

# Das Ende der letzten Eiszeit

Einst bedeckte ein riesiger Eispanzer Nordeuropa und die Barentssee. Dann, vor etwa zehntausend Jahren, verschwanden die Eismassen plötzlich. Eine ähnliche Situation könnte nach Ansicht von Glaziologen derzeit am Südpol entstehen. Dadurch würde der Meeresspiegel um sechs Meter ansteigen.

Von Martin J. Siegert, Julian A. Dowdeswell, John-Inge Svendsen und Anders Elverhøi

**D**em Amerikaner John Mercer fiel in den 1970er Jahren, als die globale Erwärmung noch längst nicht ins öffentliche Interesse gerückt war, etwas auf, das ihm Angst machte. Der Glaziologe der Ohio State University bemerkte, dass die Geografie der Westantarktis derjenigen der eurasischen Arktis in der Barentssee auffallend ähnelte: Beide polaren Regionen besitzen einen ausgedehnten, nur wenige hundert Meter tiefen Kontinentalschelf.

Der Hauptunterschied bestünde darin, machte Mercer sogleich klar, dass derzeit auf der Westantarktis eine 2,5 Kilometer dicke Eisdecke lastet; dagegen sei die eurasische Arktis auf dem Meeresgrund heute vergleichsweise eisfrei. Sollte die globale Erwärmung fortschreiten, bestünde nach Mercer jedoch die reale Gefahr, dass auch der gewaltige Eispanzer der Westantarktis abschmelzen könnte. Dadurch würde den Ozeanen genügend Wasser zugeführt, um den Meeresspiegel global um sechs Meter anzuheben. Weltweit würden zahllose Küsten überflutet.

Der amerikanische Forscher wusste, was zu tun war: Um beurteilen zu können, ob die Eisdecke der Westantarktis tatsächlich bedroht ist, sollte man nach einem vergleichbaren Ereignis suchen – in den Spuren der letzten Eiszeit, die den Norden Europas und Asiens bedeckten. Seitdem befassen sich Geowissenschaftler intensiv mit diesem Problem. Ihre Arbeit erhellte bald die gesamte Geschichte der eurasischen Arktis in der letzten Eiszeit.

Mitte der 1980er Jahre deutete man die damals vorliegenden geologischen Funde noch äußerst unterschiedlich. Einige Wissenschaftler hielten es für erwiesen, dass zur Zeit des Höhepunkts der letzten Vereisung – unter Geologen als »Letztes Glaziales Maximum« oder LGM bekannt – über dem gesamten nördlichen Europa und Sibirien ein 3,5 Kilometer dicker Eispanzer lastete.

Andere bestritten dies. Sie mutmaßten, auf dem Meeresboden nördlich des norwegischen und russischen Festlands hätte es praktisch gar kein Eis gegeben. Das Problem dieser widersprüchlichen Deutungen bestand zum Teil darin, dass die geologischen Hinterlassenschaften in der Arktis manchmal nur schwer zu interpretieren waren, weshalb es zu Fehl-

einschätzungen kam, erschwert durch die geringe Zahl verlässlicher Beobachtungen aus der entlegenen, unwirtlichen Region.

Um diese Aufgabe zu lösen, initiierte die European Science Foundation eine Reihe von Forschungsprogrammen. Darin sollten im Umkreis der ehemaligen Eisdecken in der eurasischen Arktis neue geologische Daten erhoben werden. Mehr als 50 Wissenschaftler aus sieben europäischen Ländern beteiligten sich daran, darunter auch wir vier. Das erste Programm, Ponam (Polar North Atlantic Margins, polare nordatlantische Ränder), konzentrierte sich auf die Westseite der Barentssee.

## Schnelle Eisströme am Rande

Im Verlauf des Anschlussprogramms namens Queen (Quaternary Environments of the Eurasian North, quartäre Milieus im eurasischen Norden) verlagerte sich der Schwerpunkt Richtung Osten, hin zur russischen Arktis. Beide Programme lieferten eine Menge Informationen über den Zustand des nördlichen Eurasiens während der letzten Eiszeit. Um ihre Bedeutung würdigen zu können, muss man jedoch einiges über die glaziologischen Prozesse wissen. Daher wol-



JOACHIM SCHÜRING

len wir kurz erläutern, wie Gletscher funktionieren.

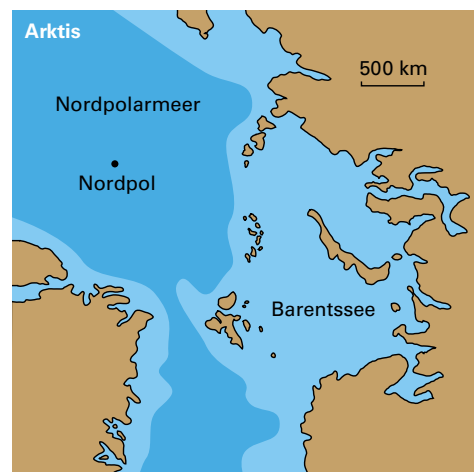
Eis ist zwar eine feste Masse, doch unter großräumigem Druck verformt es sich langsam. Das gilt auch für den Druck, den eine Eisdecke durch ihr eigenes Gewicht erzeugt. Auf Grund dieser Eigenverformung wandert ein Eispaket allmählich innerhalb eines Gletschers. An der Oberfläche einer Eisdecke wird ein Stück Eis durch fortwährenden Schneefall begraben und in die Tiefe gedrückt. Dadurch versinkt es mit einer bestimmten Geschwindigkeit im Eis. Insgesamt ist die Bewegung in der Mitte eher abwärts gerichtet, an den Seiten stärker nach außen.

Genauer gesagt strahlt die Eisbewegung im Zentrum eines Eisschildes von der so genannten Eisscheide aus. Das ist die Linie, bei der an der Eisoberfläche keine seitliche Bewegung zu verzeichnen ist. Von der Eisscheide aus wächst die Geschwindigkeit zu den Seiten hin. Anfänglich erreicht diese vielleicht nur wenige Meter pro Jahr. An den Rändern werden Eisschilde jedoch hochwirksam von rasch fließenden Eisströmen »drainiert«, mit bis zu einigen hundert Metern pro Jahr. Diese Ströme können sich am Rand so schnell bewegen, da an der

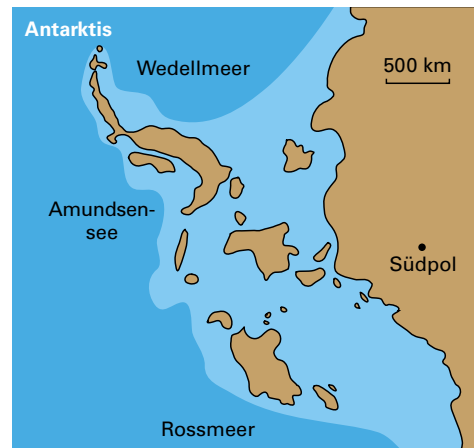
▲ **Treibendes Schelfeis umgibt die eisige Küste der Antarktis (oben). Sollte die globale Erwärmung solche Puffer zerstören, wäre der marine Eisschild der Westantarktis direkt dem Meer ausgesetzt. Das würde sein Abschmelzen beschleunigen, weltweit würden Küsten überflutet. Ein ähnliches Vorkommnis ereignete sich auf der Nordhalbkugel vor etwa 15000 Jahren – als sich das Eis, das einst die Barentssee bedeckte, rasch auflöste. Die Situationen ähneln sich: Der Kontinentalschelf der Barentssee (hellblau, rechts) gleicht dem in der Westantarktis, wenn dort das Eis abschmelze (unten rechts).**

Eisbasis Schmelzwasser die Reibung herabsetzt. Dadurch kann das Eis besser über den Grund rutschen.

Der Eisstrom bewegt sich immer zügiger, bis er schließlich an sein Ende gelangt. Dafür gibt es zwei Möglichkeiten: Die Eisdecke kann an Land zum Stillstand kommen, wenn das Eis an der Oberfläche gerade genauso schnell schmilzt, wie Nachschub kommt. Oder aber sie endet im Meer. Wo eine intakte Eisschicht in den Ozean fließt und zu ▷



ANNETTE DE FERRARI



▷ treiben beginnt, entsteht so genanntes Schelfeis. Dieses verliert an Masse, indem es »kalbt«, also von seinem Rand Eisberge abbrechen, und indem es an der Basis schmilzt.

Fließende Eisschichten über Land, erodieren sie an ihrer Basis Sedimentgesteine und schleppen diese mit. Auch riesige Gesteinsbrocken können so über große Entfernungen hinweg verlagert werden. Daher liegen vor jedem Gletscher Moränen oder Sedimenthaufen, die aussehen wie roh aufeinander geschichtete Bruchsteinmauern. Schmelzen Gletscher und Eisdecken, bleiben Moränen zurück und markieren die maximale Ausdehnung des Eises. Auf den ersten Blick scheint es also ganz einfach zu sein, die Grenzen einer alten Eisdecke zu rekonstruieren – man muss nur die Lage ihrer Endmoränen kartieren. In Wirklichkeit ist die Situation komplizierter, da in einigen Gebie-

ten Endmoränen entweder nicht vorhanden oder heute unter dem Meeresspiegel verborgen sind. Oft haben sich auch mehrere Moränen von verschiedenen Eisvorstößen miteinander verzahnt. Dann ist die gesuchte Moräne schwer von den anderen zu unterscheiden.

In den letzten Jahren haben Forscherteams zahlreiche geologische Informationen über die Eisschilde gesammelt, die zeitweise riesige Bereiche der eurasischen Arktis bedeckten. Im Wesentlichen lieferte diese Arbeit drei wichtige Ergebnisse:

► Im Verlauf des LGM, vor etwa 20 000 Jahren, bildete sich auf dem Kontinentalschelf in der Barentssee eine große, im Meer auf Grund liegende Eisdecke. Damals war die Eisschicht der Barentssee mit dem skandinavischen Eisschild vereinigt. Diese Eisdecke reichte von Deutschland und den Britischen Inseln über Skandinavien und den Schelf der Barentssee bis nach Osten zur Karasee.

► Rasch fließende Eisströme transportierten große Mengen glazialer Sedimente hin zum kontinentalen Rand.

► Gegen Ende der Vereisung zerfiel der Eispanzer offenbar ziemlich rasch.

Woher wir das alles wissen? Gesichert ist, dass die Barentssee in jüngster geologischer Vergangenheit vereist war. Denn der Meeresboden wird im Allgemeinen nur von wenigen Metern weichen Schlamm bedeckt. Das Sediment unter dieser dünnen Schlammsschicht ist reich an Schutt glazialer Herkunft. Durch das

enorme Gewicht der letzten Eisdecke wurde es stark komprimiert. Diese Sedimentschicht, bei der es sich um Tillit handelt (eine typische glaziale Ablagerung), ist auf dem Kontinentalschelf weit verbreitet. In den zentralen Teilen der Barentssee hinterließ die Eisdecke auch eine Serie langer, paralleler Rinnen, die ehemalige Eisbewegungen widerspiegeln. Um die Ausmaße und das Alter dieser Eisdecke abzuschätzen, untersuchten wir die Barentssee sowie den Nordrand des eurasischen Kontinents.

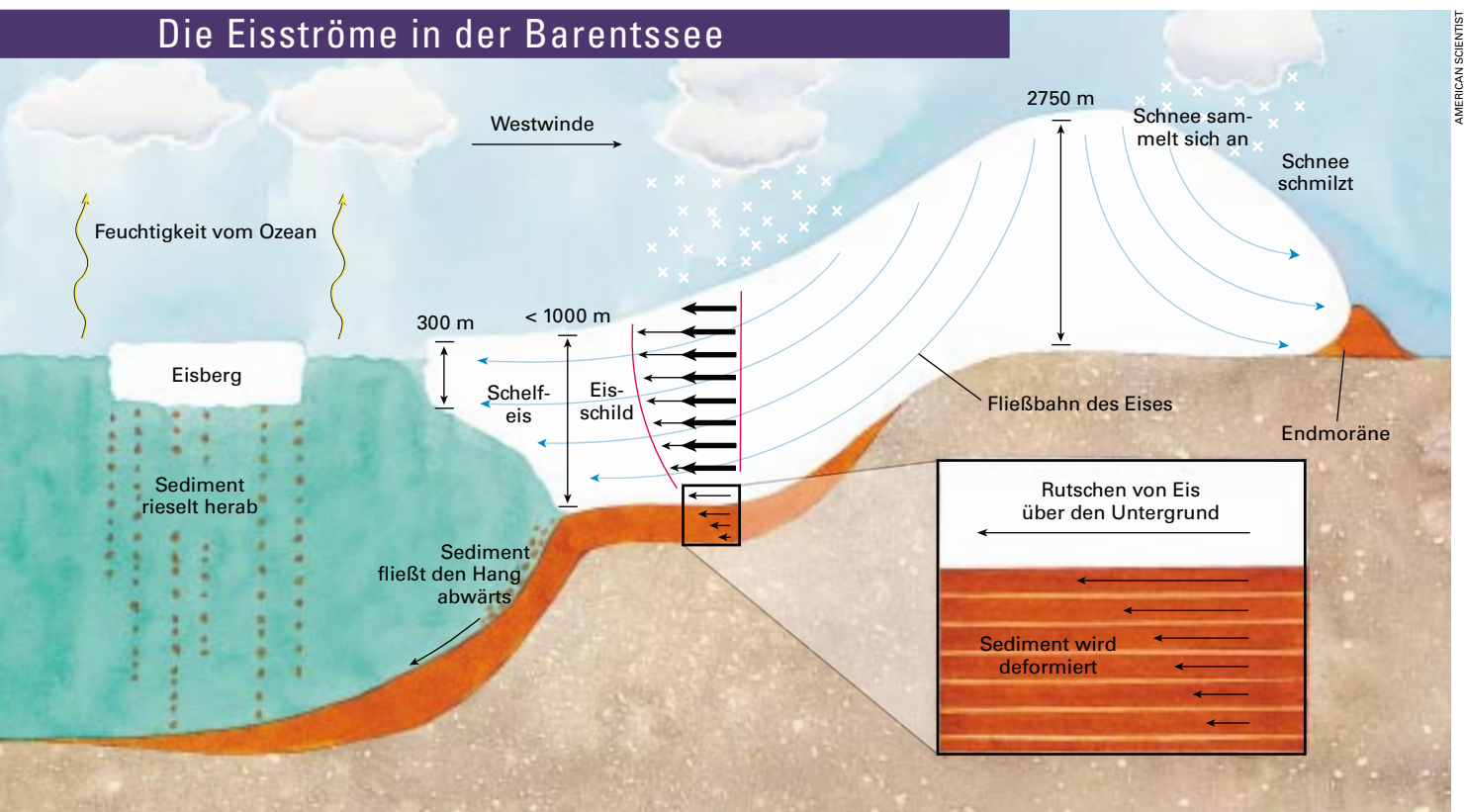
**Ufer, die nach oben schnellen**

Wir begannen mit geologischen Geländestudien auf Spitzbergen, einer Inselgruppe 600 Kilometer nördlich des skandinavischen Festlands. Das Muster gehobener Küstenlinien auf diesem Archipel und auf dem weiter östlich gelegenen Franz-Josef-Land verrät uns, dass die nördliche Barentssee im Verlauf des LGM durch ein schweres Gewicht, des Eis, nach unten gedrückt worden war. Solche gehobenen Küstenlinien entstehen in zwei Schritten: Zuerst schafft die Brandung an den Stränden flache Bereiche. Sobald die Eisdecke abschmilzt, schnell das Ufer nach oben und verwandelt diese Strände in gehobene Terrassen.

Entlang der Westküste Spitzbergens entdeckten Forscher solche angehobenen Strände gespickt mit Muscheln und Wal-knochen; mit Hilfe der Radiokarbonmethode wurde ihr Alter auf über 40 000 Jahre datiert. Die meisten Experten nah-

Die blauen Pfeile zeigen, wie am Höhepunkt der letzten Eiszeit das Eis der Barentssee durch den Eispanzer strömte. Ganz rechts, an der Südgrenze des Eisschilds hat sich eine Endmoräne gebildet. Ganz links, an den nördlichen und westlichen Grenzen des Eisschilds, entsteht ein Gebiet mit Schelfeis. Etwas landeinwärts davon befindet sich der marine Teil des Eisschilds – der Teil, der auf Felsgrund unterhalb des Meeresspiegels ruht. Hier fließt das Eis relativ schnell (Pfeile).

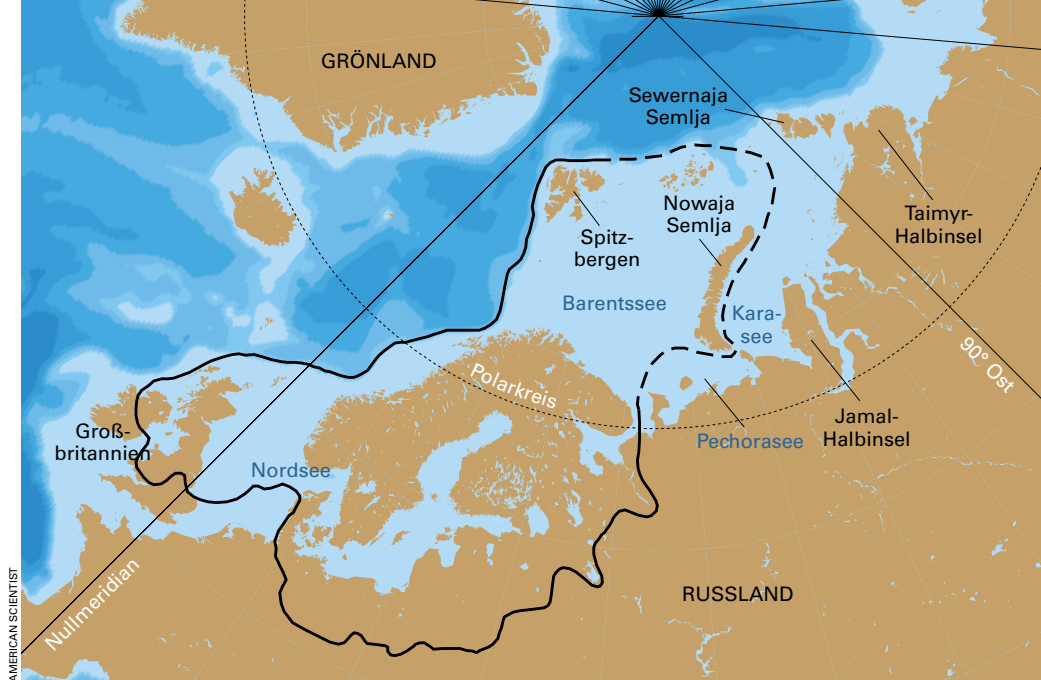
**Die Eisströme in der Barentssee**



men dies zuerst als Beleg dafür, dass nach Entstehung der angehobenen Strände Gletscher diese Küste nicht mehr erreicht haben können. Dann aber gelang Jan Mangerud, einem Geologen von der norwegischen Universität Bergen, eine bahnbrechende Entdeckung: Zumindest auch einige der alten, gehobenen Strände müssen von Eis überfahren worden sein. Das legt nahe, dass während des LGM die Gletscher viel größere Teile Spitzbergens bedeckten als bislang angenommen.

Offenbar waren damals die wichtigsten Fjorde tatsächlich zeitweise mit Eis gefüllt. Auch den gesamten Archipel hatte offenbar eine Eisschicht bedeckt, deren Zentrum sich östlich von Spitzbergen befand. Um festzustellen, wo exakt nun die Westgrenze dieser Eisdecke verlief, kartierten die Forscher die Sedimente des Meeresbodens quer über den westlichen eurasischen Kontinentalrand hinweg. Dazu benutzten sie seismische und akustische Messungen und zogen Bohrkern. So bargen sie große Mengen glazialer Sedimente, die entlang dem Kontinentalhang in gewaltigen Schwemmfächer-Komplexen angeordnet sind. Die oberste Schicht dieser Sedimente stammt von der letzten größeren Vereisung. Daher markieren sie eindeutig die westliche Grenze der ehemaligen Eisdecke am Rand des Kontinentalschelfs. Die riesige Menge an Material, die zu diesen Schwemmfächern transportiert wurde, belegt, dass an der Westseite der Eisdecke schnell fließende Eisströme aktiv gewesen sein müssen.

Schwieriger war es, den südlichen und östlichen Rand der ehemaligen Eisdecke zu rekonstruieren. Ende der 1970er Jahre stellte der bekannte Geograf Mikhail Grosswald eine Hypothese auf, wonach während des LGM eine 3,5 Kilometer mächtige Eisdecke große Teile der europäischen Arktis und Sibiriens bedeckt haben sollte. Diese Vermutung, von russischen Kollegen sogleich kritisch betrachtet, wurde aber von zahlreichen westlichen Forschern rasch übernommen. Zwischenzeitlich suchte Valery Astakhov, Geologe am Nationalinstitut für geologische Fernerkundungsmethoden in Sankt Petersburg, im Permafrostboden Westsibiriens nach versteckten Überresten des letzten Eisschildes. Er bestätigte zwar, dass eine Eisdecke mit Zentrum auf dem Kontinentalschelf der Karasee nach Süden über das Tal des Jenissei hinweg vorgerückt war – jedoch



lange vor dem LGM. Damit war klar, dass mit Grosswalds Hypothese etwas nicht stimmen konnte.

Untersuchungen im Rahmen des Queen-Programms ergaben dann, dass ein frisch aussehender Moränengürtel im europäischen Teil der russischen Arktis (östlich des Weißen Meeres) tatsächlich schon vor 60 000 Jahre abgelagert wurde – also bereits 40 000 Jahre vor dem Eiszeitmaximum. Um den Eisrand zur Zeit des LGM zu lokalisieren, war es deshalb wieder einmal notwendig, den Blick in Richtung Meer zu wenden.

### Stoßzähne von Mammuts zeigen, wo Eiszeitgletscher ihre Grenzen haben

Wir untersuchten die Sedimente auf dem Meeresboden vor dem russischen Festland und stellten fest, dass die jüngste Eisdecke am Kontinentalschelf endete. Aus der Pechorasee entnommene Bohrkern bewiesen außerdem, dass während der letzten 40 000 Jahre in diesem Gebiet die marine Sedimentation ununterbrochen angedauert hatte. Dagegen sind die ältesten Ablagerungen an der Oberfläche des Tillits – innerhalb der angenommenen Grenzen der Eisdecke – keine 14 000 Jahre alt. Auch auf der Jamal-Halbinsel, die in die Karasee hineinragt, wurden keine Spuren der Eisdecke entdeckt. Daher muss sich die Südgrenze der Eisdecke irgendwo weiter nördlich befunden haben, etwa im Flachwasser der Karasee.

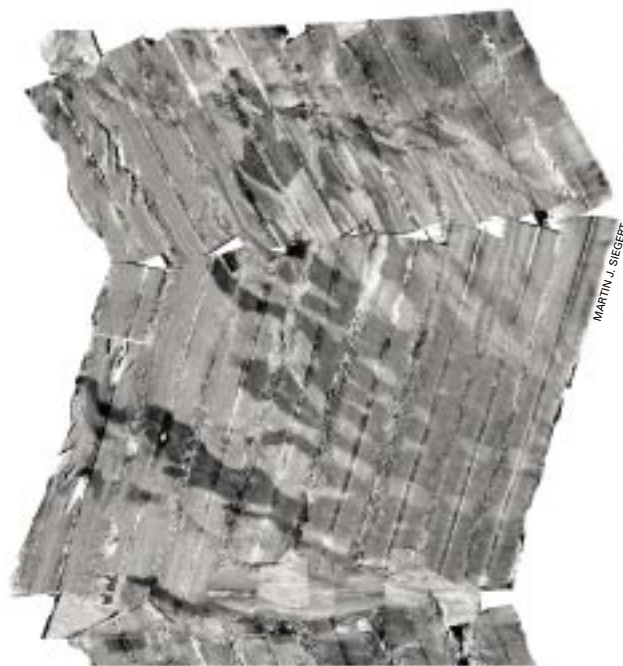
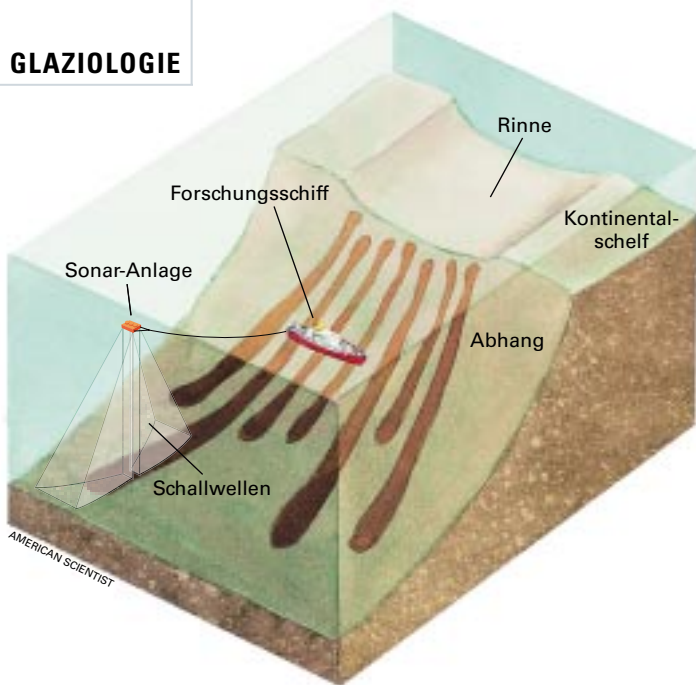
Die Lage des Ostrands der Eisdecke herauszufinden gestaltete sich ähnlich schwierig. Dazu untersuchten wir sedimentäre Ablagerungen in den vielen mit Seen gefüllten Becken der Taimyr-Halbinsel östlich der Karasee. Bei den Sedi-

▲ Seine größte Ausdehnung hatte das Eis vor etwa 20 000 Jahren (durchgezogene Linie). Die gestrichelte Linie zeigt an, wo der Eisrand nicht eindeutig ist.

menten, die sich auf dem Grund der Seen abgelagerten, handelt es sich vorwiegend um feinkörnige »Mudde« (Schlamm mit hohem Anteil organischen Materials). Hätte über dieser Halbinsel einst eine Eisdecke gelastet, wären diese Sedimente durch grobkörniges Material glazialer Herkunft ersetzt oder von ihnen überdeckt worden. Die Sedimente in diesen Seen dokumentieren jedoch, dass sich nichtglaziale Sedimente ohne Unterbrechung während des gesamten LGM abgelagert hatten. Das bedeutet: Als weiter westlich, über der Barentssee und der Karasee, eine Eisdecke lag, war die Taimyr-Halbinsel weitgehend eisfrei.

Auf Sewernaja Semlja, einer Inselgruppe nördlich der Taimyr-Halbinsel, stießen russische Forscher auf Mammut-Stoßzähne, die zwischen 25 000 und 19 000 Jahre alt waren. Das beweist die erstaunliche Tatsache, dass die Gletscher auf diesem Archipel während des LGM sogar eine geringere Ausdehnung besaßen als heute. Damit ließ sich die Ostgrenze der ehemaligen Eisdecke also nicht eindeutig bestimmen.

Um die Glazialgeschichte der eurasischen Arktis während der letzten Eiszeit im Detail zu begreifen, muss man wissen, warum Eiszeiten überhaupt auftreten. Im Verlauf der letzten 2,7 Millionen Jahre entstanden in der eurasischen Ark-



▷ tis wiederholt gewaltige Eisdecken – und zerfielen wieder. Das letzte Interglazial, in dem das Klima der Erde mit dem gegenwärtigen vergleichbar war, dauerte von 128 000 bis 115 000 Jahre vor heute. Ihm folgte eine Eiszeit, die vor 11 700 Jahren ziemlich plötzlich zu Ende ging. Während dieser Eiszeit rückten die Gletscher dreimal vor und zogen sich erneut zurück. Die jüngste Eisdecke, die das Kontinentalschelf überdeckte, entstand vor etwa 30 000 Jahren und erreichte ihre maximale Ausdehnung vor ungefähr 20 000 Jahren.

Während einer Eiszeit werden gewaltige Wassermengen von den Ozeanen hin zu den polaren Eisdecken verlagert. Dadurch sinkt der Meeresspiegel weltweit um bis zu 120 Meter. Den besten Beweis für diese großräumige Umverteilung von Wasser liefern die drei natürlich vorkommenden Sauerstoffisotope (O-16, O-17 und O-18). Warum verraten diese Sauerstoffisotope so viel? Wasser, das die leichteste Form von Sauerstoff (O-16) enthält, verdampft schneller

als Wasser mit den schwereren Isotopen (O-17 und O-18). Daher wandert in die Eisschichten bevorzugt Wasser mit leichtem Sauerstoff.

Während einer Eiszeit bleibt deshalb in den Ozeanen vermehrt Wasser mit schwerem Sauerstoff zurück. Falls dann ein Meeresorganismus eine Schale aus Kalziumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) bildet, wird diese einen überdurchschnittlich hohen Anteil an schwerem Sauerstoff O-18 enthalten. Stirbt dieser Organismus, fällt seine Schale auf den Meeresboden und archiviert von nun an das Isotopenverhältnis im damaligen Ozean.

Geologen haben viele ozeanische Sauerstoffisotope gesammelt, und zwar von Sedimenten der Tiefseeböden. Die Forscher haben auch das Isotopen-Verhältnis im Eis gemessen, das sich in der Antarktis angereichert hat. Die Sauerstoffisotope aus dem Eis und den Meeresedimenten erzählen eine auffällig ähnliche Geschichte: Die Klimaveränderungen der Eiszeiten wiederholen sich in Abständen von ungefähr 100 000,

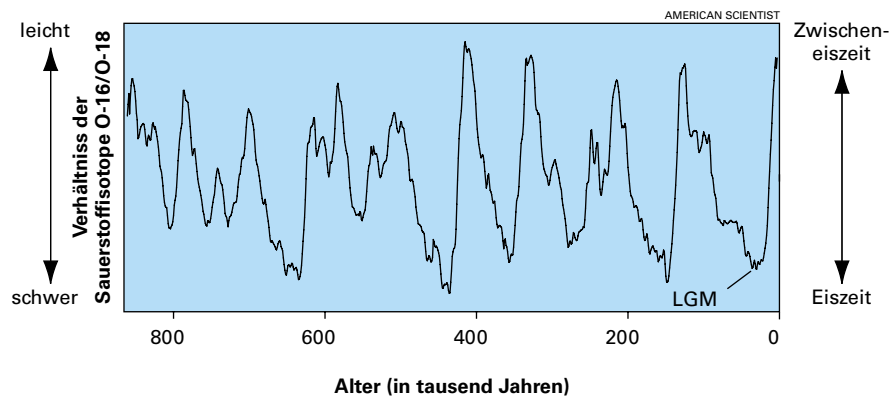
▲ Schauplatz Barentssee: Mit Hilfe eines Schiffssonars wurden lange Zungen glazialer Sedimente entdeckt (dunkle Bereiche, links). Diese Ablagerungen erstrecken sich vom Rand des Kontinentalschelfs den Kontinentalhang hinunter und in Richtung Tiefsee (rechts).

40 000 und 20 000 Jahren. Warum schwankt das Klima in diesen drei Zeitspannen? Die Antwort liegt in der Umlaufbahn der Erde um die Sonne:

▶ Die erste dieser Perioden konnten Planetologen der Exzentrizität der Erdumlaufbahn zuordnen, also der Abweichung ihrer Bahn von der perfekten Kreisform. Alle 100 000 Jahre wechselt die Erdumlaufbahn zwischen einer Ellipse und einem Kreis.

▶ Die zweite Periode führen sie auf die Neigung der Erdachse zurück. Innerhalb von ungefähr 40 000 Jahren schwankt diese zwischen 22,5 und 24,5 Grad.

▶ Verräterische Muscheln: Die Sauerstoffisotope in ihren Kalkschalen spiegeln die kalten Eiszeiten (niedrige Werte) und wärmeren Zwischeneiszeiten (hohe Werte). Während der Eiszeiten lagert sich vorzugsweise leichter Sauerstoff (O-16) ins Polareis ein; dadurch reichern sich das Meereswasser und die Muschelschalen, die sich darin bilden, verstärkt mit schwerem Sauerstoff (O-18) an – zuletzt vor 20 000 Jahren, dem »Letzten Glazialen Maximum« (LGM).



► Die dritte Periode betrifft die Position der Erde auf ihrer Ellipsenbahn in Relation zum Sommer auf der Nordhalbkugel: Diese Relation variiert regelmäßig im Verlauf von 20 000 Jahren.

Die drei Perioden modulieren die Strahlung. Wirken die drei orbitalen Parameter so zusammen, dass sich die Einstrahlung auf der Nordhalbkugel im Sommer deutlich verringert, dehnen sich Gletscher und Eisdecken aus und lösen womöglich eine Eiszeit aus.

### Verstärker für den Klimasturz

Die tatsächlichen Schwankungen unseres Erdklimas stimmen mit den theoretischen Vorhersagen exzellent überein. Doch hat die Sache einen kleinen Haken: Die Veränderungen der Sonneneinstrahlung durch die Schwankungen der Umlaufbahn sind für sich betrachtet viel zu gering, um allein schon die beobachteten Eiszeiten auszulösen. Was fehlt, sind zusätzliche Effekte, die kleine Bahneinflüsse in dramatische Klimaveränderungen umwandeln. Verschiedene solcher Verstärkermechanismen sind diskutiert worden. Wahrscheinlich tragen sie alle in irgendeiner Form zum Phänomen der Eiszeiten bei.

Der vielleicht am einfachsten zu verstehende Mechanismus ist das so genannte Eis-Albedo-Feedback. Die Rückstrahlung der Erdoberfläche, ihre Albedo, steuert die Menge an Sonnenstrahlung, die von der Erde in den Weltraum zurückgeworfen wird. Bei hoher Albedo wird mehr Strahlung reflektiert. Bei einer niedrigen Albedo absorbiert der Planet mehr Strahlung, die Erde erwärmt sich. Bei hoher Albedo reflektieren Schnee und Eis natürlich sehr viel Licht. Dehnen sich Schnee- und Eisfelder dank einer globalen Abkühlung aus, dann wird auch mehr Sonnenstrahlung ins All zurückgeworfen.

► So stellen sich die Forscher vor, wie sich zu Beginn der letzten Eiszeit die Barentssee allmählich mit Eis bedeckte. Vor 28 000 Jahren schließt sich Treibeis zur festen Eisdecke (b). Schnee und Eis drücken die Inseln im Norden (links) und das Festland (rechts) nach unten. Dadurch steigt der Meeresboden dazwischen (c). Der Meeresspiegel sinkt um 120 Meter und das Eis im Schelfgebiet kommt direkt auf dem Meeresboden zu liegen (d).

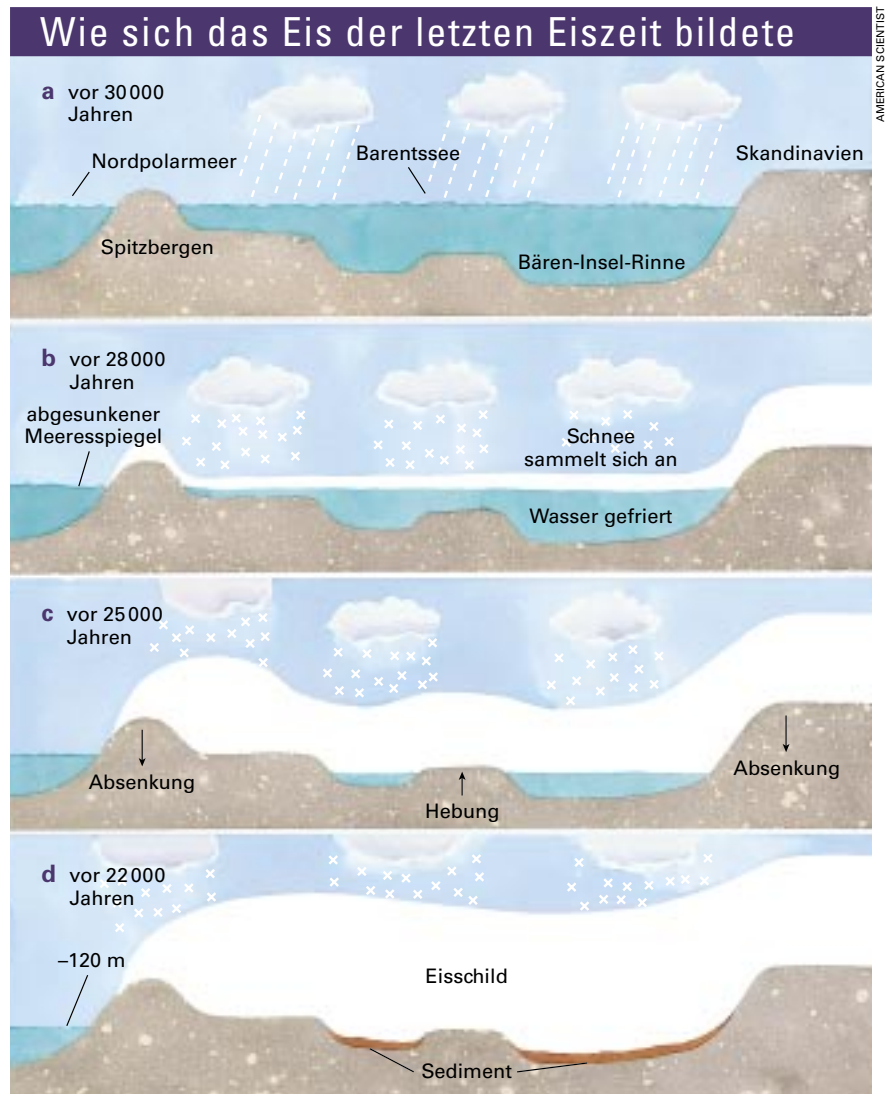
Ein anderer Verstärkereffekt hängt vom Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) der Luft ab. Das geruchlose und unsichtbare Gas trägt wesentlich zum Treibhauseffekt bei. Aus noch nicht gänzlich bekannten Gründen sinkt während der Eiszeiten die Konzentration an atmosphärischem  $\text{CO}_2$ . Fällt die Temperatur abermals aus anderen Gründen, dann reduziert das auch den Kohlendioxidgehalt. Das wiederum vermindert den Treibhauseffekt, was eine weitere Abkühlung zur Folge hat.

Die Schwankungen der Erdbahn erklären zusammen mit solchen Verstärkereffekten ziemlich einfach, wie eine Verschlechterung des Klimas das Eis am Festland wachsen lässt. Nicht so klar ist jedoch, wie durch globale Abkühlung Eis auf dem Meeresboden entstehen kann. Seit vielen Jahren wird darüber gestritten, wie ein ausgedehnter Kontinentalschelf mit Eis ausgefüllt werden kann. Problematisch ist vor allem, dass Eisdecken umso mehr Eisberge abstoßen (»kalben«), je tiefer das Wasser ist. Wenn also der Rand einer Eisschicht in tieferes Wasser gerät, brechen immer mehr

Eisberge ab, bis die weitere Ausdehnung des Eises gestoppt wird.

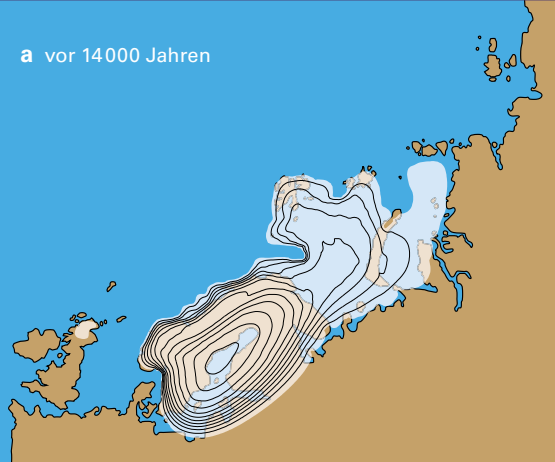
Terence Hughes von der University of Maine schlug folgenden Ablauf vor: Innerhalb der Barentssee könnte sich eine Eisdecke aus einem schon vorhandenen Schelfeis entwickeln – aus einer festen Eismasse also, die auf dem Meer treibt. Seiner Ansicht nach könnte dann ein mehrere Meter mächtiges Meereis zu einem Schelfeis von mehreren hundert Metern Dicke anwachsen, falls über die Jahrtausende oben mehr Eis hinzukommt, als unten abschmilzt. Schelfeis in der Barentssee würde das Eiswachstum in doppelter Weise anregen. Erstens würden von einer angrenzenden Eisdecke weniger Eisberge kalben: Das Eis würde einfach in das Schelfeis fließen. Und zweitens würde das Schelfeis, wenn es mächtiger würde, schließlich den Meeresboden berühren und sich mit der bereits auf Grund liegenden Eisdecke verbinden.

Ein weiterer Mechanismus könnte zur Entstehung einer Eisdecke innerhalb der Barentssee beigetragen haben. Manche Forscher nehmen an, dass sich das Eis der letzten Eiszeit zunächst über den

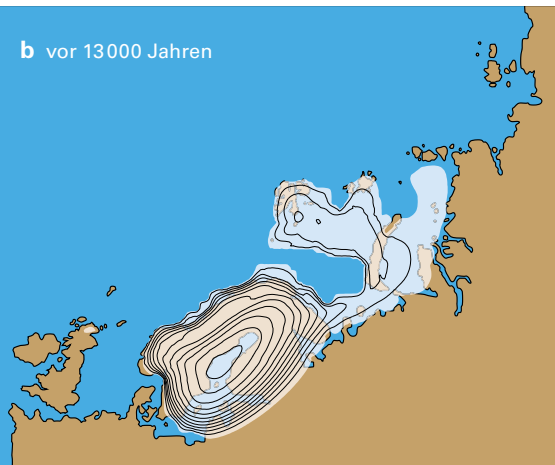


## Simulation des Eisschildes

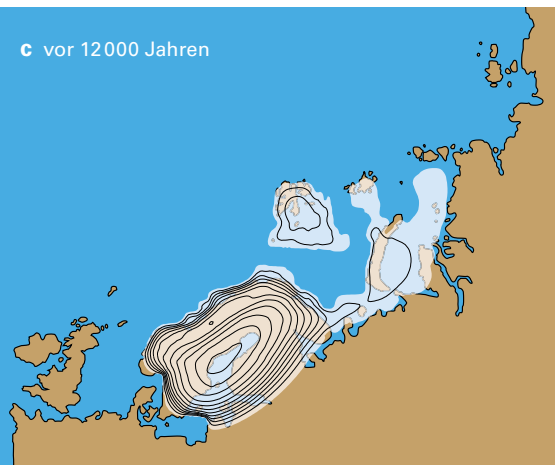
a vor 14000 Jahren



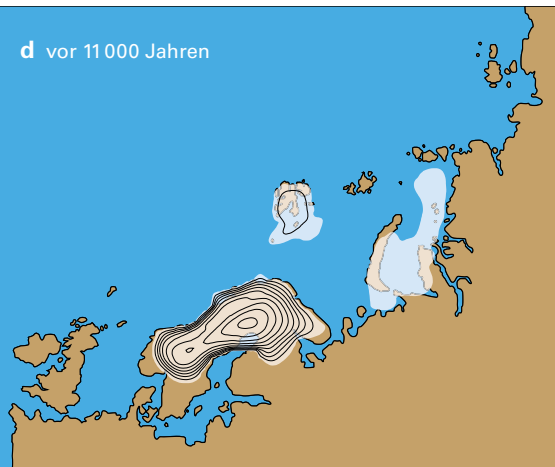
b vor 13000 Jahren



c vor 12000 Jahren



d vor 11000 Jahren



▷ Inselgruppen am Nordrand des eurasischen Kontinentalschelfs ansammelte. Das Gewicht dieser Eismassen drückte den Boden an den Rändern nach unten, wodurch er sich in den flachen, zentralen Teilen der Barentssee nach oben ausbeulte. Diese Hebung könnte in Kombination mit der Absenkung des Meeresspiegels von bis zu 120 Metern dazu geführt haben, dass sich auch seichte Gebiete mit Eis füllten.

Beide Prozesse könnten während der letzten Eiszeit wirksam gewesen sein. Außerdem zeigen Funde aus dem nahe gelegenen Europäischen Nordmeer, dass der Ozean dort während der letzten Eiszeit nicht zugefroren war. Dieses relativ warme Meerwasser lieferte eine Menge Feuchtigkeit, die über der Barentssee als Schnee fiel. Wahrscheinlich ließ erhöhter Schneefall zusammen mit einem dicker werdenden Schelfeis die Barentssee rasch zufrieren. Daher stellen sich Geologen inzwischen weniger die Frage, wie das Eis sich bildete, sondern eher, wie es wieder verschwand.

Verschiedene Indizien verraten uns, wie sich der Eisschild, der einst diesen Teil der eurasischen Arktis bedeckte, aufgelöst haben musste. Die Sauerstoffisotop-Daten von Sedimenten entlang der nahe gelegenen Framstraße und dem Kontinentabhang zeigen, dass sich vor 16000 Jahren das Wasser dort mit leichtem Sauerstoff angereichert hatte. Das belegt: Damals müssen große Mengen an glazialen Schmelzwasser in diese Re-

◀ **Die letzte Eiszeit im Computer:** In dieser Simulation erreicht der Eisschild der Barentssee eine Dicke von 2750 Metern, die bis vor etwa 14000 Jahren unverändert bleibt (a). Danach zerfällt der Eispanzer relativ rasch, sodass vor 13000 Jahren bereits ein großer Teil der Region zwischen Skandinavien und Nowaja Semlja frei von auf Grund liegendem Eis ist (b). Vor 12000 Jahren trennt sich das Eis, das Spitzbergen bedeckt, von dem Schild, der immer noch auf Skandinavien und der russischen Arktis liegt (c). Vor 11000 Jahren wird das Eis in der Region noch dünner und teilt sich in drei voneinander getrennte Massen auf (d). (Helle Farben zeigen, wo die Eisbedeckung mindestens 50 Meter dick wird. Höhenlinien der Eismächtigkeit sind in Intervallen von 250 Metern eingezeichnet.)

AMERICAN SCIENTIST

gion eingeströmt sein. So wurde uns klar, dass die Barentssee während der letzten Wiedererwärmung ihren Eispanzer ziemlich früh verlor.

Wie andere Forscher haben auch wir Moränen kartiert, die beim Rückzug des Eises entlang dem Meeresboden der Barentssee zurückblieben. Von Schiffen aus sondierten wir dazu den Meeresgrund. Offenbar brach das Eis zuerst in größeren Meerestiefen auseinander. Ungefähr vor 14000 Jahren verlor die Rinne bei der Bäreninsel (südlich von Spitzbergen) ihr Eis. So entstanden vermutlich eine Reihe offener Meeresbuchten, umgeben von zerfallenden Eiswänden. Vor rund 12000 Jahren waren die Eisschichten nur noch auf die nördlichen Inselgruppen und die Flachwasserbereiche der Umgebung beschränkt.

### Schnell kalben die Eisberge

Den zunehmenden Eiszerfall innerhalb der Barentssee belegen auch die Landmassen, die rund um Spitzbergen und das Franz-Josef-Land angehoben wurden. Die Strände auf diesen Inseln wurden anhand von Walknochen, Molluskschalen und Treibholz datiert. Ihre Chronologie deckte auf, dass die Archipele ihr Eis erst einige tausend Jahre nach dem Eiszerfall in den tieferen Bereichen der Barentssee verloren.

Um die Geschichte dieses ehemaligen Eisschildes zu rekonstruieren, haben wir auch zahlreiche numerische Simulationen durchgeführt. Dafür muss man über einen langen Zeitraum hinweg Meeresspiegel, Lufttemperatur und Schneefall bestimmen. Wenn wir es im Modell schaffen, eine Eisschicht zu erzeugen, die mit den geologischen Bedingungen in Einklang steht, können wir die Ursachen für Wachstum und Zerfall von Eisschilden besser einschätzen.

Sowohl das Ponam- als auch das Queen-Programm benutzten solche Simulationsrechnungen für die Größe und Dynamik des ehemaligen Eisschildes. In dem Modell passten wir die Umweltdaten so lange an, bis die Ausdehnung des Eises mit dem beobachteten Eisrand übereinstimmten. Damit konnten wir schließlich Aussagen über Ausdehnung, Mächtigkeit und Fließgeschwindigkeit des ehemaligen Eisschildes treffen.

Nachdem wir die Eisdecke in voller Größe dargestellt hatten, mussten wir sie im nächsten Schritt in einer Weise abschmelzen lassen, die zu den geologi-

schen Daten der tatsächlichen Enteisung passte. Doch war dies nicht so einfach. Um diese nachzuahmen, mussten wir im Modell die Geschwindigkeit des Kalbens von Eisbergen recht deutlich erhöhen – eine Überraschung.

Warum zerfiel die wirkliche Eisdecke so rasch? Die Antwort fanden wir im Mechanismus, der die Eisberge hervorbringt. Als die Eiszeit in die erste Phase der Erwärmung eintrat, hob sich der Meeresspiegel allmählich. Dieser Anstieg wirkte sich auf das Eis der Barentssee doppelt aus:

► Erstens nahm die Wassertiefe zu, was das Eis auf dem Meeresgrund verstärkt kalben ließ.

► Zweitens sank das Gewicht des Eisschildes. Das reduzierte die Reibung des Eises über den Untergrund und erhöhte so seine Fließgeschwindigkeit.

Das rasche Abschmelzen des Eispanzers hier und anderswo ließ den Meeresspiegel ansteigen, was wiederum das Kalben beschleunigte. So verursachte eine relativ geringfügige Veränderung des Meeresspiegels wahrscheinlich das rasche Aufbrechen des eurasischen Eisschildes.

### Eine Warnung für die Westantarktis?

Während der letzten Eiszeit hatte sich auch die Eisdecke in der Westantarktis wesentlich weiter ausgedehnt als heute. Wahrscheinlich lag – genau wie in der Barentssee – überall auf dem Kontinentalschelf Eis am Meeresgrund. Doch der Zerfall dieser vergrößerten westantarktischen Eisdecke unterschied sich von dem Eiszerfall in der Barentssee in zweierlei Hinsicht. Zum einen setzte das Abschmelzen in der Antarktis viel später ein als in der Barentssee. Zum anderen bildeten sich durch den Eiszerfall zwischen dem auf Grund liegenden Eisschild und dem offenen Meer große, frei treibende Schelfeisflächen. Solche gibt es noch heute: Beispielsweise beanspruchen derzeit das Filchner-Ronne- und das Ross-Schelfeis Flächen von jeweils etwa 500 000 Quadratkilometern.

Für die Stabilität des heutigen westantarktischen Eisschildes hat das zwei Konsequenzen:

► Da sie den auf dem Meeresgrund liegenden Rand des Eisschildes abstützen, könnten die Schelfeisgebiete den Eisschild stabilisieren. In der Barentssee fehlten solche Schelfeise, und der auf Grund liegende Eisrand kalbte sehr rasch.

► Den Stützeffekt der Schelfeisflächen



auf den Eisschild vorausgesetzt, reichen die Meeresspiegelschwankungen derzeit nicht aus, um heute das Eis in der Westantarktis ähnlich rasch abzubauen wie einst in der Barentssee.

Außerdem: Während der letzten Zwischenzeit lag der Meeresspiegel einige Meter höher als heute und dennoch zerfiel der Eisschild der Westantarktis nicht. Der größte Teil des Wassers, das damals für den höheren Meeresspiegel sorgte, stammte wahrscheinlich aus Grönland.

Der Eisschild der Westantarktis vermag offenbar auch einem deutlichen Anstieg des Meeresspiegels standzuhalten – aber warum? Die Antwort könnte durchaus sein, dass die treibenden Schelfeisflächen in der Westantarktis das auf Grund liegende Eis stabilisieren. Falls das zutrifft, sollte man sich also in der Westantarktis heute eher um die Stabilität der Schelfeisgebiete sorgen. Deren Abschmelzen würde zwar den Meeresspiegel allein nicht erhöhen – genau so wenig wie das Schmelzen eines schwimmenden Eiswürfels den Wasserstand in einem Glas hebt. Doch wenn sie abschmelzen, würde der westantarktische Eisschild schon deutlich früher so aussehen wie der ehemalige Eisschild Nordeuropas kurz vor seinem Zerfall.

Was könnte den Zerfall von Schelfeis am Südpol verursachen? Die Antwort liegt im antarktischen Ozean verborgen. Am meisten Material geht dem Schelfeis durch Abschmelzen vom Meeresgrund her verloren. Wenn sich also der Ozean rund um die Antarktis aufwärmt, wird die Schmelzgeschwindigkeit steigen. Wird dies nicht – im Zuge der Erwärmung des südlichen Ozeans – durch erhöhte Verdunstung und Schneefall ausgeglichen, schrumpft das Schelfeis und verschwindet schließlich ganz. Damit könnte das Drama beginnen: Der Eis-

schild der Westantarktis könnte dann rasch kollabieren. Man sollte diese Möglichkeit nicht außer Acht lassen – und den Meeresspiegelanstieg von sechs Metern, der daraus folgen würde.

Der eingangs erwähnte Glaziologe John Mercer nannte die gegenwärtige Situation eine »drohende Katastrophe«. Nach unseren Erkenntnissen rund um die Geschichte des eurasischen Eisschildes wird die Gefahr nicht akut, solange die vorhandenen Schelfeisflächen nicht verloren gehen. Dennoch ist deutlich geworden: In nicht allzu ferner Vergangenheit hat solch eine Katastrophe in der Arktis stattgefunden. Die Menschheit sollte sich darauf einstellen, dass sie sich in Zukunft wiederholen kann. ◀



**Martin J. Siegert** (oben links) lehrt am Bristol Glaciology Centre der Universität Bristol.



**Julian A. Dowdeswell** (oben rechts) ist Professor für Physikalische Geografie

und Mitglied des Scott Polar Research Institute an der Universität Cambridge. **John-Inge Svendsen** (unten links) ist Professor für Geologie an der Universität Bergen (Norwegen). **Anders Elverhøi** (unten rechts), Professor für Quartärgeologie, ist Leiter des Fachbereichs Geologie an der Universität Oslo.

© American Scientist ([www.americanscientist.org](http://www.americanscientist.org))

New constraints on the limits of the Barents-Kara ice sheet during the Last Glacial Maximum. Von L. Polyak et al. in: *Geology*, Bd. 28, S. 611, 2000

Maximum extent of the Eurasian ice sheets in the Barents and Kara Sea region during the Weichselian. Von J. I. Svendsen et al. in: *Boreas*, Bd. 28, S. 234, 1999

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei [www.spektrum.de](http://www.spektrum.de) unter »Inhaltsverzeichnis«.