

## 5.2 Historische und zukünftige Entwicklung des Arktischen Meereises

DIRK NOTZ

**Historische und zukünftige Entwicklung des Arktischen Meereises:** Das Klima der Erde hat sich schon immer aufgrund natürlicher Schwankungen in den äußeren Antriebsfaktoren verändert, wobei insbesondere Veränderungen in der solaren Einstrahlung, der atmosphärischen Zusammensetzung, der Ozeanzirkulation und der Albedo der Landmassen zu erwähnen sind. Als Folge dieser Veränderungen hat sich auch die Meereisbedeckung der Erde auf geologischen Zeitskalen immer wieder stark gewandelt. So gab es zum Beispiel während des Zeitalters der Dinosaurier auf der Erde überhaupt kein Meereis, wohingegen die Meereisausdehnung während der Eiszeiten der jüngeren geologischen Vergangenheit deutlich höher lag als heutzutage. Entsprechende Schwankungen lassen sich z.B. aus Bohrkernen vom Ozeanboden ableiten, deren Zusammensetzung unter anderem vom Vorhandensein von Eis in früheren Epochen bestimmt wird. Für die jüngere geologische Vergangenheit deuten entsprechende Bohrkern sehr stark darauf hin, dass eine das ganze Jahr über ausgedehnte Meereisdecke seit mindestens 800.000 Jahren typisch für den Arktischen Ozean gewesen ist. Der Rückgang des Meereises in den letzten Jahrzehnten, wie auch das mögliche weitere Abschmelzen des Eises in der Zukunft, sind damit auf sehr langen Zeitskalen als außergewöhnlich anzusehen.

**Historical and future development of Arctic sea ice:** The climate of the Earth has always been changing, in particular owing to natural variations of solar insolation, atmospheric composition, ocean circulation and changes in surface albedo. In response to these changes, the sea-ice cover has varied substantially on geological time scales, with for example no sea ice whatsoever during warm periods beyond 50 million years ago, to very extensive sea-ice coverage during ice-age periods. Such variations can be obtained from drilling of ocean sediment cores, whose composition allows some inference about the sea-ice coverage throughout time. For the recent geological period, the Quaternary, substantial sea-ice coverage has been prevailing for the past 800,000 years. This period was clearly dominated by year-round sea-ice coverage on the Arctic Ocean. The recent retreat of Arctic sea ice, as well as the possible further future retreat of the ice coverage are hence both extraordinary on very long time scales.

Das Klima unseres Planeten hat sich seit seiner Bildung immer wieder gravierend verändert. So war zum Beispiel nach heutigem Kenntnisstand die Erde vor knapp 600 Mio. Jahren für mehrere Millionen Jahre nahezu vollständig von Schnee und Eis bedeckt (»Schneeball Erde«), wohingegen es zur Zeit der Dinosaurier überall auf der Erde so warm war, dass es so gut wie keinen Schnee oder Eis gab.

In diesem Kapitel wird nachgezeichnet, wie das Meereis der Erde auf diese Klimaveränderungen reagiert hat. Dazu wird zunächst ein kurzer Abriss zu den Mechanismen von früheren Klimaveränderungen gegeben, bevor im 2. Abschnitt einige der Methoden vorgestellte werden, mit denen sich die Entwicklung des Meereises in den Polarregionen rekonstruieren lässt. Entsprechende Rekonstruktionen werden dann im 3. Abschnitt diskutiert, bevor das Kapitel im 4. Abschnitt mit einem Ausblick auf die mögliche zukünftige Entwicklung des Meereises endet.

### Mechanismen früheren Klimawandels

Das Klima der Erde wird primär durch drei Faktoren bestimmt, nämlich erstens durch die insgesamt absorbierte Sonnenenergie, zweitens durch die Zusammensetzung der Erdatmosphäre und drittens durch Veränderungen der Ozeanzirkulation und der Landoberflächen. Alle diese Faktoren unterliegen natürlichen Schwankungen, die schon immer das Klima der Erde teilweise

stark verändert haben. So schwanken zum Beispiel auf Zeitskalen von vielen tausend Jahren der jahreszeitliche Abstand der Erde von der Sonne und die Neigung der Erdachse zur Bahnebene um die Sonne fast periodisch, was in den vergangenen Jahrhunderttausenden zur immer wiederkehrenden Abfolge von Kaltzeiten und Warmzeiten mit entsprechenden Auswirkungen auf die Eisbedeckung der Erde geführt hat.

Auch die Zusammensetzung der Erdatmosphäre ist natürlichen Schwankungen unterworfen. Zum Beispiel wird durch Vulkanausbrüche Kohlendioxid freigesetzt, während durch chemische Prozesse bei der Verwitterung von Gestein Kohlendioxid aus der Atmosphäre als Kalk gebunden wird, sodass dadurch die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre abnehmen kann.

Änderungen im Ozean und an Land beeinflussen ebenfalls das Erdklima. So verteilen Ozeanströmungen einen Großteil der einfallenden Sonnenenergie sehr effektiv um, sodass Veränderungen in der Ozeanströmung zumindest regional zu erheblichen Temperaturänderungen führen können. Das prominenteste Beispiel für entsprechende Mechanismen ist der Nordatlantikstrom, der heutzutage als nördlicher Ausläufer des Golfstromes so viel Wärme an die Westküste Europas führt, dass es auf vergleichbaren Breitengraden dort deutlich wärmer ist als z.B. in Kanada oder Alaska. Auch die Menge an Schnee und Eis auf der Erdoberfläche beeinflusst das Klima gravierend, da beide die einfallende

Sonnenstrahlung sehr effektiv reflektieren und so zu einer Kühlung des Klimas beitragen. Schließlich sei noch die Topographie der Landoberfläche erwähnt, die mit ihren sehr langsamen geologischen Landsenkungen und -erhebungen zu großräumigen Veränderungen der vorherrschenden Windsysteme beiträgt und somit ebenfalls Klimaveränderungen hervorrufen kann.

Im Zusammenspiel haben diese verschiedenen Mechanismen in der Klimageschichte der Erde zu einer Vielzahl unterschiedlicher Klimazustände geführt, wobei eine komplette Beschreibung der entsprechenden Abfolge hier zu weit führen würde. Daher sei hier nur kurz skizziert, dass sich grundsätzlich das Klima der Erde auf langen Zeitskalen seit etwa 65 Mio. Jahren im Mittel langsam abgekühlt hat, was in der Folge vor etwa 2,6 Mio. Jahren zur Etablierung des Eiszeitalters (Quartär) mit seiner regelmäßigen Abfolge von Eiszeiten und Zwischeneiszeiten geführt hat. Diese langsame Abkühlung auf sehr langen Zeitskalen wurde vor allem durch zwei Faktoren begünstigt. Erstens haben sich im Laufe der Zeit die vorherrschenden Windsysteme und die Ozeanzirkulation auf der Erde so verändert, dass weniger Wärme von den Tropen in die Polarregionen transportiert wurde. Hierdurch konnten sich in den Polarregionen ausgedehnte Eisfelder bilden, deren Reflektion von Sonnenlicht zu einer Abkühlung der Erde beitrug. Zum anderen hat eine langsame Abnahme des atmosphärischen Kohlendioxidgehalts sehr effektiv zu der langsamen Abkühlung beigetragen. Der  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre nahm entsprechend im Laufe der Jahrtausende von knapp 1.000 ppm auf unter 300 ppm ab, bis er jüngst durch menschliche Aktivitäten wieder eine Konzentration von 400 ppm überschritten hat.

### Methoden zur Rekonstruktion von Meereis

Mit diesen Schwankungen des Erdklimas gehen Schwankungen in der Ausdehnung sowohl des Arktischen wie auch des Antarktischen Meereises einher, wobei es eine Reihe von Methoden gibt, mit denen wir diese Schwankungen selbst über sehr lange Zeiträume rekonstruieren können (vgl. die hervorragende Übersicht von POLYAK et al. (2010) für mehr Details). Entsprechende Methoden sind allerdings bisher für das Meereis in der Antarktis kaum zur Anwendung gekommen, weshalb die Diskussion in diesem Kapitel nur für das Meereis der Arktis konkretisiert wird.

Die überwiegende Mehrheit der Methoden, mit denen sich die vergangene Entwicklung des Meereises rekonstruieren lässt, beruht auf der Analyse von Sedimentkernen, die mittels entsprechender Bohrschiffe aus dem Ozeanboden entnommen werden. In diesen

Sedimentkernen sammelt sich im Laufe der Zeit organisches und anorganisches Material an, das von der Meeresoberfläche langsam auf den Meeresgrund gesunken ist. Damit entspricht eine Bohrung in die Tiefe des Ozeanbodens einer Zeitreise durch jene Materialien, die vor teilweise vielen Millionen Jahren von der Meeresoberfläche auf den Boden gesunken sind.

Bei Bohrkernen, die aus der zentralen Arktis gewonnen werden, ergibt sich dabei die Schwierigkeit, dass dort nur sehr wenig Material abgelagert wird, sodass es teilweise mehr als tausend Jahre dauert, bis sich ein Zentimeter Bodenmaterial gebildet hat. Dies führt dazu, dass die zeitliche Auflösung von entsprechenden Messungen nur relativ gering sein kann, während positiverweise damit schon ein Bohrkern von nur wenigen Metern Länge Informationen liefert, die viele Hunderttausend Jahre in die Vergangenheit reichen.

In den Schelfgebieten um die zentrale Arktis herum wird hingegen relativ viel Material abgelagert, sodass dort die zeitliche Auflösung von Bohrkernen entsprechend höher ist. Allerdings lässt sich in diesen vergleichsweise flachen Ozeanregionen das Ozeansediment nur für die jüngere Vergangenheit (seit dem Ende der letzten Eiszeit) zuverlässig rekonstruieren, da während vorangegangener Eiszeiten Gletscher immer wieder bis weit auf die dann häufig trockengefallenen Arktischen Schelfgebiete hinausragten und den Boden entsprechend umwälzten.

Eine der wichtigsten Methoden zur Rekonstruktion von Meereis aus Sedimentbohrkernen beruht auf der Untersuchung der Bohrkernkerne auf deren Inhalt von größeren Sand- oder Steinpartikeln. Während kleinere Partikel auch in der Wassersäule über viele Tausend Kilometer von den Küsten weg transportiert werden können, ist ab einer Größe von etwas über 60  $\mu\text{m}$  der Transport von Sand und Gestein in den zentralen Ozean nur durch das Vorhandensein von Eis zu erklären, in das die entsprechenden Materialien bei der Eisbildung eingelagert wurden. Die Interpretation von entsprechenden Messungen wird dabei allerdings dadurch erschwert, dass man zwischen dem von Meereis transportierten und dem von Eisbergen transportierten Gestein unterscheiden können muss. Dies wird teilweise dadurch ermöglicht, dass Eisberge normalerweise einen größeren Anteil an grobem Sediment mit sich führen als Meereis.

Neben diesem winzigen Gesteinssplittern sind in den Sedimentkernen des Meeresbodens auch biologische Ablagerungen wie zum Beispiel Kieselalgen zu finden, die ebenfalls Rückschlüsse auf die Meereisbedeckung zu lassen, da das Auftreten entsprechender Arten teilweise nur beim Vorhandensein von Eis möglich ist.

In der jüngeren Vergangenheit wurde zusätzlich ein besonderes Augenmerk auf spezielle organische Verbindungen gelegt, insbesondere auf den Biomarker IP25 (BELT & MÜLLER 2013). Dieser Biomarker wird in Bohrkernen aus dem Ozeanboden ausschließlich dann gefunden, wenn die entsprechende Region zum jeweiligen Zeitpunkt von Meereis bedeckt gewesen ist, wobei die Konzentrationen in den Bohrkernen dann besonders hoch zu sein scheint, wenn das Meereis dort nur im Winter auftritt. Im Gegensatz zu den bisherigen Methoden erlaubt es dieser Biomarker daher, recht eindeutig Regionen mit saisonaler Eisbedeckung zu identifizieren.

Andere Methoden zur Rekonstruktion von Meereis beruhen auf der Wechselwirkung von Meereis mit den umliegenden Küsten. So kann zum Beispiel Treibholz nur dann mit dem transpolaren Driftstrom von Sibirien nach Grönland gelangen, wenn es dabei vom Meereis getragen wird. Ansonsten wird das Holz im Laufe der Reise durch die Aufnahme von Wasser so schwer, dass es nicht länger schwimmfähig ist. Im Gegensatz hierzu sind bestimmte Erosionsschäden an den Küste nur dann möglich, wenn in früheren Zeiten die entsprechenden Küstenabschnitte eisfrei waren, sodass die Brandung ungehindert entsprechende Ablagerungen hinterlassen konnte.

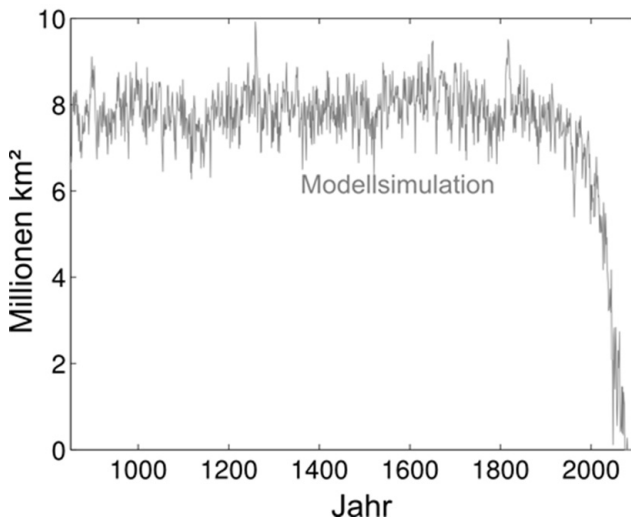
Diese und weitere Methoden erlauben es uns, inzwischen zumindest grob die Entwicklung des Meereises in der Arktis nachzuzeichnen. Entsprechenden Ergebnissen wenden wir uns als nächstes zu, wobei auch hier wieder der Übersichtsartikel von POLYAK et al. (2010) sowie die Studie von POLYAK et al. (2013) für eine detailliertere Übersicht empfohlen werden.

## Die historische Entwicklung von Meereis

Wie eingangs diskutiert, begann etwa zeitgleich mit dem Aussterben der Dinosaurier vor 65 Mio. Jahren eine langsame, immer wieder unterbrochene Abkühlung des Erdklimas. Als augenfällige Unterbrechung dieser Abkühlung sticht insbesondere das Paleozän-Eozän Temperaturmaximum heraus, das vor 50 Mio. Jahren an der Grenze zwischen diesen beiden geologischen Zeiträumen in der Arktis zu Temperaturen von über 20 °C geführt haben dürfte. Die Bildung von Eis war unter diesen Bedingungen weitestgehend ausgeschlossen. Indirekte Nachweise von Landeis deuten darauf hin, dass sich als Folge der sich anschließend fortsetzenden Klimaabkühlung zumindest in der Antarktis vor etwa 47 Mio. Jahren Landeis bilden konnte, gleichzeitig findet man in entsprechenden Bohrkernen vom Boden des Arktischen Ozeans für diese Zeit in der Form von kleinen Sand- und Gesteinsteilchen erste Hinweise auf das Vorhandensein von Meereis im Arktischen Ozean.

Anschließend wir die Datenlage extrem dünn, und halbwegs zuverlässige Abschätzungen zur Eisbedeckung gibt es erst wieder für den Zeitraum von vor etwa 17 Mio. Jahren bis heute. Entsprechende Messungen deuten darauf hin, dass in diesem Zeitraum die Menge an Meereis im Arktischen Ozean anfänglich aufgrund der langsamen globalen Abkühlung und möglicherweise auch aufgrund der Öffnung der Framstraße langsam zunahm, und der Arktische Ozean möglicherweise vor etwa 14 Mio. Jahren zumindest zu Teilen ganzjährig von Meereis bedeckt gewesen sein könnte. In den folgenden Jahrtausenden gab es, wie sich zum Beispiel aus der Analyse von Baumüberresten aus dem entsprechenden Zeitraum ableiten lässt, höchstwahrscheinlich immer wieder ausgedehnte Zeiträume, in denen die Arktis vergleichsweise warm war und keine ausgedehnte Meereisbedeckung trug, insbesondere nicht im Sommer. Insgesamt bleibt die Datenlage im Zeitraum bis vor etwa 1 Million Jahren allerdings vergleichsweise dünn, wobei zusätzlich die Interpretation der vorhandenen Daten nicht immer eindeutig ist. So kann zum Beispiel ein Mangel an eisgetragenen Ablagerungen in Sedimentkernen nicht nur bedeuten, dass es zu den entsprechenden Zeiten kaum Meereis im Arktischen Ozean gab, sondern dass ganz im Gegensatz das Meereis so dick war, dass es sich kaum bewegte und damit kein nennenswerter Transport von Sand und Gestein stattfinden konnte. Entsprechende Studien müssen daher auch immer die Konsistenz ihrer Ergebnisse mit jenen aus anderen Datenquellen abgleichen.

Hier ergibt sich für die vergangenen knapp eine Million Jahre der große Vorteil, dass Daten aus Eisbohrkernen sowohl in Grönland als auch in der Antarktis eine sehr zuverlässige Abschätzung von Temperaturschwankungen in den Polarregionen zulassen. Basierend auf diesen Messungen lässt sich die Ausdehnung von Meereis im Arktischen Ozean zumindest während dieser jüngeren Vergangenheit relativ zuverlässig nachzeichnen. Entsprechende Studien kommen dabei zu dem Ergebnis, das bis vor etwa 800.000 Jahren zumindest weite Teile des Arktischen Ozeans nur im Winter von Meereis bedeckt waren. In der Folge hat sich dieses Eis aber im Rahmen der sich fortsetzenden langsamen Abkühlung des Klimas immer weiter stabilisiert, sodass für die letzten 800.000 Jahre eine ganzjährige Bedeckung des Arktischen Ozeans nach heutigem Kenntnisstand als Normalzustand angesehen werden muss. In den Zwischeneiszeiten kam es allerdings aufgrund der damit einhergehenden Erwärmung immer wieder zu Phasen einer gewissen Abnahme des Meereises, wobei im Moment noch unklar ist, ob der Arktische Ozean in diesem Zeitraum im Sommer jemals komplett eisfrei war.



**Abb. 5.2-1:** Simulation der Ausdehnung des Meereises im September für den Zeitraum 800 bis 2100. Für die Vergangenheit wurde das entsprechende Modell mit Messdaten der äußeren Antriebe betrieben, für die Zukunft wurde angenommen, dass sich die Treibhausgasemissionen nur wenig verringern werden (vgl. JUNGCLAUS et al. 2010).

Mit höherer Zuverlässigkeit können wir aber die Möglichkeit eines eisfreien Sommers für die letzten knapp 5.000 Jahre ausschließen, da es für diesen Zeitraum eine Reihe von Indikatoren gibt, die auf das ganzjährige Auftreten von Meereis zumindest in Teilen der Arktis hindeuten. So findet sich für diesen Zeitraum zum Beispiel an der Nordküste Grönlands so gut wie kein Treibholz mehr, was auf eine ganzjährige starke Eisbedeckung in dieser Region hindeutet, die ein Treiben des Eises und damit den Transport von Treibholz in diese Region weitestgehend unterbunden hat. Für den Zeitraum der letzten 1.450 Jahre erscheint es schließlich äußerst plausibel, dass die Abnahme des Meereises, die wir in den letzten Jahren beobachtet haben, beispiellos ist. Hier liefert insbesondere die Studie von KINNARD et al. (2011) aus Landproxies eine konsistente Abschätzung der Meereisbedeckung im Arktischen Ozean zum Ende des Sommers, deren niedrigste Werte alle in das 21. Jahrhundert fallen. Diese Messdaten stimmen grundsätzlich gut mit Modellsimulationen überein, die für das letzte Jahrtausend ebenfalls die bei weitem niedrigsten Werte der Meereisausdehnung für die jüngere Vergangenheit und, wie unten detailliert beschrieben, möglicherweise die nähere Zukunft sehen (Abb. 5.2-1). Diese Abschätzungen stimmen gut mit direkten Beobachtungen überein, die vor etwa 130 Jahren begannen, wobei diese anfänglich noch recht sporadisch ausfallen, dann aber seit 1953 mit der Zunahme entsprechender Flugzeug- und Schiffsmessungen deutlich zuverlässiger werden. Seit 1979 wird schließlich die Meereisausdehnung von Satelliten erfasst, entsprechende Ergebnisse sind im nächsten Kapitel zusammengefasst.

### Die zukünftige Entwicklung von Meereis

Nach diesem Überblick über die Entwicklung des Meereises weit in die Vergangenheit hinein soll nun zum Abschluss noch ein kur-

zer Ausblick zur möglichen zukünftigen Entwicklung des Arktischen Meereises gegeben werden. Ein solcher Ausblick lässt sich am zuverlässigsten aus Simulationen mit großskaligen Klimamodellen ableiten. Dabei treten allerdings drei grundsätzlich verschiedene Unsicherheiten auf: Erstens hängt, wie schon die Entwicklung des Meereises in den letzten Jahrzehnten, die zukünftige Entwicklung des Meereises im Arktischen Ozean zentral davon ab, wieviel Treibhausgase wir Menschen in die Atmosphäre freisetzen (vgl. Abb. 5.2-2). Diese zukünftigen Emissionen lassen sich allerdings aufgrund eines Fehlens entsprechender politischer Übereinkünfte nach wie vor nicht zuverlässig abschätzen. Daher behelfen sich Klimaforscher damit, verschiedene Möglichkeiten zur zukünftigen Entwicklung der Treibhausgaskonzentration durchzurechnen, um somit darzustellen, welche Auswirkungen mögliche politische Entscheidungen haben würden.

Ein zweiter Unsicherheitsfaktor ergibt sich aus internen Schwankungen im Klimasystem der Erde, die die Entwicklung des Meereises insbesondere auf kürzeren Zeitspannen stark beeinflussen können. Daher sind Abschätzungen der konkreten Meereisentwicklung in einem bestimmten Jahr sehr schwierig, sodass entsprechende Prognosen sich normalerweise auf den Mittelwert über einige Jahrzehnte beziehen.

Ein dritter Unsicherheitsfaktor liegt schließlich in der Qualität der Klimamodelle. Aufgrund der Komplexität des Klimasystems ist es prinzipiell nicht möglich, alle relevanten Prozesse in Klimamodellen wiederzugeben, sodass insbesondere sehr kleinskalige Prozesse nur angenähert wiedergegeben werden können. Entsprechende Annäherungen sind mit gewissen Unsicherheiten belastet, die sich allerdings teilweise durch Vergleiche von Modellsimulationen mit vorliegenden Beobachtungsdaten minimieren lassen. So gibt zum Beispiel die im Mittel gute Übereinstimmung von Modellsimulationen und Beobachtungsdaten der Arktischen Meereisausdehnung begründeten Anlass zu der Hoffnung, dass auch die Simulationen der zukünftigen Entwicklung des Meereises plausibel sind.

Entsprechende Modellstudien kommen zu dem Ergebnis, dass wie auch in der jün-

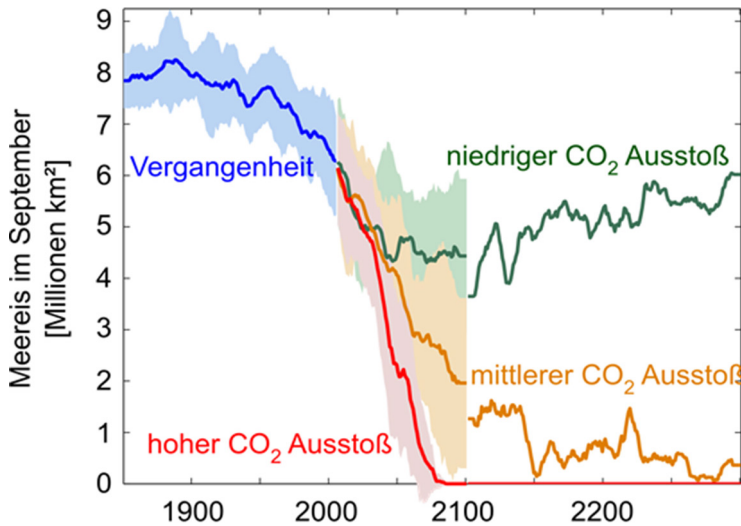


Abb. 5.2-2: Simulation der vergangenen und möglichen zukünftigen Entwicklung der Arktischen Meereisausdehnung im September (Modell: Max-Planck-Institut für Meteorologie Erdsystemmodell MPI-ESM-1.0).

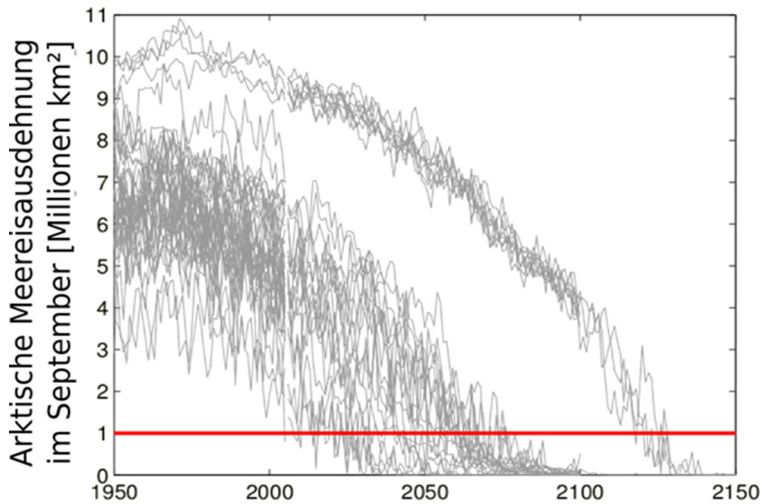


Abb. 5.2-3: Simulationen der Arktischen Meereisausdehnung im September von allen Modellen, die zum letzten IPCC Report beigetragen haben. Für die hier gezeigten Simulationen wurde angenommen, dass der Ausstoß an Treibhausgasen weitestgehend ungebremst weitergeht. Die rote Linie kennzeichnet eine Eisausdehnung von 1 Mio. km<sup>2</sup>, unterhalb der der Arktische Ozean als weitestgehend eisfrei angesehen wird (Basierend auf IPCC 2013).

geren Vergangenheit die zukünftige Entwicklung des Meereises in erster Linie von uns Menschen abhängt. So bleibt zum Beispiel die Ausdehnung des Meereises im Arktischen Ozean sowohl im Winter wie auch im Sommer mindestens bis zum Ende dieses Jahrhunderts etwa auf dem heutigen Niveau, falls es gelingen sollte, die Treibhausgasemissionen in den nächsten Jahrzehnten gravierend zu senken, sodass gegen Ende des Jahrhunderts keine Emissionen mehr auftreten. Andererseits verschwindet in einer Vielzahl von Simulationen, die

eine weitestgehend ungebremste Freisetzung von Treibhausgasen annehmen, schon in wenigen Jahrzehnten das Arktische Meer im Sommer nahezu vollständig (vgl. Abb. 3). Einige dieser Simulationen sagen für das nächste Jahrhundert bei einem weiteren Anstieg der atmosphärischen Treibhausgaskonzentration sogar ein weitgehendes Verschwinden des Meereises im Winter voraus, sodass der Arktische Ozean das ganze Jahr über eisfrei sein würde. Wie wir im letzten Abschnitt gesehen haben, sind wir Menschen damit in der Lage, eine seit vielen Millionen Jahren andauernde Periode zu beenden, während der Meereis eines der Hauptcharakteristika des Arktischen Ozeans gewesen ist.

## Literatur

- BELT, S. T. & J. MÜLLER (2013): The Arctic sea ice biomarker IP25: a review of current understanding, recommendations for future research and applications in paleo sea ice reconstructions, *Quaternary Science Reviews*, 79, pp. 9-25. doi: 10.1016/j.quascirev.2012.12.001.
- KINNARD, C., C. M. ZDANOWICZ, D. A. FISHER, E. ISAKSSON, A. DE VERNAL & L. G. THOMPSON (2011): Reconstructed changes in Arctic sea ice over the past 1,450 years. *Nature* 479 (7374), 509-512.
- JUNGLAUS, J. H., LORENZ, S. J., TIMMRECK, C., REICK, C. H. et al. (2010): Climate and carbon-cycle variability over the last millennium. *Climate of the Past*, 6, 723-737, doi:10.5194/cp-6-723-2010.
- POLYAK, L., ALLEY, R. B., ANDREWS, J. T., BRIGHAM-GRETTE, J. et al. (2010): History of sea ice in the Arctic. *Quaternary Science Reviews* 29 (15) (2010): 1757-1778.
- POLYAK, L., BEST, K. M., CRAWFORD, K. A. et al. (2013): Quaternary history of sea ice in the western Arctic Ocean based on foraminifera. *Quaternary Science Reviews* 79, 145-156.

## Kontakt:

Dr. Dirk Notz  
Max Planck Institut f. Meteorologie,  
Hamburg  
dirk.notz@mpimet.mpg.de

Notz, D. (2015): Historische und zukünftige Entwicklung des Arktischen Meereises. In: Lozán, J.L., H.Grassl, D.Kasang, D.Notz & H.Escher-Vetter (Hrsg.). Warnsignal Klima: Das Eis der Erde. pp. 194-198. Online: [www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de](http://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de). doi:10.2312/warnsignal.klima.eis-der-erde.29