

Kann das Polareis dem wachsenden Treibhauseffekt standhalten?

Die Dicke des über dem Nordpol schwimmenden Polareises nimmt ab. In einer Untersuchung zeigten alle Messpunkte eine durchschnittliche Abnahme der herbstlichen Eisdicke von 3.1 auf 1.8m, d.h. um rund 40%, während den letzten rund 30 Jahren. Auch die Bewohner der Arktis haben in den letzten Jahrzehnten Veränderungen im Meereis festgestellt. Bei anhaltendem Trend ist es möglich, dass in wenigen Jahrzehnten das arktische Meereis im Sommer vollständig wegschmilzt. Dies hätte weitreichende Auswirkungen auf den arktischen Strahlungs- und Wärmehaushalt. In der Folge könnten sich Meeresströmungen und die atmosphärische Zirkulation auf der Nordhemisphäre nachhaltig verändern. Eisfreie Zonen im arktischen Meereis, wie dieses Jahr am Nordpol beobachtet, sind im Sommer nichts aussergewöhnliches, sie könnten aber in Zukunft vermehrt und auch grossflächiger auftreten.

Die auf Festland liegenden Eismassen Grönlands und der Antarktis zeigen hingegen bisher wenig Veränderungen. Zwar ergeben die neusten Untersuchungen in Grönland ein leichtes Abschmelzen in den Randregionen. Ansonsten ist die Bilanz aber ausgeglichen. In der Antarktis wird vor allem die Möglichkeit des Kollapses des westantarktischen Eisschildes im Verlaufe der nächsten Jahrhunderte diskutiert. Dies würde einen Anstieg des Meeresspiegel bewirken. Die Schweiz wäre vor allem von den indirekten Folgen des Abschmelzens betroffen, insbesondere von resultierenden Veränderungen in der atmosphärischen Zirkulation.

Die Meldung, dass Touristen ihr Schiff am Nordpol nicht verlassen konnten, weil dieser eisfrei war, hat in der Öffentlichkeit das Interesse für die möglichen Auswirkungen der Klimaerwärmung auf die Polregionen geweckt. Das mögliche Abschmelzen des Polareises wird schon lange diskutiert. Bisher standen vor allem die Eisschilde der Antarktis und Grönlands im Mittelpunkt der Diskussion. Hier muss klar unterschieden werden: Da letztere auf dem Fest-

land liegen, würde ihr Abschmelzen zu einem deutlichen Anstieg des Meeresspiegel führen. Das Eis über dem Nordpol hingegen schwimmt im Meer, der Meeresspiegel bliebe deshalb beim Schmelzen unverändert (das Volumen des Schmelzwassers entspricht exakt dem vom schwimmenden Eis verdrängten Meerwasser).

Die Dicke des arktischen Eises verändert sich im Jahresverlauf den Temperaturen entsprechend stark. Am Ende des Sommers beträgt sie nur noch wenige Meter. Eisfreie Zonen, die durch das Verschieben grosser Eisplatten als Folge von Wind und Meeresströmungen entstehen, wurden auch früher immer wieder beobachtet. Diesen Sommer befand sich eine solche Stelle zufälligerweise genau über

Kontaktpersonen:

Prof. Wilfried Haeberli, Geographisches Institut, Universität Zürich, Winterthurerstr. 190, 8057 Zürich, Tel.: 01/635 51 20, Fax: 01/635 68 48, e-mail: haeberli@geo.unizh.ch

Dr. G. Hilmar Gudmundsson, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Zentrum, 8092 Zürich, Tel.: 01/632 40 93, Fax: 01/632 11 92, e-mail: gudmundsson@vaw.baum.ethz.ch

Prof. Atsumu Ohmura, Institut für Klimaforschung ETH Zürich, Winterthurerstr. 190, 8057 Zürich, Tel. 01/635 52 20 Fax : 01/635 68 48, e-mail: ohmura@geo.umnw.ethz.ch

Prof. Dr. Eberhard Parlow, Institut für Meteorologie, Klimatologie und Fernerkundung, Universität Basel, Spalenring 145, 4055 Basel, Tel: 061/272 64 80, Fax: 061/272 69 23, e-mail: eberhard.parlow@unibas.ch

Prof. Bernhard Stauffer, Klima- und Umweltphysik, Universität Bern, Sidlerstr. 5, 3012 Bern, Tel: 031-631 44 67, Fax: 031-631 44 05, e-mail: stauffer@climate.unibe.ch

Dr. Jakob Schwander, Klima- und Umweltphysik, Universität Bern, Sidlerstr. 5, 3012 Bern, Tel: 031-631 44 64, Fax: 031-631 87 42, e-mail: schwander@climate.unibe.ch

dem Nordpol. Eine klimabedingte Änderung lässt sich daraus jedoch noch nicht ableiten.

Im folgenden ist nur von den grossen polaren Eisschildern die Rede, andere Eismassen (alpine und polare Gletscher, Permafrost u.a.), deren Veränderungen in wärmerem Klima und ihr Einfluss auf Klima und den Meeresspiegel werden zu einem späteren Zeitpunkt gesondert behandelt.

Meereis: Die Dicke des arktischen Eises nimmt ab

Die eisbedeckte Fläche der Arktis im Sommer, welche heute etwa der Fläche der USA entspricht, nimmt zur Zeit um etwa 3% pro Jahrzehnt ab. Auch im Winter wurde von 1978-1998 eine Abnahme der Fläche um 14% festgestellt. Bei gleichbleibender Schmelzrate würde es weitere 350 Jahre dauern, bis der Arktische Ozean im Sommer eisfrei wäre.

Neuste Messungen zeigen nun, dass diese Entwicklung bedeutend schneller gehen könnte: Einerseits nimmt die Fläche mit mehrjährigem Eis etwa doppelt so schnell ab wie die Gesamteisfläche (ca. 7% pro Jahrzehnt), andererseits konnten erstmals auch Veränderungen der Eisdicke dokumentiert werden. Während der letzten rund 30 Jahre nahm die durchschnittliche Eisdicke am jeweiligen Ende der Schmelzsaison von 3.1 auf 1.8 Meter ab. Dies entspricht einem Rückgang von etwa 40%. Dieser Trend könnte sich noch erhöhen, sobald grössere Flächen eisfrei werden und zusätzliche Wärme aufnehmen können. Der arktische Ozean wäre bei Fortdauer dieser Entwicklung binnen weniger Jahrzehnte am Ende des Sommers eisfrei.

Auch die arktischen Bewohnerinnen und Bewohner haben Veränderungen im Meereis festgestellt. In vielen Gebieten haben sie in den letzten Jahren eine relativ schlechte Eisqualität beobachtet. Auch ist ihnen aufgefallen, dass das Eis in der Beringstrasse in den letzten ungefähr 30 Jahren dünner geworden ist, sich später bildet und früher schmilzt und dass mehr Eisschollen herumtreiben.

Ursachen und zukünftige Entwicklung unklar

Die Ursachen für diese Entwicklung sind schwer zu eruieren. Da nur Messungen für zwei Zeitperioden vorliegen (1958-1976 bzw. 1990-1995), ist praktisch nichts über die natürlichen Schwankungen der Eisdicke bekannt. Die Freigabe der Daten der US-Marine könnte hier gewisse Lücken schliessen. Einer der möglichen Einflussfaktoren ist die sogenannte Arktische Oszillation (AO), ein polares Pen-

dant zur Nordatlantischen Oszillation (NAO). Die AO verändert die Druckverhältnisse über der Polregion. In ihrer positiven Phase, welche seit 1989 anhält, wird unter anderem wärmere Luft in die Arktis geführt, die zur Abnahme der Eisdicke beitragen könnte. Modellrechnungen deuten darauf hin, dass der gestiegene Treibhauseffekt einerseits die AO in ihren Extremzustand getrieben haben könnte, andererseits aber auch durch die Klimaerwärmung direkt zum Abschmelzen des Eises beigetragen hat. Zwar wird die Wahrscheinlichkeit, dass es sich bei der beobachteten Veränderung um eine ausschliesslich natürliche Schwankung handelt, als ziemlich gering eingeschätzt, doch ist aufgrund der vorhandenen Daten noch keine Prognose für die zukünftige Entwicklung möglich.

Drastische Folgen möglich

Das Abschmelzen des Polareises am Nordpol hätte keinen Einfluss auf die Höhe des Meeresspiegels. Hingegen würde sich der arktische Ozean von einem weissen Reflektor (80% des Sonnenlichts wird in den Weltraum zurückgesandt) in einen Wärmekollektor verwandeln, der nur noch 10% reflektiert, also 90% der Sonnenenergie aufnimmt. Die regionale Erwärmung würde dadurch verstärkt, was zu einer drastischen Veränderung der ozeanischen und atmosphärischen Strömungen führen könnte. Spürbare Folgen für unsere Breiten hätten v.a. die mögliche Umleitung des Golfstroms sowie die Veränderung der Lage der Druckzentren (z.B. Azorenhoch) oder der Zugbahnen der Tiefdruckgebiete.

Festlandeisschilder: Nur langsame Veränderungen in Grönland und der Antarktis

Die Auswirkungen des Abschmelzens der Festlandeisschilder hätte primär eine Erhöhung des Meeresspiegels zur Folge. Der mögliche Einfluss einer Klimaveränderung auf das Eisvolumen ist allerdings unsicher, da zwei gegensätzliche Effekte auftreten: Auf der einen Seite schmilzt an den Rändern mehr Eis, auf der andern Seite wird aufgrund der stärkeren Schneefälle in einem wärmeren und feuchteren Klima auch mehr Eis im Landesinnern gebildet. Welcher der beiden Prozesse überwiegt, ist bisher noch unklar.

Die Veränderungen innerhalb der Festlandeisschilder verlaufen jedoch sehr langsam. In den nächsten Jahrzehnten wird deshalb von dieser Seite kein massgeblicher Beitrag an die Meeresspiegelerhöhung erwartet. Diese wird im Moment hauptsächlich durch das Abschmelzen von kleineren (alpinen und polaren) Gletschern und durch die

erwärmungsbedingte Ausdehnung des Meerwasservolumens bestimmt.

Eine Abschätzung der Massenbilanz für die Antarktis aus verschiedenen Messungen ergab ein Abschmelzen des Schelf-Eises, welches auf dem Meer schwimmt und deshalb ohne Einfluss auf den Meeresspiegel bleibt, sowie eine geringe Zunahme der Landeismasse. Oft diskutiert wird der Kollaps des Westantarktischen Eisschildes. Dieser würde langfristig einen Anstieg des Meeresspiegels um 5-6 Meter bewirken und die globale Zirkulation des Ozeans beeinträchtigen (Veränderung der Tiefenwasserbildung). Dieser Prozess dauert jedoch einige hundert Jahre und würde nach den heutigen Kenntnissen erst in rund hundert Jahren langsam spürbar.

Beim grönländischen Eisschild führt zur Zeit das Abschmelzen am Rand der Eismasse, in der Bilanz zu einer leichten Reduktion des Gesamtvolumens, welche einem Meeresspiegelanstieg von etwas mehr als 1 mm in 10 Jahren entspricht. Dies macht weniger als 10% des gegenwärtigen Anstiegs aus. Allerdings fehlen hier langjährige Messreihen, und wegen der grossen natürlichen Variabilität sind Trends sehr schwer zu bestimmen.

Enorme Schwankungen in der Vergangenheit

Am Höhepunkt der letzten Eiszeit vor rund 20'000 Jahren war das Landeisvolumen rund 2,6 mal grösser als heute (heutiger Wert: ca. 32 Mio. km³). Der Meeresspiegel lag dementsprechend etwa 120-130 Meter tiefer als heute. Während der letzten Zwischeneiszeit vor rund 120'000

Jahren, als es noch etwas wärmer war als zur Zeit, lag der Meeresspiegel etwa 6 Meter höher als heute. Nach dem gegenwärtigen Wissenstand scheinen sowohl der grönländische als auch der westantarktische Eisschild einen Beitrag zu diesem Anstieg geleistet zu haben. Unklar ist jedoch, wie sich diese Eismassen in der Vergangenheit verändert haben und ob es tatsächlich einmal zu einem vollständigen Kollaps der Eisschilde gekommen ist, wie er für die Zukunft befürchtet wird. Der westantarktische Eisschild wird deshalb besonders unter die Lupe genommen, weil er teils auf dem Land, teils im Meer liegt und relativ schnell fliessende Eisströme aufweist.

Indirekte Folgen für die Schweiz

Die Schweiz ist von einem Anstieg des Meeresspiegels nicht direkt betroffen. Die Eisschilde beeinflussen jedoch das ganze globale Klima. Veränderungen in der Eisbedeckung beeinflussen u.a. die Meeresoberflächentemperaturen, die Ozeanströmungen, die kontinentalen Wasserbilanzen und die Albedo (Reflektionsvermögen der Erdoberfläche) in bedeutendem Mass. Alle diese Faktoren wirken sich auf das Klima, insbesondere auch auf die atmosphärische Zirkulation (Druckverteilung und Strömungsmuster) und deren zyklische Schwankungen (z.B. Nordatlantische Oszillation, El Niño) aus. Solche indirekte Wirkungen können grössere Veränderungen hervorrufen als der direkte Einfluss der globalen Erwärmung.

Internetseiten

<http://www.ifm.uni-kiel.de/me/research/Projekte/SeaIce/SeaIce-var.html#climate>

Modellierung der Schwankungen der Arktischen Meereisbedeckung: Allgemeine Erklärungen zum Meereis, Modellresultate zur Entwicklung der Ausdehnung und der Dicke des arktischen Eises, weiterführende Literatur.
Quelle: Institut für Meereskunde, Universität Kiel.

<http://www.gfdl.gov/~kd/KDwebpages/NHice.html>

Viele Farbdarstellungen und Grafiken zur gemessenen und modellierten Veränderung des Polareises.
Quelle: Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, NOAA, Princeton, New Jersey

http://www.glacier.rice.edu/land/5_antarcticicesheet-intro.html

Zahlreiche allgemeine Informationen und Erklärungen zum Antarktischen Eisschild und seine Veränderungen in der Vergangenheit und Zukunft. Zusätzliche Informationen zur Antarktik (Wetter, Ozean, Geologie etc.) unter **<http://www.glacier.rice.edu>**.
Quelle: William Marsh Rice University, Texas, U.S.A

News aus der Literatur

Extremereignisse in wärmerem Klima:

Mehr heiße Sommertage, weniger Kältewellen, häufigere Starkniederschläge, mehr Schlechtwetterperioden

Eine Gruppe von führenden Fachleuten hat im Wissenschaftsmagazin *Science* (22. Sept., Vol. 289, S. 2068ff) das vorhandene publizierte Wissen zu den Auswirkungen der Klimaänderung auf Extremereignisse zusammengetragen. Dabei wurden einerseits die gemessenen Veränderungen im 20. Jahrhundert in verschiedenen Regionen der Erde, andererseits die aufgrund von Modellrechnungen prognostizierte zukünftige Entwicklung beurteilt. Je nachdem, wie gut die verschiedenen Messreihen bzw. Modellresultate miteinander übereinstimmen, wurde jeweils die Wahrscheinlichkeit für eine bestimmten Entwicklung klassiert (z.B. 'sehr wahrscheinlich', 'möglich', etc.).

Bei mehreren, aufgrund von Statistiken leicht eruierten Extremwerten (hauptsächlich betreffend Temperatur und Niederschläge) stimmen die im 20. Jahrhundert beobachteten Trends weitgehend mit den von den Klimamo-

dellen prognostizierten überein. Als 'praktisch sicher' wird der beobachtete Anstieg der Minimaltemperaturen eingestuft, eine Entwicklung, die auch aufgrund der Modellresultate als 'sehr wahrscheinlich' gilt. Weitere, bereits beobachtete und in Zukunft sich höchstwahrscheinlich fortsetzende Trends sind höhere Maximaltemperaturen, mehr heiße Sommertage sowie häufigere starke Ein- oder Mehrtagesniederschlagsereignisse.

Weniger klar ist das Bild bei komplexeren, von vielen Faktoren beeinflussten Einzelereignissen: Als 'sehr wahrscheinlich' gilt der Trend zu weniger Kältewellen, als 'wahrscheinlich' die Zunahme von Schlechtwetterperioden. Mehr Trockenperioden hingegen werden zwar von vielen Modellen vorausgesagt, aber zur Zeit noch nirgends beobachtet. Sowohl aufgrund der Messungen als auch der Modelle werden intensivere Stürme in den mittleren Breiten (z.B. Mitteleuropa) sowie intensivere El Niño-Ereignisse als 'mögliche' Entwicklung eingestuft. Als eher unwahrscheinlich gilt hingegen die Zunahme der Häufigkeit und Intensität von tropischen Stürmen (Taifune, Hurrikane).