



Klimageschichte

Der Arktische Ozean – ein Frühwarnsystem für globale Umweltveränderungen

Eines der letzten naturwissenschaftlichen Projekte im Akademienprogramm erforscht den Klimawandel in der Arktis gestern, heute und morgen. Die Erkenntnisse helfen, globale Umweltveränderungen besser zu verstehen.

VON JÖRN THIEDE, HENNING BAUCH UND ROBERT SPIELHAGEN

Abb. 1: Wolkenformationen über Spitzbergen, Svalbard-Archipel.

Wasser im Klimasystem und die bipolare Vereisung

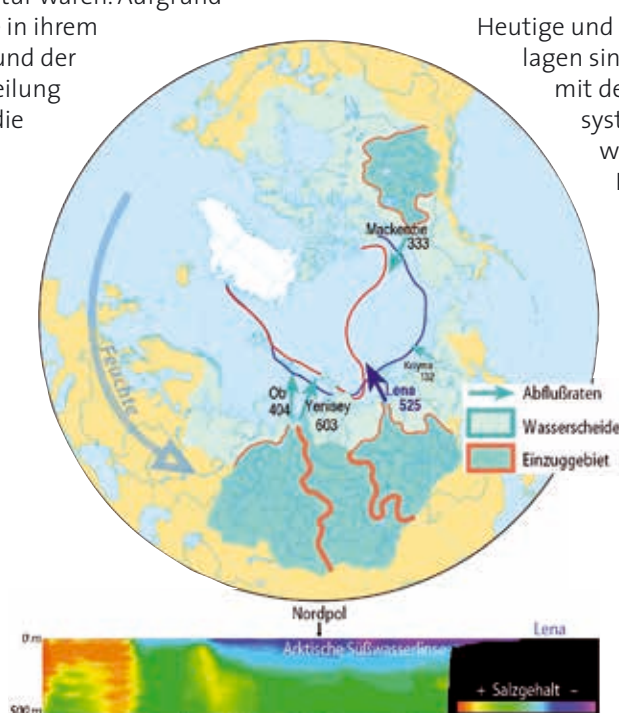
Die Erde ist ein von Wasser geprägter Planet: Mehr als zwei Drittel der Oberfläche sind von Wasser bedeckt. Dieser Stoff spielt eine extrem wichtige Rolle für nahezu alle Lebewesen, sowohl als Lebensraum als auch zur Lebensgrundlage. Viele Wasserstudien berücksichtigen jedoch kaum, dass fast 70 Prozent der Süßwasservorräte dieser Erde in destillierter Form in den großen polaren Eisschilden der Antarktis (25,7 Mio. km³) und Grönlands (2,8 Mio. km³) gebunden sind. Das moderne Klimasystem, in dem Wasser als Transportmedium für Wärme eine herausragende Rolle spielt, unterliegt gegenwärtig dramatisch schnellen Veränderungen. Der neueste Weltklimabericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2014) äußert die Befürchtung, dass durch die gegenwärtige Erwärmung die Eisschilde und die sie umgebenden Meereisflächen schnell schrumpfen. Während der letzten Eiszeit war über Verdunstung und Niederschlag so viel Süßwasser in die hohen nördlichen und südlichen Breitengrade transportiert worden, dass dort unter dem Einfluss der niedrigen eiszeitlichen Temperaturen riesige Eiskappen (auf der Antarktis, in Nordamerika und im nordwestlichen Eurasien mit einem weltweit ca. 135 Meter tieferen Meeresspiegel) wachsen konnten, deren bescheidene Reste in der heutigen Eisbedeckung Grönlands und der Antarktis bewahrt sind.

Der Planet Erde hat im Laufe seiner Geschichte viele Vereisungsphasen durchlaufen, die sehr unterschiedlicher Natur waren. Aufgrund der Stellung der Erde in ihrem Orbit um die Sonne und der Geographie der Verteilung von Land und Meer, die sich erst durch die plattentektonischen Bewegungen in der Erdneuzeit entwickelt hat, wird das Klimasystem der jüngsten geologischen Vergangenheit durch eine bipolare Vereisung und große Tempera-

turunterschiede zwischen polaren und tropischen Klimazonen geprägt. Da die Klimazonen hoher nördlicher und südlicher Breitengrade grundsätzliche geographische Unterschiede aufweisen und Veränderungen in der Arktis unmittelbare Bedeutung für unsere eigenen Lebensumstände haben, konzentriert sich das Mainzer Akademievorhaben „Frühwarnsysteme für globale Umweltveränderungen“ darauf, Geschwindigkeit und Regionalität von Umweltveränderungen in den polaren und subpolaren Meeres- und Landgebieten der Nordhemisphäre zu bestimmen. Klimaveränderungen erfolgen und erfolgten dort in der Regel früher, dramatischer und schneller als in der Südhemisphäre und besitzen oft sogar weitreichende Fernwirkungen für südlichere Gebiete der Erde.

Abbildung 2 zeigt die Verteilung von Land, Eis und Meer auf der Nordhemisphäre. Die Niederschläge über Nordeurasien werden hauptsächlich von feuchten Luftmassen von Westen her gespeist, die damit einen wichtigen Einfluss auf die Flusssysteme der großen sibirischen Ströme haben, die in das Nordpolarmeer münden. Die Seen und Permafrostgebiete Nordsibiriens und das angrenzende Nordpolarmeer enthalten hervorragende Klimaarchive, die es zu enträtseln gilt und die im Vergleich als „Frühwarnsystem“ für die Auswirkungen zukünftiger Klimaveränderungen genutzt werden können.

Wechselwirkungen zwischen den „polaren“ Kontinenten und den Polarmeeren der Nordhemisphäre



Heutige und vergangene Eisrandlagen sind im Zusammenhang mit dem arktischen Klimasystem von besonderem wissenschaftlichen Interesse, da hier schnelle Umweltveränderungen ablaufen, die auch in geologischen Archiven (z. B. Sedimentablagerungen) dokumentiert werden. Die geographischen Gegebenheiten in der Arktis spielen für das Klimasystem eine wichtige Rolle. Ursprünglich ein wesentlicher Teil der beringischen Landmasse, unterlagen

Abb. 2: Klimarelevante Elemente der Geographie der Nordhemisphäre. Grönland wird zum allergrößten Teil noch vom Rest einer eiszeitlichen Eiskappe bedeckt, während die nördlichen Gebiete von Eurasien und Nordamerika heute meist eisfrei sind. Die Hydrographie des relativ kleinen und nur über schmale Meeresstraßen mit dem Weltmeer verbundenen Nordpolarmeeres wird stark vom Süßwasserzustrom aus Nordsibirien (Abflüsse aus den Strömen in km³/Jahr; die Lena ist der wichtigste) und Nordamerika beeinflusst, weil sich an seiner Oberfläche eine dünne Schicht von Brackwasser gebildet hat, die größtenteils von einer 2 bis 4 m mächtigen Meereisdecke überzogen ist. Mächtigkeit und Ausdehnung dieser Meereisdecke verringern sich zur Zeit dramatisch (sommerliche Meereisbedeckung: blau 1979 bis 2000; rot 2007).

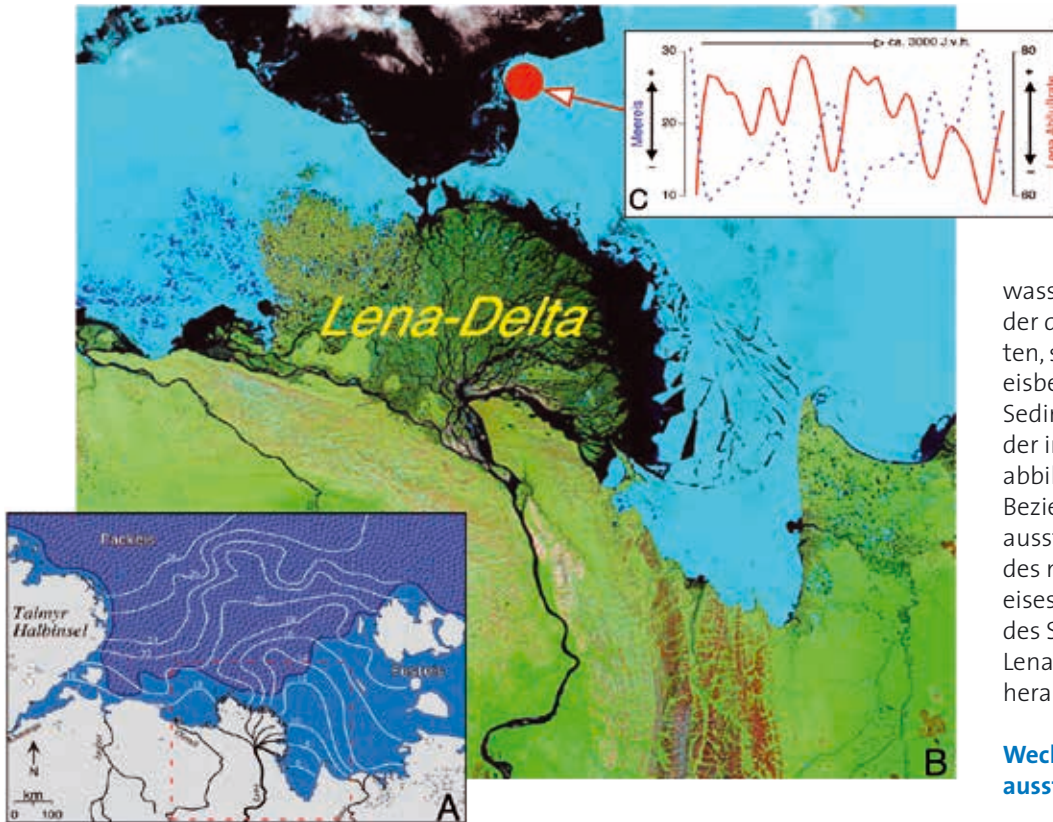


Abb. 3: A) Übersichtskarte der Laptevsee mit winterlichem Pack- und Festeis. Klar zu erkennen ist die Dominanz vom Flusswasser der Lena auf den durchschnittlichen Salzgehalt im Oberflächenwasser (weiße Linien). B) Typische Satellitenaufnahme des Lena-Deltas für Ende Juni (Ausschnitt s. roter Rahmen in A). Das mit dem Land verbundene so genannte Festeis (blau) beginnt sich aufzulösen und wird bis in den August hinein gänzlich verschwunden sein. Der rote Punkt markiert die Position eines untersuchten Sedimentkerns (C) von der Pack-Festeisgrenze, an dem mit Hilfe von Kieselalgen (Diatomeen) relative Veränderungen der Eisbedeckung sowie des Ausstroms von Lenawasser (über den Salzgehalt) für den Zeitraum der letzten 3.000 Jahre rekonstruiert wurden.

die heute flachen sibirischen Nebenmeere seit dem Beginn des globalen Meeresspiegelanstiegs vor ca. 20.000 Jahren ausgeprägten, dynamischen Veränderungen. Die Überflutung der eiszeitlich trocken liegenden heutigen Schelfmeere ging einher mit einem sukzessiven Rückzug aller sibirischen Flussmündungen nach Süden. Die Umwandlung in einen marinen Ablagerungsraum war vor ca. 5.000 Jahren abgeschlossen, so dass sich dann das heutige Umweltsystem ausbilden konnte (Abb. 3).

Die hydrologischen und kryologischen Bedingungen in den neugeformten Flachmeeren, d. h. die zeitliche Veränderlichkeit von Abflussraten der mittelsibirischen Flüsse sowie der Meereisbildungsraten, wurden damit ein integraler Bestandteil des heutigen arktischen Klimageschens. Abgestorbene mikroskopische Kleinstlebewesen (Mikrofossilien), die sich an unterschiedliche Milieus wie Süß- bzw. Salzwasser angepasst haben, geben Zeugnis der zeitlichen Veränderungen der Umweltbedingungen in den letzten Jahrtausenden. Am Fallbeispiel der Laptevsee, die maßgeblich durch den enormen Süßwasserausstoß des Flusses Lena geprägt ist, konnten diese mithilfe einzelliger Kieselalgen rekonstruiert werden. Demnach zeigt die Zusammensetzung unterschiedlicher Algenvergesellschaftungen (Eis-, Süßwasser-, Meer-

wasserdiatomeen) in Oberflächensedimenten der Laptevsee einen engen Zusammenhang mit dem durch das Flusswasser gesteuerten Salzgehalt und der durch Meereisbildung bedingten, sich alljährlich ausbildenden eisbedeckten Phase. Anhand eines Sedimentkerns vom Meeresboden, der in etwa die letzten 3.000 Jahre abbildet, konnte die zeitliche Beziehung zwischen Flusswasserausstoß auf der einen und Position des mobilen winterlichen Meereseis (Packeis) relativ zur Position des Sedimentkerns nördlich des Lena-Deltas auf der anderen Seite herausgearbeitet werden (Abb. 3).

Wechselwirkungen von Süßwasserausstrom und Klima in der Arktis

Während der Eiszeiten kam es vor allem in der jüngeren geologischen Vergangenheit, also in den letzten 200.000 Jahren, zu radikalen Veränderungen im hydrologischen System der Arktis. Mehrere z. T. einige Kilometer dicke Eisschilde blockierten die Abflusswege vieler der riesigen Stromsysteme (z. B. Ob/Irtysh, Jenissei, Mackenzie). Das Süßwasser staute sich daher südlich der Eiskappen und bildete z. B. im Gebiet des heutigen Russlands ausgedehnte Seen, deren Gesamtfläche etwa der von Nord- und Ostsee entsprach (Abb. 4). In einigen Bereichen der sibirischen Nordküste finden sich entsprechende Ablagerungen aus diesen Seen heute in geologischen Aufschlüssen. Als das Wasser eine von den morphologischen Gegebenheiten abhängige Stauhöhe erreicht hatte, suchte es sich aus den Seen neue Abflusswege, die mitunter für eine Umkehrung der Fließrichtung sorgten, so dass ein Teil des Wassers über das Schwarze Meer schließlich das Mittelmeer erreichte. Als gegen Ende der Vereisung die Eisschilde zerbrachen und sich die Gletscher in die Gebirgsregionen zurückzogen, öffneten sich wieder Abflusswege nach Norden, über die sich die Eisstauseen in den Arktischen Ozean entleeren konnten. Die Tiefseeablagerungen haben dort die Umweltveränderungen auf den umgebenden Kontinenten und die Variabilität des Süßwasserzustroms detailliert aufgezeichnet: Während in Zeiten großflächiger Vereisungen die von den Gletschermassen abbrechenden Eisberge große Mengen von z. T. sehr grobkörnigem Material in den Arktischen Ozean transportierten (massive dunkelgraue Lagen), zeugen die etwas jüngeren, stark geschichteten

Lagen von der vermutlich schubweise erfolgten Entleerung der Seen (Abb. 4). Kurzfristig, über Jahrzehnte bis Jahrhunderte, muss wegen des starken Süßwasserzustroms der Salzgehalt des Oberflächenwassers im Arktischen Ozean drastisch abgesenkt worden sein und ein großer Teil dieses salzarmen Wassers auch den Nordatlantik erreicht haben. Computer-basierte Klimamodelle, die die Veränderlichkeit von Ozean, Atmosphäre und Klima koppeln, haben aufgezeigt, dass der globale Wärmetransport mit dem weltumspannenden ozeanischen Strömungssystem höchst empfindlich auf derartige Veränderungen im Salzgehalt des Ozeans im nördlichsten Nordatlantik reagiert, wo die so genannte „Tiefenwassererneuerung“ die globale Zirkulation antreibt. Durch Untersuchungen an verschiedenen Sedimentkomponenten wie Mikrofossilien und mit geochemischen Methoden, etwa Sauerstoffisotopenmessungen, kann tatsächlich nachgewiesen werden, dass es unmittelbar nach starken „Süßwasserereignissen“ zu einer globalen oder hemisphärischen Kälteperiode kam, weil sich die Ozeanzirkulation abgeschwächt hatte.

Die eiszeitlichen Extremereignisse können, in deutlich abgeschwächter Form, durchaus als Beispiel für zukünftige Klimaveränderungen dienen. Im letzten halben Jahrhundert, das geprägt war von einer starken Zunahme der globalen und insbesondere der arktischen Lufttemperaturen, konnte eine deutliche Zunahme des Süßwasseranstroms vieler Flüsse in den Arktischen Ozean gemessen werden. Als Ursache wird ein verstärkter Feuchtigkeitstransport in der wärmeren Luft mit den vorherrschenden Westwinden über dem nördlichen Eurasien angenommen. Diese Süßwasserzufuhr kann im Laufe der nächsten 50 bis 100 Jahre gemeinsam mit Schmelzwasser der abtauenden grönländischen Gletschermassen im Nordatlantik den Salzgehalt im Oberflächenwasser signifikant verringern. Auch wenn dadurch die Tiefenwassererneuerung und der nordwärts gerichtete Wärmetransport abgeschwächt werden sollten, wird es tendenziell eher nicht zu einer Abkühlung in Europa kommen, wie noch vor einiger Zeit befürchtet. Klimamodelle haben vielmehr gezeigt, dass der durch den verstärkten Treibhaus-

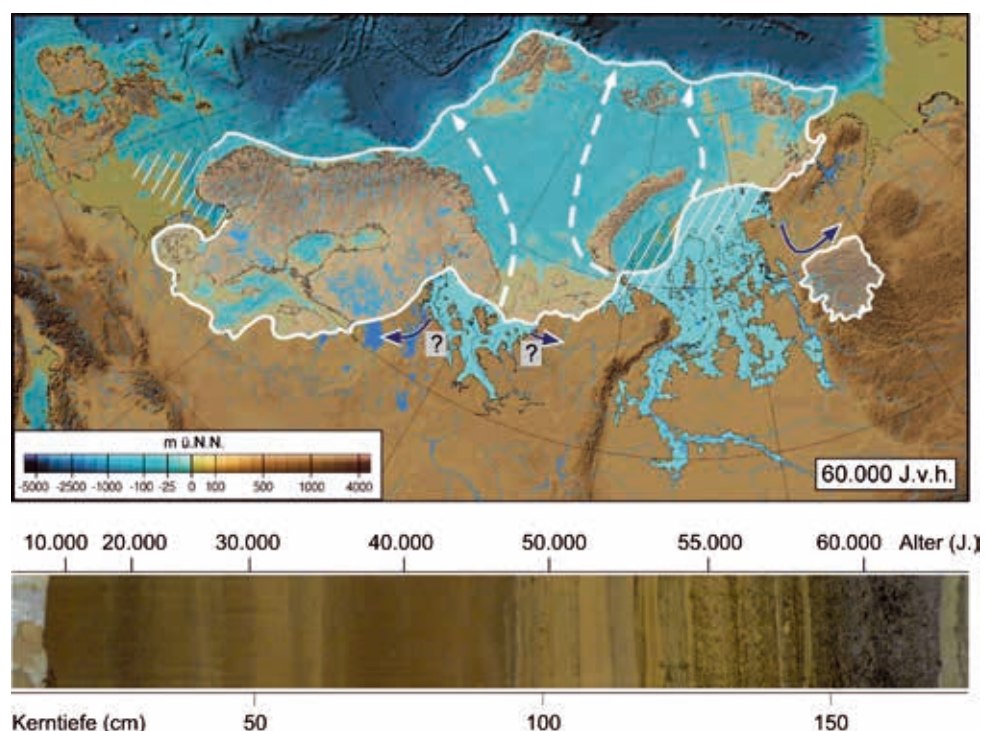
effekt verursachte Temperaturanstieg weitaus stärker wiegt. Nach speziellen Computerszenarien wird bei einem globalen Anstieg um 5 °C die Erwärmung in Westeuropa etwa 1 bis 1,5 °C geringer ausfallen.

Einsetzen der Vereisung der nördlichen Hemisphäre und langfristige Änderungen der sibirischen Flussläufe

Wann die Vereisung der Nordhemisphäre eingesetzt und wie sie sich zeitlich verändert hat, darüber wird seit langem spekuliert. Im Jahre 2004 wurden Tiefseebohrungen in unmittelbarer Nähe des Nordpols vorgenommen, weil ein reflexionsseismisches Profil des Forschungsschiffes „Polarstern“ aus dem Jahre 1991 eine scheinbar ungestörte Sedimentabfolge auf dem Lomonosow-Rücken erkennen ließ. Man hoffte, so die Umweltgeschichte des Nordpolarmeeres in der Erdneuzeit, also während der letzten ca. 66 Millionen Jahre, entziffern zu können. Die gewonnenen Bohrkerne enthielten groben, eistransportierten Gesteinsschutt und belegen damit, dass das Nordpolarmeer vor ca. 48 Millionen Jahren zu vereisen begann – also wesentlich früher, als bisher angenommen. Leider weisen die Schichtabfolgen zwei große Lücken auf, so dass die Frage nach dem Beginn der ganzjährigen Eisbedeckung weiterhin offen bleiben muss.

Unmittelbar vor dem eistransportierten Material sind in den Bohrkernen Sporen des Süßwasserfarms *Azolla* enthalten, der heute in subtropischen

Abb. 4: Oben: Rekonstruktion der Eiskappe über dem nördlichen Eurasien vor ca. 60.000 Jahren mit Ausdehnung der Eisstauseen am südlichen Rand. Schwarze Pfeile bezeichnen die möglichen Abflussrichtungen der Seen. Unten: Sedimentkern aus dem zentralen Arktischen Ozean (ca. 1.000 m Wassertiefe) mit Tiefenskala und Altersangaben. Die dunkle Lage wurde im Ozean während der Zeit maximaler Eisausdehnung an Land abgelagert. Die stark geschichteten Sedimente (Alter: ca. 49.000 bis 58.000 Jahre) wurden während des langsamen Zerfalls der Eismasse und des Süßwasserausstroms aus den Eisstauseen (gestrichelte weiße Pfeile) abgelagert und deuten auf rasch wechselnde Umweltbedingungen im Arktischen Ozean zu dieser Zeit hin.



DIE AUTOREN

Der Geologe und Paläontologe Prof. Dr. Jörn Thiede war bis 2007 Direktor des Alfred-Wegener-Instituts für Polar- und Meeresforschung sowie Gründungsdirektor des Helmholtz-Zentrums für Ozeanforschung GEOMAR in Kiel, wo er heute noch tätig ist. Zudem forscht er an der Staatlichen Universität von St. Petersburg. Er ist Mitglied der Akademie der Wissenschaften und der Literatur Mainz, wo er das Vorhaben „Frühwarnsysteme für globale Umweltveränderungen und ihre historische Dokumentation in natürlichen Klimaarchiven“ leitet, das am GEOMAR durchgeführt wird. Dr. Henning Bauch und Dr. Robert Spielhagen sind wissenschaftliche Mitarbeiter des Forschungsprojekts.

Gebieten vorkommt. Das so genannte Azolla-Event weist den ersten massiven Einstrom von Süßwasser in das Nordpolarmeer nach, ein Ereignis, das eventuell die Bildung einer ganzjährigen Meereisdecke und damit eine generelle Abkühlung der Nordhemisphäre bewirkte. Der Hintergrund für diese Prozesse ist womöglich in Veränderungen der großräumigen plattentektonischen Konfigurationen zu suchen.

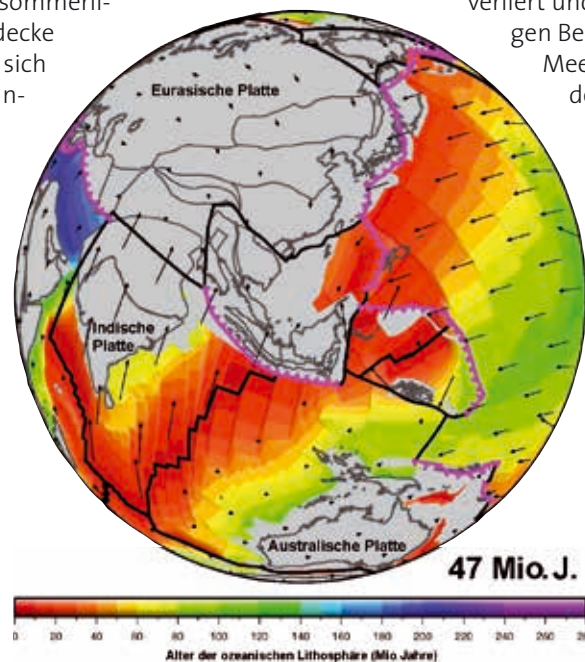
Die Geographie Sibiriens wird durch die großen Stromsysteme gekennzeichnet, die nahezu alle nach Norden in das Nordpolarmeer fließen. Über Geschichte und Entwicklung dieses Abflussmusters ist nur wenig bekannt. Es ist möglich, dass es durch ein plattentektonisches Ereignis stark verändert wurde (Abb. 5), als im Alttertiär der indische Subkontinent seine Wanderung von Süden nach Norden mit der Kollision mit dem südlichen Kontinentalrand der eurasischen Platte beendete und sich die süd- und zentralasiatischen Faltengebirge und Hochplateaus zu bilden begannen. Damals wurde die sibirische Platte so gekippt, dass die großen Flüsse nach Norden strömten und nun dem Nordpolarmeer viel Süßwasser zuführten. Die oberflächliche Wasserschicht verbrackte, und es konnte sich damit leichter eine Meereisdecke ausbilden. Damit hätten die sibirischen Ströme, die heute in das Nordpolarmeer münden, ebenfalls eine lang zurückliegende Entwicklung durchlaufen.

Abschätzbare Entwicklungen in der Zukunft

Wenn die vom IPCC für die nächsten 80 bis 100 Jahre vorhergesagte globale Erwärmung eintritt und damit die sommerliche arktische Meereisdecke verschwindet, würden sich unsere Lebensbedingungen einschneidend verändern, z. T. zum Besseren, z. T. zum Schlechteren:

- Die Existenz der Meereisdecke hat einen nachhaltigen Einfluss auf die Albedo der Nordhemisphäre. Ihr Verschwinden würde die Erwärmung des Nordpolarmeeres und damit die globale Erwärmung nachhaltig beschleunigen.
- Ein zumindest saisonal eisfreies Nordpolarmeer würde dazu führen, dass kommerziell nutzbare marin lebende Ressourcen einwandern, z. B. Fische. Der Preis dafür wäre die Zerstörung der Lebensgrundlagen von Ökosystemen, die an das Vorhandensein von Eis gebunden sind.
- Die Ausbeutung von nicht-lebenden marinen Ressourcen (Rohstoffen) im Nordpolarmeer wäre weniger gefährlich als unter den gegenwärtigen Bedingungen.
- Die Öffnung der nordwestlichen und nordöstlichen Seewege, u. U. auch direkt über das zentrale Nordpolarmeer, würde die Schifffahrtsrouten zwischen Europa und dem Fernen Osten wesentlich verkürzen.
- Die Lebensbedingungen der Gesellschaften in den gemäßigten Breitengraden würden sich wahrscheinlich verbessern, aber die Lebensgrundlage der an die hohen Breitengrade angepassten indigenen Bevölkerungen würde zerstört werden.
- Das Auftauen des Permafrostes würde enorme Mengen von Treibhausgasen freisetzen und eine schwere Störung (oder gar Zerstörung) der technischen Infrastruktur von weiten Gebieten Nord Sibiriens und Nordamerikas bedeuten.

Abb. 5: Plattentektonische Rekonstruktion für das frühe Eozän, vor etwa 47 Millionen Jahren, als der indische Subkontinent den südlichen Kontinentalrand Eurasiens erreichte. Das Alter der Ozeanböden (in Millionen Jahren) ist über den Farbcode (unten) ablesbar. Die schwarzen Linien in den Ozeanen zeigen die Lage der damaligen Plattengrenzen.



Alle Beobachtungen deuten darauf hin, dass der grönländische Eisschild schnell an Masse verliert und damit einen wichtigen Beitrag zum weltweiten Meeresspiegelanstieg von derzeit etwas mehr als 3 mm pro Jahr leistet. Bei weiterer Destabilisierung der Eisschilde auf Grönland und in der Antarktis könnte der Meeresspiegel auch kurzfristig um mehrere Dezimeter bis Meter steigen, mit dramatischen Konsequenzen für die Weltbevölkerung. ■