. 160 m² Anlagen und Einrichtungen für den technischen Stationsbetrieb untergebracht. Die Bohreinrichtungen sind in einer eigens dafür in den Schnee gebauten Behausung, dem sogenannten Trench, für die Bohrungen und Lagerung der Eiskerne untergebracht. Bis zum 16. Januar 2006 wurde ein 2774 m langer Eiskern gezogen. Seit Abschluss von EPICA wird die Station als Sommerbasis für glaziologische, meteorologische und geophysikalische Feldstudien auf dem Inlandeis und als logistische Basis für weiträumige Flugmissionen über der inneren Antarktis genutzt. Die Kohnen-Station kann bis zu 20 Personen beherbergen. Die Versorgung erfolgt über Land mit Fahrzeugen und Schlitten der Neumayer-Station III. Eine Überfahrt entlang der 757 km langen Strecke, bei der mit GPS navigiert wird, dauert 9 bis 14 Tage. Wissenschaftler und Techniker gelangen in der Regel mit Flugzeugen (Dromlan), mit denen auch spezielle Ausrüstungen sowie Eiskerne und Schneeproben transportiert werden, zur Station und zurück.

Das DallmannLabor (62°14'S, 58°40'W) eröffneten das AWI und das Instituto Antártico Argentino (IAA) im Januar 1994 an der argentinischen Jubany Station, jetzt Carlini-Station, auf King George Island. Die Carlini-Station ist ganzjährig, das Dallmann-Labor nur von Oktober bis März besetzt. Zugang und Versorgung werden in Zusammenarbeit mit dem argentinischen Programm koordiniert. Das Labor war seinerzeit die erste international betriebene Forschungseinrichtung in der Antarktis, die gemeinsam von Argentinien, Deutschland und den Niederlanden unterhalten und schrittweise ausgebaut wurde. Das Labor verfügt über 14 Wohn- und Arbeitsplätze, vier Labore, Werkstatt und Lager, einen Aquariencontainer, Tauchereinrichtungen und einigen Iglu-Hütten. Biologen und Geowissenschaftler untersuchen in eisfreien Gebieten und im küstennahen Flachwasser die Einwirkungen regionaler Klimaänderungen auf marine und terrestrische Organismen. An den meisten Projekten sind Wissenschaftler aus Deutschland, Argentinien und den Niederlanden beteiligt.

Dromlan Luftbrücke

Die Luftbrücke von Kapstadt in die Antarktis, das Dronning Maud Land Air Network (Dromlan), ist ein international kooperatives Projekt, das von Deutschland und zehn weiteren Staaten organisiert und unterhalten wird (vgl. Kap. I.3.2). Für die interkontinentale Flugverbindung von Kapstadt in die Antarktis und zurück (ca. 4500 km) werden in den Sommerperioden von November bis Februar zehn bis zwölf interkontinentale Flüge mit einem Frachtflugzeug Ilyushin IL-76TD durchgeführt.



Abbildung I.2.4: Landung einer Ilyushin-76TD des Dromlan Netzwerks bei der Station Novo, vgl. Kap. I.3.2, Foto: Alexey Nagaev.

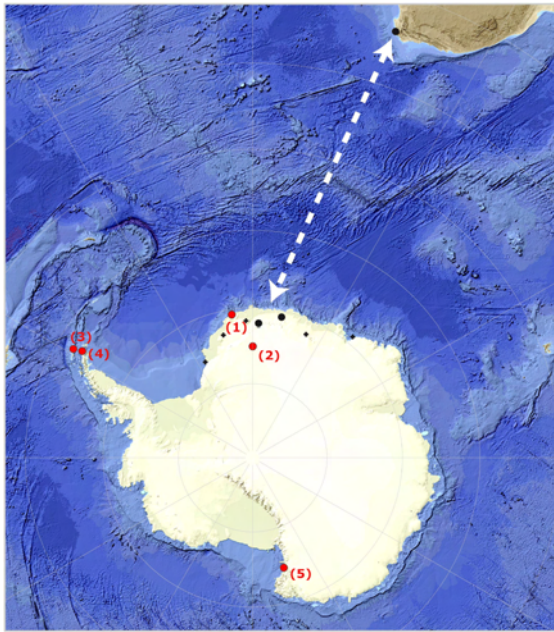


Abbildung I.2.5: Topographische Karte der Antarktis mit den Positionen der deutschen Stationen (rot), Neumayer-Station III (1), Kohnen-Station (2), Dallmann-Labor (3), GARS O'Higgins (4), Gondwana-Station (5); über die international organisierte Luftbrücke (Dronning Maud Land Air Network) sind die AWI-Stationen (1) und (2) sowie die Stationen der Dromlan-Partner während des Polarsommers mehrmals zu erreichen. Diese sind von West nach Ost die beiden Station Troll (Norwegen) und Novolazarevskaya (Russland) mit den Blaueis-Pisten für die Langstrecken Transportflugzeuge (schwarze Punkte) und die Stationen Halley VI (United Kingdom), Aboa (Finnland), Wasa (Sweden), Neumayer III und Kohnen (Germany), SANA IV (South Africa), Maitri (India), Princess Elizabeth Antarctica (Belgium), Syowa (Japan) mit Schneepisten für kleinere Flugzeuge mit Skifahrwerken (schwarze Kreuze). Karte: Antonie Haas / Alfred-Wegener-Institut.

An den Stationen Novolazarevskaya (Novo Airbase) und Troll werden dafür geeignete Landebahnen vorgehalten. Die Flüge zu den Stationen Halley (GB), Aboa (Finnland), Wasa (Schweden), Neumayer III und Kohnen (Deutschland), SANA IV (Südafrika), Troll (Norwegen), Maitri (Indien), Novolazarevskaya (Russland), Princess Elizabeth (Belgien) und Syowa (Japan) werden mit kleineren Flugzeugen bedient. Für die antarktischen Inlandflüge zu den einzelnen Stationen werden kleinere Flugzeugen mit Ski-Fahrwerk eingesetzt, die mit ihren Skifahrwerken auf den Schneepisten an den verschiedenen Forschungsstationen und im Feld landen können (vgl. Abb. 1.2.2). Die Koordination und Durchführung des interkontinentalen und intra-kontinentalen Flugbetriebes übernimmt ein dafür bestellter Operator, der mit den Dromlan-Partnern kontinuierlich zusammenarbeitet. Diese logistische Kooperation für die Polarforschung wurde unter wesentlicher Mitwirkung des AWI entwickelt und besteht seit der Sommersaison 2003/2004. Für das deutsche Antarktisprogramm ist die Luftbrücke ein fester Bestandteil der Logistik, um den umfangreichen wissenschaftlichen und logistischen Betrieb an der Neumayer-Station III und an der Kohnen-Station während des Polarsommers in jeder Saison sicher zu stellen. Der damit seit mehr als 10 Jahren während des Polarsommers mög-

lich gewordene flexible Zugang zu den deutschen Stationen und denen der Dromlan-Partner ist ein besonderes logistisches Alleinstellungsmerkmal. Die Durchführung wissenschaftlicher Vorhaben im nationalen und internationalen Rahmen an beiden Stationen, Einsatz der Forschungsflugzeuge sowie Feldarbeiten auf dem Inlandeis können logistisch effizient betreut und durchgeführt werden.

Über diese Luftbrücke gelangen in jeder Saison etwa 250 bis 300 Wissenschaftler und Techniker mit ca. 35 bis 40 t Fracht zu ihren Stationen oder Einsatzgebieten im Feld. Das gesamte Personal für die Neumayer-Station III und die Kohnen-Station, etwa 50 bis 60 Personen und ca. 12 t Fracht in jeder Sommersaison, werden auf diesem Weg transportiert. Mit dieser Luftbrücke ist für alle Beteiligten eine nie dagewesene Flexibilität für den Personaleinsatz, die Versorgung und die Durchführung wissenschaftlicher Projekte für möglich. Dazu gehört auch die jederzeit mögliche Option für Evakuierungsflüge bei medizinischen Notfällen.

Forschungsstationen BGR und DLR

Die Gondwana-Station (74°38'S, 164°13'O) der BGR liegt am Gerlach Inlet der Terra-Nova-Bucht des Rossmeeres. Sie wurde im Januar 1983 als Biwak-Hütte errichtet und in der Saison 1988/89 als Sommerstation ausgebaut. In der Nachbarschaft befinden sich die italienische Mario Zucchelli und neuerdings die koreanische Jang Bogo Station. Die Gondwana-Station ist per Schiff oder mit Flugzeugen, die auf dem Meereis in der Terra-Nova-Bucht landen können, zu erreichen. Bis zur Saison 2009/10 war die Station die logistische Basis für die geologischen Feldarbeiten im Rahmen der GANOVEX-Expeditionen im Nord-Viktoria-Land. Während der Saison 2015/2016 wurden umfassende Renovierungs- und Modernisierungsarbeiten durchgeführt. Damit steht die Station weiterhin im vollen Umfang als Basisla-

ger für umfangreiche Feldeinsätze zur Verfügung. Neben der Gondwana-Station unterhält die BGR die Lillie-Marleen-Hütte am Mt. Dockery in der Everett Range des Transantarktischen Gebirges ($71^{\circ}12'S$, $164^{\circ}31'O$). Die terrestrischen geowissenschaftlichen Arbeiten der BGR in Nord-Viktoria-Land und anderen Regionen wurden und werden in enger wissenschaftlicher und logistischer Kooperation mit verschiedenen Partnern anderer Nationen durchgeführt.



Abbildung I.2.6: Links: Gondwana-Station, Foto: A. Läufer (BGR). Rechts: Das 9-m-Antennensystem der GARS O'Higgins Station. Foto: DLR.

Seit 1991 betreibt das DLR in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Kartografie und Geodäsie (BKG) die Antarktisstation GARS O'Higgins (German Antarctic Receiving Station) in direkter Nachbarschaft zu der chilenischen Antarktisstation General Bernardo O'Higgins ($63^{\circ}19'S$, $57^{\circ}54'W$). Der logistische Betrieb wird, soweit erforderlich, mit dem chilenischen Antarktisprogramm koordiniert. Zunächst nur während spezieller Messperioden genutzt, ist die Station seit Anfang 2010 ganzjährig in Betrieb. Wichtigstes wissenschaftliches Instrument ist eine 9-m-Parabolantenne, die sowohl für den Empfang umfangreicher Erdbeobachtungsdaten europäischer und deutscher Satellitenmissionen als auch für geodätische Radioteleskop-Beobachtungen verwendet wird.

Forschungsstationen in der Arktis

In der Arktis ist das AWI als einzige deutsche Forschungseinrichtung am Betrieb von zwei Forschungsstationen beteiligt. Gemeinsam mit dem französischen Polarinstitut wird die AWIPEV Arctic Research Station vorgehalten. Im Rahmen der Zusammenarbeit mit verschiedenen russischen Forschungseinrichtungen haben Forschergruppen des AWI und anderer deutscher Einrichtungen Zugang zur Samoylov-Station im Lena-Delta. Die ständig besetzte AWIPEV Arctic Research Station befindet sich inmitten der internationalen Forschungssiedlung Ny-Ålesund, ($78^{\circ}55'N$, $11^{\circ}55'O$) am Ufer des Kongsfjord auf Spitsbergen im Svalbard-Archipel. Die Station wird seit 2003 gemeinsam vom AWI und dem französischen Polarinstitut IPEV betrieben. Bereits 1990 richtete das AWI an gleicher Stelle die ständig besetzte Koldewey-Station ein, an der komplementär zu den Programmen an den Neumayer Stationen mit langfristigen meteorologische Beobachtungen, Strahlungsmessungen und Ballonsondierungen begonnen wurde. Mitte der 1990er Jahre kam für das Network for the Detection of Stratospheric Change (NDSC) ein leistungsfähiges Atmosphärenobservatorium für fernerkundende stra-

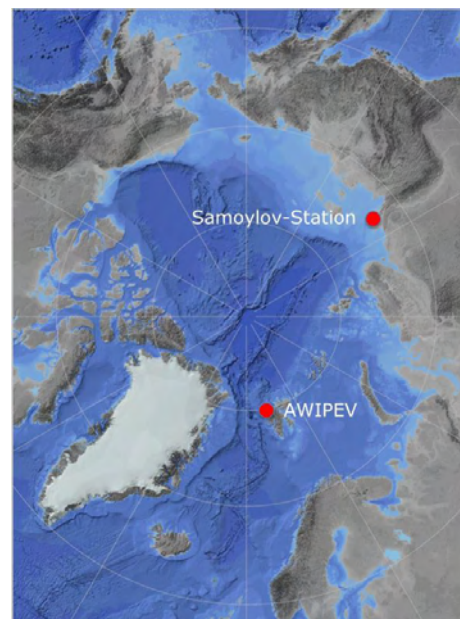


Abbildung I.2.7: Topographische Karte der Arktis mit den Stationen AWIPEV auf Spitzbergen und der Samoylov-Station im Lena-Delta. Karte: A. Haas (Alfred-Wegener Institut).

tosphärische Untersuchungen dazu. AWIPEV vereint die deutsche Koldewey-Station und die französische Station Charles Rabot mit der Reinluft-Station Jean Corbel etwa 5 km fjordaufwärts. Gemeinsam bieten die Einrichtungen Platz zum Wohnen von bis zu 30 Wissenschaftlern gleichzeitig. Während einer Sommersaison können bis bis zu 80 Wissenschaftler ihre Forschungsprojekte durchführen. Das gemeinsame Stationspersonal wird von einem wissenschaftlichen Leiter angeführt, der von bis zu zwei Ingenieuren und einem Techniker unterstützt wird.



Abbildung I.2.8: Links: Die Forschungsstation AWIPEV in Ny Ålesund, Foto: Günther Heinemann. Rechts: Die Forschungsstation Samoylov, Foto: Thorsten Sachs / Alfred-Wegener Institut.

Zum wissenschaftlichen Programm gehören die bereits an der Koldewey-Station begonnenen ganzjährigen Langzeitmessungen in der nordpolaren Tropo- und Stratosphäre, die in langfristige internationale Projekte integriert sind. Dazu gehört unter anderem das 1995 begonnene und vom AWI international koordinierte Ballonsondierungsprojekt MATCH, mit dem die chemischen Ozonverluste in der nordpolaren Stratosphäre in einer inzwischen 20-jährigen Zeitreihe quantifiziert werden konnten. Im Sommer beherbergt die Station zahlreiche Projekte mit meeresbiologischen Zielsetzungen. Seit Juni 2005 steht dafür auch das neue Kings Bay Meeresforschungslabor zur Verfügung. Es bietet in seinen Laboren vielfältige Möglichkeiten für biologische und chemische Untersuchungen. Insbesondere Meeresbiologen und -ökologen, sowie Ozeanographen, Meeresgeologen und Glaziologen arbeiten hier. Für Feldarbeiten stehen kleine Boote, Tauchausrüstung, mehrere Schneemobile mit Schlitten und ein Minibus zur Verfügung. An den Projekten sind vorrangig Wissenschaftler aus Deutschland und Frankreich, aber auch aus anderen Ländern, beteiligt. AWIPEV ist ganzjährig mit kommerziellen Fluglinien erreichbar. Ausrüstungen und wissenschaftliche Proben werden auf dem Seeweg transportiert.

Die Samoylov-Station (72°22'N, 126°28'O) befindet sich an der südlichen Küste der Insel Samoylov inmitten des Lena-Deltas nahe der Laptewsee. Die ehemals kleine Forschungsstation des Lena-Delta-Reservats wurde im Jahr 2013 wesentlich erweitert und erneuert. Sie verfügt jetzt über ausreichende Labor- und Lagerkapazitäten für wissenschaftliche Arbeiten an der Station und Feldarbeiten im Lena-Delta. Die Russische Akademie der Wissenschaften (Sektion Sibirien) betreut fortan den Stationsbetrieb. Die Station ist ständig besetzt, sodass zukünftig auch in den Wintermonaten wissenschaftliche Arbeiten durchgeführt werden können. Die Samoylov-Station kann von der sibirischen Hafenstadt Tiksi mit dem Helikopter (etwa 45 Minuten Flugzeit) oder mit dem Schiff (etwa 12 Stunden Fahrtdauer) erreicht werden.

Seit 1998 arbeiten Wissenschaftler des AWI und anderer Einrichtungen regelmäßig in den Sommermonaten an der Station. Sie wird als logistische Basis für langfristig angelegte Feldarbeiten genutzt. Untersucht werden die Ausbildung und Degeneration der Permafrostböden, die Umsetzung und Emission von Treibhausgasen wie Methan und Kohlenstoffdioxid, die Hydrologie der sommerlichen Auftauschicht des Dauerfrostbodens sowie die Bildung und Entwicklung des Lena-Deltas. Neben den Feldarbeiten werden mit automatisierten Messstationen meteorologische Daten und Temperaturprofile im Boden kontinuierlich registriert. Die Samoylov-Station wird vom AWI in Zusammenarbeit mit russi-

schen Forschungseinrichtungen langfristig genutzt. Die wissenschaftlichen Untersuchungen sind ein besonderer Schwerpunkt der bereits 1991 begonnen deutsch-russischen Zusammenarbeit im Rahmen der Projekte „System Laptev Sea“, „System Laptev Sea 2000“ und „The Dynamics of Permafrost in the Laptev Sea“.



- Forschungsschiff Polarstern: www.awi.de/expedition/schiffe/polarstern.html
- Neumayer III: www.awi.de/expedition/stationen/neumayer-station-iii.html
- AWIPEV: www.awipev.eu/
- Dallmann: www.awi.de/en/expedition/stations/dallmann-laboratory.html
- Samoylov: www.awi.de/en/expedition/stations/island-samoylov.html
- Kohnen: www.awi.de/expedition/stationen/kohnen-station.html
- Alfred-Wegener-Institut: www.awi.de/
- BGR: www.bgr.bund.de/
- GARS O'Higgins: www.dlr.de/gars

I.2.2 Technologien

Die deutsche Polarforschung basiert im Wesentlichen auf drei technologischen Säulen, die im Folgenden kurz beschrieben werden. Auf deren konkrete Umsetzungen und einzelne technologische Weiterentwicklungen wird in Kapitel 5.1 näher eingegangen.

In-situ Messungen

Lokale Messungen und Langzeitmessprogramme stellen eine wesentliche Säule der Werkzeuge der deutschen Polarforschung dar. Die direkte Beobachtung von lokalen Prozessen und Eigenschaften ist grundlegend für ein Verständnis von Teilsystemen und ihrer Wechselwirkungen. Nur auf lokalen Skalen ist eine Messgenauigkeit zu erreichen, die es erlaubt, grobskalige Messungen und Simulation zu validieren und in einen räumlichen und zeitlichen Gesamtzusammenhang zu stellen.

Fernerkundung

Die Nutzung von Satellitendaten und Flugzeugmessungen hat einen wesentlichen Beitrag zu dem Verständnis von polaren Prozessen und deren Dynamik geleistet. Erst durch die Fernerkundung wurde eine flächendeckende Beobachtung von Meereis, Eisschilden, polaren Ozeanen, der polaren Atmosphäre und der polaren Landgebiete möglich. Seit den 1970er Jahren tragen satellitengestützte Beobachtungsplattformen mit zunehmender zeitlicher und räumlicher Abdeckung dazu bei, neue Erkenntnisse über die schwer zugänglichen Polarregionen zu gewinnen und kleinskalige Messungen in einen größeren räumlichen und zeitlichen Kontext zu stellen. Dabei werden unterschiedliche Techniken genutzt, welche verschiedene Spektralbereiche vom sichtbaren Licht bis zu den Mikrowellen verwenden.

Satellitendaten liefern eine sehr wichtige Basis für die Beobachtung von kurz- und langfristigen Veränderungen im Bereich der Polargebiete, dienen als logistische Entscheidungsgrundlage für wissenschaftliche Feldarbeiten und werden im Zuge der immer besseren Beschiffbarkeit vor allem arktischer Gewässer auch für Navigation und Exploration von zunehmender Bedeutung sein.

Daten für die Fernerkundung der Polargebiete werden durch große Satelliten- und Erdbeobachtungsprogramme v.a. der USA, Japan und Europa gewonnen. Deutschland ist mit kleineren, spezifischen Einzelmissionen an internationalen Beobachtungsprogrammen beteiligt, die einen erheblichen Beitrag für verschiedene Fragestellungen leisten.

Mit Hilfe der Satellitenfernerkundung kann eine Vielzahl von Parametern bestimmt werden, die wichtige Einblicke in den Zustand der Polargebiete und dessen Veränderung im Verlaufe der letzten (bis zu) 4 Jahrzehnte zulassen. Dies beinhaltet unter anderem die Massenänderungen der Eismassen, die Veränderung der Ausdehnung und Dicke des Meereises und die Prozesse in der polaren Atmosphäre. Die Fernerkundung stellt somit – neben den in-situ Messungen und der numerischen Modellierung – eine wesentliche Säule der Technologien der deutschen Polarforschung dar.

Numerische Modellierung

Neben den Beobachtungssystemen wie den Langzeitmessungen an Forschungsstationen und der Satellitenfernerkundung sind numerische Modelle notwendig, um Prozesse zu verstehen, Umweltbedingungen der Vergangenheit zu rekonstruieren und Entwicklungen in der Zukunft vorherzusagen. Dabei spielt die Kopplung der Systeme Atmosphäre, Biosphäre, Ozean, Eis und Landoberflächen eine entscheidende Rolle. Da die Polargebiete Teile des globalen Klimasystems sind, müssen auch die Wechselwirkungen zwischen den hohen Breiten mit den mittleren Breiten berücksichtigt werden, d.h. es sind auch globale Modelle notwendig.

An deutschen Forschungsinstituten werden numerische Modelle für unterschiedliche Bereiche und räumliche und zeitliche Skalen im Bereich der Polarforschung entwickelt und angewendet. Diese komplexen, oft gekoppelten Modelle erfordern die Bereitstellung von hohen Rechnerkapazitäten und Datenspeicherstrukturen.



- DLR: www.dlr.de
- ESA: www.esa.int
- DKRZ: www.dkrz.de
- Polar Prediction Project: www.polarprediction.net
- U.S. NOAA: www.noaa.gov



I.3. Einbindung

I.3.1 Wissenschaftliche und politische Einbindung

Die Polarforschung ist international aufgestellt und deutsche Wissenschaftler sind in alle relevanten internationalen Polarforschungsprogramme eingebunden. Im Internationalen Geophysikalischen Jahr 1957/58 gründete der Internationale Rat der Wissenschaftsvereinigungen (International Council of Scientific Unions, ICSU) das Wissenschaftliche Komitee für Antarktisforschung (Scientific Committee on Antarctic Research, SCAR). Das Präsidium der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) hat 1978 dazu einen deutschen Landesausschuss SCAR eingerichtet und 1992 mit dem Beitritt der DFG in das Internationale Wissenschaftliche Komitee für Arktisforschung (International Arctic Science Committee, IASC) zum Landesausschuss für Forschung in der Antarktis und Arktis erweitert. Im Jahr 2013 wurde der Landesausschuss umbenannt in „Nationalkomitee SCAR/IASC“. Das Nationalkomitee plant und koordiniert die Aktivitäten der deutschen Hochschulforschung auf dem Gebiet der Antarktis- und Arktisforschung zusammen mit dem Alfred-Wegener-Institut sowie den betreffenden staatlichen Einrichtungen, die auch die notwendige Logistik zur Verfügung stellen. Mitglieder des Nationalkomitees vertreten die DFG in internationalen Gremien und nehmen dort z.T. führende Positionen ein (<http://www.scar-iasc.de>). Das internationale IASC-Sekretariat war bis 2016 am Alfred-Wegener-Institut angesiedelt. Mehrere leitende Autoren aus Deutschland waren an der Erstellung der Sachstandsberichte des zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC Report) bei polaren Themen beteiligt.

Die Regionalforen für die Arktis- und Antarktispolitik sind der 1996 gegründete Arktische Rat (Arctic Council) und die Treffen der Konsultativvertragsparteien des 1959 unterzeichneten Antarktisvertrages (ATCM – Antarctic Treaty Consultative Meeting). Deutschland, vertreten durch das Auswärtige Amt, zählt zu den Konsultativstaaten des Antarktisvertrages und ist bei den Konsultativtagungen stimmberechtigt. Auch im Arktischen Rat wird Deutschland durch das Auswärtige Amt vertreten. Allerdings ist die Mitgliedschaft im Arktischen Rat auf die acht Anrainerstaaten und die ständigen Teilnehmer (Permanent Participants) der indigenen Bevölkerung der Arktis beschränkt und Deutschland zählt zu den Beobachterstaaten. Auf internationaler Ebene erfolgt die wissenschaftliche Einbindung in diese beiden übergeordneten politischen Gremien über SCAR und IASC, welche Beobachterorganisationen bei den Konsultativtagungen des Antarktisvertrages beziehungsweise im Arktischen Rat sind. Auf nationaler Ebene wird der Dialog zwischen Wissenschaft und Politik hauptsächlich über das Alfred-Wegener-

Institut koordiniert, welches das Auswärtige Amt und andere an Arktis- und Antarktisfragen interessierte Ministerien wissenschaftlich berät. In den letzten Jahren hat insbesondere das Interesse an Arktisfragen stark zugenommen. Zum Informationsaustausch zwischen Arktisforschung und Arktispolitik, um Wissen, Erfahrung und internationale Kontakte den an Arktisfragen interessierten Bundesministerien gezielter zur Verfügung zu stellen, hat das Alfred-Wegener-Institut den Arktis-Dialog initiiert. Die halbjährlich stattfindenden Informationsveranstaltungen, die gemeinsam vom AWI und einem gastgebenden Ministerium organisiert werden, behandeln aktuelle Fragen der deutschen und internationalen Arktisforschung und -politik. Weiterhin unterstützt das Alfred-Wegener-Institut das Auswärtige Amt bei der Auswahl deutscher wissenschaftlicher Vertreter in den Arbeitsgruppen und Untergremien des Arktischen Rates.

I.3.2 Logistische Einbindung

Von Anfang an setzte die institutionalisierte Polarforschung in Deutschland auf internationale Zusammenarbeit nicht nur im Rahmen wissenschaftlicher Vorhaben sondern insbesondere auch auf die Kooperation im technischen und logistischen Bereich. Hervorzuheben ist hier, dass für ausländische Wissenschaftler der Zugang zu den AWI-Forschungsplattformen (Schiff, Flugzeug, Station) von Anfang an offen war. Über die Jahre entwickelte sich die Zusammenarbeit mit anderen nationalen Forschungseinrichtungen bei dem Betrieb der Stationen und der gemeinsamen wissenschaftlichen Nutzung der technischen Einrichtungen.

Arktis

Die logistische Zusammenarbeit zur Unterstützung internationaler Projekte in der arktischen Region entwickelte sich erst ab Mitte der 1980er Jahre. Sie beruht auf bi- oder multilateralen Vereinbarungen mit den Arktis-Anrainerstaaten für Schiffsexpeditionen (z.B. für FS Polarstern), Flugmissionen (z.B. Polarflugzeuge) und koordinierte Langzeitmessungen an den arktischen Forschungsstationen, die vom International Arctic Science Committee (IASC) geplant oder empfohlen werden und so eine hohe Priorität haben. Als Schnittstelle hierzu dient das *Forum of Arctic Research Operators* (FARO), das die Logistik und die operationelle Unterstützung von internationalen Forschungsvorhaben in der Arktis sichern soll. Auf Spitzbergen entstand – Hintergrund bildet der Spitzbergen-Vertrag von 1924 – eine internationale Forschungsgemeinschaft in der ehemaligen Bergbau-Siedlung Ny-Ålesund. Hier haben inzwischen neun Nationen (Norwegen, Deutschland, Frankreich, Italien, Großbritannien, Schweden, Japan, China und Südkorea) insgesamt 13 verschiedene Stationen eingerichtet und stimmen gemeinsam im Ny-Ålesund Science Managers Committee (NySMAC) die praktischen und wissenschaftlichen Angelegenheiten für diesen Forschungsstandort ab. Mit dem Ziel, logistische Ressourcen effizienter zu nutzen, haben das AWI und das Institut Polaire Francais (IPEV) die deutsche Koldewey-Station und die französische Station Charles Rabot mit der Außenstation Jean Corbel im Jahr 2003 zur AWIPEV Arctic Research Station verschmolzen. Ebenso konnte in bilateraler Zusammenarbeit mit dem Arctic and Antarctic Research Institute (AARI) in St. Petersburg und dem Melnikov Permafrost Institute der Russischen Akademie der Wissenschaften in Yakutsk im Jahr 1998 die gemeinsam betriebene Forschungsstation Samoylov eröffnet werden.

Antarktis

Der logistische Aufwand und die Vorhaltung der erforderlichen Infrastruktur für die großen und langfristig angelegten Forschungen in den Polarregionen übersteigen zunehmend die nationalen Ressourcen. So wird von den Konsultativkonferenzen der Antarktis-Vertragsstaaten nicht nur die wissenschaftliche, sondern insbesondere die logistische Zusammenarbeit angeregt und vom Council of Managers of National Antarctic Programs (COMNAP) praktisch umgesetzt.

Ein beachtenswertes Beispiel für die internationale logistische Zusammenarbeit ist das Dronning Maud Land Air Network (Dromlan), welches mit federführender Beteiligung des AWI eingerichtet wurde und seit der Saison 2003/2004 die Lufttransporte von Kapstadt in das Dronning Maud Land plant und koordiniert. Dromlan ist ein international kooperatives Projekt, das von Belgien, Finnland Deutschland, Indien, Japan, Niederlande, Norwegen, Russland, Südafrika, Schweden und Großbritannien organisiert und unterhalten wird. Die deutschen Polarflugzeuge werden bei ihren Einsätzen in der Antarktis in diese Kooperation eingebunden. Die Neumayer-Station III gibt die Flugwetter-Beratungen für die interkontinentalen Flüge und die gesamten Flugmissionen wissenschaftlicher und logistischer Art im Dronning Maud Land heraus.

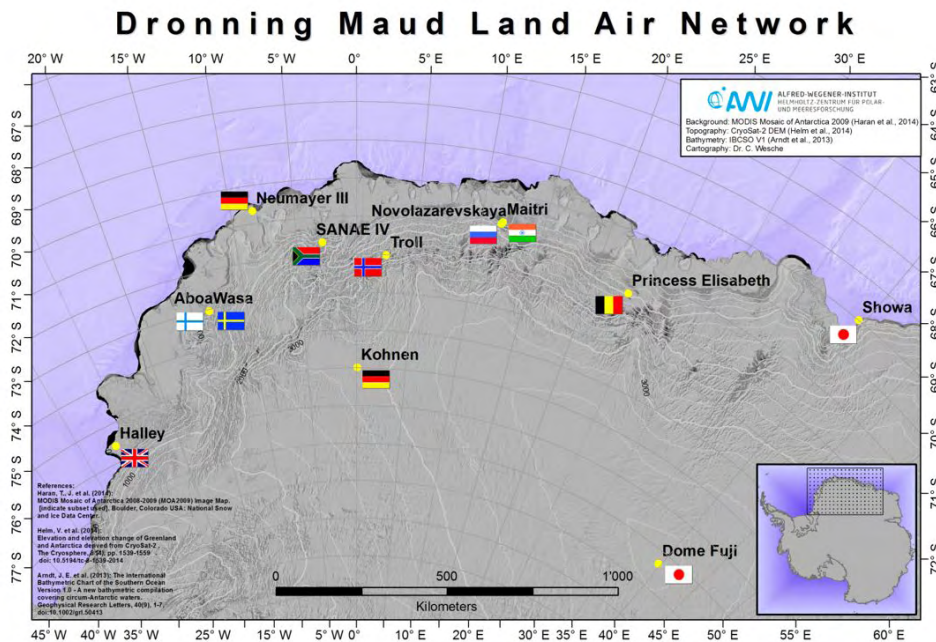
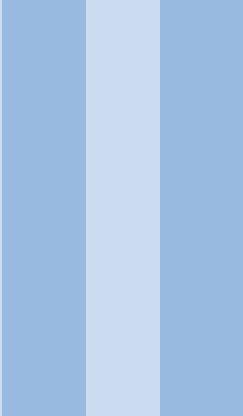


Abbildung I.3.1: Übersicht über das Dronning Maud Land Air Netzwerk (Dromlan) und die internationalen Partner. Karte: C. Wesche (Alfred-Wegener Institut)

Der Betrieb der Neumayer Station III, sowie der Kohnen-Station könnte ohne diese Luftbrücke nicht aufrechterhalten werden. Das gilt auch für die wissenschaftlichen Missionen der AWI-Forschungsflugzeuge Polar 5 und 6 in der Antarktis, deren Einsätze ohne den logistischen Hintergrund der internationalen Kooperation Dromlan signifikant aufwändiger wäre. Insofern ist eine enge internationale Kooperation eine wichtige Voraussetzung für die deutsche Polarforschung in dieser Region.



- Deutsches Nationalkomitee SCAR/IASC: www.scar-iasc.de
- Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR): www.scar.org
- International Arctic Science Committee (IASC): www.iasc.info
- AWIPEV: www.awipev.eu
- FARO-Arctic: www.faro-arctic.org
- NYSMAC: www.nysmac.npolar.no
- Antarctic Treaty Secretariat (ATS): www.ats.aq
- Council of Managers of National Antarctic Programs (COMNAP): www.comnap.aq



Die Polargebiete im globalen Wandel

II.1	Eisschilddynamik und Meeresspiegel	33
II.1.1	Eisschilde, Gletscher, Massenbilanzen und Meeresspiegel	
II.1.2	Erfassen, Verstehen, Projizieren	
II.1.3	Schneeprozesse	
II.2	Meereis	41
II.2.1	Was verursacht die Veränderungen in der Meereisbedeckung?	
II.2.2	Wie wird sich das Meereis in Zukunft entwickeln?	
II.2.3	Auswirkungen der Veränderungen des Meereises	
II.2.4	Meereis - Beobachten, Modellieren und Verstehen	
II.3	Permafrost	47
II.3.1	Permafrost Degradation	
II.3.2	Kohlenstoffumsatz durch tauenden Permafrost	
II.3.3	Submariner Permafrost und Gashydrate	
II.4	Polare Ozeane	53
II.4.1	Rolle der polaren Ozeane für die globale Umwälzbewegung	
II.4.2	Beitrag der Ozean-Eis-Wechselwirkung zum Anstieg des Meeresspiegels	
II.4.3	Die Rolle des polaren Ozeans für den Kohlenstoffhaushalt	
II.4.4	Ursache und Auswirkungen der Versauerung im polaren Ozean	
II.5	Biodiversität	65
II.5.1	Klimaänderungen und Biodiversität	
II.5.2	Struktur und Funktion polarer Lebensgemeinschaften	
II.5.3	Organisation polarer Ökosysteme	
II.5.4	Schutz polarer Ökosysteme	
II.6	Die polare Atmosphäre	73
II.6.1	Beobachtungssysteme	
II.6.2	Wechselwirkung der Atmosphäre mit Eis und Ozean	
II.6.3	Telekonnektionen der Polargebiete mit mittleren Breiten	
II.6.4	Polares Klimasystem und Ozonschicht	



II.1. Eisschilddynamik und Meeresspiegel

Die großen Inlandeismassen der Antarktis und Grönlands binden zusammen den größten Teil des Süßwassers der Erde. Sie nehmen etwa 9,5% der globalen Landoberfläche ein. Im Falle eines kompletten Abschmelzens würde die Antarktis zu einem Meeresspiegelanstieg um 58,3 m, Grönland um 7,4 m beitragen. Die polaren Landeisflächen spielen zusammen mit den sie umgebenden Meereisflächen eine wichtige Rolle im globale Klimasystem, z.B. in der atmosphärischen Zirkulation oder bei der Bildung von ozeanischem Tiefenwasser. Derzeit sind grundlegende Veränderungsprozesse der Landeismassen in beiden Polarregionen zu beobachten.

IN KÜRZE

Eisschilde (auch Inlandeis) sind Gletscherflächen, die auf Festland aufliegen und eine Fläche größer 50.000 km² abdecken. Die Eisschilde haben durch ihre hohe Albedo und Höhenlage zentralen Einfluss auf die Zirkulation der Atmosphäre. Schelfeise sind auf dem Ozean aufschwimmende Fortsetzungen der Eisschilde. Sie sind mehrere hundert Meter mächtig und stehen in starker Interaktion mit dem Ozean. Die Grenze zwischen Eisschild und Schelfeis wird als Aufsetzlinie bezeichnet. Ihre Lage ist für die Eisdynamik von entscheidender Bedeutung. An der Unterseite des schwimmenden Schelfeises kann Meerwasser anfrieren oder Eis geschmolzen werden (basales Schmelzen), wodurch die Massenbilanz und die Stabilität der Schelfeistafeln sowie die Dynamik der Inlandeismassen beeinflusst wird. Ebenso spielt Schmelzwasser an der Oberseite der Gletscher und Eisschilde (supraglaziales Schmelzwasser) eine zunehmend wichtige Rolle – zum einen für den direkten Massenverlust, aber auch für die Eisdynamik, die Stabilität und die Verdichtung des Firnkörpers.



II.1.1 Eisschilde, Gletscher, Massenbilanzen und Meeresspiegel

Die Massenbilanz der polaren Eisschilde ist eine entscheidende Größe für die Bestimmung des globalen Meeresspiegelanstiegs. Die Massenbilanz wird durch eine Vielzahl von Prozessen beeinflusst, die im komplexen Wechselspiel miteinander stehen und besonders sensitiv gegenüber Schwankungen der

klimatischen Randbedingungen sind.

In den letzten 2 Jahrzehnten hat der grönländische Eisschild an Masse verloren. Die Verlusten haben sich von der Periode 1992-2001 auf den Zeitraum 2002-2011 mehr als versechsfacht, wobei sich die betroffenen Gebiete weiter nach Norden ausgedehnt haben. Der Massenverlust in Grönland entsteht derzeit etwa zur Hälfte aus verstärktem Schmelzen an der Eisoberfläche und zur anderen Hälfte aus beschleunigter Gletscherbewegung und in der Folge verstärktem Eisausstoß auf den Ozean, verstärktem Kalben und basalem Schmelzen. Unklar ist jedoch, wie sich die veränderten Schmelzwassermengen auf die Dynamik des Eises auswirken. Auch die Gletscher und Eiskappen in der Umgebung des grönländischen Eisschildes sowie in der kanadischen und russischen Arktis und auf Svalbard zeigen erhebliche Massenverluste.

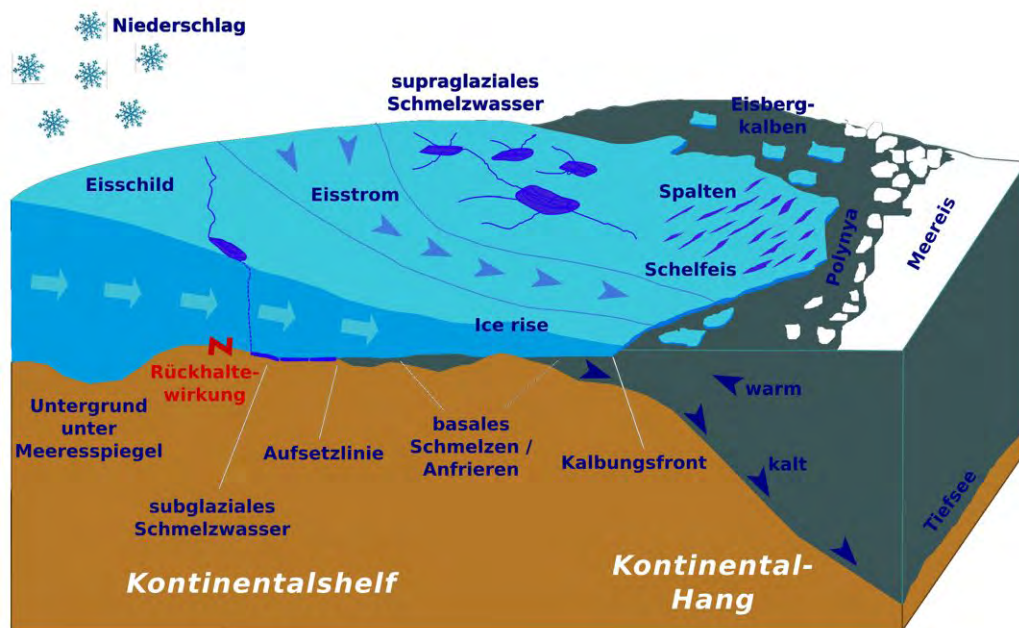


Abbildung II.1.1: Schematische Darstellung der Einwirkung von glaziologischen und ozeanischen Prozessen auf den antarktischen Eisschild.

Der antarktische Eisschild hat in den letzten 2 Jahrzehnten ebenfalls Masse verloren. Man geht von einer Zunahme des Massenverlustes um das Fünffache vom Zeitraum 1992-2001 auf 2002-2011 aus. In der Antarktis sind jedoch die verschiedenen Regionen (Ostantarktis, Westantarktis, Antarktische Halbinsel) aufgrund der regionalen Gegebenheiten und der dort ablaufenden Prozesse unterschiedlich betroffen.

Im Amundsensee-Gebiet der West Antarktis gelangt vergleichsweise warmes Tiefenwasser küstennah an die Ozeanoberfläche und erodiert die Schelfeise und Gletscherfronten. Simulationen haben gezeigt, dass die Neigung des Felsbettes landeinwärts zu einem sich selbst verstärkenden Rückzug des Eises führt und möglicherweise ein Kollaps des westantarktischen Eisschildes auf lange Sicht unausweichlich ist. Die Ursache für die Veränderung der atmosphärischen und ozeanischen Antriebe und deren Bewertung in einem multi-dekadischen Zeitraum ist noch nicht abschließend geklärt. Ähnliche Befunde und Simulationen bestehen für die submarinen Bereiche der Ostantarktis. Die Bilanz und das Vorzeichen der Massenänderungen in der Ostantarktis ist aber weiterhin ungewiss. Auf der Antarktischen Halbinsel haben sich seit Ende der 1980-er Jahre mehrere Schelfeise komplett aufgelöst oder stark zurückgezogen. Schelfeise bilden ein Widerlager für die Zuflussgletscher. Durch den Zerfall der Schelfeistafel kam es zu erheblichem Massenabfluss dieser Zuflussgletscher, wodurch ein Beitrag zum Meeresspiegelanstieg erfolgt. Nachgewiesen wurde dies durch Bewegungszunahmen und Höhen-

änderungen von mehreren Zehnermetern bis hunderten Metern. Unklar ist wie lange diese Prozesse anhalten.

Durch verschiedenste nationale und internationale Messkampagnen und Programme sowie verbesserte Computersimulationen konnte der Kenntnisstand zu den polaren Eisschilden erheblich verbessert werden. So konnte für beide Eisschilde eine deutlich verbesserte Eisuntergrundgeometrie ermittelt werden. Auch zu oberflächennahen Prozessen oder der Eisbewegung wird durch geophysikalische Modelle und verschiedenste Satellitenmessungen die Informationslage immer besser. Es konnte z.B. aus Satellitenmessungen festgestellt werden, dass subglaziale Seen unter dem Antarktischen Eisschild zeitweise Ausflussereignisse zeigen und dass die Seen miteinander in Verbindung stehen. Wie häufig und zu welchem Ausmaß diese Prozesse stattfinden und ablaufen und welche Auswirkungen dies auf das Gleitverhalten der Eisschilde und die thermale Struktur haben, ist derzeit noch unklar. Einige der bestehenden Messmethoden und Modelle benötigen ein gutes Verständnis der Eisschildentwicklung heute und in der Vergangenheit. Dies ist entscheidend für die verbesserte Bestimmung der Massenverluste und der Vorhersagen zukünftiger Meeresspiegeländerung.

II.1.2 Erfassen, Verstehen, Projizieren

Satellitengestützte Verfahren haben in den vergangenen zwei Jahrzehnten unsere Kenntnisse über Änderungsprozesse von Eisschilden revolutioniert. Hierbei haben nationale und europäische Missionen einen entscheidenden Beitrag geleistet (z.B. GRACE im Bereich der Satellitengravimetrie, die Altimeter von ERS-1/2, ENVISAT und CryoSat-2 sowie die Synthetische-Apertur-Radarsysteme von ERS-1/2, ENVISAT, TerraSAR-X und TanDEM-X sowie Sentinel-1). Dennoch ist das Verständnis systematischer Unsicherheiten nach wie vor unbefriedigend. Beispielsweise ist für den riesigen Ostantarktischen Eisschild die Massenbilanz noch selbst in ihrem Vorzeichen ungewiss.

Eismassenbilanzen in polaren Regionen werden im Wesentlichen mit drei Verfahren bestimmt: (1) durch Messungen von Änderungen der Oberflächenhöhe (in der Regel durch Satellenaltimetrie, bei der der Abstands der Eisoberfläche zum Satelliten bestimmt gemessen wird), durch Schweremessungen (Gravimetrie) und (3) durch die „Input-Output Methode“. Werden bei den ersten zwei Methoden Unterschiede in der Eisschildmächtigkeit und in der gravitativen Anziehung der Eisschilde gemessen, wird bei der „Input-Output“ Methode der Zutrag und Abtrag an der Oberfläche (z.B. durch Schneefall, berechnet über atmosphärische Modelle) dem Verlust (Kalben, Schmelzen) gegenübergestellt. Hierbei werden detaillierte Informationen zu Fließgeschwindigkeiten (z.B. aus Radarinterferometrie oder sogenannten Tracking-Verfahren), zu Eismächtigkeiten sowie der Lage der Aufsetzlinie benötigt. Jedes dieser Verfahren hat jedoch Schwächen. So müssen die Höhen des Eisschilde aus Altimetrie zunächst räumlich interpoliert werden um eine Volumenbilanz zu erhalten. Danach müssen unsichere Annahmen über die Schneedichte getroffen werden, um die Umrechnung in eine Massenänderung zu ermöglichen. Unsicherheiten zu Änderungen der Schnee- bzw. Firnstruktur limitieren gegenwärtig Massenbilanzen aus Altimeter-Daten stark. Die Schwerfeldmessung hat zwar das Problem der unbekannten Dichte nicht, allerdings überlagern sich dort Signale unterschiedlicher Herkunft, z.B. Massenbewegungen durch glazial-isostatische Anpassung (GIA) der festen Erde. Die Messungen integrieren das Signal über Gebiete von ca. 200-500 km. Die „Input-Output“-Methode hat den Vorteil, dass die Massenbilanzkomponenten (wie Schneefall und Eisfluss) unabhängig ausgewertet und damit ihr Anteil an der Massenbilanz separiert werden kann. Nachteile sind jedoch, dass jeder Datensatz fehlerbehaftet ist und sehr viele Daten zusammen verrechnet werden müssen. Häufig fehlen grundlegende Informationen wie die Eismächtigkeit an der Aufsetzlinie oder im abgekalbten Bereich sowie zur Lage und Verlagerung der Aufsetzlinie. Auch der Zutrag durch Akkumulation und dessen räumliche Umverteilung durch Schneefall ist weiterhin eine Unsicherheitsquelle. Eine ergänzende Methode zur Eingrenzung von Eismas-

senbilanzen ist die Messung der durch die Massenveränderung verursachten Erddeformation durch globale Satelliten-Navigationssysteme.

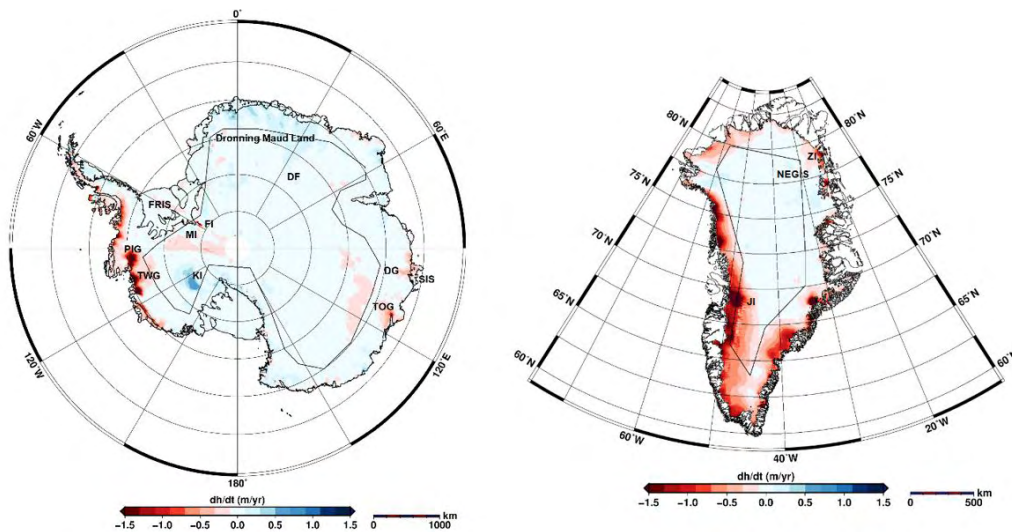


Abbildung II.1.2: Höhenänderungen des grönländischen und antarktischen Eisschildes abgeleitet aus CryoSat-2 Satellitenmessungen (Jan. 2011 – Jan. 2014), aus Helm et al., 2014, The Cryosphere.

Herausforderungen für die Erfassung von Veränderungsprozessen liegen in der Verbesserung der Auswerteverfahren, in der Vorbereitung und Einbeziehung neuer Beobachtungstechniken und Missionen und vor allem in der konsistenten Kombination der Analyse komplementärer Beobachtungsverfahren in Verbindung mit geophysikalischen und glaziologischen Modellierungsansätzen. Feld- und flugzeuggestützte Messungen zur Erweiterung und Validation der Satellitendaten sowie Prozessstudien vor Ort sind weiterhin unerlässlich. Es werden eine Kontinuität der Messreihen, verbesserte räumliche und zeitliche Auflösungen sowie Missionskonzepte mit polarer Überdeckung benötigt.

Auch im Bereich der eisdynamischen Modellierung konnten in den vergangenen Jahren entscheidende Fortschritte erzielt werden. Derartige Simulationen benötigen ein fundiertes Prozessverständnis. Sie ermöglichen prognostische Rechnungen, aber auch Modellierungen der Vereisungsgeschichte. Die Assimilation von Messungen aus der Erdbeobachtung hat wesentlich zur Modellverbesserung beigetragen. Sie ermöglicht einerseits weitestgehend unbekannte Größen zu rekonstruieren. Unter anderem wurden bereits erste erfolgreiche Versuche unternommen, die Eisviskosität, die Eismächtigkeit oder den basalen Reibungskoeffizienten abzuleiten. Andererseits ist eine Datenassimilation oftmals verbunden mit einer Initialisierung eines Modells. Dabei wird versucht, das Modell so nahe wie möglich an die zur Verfügung stehenden Beobachtungen heranzuführen, um danach Prognoseläufe zur zukünftigen Entwicklung durchführen zu können.

Welche Faktoren am Gletscherbett (wie subglaziales Wasser, Sediment, geothermaler Wärmestrom) beeinflussen die Fließdynamik der Eisschilde?

Mit Hinblick auf physikalische Mechanismen konnte mittels Modellvergleichsstudien geklärt werden, welche Komplexität und Gitterauflösung nötig ist für eine realistische Modellwiedergabe von Verschiebungen der Aufsetzlinie. Dies ist entscheidend, denn die marine Eisschilddynamik ist äußerst empfindlich darauf, wie die Übergangszone von gegründeten zu schwimmendem Eis beschrieben wird. Die Funktion der Schelfeise als schützende Bereiche des Inlandeises wurde belegt. Mit Hinblick auf die großen Schelfeise der Antarktis rückt die Eis-Ozean-Wechselwirkung in den Mittelpunkt. Hier müssen

gekoppelte Modellierungen der Eisdynamik und der Ozeanströmungen im Hohlraum unter den Schelfeisen erfolgen. Die Erfassung der Lage sowie die Modellierung der Stabilität der Aufsetzlinie sind von grundlegender Bedeutung. Verbesserte Ansätze konnten auch bzgl. des Eisbergkalbens oder der Berücksichtigung von mechanischen Beschädigungen des Eises erzielt werden.

Jedoch sind auch hier die bestehenden Ansätze noch unzureichend und müssen verbessert werden. Darüber hinaus muss es die zukünftige Ausrichtung von Eismodellierung sein, die Unsicherheiten im Verband mit Umschaltungsmechanismen des basalen Hydrologie-Systems besser einzuschränken. Dies kann temporär zu erhöhtem basalen Gleiten führen und beeinflusst damit Eis(-aus-)fluss in Richtung Meer. Je nach Schmelzwasserdurchfluss wechselt das Abfließen von basalem Wasser dabei von einem verteilten System zu einem stark kanalisierten. Die Prozesse spielen sowohl in Grönland (supra-glaziales Schmelzwasser) als in der Antarktis (sub-glaziale Seen) eine Rolle. Von ganz grundsätzlicher Dimension in der Eismodellierung ist es, das basale Gleiten des Eises über den Untergrund besser zu verstehen. Die Mechanismen am Gletscheruntergrund mit einer Mischung von Moränen-Material und Eis sind bisher noch kaum bekannt. Zudem tragen viele Modelle dem polythermalen Charakter von Eis nicht ausreichend Rechnung. Viele der eingesetzten physikalischen Beziehungen basieren auf Wassergehalten von weniger als 1% im Eis; bekannt sind jedoch Bedingungen von bis zu 5%. Daher müssen auch hier gezielt Messungen und Laborexperimente durchgeführt sowie verstärkt inverse Verfahren entwickelt werden.



Abbildung II.1.3: Auslassgletscher auf der Antarktischen Halbinsel. Oben: Boydell Glacier (Foto: M. Braun, 2013); Unten: Crane Glacier. Deutlich sichtbar sind die „Eisterrassen“ auf der orographisch rechten Seite des Crane Gletschers, die die Gletscherhöhe vor dem Aufbruch des Larsen-B Ice Shelf in 2002 markieren. Die Höhendifferenz Terrasse-Gletscheroberfläche beträgt ca. 120m (Foto: M. Braun, Februar 2012).

Zukünftige Forschungsbestrebungen in der Modellierung werden daher auf verbesserte Datenassimilierung und deren rigorose Nutzbarmachung abzielen. Zudem müssen die verschiedenen physikalischen Prozesse besser in den Modellen abgebildet werden. Modellkopplungen müssen vorgenommen werden, um die Interaktion Ozean-Eis sowie die Interaktion Atmosphäre-Eis besser abbilden zu können und Rückkopplungsmechanismen zu erfassen.

Welchen Einfluss haben großräumige Änderungen im Ozean und der Atmosphäre auf die Fließdynamik? Welche Folgen haben Eisschelf-Disintegration und weiterer Gletscherrückzug?

Ein besseres Verständnis der GIA-Prozesse ist nicht nur für die Bestimmung gegenwärtiger Eismassenänderungen entscheidend, sondern ebenso für die Vereisungsgeschichte und die Rekonstruktion des Meeresspiegels auf regionalen bis globalen Skalen. Dafür sind bessere Kenntnisse und Modellbildungen der Rheologie der festen Erde sowie der dynamischen Eis-Ozean-Wechselwirkungen notwendig, da diese durch vertikale Bewegungen des Eis- und Ozeanuntergrundes moduliert werden. Direkte Messungen der Krustenbewegungen durch Globale Satelliten-Navigationssysteme (GNSS) liefern hier entscheidende Informationen zur Verbesserung von GIA-Modellen. Als ein wichtiges Element eines kontinuierlichen Beobachtungssystems für eisschildbezogene Prozesse, müssen diese GNSS-Messungen

fortgesetzt und ausgeweitet werden.

Wie lässt sich die räumliche Verteilung der Niederschläge sowie der Schmelz- und Verdichtungsprozesse in der Schneedecke nachbilden?

II.1.3 Schneeprozesse

Prozesse an der Schneeoberfläche und im Firnkörper der großen Eisschilde und Eismassen in Polargebieten wird zunehmend mehr Bedeutung zugeschrieben. Für die Ermittlung von Massenbilanzen ist es zum einen wichtig, die räumliche Verteilung und die zeitliche Variabilität der Niederschlags- und Schmelzprozesse besser zu erfassen und zu modellieren. Großen Einfluss hierauf hat zum Beispiel die Umlagerung von Schnee durch den Wind (Winddrift). Schmelzprozesse sind vor allem am Rande der Antarktis sowie auf den arktischen Eiskappen und Grönland von großer Bedeutung.

Welcher Anteil von Schmelzwasser kommt zum Abfluss und wirkt er sich auf die Dynamik und Stabilität der Eismassen aus?

Für Grönland ist bekannt, dass sich der Bereich, in dem Oberflächenschmelze auftritt, in den letzten Jahrzehnten deutlich ausgedehnt hat. Schmelzwasser trägt zum direkten Massenverlust bei, kann aber auch eine Wirkung auf die Gletscherdynamik und Stabilität haben. So werden einige der Aufbruchereignisse von Schelfeisen an der Antarktischen Halbinsel mit kontinuierlicher Drainage von Schmelzwasser in Spaltenstrukturen und deren damit einhergehende Vergrößerung in Verbindung gebracht. Eine offene Frage ist zudem, zu welchem Grad die Ablagerung von Kohlenstoff („Black Carbon“) und Staubpartikeln für die steigenden Schmelzraten in der Arktis eine Rolle spielen. Ein besseres Verständnis der Prozesse in der Schneedecke ist zudem erforderlich, um eine genauere Quantifizierung der wiedergefrorenen Schmelzwassermengen zu ermöglichen. Diese sind zum einen für die Bilanzierungen wichtig, zum anderen erfolgt hierdurch eine Verdichtung des Firnkörpers neben anderen Verdichtungs- und Kompaktionsprozessen. Die genaue Kenntnis des Beitrags der Firnkompaktion zu Höhenänderungen sind für alle Messungen aus Satelliten-Altimetrie von besonderer Relevanz. Hierfür sind verbesserte gekoppelte Prozessmodelle der Atmosphäre und der Schneedecke sowie Messungen erforderlich.

Offene Forschungsfragen

- 1. Wie können wir die Massenbilanzen der Landeismassen in Polarregionen besser erfassen und quantifizieren?**
- 2. Wie können wir die Unsicherheiten bei der Quantifizierung der Beiträge zum Meeresspiegelanstieg von Gletschern, Eiskappen und den großen Eisschilden weiter minimieren?**
- 3. Welche Prozesse und Mechanismen führen zu einem verstärktem Eismassenverlust?**
- 4. Welchen Einfluss haben ozeanische und subglaziale Prozesse auf die Eisschilde?**
- 5. Wie können wir diese Prozesse besser verstehen und diese in geophysikalischen Modellen abbilden, um Modelle und Projektionen verlässlicher zu machen?**

- 6. Wie können wir die Interaktion zwischen Ozean und Eis besser verstehen und modellieren?**
- 7. Wie können wir aktuellen Prozesse an der Oberfläche der Eisschilde besser verstehen und regional differenziert quantifizieren?**
- 8. Gibt es Schwellenwerte oder Situationen, bei deren Überschreitung die Auswirkungen unumkehrbar sind? Wie steht es um die Stabilität des westantarktischen Eisschildes und anderer Regionen mit einem Eisuntergrund unter dem Meeresspiegel?**
- 9. Welche Rückschlüsse auf klimatische Veränderungen können wir aus Eisbohrkernen erzielen und welche physikalischen und chemischen Eigenschaften des Eises aus den Bohrkernen ableiten?**
- 10. Welche Aufschlüsse zum Klima und Klimavariationen in der Vergangenheit liefern uns Eisbohrkerne?**



II.2. Meereis

Meereis bildet sich durch das Gefrieren von Meerwasser, vor allem wenn im Winter in den Polarregionen die Lufttemperaturen weit unter den Gefrierpunkt absinken. Es stellt einen wichtigen Bestandteil des globalen Klimasystems dar, zum Beispiel wegen seiner Auswirkungen auf den Wärmeaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre, auf den Salzgehalt des Ozeans und auf biogeochemische Kreisläufe. In den polaren Ozeanen der Nord- und Südhalbkugel bedeckt Meereis ein Gebiet, das zu jedem Zeitpunkt etwa 6% der globalen Ozeanfläche umfasst. Aus den Ergebnissen bisheriger Forschungsarbeiten ergeben sich für die Zukunft im Wesentlichen drei übergeordnete wissenschaftliche Fragestellungen:

1. Was verursacht die beobachteten Veränderungen in der Meereisbedeckung?
2. Wie wird sich Meereis in Zukunft entwickeln?
3. Welche Auswirkungen haben die Veränderungen des Meereises?

IN KÜRZE

Meereis bezeichnet die Eisschicht, die sich bei einer ausreichenden Abkühlung der oberen Ozeanschicht bildet. Es reflektiert im Vergleich zum offenen Ozean einen Großteil der solaren Strahlung, wodurch sich die Erdoberfläche abkühlt. Meereis stellt eine Barriere für den Wärme- und Stoffaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre dar.

Der beobachtete Rückgang der Meereisausdehnung in der Arktis während der vergangenen 3 Jahrzehnte gehört zu den signifikantesten Veränderungen der Erdoberfläche in diesem Zeitraum. ■

II.2.1 Was verursacht die Veränderungen in der Meereisbedeckung?

In der Arktis ist sowohl die Dicke als auch die Fläche des Meereises seit den neunziger Jahren signifikant zurückgegangen. Im Gegensatz dazu nimmt die Eisbedeckung in der Antarktis seit einigen Jahrzehnten im Mittel leicht zu (Abb. II.2.2), allerdings wurde an der antarktischen Halbinsel ein massiver Rückgang des Meereises in den letzten 50 Jahren dokumentiert. Diese Veränderungen sind eines der klarsten Anzeichen für eine globale Klimaveränderung, weil die Menge an Meereis direkt die vor-

herrschenden klimatischen Bedingungen widerspiegelt.

Die Ausdehnung der Meereisfläche in der Arktis erreichte im September 2012 einen Negativrekord, der 49% unter dem langjährigen Mittel von 1979-2000 lag. Welche Konsequenzen hätte eine im Sommer komplett eisfreie Arktis?



Abbildung II.2.1: Meereis in der Arktis. Foto: S. Willmes

Als Ursache für Veränderungen in der Meereisbedeckung kommen verschiedene Faktoren in Frage, deren relative Wichtigkeit für die beobachteten Trends bislang nicht geklärt ist. Zu diesen Faktoren zählen vor allem natürliche Veränderungen im externen Klimaantrieb, menschengemachte Änderungen und interne Klimaschwankungen. Während eine Reihe von Studien für die Arktis die menschengemachten Veränderungen im Klimaantrieb als Hauptursache für den Eisrückgang identifiziert haben, sind entsprechende Analysen für die Antarktis deutlich ungewisser.

Um die entsprechenden Beiträge für die beobachteten Veränderungen in den Polargebieten besser quantifizieren zu können, ist es notwendig, die Rolle einzelner Prozesse für die beobachteten Veränderungen zu verstehen. Dies kann nur durch Simulationen mit entsprechenden Modellen geschehen, deren zugrundeliegende Physik wiederum gegen entsprechende Feldmessungen evaluiert worden ist. Momentan sind entsprechende Arbeiten nur ansatzweise möglich, weil notwendige Messdaten insbesondere über längere Zeiträume hinweg und insbesondere im Winter größtenteils fehlen und weil existierende Messungen sich häufig auf zu wenige Parameter konzentrieren. Eine große Schwierigkeit liegt dabei in der Vielzahl von Wechselwirkungen, die von außen angetriebene Veränderungen der Meereisbedeckung entweder verstärken oder abschwächen (vgl. Abb. II.2.3). Eine besondere Rolle hierbei spielt Schnee, da dieser existierende Wechselwirkungen teilweise deutlich verstärkt. Dies liegt zum einen an der geringen Wärmeleitfähigkeit des Schnees, sodass dieser den Wärmeaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre effektiv verringert, und an seiner hohen Albedo, durch die einfallendes Sonnenlicht effektiv reflektiert wird. Weiterhin hat die Schneedicke einen erheblichen Einfluss auf das verfügbare Licht für die polaren Primärproduzenten.

Um die Hauptantriebe der beobachteten Veränderungen zu verstehen, sind Messungen und Modellstudien notwendig, die eng aufeinander abgestimmt unser Prozessverständnis verbessern. Eine zentrale Rolle hierbei spielt die Messung der Eis- und Schneedicke, deren Entwicklung Veränderungen in den Antrieben direkt widerspiegeln. Entsprechende Messungen sind dabei nur dann zuverlässig möglich, wenn Schnee- und Eisdicke gleichzeitig erfasst werden, weil die aus Satellitenmessungen abgeschätzte Eisdicke direkt von der entsprechenden Schneedicke abhängt. Um die beobachtete Entwicklung des Meereises in Modellen nachvollziehen und damit verstehen zu können, muss die simulierte Entwicklung der atmosphärischen und ozeanischen Antriebe möglichst ähnlich zur realen Entwicklung verlaufen. Dies ist nur möglich, wenn den Modellen realistische Vorgaben für die Atmosphäre und den Ozean zur Verfügung stehen. Auch in diesen beiden Systemen sind die Unsicherheiten entsprechender Messungen oder Reanalysen derzeit noch relativ hoch. Eine Beantwortung der wichtigen Frage, was die beobachtete Entwicklung des arktischen und des antarktischen Meereises verursacht, ist damit nur möglich, wenn Schlüsselprozesse innerhalb von Modellexperimenten deutlich besser repräsentiert werden können. Dazu bedarf es einer Kombination von Modellexperimenten und Beobachtungsprogrammen, die dann anschließend zu einem verbesserten Prozessverständnis führen.

II.2.2 Wie wird sich das Meereis in Zukunft entwickeln?

Bei der Vorhersage der zukünftigen Entwicklung von Meereis unterscheidet man zwischen zwei grundsätzlich verschiedenen Verfahren mit teilweise unterschiedlichen Herausforderungen. Für die Vorhersage der Entwicklung von Meereis auf Zeitskalen bis zu einigen Jahren muss der Zustand des Meereises, der Atmosphäre und des Ozeans im Modell zu Beginn der Simulation möglichst nahe am tatsächlichen Zustand sein. Diese Art von Vorhersagen ist beispielsweise für die Schifffahrt von enormer Bedeutung. Um die Entwicklung des Meereises auf längeren Zeitskalen prognostizieren zu können, ist hingegen vor allem die zukünftige Entwicklung der äußeren Randbedingungen, und damit die Verfügbarkeit realistischer Ozean- und Atmosphärenmodelle, entscheidend. Ein Schwerpunkt heutiger Forschung liegt auf der Entwicklung von Vorhersagesystemen, die die Entwicklung des Meereises über alle Zeitskalen hinweg abdecken können (seamless prediction). Mit Hilfe solcher Systeme lässt sich aus Fehlern bei kurzfristigen Vorhersagen des Meereises Aufschluss über die Hauptdefizite von Modellen schließen. Man geht davon aus, dass diese Vorgehensweise auch bessere Prognosen der langfristigen Entwicklung des Meereises erlaubt, selbst wenn einige dominierende Prozesse teilweise stark zeitskalenabhängig sind. Um eine Verbesserung der Modelle zu ermöglichen, ist sowohl das im vorherigen Abschnitt besprochene bessere Verständnis der für die aufgezeigten Rückkopplungsmechanismen (Abb. II.2.3) relevanten Prozesse notwendig, als auch eine Verbesserung jener Beobachtungsdaten, die zur Initialisierung der Modelle verwendet werden. Hier bestehen insbesondere in hohen Breitengraden noch erhebliche Defizite.

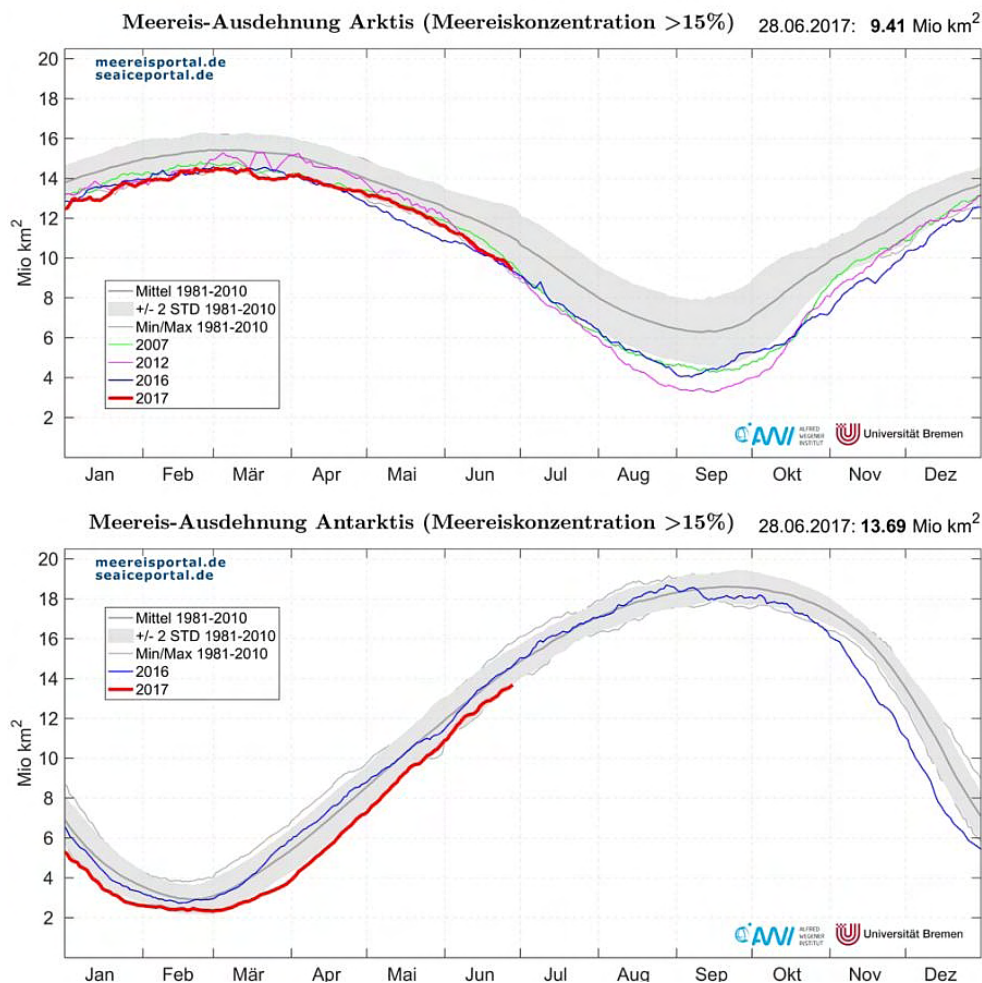


Abbildung II.2.2: Saisonaler Verlauf Meereisausdehnung Arktis (oben) und Antarktis (unten), Einzeljahre sowie mittlerer Verlauf und Standardabweichung im Zeitraum 1981-2010 (Quelle: www.meereisportal.de, Stand: 28. Juni 2017).

Neben der verbesserten Repräsentation existierender Prozesse werden durch laufende Forschungen auch neue Prozesse bekannt, die möglicherweise für die zukünftige Entwicklung des Meereises eine zentrale Rolle spielen. Hierzu zählen zum Beispiel biogeophysikalische Kreisläufe, mittels derer Meereis zum Beispiel den Anstieg der atmosphärischen CO_2 - Konzentration direkt beeinflusst. Die sich aus Simulationen ergebenden neuen Fragen zur Funktionsweise der zugrundeliegenden Prozesse erfordern neue, zielgerichtete Messprogramme.

II.2.3 Auswirkungen der Veränderungen des Meereises

Die beobachteten und erwarteten zukünftigen Veränderungen des globalen Meereises haben Konsequenzen, die weit über die Polarregionen hinausreichen. Diese Konsequenzen lassen sich unterteilen in (1) klimatische Folgen, (2) Folgen für Ökosysteme sowie (3) soziale und ökonomische Folgen. Diesen drei Bereichen ist gemeinsam, dass sie allesamt bisher nur rudimentär verstanden sind, wobei die klimatischen Folgen noch am besten untersucht sind. Zu diesen klimatischen Folgen zählt neben den direkten lokalen Auswirkungen ein wahrscheinlicher Einfluss des Meereisrückgangs in der Arktis auf das Klima der mittleren Breiten. Ein entsprechender Einfluss konnte bereits in mehreren Studien dokumentiert werden, ist aber noch nicht hinreichend verstanden. Sollte sich dieses Ergebnis als robust erweisen, wird insbesondere von Bedeutung sein, die möglichen Effekte eines weiteren Rückgangs der sommerlichen Meereisfläche auf die atmosphärischen Zirkulationsmuster und deren Einwirkung auf Mitteleuropa besser zu verstehen und zu quantifizieren (s. Kapitel II.6).

Modellstudien zeigen einen Zusammenhang zwischen einer reduzierten Meereisbedeckung in der Arktis und kälteren Wintern in den mittleren Breiten. » Wie beeinflusst die Meereisvariabilität konkret die Witterung in den mittleren Breiten? «

Auch deutet sich aus Messungen der letzten Jahre an, das Meereis einen größeren Einfluss auf globale Stoffkreisläufe hat als bisher angenommen. Ein solcher Einfluss könnte möglicherweise Auswirkungen auf die Geschwindigkeit der Ozeanversauerung wie auch auf den Anstieg der atmosphärischen CO_2 - Konzentration haben. Entsprechende Forschungen stehen allerdings noch weitestgehend am Anfang. Indirekt könnte sich ein solcher Einfluss auch daraus ergeben, dass der Rückgang des Meereises ein Abtauen von polaren Permafrostböden begünstigt. Hierdurch käme es einerseits zu einem erhöhten Eintrag organischen Materials in das marine Ökosystem, andererseits würden auch viele Huminstoffe freigesetzt, die wiederum zu einer Trübung des Wassers und Meereises mit entsprechend negativen Auswirkungen z. B. für die Primärproduktion von Biomasse im Ozean führen könnten. Insgesamt sind die sich hieraus ergebenden Rückkopplungen bisher noch weitgehend unverstanden. Obwohl große Fortschritte im Verständnis über die Meereisdynamik in den letzten Jahrzehnten erzielt wurden, fehlt ein detailliertes Verständnis der Wechselwirkungen von Meereis und Ozeanzirkulation und den damit verbundenen Veränderungen für das marine Ökosystem. Das Meereis bietet einen Lebensraum für eine speziell angepasste Flora und Fauna, die sich in den beiden Polargebieten unterscheiden. Meereisgemeinschaften spielen eine Schlüsselrolle für die pelagischen Ökosysteme, weil die dort lebenden Eisalgen an extrem geringen Lichtbedingungen angepasst sind und früh in der Saison Eisalgenblüten ausbilden und somit eine wichtige erste Nahrungsquelle im Nahrungsnetz darstellen. In der fortschreitenden Saison, wenn das Eis schmilzt, steuern diese Gemeinschaften die Nahrungszufuhr in den tiefen Ozean und zum Meeresboden. Weiterhin spielen die Organismen im Meereis eine große Rolle für die Freisetzung von Spurengasen, deren klimatologische Relevanz bisher noch nicht gut verstanden ist. Zurzeit fehlt das wesentliche Verständnis für die Lebenszyklen von Schlüsselarten dieser Gemeinschaften, was insbesondere auf fehlende Untersuchungen im Winter zurück zu führen ist. Außerdem gibt es keine quantitativen Daten zur Verteilung dieser Meereisalgen-Gemeinschaften. Um die räumliche Verteilung dieser Nahrungsquelle, die weitgehend unbekannt ist zu erfassen, ist der Einsatz neuer

Unterwassertechnologien erforderlich, die direkt unterhalb des Meereises operieren können. Eine dauerhafte Änderung der Meereisbedeckung und -dicke in der Arktis wird einen großen Einfluss auf die gesamte pelagischen Ökosystem, die Artenvielfalt und die Funktionsweise dieses Ökosystems mit Folgen für gesamte Nahrungsnetz haben.

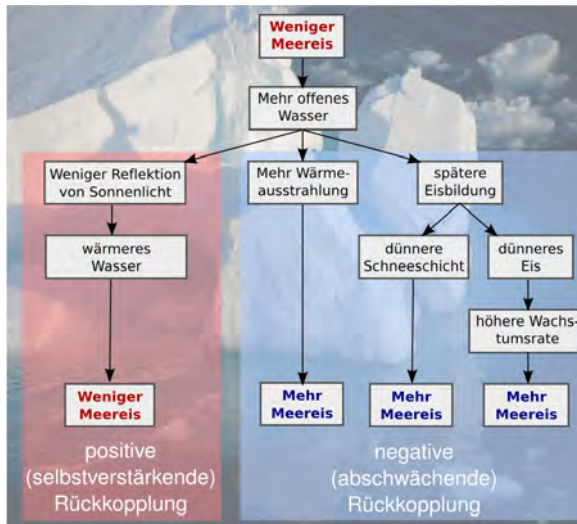


Abbildung II.2.3: Rückkopplungsmechanismen und ihre Wirkung im System Ozean/Meereis (Quelle: D. Notz).

Prognose zur zukünftigen Entwicklung entsprechender Ökosysteme gestaltet sich auch dadurch schwierig, dass sich durch die Veränderung der Eisbedeckung die Nutzung der Polargebiete, vor allem der Arktis, durch den Menschen verändern wird. Durch den Rückgang des Eises werden neue Schifffahrtsrouten möglicherweise rentabel und es ist mit einem Anstieg des Tourismus zu rechnen. Zusätzlich werden Ressourcen an fossilen Brennstoffen und Mineralien unter dem Meeresboden zugänglich gemacht. Damit ist in Zukunft mit einer fortschreitenden Kontamination durch z.B. Öl, Plastik, und Mikroplastik in diesem Lebensraum zu rechnen. Gleichzeitig verändert der Rückgang des Meereises die Lebensgewohnheiten indigener Völker in der Arktis grundlegend. Auch hier besteht noch weiterer Forschungsbedarf.

Modellbasierte Prognosen gehen davon aus, dass die bisher eisbedeckten Schelfe in der Arktis zukünftig eine erhöhte Primärproduktion aufweisen könnten, während bisher produktive Regionen wie die Barents See aufgrund der veränderten Eisbedingungen und durch die Einwanderung subarktischer Arten insgesamt weniger produktiv werden. Die zukünftige Rolle von Meereis für pelagische und benthische Ökosysteme wird daher im Rahmen zukünftiger Forschungsprojekte zu klären sein. Ob und inwieweit sich der Wechsel von mehrjährigem zu einjährigem Eis auf die Biodiversität im Meereis und die angrenzenden Ökosysteme auswirkt, ist auch nicht bekannt. Der Schwund des dickeren, mehrjährigen Meereises führt schon jetzt zum Artenverlust und der Änderungen der Stoffkreisläufe im Arktischen Ozean. Die Pro-

II.2.4 Meereis - Beobachten, Modellieren und Verstehen

Die drei hier diskutierten übergreifenden Forschungsfragen lassen sich nicht unabhängig voneinander beantworten, da die konkreten Fragestellungen jeweils eng ineinandergreifen. Insbesondere ist allen Forschungsfragen gemeinsam, dass zu ihrer Beantwortung eine bessere Integration von Beobachtungsdaten und Modellstudien notwendig ist. Nur durch eine solche Kombination kann unser Verständnis der Rolle von Meereis im Erdsystem verbessert werden. Die Verwendung von Datenassimilationssystemen, die es erlauben, Modelle mit Beobachtungen objektiv und optimal zu kombinieren, werden deshalb zukünftig eine Schlüsselrolle spielen.

Die Verbesserung der verfügbaren Modelle, umfassende in-situ Messungen sowie die Information aus flächendeckenden Satellitendaten stellen die drei wesentlichen Säulen der zukünftigen Meereisforschung dar.

Konkret bedeutet dies, dass die Beantwortung dieser Fragen, die von zentraler gesellschaftlicher und wissenschaftlicher Bedeutung sind, nur erreicht werden kann, wenn wir in Zukunft

1. bessere Modelle entwickeln und benutzen, die die zugrundeliegenden Prozesse realistisch nachbilden
2. umfassendere in-situ Messungen inklusive vermehrtem Einsatz von ganzjährigen automatischen Messplattformen durchführen, die ein besseres Prozessverständnis auf allen relevanten räumlichen und zeitlichen Skalen zulassen
3. Satellitenmessungen zur Verfügung haben, mit denen die zeitliche und räumliche Entwicklung der entscheidenden Meereisparameter und ihrer Antriebe kontinuierlich global gemessen wird.

Nur eine Kombination dieser drei Säulen im Rahmen einer optimierten Datenassimilation und –verifikation wird es uns erlauben, das Meereis der Arktis und der Antarktis zu verstehen und damit zuverlässige Informationen für entsprechende gesellschaftliche und politische Weichenstellungen zu liefern.

Offene Forschungsfragen

1. **Welche Faktoren steuern die Variabilität der minimalen Eisausdehnung im Herbst?**
2. **Wie beeinflussen Anomalien der Meereisbedeckung das Klima in den mittleren Breiten?**
3. **Wie kann die Änderung des Eisvolumens kontinuierlich erfasst werden?**
4. **Welche Rolle spielt die aufliegende Schneedecke und wie kann die Schneedicke operationell beobachtet werden?**
5. **Wie kann die Simulation des Meereises in den Klimamodellen verbessert werden?**
6. **Welche sind die Konsequenzen einer meereisfreien Arktis?**
7. **Wie verändern sich die Biodiversität der Ökosysteme durch den Meereisrückgang und welchen Einfluss hat dies auf die Stoffkreisläufe in der in der Arktis**
8. **Welche Rolle spielt das Meereis im Austausch von klimarelevanten Gasen?**



- www.meereisportal.de
- www.nsidc.org



II.3. Permafrost

Als Permafrost wird jeglicher Untergrund bezeichnet, der in zwei aufeinander folgenden Jahren kontinuierlich Temperaturen von 0°C und niedriger aufweist (Abb. II.3.1). Damit unterscheidet sich Permafrost von nur saisonal gefrorenen Böden oder Sedimenten. Im Sinne dieser Definition bestehen etwa 22,8 Millionen km^2 und damit bis zu 24% des Festlandes der nördlichen Hemisphäre aus Permafrostböden (Abb. II.3.2). Permafrostverbreitungsgebiete sind die zirkumarktischen polaren und subpolaren Festlandgebiete und Inseln Eurasiens und Nordamerikas, sowie Hochgebirge und die eisfreien Gebiete der Antarktis.

IN KÜRZE

Als Permafrost wird jeglicher Untergrund bezeichnet, der in zwei aufeinander folgenden Jahren kontinuierlich Temperaturen von 0°C und niedriger aufweist.

Der Begriff „Submariner Permafrost“ bezieht sich auf Permafrost, der unterhalb des Meeresbodens auftritt.

Wo Permafrost taut, schmilzt das Grundeis, senkt sich die Landoberfläche und es entstehen Senken und Seen (dieser Prozess wird Thermokarst genannt).

Die ansteigenden Temperaturen des gefrorenen Untergrundes können zu einer Bedrohung für die Infrastruktur in Permafrostregionen der höheren Breiten und in Gebirgen führen.



II.3.1 Permafrost Degradation

In den vergangenen Jahrzehnten hat sich der Permafrost weltweit erwärmt, wobei Daten des sogenannten „Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P)“ für viele arktische Regionen einen Anstieg der Permafrosttemperaturen in 10-20 m Tiefe bis zu 2°C anzeigen.

Im Norden Russlands ist die Permafrosttemperatur seit 2006 um 1°C gestiegen. Beobachtungen aus Alaska zeigen aber auch, dass der generelle Anstieg der Permafrosttemperatur von kürzeren Pha-

sen relativer Abkühlung unterbrochen war (Abb. II.3.3). Die Permafrosttemperaturen bis 2010 haben allerdings bereits wieder ihre Höchststände aus der ersten Hälfte der 1990er Jahre erreicht bzw. darüber hinaus. Die aktuellen Permafrosttemperaturen sind die höchsten je gemessenen für durchweg alle arktischen Regionen in Alaska. Wo Permafrost taut, schmilzt das Grundeis, senkt sich die Landoberfläche und es entstehen Senken und Seen (dieser Prozess wird Thermokarst genannt). Dadurch werden die lokalen hydrologischen Bedingungen und damit die Ökosysteme grundlegend verändert.

Die ansteigenden Temperaturen des gefrorenen Untergrundes können auch zu einer Bedrohung für die Infrastruktur in Permafrostregionen der höheren Breiten und in Gebirgen führen.

Die große Variabilität der Permafrostparameter in sehr unterschiedlichen Landschaften (z.B. Tundra, Taiga, Moore, Flusstäler, Gebirgsszüge) und das Auftreten von Grundeis in vielfältiger Form (z.B. massives Eis, Poreneis, Eislinsen) macht das Bauen auf Permafrost zu einer Herausforderung selbst für die sachkundigsten Ingenieure. Die Auswirkungen des tauenden Permafrosts auf die Infrastruktur sind vielfältig und betreffen Gebäude, Straßen, Eisenbahnen, Strom-, Öl- und Gasleitungen sowie Industrieanlagen und Nachrichtenverbindungen. Während einige negative Auswirkungen auf fehlende Kenntnisse während der Planung und beim Bauen zurückzuführen sind, resultieren eine erhebliche Anzahl



Abbildung II.3.1: Eisreicher Permafrost an der Küste „Herschel Island“, Kanada, Foto: M. Fritz.

aus den unvorhersehbaren Reaktionen der Erdoberfläche und des Untergrundes auf schmelzendes Eis und sich ändernder Stabilität. Studien schätzen, dass ein finanzieller Aufwand von etwa 150 Milliarden Dollar pro Jahr ab 2030 nötig wird, um notwendige Instandsetzungen existierender Infrastrukturen im Zuge des sich erwärmenden Permafrosts durchzuführen. Das Auftauen von Permafrost betrifft aber nicht nur Planung und Instandhaltung von Infrastruktur, sondern hat auch Auswirkungen auf Rentierhaltung und andere Formen der Landnutzung in einigen Teilen der Arktis (vgl. Textbox in Kapitel IV.2). Durch die zeitlich und räumlich abnehmende Meereisbedeckung des Arktischen Ozeans, erhöht sich die mittlere Temperatur der küstennahen Gewässer. Die Amplitude der Wellen erhöht sich durch verlängerte Windlaufzeiten. Zusammen führt dies zu einer stärkeren Erosion der Permafrostküsten, die 34% der weltweiten Küsten ausmachen (Abb. II.3.4). Küstenerosion zerstört hier große Landabschnitte mit eisreichem Permafrost, reduziert die Lebensräume der arktischen Flora und Fauna und bedroht die dortige Infrastruktur (z.B. Siedlungen, Industrie, Häfen). Eine erhöhte Anzahl von Stürmen wird prognostiziert, die die Küsten in der eisfreien Periode bedrohen werden. Dies wird die Planer zwingen, neue Anpassungsstrategien zu entwickeln. Das Auftauen von Permafrost betrifft aber nicht nur Planung und Instandhaltung von Infrastruktur, sondern hat auch Auswirkungen auf Rentierhaltung und andere Formen der Landnutzung in einigen Teilen der Arktis (vgl. Kapitel IV.2).

II.3.2 Kohlenstoffumsatz durch tauenden Permafrost

Das Auftauen von Permafrost wirkt sich erheblich auf den natürlichen Kohlenstoffkreislauf aus. Der verstärkte Abbau eingefrorenen organischen Kohlenstoffs kann zu einer verstärkten Freisetzung der Treibhausgase Methan (CH_4) und Kohlenstoffdioxid (CO_2) führen. Damit würde sich die über Jahrtausende stabile polare Kohlenstoffsänke im Permafrost in eine Quelle verwandeln. Aufgrund der Größe der von Permafrost beeinflussten Gebiete und der großen Mengen darin gespeicherten organischen

Kohlenstoffs kann das einen starken Rückkopplungsprozess auf das Klima in Gang setzen (das sogenannte „Permafrost Carbon Feedback“).

Eine Analyse der verfügbaren Zahlen über diesen Rückkopplungsprozess zeigt, dass bis zum Jahr 2100 120 ± 85 Gt Kohlenstoff freigesetzt werden könnten. Dieses Szenario würde zu einer zusätzlichen Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur von $0.29 \pm 0.21^\circ\text{C}$ führen.

Ob dies bereits der Fall ist, ist noch unklar, da die Entwicklung von Mooren durch zunehmende Vernässung auch eine verstärkte Aufnahme und Festlegung von CO_2 durch torfbildende Vegetation zur Folge haben. Bevor gesicherte Angaben zu Treibhausgasemissionen aus arktischen Landgebieten gemacht werden können, sind genauere Aussagen zur Entwicklung der Ökologie oder Hydrologie erforderlich. Ob ein tauendes Gebiet zukünftig drainiert und austrocknet oder sich zu einem Sumpfgebiet entwickelt, ist entscheidend dafür, ob CH_4 oder CO_2 emittiert oder gar CO_2 durch erhöhtes Pflanzenwachstum der Atmosphäre entzogen wird. Für die aktuelle CH_4 Emission gibt es zu wenige Basisdaten, die zuverlässige Abschätzungen ermöglichen. Die meisten Schätzungen basieren auf punktuellen Messungen, die auf große Flächen extrapoliert wurden oder auf globalen Messungen, die bestimmten Gebieten zugeordnet werden. Durch die sehr heterogene Verteilung der CH_4 -Quellen und -Senken weisen solche Schätzungen große Unsicherheiten auf.



Abbildung II.3.2: Zirkumarktische Verbreitung von terrestrischem und submarinem Permafrost, sowie der von Permafrost beeinflussten Küsten (Quelle: H. Lantuit).

Hinsichtlich des CO_2 in der Atmosphäre könnten andere Entwicklungen im Permafrostregionen einem zunehmenden Treibhauseffekt entgegenwirken. So wurden in den letzten Jahrzehnten eine Zunahme des Pflanzenwachstums in der Tundra, eine Ausbreitung der Strauchvegetation und eine Verschie-

bung der Baumgrenze nach Norden festgestellt (Arctic Greening). Dieses verstärkte Pflanzenwachstum kann der Atmosphäre erhebliche Mengen CO_2 entziehen. Gleichzeitig hat aber die Verschiebung von Vegetationszonen in der Arktis durch die Ausbreitung des Nadelwalds Rückwirkungen auf die Strahlungsbilanz der Landoberfläche durch die Verringerung der Albedo. Um den gegenwärtigen Zustand der polaren Landgebiete hinsichtlich Temperatur, Wasserhaushalt, Treibhausgasemissionen und Landschaftsentwicklung zu erfassen, ist ein umfangreiches Beobachtungsnetzwerk erforderlich, in dem Fernerkundung, Modellierung, Langzeitmessungen und detaillierte Prozessstudien aufeinander abgestimmt sind.

II.3.3 Submariner Permafrost und Gashydrate

Submariner Permafrost ist durch langjährige Temperaturen unter 0°C gekennzeichnet (kryotisch) und kann eisgebunden oder eisfrei vorkommen. Er bildet sich entweder bei negativen Wassertemperaturen am Meeresgrund oder stellt reliktschen Permafrost dar, der unter terrestrischen Landbedingungen bei Meeresspiegeltiefständen gebildet wurde. Zum Beispiel wurde während der Kaltzeiten in der jüngeren Erdgeschichte und später im Zuge des Meeresspiegelanstiegs gebildet, wo er während der Warmzeiten vom Meer überflutet wurde (Abb. II.3.2).

Reliktischer Permafrost umfasst den weitaus größten Anteil des submarinen Permafrostes im Untergrund der flachen arktischen Schelfmeere. Die Verbreitung und der Aufbau von submarinem Permafrost werden meist durch Bohrungen im Meeresboden untersucht. Zudem werden schiffsbasierte geophysikalische Methoden (z.B. Reflexionsseismik, Gleichstromgeoelektrik) eingesetzt, um die Grenze zwischen gefrorenem (eishaltigem) und ungefrorenem (eisfreiem) Material im Untergrund zu bestimmen und eine größere räumliche Auflösung der submarinen Permafrostverbreitung zu erreichen. Die Stabilität von küstennahem und submarinem Permafrost hängt von Veränderungen der Meerwassertemperatur und -salzgehalte, von der Meereisdicke und -bedeckung sowie der Küstenmorphologie ab. Der Anstieg der Lufttemperatur kann zu verstärktem Auftauen von Permafrost an Land führen und damit zu erhöhtem Stoffeintrag ins Meer, verbunden mit höheren Abflussraten der Flüsse. Diese transportieren relativ warmes Wasser und mehr Material ins Meer, wodurch sich die Wassertemperatur erhöht und der Salzgehalt sinkt. Zudem verstärkt sich durch erhöhte Lufttemperaturen die Destabilisierung von küstennahem Permafrost in den Sommermonaten.

Eine abnehmende Meereisdicke und -bedeckung im küstennahen Bereich reduziert die Entstehung von stark salzigem Bodenwasser, was die Degradation von submarinem Permafrost einschränkt. Der Anstieg der Temperaturen des Schelfwassers würde dagegen zu einer Erwärmung der marinen und darunterliegenden terrestrischen Sedimente führen.

Zunehmend wird die Bedeutung des submarinen Permafrosts als Methanquelle diskutiert und untersucht.

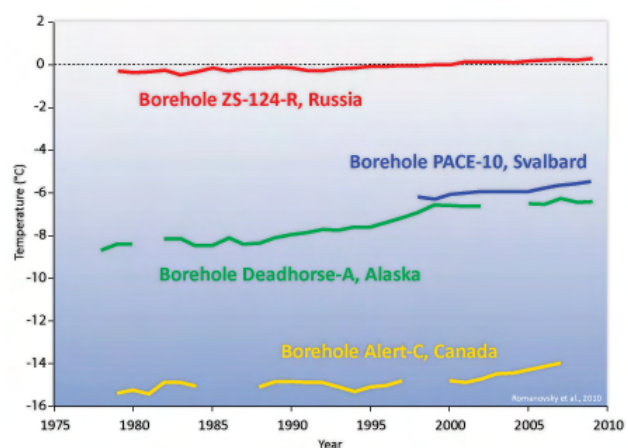


Abbildung II.3.3: Änderung der Permafrosttemperatur in 15 und 20 m Tiefe in verschiedenen Bohrungen verteilt über die nördliche Hemisphäre (Quelle: V. Romanovsky)

Methan ist ein klimawirksames Gas, das im marinen Untergrund insbesondere der arktischen Schelfgebiete überwiegend als Gashydrat gespeichert ist. Gashydrate sind chemische Strukturen, bei denen Gasmoleküle in Kristallstrukturen des Eises eingebunden und unter bestimmten Temperatur- und Druckbedingungen stabil sind. Der submarine Permafrost der arktischen Schelfmeere wird als bedeutendes Gashydrat-Reservoir angesehen, das groben Schätzungen zufolge 2 bis 65 Gigatonnen Methan umfasst. Dass Teile dieser enormen Methanvorkommen des Ostsibirischen Schelfs freigesetzt werden können, zeigen aktuelle Daten von mehr als 5000 Messpunkten an 1080 Stationen aus den Sommern 2003 bis 2008 und dem Winter 2007. Bisher ist jedoch noch ungeklärt, welchen Anteil die zersetzten reliktschen Gashydrate bzw. das durch rezente mikrobielle Prozesse an der Meeresbodenoberfläche oder in oberflächennahen Sedimenten gebildete Methan haben.

Ferner ist noch unklar, welche Rolle Mikroorganismen bei der Bildung, Stabilisierung und Degradation von Gashydraten spielen. Als Transportweg für das Methan aus zersetzten Gashydraten werden ganzjährig ungefrorene Zonen (Taliks) im submarinen Permafrost angenommen, durch welche Gas aus flach lagernden Gashydraten und aus geologischen Methanquellen in die Wassersäule und dann in die Atmosphäre gelangen können. Auch bei den Transportvorgängen ist bisher unklar, wie hoch der Anteil durch mikrobielle Prozesse oxidierten Methans ist. Die Permafrostdegradation seit der Überflutung der Schelfe und unterschiedliche Permafrostmächtigkeiten scheinen die wesentlichen Kontrollfaktoren für die Transportwege von Methan im submarinen Permafrost zu sein. Eine Freisetzung dieser Methanvorkommen, die im submarinen Permafrost über tausende Jahre fixiert waren, hätte wesentlichen Einfluss auf das jährliche Methanbudget mit globalen Auswirkungen auf das sogenannte Permafrost Carbon Feedback. Die letzten Erkenntnisse zeigen allerdings, dass eine mögliche Erhöhung der Methanemissionen vom submarinen Permafrost keine katastrophale wirtschaftliche Auswirkung auf die Erde haben würde.



Abbildung II.3.4: Zirkumarktische Karte der Küstenerosionsraten (Quelle: H. Lantuit) mit Beispielfotos von Elson Lagoon, Alaska (Oben links, Foto: A. Mahoney), Bol'shoy-Lyakhovsky-Insel (Ostsibirien, Foto: M. Grigor'ev), der Kondratyeva-Mündung (Ostsibirien, Foto: V. Rachold) und Kolguev-Insel (Westsibirien, Foto: A. Kizyakov, M. Leibman).

Offene Forschungsfragen

- 1. Wie schnell reagiert Landpermafrost auf steigende Temperaturen?**
- 2. Welchen Einfluss hat die im Zuge der Permafrosterwärmung veränderte Ökologie auf die mikrobiellen Prozesse und die Freisetzung von Treibhausgasen?**
- 3. Wie stabil verhält sich submariner Permafrost gegenüber steigenden Meerwassertemperaturen?**
- 4. Was ist der Beitrag der Permafrostgebiete zu globalen Stoff- und Energiekreisläufen?**
- 5. Wie beeinflusst die Dynamik von Permafrost die Lebensgrundlagen der indigenen Bevölkerung?**



- www.permafrost.org
- www.gtnp.org



II.4. Polare Ozeane

Die Polarmeere beeinflussen das Klima der Erde entscheidend. Die Stärke der Temperaturänderungen im Wechsel von Eis- und Warmzeiten und deren Kopplung an den Kohlendioxid (CO_2)-Gehalt der Atmosphäre während der vergangenen Jahrhunderttausende lässt sich nur durch die Speicherfähigkeit des tiefen Ozeans für Wärme und Kohlenstoff erklären. Die Schlüsselregionen für den Austausch zwischen Atmosphäre und tiefem Weltozean liegen in den Polargebieten und die in den Polarmeerern ablaufenden Prozesse sind mitbestimmend dafür, wie sich das Weltklima während der kommenden Jahrzehnte bis Jahrhunderte entwickeln wird. Einige der bekannten Prozesse wirken dabei als Verstärker der globalen Erwärmung, andere abschwächend.

IN KÜRZE

Klimaforschung in den Polarmeerern mit Verknüpfung von Langzeitbeobachtungen, Prozessstudien und realitätsnaher Modellierung der polaren Komponenten des Klimasystems ist nötig, um den zukünftigen Verlauf des globalen Klimawandels und damit verbundene Meeresspiegeländerungen verlässlich abschätzen zu können.

Die Ozeane haben seit Beginn der Industrialisierung mehr als 90% der Änderungen des globalen Wärmehaushalts und etwa 30% der CO_2 -Emissionen aufgenommen, die durch Verbrennung von fossilen Kohle- und Gasvorkommen als auch durch veränderte Landnutzung emittiert wurden (anthropogenes CO_2). Die Polarmeere erwärmen sich schneller als der globale Ozean und sind eine Schlüsselregion für den Meeresspiegelanstieg: schon heute werden etwa 20% des globalen Meeresspiegelanstiegs durch das Schmelzen der Eisschilde - unter anderem durch Kontakt mit warmem Ozeanwasser - verursacht. Mit der Aufnahme von anthropogenem CO_2 ist eine Versauerung des Ozeanwassers verbunden. Dies kann in Zukunft für Kalkschalen bildende Lebewesen ein Problem werden. Die Wassertemperatur bestimmt auch die Bedeckung mit Meereis und damit direkt den Strahlungshaushalt der Erde. Die deutsche polare Meeresforschung hat in den letzten Dekaden wiederholt international bedeutende Erkenntnisse gewonnen. Wichtige Voraussetzungen dafür waren eine sehr gute Infrastruktur für Beobach-

tungen, die über das Alfred-Wegener-Institut Helmholtz Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) bereitgestellt wird, die Etablierung von modernen und realitätsnahen Simulationsmodellen sowie die enge Kooperation zwischen universitären und außeruniversitären Forschergruppen. Die Expeditionen mit FS Polarstern waren nicht nur für die Durchführung der Untersuchungen notwendig, sie förderten auch interdisziplinäre Projekte zwischen Gruppen aus verschiedenen nationalen und internationalen Institutionen. Es wurden Messreihen von physikalischen und chemischen Parametern in Schlüsselregionen des Südpolarmeers und des Arktischen Ozeans gewonnen, die entscheidend zur Quantifizierung und zum Verständnis der klimarelevanten Prozesse beigetragen haben. Die prominentesten ozeanographischen Zeitreihen sind die Messungen in der Framstraße, der wichtigsten Verbindung zwischen dem Arktischen Ozean und dem Europäischen Nordmeer bei 79°N (seit 1997) und die seit 1984 betriebenen Untersuchungen im Südpolarmeer entlang des 0° Meridians und quer über das Weddellmeer, der wichtigsten Region für die Produktion von Antarktischen Tiefen- und Bodenwasser. So wurden zum Beispiel neue Erkenntnisse über den Süßwasserhaushalt und den Transport von warmem Atlantikwasser in den Arktischen Ozean, die biogeochemischen Stoffkreisläufe von Kohlenstoff und Eisen, die Raten für Tiefen- und Bodenwasserbildung sowie die Schwankungen der Zirkulationsmuster gewonnen. Durch die Entwicklung von hochauflösenden regionalen und globalen Ozeanmodellen und die Modellierung der Kopplung zwischen Eisschilden, Eisschelfen und Ozean konnten viele Veränderungen und Zusammenhänge auf bis zu 1000-jährigen Zeitskalen untersucht werden. Eine der wichtigen Studien beschäftigte sich mit dem heutigen und zukünftigen Transport von warmem Ozeanwasser auf den Schelf des südlichen Weddellmeeres und den daraus resultierenden Folgen für das Filchner – Ronne Schelfeis.

Klimamodelle weisen auf starke Veränderungen in den Polarmeeren in den kommenden 100 Jahren hin, die Auswirkungen auf unser Klima und den globalen Ozean haben werden, die Unterschiede zwischen verschiedenen Modellen sind jedoch noch sehr groß. Deshalb muss in Zukunft die Modellierung der Polarmeere weiter entwickelt werden. Modelle, die den Ozean realitätsnah mit dem Schelf- und dem Inlandeis koppeln, sind noch nicht vorhanden, und Messungen unter dem Eisschelf fehlen ebenso. Um die Veränderungen besser verstehen und vorhersagen zu können, sind neben der Modellentwicklung Lanzeitbeobachtungen und Prozessstudien unabdingbar. Nur so können die Modelle auf ihre Realitätsnähe überprüft werden. Neben der Weiterführung der Langzeituntersuchungen von hydrographischen und biogeochemischen Stoffflüssen sowie Änderungen im Ökosystem, muss in Zukunft die Beobachtungsfähigkeit unter dem Eis gestärkt werden.

II.4.1 Rolle der polaren Ozeane für die globale Umwälzbewegung

Die Häfen Nordnorwegens und der angrenzenden russischen Halbinsel sind ganzjährig eisfrei. Dafür sorgt die klimarelevante ozeanische Umwälzbewegung (Meridional Overturning Circulation, MOC). Sie transportiert in der oberen Wassersäule warmes Wasser in die polaren Ozeane. Dort kühlt es ab und sinkt als kaltes Wasser in die Tiefe und wird zurück Richtung Tropen transportiert. Neben der Temperatur spielt auch der Salzgehalt in den Polargebieten für die Absinkbewegung und damit die Stärke der MOC eine große Rolle. Die MOC stellt den wichtigsten ozeanischen Beitrag zur Umverteilung von Wärme im Klimasystem dar. Durch die Messung von sogenannten „Proxies“ in marinen Sedimenten kann die Geschichte der Zirkulation in der Vergangenheit rekonstruiert und frühere, drastische Veränderungen in der atlantischen MOC auf Zeitskalen von Jahrzehnten bis Jahrhunderten untersucht werden. Ein verbessertes Verständnis der Steuerung der MOC benötigt eine Kombination der Erkenntnisse aus den Klimaarchiven mit heutigen Beobachtungen und Klimamodellen. Besonders markante Beispiele früherer Abschwächungen der MOC mit globaler Auswirkung sind für die Zeitintervalle der sogenannten Heinrich-Ereignisse während der letzten Eiszeit dokumentiert. Nach heutigem Verständnis schwächte

sich zu dieser Zeit die MOC ab, da aus dem Laurentidischen Eisschild, der damals den nordamerikanischen Kontinent bedeckte, Süßwasser in die Bildungsregionen des Tiefenwassers im Nordatlantik eingetragen wurde und das Wasser trotz Abkühlung nicht mehr schwer genug war, um abzusinken. Die abrupte Abkühlung vor 8200 Jahren, die etwa 300 Jahre andauerte, hing ebenfalls mit der Abschwächung der MOC zusammen. Sie wurde durch die schnelle Entleerung des Agassiz-Sees verursacht. Das Wasser aus diesem prähistorischen See in Zentral-Nordamerika floss über den St. Lorenz Strom in den Nordatlantik und verhinderte die Bildung von Tiefenwasser.

Zu den am besten dokumentierten Folgen der Abschwächung der meridionalen Umwälzbewegung gehören drastische globale Temperaturänderungen (z.B. eine Abkühlung in Westeuropa) und zunehmende Trockenheit in den Subtropen und Tropen.

Die im Nordatlantik ausgelösten Änderungen in der MOC haben zum Ende der letzten Eiszeit auch den Antarktischen Eisschild beeinflusst. Wärmeres Wasser gelangte in Kontakt mit dem Inlandeis, was zu vermehrtem Abschmelzen und zu einer Zunahme des globalen Meeresspiegels führte. Eine zukünftig erhöhte Zufuhr von antarktischen Schmelzwasser könnte wiederum den südlichen Teil der MOC beeinflussen. Eine engere Kopplung zwischen der Arktis im Norden und dem Südpolarmeer muss daher für die Prognosen der zukünftigen Meeresspiegeländerung berücksichtigt werden.

Das Wechselspiel zwischen der Süßwasserzufuhr, dem Absinken von Tiefenwasser und die Stärke der MOC sind auch heute noch relevant. **Das Arktische Mittelmeer (Europäisches Nordmeer und Nordpolarmeer)** ist unmittelbar in die atlantikweite Zirkulation eingebunden. Warmes Wasser aus den Subtropen strömt an den nordwesteuropäischen Küsten vorbei bis in die Arktis (Golfstrom). Im Europäischen Nordmeer und in der Arktis selbst gibt das Wasser Wärme an die Atmosphäre ab, wird dadurch und durch Salzzufuhr durch Eisbildung dichter und sinkt in größere Tiefen. Das Tiefenwasser strömt von der Arktis und dem Europäischen Nordmeer in einem gewaltigen Wasserfall über den untermeerischen Rücken zwischen Grönland und Schottland weiter nach Süden. Dieses Wasser bildet den wichtigsten Beitrag der Nordhemisphäre zur MOC.

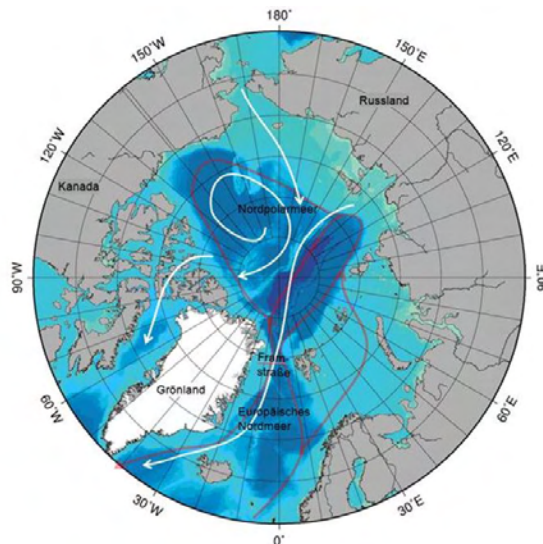


Abbildung II.4.1: Karte des Arktischen Mittelmeers, die das Europäische Nordmeer und das Nordpolarmeer umfasst. Die roten Pfeile skizzieren die Strömung von warmem Atlantikwasser; die weißen Pfeile skizzieren die Strömung von Meereis und salzarmem Oberflächenwasser.

Änderungen der meridionalen Umwälzbewegung wurden in der Vergangenheit durch ein Abschwächen der Bildung von Tiefenwasser in den Polargebieten verursacht, hervorgerufen durch Eintrag von Süßwasser.

Eine Besonderheit der Arktis ist ihre mächtige Süßwasserschicht. Die Quellen sind der immense Zustrom der sibirischen und nordamerikanischen Flüsse (etwa 11% des globalen kontinentalen Wasserabflusses münden in den Arktischen Ozean) und der Zustrom salzarmen Oberflächenwassers aus dem Pazifik. Die salzarme und damit leichte oberflächenschicht begünstigt die Meereisbildung und liegt wie ein Deckel über dem warmen Einstrom aus dem Atlantik und reguliert damit den Wärmeaustausch des atlantischen Einstroms mit der Atmosphäre. Das salzarme Oberflächenwasser wird wie das Tiefenwasser nach Süden in den Nordatlantik transportiert und kann dort die Bildung von Tiefenwasser

beeinflussen.

In den letzten Jahrzehnten wurde eine Anreicherung von Süßwasser im Nordpolarmeer beobachtet, während der Nordatlantik salzreicher wurde. Der Zusammenhang zwischen diesen Beobachtungen und möglichen Auswirkungen auf die atlantische Umwälzzirkulation sind noch unklar. Auch die Zufuhr von Wärme aus dem Atlantik und dem Pazifik ist seit den neunziger Jahren angestiegen und gleichzeitig starken Schwankungen unterworfen. Unklar ist, durch welche Prozesse diese Wärme im Arktischen Ozean verteilt wird und ob ein Zusammenhang zwischen der Erwärmung der Einströme und der drastischen Abnahme des arktischen Meereises besteht. Auch ist es möglich, dass in Zukunft bei verringerter Eisbedeckung durch unmittelbaren Windeinfluss mehr ozeanische Wärme an die Atmosphäre abgegeben wird. Der Austausch von Wasser und von Eis zwischen dem Nordpolarmeer und dem Europäischen Nordmeer wird kontinuierlich durch deutsche Forschungsaktivitäten in der Framstraße zwischen Grönland und Spitzbergen untersucht. Dort liegen seit 17 Jahren Messreihen durch verankerte Geräte vor. Regelmäßig wiederholte deutsche Expeditionen bilden in Kombination mit dem Einsatz autonomer Plattformen - im internationalen Kontext - die Basis zur Identifizierung von mehrjährigen Schwankungen im Arktischen Ozean.

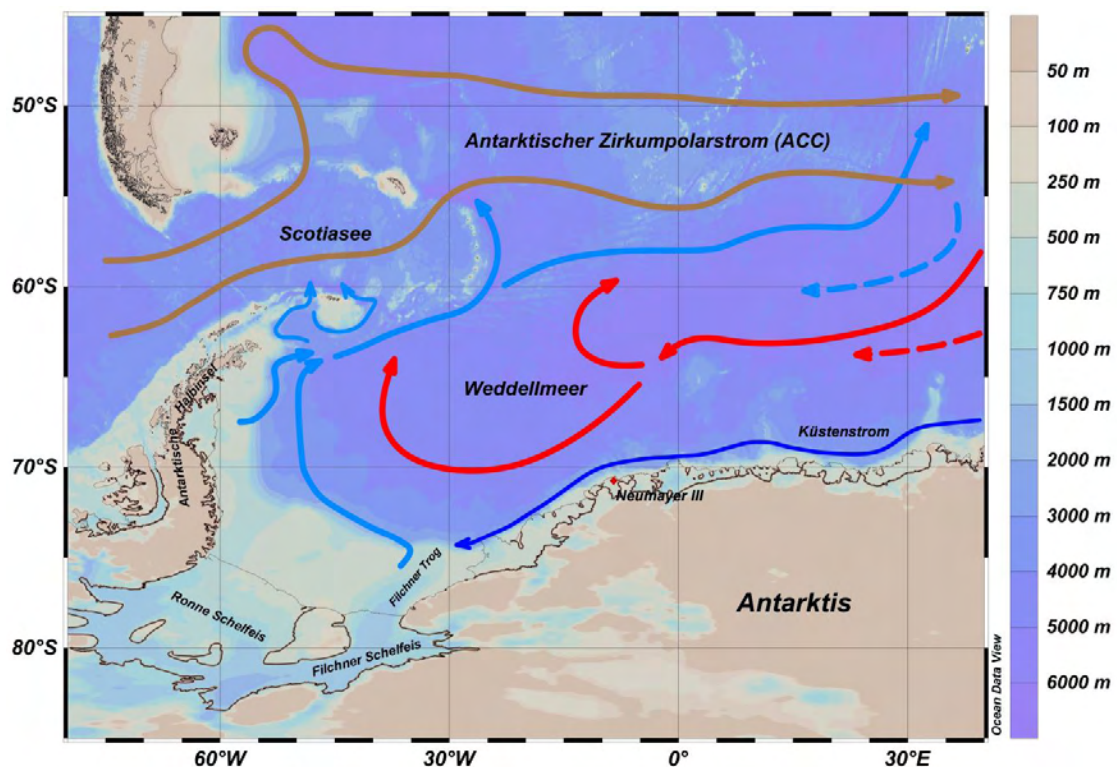


Abbildung II.4.2: Hauptmerkmale der Zirkulation von Wassermassen im Atlantischen Sektor des Südozeans. Braun: Zirkumpolarstrom. Rot: relativ warmes Wasser, das in der Wassersicht um 500 m herum mit dem Weddellwirbel südwestwärts verfrachtet wird. Blau: Kaltwassertransporte; die dünne dunkelblaue Linie zeigt den Antarktischen Küstenstrom, die dickeren hellblauen Linien den Ausstrom frisch gebildeten Bodenwassers. Neumayer III: AWI Forschungsstation (Kap. I.2.1)

Der Südozean um die Antarktis mag aus europäischer Sicht weit abgelegen erscheinen. Für das Klima der Erde spielt er jedoch eine zentrale Rolle. Der Südozean bildet einen einzigartigen, den Globus umfassenden Wasserring, den Antarktischen Zirkumpolarstrom (ACC). Er wird von starken Westwinden und Dichteunterschieden zwischen den Subtropen und der vereisten Antarktis angetrieben. Überlagert wird der ACC von einem - ebenfalls vom Wind angetriebenen - Aufquellen von Tiefenwasser, das Jahrhunderte zuvor im Nordatlantik abgesunken war. Ein Teil des im ACC bis an die Oberfläche aufquellenden Tiefenwassers wird am Nordrand des ACC wieder in mittlere Wasserschichten um 1000 m

Tiefe transportiert. Als Antarktisches Zwischenwasser dringt es bis in die gemäßigten nördlichen Breiten vor, wo es über die mitgeführten Nährstoffe die Fischereierträge bestimmt. Ein anderer Teil des aufquellenden Tiefenwassers gelangt an den antarktischen Kontinentalhang. Wärmeverluste an die Atmosphäre, Wechselwirkungen mit dem angrenzenden Schelfeis sowie Anreicherungen mit Salzlauge, die bei der Meereisbildung austritt, lassen Wassermassen sehr hoher Dichte entstehen, die den Kontinentalhang hinab bis zum Ozeanboden fließen. Das Bodenwasser breitet sich zuerst mit dem ACC aus, um anschließend die tiefen Becken des Weltozeans zu füllen. Unterhalb von 1000 m Tiefe hat sich während der letzten drei Jahrzehnte das Südpolarmeer um ein Vielfaches schneller erwärmt als der Weltozean im globalen Mittel; im antarktischen Bodenwasser lässt sich die Erwärmung über den Äquator hinaus nach Norden verfolgen. Die deutsche physikalische Meeresforschung untersucht mit Beobachtungen und Modellierung den ACC im Atlantik und das Hauptbildungsgebiet des schweren Bodenwassers, das Weddellmeer. Die oben genannten Erkenntnisse basieren unter anderem auf seit 1984 regelmäßig durchgeführten Messungen entlang des 0°-Meridians. Diese Messungen bilden die längste polare Zeitreihe im offenen Ozean, die in die Zukunft fortgeführt und durch Prozessstudien begleitet werden soll. Zugenommen hat in den vergangenen Jahrzehnten auch die Stärke der Westwinde über dem Südozean, der darauf auf verschiedene Weise reagieren kann. Es ist unklar, ob sich die Zirkulation im ACC verstärken wird oder ob mehr Wirbel gebildet werden.

Der Zirkumpolarstrom und die globale Umwälzbewegung sind im Südpolarmeer über verschiedene Prozesse eng miteinander verwoben und haben für das Klima der Erde eine entscheidende Bedeutung.

II.4.2 Beitrag der Ozean-Eis-Wechselwirkung zum Anstieg des Meeresspiegels

Schon heute werden etwa 20% des globalen Meeresspiegelanstiegs durch den Massenverlust der polaren Eisschilde verursacht. Im Falle des **antarktischen und grönländischen Eisschildes** ist dieser Verlust eng mit dem Fließverhalten der Eisströme vom Kontinent in die angrenzenden Schelfeise und Gletscher verknüpft. Schelfeis und Gletscherzungen sind leichter als Wasser, schwimmen auf und sind an der Unterseite in direktem Kontakt mit dem polaren Ozean. Das Wasser der Eisschilde wird in den Ozean neben dem Oberflächenabfluss sowohl durch das Kalben von Eisbergen an der Schelfeis/Gletscherfront, als auch durch Schmelzen an der Unterseite des Eises durch Kontakt mit warmem Ozeanwasser eingetragen.

Für das kleine Pine-Island-Schelfeis betragen die Schmelzraten (Abnahme der Eisdicke an einem Ort) bis zu 100 Meter pro Jahr. Die großen Schelfeise, wie z.B. das Filchner-Ronne-Schelfeis im Weddellmeer mit einer Fläche 1,3 mal größer als Deutschland, werden vom warmen Wasser des tiefen Ozeans bisher noch nicht erreicht. Da sie lediglich in Kontakt mit dem kalten Schelfwasser stehen, betragen ihre Schmelzraten nur etwa 0.2 Meter pro Jahr. Regionale Klimamodellierungen zeigen, dass Änderungen in der Atmosphäre im südlichen Weddellmeer die Ozeanzirkulation in naher Zukunft so verändern können, dass warmes Wasser auch dort bis unter das Schelfeis vordringt (siehe BOX). Innerhalb von Jahrzehnten würde das zusätzlich die Dynamik der Eisströme ändern und der Antarktische Eisschild würde noch mehr Eis verlieren. Wie stark dieser Mechanismus sein wird, hängt von der Bodenstruktur unter den Eisströmen ab. Auch an anderen Küstenabschnitten wäre ein wärmerer Ozean in der Lage den Massenverlust des antarktischen Eisschildes erheblich zu beschleunigen.

Die hier beschriebene zukünftige Entwicklung ist noch kein einheitliches Ergebnis der Klimamodellierung. Deshalb müssen die Modelle realitätsnäher werden. Um die neue Modellgeneration zu testen, müssen Modellvergleiche und kontinuierliche Messungen an Schlüsselpositionen durchgeführt werden. Ein weiteres, ungelöstes Problem ist die Kopplung der Ozeanmodelle mit dem Schelf- und Inlandeis. Daran wird intensiv in verschiedenen Klimazentren in Deutschland gearbeitet. Die Aussagekraft

der Modelle hängt in hohem Maße von der realitätsnahen Beschreibung der Ozeanzirkulation im Südpolarmeer ab. Genauso wichtig ist aber auch eine genaue Kenntnis über Lage und Form der Regionen unter dem Schelfeis und über die Bodenstrukturen unter dem Eisschild. Dies ist nur durch eine enge Zusammenarbeit zwischen Ozeanographen, Geophysikern und Glaziologen zu erreichen.

Laut den neuesten Satellitendaten verursacht Schmelzen durch Kontakt mit warmem Wasser den größten Verlust für die Eisschilde.

Der Massenverlust des **grönländischen Eisschildes** verursacht derzeit etwa 10% des globalen Meeresspiegelanstiegs. Dieser Beitrag könnte in Zukunft noch weiter ansteigen, da in den letzten 20 Jahren eine Beschleunigung des Schmelzens beobachtet wird. Die wichtigste Folge ist ein erhöhter Abfluss in den Ozean, der mit einem Rückzug und mit erhöhten Fließgeschwindigkeiten der großen Gletscher verbunden ist, die im Ozean enden. Messdaten und Modelle zeigen übereinstimmend, dass diese Beschleunigung durch Veränderungen im Ozean hervorgerufen worden sind. Schmelzwasser von der Oberfläche des Gletschers kann auch durch Hohlräume bis zur Basis des Gletschers durchdringen und dort als „Schmiermittel“ die Fließgeschwindigkeiten beschleunigen. Einmal im Rückzug begriffen, können einige dieser Gletscher - bedingt durch die Struktur des Untergrunds -, instabil werden und damit im Extremfall zum Zusammenbruch ganzer Abflusssysteme führen.

INFO BOX: Änderung der Wechselwirkung zwischen Eisschelf und Ozean im Südozean

Unter den heutigen Bedingungen – als Beispiel ist das südliche Weddellmeer gewählt - (Schemabild rechts) lässt starke Meereisbildung vor der Schelfeiskante kaltes und salzreiches Schelfwasser (blau) entstehen, das den warmen Küstenstrom (rot) daran hindert, auf den Kontinentalschelf vorzudringen und auf dem landeinwärts geneigten Meeresboden unter den Eisschelf fließt. Dabei wird Wärme zum Schmelzen an die tief gelegene Schelfeisunterseite transportiert und eine Zirkulation unter dem Schelfeis angetrieben. Das entstehende Schmelzwasser mit Temperaturen unter dem Oberflächegefrierpunkt verlässt die Region unter dem Schelfeis und trägt zur Bodenwasserproduktion am Kontinentalhang bei oder süßt die Schelfwassermassen aus. Im 21. Jahrhundert (unteres Schemabild) sorgen höhere Lufttemperaturen für eine dünnere Meereisbedeckung und eine geringere Eisbildung vor der Schelfeiskante. Dadurch wird die Kraft des Windes auf die Meeresoberfläche erhöht und weniger kaltes und salzreiches Schelfwasser (blau) produziert. Beide Prozesse sorgen dafür, dass warmes Wasser (rot) auf den Kontinentalschelf vordringt und unter das Schelfeis strömt. Im Vergleich zu heute wird dabei erheblich mehr Wärme an die tief gelegene Schelfeisunterseite transportiert, was zu stark erhöhten Schmelzraten führt.

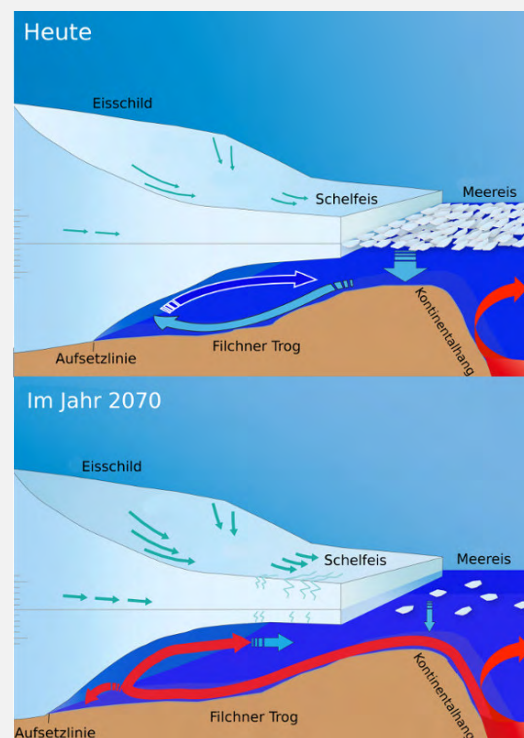


Abbildung II.4.3: Oben: Schematische Darstellung der heutigen Zirkulation im südlichen Weddellmeer. Unten: Schematische Darstellung der für das 21. Jahrhundert projizierten Zirkulation im südlichen Weddellmeer. Grafiken: H. Hellmer, Alfred-Wegener-Institut

In die Gletscherfjorde rund um Grönland kann warmes Atlantikwasser eindringen. Das Fjordwasser erwärmte sich tatsächlich, seitdem die Gletscher begannen, sich zurückzuziehen. Der Gletscherrückgang wurde bislang in Südost- und Westgrönland beobachtet, wo das Wasser in den Fjorden Temperaturen bis zu 4°C aufweist. Klimamodelle deuten an, dass sich das Ozeanwasser um Nordostgrönland bis zum Jahr 2200 um mehrere Grad Celsius erwärmen könnte. Langzeitbeobachtungen belegen, dass sich die Schicht des atlantischen Wassers in der Framstraße im Verlauf einer Dekade sowohl erwärmt hat, als auch an Mächtigkeit zugenommen hat. Neue Studien kommen zu dem Schluss, dass auch die Gletscher Nordostgrönlands bereits Anzeichen für eine Beschleunigung aufweisen. Dies ist deshalb erwähnenswert, da diese Gletscher 16% der Gesamtfläche des grönländischen Eisschildes entleeren und so eine wichtige Rolle für den zukünftigen Meeresspiegelanstieg spielen können. Die nordostgrönländischen Gletschersysteme stellen einen zukünftigen Schwerpunkt der deutschen Polarforschung dar.

Das Vordringen von warmem Wasser bis unter das Filchner-Ronne-Schelfeis würde zu einer starken Erhöhung der Schmelzraten und zu einer Veränderung der Eisdynamik führen.

Das Heranführen von warmem Atlantikwasser durch die tiefen Tröge des grönländischen Schelfs in die Fjorde hinein wird sowohl durch ozean- als auch gletscherbedingte Prozesse kontrolliert. Nur durch Beobachtungen und Modellierung der Wechselwirkungen zwischen dem Ozean, den Gletschern und dem Inlandeis können für die Zukunft die Beiträge zur Meeresspiegelerhöhung besser bestimmt und prognostiziert werden.

Um fachkundige Aussagen über den Zustand und die mögliche zukünftige Entwicklung der Eisschilde machen zu können, bedarf es einer gemeinsamen Forschung von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus der Ozeanographie, Meteorologie, Geophysik und Glaziologie bei Feldarbeiten und Modellierung.

II.4.3 Die Rolle des polaren Ozeans für den Kohlenstoffhaushalt

Kohlenstoff im Meerwasser in Form von gelöstem Kohlendioxid (CO_2) und Karbonaten, bildet die Grundlage für das Leben in den Ozeanen und auf der Erde. Der Polare Ozean ist durch seine niedrigen Temperaturen, die die Löslichkeit von Gasen fördern, ein beachtlicher Speicher von CO_2 (Gesamt- $\text{CO}_2 = \text{TCO}_2$, häufig auch als *DIC* bezeichnet). So wird ein Drittel des von Menschen durch Verbrennung fossiler Brennstoffe erzeugten und an der globalen Erwärmung beteiligten CO_2 , sogenanntes anthropogenes CO_2 , vom Ozean aufgenommen, etwa 40% davon im Südpolarmeer. Der Ozean kann CO_2 aus der Atmosphäre aufnehmen und über Jahrtausende in der Tiefe speichern. Die globale Zirkulation verteilt CO_2 , wie auch andere chemische Verbindungen, vertikal und horizontal über die Polarmeere und von dort aus über den Weltozean; diesen Prozess nennt man auch physikalische Kohlenstoffpumpe.

Die CO_2 -Aufnahme und -Verteilung im Ozean wird sowohl von physikalischen als auch von biologischen Faktoren bestimmt.

Biologische Prozesse spielen eine entscheidende Rolle in der vertikalen Verteilung des TCO_2 und dessen Komponenten. Phytoplankton wandelt gelöstes CO_2 in der Oberflächenschicht in organische Verbindungen um und liefert damit die Grundlage für ein komplexes Nahrungsnetz. Ein Teil der organischen Verbindungen sinkt in Form von Partikeln in tiefere Wasserschichten und wird dort von Zooplankton und Bakterien größtenteils wieder in CO_2 und Nährstoffe umgewandelt. Dieser Prozess ist bekannt als die biologische Kohlenstoffpumpe. Wir wissen aus den im Inlandeis eingefrorenen Luftbläschen, dass Klimaänderungen in der Vergangenheit sich auch im CO_2 -Gehalt der Atmosphäre widerspiegeln. Die atmosphärischen Konzentrationen während der letzten Jahrhunderttausende schwankten zwi-

schen ca. 180 ppm während der Eiszeiten und ca. 280 ppm während der Warmzeiten – heute sind sie bereits bis ca. 400 ppm angestiegen.

Im Südozean führten eine durch die Ozeanzirkulation veränderte Nährstoffzusammensetzung und eine effektivere Nutzung der Nährstoffe zu einer Verstärkung der biologischen Pumpe. Dadurch wurden große Mengen an Kohlenstoff in den tiefen Ozean verbracht, die erst im Übergang zur nächsten Warmzeit wieder in die Atmosphäre entlassen wurden. Es wird angenommen, dass dieser Kohlenstoff während der Eiszeiten im tiefen Pazifik gespeichert war und auch über den Südozean wieder der Atmosphäre zugeführt wurde. Bezüglich der genauen Mechanismen der Umverteilung des CO_2 sind noch viele Fragen offen. In den Warmzeiten wird die schwächere biologische Pumpe im Südozean zum Teil durch eine erhöhte Produktivität im hohen Norden kompensiert, die dort während der Eiszeiten unter einer weitestgehend geschlossenen Eisdecke fast komplett zum Erliegen gekommen war. Während der zentrale Arktische Ozean dabei relativ wenigen Veränderungen unterlegen ist, sind es in den Warmzeiten vor allem die arktischen Randmeere und Schelfgebiete, in denen sehr viel Kohlenstoff umgesetzt wird. Eine große Menge des auf den Schelfen produzierten organischen Kohlenstoffs wird über Umlagerungsprozesse doch noch in den tiefen Arktischen Ozean transportiert und dort dann über längere Zeiten gelagert. Dieses Nord-Süd-Wippenmuster auf Eiszeit/Warmzeit-Zeitskalen spiegelt sich auch in der Zufuhr von Sauerstoff in die tiefen Ozeanbecken wider. Während unter heutigen Bedingungen das in den hohen nördlichen Breiten gebildete, sauerstoffreiche Nordatlantische Tiefenwasser eine zentrale Rolle für die globale Umwälzzirkulation spielt, wurden die tiefen Ozeanbecken in den Eiszeiten fast ausschließlich über den Südozean mit Sauerstoff versorgt. Entsprechende räumliche Verschiebungen in der Tiefenwasserbildung sind allerdings auch auf sehr viel kürzeren Zeitskalen in Verbindung mit abrupten Klimaveränderungen nachgewiesen worden. Weil der gesamte Kohlenstoffkreislauf komplexen Wechselwirkungen unterliegt und zusätzliches, anthropogenes CO_2 den Kreislauf erheblich stört, ergeben sich zahlreiche neue Forschungsfelder und offene Fragestellungen.

Die eiszeitliche Abnahme des CO_2 -Gehalts der Atmosphäre um 35% kann nur durch eine Aufnahme des CO_2 durch die Ozeane erklärt werden. Eine maßgebliche Rolle spielte dabei der Südozean.

Durch Boden- und Tiefenwasserbildung an den Rändern der Polarmeere und durch Zwischenwasserbildung im ACC werden Konzentration von z.B. CO_2 , Sauerstoff sowie Nährstoffe im Weltozean entscheidend geprägt. Auch anthropogenes CO_2 , aufgenommen an der Oberfläche, wird so von den Polaren Ozeanen in tiefere Schichten verfrachtet und der Atmosphäre entzogen. Die Differenzierung des anthropogenen Teils des CO_2 von dem sehr hohen Hintergrund an natürlichem CO_2 im Ozean ist extrem schwierig. Natürliche Variationen in allen Prozessen, die den ozeanischen Kohlenstoffgehalt bestimmen, sind in den polaren Regionen groß, mit Auswirkungen auf die CO_2 -Aufnahme und -Verteilung.

Physikalische und biologische Prozesse befinden sich in einem sensiblen Gleichgewicht, das durch Klimawandel leicht gestört werden und so die CO_2 -Senke im Südozean stark beeinträchtigen kann. Die Empfindlichkeit des Kohlenstoffkreislaufs gegenüber Klimaänderungen kann durch die Untersuchung von Umweltarchiven in marinen Sedimenten erfasst werden.

Während die horizontale Zirkulation in den Polaren Ozeanen im Allgemeinen gut bekannt ist, gilt dies nur in eingeschränktem Maße für die Vertikalbewegungen. Der CO_2 -Gehalt in der oberflächennahen Schicht wird bestimmt von der Konkurrenz zwischen physikalisch bedingtem Auftrieb, mit Neigung zu CO_2 -Erhöhung in der Oberfläche (und damit weniger CO_2 Aufnahme aus der Atmosphäre), und biologischer CO_2 -Aufnahme durch die biologische Pumpe, mit Neigung zur CO_2 -Verminderung in der Oberfläche. Unter dem Einfluss von beobachteten Klimaschwankungen hat sich diese Wechselwirkung bereits verändert und möglicherweise hat sich der physikalisch angetriebene Auftrieb schon verstärkt. Dies führt zu einer Verminderung der CO_2 -Aufnahme des Ozeans. Wie sich dies in Zukunft weiterentwickeln

und welche Rolle der Auftrieb von Nährstoffen spielen wird, ist eine der wichtigsten offenen Fragen.

In der Zukunft wird die Rolle der biologischen Prozesse für die CO_2 -Aufnahme zunehmen (siehe Infobox Revelle-Faktor, Kap II.4.4.). Es gibt noch viele „Unbekannte“ im Verständnis der biologischen Pumpe, zum Beispiel wie sich die Umweltbedingungen (Eisen-, Lichtlimitierung) auf die Mikroalgen und damit auf die CO_2 -Aufnahme auswirken und welche Rolle die Struktur des Nahrungsnetzes für den Export von CO_2 in die Tiefe spielt. In Polaren Ozeanen spielt das Meereis eine vielfältige Rolle. Für den CO_2 -Haushalt ist das Meereis ein Deckel, der speziell im Winter dafür sorgt, dass Gase aus dem übersättigten Oberflächenwasser nicht in die Atmosphäre entweichen können. Veränderungen in der Meereisbedeckung werden zweifellos das Aufnahme/Abgabe-Verhalten von CO_2 beeinflussen. Aber auch indirekt sind Veränderungen in den CO_2 -Flüssen zu erwarten. Besonders im Arktischen Ozean, in dem große Flächen im Sommer seit etwa 20 Jahren zunehmend eisfrei sind, können Zirkulation und Schichtung des Ozeans sich ändern. Dies hat Auswirkungen auf die Verfügbarkeit von Nährstoffen, und damit auf das Ökosystem und die biologische Primärproduktion; in Folge dessen wird sich der biologisch gesteuerte Teil des CO_2 -Haushalts ändern. Ferner wird der Salzgehalt des Arktischen Ozeans verändert, was die Pufferkapazität gegenüber pH-Veränderungen (die Alkalinität) des Ozeans für die CO_2 -Aufnahme reduziert. Mit weiter voranschreitender Erwärmung des Südozeans (Sektion 2.4.1.) wird auch hier die Eisdecke in Zukunft Änderungen erfahren - große Veränderungen sind bereits an der Antarktischen Halbinsel zu beobachten -, mit großen Folgen für die vertikalen CO_2 -Flüsse. Der Südozean ist das größte zusammenhängende Gebiet, in dem Eisen für den Nährstoffkreislauf und die biologische Pumpe limitierend ist. Es ist bekannt, dass die Verteilung von Eisen im tiefen Ozean nicht homogen ist. Änderungen in der Zirkulation werden sich so unterschiedlich in verschiedenen Gebieten auf die Eisenzufuhr auswirken. Andere Quellen von Eisen sind bisher nicht ausreichend quantifiziert, z.B. Eisen aus Sedimenten, Meereis und Eisbergen. Die Zufuhr von Eisen wird den Kohlenstoffexport in die Tiefe bestimmen und somit die Aufnahme von CO_2 aus der Atmosphäre.

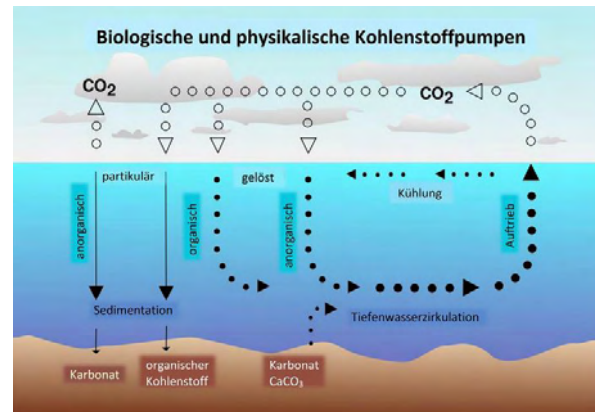


Abbildung II.4.4: Die biologische und physikalische Kohlendioxid-Pumpe des Ozeans.

Ohne die biologische Pumpe würde das Südpolarmeer kein CO_2 aufnehmen, sondern CO_2 abgeben, das durch den Auftrieb von kohlenstoffreichem Tiefenwasser an die Oberfläche gelangt.

Ein bedeutender Teil des durch Verbrennen fossiler Brennstoffe und durch veränderte Landnutzung zusätzlich in die Atmosphäre emittierten CO_2 wird durch physikalische Prozesse im Südozean aufgenommen.

II.4.4 Ursache und Auswirkungen der Versauerung im polaren Ozean

An der Meeresoberfläche findet ein Gasaustausch zwischen Atmosphäre und Meerwasser statt, bis sich ein Gleichgewicht des CO_2 -Gehalts in beiden Medien einstellt. Die Zunahme der atmosphärischen CO_2 -Konzentration in den letzten 200 Jahren hat zu einer verstärkten Aufnahme von CO_2 durch den Ozean geführt. CO_2 reagiert mit Wasser und bildet Kohlensäure: dadurch steigt der Säuregehalt (seit Beginn der Industrialisierung um 30%) und sinkt der pH-Wert. Diese Abnahme im pH-Wert wird als 'Ozeanversauerung bezeichnet. Ozeanversauerung ist eine direkte Folge des CO_2 -Anstiegs in der Atmo-

sphäre. Betroffen sind zunächst die oberen Schichten des Ozeans, in denen ein Großteil der marinen Organismen lebt. Durch Zirkulation und Vermischung wird die Versauerung aber nach und nach auch in tiefere Schichten eingetragen.

Die Versauerung ist in den Polargebieten am stärksten, da geringe Temperaturen die CO_2 -Aufnahme begünstigen. In der Arktis führt das Schmelzen des Meereises zu einer noch schnelleren Versauerung, weil Süßwasser eine geringere Alkalinität (Pufferkapazität gegenüber pH-Änderungen) als Salzwasser hat. In der Antarktis trägt zusätzlich der durch den Klimawandel und das Ozonloch verstärkte Auftrieb von kohlenstoffreichem Tiefenwasser zur Versauerung bei. Die Versauerung verändert die Chemie der Meere. Die pH-Abhängigkeit des Karbonatsystems führt dazu, dass mehr von dem aufgenommenen Kohlenstoff als CO_2 verbleibt und weniger Karbonat-Ionen vorhanden sind. Dadurch nimmt auch der Revelle-Faktor zu (siehe Infobox), ein Maß für die ozeanische Aufnahmekapazität von CO_2 pro Zunahme von atmosphärischem CO_2 : mit zunehmendem Revelle-Faktor nimmt der Oberflächenozean immer weniger des zusätzlichen CO_2 aus der Atmosphäre auf. Außerdem ist die Meereschemie bei höherem Revelle-Faktor saisonal stärkeren Schwankungen unterworfen. Dieser Effekt ist in den saisonal geprägten Polargebieten besonders wichtig und wird die Versauerung weiter beschleunigen.

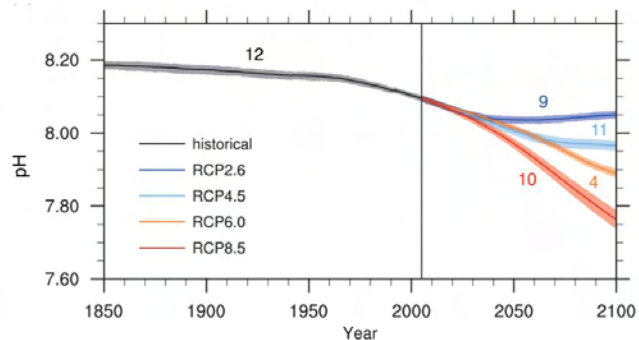


Abbildung II.4.5: Abnahme des globalen OberflächenpH-Wertes. RCPs: IPCC Szenarien, RCP8.5 ist das mit den höchsten CO_2 Emissionen. Zahlen: Anzahl der benutzten Klimamodelle. Quelle: IPCC AR5, Technical summary, Figure TS.20a.

Modelle sagen voraus, dass der Ozean im Jahr 2100 um 150% saurer sein wird. Es bestehen erhebliche Lücken im Verständnis der Rückkopplungen zwischen chemischen, biologischen und physikalischen Veränderungen im Ozean und der Atmosphäre auf die Versauerungsrate und das marine Ökosystem

Die Ozeanversauerung in den Polargebieten hat weitreichende Auswirkungen auf die Organismen, die an diese Umgebung angepasst sind. Speziell kalkbildende Organismen, wie einige wichtige Algenarten, Plankton und Kaltwasserkorallen sind hierbei betroffen: höhere pH-Werte können zu einer Auflösung ihrer Kalkschalen und damit zu verringertem Fraßschutz oder zum Absterben dieser Organismen führen. Andere Tiere im polaren Nahrungsnetz, wie zum Beispiel Krebse, Lachse oder Wale, für die diese kalkbildenden Organismen eine wichtige Nahrungsquelle darstellen, wären dadurch betroffen.

INFO BOX: Der Revelle-Faktor

Der Revelle Faktor beschreibt anschaulich, wie groß der Prozentsatz des atmosphärischen CO_2 ist, der in der oberflächennahen Schicht des Ozeans aufgenommen werden kann. Je wärmer das Ozeanwasser und je mehr CO_2 der Ozean bereits aufgenommen hat, desto größer ist der Revelle Faktor und desto geringer ist die Aufnahmekapazität des Oberflächenwassers. Durch den Klimawandel und die steigenden CO_2 Konzentrationen in der Atmosphäre wird sich der Revelle Faktor in den kommenden 100 Jahren weiter erhöhen und die mögliche CO_2 -Aufnahme in der Zukunft reduzieren. Ein hoher Revelle-Faktor bedeutet aber auch, dass biologische CO_2 -Bindung durch Algenwachstum im Sommer zu mehr CO_2 -Aufnahme führen kann als heute. Dies kann in den Polargebieten die Versauerung noch verstärken.

Auch die biologische Kohlenstoffpumpe wird durch die Ozeanversauerung beeinflusst: Es steht zu vermuten, dass die Änderung des pH-Wertes auch Auswirkungen auf den organischen Kohlenstoffkreislauf hat: Aggregation und Absinken von organischen Partikeln, die mikrobielle Umsetzung organischer Verbindungen und physiologische Prozesse werden durch den pH-Wert des Meerwasser beeinflusst. Die Mechanismen dieser Änderungen und deren Auswirkungen auf Organismen und den zukünftigen Kohlenstoffkreislauf sind wichtige Bausteine zukünftiger Forschung. Die Herausforderung für zukünftige Studien besteht darin, diese Effekte mit weiteren wichtigen Einflussgrößen, wie Temperaturänderung, Lichtverfügbarkeit und Einfluss von erhöhtem CO₂ auf das Wachstum (Düngeeffekt) abzugleichen und daraus ein integriertes Verständnis der zu erwartenden Auswirkungen in den Polargebieten zu erreichen.

Offene Forschungsfragen

- 1. Wie beeinflussen die natürliche Klimavariabilität und der anthropogene Wandel die Meereisbedeckung, die Zirkulation der Polarmeere und die Massenbilanz der Eisschilde?**
- 2. Wie sind Klimaänderungen in den Polargebieten an die Dynamik der globalen Ozeanzirkulation gekoppelt?**
- 3. Wie stark ändern sich die ozeanische Aufnahme und der Transport von Wärme, Gasen, Nährstoffen und Spurenmetallen in den Polarmeeren?**
- 4. Welche Auswirkungen hat dies auf die polaren marinen Ökosysteme?**



II.5. Biodiversität

Biodiversität beschreibt das gesamte Spektrum des Lebens. Der Begriff schließt nicht nur die Vielzahl aller natürlich vorkommenden Tier- und Pflanzenarten, Mikroorganismen und Pilze terrestrischer und aquatischer Habitats der Antarktis und Arktis ein, sondern auch die genetische Vielfalt innerhalb jeder Art. Auch die spezifischen, komplexen ökologischen Prozesse und Wechselwirkungen werden zur Biodiversität gezählt. Diese Prozesse sind Grundlage zahlreicher polarer Ökosystem-Dienstleistungen, wie z.B. der Kohlendioxid-Aufnahme und -Speicherung durch das Phytoplankton. Deswegen müssen wir die Biodiversität der Polargebiete erforschen, verstehen und versuchen, sie zu bewahren.

IN KÜRZE

Terrestrische polare Ökosysteme werden vor allem geprägt durch niedrige Temperaturen, extreme klimatische Saisonalität, kurze Vegetations- bzw. Reproduktionszeiten und relativ geringe Artenzahlen. Polare Tier- und Pflanzenarten begegnen diesen Bedingungen meist durch physiologische Anpassung, saisonale Migration (Tiere) und eine oftmals hohe Lebenserwartung. Aufgrund der Ozean-Kontinent-Verteilung sind terrestrische Ökosysteme der Arktis deutlich artenreicher als die der Antarktis.

Die heutige Biodiversität von Arktis und Antarktis ist das Ergebnis evolutionärer Anpassung über geologische Zeiträume, angetrieben von hydrographischen und klimatischen Veränderungen, die in ihrer Summe zu einer ausgeprägten Kaltwasser-Situation führten. Gleichermaßen prägend ist die starke Saisonalität, die sich aus den Bestrahlungsverhältnissen ergibt. Im Rhythmus von Polartag und Polarnacht verändern sich u.a. Eis- und Schneebedeckung, Nahrungsangebot und die Verfügbarkeit von offenem Wasser an Land und im Meer. Durch diese Bedingungen steht vielen Organismen nur eine sehr kurze Vegetations- bzw. Reproduktionszeit zur Verfügung. Unterschiede in der Biodiversität der beiden Polarregionen resultieren aus der unterschiedlichen Dauer der Kaltwassergeschichte - Antarktis ca. 20 Millionen Jahre, Arktis ca. 2 Millionen Jahre - und der unterschiedlichen Topographie der beiden Ozeane; das Südpolarmeer ist ein Ringozean um einen zentralpolaren Kontinent, das Nordpolarmeer

ist ein von Landmassen umschlossenes Mittelmeer. Das unterschiedliche Alter der beiden Polarmeere ist die wesentliche Ursache für deutliche Unterschiede in verschiedenen Aspekten der Biodiversität: In der Antarktis finden sich mehr Arten und komplexere Nahrungsnetze, der Anteil an endemischen Arten (nur dort vorkommend) ist wesentlich höher (in den meisten marinen Tier- und Pflanzengruppen über 50%), und viele Arten sind an ihren Kaltwasser-Lebensraum extrem gut angepasst. Dagegen ist im terrestrischen Bereich die starke Isolation der Antarktis ausschlaggebend für die dort deutlich geringere Artenvielfalt. Insgesamt jedoch ist die Biodiversität vieler Organismengruppen der Polargebiete nach wie vor wenig verstanden. Das gilt insbesondere für die Tiefsee-Fauna und für terrestrische Mikroorganismen.

II.5.1 Klimaänderungen und Biodiversität

Die gegenwärtigen, durch die globale Erwärmung angetriebenen Klimaänderungen sind in der gesamten Arktis und insbesondere an der antarktischen Halbinsel stark ausgeprägt. Der für die nächsten Jahrzehnte prognostizierte Klimawandel wird in den Polargebieten - neben steigenden Temperaturen und zunehmender Versauerung des Meerwassers - zu verstärkten Schnee- und Eisschmelzen, einem veränderten jahreszeitlichen Niederschlagsaufkommen, einem Anstieg des Meeresspiegels, zunehmender Küstenerosion und dem weiteren Auftauen von Permafrostböden führen. Im Vergleich zu evolutionären Zeitskalen laufen diese Veränderungen sehr schnell ab. Das birgt für polare Ökosysteme und ihre teils hoch spezialisierten Organismen das Risiko, dass sie sich nicht in der nötigen Geschwindigkeit anpassen können. Der Klimawandel bedroht somit massiv die Biodiversität und damit die Funktionalität polarer Ökosysteme. Diese Annahmen basieren vorwiegend auf theoretischen und modellhaften Studien, denn bisher kennen wir nur wenige Prozent aller polaren Organismen gut genug, um klimabedingte Veränderungen überhaupt dokumentieren zu können.

Die Biodiversität spielt aber in vielen klimarelevanten Prozessen der Polargebiete eine wichtige Rolle (z.B. Bindung und Freisetzung von Kohlendioxid). Veränderungen der Lebensgemeinschaften können daher auch auf das Klimasystem rückkoppeln, diese Mechanismen sind aber bisher nicht gut verstanden. So bestimmt das Klima die biogeographische Verbreitung der Arten in den Polargebieten. Veränderungen in den Temperaturverhältnissen haben einen direkten Einfluss auf jahreszeitliche Aktivität, Verhalten und Fortpflanzung, sowie Konkurrenzfähigkeit und Nahrungsbeziehungen polarer Organismen. Hierdurch kann es zu starken Verschiebungen in den Verbreitungsgebieten bis hin zur Auslöschung empfindlicher Arten, sowie in der Struktur ganzer Ökosysteme und somit letztendlich deren Funktionen kommen. Es mehren sich die Anzeichen, dass sich die Zusammensetzung arktischer und antarktischer Lebensgemeinschaften gegenwärtig deutlich zu verändern beginnt.

Der antarktische Krill gehört zu den Leuchtgarnelen, und gilt aufgrund seiner gewaltigen Biomasse von ungefähr 500 Millionen Tonnen als erfolgreichste Tierart der Weltmeere. Er dient als Nahrungsquelle für Wale, Robben, Pinguine und andere Meeresvögel sowie für die meisten Fische der Antarktis.

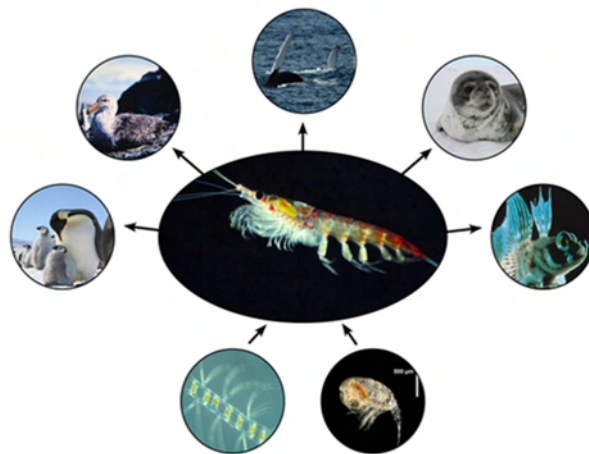


Abbildung II.5.1: Die Stellung des antarktischen Krills (*Euphausia superba*) im Nahrungsnetz des Südpolarmeeres (AWI Infografik)

Der Krill ernährt sich bevorzugt vom Phytoplankton der Wassersäule und von den produktiven Algen-Gemeinschaften an der Unterseite des Packeises. Gerade eine Verminderung des antarktischen Meereises, wie es vor der antarktischen Halbinsel zu beobachten ist, führt zu deutlich geringeren Krillpopulationen, da besonders die Larven und Jungtiere im Winter auf die Eisalgen angewiesen sind. Die Versauerung des Meerwassers aufgrund der verstärkten Aufnahme von Kohlendioxid durch die Ozeane ist ein zusätzlicher Stressfaktor. Der Chitinpanzer des Krill besteht zum Teil aus schwerlöslichen Kalziumverbindungen, die in saurem Wasser schwerer zu bilden und leichter aufzulösen sind. Dadurch wird die Entwicklung von Jungtieren von erhöhten Kohlendioxid-Konzentrationen beeinträchtigt.

Der antarktische Krill *Euphausia superba* ist ein ökologischer Schlüsselorganismus des Südpolarmeers. Es mehren sich Hinweise auf einen Rückgang seiner Bestände, mit möglichen dramatischen Folgen für die pelagischen Nahrungsbeziehungen.

Eine starke Abnahme des Packeises im Zusammenspiel mit erhöhten Wassertemperaturen und erniedrigten pH-Werten würde schwerwiegende Auswirkungen auf die Krillbestände nach sich ziehen, mit dramatischen Konsequenzen für die vom Krill abhängigen Konsumenten, insbesondere für Vögel, Robben und Wale. So hat sich für das Gebiet der westlichen Antarktischen Halbinsel, welches eine der sich am schnellsten erwärmenden Regionen der Erde ist, am Beispiel der Adelie-Pinguine gezeigt, dass eine Abnahme im Krillbestand unmittelbar den Bruterfolg und somit dem Bestand dieser Vögel beeinträchtigt. Die Beobachtung, dass gleichzeitig die Anzahl brütender Esels-Pinguine ansteigt, zeigt die Komplexität des Systems. Die Nahrungsbeziehungen zwischen Krill, Fischen, Pinguinen und Seevögeln sind zudem ein gutes Beispiel für die Verknüpfung mariner und terrestrischer Ökosysteme in den Polargebieten.



Abbildung II.5.2: Adelie Pinguin auf seinem Nest nach einem Schneesturm (Foto: O. Mustafa)

Klimaänderungen in den terrestrischen Gebieten der Polarregionen sind gut dokumentiert, ihre Auswirkungen auf landlebende Organismen aber kaum untersucht.

Flora und Vegetation der Arktis und Antarktis unterscheiden sich deutlich voneinander. So sind für die Antarktis nur zwei einheimische Gefäßpflanzen beschrieben, während in der Arktis über 2000 Arten vorkommen. Die extremen Standorte beider Regionen werden meist von Moosen, Flechten, Algen und Cyanobakterien dominiert, wobei die Biodiversität dieser Gruppen bisher nur lokal erfasst wurde. Eine sorgfältige molekular-taxonomische Bearbeitung als Grundlage der Erfassung der Biodiversität dieser Flora steht noch aus. Höhere Lufttemperaturen und zunehmende Niederschläge begünstigen schnellwüchsige Pflanzen, so dass Gefäßpflanzen, Moose und Algen vermutlich auf Kosten der Flechten profitieren werden.

So breitet sich die Antarktische Schmieie (*Deschampsia antarctica*) im Bereich der Antarktischen Halbinsel immer weiter auf vormalig von Flechten dominierten oder vegetationsfreien Arealen aus. Weiterhin werden Verwitterungsprozesse und damit verbundene biogeochemischen Kreisläufe beschleunigt, was wiederum die bodenlebenden Organismen und deren Interaktionen maßgeblich beeinflusst. Um die zu erwartenden Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Biodiversität polarer mariner und

terrestrischer Systeme abschätzen und bewerten zu können, ist zum einen ein tieferes Verständnis der ökosystemischen Zusammenhänge notwendig. Zum anderen müssen wichtige Bestandteile (wie z.B. Schlüssel-Arten) und Prozesse (wie z.B. Primärproduktion) polarer Ökosysteme großräumig und langfristig quantifiziert werden. Dafür müssen moderne und effiziente Methoden wie Fernerkundung (weiter-) entwickelt und eingesetzt und die internationale Zusammenarbeit gestärkt werden.

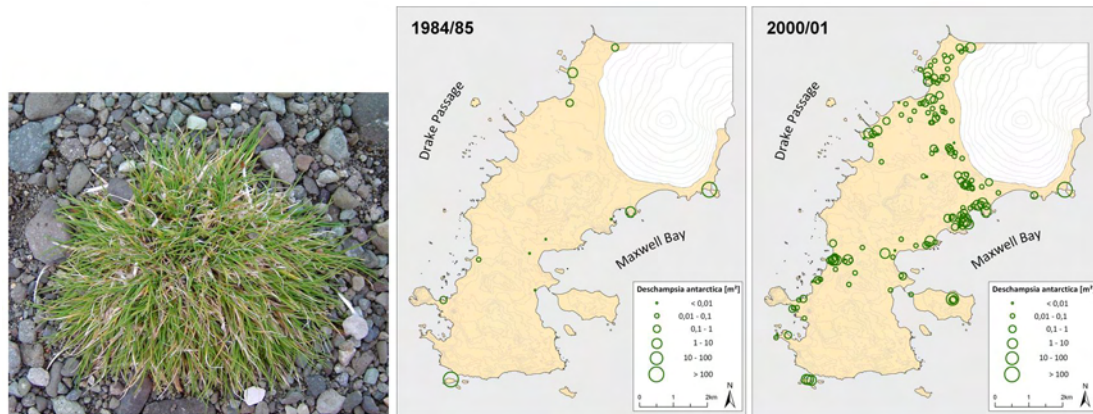


Abbildung II.5.3: Ausbreitung der Antarktischen Schmiege (*Deschampsia antarctica*) auf der Fildes Halbinsel (Pflanzenbild: O. Mustafa, Karten überarbeitet nach Gerighausen U., Bräutigam K., Mustafa O. und Peter H.U. 2003. Expansion of vascular plants on an Antarctic island – a consequence of climate change? In A.H.L. Huiskes et al. (eds.): Antarctic biology in a global context. S. 79–83. Leiden: Backhuys Publishers)

II.5.2 Struktur und Funktion polarer Lebensgemeinschaften

Organismen sind an allen wesentlichen biogeochemischen Austauschprozessen zwischen den Kompartimenten Meerwasser, Atmosphäre, Sediment und Meereis beteiligt. Dies geschieht durch vielfältige metabolische Aktivitäten wie z.B. der Photosynthese. Insbesondere die drei Partialsysteme Meereis, Wassersäule und Meeresboden sind in den Polargebieten eng miteinander verknüpft, wobei der vertikale Partikeltransport von organischer Substanz eine zentrale Rolle spielt. Gerade die Eis-assoziierten Bakterien und Mikroalgen stellen eine wichtige Nahrungsquelle für viele wirbellose Tiere der Wassersäule und des Meeresbodens dar, die wiederum als Nahrung für Fische, Seevögel und Warmblüter dienen. Die Nahrungsbeziehungen zwischen all diesen Organismen sind jedoch deutlich komplexer als früher angenommen. Wir wissen wenig über die Biodiversität vieler wichtiger Organismengruppen der Polargebiete. Entsprechend wenig können wir über die Reaktion der betroffenen Lebensgemeinschaften auf Umweltveränderungen sagen. So tragen bspw. am Meeresboden lebende Kieselalgen in bestimmten Flachwassergebieten signifikant zur Primärproduktion bei, es ist aber noch ungewiss, ob die ökologische Leistungsfähigkeit der Gemeinschaft in Zukunft so bleiben wird.

Biologische Bodenkrusten dominieren große Flächen der Arktis und der maritimen Antarktis; ihre Struktur, Funktion und Bedrohung durch Umweltveränderungen sind kaum untersucht.

Ähnlich verhält es sich mit vielen terrestrischen Organismen. Grünalgen und Cyanobakterien sind z.B. typische und häufige Komponenten biologischer Bodenkrusten der Polarregionen. Diese Gemeinschaften bilden wasserstabile Aggregate und üben ökologisch wichtige Funktionen hinsichtlich Primärproduktion, Stickstofffixierung, Nährstoffkreislauf, Wasserretention und Bodenbildung und -stabilisierung aus. Obwohl kaum Daten über die Biodiversität dieser phototrophen Mikroorganismen in der Arktis und Antarktis vorliegen, wird ihre funktionelle Bedeutung als Ökosystem-Entwickler nährstoffarmer terrestrischer Gebiete, z.B. exponierter Böden nach Gletscherrückzug, als sehr hoch eingeschätzt.

II.5.3 Organisation polarer Ökosysteme

Die Polargebiete gehören wegen ihrer extremen Umweltbedingungen und Unzugänglichkeit immer noch zu den Ökosystemen der Erde, über die wir am wenigsten wissen. Der Begriff *Ökosystem* bezeichnet das Zusammenspiel zwischen einem Lebensraum und seinen tierischen, pflanzlichen und mikrobiellen Bewohnern. Gerade die Vielfalt der polaren Organismen ist nach wie vor völlig unzureichend untersucht. Dabei sind alle Bestandteile des Ökosystems voneinander abhängig; wenn ein Element abnimmt oder verschwindet, kommt es zu Störungen in der Funktion des ganzen Gefüges. Ökologisch unterscheiden sich die polaren Meeresgebiete grundlegend von den Landökosystemen der Arktis und Antarktis. Während die terrestrischen Lebensräume vor allem von der Sonnenenergie und Wasserverfügbarkeit abhängig sind, ist in den polaren Ozeanen die Verfügbarkeit von Nährstoffen ein Schlüsselfaktor. Beiden Polargebieten ist gemeinsam, dass sich die Ökosysteme und ihre jeweiligen Organismen über Millionen Jahre Erdgeschichte an die dort herrschenden Kaltwasserbedingungen angepasst haben. Da der Kaltwassercharakter über die Jahreszeiten relativ konstant ausgeprägt ist, haben die meisten polaren marinen Organismen eine geringe Temperaturltoleranz. Kleinste Änderungen dieser extremen, aber stabilen Lebensbedingungen können viele polare Tiere, Pflanzen und Mikroorganismen nur schwer, manchmal gar nicht kompensieren.

Die Struktur vieler Ökosysteme der Polarregionen ist massiv durch den Klimawandel bedroht, mit unübersehbaren Folgen für die vielfältigen ökologischen Funktionen.

Die Randregionen des polaren Meeres sind der wichtigste marine Lebensraum für die arktische und antarktische Pflanzen- und Tierwelt. An der Unterseite der Eisschollen existieren einzellige Algen, von denen wenige Zentimeter lange Krebse, wie der Krill der Antarktis, leben, die wiederum als Futter für viele Fischarten dienen, die die Hauptnahrungsquelle von Meeressäugern und Seevögeln darstellen. In der Arktis profitiert vom Zooplankton vor allem der Polardorsch, der die Hauptnahrungsquelle für Ringelrobben ist. Für Eisbären sind die Eisrandregionen das natürliche Jagdrevier, in dem sie auf Robbenjagd gehen. Die Verringerung der Ausdehnung des arktischen Meereises wird die auf dem Eis lebenden Säuger, wie Eisbär und Ringelrobbe, unmittelbar in ihren Ernährungsgewohnheiten und bei der Aufzucht der Jungen, die auf dem Eis erfolgt, beeinträchtigen. Der Rückgang des arktischen Packeises betrifft aber auch Seevogelarten, wie die Elfenbeinmöwe, die an die Eisbedeckung angepasst ist, da sie dort nach Futter sucht. Durch die zunehmende Eisschmelze des arktischen Ozeans muss die Elfenbeinmöwe immer größere Distanzen von den Nist- zu den Futterplätzen zurücklegen, was sich in einem höheren Energieverbrauch und somit letztendlich geringeren Reproduktionserfolg widerspiegelt. Dieses Beispiel belegt, wie einschneidend klimabedingte Veränderungen im Lebensraum Eis bis auf die höchste trophische Ebene wirken können.

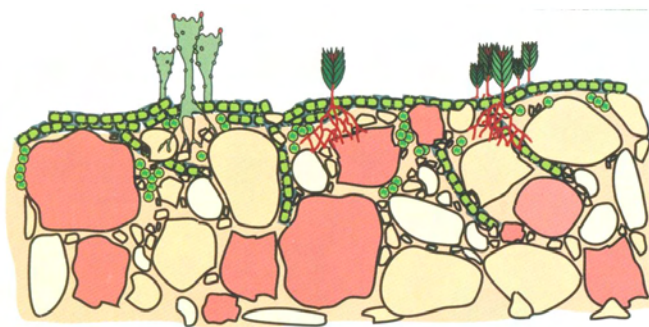


Abbildung II.5.4: Schematischer Querschnitt durch eine biologische Bodenkruste mit Moosen, Flechten, filamentösen und einzelligen Algen und Cyanobakterien (© B. Büdel)

Eine reiche Artenvielfalt findet sich auch auf dem polaren Meeresboden, dessen Bewohner nahezu ausschließlich von der Zufuhr organischen Materials (Algenzellen, Kotballen des Zooplanktons u.ä.) aus den oberflächennahen Schichten abhängen. Die Biodiversität dieser benthischen Lebensgemeinschaften ist besonders hoch in der polaren Tiefsee, wo mit jeder Expedition zahlreiche neue Arten entdeckt werden, und auf dem antarktischen Schelf, dessen Schwamm-Gemeinschaften zum Teil an

die Komplexität tropischer Korallenriffe heranreichen.

Im Gegensatz zur Antarktis finden sich in der terrestrischen Arktis drei Vegetationszonen mit den für sie typischen Ökosystemen, d.h. die polare Eiswüste, die Tundra und der nördliche Teil des borealen Nadelwaldes. Da die polare Eiswüste und die Tundra extreme Umweltbedingungen, wie große saisonale Temperaturfluktuationen aufweisen, leben hier nur hoch angepasste Organismen, wie Algen, Flechten, Moose und einige Zwergsträucher. Aufgrund ihrer spezifischen Anpassung sind diese Pflanzen, insbesondere die langsam wüchsigen Flechten, auf extreme, aber relativ stabile Umweltverhältnisse angewiesen. Eine Erwärmung der Arktis führt zu einer Verschiebung der Vegetationszonen, wie dem borealen Nadelwald, in Richtung Norden. Viele der Anpassungsmechanismen, die es den arktischen Organismen ermöglichen, in dieser lebensfeindlichen Gegend zu überleben, begrenzen ihre Konkurrenzfähigkeit gegenüber den neu eindringenden Arten. Hinzu kommt, dass sich die Erwärmung der Arktis mit einer Geschwindigkeit vollzieht, die eine Anpassung der heimischen Arten an die neuen Umweltbedingungen unmöglich macht. Da der Verlagerung der Tundra ihrerseits nach Norden Grenzen gesetzt sind, besteht die Gefahr, dass sie mit den steigenden Temperaturen an Fläche verlieren wird. Damit verschwinden große Teile eines Ökosystems, das die weltweit einzigartige Vielfalt von über 600 Moos- und 2000 Flechtenarten beherbergt. Neben der Zerstörung der Lebensgrundlage der dort lebenden Tierarten wird auch die Brutfläche für die vielen Zugvögel reduziert, die jedes Jahr in den Norden fliegen, um ihre Jungen groß zu ziehen.

II.5.4 Schutz polarer Ökosysteme

Aufgrund der extremen naturräumlichen Bedingungen der Polargebiete sind die dortigen Ökosysteme besonders empfindlich und haben äußeren Eingriffen oftmals nur wenig entgegen zu setzen. Auch sind die Regenerationszeiten für Organismen deutlich länger als in anderen Regionen. Gefahren für polare Ökosysteme entstehen auf sehr unterschiedlichen Ebenen. Neue Routen, die sich der Seefahrt durch den Rückgang des Meereises im Arktischen Ozean bieten, bedrohen insbesondere bei Havarien nicht nur die Meeresgebiete selbst, sondern auch deren Küsten. Fischerei in polaren Gewässern greift massiv in marine Ökosysteme ein, so dass einige arktische Meeresgebiete bereits als überfischt gelten. Ganze Lebensräume wie die Kaltwasserkorallenriffe werden durch ungeeignete Fischereimethoden bedroht. Auch in der Antarktis nehmen legaler und illegaler Fang von Fischarten wie dem Schwarzen und dem Antarktischen Seehecht zu. Daneben ist der Südozean das weltweit wichtigste Fanggebiet für Krill, dem wiederum eine Schlüsselrolle im Nahrungsnetz der Antarktis zukommt. Auch wenn es ein funktionierendes System zur Regulierung und Überwachung der Fischereiaktivitäten in der Antarktis gibt (CCAMLR), fehlt es oftmals an genügend Grundlagendaten zur Ökologie und zur quantitativen Entwicklung der Gesamtpopulationen von betroffenen Arten sowie zu den Auswirkungen, die deren Fang auf andere Elemente des Ökosystems hat.



Abbildung II.5.5: Zweiundzwanzig Jahre alte Fahrzeugspuren von 1982 auf Ardley Island, Foto: O. Mustafa

Der Antarktische Seehecht (*Dissostichus mawsoni*) wird seit 1996 intensiv befischt - zurzeit mit jährlich ca. 4000 t. Die Größe seiner Population ist nicht bekannt und auch seine Biologie ist erst in Ansätzen erforscht.

Der zunehmende Tourismus bietet neben Chancen („Werbung“ für den Erhalt polarer Ökosysteme) auch Risiken, die sowohl im Transport, als auch im Aufenthalt vor Ort liegen. Beispiele hierfür sind Havarien von Schiffen oder Flugzeugen, die Störung von Tieren oder die Beschädigung der Vegetation vor Ort. Nicht zuletzt sei auf die Gefahr der Einschleppung fremder Arten verwiesen. Es ist zu erwarten, dass die im schiffsbasierten Tourismus geltenden Management-Regelungen (IAATO) insbesondere auch auf landgestützten und Individualtourismus ausgedehnt und angepasst werden müssen. Als Basis für die Ausweisung von Schutzgebieten und die Aufstellung von Managementplänen sind jedoch konkrete fachliche Grundlagen zum Vorkommen und zum Gefährdungspotential der Schutzgüter (z.B. Tierkolonien, Pflanzenvorkommen, Fossilien) zu erarbeiten.

Die Gewinnung von Rohstoffen ist in der Antarktis zumindest für die Laufzeit des Antarktisvertrages ausgeschlossen. In der Arktis jedoch sind insbesondere aufgrund des Eisrückgangs erhebliche Erkundungsaktivitäten zu beobachten. Um in dem ohnehin schwierigen politischen Umfeld Regelungen zu treffen, bedarf es einer deutlich fundierteren fachlichen Grundlage zur Sensibilität und auch zur quantitativen Beschaffenheit der dortigen Ökosysteme vor allem im marinen Bereich. Neben den genannten direkten lokalen bzw. regionalen Gefahren gibt es auch eine Reihe von indirekten Bedrohungen polarer Ökosysteme durch globale Prozesse, die in ihrer Wirkung nicht minder dramatisch erwartet werden. Insbesondere die Folgen des Klimawandels wirken sich auf verschiedenen Ebenen aus: So wird das marine System nicht nur durch den Rückgang des Meer- und Schelfeises, sondern ebenfalls durch einen lokal vermehrten Eintrag von Süßwasser aus schmelzenden Gletschern beeinflusst. Gleiches gilt für die Versauerung des Meerwassers aufgrund der vermehrten Aufnahme von atmosphärischem Kohlendioxid und eine Reihe weiterer Effekte, die bisher nur in Ansätzen bekannt sind.

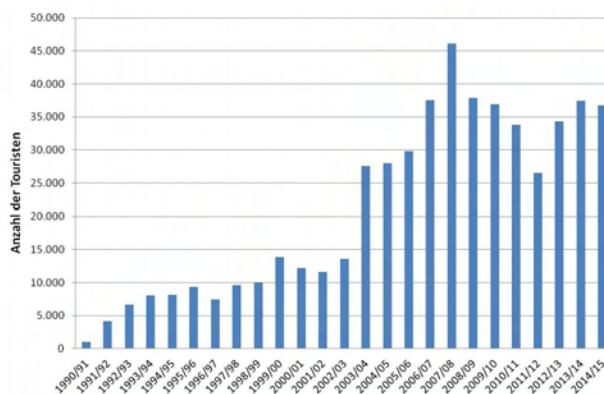


Abbildung II.5.6: Entwicklung der Touristenzahlen in der Antarktis (© O. Mustafa, basierend auf IAATO Daten)

INFO BOX: Relevante Prozesse

Gefahren durch lokale und regionale Prozesse:

- Fischerei
- Rohstofferkundung
- Tourismus
- Logistik

Gefahren durch globale Prozesse:

- Klimawandel
- Müll (Mikroplastik) und Schadstoffe im Ozean
- Ozonloch

Terrestrische Ökosysteme sind in den Polargebieten, vor allem aber in der Antarktis, oft sehr eng mit marinen Systemen verbunden, da viele Nahrungsketten im Meer beginnen. Die genaue Verknüpfung mariner und terrestrischer Lebensräume ist jedoch erst in Ansätzen verstanden. Gleiches gilt für den Einfluss veränderter Niederschlagsregime (z.B. auf Brutvögel). Nicht zuletzt ist mit der Einwanderung neuer Arten zu rechnen, deren Ausmaß und Einfluss momentan noch nicht abzusehen ist. Als weitere globale Prozesse, die Auswirkungen auf polare Ökosysteme haben, seien die Verbreitung von Müll, Mikroplastik und anderen Schad-

stoffen durch Meeresströmungen sowie die weitere Entwicklung des Ozonloches genannt. Insgesamt bedarf es eines tieferen Systemverständnisses, um die Empfindlichkeit und Widerstandsfähigkeit der polaren Teilökosysteme einschätzen zu können. Eine besondere Herausforderung stellt, nicht nur hierbei, die Unterscheidung von natürlichen und anthropogen verursachten Veränderungen dar. Um die Konsequenzen von lokalen und globalen Einflüssen für das Ökosystem zu erfassen, ist es wichtig, standardisierte Beobachtungs- und Quantifizierungsmethoden zu entwickeln und anzuwenden. Hierfür sollten Indikatorarten identifiziert werden, die sich zum einen gut beobachten lassen und zum anderen aussagekräftig für den Zustand des Ökosystems sind. Um der Ausdehnung und der naturräumlichen Vielfalt der Polargebiete gerecht zu werden, werden die Möglichkeiten, welche die Fernerkundung bietet, flankiert von Untersuchungen vor Ort, an Bedeutung gewinnen. Sowohl das Ausmaß der fachlichen Arbeit zum Schutz polarer Ökosysteme, als auch die politische Umsetzung konkreter Schutzmaßnahmen erfordert eine Stärkung der internationalen Zusammenarbeit (z.B. nationale Programme der Antarktisvertragsstaaten, SCAR, Arktischer Rat, IASC).

Offene Forschungsfragen

1. **Welche Wechselwirkungen bestehen zwischen terrestrischen und marinen Ökosystemen?**
2. **Wie sind Empfindlichkeit und Widerstandsfähigkeit einzelner Bestandteile polarer Ökosysteme einzuschätzen?**
3. **Welche Arten eignen sich als Indikator für langfristige Beobachtung zum Zustand des Ökosystems und dessen Veränderung?**
4. **Welches quantitative Ausmaß haben Klimawandel-induzierte Veränderungen der Ökosysteme?**
5. **Welchen Einfluss haben Neobiota auf die Biodiversität der Polargebiete?**



- www.iaato.org
- www.ccamlr.org



II.6. Die polare Atmosphäre

Atmosphärische Prozesse sind charakterisiert durch einen extrem großen Skalenbereich. So sind am unteren Ende dieses Skalenbereichs z.B. für den Energieaustausch zwischen Atmosphäre und Erdoberfläche Luftwirbel von wenigen Metern bis Millimetern zuständig, während Wettersysteme und lange Wellen von mehreren 1000 km die Energietransporte zwischen Polargebieten und mittleren Breiten bewerkstelligen. Die Wechselwirkung dieser Prozesse untereinander und mit anderen Komponenten des Klimasystems stellt eine große Herausforderung sowohl an die Beobachtung als auch an die Modellierung dar.

IN KÜRZE

Die Polargebiete sind mit den mittleren Breiten über großskalige atmosphärische Zirkulationen gekoppelt.

Die Wechselwirkungen zwischen der Atmosphäre und dem Ozean und dem Meereis sind von entscheidender Bedeutung für die polaren Klimasysteme.

Der Temperaturanstieg durch den Klimawandel ist in der Arktis um ein Mehrfaches stärker ausgeprägt als im globalen Mittel.

Regelmäßige Beobachtungen und Prozessbeobachtungen unter dem Einsatz moderner Messgeräte sind unabdingbar.



II.6.1 Beobachtungssysteme

Trotz großer Fortschritte im Bereich satellitengestützter Fernerkundungsverfahren sind auch in Zukunft Messungen vor Ort unerlässlich. Ohne diese In-situ-Messungen ließen sich die Daten aus der Fernerkundung nur bedingt kalibrieren und Modellberechnungen nicht verifizieren. Für diese Zwecke unterhält das AWI zwei ganzjährig betriebene Forschungsstationen (Neumayer-III in der Antarktis, AWIPEV auf Spitzbergen) sowie eine Reihe kleinerer temporär betriebener Einrichtungen. Die ortsfesten Observatorien werden durch die Messungen des Eisbrechers POLARSTERN sowie der Flugzeuge POLAR5

und POLAR6 ergänzt. Die meteorologischen Forschungsprogramme der deutschen polaren Beobachtungssysteme liefern wesentliche Beiträge zum GLOBAL CLIMATE OBSERVING SYSTEM (GCOS) der World Meteorological Organization (WMO). Die synoptischen Wetterbeobachtungen sowie Wetterballonaufstiege werden unverzüglich international ausgetauscht. Da sie aus sehr datenarmen Regionen stammen, haben sie für die weltweiten Wettervorhersagen eine besonders große Bedeutung. Am Alfred-Wegener-Institut werden alle Daten persistent in dem Datenarchiv PANGAEA gesichert und allen Forschenden frei über das Internet zur Verfügung gestellt. Diese raren und wertvollen Klimazeitreihen gilt es fortzuführen.

II.6.2 Wechselwirkung der Atmosphäre mit Eis und Ozean

Der Austausch von Energie, Impuls und Spurengasen an der Grenzfläche Atmosphäre-Eis-Ozean ist ein Schlüsselprozess im polaren Klimasystem. Er beeinflusst maßgeblich Meereisbildung und -transport, Ozeanströmungen, Windsysteme und Energiebilanz über den polaren Eisschilden. Einen wesentlichen Einfluss auf den Austausch haben Vorgänge in der oberflächennahen Atmosphärenschicht, der sog. Grenzschicht. Ihre Dicke beträgt nur wenige hundert Meter und oft sogar weniger als 50 Meter. Die Intensität des Austausches hängt von den Oberflächeneigenschaften (Geländeneigung, Rauigkeit, Oberflächentemperatur, Meereiskonzentration, Eis- und Schneedicke, Schmelztümpel) sowie von den meteorologischen Bedingungen (Wind, Lufttemperatur, Feuchte, Wolken, u.a.) ab. Aufgrund der geringen Grenzschichtdicke und der damit verbundenen kleinen räumlichen Skala der Austauschprozesse sind diese in Wettervorhersage- und Klimamodellen nur näherungsweise darstellbar und müssen durch vereinfachte Verfahren (Parametrisierungen) beschrieben werden.

Der Austausch von Energie und die Massenbilanz an der Oberfläche der Eisschilde werden maßgeblich durch den katabatischen Wind beeinflusst. Er entsteht durch die Abkühlung der Grenzschicht über den geneigten Eisflächen und dominiert die Struktur des Windfelds über Grönland und der Antarktis. Der katabatische Wind ist mit hohen Windgeschwindigkeiten verbunden, im Extremfall mit mehr als Windstärke 12 in Bodennähe. Sehr intensive Wechselwirkungsprozesse finden im Winter über Regionen statt, in denen die Meereisbedeckung durch offenes Wasser unterbrochen ist. Ein wichtiges Beispiel ist die Bildung von Wasserflächen im Meereis des Küstenbereichs, den sog. Polynjas. Eine Polynja bildet sich, wenn das Meereis durch Wind wegtransportiert wird. In einigen Regionen der Antarktis wird dies durch den katabatischen Wind verursacht.



Abbildung II.6.1: Seerauch zeigt besonders intensive Austauschprozesse über einer Eisirinne an, Foto: G. Heinemann

Das Besondere an den Polynjas ist, dass die Eisproduktion und die Wechselwirkung mit der Atmosphäre in einem eng begrenzten Gebiet stattfinden. So bildet die Eisproduktion in den Polynjas des südlichen Weddellmeeres den Motor für die antarktische Tiefenwasserbildung, die weit in die mittleren Breiten hineinreicht. Die Modifikation der atmosphärischen Grenzschicht durch eine Polynja kann sich bis mehrere hundert Kilometer windabwärts der Polynja erstrecken. Ähnlich große Energietransporte findet man in der Eisrandzone und dem angrenzenden offenen Ozean bei polaren Kaltluftausbrüchen. Die dadurch bewirkte Modifizierung der atmosphärischen Grenzschicht (Temperatur, Wind) hat u.a. Auswirkungen auf den Eistransport am Rande des Packeisgebietes.

Aufgrund von Wind und Ozeanströmungen entstehen häufig im Innern der polaren Ozeane schmale Risse im Meereis, die sog. Eisirinnen (Abb. II.6.1). Eisirinnen haben typischerweise eine Breite von 1 km,

ihre Länge kann aber 100 km und mehr betragen. Im Winter erfolgt ein wesentlicher Teil der Eisbildung in den Eisrinnen. Der intensive Energieeintrag durch Eisrinnen in die Atmosphäre hat große Auswirkungen auf die bodennahe Atmosphäre. Ein Eisrinnenanteil von 5% kann die Lufttemperatur ca. 5°C in 12 Stunden erhöhen.



Abbildung II.6.2: Polynja vor der Filchner-Ronne-Schelfeiskante (Antarktis), Foto: G. Heinemann

Das Verständnis der Wechselwirkungsprozesse und die Repräsentation dieser Prozesse in Wettervorhersage- und Klimamodellen müssen verbessert werden, u.a. um die großen Unsicherheiten der Klimamodelle z.B. bezüglich der Entwicklung des Meereises zu reduzieren. Dazu müssen sowohl regelmäßige Beobachtungen als auch Prozessbeobachtungen in weiten Teilen der Polargebiete unter dem Einsatz moderner Messgeräte durchgeführt sowie Prozesse hochaufgelöst modelliert werden.

II.6.3 Telekonnektionen der Polargebiete mit mittleren Breiten

Arktische Verstärkung

Der in den letzten Jahren nahezu regelmäßig im September beobachtete dramatische Rückgang der arktischen Meereisbedeckung zeigt exemplarisch die Auswirkungen der in der Arktis ablaufenden drastischen Klimaänderungen. Dass dieser Meereis-Rückgang in der Arktis von den meisten Klimamodellen unterschätzt wird, weist darauf hin, dass das Verständnis der verursachenden Prozesse und Rückkopplungsmechanismen zwischen Atmosphäre, Meereis, Ozean sowie Wolken und Aerosolpartikel noch unvollständig ist. Projektionen für die zukünftige arktische Klimaentwicklung sind derzeit daher noch nicht verlässlich möglich.

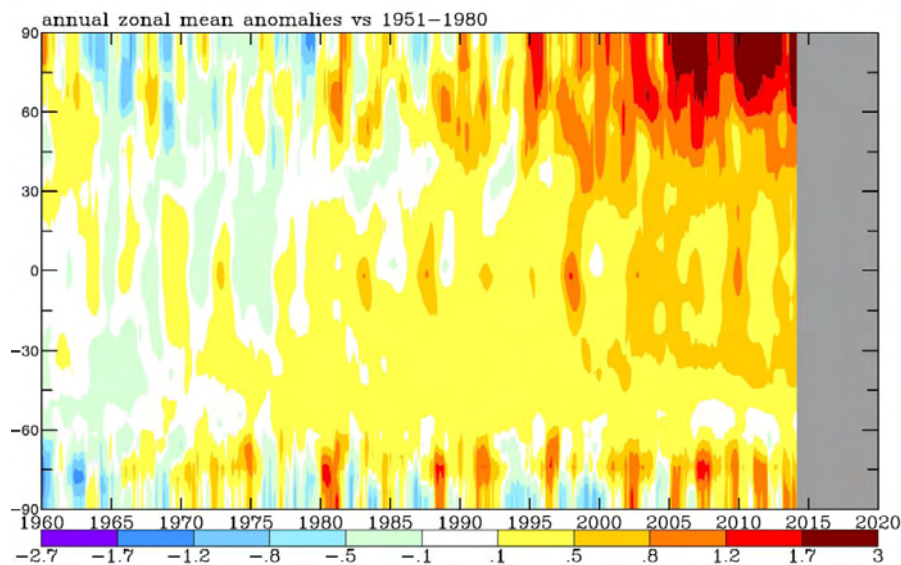


Abbildung II.6.3: Zeitreihe der jährlich zonal gemittelten bodennahen Lufttemperaturabweichung (in °C) im Vergleich zur Mitteltemperatur zwischen 1961-1990. Die horizontale Achse zeigt das Jahr, die vertikale Achse die geographische Breite. Quelle: http://data.giss.nasa.gov/gistemp/time_series.html

Die derzeitige überdurchschnittliche Erwärmung der Arktis zeigt sich am deutlichsten in den gemessenen bodennahen Monatsmittel-Temperaturanomalien im Vergleich zu 1981-2010, die z.B. im Februar 2012 bis zu 7°C betrugen. Dieser Temperaturanstieg ist ungefähr drei bis vier Mal größer als im globalen Mittel. Diese überhöhte bodennahe Lufttemperatur in der Arktis im Vergleich zu globalen Änderungen nennt man „Arktische Verstärkung“ („Arctic Amplification“, s. Abb. II.6.3). Eines der wesentlichen Probleme bei der Modellierung des arktischen Klimas ist die unzureichende Kenntnis der relativen Stärke von verschiedenen Prozessen und positiven Rückkopplungsmechanismen. Die direkte Albedo-Rückkopplung ist prinzipiell gut verstanden (s. Kap. II.2). Der indirekte Albedo-Effekt ist weniger gut quantifiziert. Er besteht in dem Zusammenwirken von Prozessen des Energieaustauschs an der Oberfläche, Wolken und Strahlungsprozessen sowie großskaligen Transporten von Wärme und Feuchte. Außerdem spielen Aerosolpartikel (insbesondere Ruß) in der Atmosphäre, aber auch im Schnee/Eis eine Rolle bei der arktischen Verstärkung. Insbesondere Prozesse, die mit der Wolkenrückkopplung verbunden sind, sind sowohl qualitativ als auch quantitativ noch nicht gut verstanden.

Atmosphärische Telekonnektionsmuster

Die Verteilungen von Luftdruck und Temperatur in der Arktis unterliegen Schwankungen auf interannuellen bis zu dekadischen Zeitskalen, die mit großskaligen atmosphärischen Telekonnektionsmustern verbunden sind. Die arktische Oszillation (AO) stellt in allen Jahreszeiten das dominierende Variabilitätsmuster der Nordhalbkugel dar. Während der positiven Phase der AO ist der Luftdruck in der gesamten Arktis niedriger als normal bei gleichzeitig höherem Luftdruck in mittleren und subtropischen Breiten. Ein großer Teil der beobachteten arktischen Erwärmung bis zum Ende des 20. Jahrhunderts lässt sich mit den Änderungen der Arktischen Oszillation und weiterer Telekonnektionsmuster verstehen. Vor allem in den 1990er Jahren trat die positive Phase der AO mit positiven Temperaturanomalien über der westlichen Eurasischen Arktis und einer Ausdehnung der nordatlantischen Zyklonenzugbahn nordwärts in den Arktischen Ozean auf.

Die verstärkte Erwärmung im letzten Jahrzehnt ist verbunden mit dem Anstieg der Konzentration der Treibhausgase, dem Anstieg der Konzentration von Ruß-Aerosolen, einem Anstieg der Wolkenbedeckung im Frühling mit verstärkter abwärtsgerichteter langwelliger Strahlung, und mit einem drastischen Rückgang der arktischen Meereisbedeckung im Sommer. Gleichzeitig haben sich die atmosphärischen Telekonnektionsmuster grundlegend umgestellt, und es treten häufiger Zirkulationsmuster mit starken meridionalen Strömungskomponenten auf. Die bodennahe Erwärmung durch den Rückgang des Meereises beeinflusst die Stabilität der Atmosphäre und begünstigt die Entstehung und Ausbreitung von Tiefdruckgebieten. Die dadurch bedingten Veränderungen der Luftdruck- und Zirkulationsmuster der Nordhemisphäre im Winter ähneln dem Strömungsmuster der Arktischen Oszillation in der negativen Phase: in Jahren mit geringer Meereisbedeckung im Sommer tritt im darauffolgenden Winter ein im Mittel

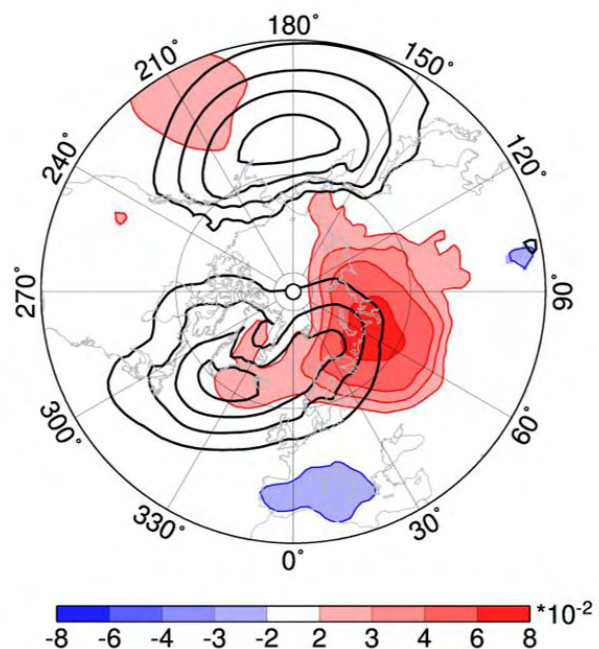


Abbildung II.6.4: Zusammenhang zwischen Meereisrückgang im Zeitraum 1979–2012 und Bodenluftdruck. Blau: negative Abweichungen des Bodenluftdrucks in den mittleren Breiten. Rot: positive Druckabweichungen in polaren Breiten. Schwarze Konturlinien zeigen die über den Gesamtzeitraum gemittelte Lage des Aleutentiefs und des Islandtiefs. Quelle: Dethloff et al., in: Lozan et al., Warnsignal Klima, 2014

schwächer ausgeprägter Luftdruckunterschied zwischen mittleren und polaren Breiten auf (s. Abb. II.6.4). Dadurch wird weniger warme Luft vom Atlantik auf die Kontinente getragen und es steigt die Wahrscheinlichkeit für den Einbruch kalter Luftmassen aus Norden und Osten bis nach Mitteleuropa. Dabei besteht ein Zusammenhang mit großskaligen planetaren Wellen, welche sich im Winter vertikal zwischen der Troposphäre und Stratosphäre ausbreiten. Diese werden durch die veränderten Bedingungen infolge der veränderten Meereisbedeckung derart modifiziert, dass sie den Polarwirbel stören.

II.6.4 Polares Klimasystem und Ozonschicht

Polare Ozonschicht

Der Abbau der stratosphärischen Ozonschicht in den Polarregionen gehört zu den stärksten vom Menschen verursachten Veränderungen im Erdsystem. In der Stratosphäre, der Luftschicht von etwa 15-45 km Höhe, wird der Strahlungshaushalt und damit auch die Temperaturverteilung von der Absorption solarer Strahlung in der Ozonschicht dominiert. Durch die dabei entstehende Wärme nimmt die Temperatur dort um mehrere zehn Grad Celsius nach oben hin zu. In der Antarktis kommt es jedoch derzeit in jedem Frühjahr zu einem praktisch vollständigen Verlust der Ozonschicht und auch in der Arktis wird im Bereich des Ozonschichtmaximums in einigen Jahren mehr als die Hälfte des Ozons zerstört. Die daraus resultierende Umstellung des Strahlungshaushalts der Atmosphäre und das Fehlen der strahlungsbedingten Heizquelle kann besonders in den Polargebieten einen großen Einfluss auf das Klima haben. Beruhend auf dem Erfolg des Montrealer Protokolls zum Schutz der Ozonschicht wird mit einer Erholung der Ozonschicht in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts gerechnet. Da die Erholung der Ozonschicht Auswirkungen auf das Klima der Antarktis haben wird muss die Entwicklung der Ozonschicht weiterhin überwacht werden, was den langfristigen Betrieb von polaren Beobachtungssystemen erfordert.

Wechselwirkungen zwischen Ozonschicht und Klima

Als integraler Teil des Klimasystems wird sowohl der Zustand der Ozonschicht von Klimaänderungen beeinflusst als auch das restliche Klimasystem von Veränderungen im Bereich der Ozonschicht. Die direkte Strahlungswirkung wachsender atmosphärischer Treibhausgas-Konzentrationen führt zu einer Abkühlung der Stratosphäre. Die Temperaturen in der winterlichen polaren Stratosphäre unterliegen jedoch darüber hinaus komplizierten dynamischen Prozessen. Das Verständnis dieser gegenseitigen Wechselwirkungen und die Bemühungen, diese in Erdsystemmodellen korrekt abzubilden, stehen noch am Anfang. Es besteht erheblicher Forschungsbedarf, um den Einfluss der Ozonschichterholung auf das Oberflächenklima hoher Breiten vorhersagen zu können. Im Gegensatz zur globalen Erwärmung hat sich der zentrale antarktische Kontinent bis zur Jahrtausendwende abgekühlt, bei jedoch gleichzeitig starker Erwärmung der antarktischen Halbinsel (Abbildung II.6.5, siehe auch Abbildung II.6.3). Dieses Muster der Temperaturveränderungen ist das Ergebnis einer verstärkten zonalen Luftmassenströmung um die Antarktis herum (siehe Pfeile in Abbildung II.6.5).

Die verstärkte zonale Strömung unterdrückt den Luftmassenaustausch zwischen der Antarktis und mittleren Breiten und die damit einhergehenden meridionalen Wärmetransporte, welche eine wesentliche Wärmequelle für die Antarktis darstellen. Dieser Umstand führt zu der These, dass der Schwund der Ozonschicht die in weiten Bereichen der Antarktis beobachtete Abkühlung begünstigt hat. Gleichzeitig führt die Verstärkung der zonalen Strömung zu verstärkten Wärmetransporten zur antarktischen Halbinsel, welche quer in der Strömung liegt. Die Stärke der zonalen Strömung ist Teil eines zwischen Stratosphäre und Troposphäre gekoppelten Variabilitätsmodes der Atmosphäre, welcher als Southern Annular Mode (SAM) bezeichnet wird. In der Stratosphäre hat das Ozonloch (Abbildung II.6.5) durch eine Koppelung zwischen Strahlung und Dynamik zu einer deutlichen Verstärkung des SAM geführt.

Modellstudien weisen darauf hin, dass sich diese vom Ozonloch verursachte Verstärkung bis zum Erdboden durchgesetzt hat. Die erwartete zukünftige Erholung des Ozonlochs lässt eine Abschwächung dieser Prozesse in den kommenden Jahrzehnten erwarten. Die Auswirkungen auf die Entwicklung des Klimas der Antarktis und in der Folge auch z.B. auf das Meereis und die Eismassenbilanz der Antarktis können derzeit nicht robust quantifiziert werden. Der verstärkte SAM und die damit einhergehenden erhöhten Windgeschwindigkeiten haben im Bereich des Südozeans die Aufnahme von CO_2 im Ozean in der Vergangenheit begünstigt. Auch dieser Effekt könnte sich mit der Erholung des Ozonlochs zukünftig abschwächen oder umdrehen, was aber derzeit ebenfalls nicht robust vorhergesagt werden kann.

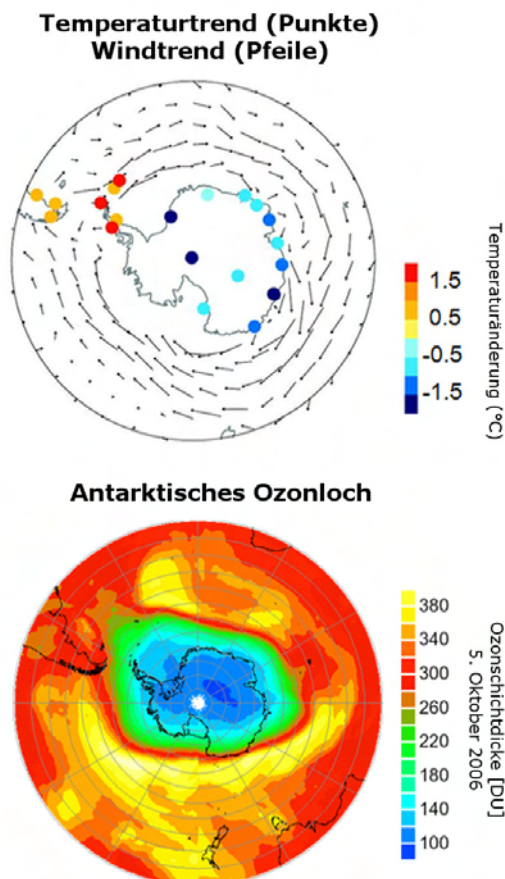


Abbildung II.6.5: Dezember-Mai-Trends der bodennahen Temperatur (farbig) während 1969-2000 und des Winds in ca. 800m Höhe (Pfeile, längster Pfeil entspricht 4m/s) während 1979-2000 (oben, Thompson and Solomon, Science, 2002) sowie typische Ozonschichtdicke (unten) im Oktober im Bereich der Antarktis.

Ebenfalls unklar ist derzeit der Einfluss von Änderungen im Bereich der Ozonschicht auf das Klima der Arktis. Die arktische Ozonschicht reagiert sehr empfindlich auf kleine Veränderungen der winterlichen stratosphärischen Temperaturen, mit deutlich massiverem Ozonverlust bei leicht niedrigeren Temperaturen. Daten aus den letzten vier Jahrzehnten legen eine Abkühlung der kalten Winter nahe, die zu erheblichen arktischen Ozonverlusten gerade in einigen Jahren seit der Jahrtausendwende beigetragen hat. Das Wirken ähnlicher physikalischer Zusammenhänge wie in der Antarktis lassen eine Kopplung zwischen Ozon und Klima vermuten, aber schwächerer Ozonabbau und größere meteorologische Variabilität in der Arktis erlauben es nicht, ein Signal statistisch signifikant aus Beobachtungszeitreihen zu identifizieren. Weitere Forschung ist erforderlich, um zu klären, ob Klimaänderungen die Erholung der arktischen Ozonschicht verzögern können.

Ein Grund für die mangelnde Fähigkeit, die Ozon-Klima-Kopplungen sicher beurteilen und für die Zukunft vorhersagen zu können, liegt darin, dass die meisten derzeitigen Erdsystemmodelle die Rückkopplungseffekte zwischen Ozonschicht und Klimasystem nur unbefriedigend abbilden. Die Forschung der letzten Jahre hat zwar inzwischen

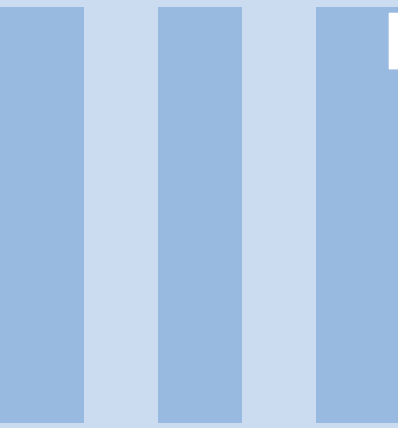
zu sehr detaillierten Modellen der chemischen Prozesse im Bereich der Ozonschicht geführt, welche die beobachtete Ozonschicht einschließlich der polaren Ozonverluste sehr gut wiedergeben. Diese Modelle sind jedoch z.Z. zu aufwändig, um für gekoppelte Klimasimulationen mit Erdsystemmodellen verwendet zu werden. Ziel aktueller Forschung ist eine gekoppelte Simulation der Ozonschicht in vollständigen Erdsystemmodellen, ohne deren Fähigkeit zur Darstellung vielfältiger Emissionsszenarien und größerer Ensembles zu verlieren. Dies erfordert die weitere Entwicklung vereinfachter und schneller Module der stratosphärischen Ozonchemie.

Offene Forschungsfragen

- 1. Wie reagiert das antarktische Klimasystem auf die Erholung der Ozonschicht?**
- 2. Wie beeinflusst der Meereisrückgang in der Arktis das Klima in Europa?**
- 3. Was ist die Ursache der „Arctic Amplification“?**
- 4. Wie können wir die Wechselwirkungsprozesse der Atmosphäre mit Eis und Ozean besser quantifizieren?**
- 5. Wie können kleinräumige Prozesse in Wettervorhersage- und Klimamodellen realitätsnäher berücksichtigt werden?**
- 6. Werden sich wichtige Wechselwirkungsprozesse im Klimawandel verändern?**



- www.awi.de/en/science/long-term-observations/atmosphere
- www.scar.org/science-themes/climate
- www.arctic.noaa.gov



Die Polargebiete im Erdsystem

III.1	Geologischer Untergrund	83
III.1.1	Antarktis	
III.1.2	Arktis	
III.2	Paläoklima	89
III.2.1	Klimaarchive	
III.2.2	Eisschilddynamik und Meeresspiegel	
III.2.3	Meereisbedeckung und Stoffkreisläufe	
III.2.4	Boden- und Tiefenwasserbildung	
III.3	Evolution und Anpassung	97
III.3.1	Evolution und genetische Anpassung	
III.3.2	Schlüsselarten und Nahrungsnetze unter Stress	
III.3.3	Verbreitungsmechanismen und Bioinvasion	
III.3.4	Beobachten, modellieren, verstehen, neue Methoden anwenden	
III.4	Erde und Weltraum	101
III.4.1	Neutrino-Astronomie	
III.4.2	Astrobiologie: Planetenanalogie und Exploration	



III.1. Geologischer Untergrund

Die beiden Polargebiete unterscheiden sich fundamental in ihrem geologischen Bau und der Zusammensetzung ihres Untergrundes. Während im Zentrum der Arktis mit dem Nordpolarmeer ein von Kontinenten umgebener Ozean liegt, befindet sich die Antarktis als von ozeanischem Raum vollständig umschlossener Kontinent am Südpol der Erde. Sowohl Arktis als auch Antarktis sind durch plattentektonische Prozesse geprägt, allerdings von grundlegend verschiedenem Charakter. Der große Bereich der Ostantarktis ist das Resultat wiederholter Kollisionen und erneuten Auseinanderbrechens von Krustenfragmenten unterschiedlichen Alters und Beschaffenheit seit fast vier Milliarden Jahren. Am pazifischen Plattenrand der Westantarktis hingegen sind Subduktions- und Akkretionsvorgänge während der letzten 500 Millionen Jahre der Erdgeschichte dokumentiert, was über einen solch langen Zeitraum weltweit einzigartig ist. Im Unterschied dazu ist die heutige Arktis infolge der Öffnung des Nordpolarmeres weitgehend von Dehnungsprozessen und Intraplattendeformation betroffen, während entsprechende Subduktionsprozesse vollständig fehlen.

III.1.1 Antarktis

Die Antarktis ist ein typischer, wenn auch eisbedeckter Kontinent mit einer teilweise bis über 40 km dicken kontinentalen Kruste, die in bestimmten Regionen ein Alter von über 3,8 Milliarden Jahren aufweist und damit zu den ältesten Krustenfragmenten der Erde gehört. Während ihrer erdgeschichtlichen Vergangenheit war die Antarktis nicht immer ein isolierter Kontinent nahe des Südpols, sondern befand sich mindestens zweimal im Zentrum so genannter Superkontinente. Zunächst war sie zentraler Teil des aus allen damaligen Erdteilen bestehenden Superkontinents Rodinia, der sich infolge weltweiter gebirgsbildender Prozesse vor etwa einer Milliarde Jahre bildete. Vor 500 Millionen Jahren formte die Antarktis das Herzstück des riesigen Gondwana-Kontinents, der sämtliche heutigen Südkontinente sowie den indischen Subkontinent in sich vereinte. Aufgrund dieser besonderen Situation birgt die Antarktis wertvolle Hinweise zum Prozessverständnis der Bildung und des Zerfalls solcher Superkontinente, wie auch zu deren besonderen klimatischen oder auch ozeanographischen Implikationen. Gondwana existierte mehr als 300 Millionen Jahre und begann erst vor etwa 180 Millionen Jahren wieder zu zerfallen – einhergehend mit heftiger vulkanischer Aktivität. In der Folgezeit spalteten sich die

Nachbarkontinente nacheinander von der zentral gelegenen Antarktis ab, und zwar zuerst Afrika, dann Indien-Madagaskar, dann Neuseeland und Australien mit der Öffnung der Tasman-Meeressstraße vor etwa 35 Millionen Jahren und schließlich Südamerika mit der Öffnung der Drake Passage vor etwa 20 Millionen Jahren. Dieser Prozess führte schließlich zur Isolierung der Antarktis am Südpol und infolge der Kopplung tektonischer, klimatischer und ozeanographischer Bedingungen seit etwa 35 Millionen Jahren zur vollständigen Vereisung des Kontinents und weltweiter Abkühlung.

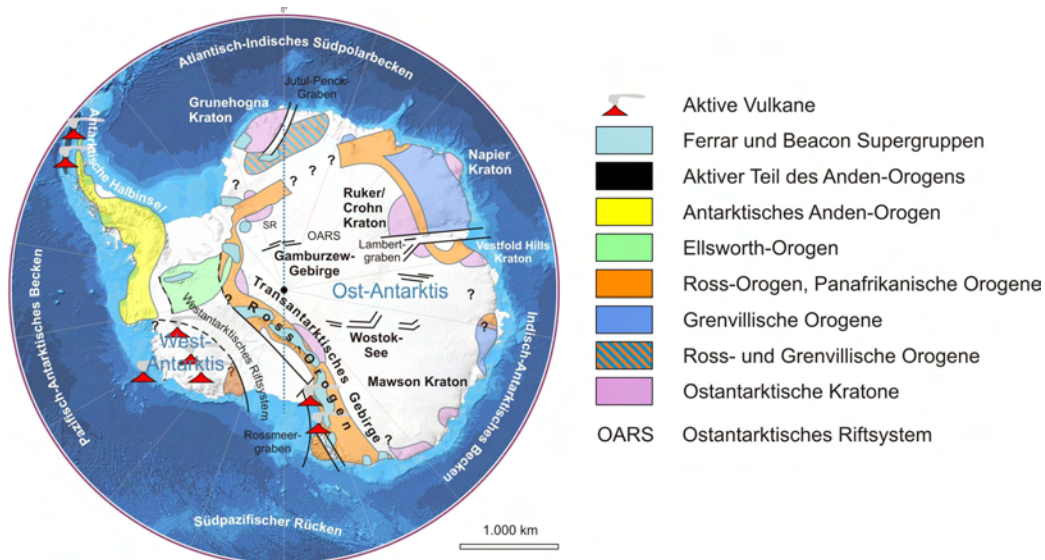


Abbildung III.1.1: Geologische Übersichtskarte der Antarktis (nach Melles et al., Polarforschung, 2015)

Nach heutigem Kenntnisstand besteht die Ostantarktis aus topographisch hoch liegender und weitgehend stabiler präkambrischer bis frühpaläozoischer kontinentaler Kruste mit Dicken um 35-40 km. Die topographisch niedrigere Westantarktis stellt eine Kollage jüngerer und nur 20-35 km dicker Krustenblöcke dar. Das junge und aktive Westantarktische Riftsystem, eines der größten kontinentalen Grabenbruchsysteme der Erde, durchzieht die Westantarktis vom Rossmeer bis zum Weddellmeer. Es ist durch Seismizität, erhöhten Wärmefluss und Vulkanismus gekennzeichnet. Weitere Merkmale sind eine stark ausgedünnte kontinentale Kruste und Becken, die bis zu 14 km mächtige Sedimente enthalten. Die morphologische Grenze zwischen Ost- und Westantarktis wird durch das 200 km breite und über 4000 m hohe Transantarktische Gebirge gebildet. Es durchzieht die Antarktis vom Atlantik bis zum Pazifik über eine Strecke von mehr als 2500 km und erreicht Krustendicken von 20 bis 45 km. Das Transantarktische Gebirge stellt die westliche, um mehr als 10 km herausgehobene Grabenschulter des Westantarktischen Riftsystems dar. Seine Entstehung geht also nicht auf Einengungs- bzw. Kollisionstektonik (wie z.B. Alpen oder Himalaya) zurück, sondern auf Dehnung kontinentaler Kruste. Damit stellt es unter den Hochgebirgen der Erde einen Sonderfall dar. Die morphologische Heraushebung des Transantarktischen Gebirges begann nach jüngstem, besonders auf Untersuchungen deutscher Wissenschaftler beruhendem Kenntnisstand erst vor etwa 35 Millionen Jahren, während gleichzeitig die sich absenkenden Becken des Rossmeeres große Mengen an Abtragungsschutt aus dem aufsteigenden Gebirge aufnahmen und die kontinentale Ostantarktis erstmalig von einem zusammenhängenden Eisschild bedeckt wurde.

Da die Antarktis zu etwa 99% unter Eis liegt, beruht der geologische Kenntnisstand auf lediglich ungefähr 1% des Kontinents. Zudem sind diese wenigen, an der Oberfläche aufgeschlossenen Bereiche aufgrund ihrer Unzugänglichkeit bei weitem nicht vollständig, zum Teil sogar geologisch noch nicht untersucht worden. Die von Eis bedeckten Gebiete der Antarktis sind bisher zu etwas mehr als die Hälfte mit geophysikalischen Methoden untersucht worden. Von diesen Gebieten liegt heute ein rela-

tiv zuverlässiges Bild des subglazialen Reliefs, signifikanter Großstrukturen, genereller Gesteinstypen (Sediment- gegenüber Festgestein) oder des Wärmefflusses vor. Andererseits ist aber fast die Hälfte des geologischen Baus der Antarktis nach wie vor kaum oder überhaupt nicht bekannt. Auch nimmt die Verlässlichkeit geophysikalischer Methoden mit zunehmender Entfernung zu zugänglichen Gesteinen ab, was die Bestimmung des geologischen Untergrundes einschränkt. Hier würde selbst wenig Probenmaterial, z.B. aus Gesteinsbohrungen, eine wesentliche Verbesserung des Kenntnisstandes erbringen. In diesem Zusammenhang wird deutlich, wie wichtig die enge Vernetzung geophysikalischer und geologischer Methoden in der Antarktis ist. Wie alle anderen Kontinente enthält auch die Antarktis alte Kerne oder Nuclei, die man traditionell als Kratone bezeichnet und die von jüngeren Faltengebirgszügen umgeben werden. Bis noch vor gut 30 Jahren galt die gesamte Ostantarktis als ein einheitlicher, seit etwa 1,5 Milliarden Jahren stabiler Krustenblock, der „Ostantarktische Kraton“. Heute wissen wir, dass der „Ostantarktische Kraton“ eine aus mehreren Kratonen zusammengesetzte Kollage repräsentiert. Bisher kennt man vier größere und einige kleinere dieser Kratone, deren Zahl jedoch mit zunehmendem Wissen vermutlich noch weiter anwachsen wird. Wenig bekannt sind die Nahtstellen oder Suturen zwischen den Kratonen, die zum Verständnis krustenbildender geodynamischer Prozesse in besonderer Weise beitragen. Die Rekonstruktion des Aufbaus und der Struktur der antarktischen Kruste als ehemaliges Herzstück Gondwanas und Rodinias ist von wesentlicher Bedeutung für das Verständnis grundlegender plattentektonischer Prozesse, insbesondere von Bildung und Vergehen von Superkontinenten und deren Rolle im globalen System.

Plattentektonische Vorgänge prägen nicht nur den Aufbau der Kontinente sondern auch die Struktur der Ozeane auf dem Globus. Durch Konvektion erneuert sich ihre Kruste permanent an den mittelozeanischen Rücken, während ältere Kruste an den Rändern abtaucht und durch Schmelzvorgänge aufgezehrt wird. Diese Subduktion führt im Falle des Pazifiks u.a. zur Bildung der Randgebirge der amerikanischen Kordilleren. Die älteste noch erhaltene ozeanische Kruste des Pazifiks datiert mit etwa 170 Millionen Jahren aus der Zeit des Jura. Für die Zeit davor gibt es keine direkten geologischen Belege, es sei denn, man findet ozeanische Relikte in älteren Randgebirgen vom Typ der Anden. Am pazifischen Rand der Antarktis entstanden in den letzten 500 Millionen Jahren drei Faltengebirge. Nur das jüngste, das andine Orogen der Antarktischen Halbinsel, fällt zeitlich mit dem gegenwärtigen Zyklus der pazifischen Krustenbildung zusammen. Die Analyse der beiden älteren Faltengebirge könnte also Hinweise auf die frühere Geschichte des Pazifiks ergeben. Vor allem die Arbeiten im ca. 500 Ma alten Ross-Orogen des Nord-Viktoria-Lands haben Hinweise für ein älteres Randgebirge am damals bereits bestehenden Pazifik geliefert. Das würde bedeuten, dass die Konvektionszelle unter dem Pazifik, also der Motor der pazifischen Plattenbewegung, seit mehr als 500 Millionen Jahren quasi ortsfest besteht. Ein derart langlebiges Konvektionssystem würde den Pazifischen Ozean deutlich von den anderen heutigen Ozeanen unterscheiden, die überwiegend durch den Zerfall Gondwanas ab 180 Millionen Jahren entstanden. Während die Schließung von Ozeanen in anderen Regionen der Erde zur Kollision von Kontinenten und Bildung von Faltengebirgen, wie der europäischen Alpen oder des Himalaya, führte, wurde die ozeanische Kruste des Pazifik nicht komplett aufgezehrt. Vielmehr wurde hier die Subduktionszone immer wieder episodisch ozeanwärts verlagert. Dieses Prinzip ist in Einzelsegmenten des Ozeanrands rund um den Pazifik zu beobachten (Japan, Nordamerika, Südamerika, Australien und Antarktis). Die Folge von drei durch Subduktion entstandenen Randgebirgen in der Antarktis liefert zwingende Argumente zu dieser Sonderstellung des Pazifiks. Es sind hier dringend weitere Arbeiten nötig, um diese plattentektonischen Forschungsansätze zu untermauern und die ablaufenden Prozesse besser verstehen zu können. Nach wie vor sehr lückenhaft ist daneben der Kenntnisstand über Prozessabläufe auf dem Kontinent und die antarktische Paläotopographie vor und während des Zerfalls von Gondwana, da entsprechende Ablagerungen dieser Zeit in der Ostantarktis nicht belegt sind. Gegenwärtig gültige paläogeographische und –klimatische Modellierungen beruhen weitgehend auf der Annahme einer statischen Topographie, die aber durch die Anwendung thermochronologischer Verfahren widerlegt wird. Die Verlässlichkeit der auf diesen Annahmen beruhenden Modelle hat jedoch weitreichende Auswir-

kungen z.B. für unser Verständnis der langfristigen Klimaentwicklung, der Entwicklung ökologischer Barrieren und Faunenradiation, der Rheologie und der Paläogeographie von (Super-) Kontinenten oder der Entwicklung der angrenzenden Kontinentalränder.

Offene Forschungsfragen

(Antarktis)

- 1. Wie sahen die Antarktis und deren geologischer Untergrund vor dem Aufbrechen Gondwanas aus? Wie lässt sich mit diesem Wissen unser Verständnis vom Entstehen und Zerfall von Superkontinenten verbessern?**
- 2. Welche Rolle spielten interne und externe Riftprozesse bei der Isolierung des antarktischen Kontinentes?**
- 3. Welche Eigenschaften hat der geologische Untergrund unter dem antarktischen Eisschild?**
- 4. Wie groß sind die heutigen vertikalen und horizontalen Krustenbewegungen in der Antarktis?**
- 5. Welchen Einfluss hatten tektonische Prozesse und Gebirgshebung in der Antarktis auf die langfristige globale Klimaentwicklung?**
- 6. Wie entwickelte sich die antarktische Landschaft nach dem Auseinanderbrechen Gondwanas? Wie interagieren Tektonik, Gebirgshebung, Gesteinsaufbau und Klima bei der Bildung dieser Landschaften?**

III.1.2 Arktis

Wie bei der Antarktis ist die plattentektonische Konstellation in der Arktis durch den Zerfall eines Großkontinents, nämlich Laurasia, entstanden. Im Gegensatz zur Antarktis hat sich jedoch bei dem Auseinanderdriften der eurasischen und nordamerikanischen Kontinentalplatten am Nordpol ein zentraler Ozean gebildet, der von passiven Kontinentalrändern begrenzt ist und nur über die schmale Framstraße zwischen Spitzbergen und Nordgrönland einen Tiefseezugang zu den Weltmeeren besitzt.

Der sehr heterogen aufgebaute Arktische Ozean zwischen den großen Landmassen der nördlichen Hemisphäre besteht heute aus zwei großen Tiefseebecken, dem Amerasischen und dem Eurasischen Becken, und einer Zahl unterseeischer Rücken und Plateaus, die aus ozeanischer Kruste oder, wie der Lomonossowrücken, aus kontinentaler Kruste aufgebaut sind. Während die Entstehung des jüngeren Eurasischen Beckens mit dem sich ultralangsam spreizenden Nansen-Gakkel-Rücken weitgehend geklärt ist, gibt es für die Öffnung und Entwicklung des älteren Amerasischen Beckens nach wie vor keine befriedigenden plattentektonischen Modelle. Um die Frage nach der Entstehung des Arktischen Ozeans besser zu verstehen, ist die Erforschung der zirkum-arktischen Kontinentalränder ausschlaggebend: Hier sind die Gesteine und die tektonischen Strukturen für Geologen direkt zugänglich und können aufgenommen, vermessen und analysiert werden. Wie bei einem gigantischen Puzzle müssen die verschiedenen Gesteinstypen und die geologische Entwicklung durch die langen Zeiträume der Erdgeschichte in den verschiedenen Randbereichen des Polarmeeres untersucht und aufgeschlüsselt werden, um diese mit anderen Gebieten vergleichen und Aussagen darüber machen zu können, ob und zu welcher Zeit welche der heute auseinanderliegenden Küsten des Arktischen Ozeans einmal zusam-

mengelegen haben und wann sie sich auseinander bewegt haben. So kann durch den Vergleich der erdgeschichtlichen und geologischen Entwicklung beispielsweise rekonstruiert werden, dass Spitzbergen vor 350 Millionen Jahren mit dem Nordrand von Nordamerika kollidierte, um mit diesem über 300 Millionen Jahre eine Einheit zu bilden, bevor beide sich vor 35 Millionen Jahren wieder trennten, wobei ein Stück Eurasiens an der äußersten Nordspitze von Ellesmere Island „hängengeblieben“ ist.



Abbildung III.1.2: Geologische Übersichtskarte der Arktis (aus Piepjohn et al., Geographische Rundschau, 2011)

Nach wie vor sind aber weite Bereiche der kontinentalen Arktis nicht miteinander verglichen worden. So ist immer noch ungeklärt, warum eine Anzahl von verschiedenen alten Faltengürteln oder Kollisionszonen auf den Kontinenträndern in Richtung des Arktischen Ozeans verlaufen und sich im Übergang zur Tiefsee verlieren, ohne auf der anderen Seite der Arktis wieder aufzutauchen. Diese Puzzleteile bilden nach wie vor isolierte Gebiete, deren passenden Gegenstücke noch gesucht und identifiziert werden müssen. Das komplizierte Netzwerk von großen und kleinen Kontinentschollen, die im Laufe der Erdgeschichte über den Globus gedriftet sind, miteinander kollidierten und sich wieder trennten, ist ein Grund dafür, warum gerade in der Arktis eine sehr enge Kooperation zwischen den marin arbeitenden Geophysikern und den an Land arbeitenden Geologen eine so große Rolle spielt.

Für den Geologen hört der beobachtbare und zugängliche Teil der Erdkruste sozusagen am Strand des Polarmeeres auf. Seewärts können nur noch geophysikalische Methoden helfen, um die Strukturen, den Aufbau und die Zusammensetzung der Erdkruste im Ozean sowie deren zeitliche Entwicklung zu erforschen: Wo befindet sich ozeanische und wo kontinentale Kruste? Wo lagen die untermeerischen Plateaus und

Rücken vor der Öffnung des Arktischen Ozeans? Andererseits können Geologen an Land die Bewegungen entlang großer Kollisionszonen oder Störungszonen und deren Alter ermitteln und damit wiederum (messbare) Rückschlüsse auf die Entwicklung im Ozean liefern.

Diese Fragen spielen eine große Rolle, wenn es letztendlich um die Bildung des Durchbruchs der Framstraße zwischen Spitzbergen und Nordgrönland geht. Damit wurde eine Verbindung zwischen dem Arktischen Ozean und dem Nordatlantik geschaffen hat, die wiederum die Voraussetzung für die Entstehung des Golfstroms und der heutigen klimatischen Verhältnisse auf der Nordhalbkugel war.

Offene Forschungsfragen*(Arktis)*

- 1. Wie sah die Arktis vor der Öffnung des Arktischen Ozeans aus?**
- 2. Welche geodynamischen Prozesse führten zur Öffnung des Arktischen Ozeans?**
- 3. Welche Rolle spielte Vulkanismus bei der Entwicklung der Arktis?**
- 4. Wie sind die großen Rückensysteme im Arktischen Ozean aufgebaut?**
- 5. Wann und wie haben sich die Meeresstraßen zum Weltozean gebildet?**
- 6. Wie bildeten sich die zirkumarktischen Sedimentbecken und welches Potential zur Bildung von Kohlenwasserstofflagerstätten haben sie?**



• www.bgr.bund.de



III.2. Paläoklima

Die anthropogenen Treibhausgasemissionen beeinflussen das gegenwärtige und zukünftige Klima maßgeblich. Für eine verbesserte Abschätzung zukünftiger Veränderungen bedarf es einer genauen Kenntnis über natürliche Klimavariationen und der verantwortlichen Prozesse aus Zeiträumen, in denen der Einfluss durch den Menschen keine Rolle spielte.

IN KÜRZE

Der Rückblick in die Erdgeschichte liefert grundlegende Informationen zur natürlichen Klimadynamik, die neben externen Antrieben, wie z.B. der Sonneneinstrahlung, auf interne Rückkopplungsprozesse im Klimasystem zurückgeht.

Solche Informationen sind u.a. in Sedimentablagerungen und Eisschilden gespeichert, deren Interpretation mit Hilfe numerischer Modellierung zum Verständnis der relevanten physikalischen und biologischen Prozesse beiträgt und damit wichtig für die verbesserten Prognosen zukünftiger Klimaentwicklungen ist.



III.2.1 Klimaarchive

Für das Verständnis der zukünftigen Klimaentwicklung benötigt die Klimaforschung vorrangig Informationen über Dauer, Geschwindigkeit, Frequenz und regionale Muster von lang- und kurzfristigen Klimavariationen. Dafür ist eine zeitliche Perspektive notwendig, die über den Zeitraum der instrumentellen Messreihen (d.h. die letzten 150 Jahre) und des anthropogen beeinflussten Wandels hinausgeht. Der Rückblick in die Erdgeschichte bildet daher eine wesentliche Basis zum Verständnis der Klimadynamik im Hinblick auf Veränderungen in den treibenden Kräften und der Bedeutung interner Rückkopplungsprozesse im Klimasystem. Derartige Informationen sind in Klimaarchiven gespeichert. Relevante Klimaarchive sind Sedimentablagerungen in den Weltmeeren und in Seen sowie Eisbohrkernen aus der Antarktis und aus Grönland (Abb. III.2.1).

Geochemische und physikalische Messungen an Proben aus diesen Archiven ermöglichen die Rekonstruktion natürlicher Klimavariationen, die Quantifizierung von Umweltveränderungen und die Entschlüsselung ursächlicher Prozesse. Aus solchen Messungen wissen wir, dass schnelle Klimaänderungen mit ausgeprägten Wechseln in Temperatur und Niederschlag auf Zeitskalen von Jahren, Dekaden und Jahrhunderten nicht ungewöhnlich sind. Außerdem erlauben uns diese Archive einen Einblick in erdgeschichtliche Zeiten, die durch ein ähnliches oder sogar wärmeres Klima als heute gekennzeichnet waren. Diese Zeiten stehen derzeit im Fokus der Paläoklimaforschung. Ein prominentes Beispiel ist das letzte warmzeitliche Maximum vor ca. 125.000 Jahren, als die globale Mitteltemperatur etwa 1-2°C über der heutigen lag. Zu dieser Zeit erreichten auch die atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen typische interglaziale Höchstwerte, die aber allesamt ca. 25% unter den heutigen Konzentrationen von 400 ppm lagen. Im warmen Pliozän vor 3-5 Millionen Jahren war es im globalen Mittel 2-4°C wärmer als heute und ist somit vergleichbar mit Klimaprognosen einiger Szenarien für das Jahr 2100 (Abb. III.2.2).



Abbildung III.2.1: Eisbohrkern aus der Ostantarktis, Dronning Maud Land (Foto: H. Fischer)

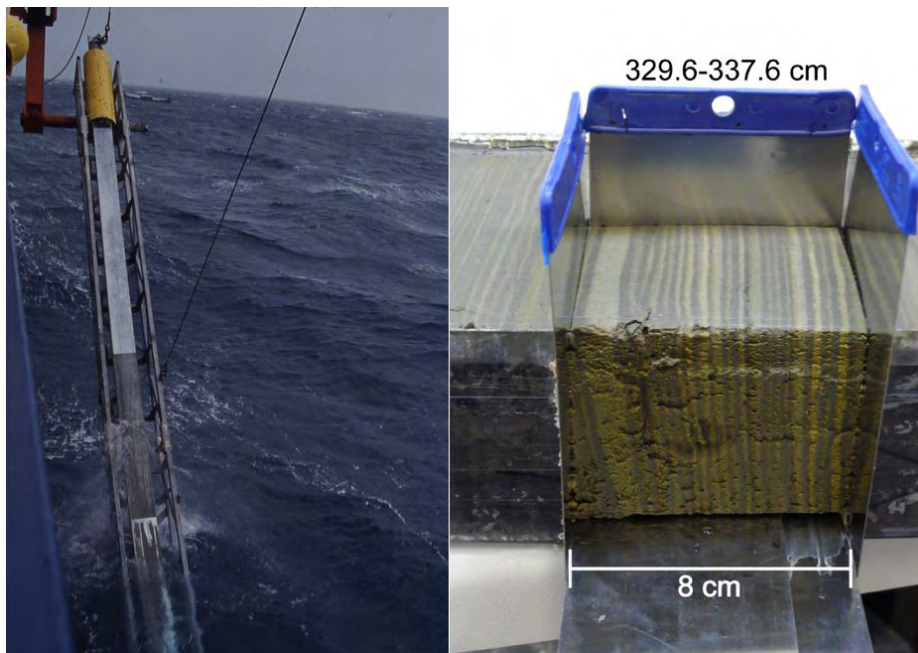


Abbildung III.2.2: Links: Einsatz eines Kastenlotes auf hoher See zur Entnahme eines Sedimentkerns vom Meeresgrund (Foto: R. Gersonde). Rechts: Beprobung eines Kastenlot-Sedimentkerns aus der Beringsee. Das Sedimentprofil besteht aus jahreszeitlich geschichteten Wechsellagen von kieseligen Algenresten (grün) und Sedimenten die von Alaska in die Beringsee eingetragen wurden (grau). Die Sedimentprobe enthält detaillierte, zeitlich sehr hochauflösende Paläoklimainformationen für einen Zeitraum von 20 Jahren von 11.238-11.258 Jahren vor heute (Foto: H. Kühn).

Noch wärmer war es während des mittleren Miozäns vor ca. 15 Millionen Jahren, als die globale Mitteltemperatur 5-8°C über dem heutigen Wert lag. Die raum-zeitlichen Klimamuster solcher Warmzeiten sind allerdings nur lückenhaft dokumentiert und auch in ihren Ursachen nicht ausreichend verstanden. Ihre Rekonstruktion und modellgestützte Interpretation bilden daher einen wichtigen Beitrag, um

die natürliche Klimadynamik in ihrer Gesamtheit zu verstehen. Letztendlich bildet dieses Wissen eine wesentliche Grundlage für die detaillierte Analyse regionaler Aspekte des globalen Wandels. Da die Umweltveränderungen in den polaren und subpolaren Regionen besonders empfindlich auf Klimawechsel reagieren, kommt den Klimaarchiven der hohen Breiten eine Schlüsselfunktion für die Klimarekonstruktion zu. Die korrekte Interpretation der in den Archiven enthaltenen Informationen über bestimmte Umweltparameter bildet gemeinsam mit einer exakten zeitlichen Einstufung der Klimazeitreihen das Rückgrat der Paläoklimaforschung. Für eine Reihe bedeutender Klimavariablen (z.B. Meereisverbreitung, Salzgehalte im Meerwasser) ist die quantitative Rekonstruktion ihrer Kenngrößen aber viel zu ungenau, um daran gekoppelte Auswirkungen für das Klimasystem exakt abzuleiten. Deren Entwicklungen zusammen mit verbesserter Altersdatierung bilden zukünftige Herausforderungen in den Geowissenschaften. Diese rekonstruierten Klimavariablen sind entscheidend für die Validierung und Anwendung von Klimamodellen, die auch für Prognosen zukünftiger Klimaentwicklung genutzt werden.

III.2.2 Eisschilddynamik und Meeresspiegel

Eine negative Massenbilanz der Eisschilde auf Grönland und in der Antarktis bestimmt ganz wesentlich, wie stark der globale mittlere Meeresspiegel ansteigt. Die gegenwärtige Prognose eines mittleren Meeresspiegelanstiegs von 28-98 cm bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ist relativ unsicher und der Beitrag der großen Eisschilde hierzu ist nicht ausreichend untersucht und verstanden. Eine entscheidende Frage ist daher, wie schnell der Meeresspiegel in Zukunft steigen könnte. Auch hier liefert die Paläoklimaforschung wichtige Abschätzungen. Die schnellsten Meeresspiegelanstiege sind uns aus dem Übergang von der letzten Eiszeit in die heutige Warmzeit bekannt, bei dem durch Abschmelzen von großen Landeismassen der Meeresspiegel innerhalb etwa 10.000 Jahren um ca. 120 m stieg. Es gab darin allerdings kurze Zeitintervalle mit schnelleren Änderungen. So stieg um 14.600 Jahren vor heute der Meeresspiegel innerhalb weniger Jahrhunderte um ca. 16 m mit einer Rate von mehr als 4 cm pro Jahr. Höhere Meeresspiegelstände als heute sind aus Zeiten bekannt, in denen es wärmer war als heute, wie z.B. während der letzten Warmzeit vor ca. 125.000 Jahren (Abb. III.2.3, III.2.4).

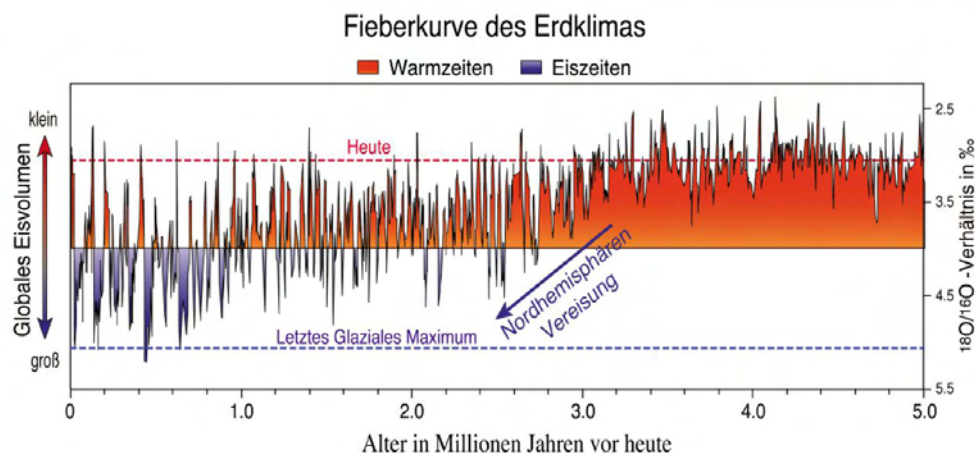


Abbildung III.2.3: Klimaentwicklung der letzten 5 Millionen Jahre. Die Sauerstoffisotopen wurden entlang eines Sedimentkerns an fossilen Kalkschalen von benthischen Foraminiferen (am Meeresboden lebende Einzeller) gemessen. Aus ihnen können Veränderungen in der globalen Landeismasse und der Temperatur des tiefen Ozeans berechnet werden (modifiziert, Tiedemann et al., 1994).

Rekonstruktionen aus Daten des NEEM Eisbohrkerns zeigen, dass die Temperaturen in Nordwestgrönland um 4-12°C wärmer waren als heute. Dieser Temperaturanstieg war auf Grund der sogenannten „polaren Verstärkungen“ im Vergleich zum globalen Mittel mehr als doppelt so groß und entspricht ungefähr der Temperaturzunahme, die gegen Ende des 21. Jhd. in Grönland erwartet wird. Die Befunde aus Eiskerndaten und Klimamodellen weisen darauf hin, dass der grönländische Eisschild während des

letzten warmzeitlichen Maximums etwa 25% kleiner war als heute, was einem Meeresspiegelanstieg von etwa 2 m entspricht. Tatsächlich wird für denselben Zeitraum ein Meeresspiegel rekonstruiert, der um 4-8 m über dem heutigen lag. Dies bedeutet, dass die antarktischen Eisschilde mindestens 50% zum damaligen Meeresspiegelanstieg beigetragen haben müssen. Große Teile des westantarktischen Eisschildes gründen unterhalb des Meeresspiegels und sind durch sich aufwärmende benachbarte Wassermassen besonders leicht zu destabilisieren. Es gibt auch Hinweise, dass Teile des unter dem Meeresspiegel aufliegenden ostantarktischen Eisschildes eine ähnliche Entwicklung nehmen können. Ob der westantarktische Eisschild während früherer Warmzeiten teilweise oder vollständig verschwand, ist Gegenstand der derzeitigen Forschung. Im internationalen Forschungsprojekt ANDRILL (Antarctic geological DRILLing) rekonstruierten Wissenschaftler die pliozäne Entwicklungsgeschichte des westantarktischen Eisschildes, um dessen Empfindlichkeit gegenüber globalen Temperaturerhöhungen abzuschätzen. Die Ergebnisse weisen auf ein wiederholtes Abschmelzen des Eisschildes der Westantarktis während des Pliozäns (vor 3-5 Mill. Jahren) hin verbunden mit einem Anstieg des globalen mittleren Meeresspiegels um 3-5 m. Ob und wann ein solches Ereignis unter den prognostizierten zukünftigen Klimaveränderungen erneut eintreten könnte, ist Gegenstand aktueller Forschung.

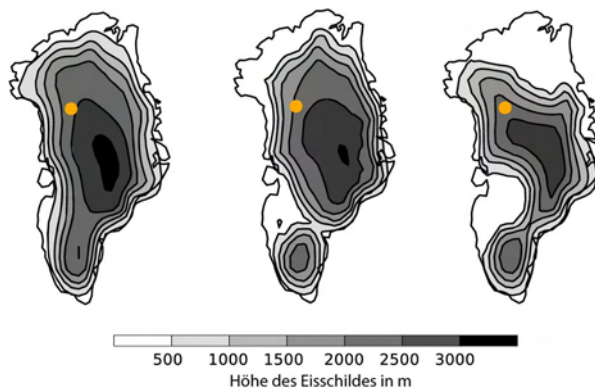


Abbildung III.2.4: Modellierte Änderungen im grönländischen Eisschildvolumen für das letzte interglaziale Maximum (Mitte und rechts) im Vergleich zum heutigen Eisschild (links); gelber Kreis: Eiskernbohrung des NEEM Projektes (modifiziert nach Merz et al., 2014).

Über längere, sogenannte tektonische Zeitskalen der Erdgeschichte (insbesondere die letzten 65 Millionen Jahre, das sogenannte Känozoikum) spielen Veränderungen der globalen ozeanischen Zirkulation vermutlich eine entscheidende Rolle beim langfristigen Wechsel von warmen und kalten Perioden. Entscheidend dabei sind die tektonisch bedingten Öffnungen und Schließungen von Meeresstraßen als Verbindung zwischen den großen Ozeanen. So gilt bisher die Annahme, dass der durch die Tiefenwasseröffnung der Drake-Passage und der Tasmanischen Meeresenge ermöglichte Antarktische Zirkumpolarstrom die erste große Vereisung der Antarktis vor ca. 34 Millionen Jahren initiiert hat. Dieses Paradigma wird allerdings immer wieder durch andere Hypothesen, wie z.B. durch eine CO_2 -Reduktion in der Atmosphäre, herausgefordert. Daher werden wesentlich verbesserte Datengrundlagen zur raum-zeitlichen Entwicklung dieser Meeresstraßen in Kombination mit numerischen Simulationen benötigt. Nur wenn in diesen Simulationen gekoppelte Erdsystemmodelle mit interaktiver Eisschild-Modellierung verwendet werden, sowie die explizite Simulation der in der Paläoklimaforschung gemessenen Daten erfolgt, werden diese Hypothesen in ausreichender Genauigkeit getestet werden können.

Über längere, sogenannte tektonische Zeitskalen der Erdgeschichte (insbesondere die letzten 65 Millionen Jahre, das sogenannte Känozoikum) spielen Veränderungen der globalen ozeanischen Zirkulation vermutlich eine entscheidende Rolle beim langfristigen Wechsel von warmen und kalten Perioden. Entscheidend dabei sind die tektonisch bedingten Öffnungen und Schließungen von Meeresstraßen als Verbindung zwischen den großen Ozeanen. So gilt bisher die Annahme, dass der durch die Tiefenwasseröffnung der Drake-Passage und der Tasmanischen Meeresenge ermöglichte Antarktische Zirkumpolarstrom die erste große Vereisung der Antarktis vor ca. 34 Millionen Jahren initiiert hat. Dieses Paradigma wird allerdings immer wieder durch andere Hypothesen, wie z.B. durch eine CO_2 -Reduktion in der Atmosphäre, herausgefordert. Daher werden wesentlich verbesserte Datengrundlagen zur raum-zeitlichen Entwicklung dieser Meeresstraßen in Kombination mit numerischen Simulationen benötigt. Nur wenn in diesen Simulationen gekoppelte Erdsystemmodelle mit interaktiver Eisschild-Modellierung verwendet werden, sowie die explizite Simulation der in der Paläoklimaforschung gemessenen Daten erfolgt, werden diese Hypothesen in ausreichender Genauigkeit getestet werden können.

III.2.3 Meereisbedeckung und Stoffkreisläufe

Veränderungen in der Meereisbedeckung sind nicht nur eine Folge von Klimavariationen, sondern tragen durch die Eis-Albedo-Rückkopplung (s. Kapitel II.2) auch zu einer Verstärkung von Klimaveränderungen bei. Eine Zunahme in der Meereisbedeckung erhöht die Reflektion der einfallenden Sonnenstrahlung und verstärkt so den Wechsel von einer Warmzeit in eine Kaltzeit (und umgekehrt). Neben dieser Auswirkung auf den Strahlungshaushalt der Erde beeinflusst die Bildung von Meereis den Gas- und Wärmeaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre sowie die ozeanische und atmosphärische Zirkulation. Gerade für das Prozessverständnis der atmosphärischen CO_2 -Schwankungen zwischen Eiszeiten und

Warmzeiten spielt der Gasaustausch zwischen tiefem Ozean und Atmosphäre eine wesentliche Rolle, insbesondere im Südozean (Abb. III.2.5). Das Auftriebsgeschehen im Bereich der Polarfront ermöglicht heute das Aufsteigen alter nährstoff- und CO_2 -reicher Tiefenwässer bis an die Wasseroberfläche und damit eine CO_2 -Abgabe an die Atmosphäre. Dem entgegen wirkt die biologische Produktivität in der lichtdurchfluteten Oberflächenschicht. Über Photosynthese nehmen Algen aus dem Oberflächenwasser CO_2 auf, das sie für den Aufbau von Biomasse benötigen. Nach ihrem Absterben sinken die organischen Überreste in den tiefen Ozean, wo sie respiriert und teilweise sedimentiert werden. Hierdurch wird CO_2 für mehrere Jahrhunderte bis Jahrtausende von der Oberfläche entfernt und in den tiefen Ozean exportiert, ein Vorgang, der auch als biologische Kohlenstoffpumpe bezeichnet wird (vgl. Kap. II.4.3). Diese Prozesse werden durch das Vorhandensein von Meereis stark beeinflusst

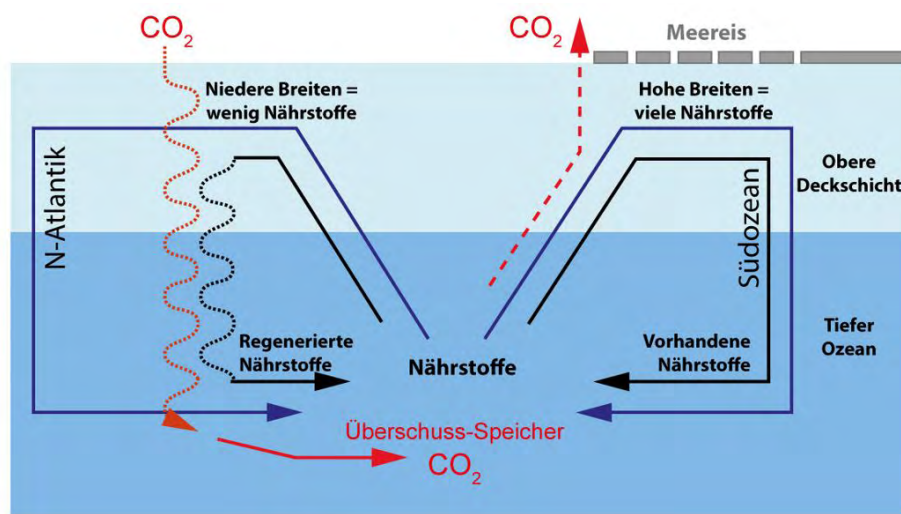


Abbildung III.2.5: Schematisches Prinzip der ozeanischen Kohlenstoffpumpen zur Speicherung und Entgasung von CO_2 im Ozean. Im Atlantik wird bei einer hohen Nutzungseffizienz der vorhandenen Nährstoffe durch Photosynthese CO_2 in Biomasse gebunden und in den tiefen Ozean exportiert (biologische Pumpe). Aufgrund der erhöhten Löslichkeit von CO_2 in kaltem Wasser ist das Oberflächenwasser in den hohen Breiten an CO_2 angereichert. Über den Prozess der Tiefenwasserbildung werden die CO_2 -reichen Wässer in den tiefen Ozean verfrachtet (physikalische Pumpe). Wird die Tiefenwasserbildung eingeschränkt, so ist der CO_2 -Speicher des tiefen Ozeans schnell gefüllt. Im Bereich von Auftriebsregionen gelangen diese Wassermassen teilweise wieder bis an die Wasseroberfläche wie im Bereich der Polarfront des Südozeans (rechte Seite). Heute werden die dort in größeren Mengen vorhandenen Nährstoffe nicht komplett durch Algenblüten verbraucht. Überschüssiger Kohlenstoff (in gelöster Form im Wasser) der nicht zur Bildung von Biomasse genutzt wird, entgast als überschüssiges CO_2 wieder in die Atmosphäre. Eine ausgedehnte Meereisdecke würde diesen Prozess einschränken (modifiziert nach Sigman et al., 2010).

Während Eiszeiten trug die Speicherung von CO_2 im tiefen Ozean zur Reduzierung des atmosphärischen CO_2 -Gehaltes bei. Dabei werden folgende Prozesse im Zusammenhang mit Meereis diskutiert. Zum einen verringert eine ausgedehntere Meereisbedeckung den Gasaustausch zwischen der Oberfläche polarer Ozeane und der Atmosphäre. Zum anderen erhöht die Meereisbildung den Salzgehalt an der Wasseroberfläche. Letzteres führt vor allem während der Wintermonate zu einer erhöhten Vermischung und einem Absinken oberflächennaher Wassermassen, wobei CO_2 mit in die Tiefe geführt wird. Dieser Prozess ist Teil der physikalischen Kohlenstoffpumpe. Während der Eiszeiten war der atmosphärische Staubanteil im Vergleich zu den Warmzeiten deutlich höher, was auch zu einer verstärkten Ablagerung von Mikronährstoffen, z.B. Eisen, auf dem Meereis geführt haben dürfte. Während der Sommermonate führt abschmelzendes Meereis daher zum Eintrag dieser Mikronährstoffe und zu einer Abnahme der Oberflächenwassersalinität. Ersteres bewirkt eine Ankurbelung der Photosynthese und der biologischen Kohlenstoffpumpe, letzteres eine stabilere Schichtung der oberen Wassersäule, die wiederum einen Austausch CO_2 -reicher Wassermassen mit der Atmosphäre einschränkt (Veränderung der physikalischen Kohlenstoffpumpe). In welchem Maße die biologische und physikalische Kohlenstoffpumpe während Eiszeiten zur Reduzierung der atmosphärischen CO_2 -Konzentrationen beigetragen haben, ist Gegenstand der Forschung. Diese Prozesse beeinflussen auch heute die Raten des

ozeanisch-atmosphärischen Gasaustausches. Sie sind lokal unterschiedlich und im Detail nur wenig untersucht und daher auch in Paläoklimamodellen nur unzureichend berücksichtigt.

III.2.4 Boden- und Tiefenwasserbildung

Die Prozesse der Boden- und Tiefenwasserbildung im Bereich des subpolaren Nordatlantiks (Labrador- und Grönlandsee) und des polaren Südozeans (Weddell- und Rossmeer) bilden den Motor für die Ozeanzirkulation in den Weltmeeren (vgl. Abb. II.4.1: „Umwälzzirkulation des globalen Ozeans“). Die Stärke dieser Zirkulation bestimmt nicht nur den ozeanischen Wärmetransport, sondern auch den Grad der Ventilation und damit die Sauerstoff- und CO_2 -Gehalte sowie die Verteilung von Nährstoffen in den Ozeanen. Wind, Temperatur und Salzgehalt an der Wasseroberfläche sind entscheidend für die Stärke der Tiefenwasserbildung in den polaren und subpolaren Meeresregionen. Heute führen geringe Temperaturen und hohe Salzgehalte an der Wasseroberfläche zu einer hohen Dichte der Wassermassen, so dass sie in die Tiefe absinken. In der Grönland- und Labradorsee wird heute Nordatlantisches Tiefenwasser (NADW) gebildet, im Bereich der Antarktis das Antarktische Boden- und Zwischenwasser (AABW, AAIW). In den Polarregionen sind die Wasseroberflächentemperaturen generell gering, so dass vor allem ihr Salzgehalt über eine Tiefenwasserbildung entscheidet. Aufgrund zu geringer Salzgehalte gibt es daher heute keine Tiefenwasserbildung im nordpazifischen Raum. Dieser Prozesse der Wassermassenbildung und globalen Zirkulation durch den Weltozean ist nicht konstant, sondern aufgrund der Variabilität natürlicher Steuerungsmechanismen veränderlich. Auf instrumentellen Daten beruhende, relativ kurze ozeanographische Messreihen (meist weniger als hundert Jahre) erlauben dabei die Erfassung kurzfristiger natürlicher Schwankungen der meridionalen Ozeanzirkulation, im Bestfall bis zu mehreren Dekaden. Fundamentale Änderungen der Konfiguration dieser Zirkulationsmuster und Wassermassenbildung sind aber auch in den vergangenen Jahrzehnten anhand von paläoozeanographischen Daten bis weit in die geologische Vergangenheit und auf Zeitskalen von Dekaden bis Jahrtausenden belegt. Mit instrumentellen Daten allein lassen sich keine befriedigenden Rückschlüsse über langfristige Änderungen der globalen meridionalen Ozeanzirkulation und ihrer Interaktion mit dem Erdklima der geologischen Vergangenheit oder der Zukunft ziehen. Die paläoozeanographische Rekonstruktion der letzten Eiszeit zeigt, dass die meridionale Ozeanzirkulation, insbesondere im Atlantik, nicht immer stabil war, sondern abrupt innerhalb weniger Dekaden in unterschiedliche Zustände kippen kann, die dann mehrere hundert bis tausende von Jahren andauern können. Die verstärkte Bildung von NADW im sogenannten Warmzeitmodus mit einem erhöhten Wärmetransfer in den Nordatlantik unterscheidet sich von zwei eiszeitlichen Modi, einem mit reduzierter NADW Bildung und einem bei dem die Bildung von NADW und der Wärmetransport in den nördlichen Nordatlantik nahezu vollständig zum Erliegen kam. Während der Eiszeiten kam es zu wiederkehrenden Wechseln zwischen diesen Zirkulationsmodi im Atlantik.

Paläorekonstruktionen zur Dynamik des globalen Klimasystems haben gezeigt, dass ausgeprägte Variationen in der atlantischen meridionalen Ozeanzirkulation während des Zeitraumes von 110.000 – 12.000 Jahren vor heute mit massiven und kurzfristigen Temperaturschwankungen in der Antarktis und auf Grönland einhergingen. Über die Synchronisation von Eisbohrkernen konnte nachgewiesen werden, dass die grönländischen und antarktischen Temperaturschwankungen entgegengesetzt verliefen. Erwärmte sich der polare Norden, kühlte der polare Süden ab. Als Ursache dieser polaren Klimawippe werden vor allem Änderungen in der Ozeanzirkulation verantwortlich gemacht. Starke Rückgänge in der Bildung von NADW waren mit einem Versiegen des Golfstroms – der Wärmepumpe im Nordatlantik – verbunden und führten zur Erwärmung im polaren Süden. Sobald die atlantische meridionale Ozeanzirkulation wieder anlief, kühlte die Antarktis ab. In diesem Zusammenhang werden auch Änderungen im globalen Eisvolumen und Meeresspiegelschwankungen von mehreren Metern diskutiert. Das Rätsel um den tatsächlichen Auslöser dieser wiederkehrenden Änderungen in der atlantischen Ozeanzirkulation

on ist allerdings noch nicht abschließend gelöst. Klar ist hingegen, dass diese Zirkulationsänderungen im Nordatlantik mit abrupten Klimawechseln und weltweiten Änderungen in den Tiefenströmungen der Ozeane verbunden waren. Für die eiszeitlichen Phasen mit einer stark reduzierten Bildung von NADW weist eine Vielzahl von Untersuchungen auf eine erhöhte Bildung und Ausbreitung von gering ventiliertem und nährstoffreichem AABW hin. Aktuell wird für diese Zeiten sogar eine heute nicht existente Tiefenwasserbildung im Nordpazifik diskutiert.

Da der Ozean sechzig Mal mehr CO_2 als die Atmosphäre enthält, waren einige dieser Änderungen auch mit deutlichen Schwankungen in der atmosphärischen CO_2 -Konzentration verbunden. Ein wichtiges Ergebnis der Paläorekonstruktionen und der Paläomodellierung ist, dass die Prozesse der Tiefenwasserbildung mit kritischen Schwellenwerten verknüpft sind, bei deren Überschreiten sich die Zirkulation und das Klima abrupt ändern. Eine der aktuellen Aufgaben der Klimaforschung ist es daher, das polare Verständnis zur Variabilität der Tiefenwasserbildung in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft zu verbessern.

Offene Forschungsfragen

- 1. Welche Mechanismen, Prozesse und regionalen Klimamuster verstärken abrupte Klimaänderungen in Warmzeiten und am Übergang von Eiszeiten in Warmzeiten?**
- 2. Wie stabil waren und sind die polaren Eisschilde und Schelfeisregionen?**
- 3. Wie sah die Meereisverbreitung im Arktischen Ozean aus als es global 1-2°C wärmer war als heute?**
- 4. Wie groß wird die polare Verstärkung des Klimawandels ausfallen, was lehrt uns die Vergangenheit?**
- 5. Wie sehen die tektonischen Strukturen an Land aus, die in Verbindung mit der Öffnung des Arktischen Ozeans stehen?**



III.3. Evolution und Anpassung

IN KÜRZE

Die Lebewesen der Polarregionen haben über Jahrtausende faszinierende Anpassungen und Lebensstrategien entwickelt, die ihnen ein Überleben in den extremen Polarregionen ermöglichen. Es ist zweifelhaft, ob die Evolutionsgeschwindigkeit dieser Organismen mit den aktuellen rapiden Umweltveränderungen in den Polarmeeren Schritt halten kann. Der Klimawandel (z.B. Erwärmung, Versauerung) insbesondere in der Arktis, aber auch an der Antarktischen Halbinsel, wird diese Ökosysteme nachhaltig verändern. Langfristige, ganzjährige Beobachtungen, experimentelle Untersuchungen und prognostische Modellierungsansätze unter Einsatz modernster Methodik, Analytik und Technologie sind unabdingbar, um diese Mechanismen zu verstehen und die Konsequenzen ggf. abzumildern.

Die Polargebiete sind die am stärksten vom globalen Klimawandel betroffenen Regionen. Insbesondere die Arktis und die Antarktische Halbinsel zeigen die weltweit höchsten Temperaturanstiege. Innerhalb der nächsten Generation werden wir Zeugen von grundlegenden Veränderungen in der Ausdehnung, Dicke und saisonalen Verteilung des arktischen Meereises mit gravierenden Folgen nicht nur für die mit dem Eis assoziierten Algen und Tiere, sondern auch für die Lebensgemeinschaften des Pelagials und des Meeresbodens (Abb. III.3.1). Die terrestrischen Systeme zeigen in den oben genannten Gebieten ebenfalls deutliche Veränderungen in der Verbreitung und Physiologie ihrer Organismen (z.B. Flechten).

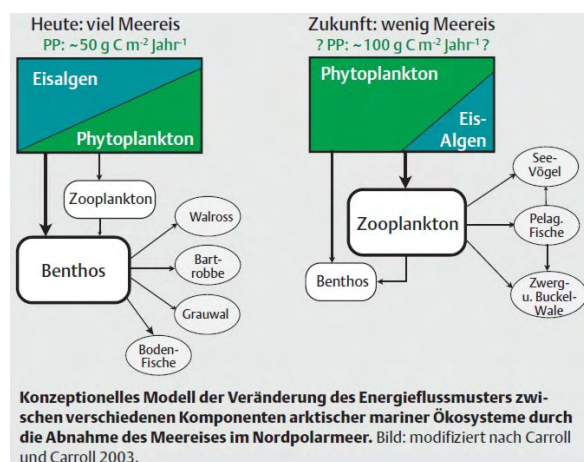


Abbildung III.3.1: Einfluss der Meereisabnahme auf den Energiefluss in der Arktis - ein Modell (Hempel & Piepenburg 2010, Copyright: Biuz)

Der globale Wandel beeinträchtigt polare Ökosysteme auf unterschiedliche Weise: a) durch die Erwärmung und die Ozeanversauerung, die sich am stärksten in den Polarmeeren auswirken, b) durch das Abschmelzen der Gletscher (Meeresspiegelanstieg) bzw. über eine ggf. verringerte Tiefenwasserbildung (Sauerstoffreduktion).

III.3.1 Evolution und genetische Anpassung

Viele Organismen in den südlichen und nördlichen Polarregionen haben sich während der ausgedehnten Abkühlungsphasen über Jahrtausende an die heute herrschenden, extrem niedrigen Umwelttemperaturen anpassen können, andere Lebensformen verschwanden. Die Vereisung der Antarktis begann vor mehr als 30 Millionen Jahren, und ein subtropischer Lebensraum verwandelte sich langsam in ein kalt-adaptiertes Ökosystem mit stabilen Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt im Meer und Extremwerten bis -89°C auf dem Kontinent. Die Lebensgemeinschaften in der Antarktis sind durch ungewöhnlich viele nur hier vorkommende (endemische), Kälte liebende Arten gekennzeichnet, die durch den Zirkumpolarstrom hydrographisch von anderen Bereichen des Weltozeans separiert werden.



Abbildung III.3.2: Antarktischer Eisfisch mit weißen Kiemen (Foto: K.-H. Kock)

lebensdauer, späte Geschlechtsreife und geringe Nachkommenzahl - typisch für viele polare Organismen - die Evolutionsgeschwindigkeit und Anpassungsfähigkeit im Vergleich zu Warmwasserarten verringern.

In dieser Isolation konnten sich einzigartige Anpassungsstrategien entwickeln, wie die „Weißblütigkeit“ (Blut ohne Hämoglobin) der Eisfische (Abb. III.3.2) und deren hochspezifische Gefrierschutzglycoproteine. Auch für die Arktis mehren sich die Hinweise, dass bereits vor mehreren Millionen Jahren das Nordpolarmeer durch eisige Temperaturen geprägt war, jedoch ist der Anteil der Endemismen im Norden geringer. Zahlreiche boreal-atlantische Arten mit hinreichender Temperaturtoleranz konnten ihr Verbreitungsgebiet bis in die Arktis ausdehnen. Gemeinsam ist den Arten beider Polarregionen, dass die lange Lebensdauer, späte Geschlechtsreife und geringe Nachkommenzahl - typisch für viele polare Organismen - die Evolutionsgeschwindigkeit und Anpassungsfähigkeit im Vergleich zu Warmwasserarten verringern.

III.3.2 Schlüsselarten und Nahrungsnetze unter Stress

Aktuelle Forschungsergebnisse dokumentieren deutliche Veränderungen in polaren Lebensgemeinschaften, insbesondere verursacht durch den Temperaturanstieg in bestimmten Regionen. Schlüsselarten wie der Antarktische Krill, dessen Lebenszyklus eng an die Meereisausdehnung im Winter gekoppelt ist, zeigen seit Mitte der 1970er Jahre signifikante Bestandsabnahmen im Südatlantik. Dagegen nehmen die wenig nahrhaften Salpen-Populationen seit 1926 im Plankton deutlich zu und dehnen ihr Verbreitungsgebiet nach Süden aus. Dies hat dramatische Auswirkungen auf das vom Krill geprägte antarktische Nahrungsnetz und kann den Energiefluss zu höheren Ebenen der Nahrungspyramide (z.B. Fische, Pinguine, Wale, Robben) erheblich beeinträchtigen. An der Antarktischen Halbinsel zeigen verschiedene Pinguinarten dramatische Bestandsveränderungen, aber auch terrestrische Flechtengemeinschaften sind vom Klimawandel betroffen. Die Dezimierung der Bartenwale durch den Walfang im 20. Jahrhundert insbesondere in der Antarktis hatte erhebliche Verschiebungen im Nahrungsnetz zur Folge. Heute wird diskutiert, ob auch die Produktivität dieses Ökosystems unter dem Raubbau gelitten hat (Eisen-Recycling, Kieselalgen-Kultivierung). Die CO_2 -Anreicherung und die damit verbundene Versauerung der Polarmeere wirken sich insbesondere auf kalkbildende Organismen aus und können zu Ver-

änderungen in der Biodiversität und in biogeochemischen Prozessen führen. Besonders betroffen sind beschaltete Flügelschnecken und andere Weichtiere, Stachelhäuter und Kalkalgen (Coccolithophoriden). Das "Ozonloch" in den Polarregionen und die damit verbundene intensivere UV-Strahlung bilden einen weiteren Stressor für exponierte Organismen. Die Auswirkungen dieser Umweltfaktoren wurden in den letzten Jahren intensiv untersucht; die synergistischen Effekte sich überlagernder Stressfaktoren sind jedoch noch weitgehend unverstanden.

III.3.3 Verbreitungsmechanismen und Bioinvasion

Der Rückgang der Meereisbedeckung in der Arktis wird neue Schifffahrtsrouten (Nordost- und Nordwestpassage) öffnen, marine Bodenschätze leichter erschließbar machen und zu einer Zunahme des Schiffsverkehrs in den Polargebieten führen. Damit steigt auch die Gefahr der Einschleppung fremder Arten durch Ballastwasser und Aufwuchs auf den Schiffsrümpfen. Steigende Meerestemperaturen in den Polargebieten werden zeitgleich dazu führen, dass die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Etablierung bioinvasiver Arten in der Arktis und Antarktis steigt. Die Wiederansiedlung der Miesmuschel auf Spitzbergen nach über 1000 Jahren ist nur ein Beispiel für die Ausbreitung borealer Arten in die Arktis. Auch viele Plankton- und Fischarten (z.B. der Kabeljau) im Nordatlantik und Nordpazifik dehnen ihre Verbreitungsgebiete nordwärts in die Arktis aus und führen zu Veränderungen im marinen Nahrungsnetz der Arktis (Abb. III.3.3). Zu erwarten ist, dass polare Arten zunehmend von neu einwandernden borealen Arten verdrängt werden. Daher sind vergleichende Untersuchungen zu Verbreitungsmechanismen, Anpassungskapazitäten, Toleranzschwellen sowie zur Konkurrenzstärke polarer und borealer Organismen erforderlich, um Veränderungen in der Artenzusammensetzung und deren Auswirkungen auf Nahrungsnetze und biogeochemische Prozesse abschätzen zu können.

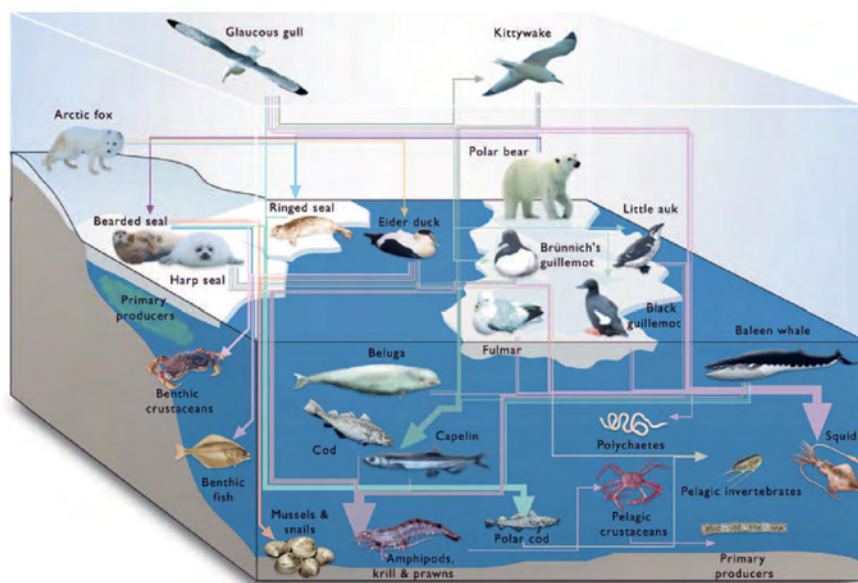


Abbildung III.3.3: Das marine Nahrungsnetz der Arktis (ACIA 2004, Copyright: AMAP)

III.3.4 Beobachten, modellieren, verstehen, neue Methoden anwenden

Die Erforschung biologischer Prozesse und physiologischer Anpassungsmechanismen in den Polarregionen stellt methodisch eine große Herausforderung dar. Die Meereisdecke erschwert sowohl den Schiffseinsatz, als auch die satellitengestützte Fernerkundung. Neue, modernere Untersuchungsmethoden, wie der Einsatz selbststeuernder Unterwasserfahrzeuge (AUV), werden zukünftig eine große

Rolle spielen. Bei der technologisch anspruchsvollen Entwicklung und Integration entsprechender Sensoren für biologische Parameter werden Wissenschaftler eng mit Ingenieuren und Technikern zusammenarbeiten. Passive Bioakustiksensoren, wie das bereits erfolgreich etablierte PALAOA-Observatorium des AWI in der Antarktis, Telemetrie und ferngesteuerte Videoüberwachung von Brutkolonien ermöglichen ganzjährig großräumige Bestands- und Verhaltensuntersuchungen an Meerestieren (Walen, Robben, Pinguinen) in sonst nur schwer zugänglichen Polarregionen. Die Kombination von langfristigen Felduntersuchungen mit ökophysiologischen Experimenten, biochemischen und molekulargenetischen Analysen (Metabolomics, Genomics) sowie einer fortschrittlichen Ökosystemmodellierung wird es ermöglichen, artspezifische physiologische Toleranzschwellen zu identifizieren, deren genetische Regulationsmechanismen zu entschlüsseln und ihre ökologischen Auswirkungen zu quantifizieren und sogar vorherzusagen.

Offene Forschungsfragen

- 1. In welchem Umfang erlauben physiologische Toleranzen und phänotypische Plastizität polaren Organismen das Überleben unter sich ändernden Umweltbedingungen? Gibt es dabei Unterschiede zwischen Arktis und Antarktis?**
- 2. Reicht die geringe Evolutionsgeschwindigkeit polarer Arten aus, um sich an die rapide fortschreitenden Umweltveränderungen genetisch anzupassen?**
- 3. Wie reagierten polare Arten auf dramatische Ereignisse (z.B. Warmphasen) in der Erdgeschichte?**
- 4. Welchen Einfluss haben synergistische Effekte durch multiple Stressfaktoren auf Organismen in den Polargebieten?**
- 5. Welche polaren Ökosysteme und Nahrungsnetze sind besonders empfindlich gegenüber dem Klimawandel? Welche Hinweise geben uns Schlüsselarten auf Veränderungen im Nahrungsnetz und deren Ursachen?**
- 6. Wie wird der Klimawandel Fischereierträge von Krill- und Fischbeständen verändern? Wie wirkt sich eine intensivere Fischerei auf biogeochemische Zyklen in den Polarmeeen aus?**



- www.acia.uaf.edu
- www.caff.is
- www.scar.org/accegroup/accegroup-publications



III.4. Erde und Weltraum

Die Polargebiete sind nicht nur außergewöhnliche Klima- und Ökosysteme, sie bieten auch einzigartige Bedingungen für Forschungszweige außerhalb der Polarforschung. Gerade die Astrophysik findet in Arktis und Antarktis Umweltbedingungen vor, die Instrumente und Beobachtungen ermöglichen, die sonst schwierig zu realisieren wären.

IN KÜRZE

Die Polargebiete erlauben einzigartige Forschungsinfrastrukturen für die Astrophysik, Planetenforschung und Astrobiologie. In der Astrophysik benutzt IceCube das Eis der Antarktis, um hochenergetische Neutrinos aus der Erdatmosphäre und dem Kosmos aufzuspüren und zu untersuchen. In der Planetenforschung liefern sowohl die terrestrische als auch die marine Forschung der Polargebiete (einschließlich der Tiefsee) grundlegende Erkenntnisse, um die Nachbarwelten im Sonnensystem zu verstehen und die optimale Explorationstechnik sowie den menschlichen Faktor bzw. seine Eignung für zukünftige Weltraummissionen zu untersuchen, zu entwickeln und zu testen. Für die Suche nach Leben auf der kalten Welt des Mars können terrestrische Feldstudien in der Arktis und Antarktis wertvolle Erkenntnisse liefern. Die marine Polarforschung kann Weltraummissionen zu den eisigen Ozeanwelten der Eismonde von Jupiter und Saturn unterstützen.

Aus deutscher Sicht ist hierbei die Neutrino-Astronomie hervorzuheben. Nahe der Amundsen-Scott Station betreibt eine internationale Kollaboration das derzeit weltgrößte Neutrino-Teleskop IceCube. Die Beobachtung von Neutrinos aus dem Kosmos ermöglicht ein besseres Verständnis der hochenergetischen Prozesse in unserem Universum. Dabei ist IceCube mehr als „nur“ ein Neutrino-Teleskop; seine Daten erlauben zudem, fundamentale Eigenschaften der Neutrinos selbst zu vermessen, sowie eine präzise Bestimmung des Spektrums der auf der Erde ankommenden kosmischen Strahlung.

Warum die Polargebiete auch in anderen Bereichen der Weltraumforschung von Interesse sind, zeigt ein anderer Forschungsbereich der Astrobiologie sehr deutlich. Verglichen mit den Weiten des

Alls eignen sich die Polargebiete nicht zuletzt aufgrund ihrer Erreichbarkeit exzellent für die Planeten-analoge und astrobiologische Feldforschung. Erkenntnisse, die hier gewonnen werden, führen maßgeblich zum Fortschritt in der experimentellen, modellierenden und missionsvorbereitenden Planeten-forschung.

Um ein besseres Verständnis der zumeist eisigen Planeten und Monde im Sonnensystem und darüber hinaus zu erlangen, dienen gerade die Polargebiete mit ihren Umweltbedingungen als optimale Annäherung an die Bedingungen, wie sie auf Mars und die Eismonde von Jupiter und Saturn vorherrschen. Da diese halbwegs durch Sonden erreichbaren Himmelskörper meist auch für die Suche nach Leben außerhalb der Erde interessant sind, untersuchen Astrobiologen die durch Mikroorganismen besiedelten Nischen im Polargebiet. Dadurch können Rückschlüsse auf potentielle Habitate und damit mögliche Rückzugsgebiete für Leben auf den anderen eisigen Planeten und Monden gezogen werden. Das hierbei gewonnene Wissen erlaubt die Entwicklung gezielterer Strategien für die zukünftigen, robotischen oder auch bemannten Missionen, die beispielsweise das Ziel haben, dort nach Leben zu suchen. Zudem sind die harschen Bedingungen der Polarregionen auch optimal, um Mensch, Technik und Logistik für die Exploration unter Extremstbedingungen auf deren Einsatzfähigkeit in den Eiswelten zu testen.

III.4.1 Neutrino-Astronomie

Nach einer Bauzeit von 6 Jahren wurde Ende 2010 das weltgrößte Neutrino-teleskop IceCube fertiggestellt. Seitdem wird es benutzt, um den Himmel nach Neutrinos aus dem Kosmos abzusuchen.

Da Neutrinos sehr ungewöhnliche Teilchen sind, ist auch das Teleskop ungewöhnlich: es befindet sich ca. 1.5km – 2.5 km unter der Oberfläche des antarktischen Eisschildes, nahe des geographischen Südpols.

Neutrinos selbst können nicht beobachtet werden. In seltenen Fällen jedoch kollidieren sie mit den Atomkernen der uns umgebenden Materie. Dann entstehen geladene Teilchen, die unter bestimmten Bedingungen Licht emittieren, welches beobachtet werden kann. Genau diesem Licht aus Kollisionen von Neutrinos spürt man mit IceCube nach. Dazu wurden mehr als 5000 lichtempfindliche Sensoren im Eisschild versenkt, die Signale von Neutrinos messen. Die Kollisionen sind sehr selten, daher muss ein großes Volumen mit Sensoren instrumentiert werden. Im Falle von IceCube sind das mehr als 1 km³, entsprechend ca. 1.000.000.000 t Eis. 2013 konnte IceCube zum ersten Mal Neutrinos aus dem Kosmos nachweisen. Ein wichtiger Meilenstein für das noch junge Feld der Neutrino-Astronomie. Unter den gefundenen Neutrinos waren auch drei mit Energien von mehr als einem Petaelektronenvolt (PeV). Das entspricht ca. dem 100fachen der Energie, die man mit Teilchenbeschleunigern auf der Erde zurzeit erreichen kann. Die gewaltigen Energien sind ein Zeichen für die außergewöhnlichen Prozesse, die im Universum stattfinden und solche Teilchen erzeugen können. Sie treten zum Beispiel bei Sternexplosionen oder in der Nähe schwarzer Löcher auf, könnten aber auch Hinweise auf die bisher noch unentdeckten Teilchen der dunklen Materie liefern.

Noch ist das Signal zu schwach, um einzelne Objekte zu identifizieren, von denen diese Neutrinos stammen. Nach der Entdeckung der astrophysikalischen Neutrinos ist dies das nächste große Ziel des auf 15-20 Jahre angelegten Forschungsprogramms von IceCube.

Auch über eine Erweiterung des bestehenden Detektors wird nachgedacht. Der für die Neutrino-Astronomie interessante Energiebereich und die optischen Eigenschaften des Gletschereises sind heute sehr viel besser bekannt, als zu der Zeit in der IceCube geplant wurde. Daher könnte man jetzt mit ca. doppelt so vielen Sensoren ein 5-10fach größeres Volumen instrumentieren. Mit dem dann zu er-

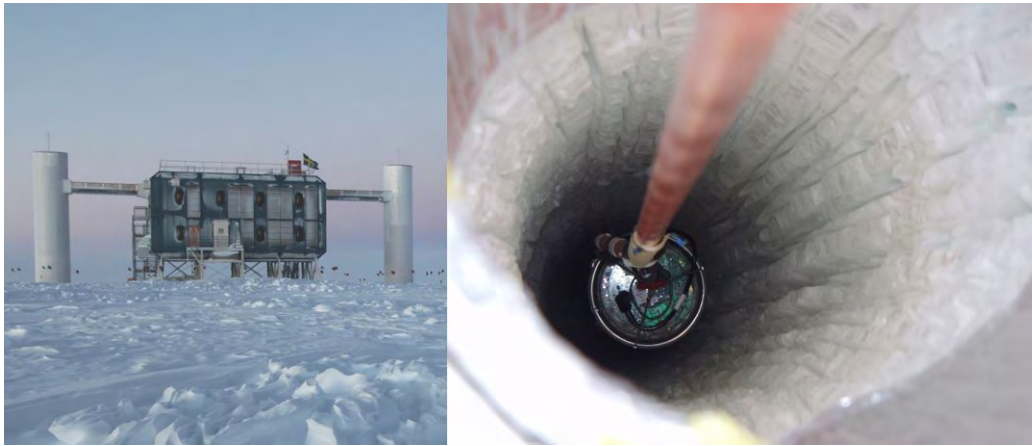


Abbildung III.4.1: Links: Zentralgebäude des IceCube Neutrino-Teleskops. Rechts: Versenken eines Lichtsensors im Eis. Quelle: IceCube/NSF

wartenden Signal wäre es möglich, detailliert die Eigenschaften der hochenergetischen Prozesse zu vermessen, die für die kosmischen Neutrinos verantwortlich sind; und damit z.B. die Physik von Sternexplosionen, die Dynamik im Umkreis riesiger schwarzer Löcher, oder den Ursprungsort der kosmischen Strahlung besser verstehen zu lernen. IceCube ist ein multinationales Projekt an dem weltweit 43 Universitäten und Forschungsinstitutionen beteiligt sind. Federführend ist die amerikanische National Science Foundation (NSF). Deutschland stellt mit acht Universitätsgruppen und über die Beteiligung des Deutschen Elektronen Synchrotron (DESY) etwa ein Drittel der ca. 250 an IceCube beteiligten Wissenschaftler und liefert signifikante Beiträge zum Aufbau, Betrieb und zur wissenschaftlichen Auswertung der Daten des Neutrino-Teleskops. Deutsche Wissenschaftler sind auch an Planung und Design zukünftiger Erweiterungen beteiligt.

Fundamentale Eigenschaften von Neutrinos

Eine dichter mit optischen Sensoren instrumentierte Region im Kern des IceCube Detektors (genannt "DeepCore") hilft dabei, die Neutrinos selbst besser zu verstehen. Neben Neutrinos aus dem Kosmos misst IceCube/DeepCore auch solche, die in unserer eigenen Atmosphäre produziert wurden. Diese sogenannten atmosphärischen Neutrinos können mühelos die Erde durchdringen, verändern jedoch dabei manchmal ihre Eigenschaften: aus der einen Art von Neutrinos wird eine andere.

Die Bestimmung wie oft dies bei welcher Energie geschieht, erlaubt die Messung fundamentaler Eigenschaften der Neutrinos, z.B. der Differenz der Massen zweier Neutrinoarten.

Nach nur drei Jahren Messzeit hat DeepCore hier an Teilchenbeschleunigern durchgeführten Messungen in der Präzision fast erreicht und hervorragenden Chancen in Zukunft eine führende Rolle in diesem Feld einzunehmen. Mit einer zukünftigen Erweiterung könnte zudem die wichtige Frage geklärt werden, welche Neutrinoart die leichteste und welche die schwerste ist.

Spektrum der kosmischen Strahlung

An der Eisoberfläche, direkt über dem IceCube Neutrino-Teleskop sitzt der IceTop-Detektor zur Messung des Energiespektrums und der Eigenschaften der kosmischen Strahlung. Er benutzt zu IceCube baugleiche optischen Sensoren und Elektronik-Komponenten und wird zusammen mit IceCube von der selben internationalen Kollaboration von Wissenschaftlern betrieben. Für IceTop wurden die optischen Sensoren in wassergefüllten Tanks an der Oberfläche installiert um Lichtsignale von Teilchenschauern zu detektieren, die dann entstehen, wenn kosmische Strahlung auf die Erde trifft.

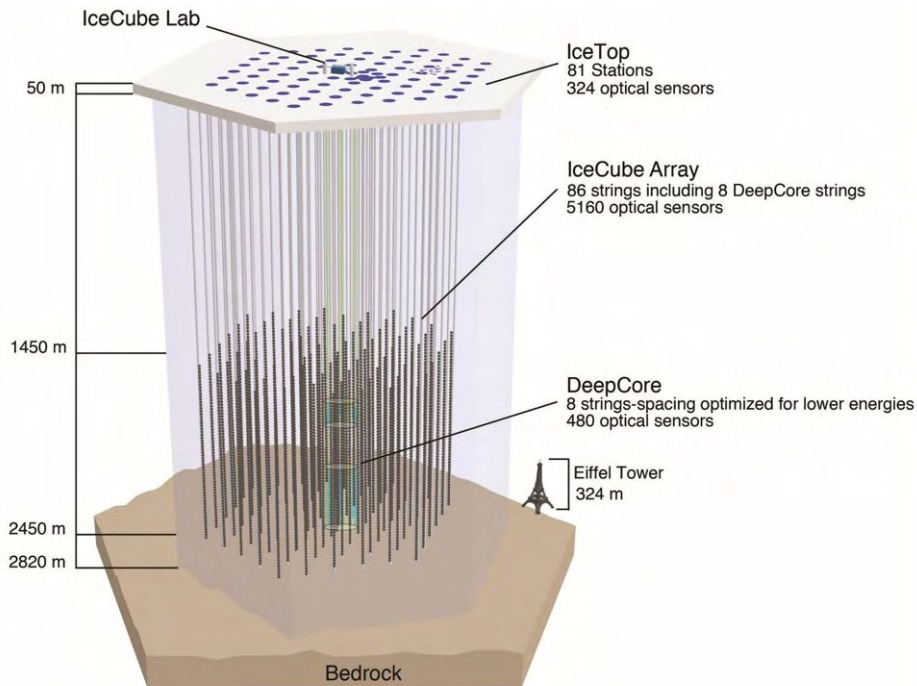


Abbildung III.4.2: Das IceCube Neutrinoobservatorium am Südpol. Verteilt über eine Fläche von mehr als 1 km² sind 5160 optische Sensoren in einer Tiefe zwischen 1,5 km und 2,5 km unter der Eisoberfläche installiert worden, um nach den schwachen Lichtsignalen zu suchen, die durch die Kollisionen von Neutrinos mit Atomen im Eis produziert werden. Quelle: IceCube Collaboration.

Die Vermessung der Teilchenschauer erlaubt Rückschlüsse auf das Energiespektrum und die Art der Teilchen der kosmischen Strahlung.

Die mit IceTop durchgeführten Messungen sind dabei die momentan präzisesten im Energiebereich zwischen einem und einigen hundert Petaelektronenvolt. Dieser Energiebereich ist sehr interessant, da viele Modelle vorhersagen, dass kosmische Strahlung maximal bis zu diesen Energien in unserer eigenen Milchstraße produziert werden kann, während sie bei noch höheren Energien außerhalb unserer Galaxie entstehen muss. Eine genaue Vermessung hilft, diese Modelle zu überprüfen und zu verbessern.

Offene Forschungsfragen

1. Welche astrophysikalischen Systeme beschleunigen Teilchen zu höchsten Energien?
2. Erzeugen diese Systeme die kosmische Strahlung nahe der Erde?
3. Bis zu welchen Energien wird kosmische Strahlung in unserer Milchstraße produziert?
4. Welche fundamentalen Eigenschaften hat ein Neutrino? Welches ist das leichteste, welches das schwerste Neutrino?
5. Finden wir ein Signal, dass uns Hinweise auf die Natur der dunklen Materie gibt?



Abbildung III.4.3: Design eines Lichtsensors für zukünftige Neutrinooteleskope, entwickelt an der Universität Erlangen und am DESY.



• www.icecube.wisc.edu

III.4.2 Astrobiologie: Planetenanalogue und Exploration

Verglichen mit den Weiten des Alls eignen sich die Polargebiete nicht zuletzt aufgrund ihrer Erreichbarkeit exzellent für die Planeten-analogue und astrobiologische Feldforschung. Erkenntnisse, die hier gewonnen werden, führen maßgeblich zum Fortschritt in der experimentellen, modellierenden und missionsvorbereitenden Planetenforschung. Um ein besseres Verständnis der zumeist eisigen Planeten und Monde im Sonnensystem und darüber hinaus zu erlangen, dienen gerade die Polargebiete mit ihren Umweltbedingungen als optimale Annäherung an die Bedingungen, wie sie auf Mars und die Eismonde von Jupiter und Saturn vorherrschen. Da diese halbwegs durch Sonden erreichbaren Himmelskörper meist auch für die Suche nach Leben außerhalb der Erde interessant sind, untersuchen Astrobiologen die durch Mikroorganismen besiedelten Nischen im Polargebiet. Dadurch können Rückschlüsse auf potentielle Habitate und damit mögliche Rückzugsgebiete für Leben auf den anderen eisigen Planeten und Monden gezogen werden. Das hierbei gewonnene Wissen erlaubt die Entwicklung gezielterer Strategien für die zukünftigen, robotischen oder auch bemannten Missionen, die beispielsweise das Ziel haben, dort nach Leben zu suchen. Zudem sind die harschen Bedingungen der Polarregionen auch optimal, um Mensch, Technik und Logistik für die Exploration unter Extremstbedingungen auf deren Einsatzfähigkeit in den Eiswelten zu testen.

Planeten Analoge Feld- und Ozean-/Tiefseeforschung

Ein systematischer Ansatz zur Erkundung des Weltraums wird bereits seit wenigen Jahrzehnten unter anderem durch die Weltraumorganisationen ESA, NASA und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) verfolgt, bei dem potentielle Planeten-analogue Gebiete auf unserem Planeten auskundschaftet werden und diese Gebiete für die Weltraumforschung genutzt werden.

Auf der Suche nach Leben im All unterstützt die Planeten-analogue Feldforschung in den Polargebieten zukünftige Weltraummissionen zu den eisigen Welten im Sonnensystem, was sowohl in der robotischen als auch bemannten Erkundung sehr hilfreich ist.

Im terrestrischen Bereich stehen zumeist Lokalitäten mit geologischen, geomorphologischen als auch annäherungsweise klimatischen Besonderheiten, wie man sie auf dem Mars beobachtet hat oder

Eigenschaften der Kryosphäre mit Referenz zu den eisigen Ozeanwelten der Jupitermonde Europa und Ganymed als auch der Saturnmonde Enceladus und Titan im Fokus. Diese Welten unseres Sonnensystems sind zunehmend in das Zentrum der astrobiologischen Forschung gerückt, die sich mit der Entstehung, Entwicklung, Ausbreitung und Zukunft des Lebens im Universum befasst. Der Grund hierfür ist die Existenz flüssigen Wassers in Vergangenheit und Gegenwart auf und in diesen planetaren Körpern, die die Existenz von Leben erlauben könnten. Um ein besseres Verständnis über die Oberflächenstrukturen des Mars als auch über potentielle habitable Nischen für Leben zu gewinnen, sind bereits die Trockentäler der Antarktis (Dry Valleys) im Nord Victoria Land regelmäßig von der NASA im Zentrum der Mars-analogen Forschung gerückt worden. Neben diesen bekannten Trockentälern mit Mars-Analogie sind aber auch viele andere kleinere, noch unbekannte und kaum erforschte Trockengebiete im Transantarktischen Gebirge als auch vulkanisch geprägte Landschaften von Interesse, die zudem über europäische Polarstationen, wie die italienische Mario Zucchelli Station und die deutsche Gondwana-Station mit der dazugehörigen Logistik sehr gut erreichbar sind.

Abgesehen von der terrestrischen, zumeist auf den Nachbarplaneten Mars fokussierten Forschung, sind die polar-ozeanische bzw. die polare Tiefseeforschung nicht minder von Interesse für die Planetenforschung und Astrobiologie. Insbesondere vulkanisch aktive Tiefseebereiche mit möglichst hydrothermaler Aktivität als auch der Kontakt derartiger Seegebiete zu Oberflächenseeeis kann ein Annäherungsmodell für die Eismonde mit ihren Ozeanen sein. Die in diesen Regionen vorkommenden Umweltbedingungen könnten sehr gut die sich extrem unterscheidenden Phasengrenzen z.B. von Niedrig- zu Hochdruck, von heißen zu kalten und basisch zu sauren Umweltbedingungen bieten, wie man dies für die Eismonde postuliert. Da die komplexe präbiotische Netzwerkchemie in diesen interessanten ozeanischen bis in die Tiefsee reichenden Regionen alle in den Polarregionen gute Ausgangsbedingungen für möglicherweise der Entstehung von Leben bieten und zudem eine große Bandbreite an ökologischen Systemen schaffen, könnten hier auch Analogien zu möglichen biologischen Systemen in den Ozeanen der Eismonde gezogen werden. Die Erforschung der polaren Tiefsee würde somit näherungsweise Erkenntnisse liefern, was in den von einer Eiskruste bedeckten Ozeanen der Eismonde zu erwarten wäre.

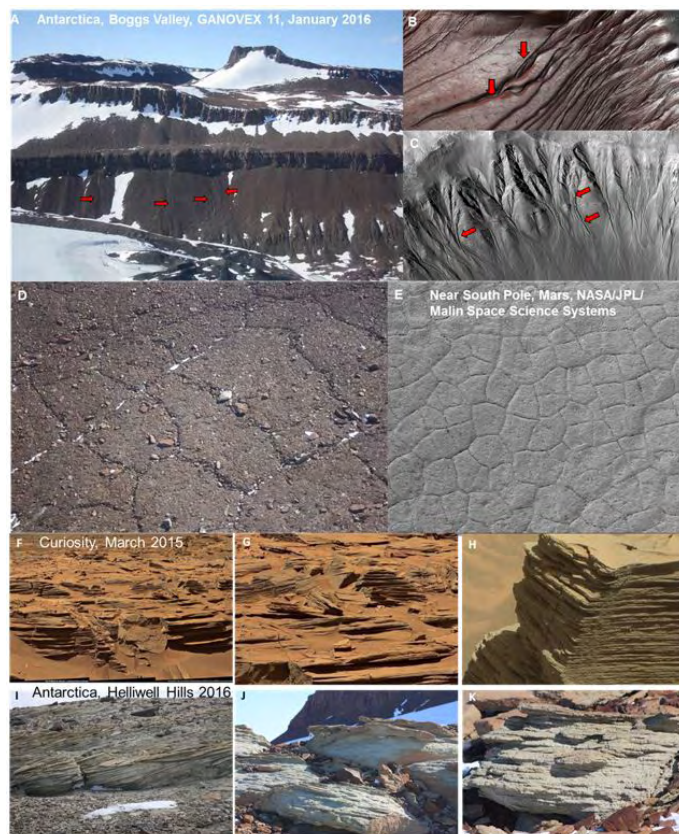


Abbildung III.4.4: Mars-analoge geomorphologische Strukturen im Nord Victoria Land - Tal Boggs-Valley (Antarktis; A+D) in Gegenüberstellung zu Strukturen auf dem Mars (B, C, E). A-C: Gullies/Erosionsrinnen; D-E: Frostmusterböden / Polygonböden. Geologie: Sedimentgesteine auf dem Mars (F-H) und Sedimentgesteine / Sandsteine im Nord Victoria Land (I-K). Die Sedimentgesteine bieten einer Vielzahl an endolithischen Organismen Besiedlungsnischen. (Fotoquellen: Nord-Victoria Land/GANOVEX 11: J.P. de Vera, Mars: NASA, ESA, DLR).

Unterstützung Robotischer Missionen

Neben der Bearbeitung wissenschaftlicher Fragestellungen durch die Planeten-analoge Feldforschung, könnten die Herausforderungen, die die extremen Bedingungen der Polarregionen auch an technische Systeme stellen, direkt an entwickelte Sonden und mobilen Forschungsplattformen bis zu Erkundungs-Rovern für die Erforschung des Weltraums getestet werden.

Sowohl robotische Operationen als auch die Erkenntnisse über optimale Erkundungsstrategien können direkt mit den für die Weltraumforschung entwickelten Geräten im Feld getestet werden. Dabei spielt ebenfalls wieder die Detektion von Leben eine wichtige Rolle.

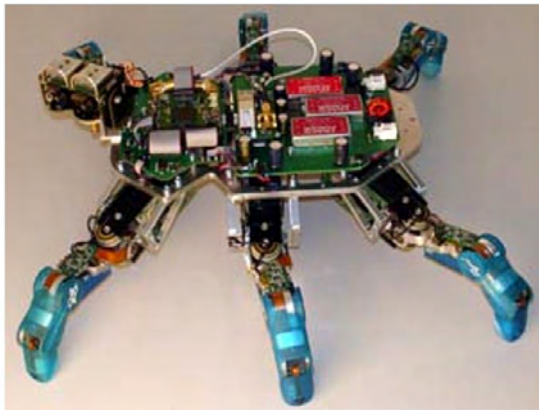


Abbildung III.4.5: Neue Gelände-gängige robotische Sonden wie der Krabbler zur Erkundung schwer zugänglicher Nischen wie Höhlen und Spalten (Quelle DLR: http://www.dlr.de/rmc/rm/desktopdefault.aspx/tabid-3755/17612_read-12712/).

Instrumente, die das Erkennen von Leben bewerkstelligen wollen, müssen den sehr kalten Bedingungen auf dem Mars und den Eismonden sowie deren Geländebesonderheiten Stand halten können. Vortests sind daher in den Polregionen als Annäherung an die kalten Welten im Sonnensystem essentiell wichtig. So sind für die neue Generation von Robotern auch nicht nur Rad-gestützte Fahrzeuge gefragt, sondern ebenfalls sich in Eis einschmelzende Sonden oder mit Gliedmaßen versetzte Erkundungsroboter, die schwer zugängliches Gelände mit Unebenheiten oder sogar Höhlen in Fels und Eis erkunden könnten. Höhlen können nämlich auf dem Mars Mikrohabitate ausbilden, in denen es feuchtere und vor der intensiven Sonnen- und Weltraumstrahlung geschütztere Bereiche gibt, die für Leben förderlich wären. Eisgräben, Brüche und sogar Höhlungen in der Eiskruste

der Eismonde könnten ebenfalls das aus dem Ozean heraufströmende Geysir-Wasser-Gas-Gemisch im Eis einfangen und wären vielversprechende Ziele für die Suche nach Spuren des Lebens, die erkundet werden könnten. Somit könnten speziell dafür entwickelte Geräte auch in der Polarregion in Gletscherspalten, Gletscherhöhlen, Lavahöhlen und andere ähnlich geartete Nischen getestet werden.

Unterstützung bemannter Missionen

Der Faktor Mensch ist in der Weltraumforschung ebenfalls eine schwer einschätzbare Größe. Insbesondere die Langzeitmissionen, wie sie bei einer Reise zum Mars mit einer lange isolierten bzw. auf wenige Crew-Mitglieder begrenzter Personenzahl vorgesehen sind, stellen höchste Belastungen für Körper und Geist dar. Zudem werden die Umweltbedingungen insbesondere auf der gefrorenen Oberfläche des Planeten Mars äußerst unwirtlich sein.

Im Gegensatz zu Laborsimulationen eignet sich die Antarktis oder auch Arktis besonders für realistische Isolationstests. Sowohl die körperlichen Belastungen bei Stress- und/oder die Monotonie in den Ruhephasen in einer isolierten extremen Umwelt, wie sie die Polargebiete bieten, nähern sich besonders den Bedingungen der Eiswelten im Sonnensystem, wie z.B. dem Mars an.

Auf sich allein gestellte und autark arbeitende Gruppen könnten beispielsweise Tests in Raumanzügen im Mars-analogen Gelände unter Aufsicht von Medizinern und Psychologen durchführen. Aufgaben, wie sie auf bemannten Weltraummissionen anstehen werden, könnten hier simuliert durchgeführt werden und auf die Einsatzfähigkeit sowohl von Mensch als auch Maschine getestet werden. Sogar Tests

für die Standfestigkeit von möglichen Modulhabitaten, die für die Menschen als Unterkunft auf dem roten Planeten dienen sollen, könnten in den Polargebieten durchgeführt werden und sogar in Absprache und Abstimmung mit der Logistik der Polarstationen realisiert werden. Einige Ansätze in diese Richtung werden bereits von der ESA auf der Französisch-Italienischen Station Concordia durchgeführt. Dabei werden alle internationalen Standards für die Einhaltung des Umweltschutzes und die Planetary Protection Guidelines des Internationalen Komitees der Weltraumforschung COSPAR eingehalten.

Offene Forschungsfragen

- 1. Welche anderen planeten-analogen Gebiete gibt es zusätzlich zu den bereits bekannten im Polargebiet?**
- 2. Welche Lebensformen könnten auf dem Mars oder in den Ozeanen der Eismonde leben?**
- 3. Wie detektiert bzw. erkennt man Leben in den eisigen Welten des Sonnensystems?**
- 4. Welche robotischen Systeme eignen sich optimal für die Erkundung der Eiswelten im Sonnensystem?**
- 5. Wie verhält sich der Mensch in einer eisgeprägten Umwelt mit Mars- und Eismond-Analogie?**

NW

Die Polargebiete: Ressourcen und Nachhaltigkeit

IV.1	Ressourcen	111
IV.1.1	Der internationale Status der Antarktis	
IV.1.2	Vorkommen mineralischer Rohstoffe in der Arktis	
IV.1.3	Vorkommen und Potentiale von Energierohstoffen in der Arktis	
IV.1.4	Biologische Rohstoffe in der Arktis	
IV.2	Sozio-ökonomische Aspekte	117
IV.2.1	Antarktis	
IV.2.2	Arktis	
IV.3	Völkerrecht	123
IV.3.1	Rechtslage in der Antarktis	
IV.3.2	Rechtslage in der Arktis	
IV.3.3	Forschungsfelder	
IV.4	Historische und Archäologische Forschung ..	127
IV.4.1	Nachlässe von Polarforschern	
IV.4.2	Lebens und Arbeitsbedingungen	
IV.4.3	Historische Wasserfahrzeuge	



IV.1. Ressourcen

Die Debatte über den Klimawandel und die politischen Veränderungen besonders im Nordpolargebiet haben die Frage nach möglichen Rohstoffvorkommen in der Arktis und ihrer Nutzung zunehmend in den Mittelpunkt des Interesses gerückt. Zusätzlich führen die steigende Nachfrage nach Rohstoffen weltweit und der Preisanstieg zu einer zunehmenden Bereitschaft der Wirtschaft, mehr Geld in die Erkundung und Exploration sowohl von mineralischen als auch von Energierohstoffen in diesen entlegenen Gebieten zu investieren. Für die Antarktis sind die Voraussetzungen aufgrund ihrer isolierten Lage, ihrer Unzugänglichkeit, ihres sehr schmalen Schelfs und ihres unwirtlichen Klimas völlig anders. Diese schwierigen Bedingungen würden – von den ebenfalls grundverschiedenen politischen, ökologischen und ökonomischen Problemen einmal abgesehen – eventuelle Absichten der Rohstoffgewinnung vor bisher nicht einzuschätzende technische Probleme stellen. Daher ist von einem „Run“ auf die Rohstoffe der Antarktis in absehbarer Zukunft nicht auszugehen.

IV.1.1 Der internationale Status der Antarktis

Die Antarktis gehört wie Indien, Australien, Südamerika und Afrika zum auseinander gebrochenen Großkontinent Gondwana. Damit teilt sie die geologische Geschichte mit diesen Kontinenten. Es kann daher von ähnlichen Vorkommen an Rohstoffen auf dem antarktischen Kontinent ausgegangen werden. Es gibt Kenntnisse von Rohstoffvorkommen, zum Beispiel von Industriemineralen, Energierohstoffen, Bunt- und Edelmetallen oder Vorkommen von Manganknollen im Tiefseebereich (Abb. IV.1.1). Es handelt sich dabei allerdings meist nicht um abbauwürdige Lagerstätten, sondern um einzelne Mineralfunde oder Vorkommen von Wertmineralen. Lediglich Eisenerz und Kohle kommen in so großen Mengen vor, dass man von Lagerstätten sprechen könnte, ohne Aussagen über Qualität, Quantität oder Bauwürdigkeit treffen zu können.

Lediglich etwa 1-2% der Gesteine des antarktischen Kontinents sind direkt zugänglich. Ein Großteil an vermuteten Rohstoffvorkommen ist unter einem bis über 4 km dicken Eisanter verborgen. Der Kontinent gilt daher bis heute als „unverritz“, das heißt alle in der geologischen Vergangenheit gebildeten Lagerstätten befinden sich noch vor Ort und sind nicht „angefahren“. Daher beruhen auch sämtliche Angaben zu Rohstoffmengen in der Antarktis auf statistischen Hochrechnungen und sind insofern un-

gesichert. Berücksichtigt man hier den Vergleich von Größe des Kontinents, seine Eisbedeckung und Lagerstättenhäufigkeit und wendet diese auf die wenigen eisfreien Regionen an, dann reduziert sich die hypothetische Zahl der statistisch ermittelten Lagerstätten von etwa 900 auf nur etwa 20.

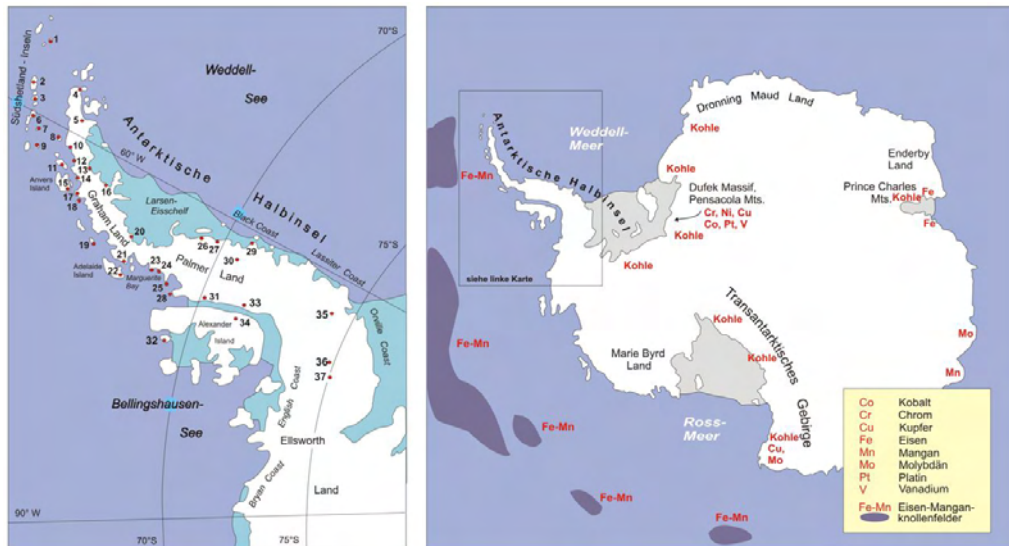


Abbildung IV.1.1: Bekannte Rohstoffvorkommen in der Antarktis. Im Transantarktischen Gebirge existieren größere Vorkommen von Kohle, in den Prince Charles Mountains von Eisenerz. Eine Vielzahl an Mineralfunden (angegeben durch die Zahlen in der linken Karte; v.a. sind dies Kupfer-Molybdän-Vorkommen) sind von der Antarktischen Halbinsel bekannt oder auch vom Dufek Massiv, welches eine so genannte geschichtete Intrusion darstellt und wo verschiedene Metall-Rohstoffe vermutet werden (nach Roland, 2009: Antarktis, Forschung im ewigen Eis, Spektrum Akad. Verlag).

Die Antarktis ist im Unterschied zur Arktis durch den – zeitlich nicht begrenzten – völkerrechtlichen Antarktisvertrag von 1959 unter Schutz gestellt und unterliegt keinem politischen Staatssystem, da sämtliche Territorialansprüche zurzeit ruhen. Alle den Vertrag unterzeichnenden Staaten bekennen sich auf Dauer zum Schutz der Antarktis und ihrer friedlichen Nutzung. Der Geltungsbereich des Vertrages umfasst alle Gebiete südlich des 60. südlichen Breitengrades und damit den gesamten antarktischen Kontinent und die umliegenden Meeresgebiete. Aufgrund der ruhenden Territorialansprüche gehören Bodenschätze in der Antarktis rechtlich gesehen niemandem. Die Rohstofffrage in der Antarktis ist durch ein Zusatzmoratorium zum Antarktisvertrag, dem 1991 beschlossenen und 1998 in Kraft getretenen Madrider Umweltschutzprotokoll, geregelt. Nach Artikel 7 dieses Vertrages ist „jede Aktivität im Zusammenhang mit mineralischen Ressourcen mit Ausnahme wissenschaftlicher Forschung“ verboten. Das Umweltschutzprotokoll hat eine Laufzeit von zunächst 50 Jahren (bis 2048) und kann erst dann auf Antrag eines Vertragsstaates im Rahmen einer diplomatischen Konferenz neu verhandelt werden. Nach jetzigem Stand ist somit keine Förderung erlaubt. Im Gegensatz zu einer in Medien und Öffentlichkeit weit verbreiteten Meinung beinhaltet das Madrider Umweltschutzprotokoll darüber hinaus kein generelles automatisches Auslaufen. Bedenkt man, dass das Antarktisvertragssystem auf Konsensus basiert, sind vielmehr hohe diplomatische Hürden gesetzt, um überhaupt eine Beendigung oder auch nur eine Änderung des Protokolls und so auch des Abbauverbotes durchsetzen zu können. In einer Erklärung im Rahmen der 37. Konsultativtagung der Antarktisvertragsstaaten in Brasilia im Jahre 2014 hat sich Deutschland klar zum Weiterbestand des Rohstoffmoratoriums und dessen Fortführung über das Jahr 2048 hinaus bekannt. Dies führte zwei Jahre später während der 39. Konsultativtagung der Antarktisvertragsstaaten in Santiago (Chile) zur Verabschiedung einer Resolution, in der sich alle Vertragsstaaten zur Beibehaltung und Fortführung des Bergbauverbots verpflichteten und dieser höchste Priorität einräumten. Ein weiteres Übereinkommen ist die internationale Konvention zur Erhaltung der lebenden Meeresschätze der Antarktis (CCAMLR) mit zurzeit 25 Mitgliedern, u.a. die Bundesrepublik Deutschland und die Europäische Union. Die Konvention wurde 1980 beschlossen und trat 1982

in Kraft. Ziel ist der Erhalt der lebenden Meeresschätze der Antarktis, wobei hier auch deren nachhaltige Nutzung mit eingeschlossen ist. Im Südozean betrifft dies heute insbesondere den Krill und den Schwarzen Seehecht. Eine Überfischung von Krill würde aufgrund seiner führenden Rolle in der antarktischen Nahrungskette letztendlich auch zu einer Gefährdung der Bestände von Walen, Robben und Seevögeln führen. Im Hinblick auf die Verknüpfung von Umweltschutz und Fischereimanagement kann CCAMLR als ein modernes und effizientes Übereinkommen bezeichnet werden, welches seit seinem Inkrafttreten auf viele Erfolge zurückblicken kann. Dies betrifft z.B. die Einführung eines ökosystembasierten Fischereimanagements oder die Reduktion der Beifangmortalität von Seevögeln auf beinahe Null im Jahre 2013 und von illegaler, nicht regulierter und unangemeldeter Fischerei). Gegenwärtig bereitet CCAMLR die Einrichtung von Meeresschutzgebieten im Südozean vor, um die internationalen politischen Ziele und Verpflichtungen (Schutz von 10% der Weltmeere bis 2020) auch in der Antarktis umzusetzen. Im Zuge dieser Initiative wurde von den CCAMLR Mitgliedsstaaten im Oktober 2016 im antarktischen Rossmeer eine neues Schutzgebiet auf Zeit ausgerufen, das am 1. Dezember 2017 in Kraft tritt.

IV.1.2 Vorkommen mineralischer Rohstoffe in der Arktis

Die Verteilung von Rohstoffen in der Arktis ist abhängig von deren plattentektonischer Entwicklung, d.h. von der Lage sehr alter Krustenanteile - sogenannter Kratone - sowie der jüngeren Faltengebirge und Sedimentbecken: In Bereichen mit überwiegend kristallinen Gesteinen der Kratone führen die geologischen Bedingungen eher zur Bildung mineralischer Rohstoffe, während in den großen Sedimentbecken die Möglichkeit für die Bildung von Erdöl, Erdgas oder Kohle, aber auch für sedimentäre mineralische Rohstoffe besteht.

Im Umkreis des Arktischen Ozeans liegen die drei großen und geologisch sehr alten Kontinentschilde oder -kerne Laurentia, Baltica und Sibiria, in denen mineralische Rohstoffe entstanden sind. Die sie umlagernden Sedimentbecken können nennenswerte Lagerstätten enthalten, wie z.B. eine der größten sedimentären Blei-Zink-Lagerstätten der Welt am Citronefjord in Nordgrönland. Derzeit sind bereits rund 20 Bergwerksbetriebe nördlich des Polarkreises aktiv, die Vorkommen von Gold, Kupfer, Eisenerz, Molybdän, Blei, Zink, Platingruppenmetalle, Nickel, Diamanten und Seltene Erden abbauen. Nordeuropa blickt auf eine lange, bis in die Mitte des 17. Jahrhunderts zurückreichende Tradition des mineralischen Rohstoffabbaus in der Arktis zurück. Gefördert wurden und werden insbesondere Eisenerz, Silber, Industriemineralien und Marmor.

In kleinem Maßstab wurden auch in Grönland bereits seit Mitte des 19. Jahrhunderts Kupfer, Blei, Zink, Silber, Gold, Marmor und die Industriemineralien Graphit, Olivin und Kryolith gewonnen. Der weltweit steigende Rohstoffbedarf führt zu Explorationsvorhaben in der Arktis: Zwischen 2004 und 2010 haben sich die Explorationslizenzen in Grönland von 22 auf mehr als 70 erhöht. Ein Schwerpunkt des Rohstoffabbaus Rußlands liegt auf der Kola-Halbinsel, wo derzeit an mehreren Orten Eisenerz, Nickel-Kupfer-Kobalt mit Anteilen von Silber-Gold-Platingruppenmetallen, Niob-Tantal-Seltene Erden (Zirkonium) und Industriemineralien (Apatit, Feldspat u.a.) gewonnen werden. Trotz der beschriebenen Projekte sind große Teile der Arktis – insbesondere die Kontinentschilde – geologisch noch wenig erschlossen und auf ihr Potential an mineralischen Rohstoffvorkommen untersucht.

IV.1.3 Vorkommen und Potentiale von Energierohstoffen in der Arktis

Erdöl ist derjenige Rohstoff der Erde, der gegenwärtig die größte weltwirtschaftliche Bedeutung hat. Mit dem Anwachsen der Weltwirtschaft wächst zurzeit trotz intensiver Bemühungen der Substitution der Bedarf an Erdöl weiter. Die Aufmerksamkeit der Staaten und der Industrie richtet sich daher immer mehr auf Vorkommen, die bislang als zu aufwändig und zu kostenintensiv galten. Diese Vorkommen

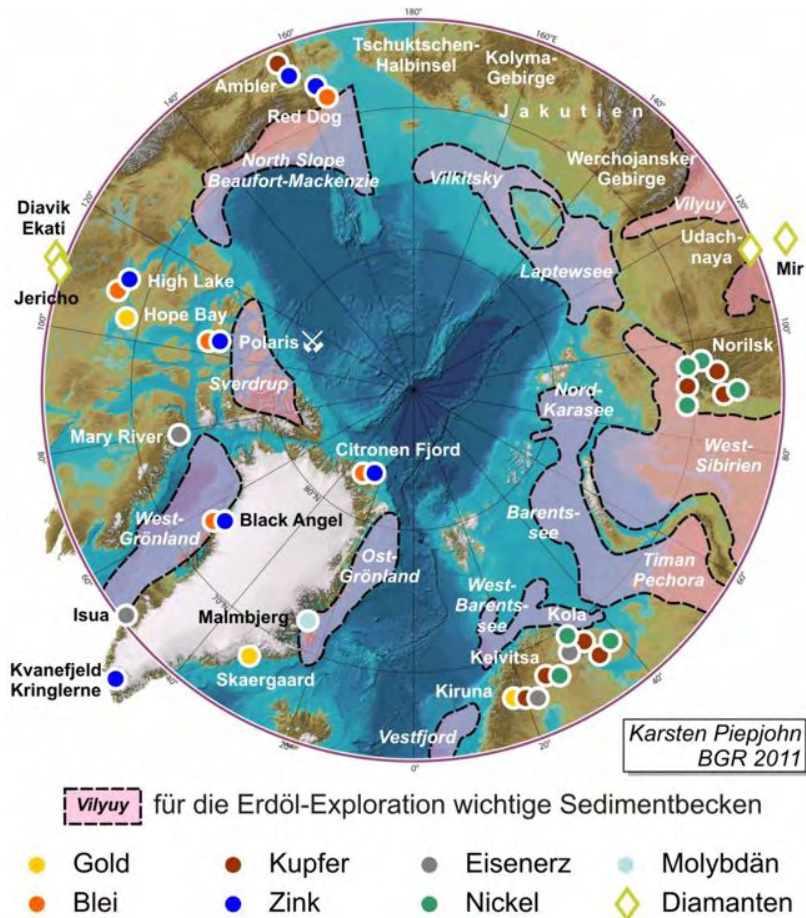


Abbildung IV.1.2: Karte der Arktis mit den wichtigsten Vorkommen mineralischer Rohstoffe und der Lage der für die Energierohstoffe bedeutenden zirkumarktischen Sedimentbecken (nach Piepjohn et al., Geographische Rundschau, 2011)

liegen an den Kontinenträndern der Weltmeere im Tiefstwasserbereich (> 1500 m), in unkonventionellen Lagerstätten oder in schwer zugänglichen und sensiblen Gebieten der Arktis. Dabei werden Erdöl und Erdgas bereits seit Jahren in der Arktis gefördert. Gerade in Europa wird arktisches Erdgas vor allem aus Norwegen und Russland genutzt. Eines der größten Erdgasfelder Norwegens, das Snøhvit Feld in der westlichen Barentssee auf etwa 70° Nord, produziert seit 2008 Erdgas und Kondensat. Um die Fördertechnik vor dem Vereisen, dem Packeis und Eisbergkollisionen zu schützen, wurde sie auf dem Meeresgrund in rund 300 m Wassertiefe installiert. Erdgas und Kondensat werden durch eine Pipeline am Meeresboden über 140 km zur Küste transportiert und dort aufbereitet. Deutschland bezieht gut ein Drittel seines Erdgases aus Russland und hier überwiegend aus Westsibirien. Die gigantischen Erdgasfelder Westsibiriens liegen nördlich des Polarkreises und sind von mehreren 100 m mächtigem Permafrost überlagert. Sowohl Russland als auch Norwegen planen die weitere Erschließung von Gasfeldern in der Barentssee. Hier steht die Anbindung des Shtokmanfeldes in Vorbereitung, dem von russischer Seite Reserven von mehr als 3,8 Billionen m^3 Erdgas zugerechnet werden (Welterdgasverbrauch im Jahr 2010: 3,0 Billionen m^3). Diese Entwicklungen führen dazu, dass der Anteil an in Europa genutztem Erdgas aus arktischen Regionen in den kommenden Jahren wahrscheinlich zunehmen wird.

Die für Erdöl und Erdgas hoffigen Sedimentbecken der Arktis (vgl. Abb. IV.1.2) ähneln sich in vielerlei Hinsicht. Im Vergleich mit den meisten Regionen der Welt ist die Datenlage allerdings schlecht. Die klimatischen Bedingungen in der Arktis erschweren die Erkundung mit Hilfe von geophysikalischen Messungen und Bohrungen. Dennoch sind an den Kontinenträndern rund um das Polarmeer eine Vielzahl von Sedimentbecken bekannt, in denen entweder bereits Erdöl oder Erdgas nachgewiesen wurden,

oder für die von einem Potential für wirtschaftlich relevante Mengen an Kohlenwasserstoffen in Lagerstätten ausgegangen wird. Laut einer Studie des Geologischen Dienstes der USA (USGS) aus dem Jahre 2008 sind mehr als 400 Öl- und Gaslagerstätten nördlich des Polarkreises bekannt. Bezogen auf die bisherige Produktion und die sicher nachgewiesenen Reserven enthalten diese etwa 10% der weltweit bekannten konventionellen Vorräte. Zudem weist der USGS in seiner zirkumarktischen Ressourcenbewertung 25 Provinzen aus, in denen mit einer gewissen Sicherheit mindestens eine signifikante Öl- oder Gaslagerstätte zu erwarten ist. Diese 25 Provinzen decken fast den gesamten Schelfbereich an den nördlichen Kontinenträndern Eurasiens, Grönlands und Nordamerikas ab (vgl. Abb. IV.1.2).

Die Kenntnisse über tatsächliche Vorkommen und Mengen an Erdöl und Erdgas in der Arktis sind noch nicht ausreichend, um ihre Bedeutung für die weltweite Versorgung mit Energierohstoffen in den kommenden Dekaden abzuschätzen. Auch die Kenntnisse über die Reaktion der arktischen Umwelt auf die Produktion von Kohlenwasserstoffen ist nicht ausreichend. Beide Bereiche sind gleichwohl bedeutsam, um die Entwicklung und den Schutz der Arktis kritisch zu begleiten und Empfehlungen Seitens der Wissenschaft für Politik und Wirtschaft auszusprechen.

IV.1.4 Biologische Rohstoffe in der Arktis

Der in den letzten Jahren verstärkt beobachtbare Rückgang des arktischen Meereises eröffnet Perspektiven für neue Transportwege durch das Nordpolarmeer, aber auch für den Zugang zu neuen Fischereigründen in der Arktis. Bereits heute wird schon etwa die Hälfte des im Nordpolarmeer gefangenen Fisches in der EU verzehrt. Erhalt und nachhaltige Bewirtschaftung der biologischen Ressourcen muss jedoch in jedem Fall die Basis für deren weitere, zukünftige Nutzung darstellen. Das Potential für lebende Meeresressourcen ist zurzeit nach wie vor nur unzureichend abzuschätzen. Daher muss eine verlässliche Datenbasis entwickelt werden, um mögliche Risiken zu identifizieren, den Erhalt der biologischen Vielfalt auch für die Zukunft zu garantieren und die Ressourcen nachhaltig zu nutzen und zur gleichen Zeit die arktische Umwelt bestmöglich zu schützen. Die biologische Diversität des Nordpolarmeeres wird sich aufgrund des Klimawandels und der zunehmenden wirtschaftlichen Nutzung der Arktis zunehmend verändern. Wissenschaftliche Untersuchungen sind notwendig, um mögliche Rückzugsregionen für gefährdete Arten zu identifizieren. Hierzu sind neben der gerade durch die Entwicklung innovativer Beobachtungssysteme und verfeinerter Modelle zu Klima und Ökosystemen in regionalen bis lokalem Maßstab Voraussetzung.



• www.bgr.bund.de



IV.2. Sozio-ökonomische Aspekte

Die schnellen und weitreichenden Veränderungen in der Arktis und der Antarktis betreffen nicht nur die natürliche Umwelt – sie sind auch wirtschaftlicher, sozialer und politischer Art. Eine fundierte Einschätzung der künftigen Risiken und Potenziale erfordert das Zusammenwirken der Natur- und Sozialwissenschaften. Die Darstellung der sozio-ökonomischen Entwicklungslinien erfolgt hier zunächst mit Blick auf die Antarktis, anschließend – und in ausführlicherer Form – mit Fokus auf die Arktis. Die aufgeführten Forschungsfragen sind für beide Polarregionen formuliert.

IV.2.1 Antarktis

Historisch einzigartig ist der Umstand, dass das Antarktis-Vertragssystem seit mehr als 50 Jahren eine einvernehmliche Kooperation hinsichtlich des Umweltschutzes und der Forschung garantiert. Wenngleich alle Formen der Ressourcennutzung in der Antarktis durch das Vertragswerk streng begrenzt sind, so ist doch die unmittelbare Umgebung des Kontinents bereits von weitreichenden – teils von Menschen induzierten – Veränderungen der Ressourcenbasis betroffen. So hat der Walfang im späten 19. und im 20. Jahrhundert zu einer drastischen Dezimierung der Meeressäuger geführt und die Nahrungsnetze in den südlichen Ozeanen beeinflusst. Auch in der Gegenwart findet eine Bewirtschaftung der Südpolargewässer statt. Die Krillfischerei liefert ein anschauliches Beispiel. Krill wird seit einigen Jahrzehnten als Proteinquelle genutzt und „geerntet“ – unter anderem zur Versorgung der stetig expandierenden Aquakulturen. Die Krillbestände wiederum sind von der Verbreitung des Meereises abhängig, d.h. je geringer die Ausdehnung des Meereises in einem bestimmten Jahr ausfällt, umso geringer ist der Krillbestand in der Folge. Die Krillbestände werden also einerseits durch den Rückgang des Meereises (d.h. durch die globale Erwärmung) und andererseits durch die kommerzielle Nutzung verringert.

Die Zunahme des Tourismus auf der Antarktischen Halbinsel und der Forschungsaktivitäten belegt ebenfalls den wachsenden menschlichen Einfluss in der Antarktis. Die Zahl der Besucher hat durch den Tourismus rasant zugenommen (wenngleich die längerfristigen Aufenthalte in den Forschungsstationen in der Summe immer noch die Kurzeitaufenthalte übersteigen). Tourismus hat nicht ausschließlich negative Auswirkungen. In manchen Fällen sind Touristen damit beauftragt, die in früheren

Jahrzehnten hinterlassenen Abfälle zu bergen und somit die ökologischen Folgen der menschlichen Präsenz auf dem Kontinent zu minimieren.

IV.2.2 Arktis

Die Arktis ist – im Unterschied zur Antarktis – seit mehreren Jahrtausenden von Menschen bewohnt. Die zahlreichen indigenen Völker, die in der Arktis leben, betrachten sie als Heimat. Die Bewohner der Arktis waren aufgrund der spezifischen ökologischen Bedingungen und der saisonal schwankenden Verfügbarkeit von Ressourcen stets darauf angewiesen, über große Areale zu operieren und in flexibler Weise zu agieren. Die Veränderlichkeit der Umweltbedingungen hat also schon in früheren Jahrhunderten einen hohen Grad an Reaktionsvermögen und Beweglichkeit erfordert.

Mobilität und Migration

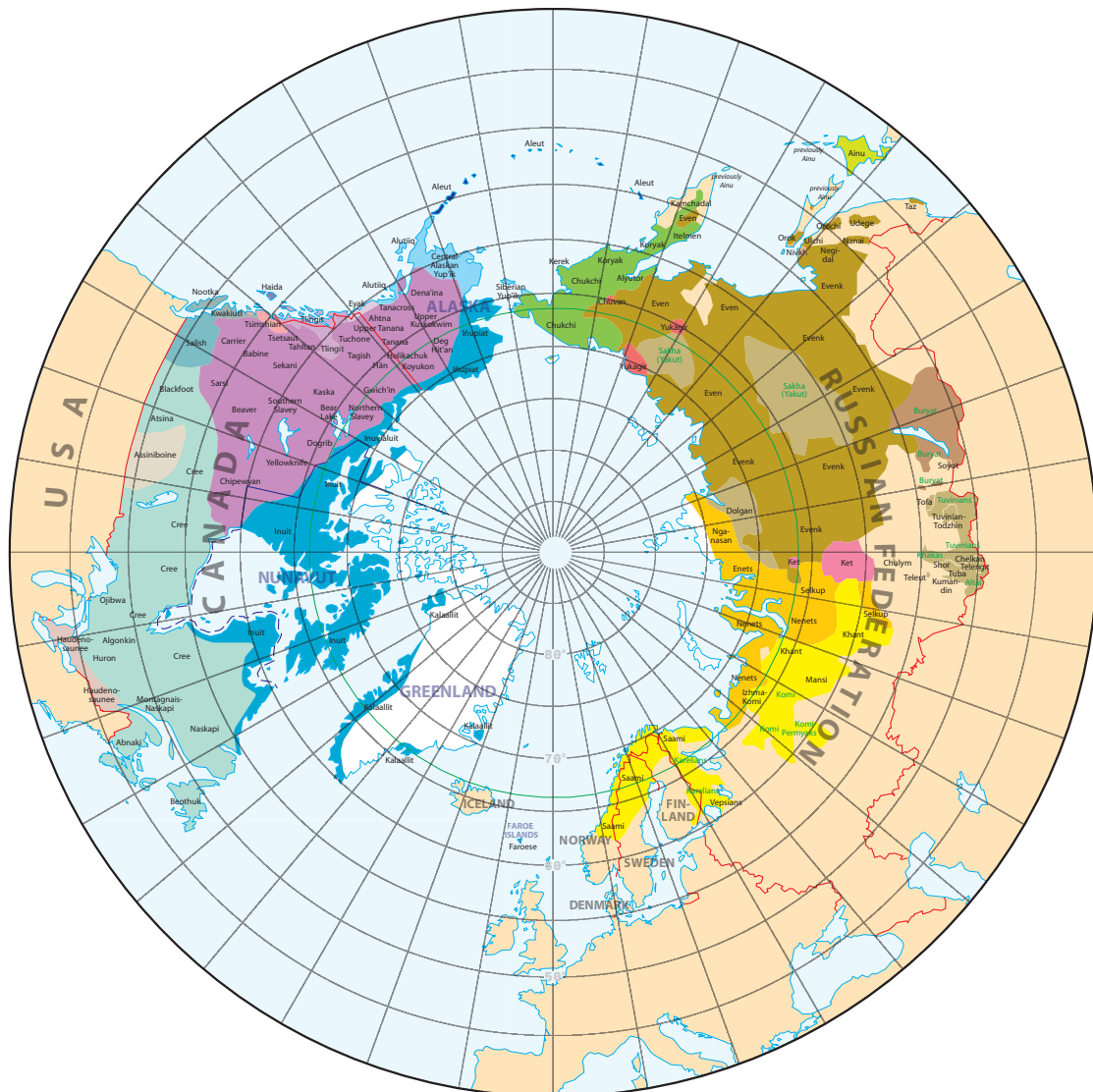
Wenngleich Mobilität und Flexibilität seit langem Kennzeichen des menschlichen Lebens in der Arktis sind, so stellen die derzeitigen und in naher Zukunft zu erwartenden Veränderungen die Bewohner der Region ebenso wie die Regierungen der Anrainerstaaten und die internationalen Organisationen vor völlig neue Herausforderungen – hinsichtlich der Versorgung und Einkommenssicherung, aber auch des Umweltschutzes, der Gesundheit und der Lebensqualität.

„Die Klimaerwärmung bewirkt [...] einen erheblichen Eingriff in die natürlichen Lebensgrundlagen und die Kultur der indigenen Bevölkerung. Ihre Rechte auf Selbstbestimmung und Freiheit in ihrem Lebensraum müssen gewahrt werden.“ (Leitlinien deutscher Arktispolitik, Auswärtiges Amt, September 2013)

Die Erschließung arktischer Ressourcen hat in den vergangenen Jahrhunderten mehrere Zuzugswellen von Personen aus südlicheren Regionen mit sich gebracht. In vielen Fällen haben die Siedler die angestammte (indigene) Bevölkerung verdrängt oder benachteiligt. Die daraus resultierenden sozialen Probleme sind in den letzten Jahrzehnten weltweit ins Bewusstsein der Öffentlichkeit gerückt. Mittlerweile ist die Erkenntnis gewachsen, dass die indigenen Gruppen nicht isoliert betrachtet werden können: In den Städten und auch den kleinen Siedlungen des Hohen Nordens leben viele Personen, die keinen indigenen Hintergrund haben. Für viele von ihnen ist das Leben in der Arktis ebenso zu einer Selbstverständlichkeit geworden wie für die indigenen Bewohner. Die „zugezogene“ und die indigene Bevölkerung haben sich in vielen Regionen längst vermischt, sind im Alltag aufeinander angewiesen und haben oft ähnliche Erwartungen und Lebensentwürfe. Nicht zuletzt das Interesse der „Neuankömmlinge“ an den traditionellen Lebensweisen in der Arktis hat zur verstärkten Präsenz indigener Kultur in den Medien und den örtlichen Institutionen geführt. Dabei sollte jedoch nicht übersehen werden, dass die Revitalisierung indigener Sprachen und Kulturen wegen jahrzehntelanger Stigmatisierung und Diskriminierung vor großen Problemen steht.



Abbildung IV.2.1: Spielplatz in Qornoq an der Westküste Grönlands. Quelle: J. Otto Habeck



Indigenous peoples of the Arctic countries

Subdivision according to language families

Na'Dene family	Eskimo-Aleut family
Athabaskan branch	Inuit group of Eskimo branch
Eyak branch	Yupik group of Eskimo branch
Tlingit branch	Aleut group
Haida branch	Uralic-Yukagiran family
Penutan family	Finno-Ugric branch
Macro-Algonkian family	Samodich branch
Algonkian branch	Yukagiran branch
Wakasha branch	Altaic family
Salish branch	Turkic branch
Macro-Sioux family	Mongolic branch
Sioux branch	Tunguso-Manchurian branch
Iroquois branch	Chukotko-Kamchatkan family
Indo-European family	Ket (isolated language)
Germanic branch	Nivkh (isolated language)
	Ainu (isolated language)

Notes:

For the USA, only peoples in the State of Alaska are shown. For the Russian Federation, only peoples of the North, Siberia and Far East are shown.

Majority populations of independent states are not shown, not even when they form minorities in adjacent countries (e.g. Finns in Norway).

Areas show colours according to the original languages of the respective indigenous peoples, even if they do not speak these languages today.

Overlapping populations are not shown. The map does not claim to show exact boundaries between the individual groups.

In the Russian Federation, indigenous peoples have a special status only when numbering less than 50,000. Names of larger indigenous peoples are written in green.

compiled by W.K. Dallmann
© Norwegian Polar Institute



Abbildung IV.2.2: Indigene Völker in den Ländern der Arktis. Quelle: W.K. Dallmann, Norwegisches Polarinstitut

Neue Verkehrswege und Erschließungsprojekte

Für die Gewässer, Inseln und Festlandregionen der Arktis sind eine Zunahme des Verkehrs und ein verstärkter Abbau von Rohstoffen zu erwarten. Ganzjährig befahrbare Gewässer ermöglichen neue Verbindungen, Orientierungen und Perspektiven. Die bisher als nachteilig empfundene „Randlage“ der Städte und Siedlungen an den Küsten des Arktischen Ozeans erhält eine andere Bedeutung, wenn sich die Verkehrsströme intensivieren. Technisches know-how und Effizienz bei der Planung und Umsetzung von Erschließungsprojekten sind von großer Bedeutung, aber der deutsche Beitrag zur Arktisforschung sollte sich nicht allein auf die Aspekte der Exploration und des Engineering beschränken, sondern auch die Möglichkeiten einer sinnvollen Einbettung von Großprojekten aufzeigen. Die größte Herausforderung besteht darin, Erschließungsprojekte umweltverträglich und zum langfristigen Nutzen der lokalen Bevölkerung zu gestalten, wobei deren Partizipation in der Planung und Umsetzung gewährleistet werden muss. Die Gemeinden in der Arktis sind nicht nur an ökonomischem Wachstum, sondern auch an der Stärkung des Gesundheitswesens und der örtlichen Bildungseinrichtungen interessiert. Viele Gemeinden sind mit dem Problem der Abwanderung konfrontiert. Vor allem gut ausgebildete Personen – Frauen häufiger als Männer – halten es aufgrund mangelnder beruflicher Perspektiven für notwendig, in größere Städte oder andere Regionen abzuwandern. Regionale Entwicklungsstrategien sollten darauf abzielen, die Attraktivität der nördlichen Gemeinden zu fördern, die Lebensqualität in ihnen zu verbessern und die kulturelle Kreativität der jeweiligen Region zu stärken. Gerade hieraus ergeben sich die Chancen neuer Erschließungsimpulse.

INFO BOX: Permafrost und indigene Landnutzung

Die Dynamik von Dauerfrostböden (Permafrost) ist bereits seit längerem ein zentrales Feld der Arktisforschung unter Beteiligung deutscher Wissenschaftler. Dieses Forschungsfeld wird aktuell erweitert, dabei werden die Sozialwissenschaften mit einbezogen. Das Auftauen von Permafrostböden stellt nicht allein die Siedlungen und Infrastruktur (Gebäude, Straßen, Bahnlinien, Pipelines) vor große Probleme, sondern auch die indigenen Bewohner des Hohen Nordens, die vielfach – wenngleich nicht ausschließlich – von der Rentierhaltung, Fischfang, Jagd und von anderen Formen der Landnutzung leben. Die indigenen Gemeinschaften haben sich auf das Leben in den nördlichen Regionen spezialisiert, aber teilweise auch selbst die natürliche Umwelt verändert und somit zur Gestalt der heutigen Landschaft beigetragen. Landnutzungsstrategien müssen modifiziert und angepasst werden, da sich im Falle des Auftauens des Permafrostbodens das Landschaftsbild gravierend und schnell verändern wird.



Abbildung IV.2.3: Rentierhaltung in der Region Jugra (Russland).
Quelle: Stephan Dudeck

Forschungsfelder

Aufgabe der Sozial- und Wirtschaftswissenschaften ist es, die demographischen und kulturellen Dynamiken sowohl großräumig als auch anhand von lokalen Fallstudien in verschiedenen Teilen der Arktis zu analysieren und die Planung und Umsetzung neuer Großprojekte aus der Sicht der unterschiedlichen Interessengruppen zu dokumentieren. Mit den Instrumentarien der Ethnologie und der Kulturwissenschaften können die divergierenden Interessen und Verhandlungsprozesse aus unmittelbarer Nähe beobachtet werden; mit den Ansätzen der Wissenschafts- und Techniksoziologie lassen sich die er-

kenntnistheoretischen Grundlagen und Verfahren beschreiben, die die Exploration und die Aneignung der „Ressourcenregion“ Arktis bestimmen. Beide Polarregionen – die Arktis und die Antarktis – besitzen eine besondere wissenschaftsgeschichtliche Bedeutung, deren Dokumentation erst an den Anfängen steht.

Medienwissenschaften untersuchen das sich wandelnde Image der Polarregionen und das wachsende mediale Interesse an den Lebensbedingungen der Bevölkerung in der Arktis. Aus politikwissenschaftlicher Sicht stellt sich die Aufgabe, die bisher dominierende koloniale Blickrichtung umzukehren und zu fragen, welche Erfahrungen und Impulse die Arktis (z.B. Grönland, Nunavut) für die Anerkennung indigener Repräsentanz oder auch die Regelung von Nutzungskonflikten in anderen Erdteilen vermitteln kann. Die führenden Institutionen der deutschen Polarforschung haben die Notwendigkeit erkannt, ihre Arbeit in der Arktis auf eine breitere Basis stellen und die Sozialwissenschaften mit einzu beziehen. Das in der Textbox vorgestellte Forschungsthema „Permafrost und indigene Landnutzung“ bietet ein Beispiel für eine solche Zusammenarbeit. Innerhalb der Sozial- und Geisteswissenschaften selbst besteht Bedarf, bisher fragmentierte Forschungsaktivitäten (u.a. im Bereich der Ethnologie, der Humangeographie und der Wissenschaftsgeschichte) zusammenzuführen und in koordinierter Weise auszubauen.

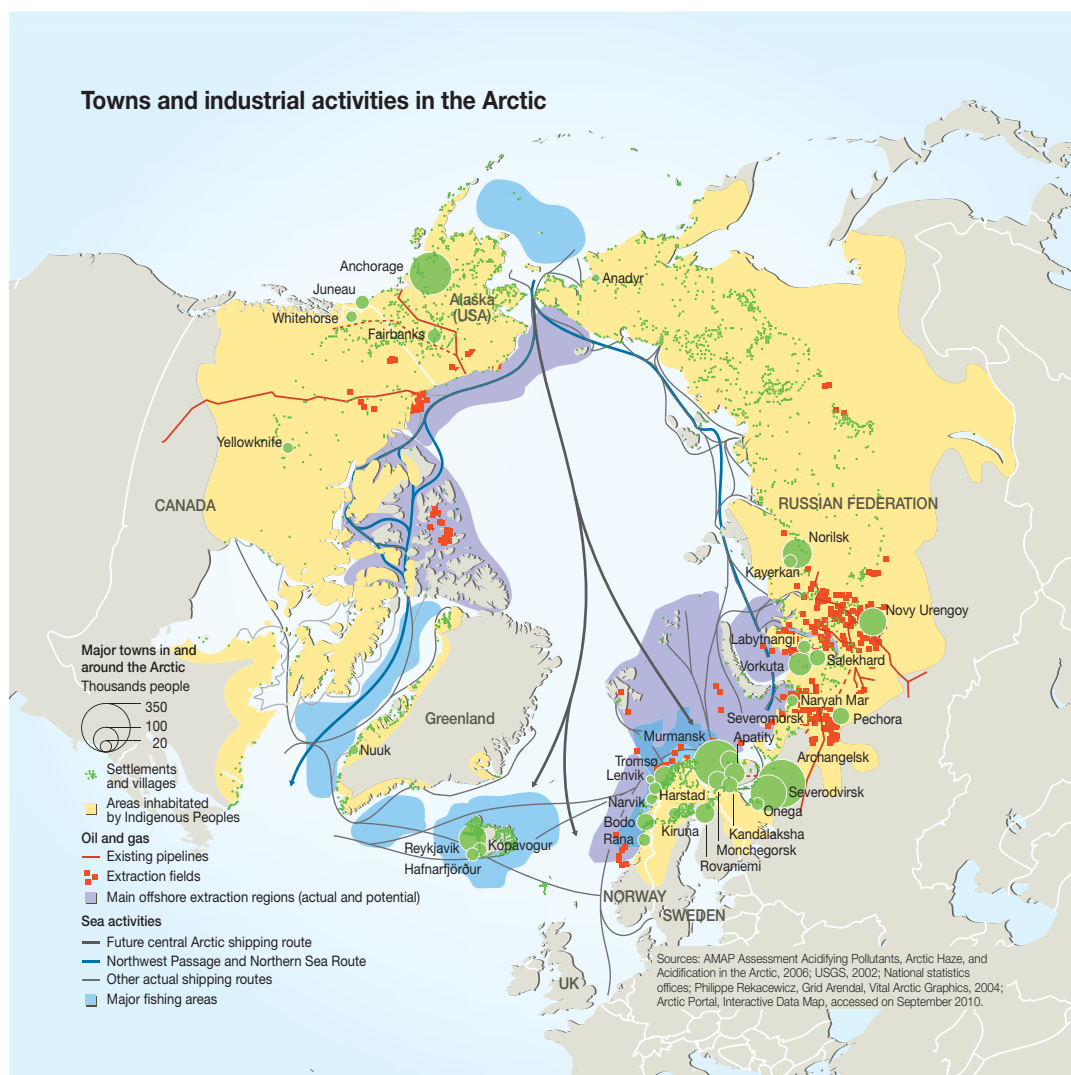


Abbildung IV.2.4: Städte und industrielle Nutzung in der Arktis. Quelle: UNEP/GRIDA, Arctic Monitoring and Assessment Programme

Forschungsaktivitäten in der Arktis und im Hohen Norden werden von den dortigen Gemeinden mit Interesse verfolgt; sie stoßen auch gelegentlich auf Kritik, nämlich immer dann, wenn die Positionen und Belange der Bewohner außer Acht gelassen werden. Forschungsprojekte sollten daher nicht allein auf Transdisziplinarität ausgerichtet sein, sondern auch so weit wie möglich auf die aktive Beteiligung der örtlichen Bevölkerung am Forschungsprozess abzielen, die aufbereiteten Daten den jeweiligen Gemeinden verfügbar machen und Diskussionen über die Schlussfolgerungen mit örtlichen Vertretern einplanen.

Offene Forschungsfragen

- 1. Welche Mechanismen und Institutionen sind geeignet, die Vielzahl der heutigen und künftig zu erwartenden Nutzungskonflikte – z.B. um nachwachsende und fossile Rohstoffe – zu schlichten?**
- 2. Wie können nationale und internationale juristische Regelungen der Ressourcennutzung mit lokalen Praktiken, die sehr stark auf gemeinschaftlicher Nutzung, auf Mobilität und flexiblen Absprachen beruhen, in Einklang gebracht werden?**
- 3. Wie kann die rechtliche, politische und (forschungs-) logistische Zusammenarbeit in der Antarktis und Arktis weiter gestärkt werden? Welche Strategien sind am besten geeignet, ein friedliches Zusammenleben und eine intakte Umwelt zu gewährleisten?**
- 4. Wie kann angesichts der rapiden Umweltveränderungen (u.a. Klimawandel, Schadstoffeintrag, neue epidemische Risiken) die Gesundheit der permanent oder zeitweilig in den Polarregionen lebenden Menschen verbessert werden?**
- 5. Wie können die Polarregionen an den Innovationen in den Bereichen Gesundheitswesen, Telekommunikation, Verkehr und Infrastruktur teilhaben?**
- 6. Wie kann die zunehmende touristische Anziehungskraft der Polargebiete die kulturelle Kreativität, regionale Identität und eine nachhaltige wirtschaftliche Entwicklung stärken, ohne dabei die empfindlichen Ökosysteme zu schädigen?**



- www.arctic-council.org
- www.iassa.org
- www.iasc.info/home/working-groups/socialahuman
- www.uarctic.org
- www.ipa.arcticportal.org/activities/action-groups.html
- www.dgv-zirkumpolar-sibirien.jimdo.com



IV.3. Völkerrecht

Die schnellen und weitreichenden Veränderungen in der Arktis und der Antarktis wirken sich nicht nur auf die natürliche Umwelt aus, sondern betreffen auch die völkerrechtlichen Regelungen, die sich dem Status, dem Schutz und der Nutzung dieser Räume widmen. Dabei unterscheiden sich Rechtsstatus und Schutz- bzw. Nutzungsregime von Arktis und Antarktis in erheblichem Maße.

IV.3.1 Rechtslage in der Antarktis

In der Antarktis spielt die faktische Nichtbeherrschbarkeit normativ nach wie vor eine Rolle. So ist streitig, ob die extreme Kälte und die lebensabweisende Eisbedeckung eine effektive Beherrschung des antarktischen Kontinents und damit auch den potentiellen Erwerb von Gebietshoheit bisher auszuschließen vermochten. Sieben Staaten (die sog. claimants: Argentinien, Australien, Chile, Frankreich, Großbritannien, Neuseeland und Norwegen) beanspruchen, ohne effektive Kontrolle auszuüben, Souveränität in Bezug auf große Teile des Kontinents. Sie haben Sektoren definiert, deren Spitze der Südpol und deren Basis der 60. Breitengrad ist. Teilweise überschneiden sich die Sektoren. Die anderen ebenfalls an den Antarktis-Vertrag von 1959 gebundenen Staaten (u.a. Deutschland) lehnen diese Hoheitsbehauptungen ab; sie qualifizieren den Kontinent als dauerhaft aneignungsunfähiges Nichtstaatsgebiet. Der Antarktis-Vertrag hält den Status quo in Bezug auf die gebietsrechtlichen Positionen der claimants einerseits und ihre Negierung durch die non-claimants andererseits aufrecht und untersagt zugleich das Erheben neuer oder erweiterter Gebietsansprüche. Antarktisbezogene Rechtsnormen werden dementsprechend so gestaltet, dass ihnen die Richtigkeit jeder der beiden entgegengesetzten Thesen (Vorliegen oder Nichtvorliegen von wirksamen Gebietsansprüchen) gleichermaßen zugrunde gelegt werden kann (sog. Bifokalismus). Gänzlich frei von Hoheitsbehauptungen ist nur der Sektor zwischen 90° und 150° westlicher Breite.

Unter „Antarktis“ sind im Einklang mit Art. VI des Antarktis-Vertrags alles Land und Meer sowie alle Eisschelfe südlich von 60° südlicher Breite zu verstehen. Dieser Raum ist „im Interesse der gesamten Menschheit“ vorwiegend der wissenschaftlichen Forschung vorbehalten. Der sich zunehmend ausdrückende Wandel des Systems in Richtung auf ein sowohl der Forschung als auch dem Umweltschutz gewidmetes Regime schlug sich 1991 im Madrider Umweltschutzprotokolls zum Antarktis-Vertrag nie-

der, zu dem bislang sechs Anlagen existieren. Nach ihm gilt insbesondere ein Bergbauverbot. Nach Art. 3 Abs. 2 des Umweltschutzprotokolls müssen Tätigkeiten auf der Grundlage von Informationen, die vorherige Prüfungen im Hinblick auf ihre Auswirkungen ermöglichen, und in einer Weise geplant und durchgeführt werden, dass nachteilige Auswirkungen auf die antarktische Umwelt begrenzt werden. In der deutschen Rechtsordnung wurden die Vorgaben des Umweltschutzprotokolls mit Ausführungsgesetz vom 22. September 1994 (AUG) konkretisiert und anwendbar gemacht. Mit Ausnahme von Forschungstätigkeiten, die weniger als geringfügige oder vorübergehende Auswirkungen auf die Umwelt haben (bloße Anzeigepflicht, vgl. § 6 Abs. 1 AUG), sieht dieses Gesetz ein Genehmigungserfordernis für alle von deutschen Staatsangehörigen bzw. unter deutscher Hoheitsgewalt durchgeführten Aktivitäten in der Antarktis vor (vgl. § 3 Abs. 1 AUG). Wird das Umweltbundesamt als in Deutschland zuständige Genehmigungsbehörde mit einem Vorhaben konfrontiert, dessen Auswirkungen auf die Umwelt wissenschaftlich unklar sind, darf es weder die Erteilung der Genehmigung umstandslos ablehnen noch – unter Hinweis auf die infolge Unkenntnis vermeintlich fehlende Besorgnis einer Umweltschädigung – erteilen. Vielmehr muss im Einzelfall geprüft werden, was angesichts des konkreten Unwissens zu veranlassen ist, um sowohl den Anforderungen des Vorsorgeprinzips als auch denen der Forschungsfreiheit angemessen Rechnung zu tragen. Im Detail stellt sich das Regime des AUG als überkomplex und z.T. in sich widersprüchlich dar.

Die auf dem Antarktis-Vertrag fußende, mittlerweile relativ detailliert ausgestaltete Rechtsordnung wird Antarktisches System genannt. Dieses schließt den Erlass von Empfehlungen und normkonkretisierenden Anlagen zum Umweltschutzprotokoll im Rahmen der alljährlichen Konsultativtagungen ein, mit denen Antarktis-Vertrag und Protokoll an neuen faktischen Herausforderungen ausgerichtet werden können. Daneben bestehen rechtlich selbständige, mit den übrigen antarktisbezogenen Normen freilich vielfach verschränkte multilaterale Verträge, etwa das Übereinkommen zum Schutz der antarktischen Robben von 1972 (CCAS) und das zur Erhaltung der lebenden Meeresschätze der Antarktis von 1980 (CCAMLR).

IV.3.2 Rechtslage in der Arktis

Im Unterschied zur Antarktis ist es in der Arktis bislang nicht zur Entwicklung gemeinsamer, spezifisch arktisbezogener Rechtsnormen, gar der gemeinsamen Wahrnehmung von Nutzungsrechten, gekommen. Erst seit wenigen Jahren versuchen die Anrainerstaaten, mit Umweltschutzkonferenzen und -Programmen, vor allem im Rahmen des Arktischen Rats, einzelne Probleme gemeinsam zu lösen. Normativ wird die Arktis daher primär von den Vorgaben des Seevölkerrechts, insbesondere den des Seerechtsübereinkommens der Vereinten Nationen von 1982 (UNCLOS), erfasst. Dies wirkt sich dahingehend aus, dass der arktische Raum in verschiedene Rechtszonen aufgeteilt ist. Während die küstennahen Gewässer (bis zu einer Entfernung von maximal 12 Seemeilen ab der Basislinie) zum Staatsgebiet der fünf arktischen Anrainerstaaten (Dänemark, Kanada, Norwegen, Russland und USA) zählen, verfügen die Küstenstaaten in den sich anschließenden Zonen (Ausschließliche Wirtschaftszone [AWZ] und Festlandsockel) lediglich über funktional begrenzte Hoheitsmacht, die sich nicht auf das Meeresgebiet selbst, sondern lediglich auf die dort vorhandenen Ressourcen bezieht. In der AWZ darf daher allein der jeweilige Küstenstaat künstliche Inseln und Anlagen wie etwa Ölbohrplattformen und Offshore-Windenergieanlagen errichten und nutzen oder Fischfang betreiben. Der Küstenstaat hat darüber hinaus Hoheitsbefugnisse in Bezug auf die wissenschaftliche Meeresforschung. Deshalb bedürfen Meeresforschungsaktivitäten fremder Staaten in der AWZ grundsätzlich der Zustimmung des Küstenstaates. Auch wenn es um den Meeresschutz geht, genießt der Küstenstaat in der AWZ bestimmte Hoheitsrechte, die für eisbedeckte Gebiete aus Gründen der Sicherheit des Schiffsverkehrs in erweitertem Umfang zur Anwendung gelangen.

Spezielle Vorgaben enthält das Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen (SRÜ) auch für den größtenteils unterhalb der AWZ verlaufenden Festlandsockel. Dieser ist wie die AWZ ein Hoheits-

raum, in dem nur der Küstenstaat die natürlichen Ressourcen erforschen und ausbeuten darf. Jeder Küstenstaat weltweit besitzt automatisch einen solchen Festlandsockel. Natürlich sind Festlandsockel je nach geologischen Gegebenheiten unterschiedlich breit. Ungeachtet dessen darf jeder Küstenstaat einen Festlandsockel von bis zu 200 Seemeilen Breite für sich proklamieren. Ist der Festlandsockel geologisch breiter, können noch größere Bereiche ausgewiesen werden. In rechtlicher Hinsicht verläuft die maximale Ausdehnung dann entweder in 350 Seemeilen Entfernung von der Basislinie, oder 100 Seemeilen seewärts der 2.500-Meter-Wassertiefenlinie.

Proklamiert ein Küstenstaat einen mehr als 200 Seemeilen breiten Festlandsockel, ist er in der Beweispflicht. Der Staat muss gegenüber der UN-Kommission zur Begrenzung des Festlandsockels (Commission on the Limits of the Continental Shelf, CLCS) belegen, dass es sich bei dem betreffenden unterseeischen Gebiet tatsächlich um eine natürliche Verlängerung seines Landgebiets handelt. Die Kommission prüft die vorgelegten geologischen und hydrographischen Daten und gibt schließlich eine Empfehlung ab. Die von einem Küstenstaat auf der Grundlage einer solchen Empfehlung festgelegten Außengrenzen des Festlandsockels sind endgültig und verbindlich. Allerdings ist sich die Staatengemeinschaft bis heute nicht einig, welche rechtlichen Konsequenzen die CLCS-Empfehlungen haben. Denn die Kommission ist kein Organ der Rechtskontrolle. So soll die CLCS-Prüfung lediglich sicherstellen, dass die Grenzziehung wissenschaftlichen Standards entspricht. In der Arktis ist vor allem die Frage, wie die Festlandsockel von Staaten mit gegenüberliegenden oder aneinander angrenzenden Küsten, hinsichtlich derer die CLCS über keine Zuständigkeit verfügt, abgegrenzt werden können, von Bedeutung. In Nordpolarmeer werden Bodenschätze vermutet, die vor dem Hintergrund der klimawandelbedingten Eisschmelze zunehmend erreichbar erscheinen, und die von den arktischen Anrainerstaaten beansprucht werden. Die Öffentlichkeit bekam davon erstmals einen Eindruck, als Russland am 1. August 2007 mit Hilfe bemannter Mini-U-Boote eine russische Flagge auf dem Meeresboden unter dem Nordpol hisste und das betreffende Gebiet damit symbolisch als russisches Staatsgebiet proklamierte. Der arktische Festlandsockel, vor allem an Russlands Nordküste, ist ungewöhnlich flach und breit. Es gibt markante, für den Verlauf der Außengrenze des Festlandsockels u.U. relevante unterseeische Gebirge, deren Einordnung als „ozeanische Bergrücken“ (Art. 76 Abs. 3 UNCLOS), „unterseeische Bergrücken“ (Art. 76 Abs. 6 UNCLOS) oder „unterseeische Erhebungen“ (Art. 76 Abs. 6 UNCLOS) jeweils umstritten ist. Noch ist unklar, inwieweit die arktischen Gebiete zum Festlandsockel der benachbarten Küstenstaaten gehören. Sollte dies der Fall sein, könnten die dort vermuteten Ressourcen gemäß UNCLOS exklusiv von dem arktischen Staat ausgebeutet werden, auf dessen Festlandsockel sie sich befinden. Sie fielen damit nicht unter die Regelungen zum gemeinsamen Erbe der Menschheit, die von der Internationalen Meeresbodenbehörde verwaltet werden. Derzeit versuchen die arktischen Staaten zu belegen, dass sich ihr Festlandsockel geologisch über mehr als 200 Seemeilen hinaus in den arktischen Ozean erstreckt. Auch in diesem Fall verliefte die maximale Außengrenze – wie oben beschrieben – alternativ bei 350 Seemeilen oder 100 Seemeilen seewärts der 2.500-Meter-Wassertiefenlinie. Die – zulässige – Kombination beider Methoden böte in der Arktis insbesondere Russland die Chance auf die größtmögliche Ausdehnung der Festlandsockel. Nur zwei vergleichsweise kleine Flächen könnten von gar keinem Anrainerstaat beansprucht werden: Der einen fehlt als so genanntem ozeanischen Bergrücken (oceanic ridge) eine „natürliche“ Verbindung mit den Festlandrändern (Gakkel-Rücken), die zweite scheidet wegen des Verlaufs der 2.500-Meter-Wassertiefenlinie aus. In der Ilulissat-Erklärung von 2008 bekannten sich die fünf zentralen Anrainerstaaten dazu, alle etwaigen künftigen gebiets- und nutzungspolitischen Konflikte friedlich und auf der Grundlage des internationalen Seerechts zu lösen.

Noch nicht beantwortet ist auch die Frage, inwieweit der Mensch in das marine Ökosystem eingreifen darf, um die Auswirkungen des Klimawandels abzufedern, und wie die Auswirkungen von Klimawandel und sich intensivierender Nutzung auf die im Gebiet der Arktis lebenden und arbeitenden Menschen, insbesondere die Angehörigen indigener Gemeinschaften, und die dort vorhandenen Ökosysteme normativ bewältigt werden können. Dies schließt sowohl traditionelle Nutzungsformen wie

die Fischerei und die wissenschaftliche Forschung in der Arktis als auch potentielle neue Nutzungen wie die Bewirtschaftung von Methanhydratvorkommen und die Eröffnung neuer arktischer Schifffahrtsrouten mit ein. Im Unterschied zur Situation in der Antarktis fehlt es bislang an einem spezifisch der Erhaltung der arktischen Umwelt gewidmeten Vertrag. Ob ein solcher Vertrag erforderlich ist, und wie er ggf. ausgestaltet werden könnte, kann nicht allein aus rechtswissenschaftlicher Perspektive beurteilt werden. Gleiches gilt für die künftige und durchaus nicht einheitlich beurteilte Rolle des Arktischen Rates sowie die Anpassung und Fortentwicklung von Instrumenten der Internationalen Seeschifffahrtsorganisation.

IV.3.3 Forschungsfelder

Sowohl im deutschen Kontext als auch auf Ebene der Europäischen Union hat sich inzwischen die Einsicht durchgesetzt, dass Polarforschung auch die Perspektive der Rechtswissenschaft einbeziehen sollte. Gemeinsam mit den Anrainerstaaten der Arktis hat das Auswärtige Amt in den vergangenen Jahren mehrere Konferenzen und Workshops durchgeführt und Leitlinien deutscher Arktispolitik verabschiedet (abrufbar unter www.bme1.de), in deren Rahmen dem Völkerrecht breite Aufmerksamkeit geschenkt wird. Vom rechtswissenschaftlichen Standpunkt erweist sich dabei vor allem die Aufgabe, bestehende Regelungslücken im Hinblick auf die Arktis effektiv zu schließen (vgl. ebd., S. 20), als zentral. Hinzu tritt die Frage nach dem Beitrag des Völkerrechts zur friedlichen Beilegung der Grenzstreitigkeiten in der Arktis und zur Gewährleistung einer nachhaltigen, die Belange der indigenen Gemeinschaften und der arktischen Ökosysteme in den Vordergrund rückenden Entwicklung des arktischen Raums, jeweils unter Berücksichtigung des legitimen Interesses an einer wirtschaftlichen Nutzung des Nordpolarraums. Auch die EU hat eine Arktis-Strategie angenommen (abrufbar unter ec.europa.eu), die nicht nur die hohe Relevanz der Polarforschung unterstreicht, sondern der Bedeutung der Wahrung und Fortentwicklung des Rechts zur nachhaltigen Entwicklung des arktischen Raums maßgebliches Gewicht beimisst.

Mit Blick auf die Antarktis steht vor allem in Rede, auf welche Weise der Charakter des Kontinents und seiner Randmeere als Staatengemeinschaftsraum langfristig, zumal unter Berücksichtigung steigender touristischer Aktivitäten, abgesichert werden kann, und wie etwaige Kollisionen von wissenschaftlicher Forschung einerseits und Umweltschutz andererseits vermieden bzw. gelöst werden können.

Offene Forschungsfragen

- 1. Welche Mechanismen, Instrumente und Institutionen sind geeignet, die Vielzahl der heutigen und künftig zu erwartenden Nutzungskonflikte – z.B. um nachwachsende und fossile Rohstoffe – zu schlichten?**
- 2. Wie lässt sich das Erfordernis einer nachhaltigen, den Interessen der Arktisbewohner in besonderem Maße Rechnung tragenden Entwicklung normativ unterstützen?**

WEB

- www.arctic-council.org
- www.ats.aq/e/ats.htm
- eeas.europa.eu/arctic-policy
- www.umweltbundesamt.de/.../antarktis
- www.un.org/depts/los



IV.4. Historische und Archäologische Forschung

Das Verständnis der Geschichte der Erforschung und Nutzung der Polargebiete trägt unmittelbar dazu bei, das sich im Laufe der Zeit wandelnde Verhältnis von Mensch und Natur in den Polargebieten nicht nur zu verstehen, sondern darüber hinaus aus der Geschichte sowohl neue Ansätze für die Polarforschung zu entwickeln, wie auch Erkenntnisse und Messergebnisse früherer Expeditionen so aufzubereiten, dass sie von der heutigen Forschung genutzt werden können. Darüber hinaus trägt die historische und archäologische Forschung dazu bei, individuelle und gesellschaftliche Motive für die Beteiligung an der Polarforschung zu verstehen und nicht zuletzt, den dauerhaften Erhalt von Denkmalen und historischen Stätten in Arktis und Antarktis abzusichern.

IN KÜRZE

Polargeschichte und –archäologie erforschen die Geschichte menschlicher Aktivität im Bereich der polaren Gebiete. Unabhängig ob vor Ort oder in Archiven und Sammlungen durchgeführt, helfen sie zu verstehen, warum Menschen polare Gebiete erforscht und erschlossen haben und welchen Einschränkungen sie hierbei durch Gesellschaft, Politik, Kultur und zur Verfügung stehender Technologie unterworfen waren. Darüber hinaus hilft sie, historische Messreihen so auszuwerten, dass sie für die gegenwärtige Polar- und Klimaforschung genutzt werden können

IV.4.1 Nachlässe von Polarforschern

Nicht alle Erlebnisse auf Expeditionen wurden detailliert in Reise- und Arbeitsberichten veröffentlicht, so dass die Publikationen nie einen objektiven Blick in die Vergangenheit zulassen. Briefwechsel, Tagebücher, Manuskripte und Fotos geben einen persönlichen Einblick und helfen, die Hintergründe von Ereignissen und Entscheidungen genauer darzustellen und zu verstehen. Insbesondere für wissenschaftshistorische, soziologische und psychologische Aspekte sind diese Quellen unerlässlich.

Polarforschernachlässe ermöglichen einen detaillierten Einblick in historische Expeditionen, so dass diese Quellen als bedeutendes Kulturgut aufgespürt und erhalten werden müssen.

In den kommenden Jahren müssen Nachlässe von Polarforschern, nicht nur von Expeditionsleitern und Wissenschaftlern sondern auch von weiteren Expeditionsteilnehmern gezielt gesucht werden, um diese meist noch völlig unausgewerteten Quellen der Nachwelt zugänglich zu machen und zu erhalten. Dafür bietet es sich an, diese Nachlässe in bestehende Archive wie dem Archiv für Geographie am Institut für Länderkunde in Leipzig oder dem Archiv für deutsche Polarforschung am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven einzugliedern, um dadurch eine umfassende Bewertung der früheren Polarforschung aus verschiedenen authentischen Blickwinkeln zu ermöglichen.

IV.4.2 Lebens und Arbeitsbedingungen

Die jeweiligen Lebens und Arbeitsbedingungen während polarer Expeditionen haben in erheblichem Umfang die wissenschaftlichen Ergebnisse der jeweiligen Unternehmung beeinflusst. Im Unterschied zu den Forschungsthemen einer wissenschaftsgeschichtlichen Polargeschichte sind die Themen einer sozial- und alltagsgeschichtlichen Betrachtung der Geschichte der deutschen Aktivitäten in den Polargebieten noch immer weitgehendes Neuland und zwar sowohl im Bereich der Geschichte der Erforschung dieser Regionen, als auch ihrer ökonomischen Nutzung.

Gute Lebens- und Arbeitsbedingungen während polarer Expeditionen waren und sind von entscheidender Bedeutung für den wissenschaftlichen Erfolg der jeweiligen Unternehmung.

Eine international komparative Analyse der Genese der Lebens- und Arbeitsbedingungen im Kontext von Forschung und ökonomischer Nutzung polarer Gebiete kann nicht nur helfen, die Herkunft gegenwärtiger struktureller und sozialer Unterschiede zwischen an der Polarforschung beteiligten Nationen zu verstehen, sondern vor allem dazu beitragen die kulturellen Herausforderungen erfolgreich zu bewältigen, die sich aus einer stetigen Vergrößerung der Anzahl der in den Polargebieten aktiven Nationen ergeben und zwar insbesondere angesichts der zunehmenden Aktivitäten von nicht-traditionell an der Erforschung und Erschließung der Polargebiete beteiligten Nationen.

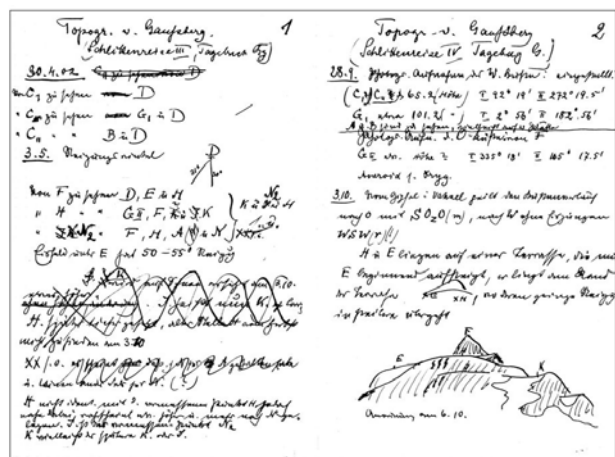


Abbildung IV.4.1: Hans Gazerts Aufzeichnungen zur Topographie des Gaußberges (Kaiser-Wilhelm II-Land, Antarktis) von der 3. und 4. Schlittenreise im Jahr 1902 liefern Metadaten zur Konstruktion der Karte des Gaußberges. © Gazert-Nachlass, Partenkirchen.

IV.4.3 Historische Wasserfahrzeuge

Die Erforschung und Erschließung der polaren Regionen ist seit je her unmittelbar auf die Nutzung zu meist hochspezialisierter Wasserfahrzeuge angewiesen. Anders als die im Laufe der verschiedenen Expeditionen errichteten baulichen Anlagen, sind die historischen Wasserfahrzeuge der Polarforschung bislang kaum Gegenstand der deutschen polarhistorischen Forschung oder Archäologie gewesen. Eine

systematische Erforschung dieser historischen Wasserfahrzeuge und zwar insbesondere auch der vergleichsweise kleinen Boote kann nicht nur entscheidend dazu beitragen, die Entstehungsbedingungen historischer Messdaten zu verstehen und für die moderne Forschung im Rahmen von langen Zeitreihen zugänglich zu machen, sondern ebenfalls dazu beitragen, die bislang nur selten im Rahmen der Forschung betrachteten Lebens- und Arbeitsbedingungen ordinärer Besatzungs- und Expeditionsmitglieder zu verstehen. Erkenntnisse über die Genese dieser Lebens- und Arbeitsbedingungen sind ihrerseits wiederum ebenso für die Entwicklung künftiger Polarforschungsschiffe relevant, wie auch für die Entwicklung von Forschungsfahrzeugen zur Erschließung anderer Räume.



Abbildung IV.4.2: Links: Rekonstruierte Alltagssituationen, wie hier im Museum Port Lockroy, lassen oft nur noch geringe und erkenntnistheoretisch problematische Rückschlüsse auf den tatsächlichen historischen Alltag zu. © Ingo Heidbrink. Rechts: Überreste eines Bootes auf Halfmoon Island (Süd-Shetland Inseln) © Ingo Heidbrink

Forschungsschiffe und kleinere Wasserfahrzeuge waren seit Beginn der Polarforschung zentrale Arbeitsgeräte, ohne die eine Erforschung der Arktis und Antarktis nicht denkbar gewesen wäre.

Trotz der unumstrittenen Relevanz von Wasserfahrzeugen und zumindest einer gewissen Zahl erhaltener Objekte befindet sich bis heute nicht ein Wasserfahrzeug auf der Liste der "Historic Sites and Monuments in Antarctica". Eine Erstellung eines Katasters der noch existierenden Fahrzeuge bzw. Überreste von diesen im Kontext der Arbeit des "International Polar Heritage Committee" wäre ein entscheidender Schritt diese Situation langfristig zu verändern und einen adäquaten Schutz dieser Relikte mit zentraler Bedeutung für die Geschichte der Erforschung der Polargebiete dauerhaft sicher zu stellen.

INFO BOX: Vermittlung

Da der weitaus größte Teil der Bevölkerung nie die Gelegenheit haben wird, Arktis oder Antarktis unmittelbar zu erleben, kommt der historischen Forschung und archäologischen Arbeit die Aufgabe zu, die polaren Gebiete und ihre Geschichte zumindest indirekt zugänglich zu machen und ein breites öffentliches Interesse an diesen Regionen zu wecken. Dafür stehen u.a. zur Verfügung:

- Populärwissenschaftliche Bücher und Nachdrucke von Expeditionsberichten
- Ausstellungen in Museen
- Berichte in populärwissenschaftlichen Zeitschriften
- Öffentliche Vorträge und Symposien
- Fachlektorate an Bord von Kreuzfahrern

All diesen Maßnahmen ist gemein, dass sie die Ergebnisse der polarhistorischen Forschung nutzen, um ein breites öffentliches Bewusstsein für die polaren Regionen und insbesondere für die Relevanz der Polargebiete im Kontext gegenwärtiger und künftiger gesellschaftlicher und ökonomischer Entwicklungen und Herausforderungen zu schaffen.



- www.antarctica-ssag.org
- www.awi.de/.../archiv-fuer-deutsche-polarforschung.html
- www.ifl-leipzig.de/de/archiv.html
- www.polarheritage.com



Umsetzung

V.1	Infrastruktur und Technologien	133
V.1.1	Infrastruktur	
V.1.2	Technologien	
V.2	Integration in nat. und int. Forschungsprogramme	139
V.2.1	SCAR/IASC	
V.2.2	European Polar Board	
V.3	Nachwuchsförderung	141
V.3.1	DFG-Schwerpunktprogramm „Antarktisforschung“	
V.3.2	Russisch-Deutscher Masterstudiengang - POMOR	
V.3.3	APECS	
V.4	Wissenstransfer in die Gesellschaft	143



V.1. Infrastruktur und Technologien

Die zukünftigen und aktuellen Forschungsfragen erfordern ein langfristiges Engagement der deutschen Forschung in den Polargebieten. Die international anerkannten Forschungsleistungen von deutschen Forschern und Forscherinnen müssen auch in Zukunft gewährleistet werden. Dazu gehört die langfristige Bereitstellung von Forschungsinfrastrukturen, aber auch die Drittmittelförderung von Projekten im Rahmen von EU-, BMBF- und DFG-Projekten. Neben der institutionellen Forschung muss der Beitrag der Universitäten verstärkt werden. Insbesondere muss der Zugang zur deutschen Infrastruktur zur Polarforschung (v.a. Schiffe, Flugzeuge, Stationen, Rechnerinfrastruktur) für Universitäten gewährleistet werden. Die Fortführung von Langzeitbeobachtungen an Observatorien wie den Stationen Neumayer (Antarktis) und AWIPEV (Spitzbergen) wird weiterhin ein wichtiger Beitrag im Rahmen internationaler Netzwerke sein.

V.1.1 Infrastruktur

Die deutsche Polarforschung hat in den letzten Dekaden ein beachtliches internationales Ansehen und Gewicht gewonnen. Als eine der wenigen polaren Forschungseinrichtungen weltweit entwickelte das AWI ein wissenschaftliches Forschungsprofil mit einem bipolaren Ansatz. Dafür wurde die in Abschnitt 1.2 beschriebene Infrastruktur entwickelt und ständig den wissenschaftlichen Anforderungen angepasst. Dazu gehören natürlich auch die technischen Verbesserungen für die Kommunikation (Satelliten), für die IT-Ausrüstungen und ein zentrales Logistikmanagement am AWI für Planung, Organisation und Durchführung der Expeditionen und Stationsbetriebes. Der Bau der Neumayer-Station III, das bislang aufwändigste technisch/logistische Vorhaben in der Geschichte der deutschen Antarktisforschung, und die Indienststellung der neuen Forschungsflugzeuge Polar 5 und Polar 6 waren in den vergangenen 10 Jahren große Investitionen in die vom AWI vorgehaltene Infrastruktur. Für die zukünftigen wissenschaftlichen und logistischen Herausforderungen ist die deutsche Polarforschung gut aufgestellt und wird sich in der kommenden Dekade mit substantziellen Beiträgen an internationalen Großprojekten in den Polarregionen beteiligen können.

Polarforschungsschiff des AWI

Eine noch größere Herausforderung wird in den kommenden Jahren die Nachfolge des inzwischen in die Jahre gekommenen Forschungseisbrecher Polarstern sein. Nach positiver Begutachtung durch den Wissenschaftsrat und entsprechenden planerischen Vorarbeiten und hat das BMBF den Nachfolgebau des Polarforschungs- und Versorgungsschiffs *Polarstern* im Januar 2016 ausgeschrieben. Den Planungen zugrunde liegt das Leistungsspektrum der Polarstern als eisbrechendes Forschungs- und Versorgungsschiff angepasst an die modernen technischen Möglichkeiten. Polarstern II wird für eine Lebensdauer von 30 Jahren ausgelegt sein und voraussichtlich 2021 für die wissenschaftlichen und Versorgungsaufgaben zur Verfügung stehen und wie Polarstern vom AWI betrieben werden. Damit steht dann auch für die weitere Zukunft eine exzellente Forschungsplattform für die deutsche und internationale Antarktisforschung zur Verfügung.

Polarstationen des AWI

Die arktischen und antarktischen Stationen werden auch in Zukunft für die Fortsetzung der Observatoriumsprogramme und für neue wissenschaftliche Projekte in vollem Umfang zur Verfügung stehen.

Antarktis: Die Neumayer-Station III ist seit Februar 2009 in Betrieb. Sie ist das antarktische Zentrum der deutschen Polarforschung. Sie gehört mit ihrer technischen und wissenschaftlichen Ausstattung mit zu den modernsten Forschungsstationen in der Antarktis. Das neue technische Konzept, insbesondere das hydraulische Tragwerk, hat sich in vollem Umfang bewährt, und die Station wird sicherlich die angestrebte Betriebsdauer von ca. 30 Jahren erreichen. Nach 2020 müssen jedoch die stark beanspruchten betriebstechnischen Anlagen erneuert und die Energieversorgung modernisiert werden. Neumayer ist nicht nur eine wichtige Forschungsplattform, sondern dient auch als logistische Basis für Inlandtraversonen mit den Polarfahrzeugen und Flugmissionen. Für diesen Zweck wird auch die Kohnen-Station als Sommerbasis weiterhin vorgehalten, bei der die Erneuerung der technischen Anlagen ansteht. Das Dallmann-Labor an der argentinischen Station Carlini wird wie bisher weiter im Rahmen der deutsch-argentinischen Zusammenarbeit genutzt, und das AWI wird die Forschungsmöglichkeiten durch ein Aquarium-Labor ergänzen.

Arktis: Die langjährige wissenschaftliche und technische Zusammenarbeit mit Frankreich an der AWIPEV-Station und mit Russland an der Samoylov-Station wird fortgesetzt.

Forschungsflugzeuge des AWI

Die Forschungsflugzeuge des AWI Polar 5 und Polar 6 werden auch in den kommenden Jahren in der Arktis und in der Antarktis für international koordinierte oder eigenständige nationale Programme eingesetzt. Die flugtechnische Ausstattung der beiden Maschinen bedarf keiner grundsätzlichen Ergänzungen. Schwerpunkt wird die Erneuerung bzw. Verbesserung der wissenschaftlichen Ausrüstungen an Bord für fernerkundende und in-situ Messtechnik sein. Die Flugmissionen in der Arktis werden so wie bisher mit den zuständigen nationalen Behörden in den Arktis-Anrainerstaaten abgestimmt. In der Antarktis wird der flugtechnische Einsatz der Flugzeuge im Rahmen der Dromlan-Zusammenarbeit koordiniert (siehe I.2.1 und I.3.2).

Satellitendatenempfangsstation des DLR

Die German Antarctic Receiving Station GARS O'Higgins des DLR ist seit 1991 in Betrieb. Stand zu Beginn des Datenempfangs die europäischen Missionen ERS-1 und ERS-2 im Vordergrund, wird die Station seit dem Start der TanDEM-X Mission im Jahr 2010 ganzjährig mit einem erweiterten Nutzungsportfolio betrieben. Das 9-m-Antennensystem dient nunmehr dem Empfang von Satellitendaten verschiedener deutscher und europäischer Satellitenmissionen und wird darüber hinaus auch zur Unterstützung im Bereich des Telemetrie, Tracking und Control (TT&C) sowie zur Unterstützung in der Launch and Early Orbit Phase (LEOP) verschiedener Satelliten für das Deutsche Raumfahrtkontrollzentrum eingesetzt.

Nach wie vor liegt der Schwerpunkt der Datenerhebung bei Satellitendaten über der Antarktis. Mit demselben 9-m-Antennensystem führt das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) Messungen nach dem Prinzip der Very Long Baseline Interferometry (VLBI) durch und erhebt damit Daten zur Bestimmung der Kontinentaldrift, Erdrotation und anderen geodätischen Parametern. GARS O'Higgins ist somit auch Teil des International VLBI Services (IVS).

Antarktisstationen der BGR

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) betreibt seit Anfang der 1980er Jahre zwei Landstationen im Nord-Viktoria-Land der Antarktis, die Gondwana-Station und die kleinere Lillie-Marleen-Hütte. Beide dienen der BGR als Basis für ihre geowissenschaftlichen Forschungsarbeiten und wurden mehrfach im Rahmen des GANOVEX-Programms (German Antarctic North Victoria Land Expedition) genutzt. Die Gondwana-Station befindet sich bei 74°38'S und 164°13'O am Gerlache Inlet der Terra Nova Bucht des Rossmeeres in Nachbarschaft zur Mario-Zucchelli-Station (Italien) und Jang-Bogo-Station (Südkorea). Sie wurde 1982/83 als Schutzhütte erbaut und 1988/89 zu einem Mehrcontainerbau erweitert. Das Hauptgebäude enthält u.a. Werkstatt und Lager, Küche, Vorratsraum, Kantine, Funkstation, Aufenthalts- und Arbeitsräume und sanitäre Anlagen. In den Saisons 2015/16 und 2016/17 wurden umfangreiche Renovierungs- und Modernisierungsarbeiten durchgeführt. Mit neuer Haustechnik, verbesserten sanitären Einrichtungen, Solarpanelen, einer neuen Seewasser-Aufbereitungsanlage und einer biologischen Abwasserreinigung ist die Gondwana-Station nun umwelttechnisch und energetisch auf dem neusten Stand und kann so für mindestens weitere 25 Jahre als Forschungs- und Logistikbasis genutzt werden. Die Lillie-Marleen Hütte liegt bei 71°12'S und 164°31'O in der Everett Range des Transantarktischen Gebirges. Ihr Name ist eine Kombination aus dem nahe gelegenen Lillie-Gletscher und dem Lied „Lili Marleen“. Sie besteht aus einer kälteisolierten Biwakschachtel aus Fiberglaselementen, welche zur Verhinderung von Schneeakkumulation auf einem Stahlrahmen fixiert ist. Sie wurde während GANOVEX I (1979/80) erbaut, diente in der Folge bei acht Expeditionen als Basis, Funkstation und Depot und ist auch weiterhin als Unterkunft bei Feldeinsätzen geeignet.

Logistik des Zugangs in die Polarregionen – Mobilität in den Polarregionen

In der Arktis werden der Zugang und die Versorgung der Stationen mit den Kooperationspartnern Frankreich bzw. Russland organisiert. Der gemeinsame wissenschaftliche Betrieb des Dallmann-Labors in der Antarktis ist Teil der Zusammenarbeit mit Argentinien. In der Antarktis haben sich die Zugangsmöglichkeiten zur Neumayer-Station III und zur Kohnen-Station mit dem international kooperativen Projekt Dronning Maud Land Air Network (Dromlan) seit mehr als 15 Jahren grundsätzlich verändert. Seitdem gelangen das gesamte Personal sowie wichtige wissenschaftliche und technische Ausrüstungen für die Neumayer Station III und Kohnen-Station über diese Luftbrücke von Kapstadt zu beiden Stationen und zurück (vgl. Kap. I.3.2). Treibstoffe, Verpflegung und schwerer Ausrüstung/Material, etwa 500 t in jedem Jahr, werden weiterhin auf dem Seeweg mit FS Polarstern befördert, an der Schelfeiskante des Ekström-Schelfeises umgeschlagen und auf Lastschlitten zur etwa 21 km weiter südlich gelegenen Neumayer-Station III transportiert.

V.1.2 Technologien

Die zukünftige Forschung basiert auf den vorhandenen Strukturen und Methoden, es werden aber auch neue, innovative Technologien zur Erforschung der Arktis und Antarktis benötigt. Zum Beispiel werden bei der Erforschung biologischer und ozeanographischer Prozesse in den Polargebieten neue, modernere Untersuchungsmethoden, wie der Einsatz selbststeuernder Unterwasserfahrzeuge (AUV), zukünftig eine große Rolle spielen. Bei der technologisch anspruchsvollen Entwicklung und Integration entsprechender Sensoren für biologische Parameter werden Wissenschaftler eng mit Ingenieuren und

Technikern zusammenarbeiten. Eine ähnliche Entwicklung zeichnet sich im Bereich der Atmosphärenmessungen ab. Auch hier können z.B. mit autonomen Flugzeugen (Drohnen) Messdaten in Regionen gewonnen werden, die mit anderen Messplattformen nicht zugänglich sind.

INFO BOX: Innovative Technologien zur Polarforschung

- Polar angepasste maritime Technologie, autonome Unterwasserfahrzeuge
- Autonome Messplattformen für die Erforschung der Atmosphäre
- Neue synergetische Methoden zur Verknüpfung von Feldmessungen, Fernerkundung und Modellierung
- Neue Methoden der Fernerkundung der Kryosphäre mit Multisensor-Untersuchungen (Flugzeuge, Satelliten)
- Komplexe, gekoppelte Modelle für die Berechnung und Vorhersage von Klima, Eisdynamik und Meeresspiegelanstieg und entsprechende hohe Rechnerkapazitäten
- Langfristige multidisziplinäre Datenbanken mit Qualitätskontrolle von Datenprodukten und Ergebnissen
- Astrobiologische Planeten-analoge Feldforschung
- Erweiterung des Netzes von Langzeitbeobachtungen

Langzeitbeobachtungen und Messprogramme

Ein wichtiger wissenschaftlicher Beitrag zu derzeit (und zukünftig) drängenden globalen Fragen sind Langzeitbeobachtungen in den Polarregionen und die Organisation der entsprechenden Verfügbarkeit derartig erhobener Daten in internationalen Datenbanken. Solche Langzeitmessungen dienen vorwiegend wissenschaftlich-operationellen, aber auch politischen Zielsetzungen.

Die Bundesrepublik Deutschland hat das Atomwaffen-Teststopp-Abkommen unterzeichnet und ist in diesem Zusammenhang mit dem Betrieb von zwei (Überwachungs-) Monitoring-Stationen im Rahmen eines globalen Netzwerkes verpflichtet. Eine Station befindet sich auf deutschem Territorium, die zweite an der Neumayer-Station III. Der Betrieb dieser Stationen ist völkerrechtlich verbindlich und ohne zeitliche Begrenzung durchzuführen. Im Rahmen der deutschen Polarforschung führt das AWI seit mehr als 30 Jahren Langzeitbeobachtungen von geophysikalischen und meteorologischen Größen an den Stationen Neumayer (Antarktis) und AWIPEV (Svalbard) durch. Dies erfordert einen ständigen, hohen Aufwand (Personal, Investitionen) für die messtechnische und personelle Ausstattung. Neben kontinuierlichen Langzeitbeobachtungen sind auf spezielle Themen fokussierte Messprogramme notwendig, z.B. als Feldkampagnen einzelner Projekte, mittelfristige Programme von Polarforschungsinstituten und große koordinierte internationale Programme (wie z.B. das Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate, MOSAiC). Im Rahmen der deutschen Polarforschung führt das AWI seit mehr als 30 Jahren Langzeitbeobachtungen von geophysikalischen und meteorologischen Größen an den Stationen Neumayer (Antarktis) und AWIPEV (Svalbard) durch. Seit 20 Jahren werden in der tiefen Framstrasse ozeanographische Messketten ausgebracht und ökologische Daten am LTER Hausgarten erhoben.

Neue Methoden der Umweltbeobachtung im eisbedeckten Ozean - Beispiel FRAM

Das modulare Arktis-Observatorium FRAM (FRontiers in Arctic Marine Monitoring) umfasst zukunftsweisende, modular verteilte Technologie-Infrastruktur, die seit 2014 vom AWI zur ganzjährigen Beobachtung des Arktischen Ozeans errichtet wird. Eisbojen, stationäre Verankerungen und mobile Messplattformen (z.B. AUV, ROV, Tiefseelander und -Crawler) ermöglichen ganzjährige synchrone Beobachtungen der physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse auf dem Eis, unter dem Eis, in der

Wassersäule und am Meeresboden. Die gewonnenen Daten werden mit schiffsbasierten und satellitengestützten Datenerhebungen abgeglichen. FRAM Daten und Datenprodukte (z.B. Schiffnavigationssoftware; Informationsdienst zu Meeresmüll in der Arktis) unterstützen sowohl Wissenschaft als auch maritime Ökonomie und Gesellschaft und werden über das AWI Datenportal zukünftig online verfügbar gemacht.



- www.awi.de/expedition/stationen/neumayer-station-iii.html
- www.awipev.eu/
- MOSAiC Drift Expedition: www.mosaicobservatory.org
- AWI Hausgarten: www...lter-observatorium-hausgarten.html
- Langzeit-Observatorium FRAM: www...ocean-fram.html

Modelle und Rechnerinfrastruktur

Die numerischen Modelle zur Simulation z.B. des Klimas müssen fortlaufend verfeinert werden. Dies erfolgt durch die Integration neuer theoretischer Ansätze, neuer numerischer Lösungsverfahren und durch eine verbesserte Verwendung von Beobachtungsdaten in den Modellen. Daher muss mit der Modellentwicklung auch die Rechnerinfrastruktur weiterentwickelt werden und insbesondere für die Hochschulen müssen Höchstleistungsrechner und Datenspeicher zugänglich bleiben. Dies ist eine notwendige Voraussetzung, damit die deutsche Polarforschung international konkurrenzfähig bleibt. Dabei kommt der langfristigen Speicherung von Modell- und Messdaten in frei zugänglichen Datenbanken (wie z.B. in PANGAEA und CERA) eine wichtige Rolle zu.



- www.pangaea.de
- cera-www.dkrz.de

Neue Methoden der Fernerkundung – Beispiel Satellitenmission Tandem-L

Tandem-L ist als Nachfolge zur seit 2010 erfolgreichen Tandem-X-Mission geplant und soll als hochinnovative Satellitenmission zur globalen Beobachtung von dynamischen Prozessen auf der Erdoberfläche in einer bisher nicht erreichten Qualität und Auflösung dienen. Aufgrund seiner neuartigen Abbildungstechniken und seiner enormen Aufnahmekapazität wird Tandem-L dringend benötigte Informationen zur Lösung hochaktueller wissenschaftlicher Fragestellungen aus den Bereichen der Bio-, Geo-, Hydro- und Kryosphäre liefern. Tandem-L trägt damit entscheidend zu einem besseren Verständnis des Systems Erde und seiner Dynamik bei. Ein wichtiges Missionsziel für den Bereich der Polarforschung ist die Quantifizierung von Gletscherbewegungen und Schmelzprozessen in den Polarregionen für verbesserte Prognosen zum Anstieg des Meeresspiegels. Das Tandem-L Missionskonzept nutzt zwei Radarsatelliten im L-band (24 cm Wellenlänge) und ermöglicht eine hochauflösende kontinuierliche Beobachtung unabhängig von Wetter und Tageslicht.

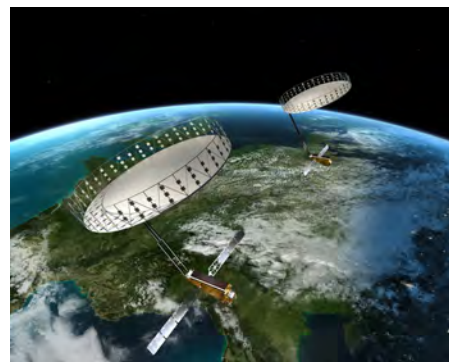


Abbildung V.1.1: TanDEM-L, Skizze, DLR



- www.tandem-l.de



V.2. Integration in nat. und int. Forschungsprogramme

Die deutsche Polarforschung ist national gut vernetzt und in die internationalen Programme eingebunden. Dies gilt sowohl für Kooperationsprojekte als auch für die Nutzung von Forschungsinfrastruktur. So wird die FS Polarstern auch stark von internationalen Gruppen genutzt. Ca. 10000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus der ganzen Welt haben seit Indienststellung an Bord erfolgreich gearbeitet. Der Betrieb der Forschungsstationen GARS O' Higgins und Dallmann-Labor (Antarktis) sowie AWIPEV (Arktis) erfolgt im Rahmen von internationalen Kooperationen. Deutsche Forscherinnen und Forscher haben sich maßgeblich an zahlreichen internationalen Großprojekten in den vergangenen 20 Jahren beteiligt (z.B. EPICA, GANOVEX, ANDRILL, CASE). Sie haben ebenso wesentliche Beiträge zum Internationalen Polarjahr 2007/2008 geleistet.

V.2.1 SCAR/IASC

Die deutsche Polarforschung ist in den internationalen Gremien gut vertreten und nimmt dort vielfach auch leitende Positionen ein. Deutsche Forscher und Forscherinnen wirken maßgeblich mit an der Gestaltung von internationalen Forschungsprogrammen. Das deutsche Nationalkomitee SCAR/IASC dient als nationales Korrespondenzorgan zum Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR) und zum International Arctic Science Committee (IASC), beides Mitglieder des International Council for Science (ICSU). Das deutsche Nationalkomitee SCAR/IASC plant und koordiniert die Aktivitäten der deutschen Hochschulforschung auf dem Gebiet der Polarforschung zusammen mit dem Alfred-Wegener-Institut sowie den betreffenden anderen Bundeseinrichtungen, auf deren Logistik die Hochschulforschung angewiesen ist. Dabei steht die Einbindung der Forschungsplanungen der verschiedenen deutschen Institutionen im süd- und nordpolaren Raum in internationale Programme im Vordergrund. Deutschland ist in allen wissenschaftlichen Arbeitsgruppen von SCAR und IASC vertreten und stellt u.a. den Sprecher des neuen SCAR-Programms Ant-ERA (Prof. Gutt, AWI). Zudem wurde das internationale IASC Sekretariat mit Sitz in Potsdam 8 Jahre lang (2009-2016) vom Alfred-Wegener-Institut und von der DFG gefördert. Damit hat Deutschland einen sehr wichtigen Beitrag zur internationalen Arktisforschung geleistet. Hohe internationale Wertschätzung der deutschen Polarforschung und die Anerkennung der wissenschaftlichen Erfolge lässt sich auch daraus ableiten, dass Wissenschaftler

aus Deutschland in herausragende Führungspositionen gewählt wurden (Prof. Thiede: SCAR-Präsident 2002-2006, Prof. Miller: ehemals COMNAP Chair, Prof. Lochte: SCAR-Vizepräsidentin). Deutsche Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen waren auch am "Antarctic and Southern Ocean Science Horizon Scan" von SCAR beteiligt, bei dem 80 Schlüsselfragen für die Antarktisforschung der kommenden Dekade im internationalen Rahmen identifiziert wurden. Ebenfalls mit starker deutscher Beteiligung wurde ein ähnlicher Prozess für die Arktis, der IASC-Strategieprozess ICARP-III (International Conference on Arctic Research Planning), durchgeführt.

V.2.2 European Polar Board

Das European Polar Board (EPB, bis 2014 zugehörig zur European Science Foundation, ESF) soll die europäische Polarforschung fördern und eine Plattform zur Koordinierung der europäischen Polarforschung bilden. Deutsche Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sind maßgeblich daran beteiligt.



- www.scar-iasc.de
- www.scar.org
- iasc.info
- www.europeanpolarboard.org



V.3. Nachwuchsförderung

V.3.1 DFG-Schwerpunktprogramm „Antarktisforschung“

Das Schwerpunktprogramm SPP1158 „Antarktisforschung mit vergleichenden Untersuchungen in der Arktis“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft ist ein interdisziplinäres Programm, das als Hauptziel die Förderung der universitären Polarforschung hat, aber auch die Kooperation von universitären mit nicht-universitären Forschergruppen (AWI, BGR und GEOMAR) bewirkt hat. Durch die Beteiligung von Studierenden im Rahmen von Forschungsprojekten (als Hilfskräfte oder in Form von Bachelor- und Masterarbeiten) werden schon früh Erfahrungen in der Polarforschung gesammelt. Das Schwerpunktprogramm hatte in den letzten Jahren ein Finanzvolumen von ca. 3,5 Millionen €/Jahr, aus dem fast ausschließlich Doktoranden und Nachwuchswissenschaftler gefördert wurden. Das Schwerpunktprogramm ist daher ein wichtiges Instrument, um die kommende Generation von Polarforscherinnen und Polarforschern auszubilden.

V.3.2 Russisch-Deutscher Masterstudiengang - POMOR

Dieser zweijährige, englischsprachige Studiengang für Polar- und Meereswissenschaften bildet seit 2002 pro Jahrgang 15-20 Studierende im Bereich der Erd- und Klimasystem-Wissenschaften mit Schwerpunkt Meeres- und Polarforschung erfolgreich aus. Getragen wird der Studiengang durch die Universität St. Petersburg in Zusammenarbeit mit einem Konsortium aus deutschen Universitäten (Hamburg, Bremen, Kiel, Potsdam) und Forschungseinrichtungen (AWI, GEOMAR, IOW, AARI). Nach dem ersten Studienjahr, in dem die wesentlichen Grundlagen des arktischen Erdsystems vermittelt werden, absolvieren die POMOR Studierenden ein Semester an einer der o.g. beteiligten Partneruniversitäten. Die Studierenden entscheiden selbst, ob sie ihre Masterarbeit an einer deutschen oder russischen Universität durchführen. POMOR wurde 2012 akkreditiert.

Bisher wurde der Studiengang für Meeres- und Polarforschung im Wesentlichen durch das BMBF, den DAAD, die Uni St. Petersburg und zu einem geringen Anteil von den deutschen Universitäten finanziert. Eine Förderung ist durch das IB-BMBF und den DAAD nicht mehr möglich. Mit der Unterstützung des Alfred-Wegener-Instituts, des GEOMAR und der Universität Hamburg wird die Fortführung von POMOR über Förderprogramme der EU (ERASMUSplus u.a.) angestrebt.

POMOR ist ein international sichtbares Aushängeschild der wissenschaftlichen Nachwuchsförderung und Weiterbildung mit deutscher Beteiligung. Die Absolventinnen und Absolventen sind hochqualifiziert und werden als Experten sowohl in Russland als auch in Deutschland für wichtige Nachwuchsstellen sehr nachgefragt.

V.3.3 APECS

Die *Association of Polar Early Career Scientists* (APECS) ist ein Zusammenschluss von Nachwuchswissenschaftlern. Das APECS-Netzwerk unterstützt die interdisziplinäre und internationale Zusammenarbeit im Bereich der Polarforschung, organisiert eigene wissenschaftliche Arbeitstreffen und fördert die Kompetenzen von Nachwuchswissenschaftlern. In Deutschland bestehen zwischen APECS und dem DFG-Schwerpunktprogramm "Antarktisforschung" enge Kontakte. Das internationale APECS Sekretariat wird seit dem 1. Februar 2017 vom Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, in Potsdam beherbergt.



- www.spp-antarktisforschung.de
- pomor.spbu.ru
- www.apecs.is
- apecsgermany.wixsite.com/apecsde



V.4. Wissenstransfer in die Gesellschaft

Von den Polarforschungsinstituten und den Universitäten werden vielfältige Aktivitäten durchgeführt, um die Themen der Polarforschung einer breiten Öffentlichkeit zu vermitteln. So waren im **Internationalen Polarjahr** 2007/2008 z.B. Schulklassen und Lehrer in die Forschung aktiv eingebunden. Daraus hat sich ein Arbeitskreis „Polarlehrer“ der **Deutschen Gesellschaft für Polarforschung** (DGP) gebildet, der diese sehr erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen Schulen, Universitäten und Forschungsinstituten fortführt. Im Rahmen des **Wissenschaftsjahrs 2016/17** „Meere und Ozeane“ werden zahlreiche Veranstaltungen und Informationsmöglichkeiten angeboten, die Forschungsergebnisse der Polarforschung allgemeinverständlich für die Öffentlichkeit vermitteln.

Die Ergebnisse der deutschen Polarforschung sind von hohem Interesse für die Analyse des globalen und regionalen Klimawandels. Sie fanden Eingang in die **Sachstandsberichte des zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen** (IPCC Report) und werden auch in Zukunft einen bedeutenden Beitrag leisten. Es werden daher sowohl für IPCC als auch für andere Gremien die entsprechenden Analysen zur Veränderung der Kryosphäre und des Meeresspiegelanstiegs zur Verfügung gestellt. Am Alfred-Wegener-Institut existiert ein **Regionales Klimabüro**, das die entsprechenden Daten aufbereitet und für Anfragen aus Politik, Wirtschaft und Gesellschaft bereitstellt. Durch die universitäre Polarforschung werden polare Themen in die Lehre und Forschung eingebracht und so Interesse an diesen Themen geweckt. Die große Anzahl an Abschlussarbeiten mit polarem Bezug an den Fächern der Universitäten, die aktiv Polarforschung betreiben, zeigt, dass viele potentielle Nachwuchswissenschaftler für die Polarforschung begeistert werden können. Die Forschenden an Universitäten vermitteln polares Wissen seit vielen Jahren an Kinder z.B. in Form von Kinder-Unis, aber auch in der Erwachsenen- und Seniorenbildung. Daher ist die Fortführung der Förderung von Projekten an Universitäten eine wichtige Grundlage für die Aufrechterhaltung einer breiten Basis für Nachwuchswissenschaftler für die Polarforschung sowie für das Interesse der Öffentlichkeit für die Polarforschung. Dazu leistet Schwerpunktprogramm „Antarktisforschung“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft einen wichtigen Beitrag. Durch die Verpflichtung, Daten der Forschungsprojekte auf **Langzeitdatenbanken** (wie PANGAEA) zur Verfügung zu stellen, werden die im Rahmen des Schwerpunktprogramms erzielten Forschungsergebnisse langfristig für die Öffentlichkeit zugänglich.

Obwohl die Bundesrepublik Deutschland kein Anrainerstaat ist, gehört sie zu den führenden Forschungsnationen in der Arktis. Aufgrund der geopolitischen, geoökonomischen und geoökologischen Bedeutung der sich durch die Klimaerwärmung besonders rasant verändernden Nordpolarregion strebt die Bundesregierung an, auch die politische Rolle Deutschlands in Arktis-Angelegenheiten zu stärken. Der Dialog zwischen Wissenschaft und Politik spielt dabei eine wichtige Rolle. Im Arktisdialog stellt das AWI sein Wissen, seine Erfahrung und seine internationalen Kontakte den an Arktisangelegenheiten interessierten Bundesministerien gezielt zur Verfügung. Die seit 2013 halbjährlich stattfindenden Informationsveranstaltungen, die gemeinsam vom AWI und einem gastgebenden Ministerium organisiert werden, behandeln aktuelle Fragen der deutschen und internationalen Arktisforschung und -politik. Zusätzlich zu sieben Bundesministerien nehmen Vertreter von Forschungseinrichtungen, Bundesbehörden und Think Tanks an den Veranstaltungen regelmäßig teil.

Um dem zunehmenden gesellschaftlichen Interesse gerecht zu werden und Entscheidungsträgern auf direktem Weg wissenschaftliche Beratung anbieten zu können, hat das AWI an seinem Potsdamer Standort zum 1. Januar 2017 ein Informations- und Kooperationsbüro für Arktisangelegenheiten eingerichtet. Dieses **Deutsche Arktisbüro** unterstützt die Vernetzung und den Informationsaustausch zwischen deutschen Arktis-Akteuren aus Politik, Wissenschaft und Wirtschaft und sorgt für mehr Kohärenz und Sichtbarkeit der deutschen Arktispolitik auf nationaler und internationaler Ebene. Das Büro dient als einheitlicher Ansprechpartner für Bundesministerien, Behörden etc. und als Anlaufstelle für die deutsche Wirtschaft. Es berät die Bundesregierung durch wissenschaftliche Vorbereitung und Begleitung von Positionen zu Arktisfragen und unterstützt das Auswärtige Amt bei der Koordinierung der deutschen Beteiligung an den Aktivitäten des Arktischen Rats. Eine im September 2016 vom AWI und vom Auswärtigen Amt im Rahmen des Arktisdialogs in Potsdam veranstaltete Sitzung konzentrierte sich auf die deutschen Beiträge zum Arktischen Rat. Zu den Aufgaben des Arktisbüros gehört zusätzlich zur Fortführung des Arktisdialogs die Informationsvermittlung durch einen eigenen Internetauftritt und die Initiierung und Durchführung nationaler Arktisveranstaltungen gemeinsam mit Partnern aus Wissenschaft, Politik und Wirtschaft. Der Informationsaustausch beinhaltet sowohl den Transfer von Forschungsergebnissen an Stakeholder und Entscheidungsträger, als auch die Vermittlung politikrelevanter Fragen an die entsprechenden wissenschaftlichen Institutionen.



- ipcc.ch
- pangaea.de
- www.wissenschaftsjahr.de/2016-17/
- www.polarjahr.de
- www.arctic-office.de
- www.dgp-ev.de
- www.awi.de/forschung/besondere-gruppen/klimabuero.html



Anhang

VI.1	Glossar	147
VI.2	Liste der Abkürzungen	151
VI.3	Beteiligte Autoren	153
VI.4	Bildnachweise	155

VI.1. Glossar

Ablation Abschmelzen und Verdunsten von Schnee und Eis, hauptsächlich an der Oberfläche

Aerosol Gemisch aus festen oder flüssigen Schwebeteilchen in einem Gas

Akkretion Anwachsen des Krustenmaterials einer Platte durch tektonische oder magmatische Prozesse

Albedo Maß für das Reflektionsvermögen von solarer Strahlung

Altimetrie Höhenmessung

Anomalie Abweichung vom Erwartungswert

anthropogen Durch den Menschen hervorgerufen

Astrobiologie Forschung, die sich mit der Entstehung, Entwicklung, Ausbreitung und Zukunft des Lebens im Universum befasst

Bathymetrie Meerestiefenmessung

Benthos Lebensgemeinschaft der Bodenzone eines Gewässers

Concordia Französisch-italienische Polarstation auf Dome C

Datenassimilation Die Synthese aus gemessenen Daten und Modellen

Eismonde Satelliten bzw. Monde anderer Himmelskörper, die aus einer mehr oder weniger dichten und mächtigen Eiskruste bestehen, die meist einen mehr oder weniger global ausgeprägten Ozean bedecken

Eisschild Festes Land bedeckender Gletscher mit einer Fläche von mehr als 50.000 km²

Eisviskosität Maß für die Fließfähigkeit des Eises

Evolution Die allmähliche Veränderung der vererbten Merkmale von Organismen aufgrund von Mutations-, Rekombinations- und Selektionsprozessen

Evolutionäre Adaptation Generationenübergreifende (genetisch verankerte) Anpassung an veränderte Umweltbedingungen

Exploration Erkundung neuer Standorte, Gelände, Länder, Inseln, Planeten mit unterschiedlichen Umweltbedingungen (sowohl robotisch autonom als auch unter humaner Beteiligung möglich).

Faunenradiation Auffächerung von einer weniger spezialisierten in verschiedene stärker spezialisierte Tierarten

Fernerkundung Verfahren zur Gewinnung von Informationen durch Messung von reflektierter oder emittierter elektromagnetischer Strahlung (üblicherweise von Satelliten oder Flugzeugen aus)

Firn Schnee, der mindestens ein Jahr alt ist und somit eine Schmelzperiode überstanden hat

Glazial-isostatische Anpassung Vertikale Ausgleichsbewegung kontinentaler Kruste aufgrund der Auflast oder des Abschmelzens von Eisschilden

Gravimetrie Methode zur Bestimmung des lokalen Schwerefeldes der Erde

Habitat Lebensraum

Indigene Angestammte Bevölkerung einer Region

In-situ Messungen Messverfahren, die unmittelbar am Ort des zu vermessenden Objekts stattfinden

Isolationstests Studien während der Isolierung von Personengruppen zur Untersuchung der Eignung für bemannte Weltraummissionen

Isotope Arten von Atomen, deren Atomkerne gleich viele Protonen, aber verschieden viele Neutronen enthalten

Kalbung Abbruch von Eisbergen an Gletschern oder Eisschelfen

Kontinentalschelf Vom Meer bedeckter Randbereich eines Kontinents

Kraton Kernbereich eines Kontinents mit durchschnittlicher oder erhöhter Krustendicke

Kryosphäre Gesamtheit der Vorkommen festen Wassers (Eis) in Form von Schnee, Gletschern, Eisschilden, Meereis, See- und Flusseis sowie Permafrost im Boden

Metabolische Adaptation Die Anpassung von Zell- und Gewebestrukturen sowie Stoffwechselprozessen an veränderte Umweltbedingungen

Meridional Entlang der Längengrade (Nord-Süd gerichtet)

Modulhabitat Unterkunftseinheit mit Lebenserhaltungssystemen auf Stationen für Polarforscher und/oder Raumfahrer im Erdorbit, auf dem Mond oder anderen Planeten

Moräne Vom Eis transportiertes oder abgelagertes Material

Ozeanversauerung Sinkender pH-Wert des Ozeans in Folge einer verstärkten Aufnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre

Packeis Dicht angeordneter Verbund aus driftenden Meereisschollen

Paläoklima Klima der Erdgeschichte

Pelagial Lebensraum des Freiwassers

Permafrost Untergrund, der in mind. zwei aufeinander folgenden Jahren kontinuierlich Temperaturen von 0°C oder niedriger aufweist

Phänotypische Plastizität Anpassungsfähigkeit eines Organismus innerhalb seiner vorhandenen genetischen Voraussetzungen, d.h. ohne evolutive Veränderungen

Phytoplankton In Wasserströmungen treibende Organismen, die Licht als Energiequelle nutzen

Planetary Protection Guidelines Alle Maßnahmen in der Raumfahrt, die verhindern, dass irdische Lebensformen (z. B. Mikroorganismen oder Biomoleküle) mit Raumfahrtmissionen andere Planeten, Monde, Asteroiden und Kometen erreichen und kontaminieren.

Planeten-analoge Feldforschung Erkundung von Geländetypen mit Analogie zu Planeten im Sonnensystem als auch die Nutzung des Geländes für Studien, die zukünftige Weltraummissionen unterstützen sollen

Planetenforschung Erkundung und Erforschung der Himmelskörper (Planeten) im Sonnensystem und von anderen Sternensystemen (Exoplaneten)

Polynja Fläche offenen Wassers oder dünnen Eises in einem Gebiet, in dem man eine geschlossene Meereisdecke erwarten würde

Präbiotische Netzwerkchemie Komplexe chemische miteinander verknüpfte Reaktionen, die potentiell zur Entstehung des Lebens geführt haben können

Primärproduktion Produktion von Biomasse durch Pflanzen, Blaualgen und Bakterien mit Hilfe von Licht oder chemischer Energie

Proxy Schätzwert

Radarinterferometrie Verfahren zur Bestimmung von Geländehöhen und der Erfassung von Veränderungen der Erdoberfläche im mm- und cm-Bereich

Reanalyse Neuberechnung der Ergebnisse numerischer Wettermodelle für einige Jahre bis Jahrzehnte in der Vergangenheit, unter Einbezug aller jetzt vorliegenden Beobachtungen mit einem modernen Modell

Rheologie Wissenschaft, die sich mit dem Verformungs- und Fließverhalten von Materie beschäftigt

Robotische Missionen Meist langjährige Erkundungsprojekte, die mit Unterstützung von Sonden und Robotern in der Tiefsee, in Höhlen, in terrestrischen Geländeformen oder auf Planeten erfolgen

Schelfeis Schwimmende Eisplatte von großflächigem Ausmaß, die von einem Eisstrom (Gletscher, Eisschild) gespeist wird.

Schelfmeere Meeresbereich über dem Kontinentalschelf (s.o.)

Schlüsselarten Prägende Arten in einem Ökosystem

Stratosphäre Höhenbereich zwischen 15 und 50 km über der Erdoberfläche

Subduktion Abtauchen ozeanischer Kruste unter kontinentale Kruste

Telekonnektion Fernwirkung

Tiefseeforschung Forschung, die sich naturwissenschaftlich mit den lichtlosen Tiefen der Ozeane beschäftigt

Topographie Geländeform

Trophische Ebene Position im Nahrungsnetz

Troposphäre Bereich der Atmosphäre zwischen Erdoberfläche und 10 bis 15 km Höhe ("Wetterschicht")

Tundra Baumlose Vegetationszone zwischen borealem Nadelwald und Kältewüste

VI.2. Liste der Abkürzungen

AABW	Antarktisches Bodenwasser	CASE	Circum-Arctic Structural Events
AAIW	Antarktisches Zwischenwasser	CCAMLR	Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources
AARI	Arctic and Antarctic Research Institute (Russland)	CLCS	Commission on the Limits of the Continental Shelf
ACC	Antarktischer Zirkumpolarstrom	COMNAP	Council of Managers of National Antarctic Programs
ANDRILL	ANtartic geological DRILLing	COSPAR	Committee on Space Research
AO	Arktische Oszillation	DAAD	Deutscher Akademischer Austauschdienst
APECS	Association of Polar Early Career Scientists	DESY	Deutsche Elektronen-Synchrotron
ATCM	Antarctic Treaty Consultative Meeting	DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
AUG	Umweltschutzprotokoll-Ausführungsgesetz	DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
AUV	Autonomous Underwater Vehicle	Dromlan	Dronning Maud Land Air Network
AWI	Alfred-Wegener Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung	ERASMUS	Förderprogramm der EU für Auslandsaufenthalte an Universitäten
AWIPEV	French - German Arctic Research Base at Ny-Ålesund / Spitsbergen	EPB	European Polar Board
AWZ	Ausschließliche Wirtschaftszone	EPICA	European Project for Ice Coring in Antarctica
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe	ERS-1/-2	European Remote Sensing satellites 1 and 2
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie	ESA	European Space Agency
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung	ESF	European Science Foundation
		GARS	German Antarctic Receiving Station

GANOVEX	German Antarctic North Victoria Land Expeditions	MOC	Meridional Overturning Circulation
GEOMAR	Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel	NADW	Nordatlantisches Tiefenwasser
GCOS	Global Climate Observing System	NASA	National Aeronautics and Space Administration (US)
GIA	Glazial-isostatische Anpassung	NSF	National Science Foundation (US)
GPS	Global Positioning System	PALAOA	Perennial acoustic observatory in the Antarctic Ocean
GRACE	Gravity Recovery And Climate Experiment	POMOR	Deutsch-russischer Masterstudiengang für angewandte Meeres- und Polarwissenschaften
GTN-P	Global Terrestrial Network for Permafrost	SAM	Southern Annular Mode
IAATO	International Association of Antarctica Tour Operators	SCAR	Scientific Committee on Antarctic Research
IASC	International Arctic Science Committee	SRÜ	Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen
ICSU	International Council for Science	TanDEM-X	TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement
IPA	International Permafrost Association	UNCLOS	United Nations Convention on the Law of the Sea
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	USGS	United States Geological Survey
IOW	Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde	VLBI	Very Long Baseline Interferometry
IPY	International Polar Year		
IVS	International VLBI Services		
LEOP	Launch and Early Orbit Phase		

VI.3. Beteiligte Autoren

Teil I - Die deutsche Polarforschung

Geschichte und Organisation. Leitautorin: *Cornelia Lüdecke* (LMU München), Beiträge: *Günther Heinemann* (Uni Trier)

Werkzeuge. Leitautor: *Hartwig Gernandt* (AWI), Beiträge: *Antonie Haas* (AWI), *Günther Heinemann* (Uni Trier), *Kathrin Höppner* (DLR), *Lars Kaleschke* (Uni Hamburg), *Sascha Willmes* (Uni Trier)

Einbindung. Leitautor: *Günther Heinemann* (Uni Trier), Beiträge: *Volker Rachold* (AWI)

Teil II - Die Polargebiete im globalen Wandel

Eisschilddynamik und Meeresspiegel. Leitautor: *Matthias Braun* (Uni Erlangen), Beiträge: *Thomas Kleinert* (AWI), *Martin Rückamp* (AWI), *Johannes Fürst* (Uni Erlangen), *Mirko Scheinert* (TU Dresden), *Martin Horwath* (TU Dresden)

Meereis. *Dirk Notz* (MPI Hamburg), *Thomas Jung* (AWI), *Lars Kaleschke* (Uni Hamburg), *Marcel Nicolaus* (AWI), *Ilka Peeken* (AWI), *Sascha Willmes* (Uni Trier)

Permafrost. Leitautor: *Hugues Lantuit* (AWI), Beiträge: *Lutz Schirrmeister* (AWI), *Dirk Wagner* (GFZ Potsdam)

Polare Ozeane. Leitautorin: *Monika Rhein* (IUP-MARUM, Uni Bremen), Beiträge: *Volker Strass* (AWI), *Oliver Huhn* (Uni Bremen), *Benjamin Rabe* (AWI), *Torsten Kanzow* (AWI), *Michael Schulz* (MARUM), *Stefan Mulitza* (MARUM), *Dierk Hebbeln* (MARUM), *Gerrit Lohmann* (AWI), *Michal Kucera* (MARUM), *Mario Hoppe* (AWI), *Reiner Schlitzer* (AWI), *Boris Koch* (AWI), *Dieter Wolf-Gladrow* (AWI), *Ralph Timmermann* (AWI), *Hartmut Hellmer* (AWI), *Ursula Schauer* (AWI), *Matthias Braun* (Uni Erlangen), *Angelika Humbert* (AWI), *Judith Hauck* (AWI), *Christoph Völker* (AWI)

Biodiversität. Leitautor: *Ulf Karsten* (Uni Rostock), Beiträge: *Osama Mustafa* (Uni Jena), *Wilhelm Hagen* (Uni Bremen), *Holger Auel* (Uni Bremen), *Thomas Brey* (AWI)

Die polare Atmosphäre. Leitautor: *Günther Heinemann* (Uni Trier), Beiträge: *Thomas Jung* (AWI), *Gert König-Langlo* (AWI), *Christof Lüpkes* (AWI), *Ulrike Wacker* (AWI), *Manfred Wendisch* (Uni Leipzig), *Klaus Dethloff* (AWI), *Dörthe Handorf* (AWI), *Markus Rex* (AWI)

Teil III - Die Polargebiete im Erdsystem

Geologischer Untergrund. Leitautor: *Andreas Läufer* (BGR), Beiträge: *Karsten Piepjohn* (BGR), *Frank Lisker* (Uni Bremen), *Martin Melles* (Uni Köln), *Solveig Estrada* (BGR), *Christoph Gaedicke* (BGR)

Paläoklima. Leitautor: *Ralf Tiedemann* (AWI), Beiträge: *Gerrit Lohmann* (AWI), *Karsten Gohl* (AWI), *Gregor Knorr* (AWI)

Evolution und Anpassung. *Wilhelm Hagen*, *Holger Auel* (Uni Bremen)

Erde und Weltraum. *Markus Ackermann* (DESY), *Jean-Pierre de Vera* (DLR), *Peter Gauger* (DLR)

Teil IV - Die Polargebiete: Ressourcen und Nachhaltigkeit

Ressourcen. Leitautor: *Andreas Läufer* (BGR), Beiträge: *Karsten Piepjohn* (BGR), *Christoph Gaedicke* (BGR)

Sozio-ökonomische Aspekte. *Otto Habeck* (Uni Hamburg)

Völkerrecht. *Alexander Proelß* (Uni Trier)

Historische und Archäologische Forschung. *Cornelia Lüdecke* (LMU München), *Ingo Heidbrink* (Old Dominion University, Norfolk, USA)

Teil V - Umsetzung

Infrastruktur und Technologien. Leitautor: *Hartwig Gernandt* (AWI), Beiträge: *Antje Boetius* (AWI), *Günther Heinemann* (Uni Trier), *Andreas Läufer* (BGR), *Kathrin Höppner* (DLR)

Integration in nationale und internationale Programme. *Günther Heinemann* (Uni Trier)

Nachwuchsförderung. *Günther Heinemann* (Uni Trier), *Eva-Maria Pfeiffer* (Uni Hamburg)

Wissenstransfer in die Gesellschaft. *Günther Heinemann* (Uni Trier)

Redaktion

Matthias Braun (Uni Erlangen), *Thomas Brey* (AWI), *Detlef Damaske* (ehem. BGR), *Günther Heinemann* (Koordination, Uni Trier), *Martin Melles* (Uni Köln), *Monika Rhein* (Uni Bremen)

Redaktionsassistent: *Sascha Willmes* (Uni Trier)

VI.4. Bildnachweise

Kapitelbilder

Sascha Willmes (Uni Trier), Titelbild mit Bildbeitrag von Marcel Nicolaus (AWI)

Abbildungen im Fließtext

Abb. I.1.1 - Links: Payer, J. (1876): Die Österreichisch-Ungarische Nordpol-Expedition in den Jahren 1872 - 1874. Nebst einer Skizze der zweiten deutschen Nordpol-Expedition 1869 - 1870 und der Polar-Expedition von 1871, Hölder, Wien, S. 641; rechts: Neumayer, G., hrsg. im Auftrage der Deutschen Polar-Kommission (1891): Die deutschen Expeditionen und ihre Ergebnisse. Bd. 1: Geschichtlicher Theil und in einem Anhang mehrere einzelne Abhandlungen physikalischen und sonstigen Inhalts, Asher, Berlin, S. 60. **Abb. I.1.2** - Links: Privatbesitz Möder; rechts: Privatbesitz Joester. **Abb. I.2.1** - Foto: Alfred-Wegener-Institut / Mario Hoppmann (CC-BY 4.0); Karte: Antonie Haas (Alfred-Wegener-Institut). **Abb. I.2.2** - Alfred-Wegener-Institut / Thomas Steuer. **Abb. I.2.3** - Links: Alfred-Wegener Institut / Stefan Christmann; rechts: Alfred-Wegener Institut / Reinhard Sibbers. **Abb. I.2.4** - Alexey Nagaev. **Abb. I.2.5** - Antonie Haas (Alfred-Wegener-Institut). **Abb. I.2.6** - Links: Andreas Läufer (BGR); rechts: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). **Abb. I.2.7** - Antonie Haas (Alfred-Wegener-Institut). **Abb. I.2.8** - Links: Günther Heinemann; rechts: Thorsten Sachs / Alfred-Wegener Institut. **Abb. I.3.1** - Christine Wesche (Alfred-Wegener-Institut). **Abb. II.1.1** - Matthias Braun / Uni Erlangen. **Abb. II.1.2** - Heim, V., Humbert, A. und Miller, H. (2014): Elevation and elevation change of Greenland and Antarctica derived from CryoSat-2, The Cryosphere, 8, 1539–1559, doi:10.5194/tc-8-1539-2014. **Abb. II.1.3** - Matthias Braun / Uni Erlangen. **Abb. II.2.1** - Sascha Willmes / Uni Trier. **Abb. II.2.2** - www.meereisportal.de, vom 28.6.2017. **Abb. II.2.3** - Dirk Notz / Max-Planck Institut für Meteorologie, Hamburg. **Abb. II.3.1** - M. Fritz. **Abb. II.3.2** - H. Lantuit / AWI Potsdam. **Abb. II.3.3** - V. Romanovsky. **Abb. II.3.4** - H. Lantuit, Fotos: A. Mahoney, M. Grigoriew, V. Rachold, A. Kizyakow, M. Leibman. **Abb. II.4.1** - Alfred-Wegener Institut. **Abb. II.4.2** - Alfred-Wegener Institut. **Abb. II.4.3** - H. Hellmer / AWI Bremerhaven. **Abb. II.4.4** - Alfred-Wegener Institut. **Abb. II.4.5** - IPCC Assessment report 5, Technical Summary, Abb.TS20a. **Abb. II.5.1** - Alfred-Wegener Institut. **Abb. II.5.2** - O. Mustafa. **Abb. II.5.3** - Links: O. Mustafa, Mitte und rechts: Überarbeitet nach Gerighausen U., Bräutigam K., Mustafa O. und Peter H.U. 2003. Expansion of vascular plants

on an Antarctic island – a consequence of climate change? In A.H.L. Huiskes et al. (eds.): Antarctic biology in a global context. S. 79–83. Leiden: Backhuys Publishers. **Abb. II.5.4** - B. Büdel. **Abb. II.5.5** - O. Mustafa. **Abb. II.5.6** - O. Mustafa, basierend auf IAATO Daten. **Abb. II.6.1** - G. Heinemann. **Abb. II.6.2** - G. Heinemann. **Abb. II.6.3** - https://data.giss.nasa.gov/gistemp/zonal_means/. **Abb. II.6.4** - Dethloff, K., D. Handorf, A. Rinke, W. Dorn, R. Jaiser, Wechselwirkungen zwischen arktischem Meereis und der atmosphärischen Zirkulation (2014), in WARNSIGNAL KLIMA: Die Polarregionen, Hrg: J.L.Lożán, H. Grassl, D. Notz, D. Piepenburg, Hamburg, S. 206-212. **Abb. II.6.5** - Oben: Thompson, D.W.J. and Solomon, S. (2002): Interpretation of Recent Southern Hemisphere Climate Change, Science, 296(5569), 895-899. **Abb. III.1.1** - Melles, M., Dieckmann, B., Estrada, S., Gaedicke, C., Gohl, K., Jokat, W., Lembke-Jene, L., Läufer, A., Lisker, F., Piepjohn, K., Scheinert, M., Schirrmeister, L. und Tessensohn, F. (2015): Geowissenschaftliche Forschung in den Polargebieten – globale Bedeutung und Perspektiven. Polarforschung, 85, 1, 1-64. **Abb. IV.1.1** - Roland, N.W. (2009): Antarktis: Forschung im ewigen Eis.- Spektrum Akadem. Verlag, Heidelberg/Berlin/New York, 334 pp. **Abb. III.1.2/Abb. IV.1.2** - Piepjohn, K., Cramer, B., Buchholz, P., Elsner, H. und Klimesch, L.-M. (2011): Vorkommen und Potentiale geologischer Ressourcen in der Arktis.- Geograph. Rundschau, 12, 34-39. **Abb. III.2.1** - H. Fischer. **Abb. III.2.2** - Links: R. Gersonde; rechts: H. Kühn. **Abb. III.2.3** - modifiziert nach: Tiedemann, R., Sarnthein, M. and N.J. Shackleton (1994): Astronomic timescale for the Pliocene Atlantic d18O and dust flux records of ODP Site 659, Paleoceanography, 9, 619-638. **Abb. III.2.4** - Merz, N., G. Gfeller, A. Born, C. C. Raible, T. F. Stocker, and H. Fischer (2014): Influence of ice sheet topography on Greenland precipitation during the Eemian interglacial, J. Geophys. Res. Atmos., 119, doi:10.1002/2014JD021940. **Abb. III.2.5** - Sigman, D.M., Hain, M.P., and Haug, G.H. (2010): The polar ocean and glacial cycles in atmospheric CO2 concentration: Nature, 466, 47-55. **Abb. III.3.1** - Hempel, G. and Piepenburg, D. (2010): Nord- und Südpolarmeer im Klimawandel. Ein biologischer Vergleich. Biologie in unserer Zeit, 40: 386–395. doi: 10.1002/biuz.201010437. **Abb. III.3.2** - K.-H. Kock. **Abb. III.3.3** - ACIA (2004): Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment. ACIA Overview report. Cambridge University Press. 140 pp. **Abb. III.4.1** - IceCube/NSF. **Abb. III.4.2** - IceCube Collaboration. **Abb. III.4.3** - DESY. **Abb. III.4.4** - Nord-Victoria Land/GANOVEX 11: J.P. de Vera, Mars: NASA, ESA, DLR. **Abb. III.4.5** - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR. **Abb. IV.1.1** - nach Roland, N.W. (2009): Antarktis: Forschung im ewigen Eis.- Spektrum Akadem. Verlag, Heidelberg/Berlin/New York, 334 pp. **Abb. IV.1.2** - nach Piepjohn, K., Cramer, B., Buchholz, P., Elsner, H. und Klimesch, L.-M. (2011): Vorkommen und Potentiale geologischer Ressourcen in der Arktis.- Geograph. Rundschau, 12, 34-39. **Abb. IV.2.1** - J. Otto Habeck. **Abb. IV.2.2** - W.K. Dallmann, Norwegisches Polarinstitut. **Abb. IV.2.3** - Stephan Dudeck. **Abb. IV.2.4** - Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway, Arctic Portal, UNEP/GRID-Arendal, Arendal, Norway. **Abb. IV.4.1** - Gazert-Nachlass, Partenkirchen. **Abb. IV.4.2** - Links: I. Heidbrink; rechts: I. Heidbrink. **Abb. V.1.1** - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR.

