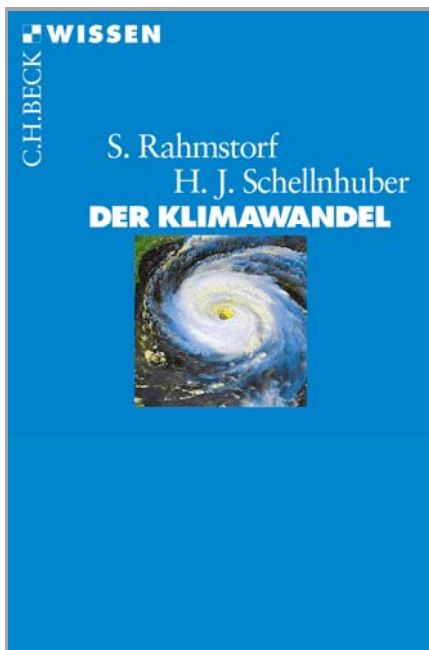


Unverkäufliche Leseprobe



S. Rahmsdorf, H.J. Schellhuber
Der Klimawandel

2018. 144 S., mit 21 Abbildungen und 1 Tabelle
ISBN 978-3-406-72672-9

Weitere Informationen finden Sie hier:
<https://www.chbeck.de/25219044>

© Verlag C.H.Beck oHG, München

Der Klimawandel ist – nicht zuletzt nach der einzigartigen Serie verheerender Wetterextreme seit der Jahrtausendwende – in aller Munde. Angesichts seiner einschneidenden und globalen Bedeutung für Natur und Zivilisation ist das kein Wunder. Doch was ist eigentlich unter Klimawandel zu verstehen, und welche Faktoren sind für das Klima verantwortlich? Zwei international anerkannte Klima-Experten geben einen kompakten und verständlichen Überblick über den derzeitigen Stand unseres Wissens und zeigen Lösungswege auf.

Stefan Rahmstorf leitet die Abteilung Erdsystemanalyse am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, ist Professor für Physik der Ozeane an der Universität Potsdam und beriet acht Jahre lang die Bundesregierung als Mitglied des Wissenschaftlichen Beirats Globale Umweltveränderungen (WBGU).

Hans Joachim Schellnhuber ist Gründer und emeritierter Direktor des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung. Er ist Mitglied des WBGU und verschiedener Akademien, zum Beispiel der Päpstlichen Akademie der Wissenschaften.

Stefan Rahmstorf
Hans Joachim Schellnhuber

DER KLIMAWANDEL

Diagnose, Prognose, Therapie

C.H.Beck

Mit 21 Abbildungen und 1 Tabelle

1. Auflage. 2006
- 2., durchgesehene Auflage. 2006
- 3., aktualisierte Auflage. 2006
4. Auflage. 2007
- 5., aktualisierte Auflage. 2007
6. Auflage. 2007
- 7., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage. 2012

8., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage. 2018

Originalausgabe
© Verlag C.H.Beck oHG, München 2006
Satz: Fotosatz Amann, Memmingen
Druck und Bindung: Druckerei C.H.Beck, Nördlingen
Umschlagentwurf: Uwe Göbel, München
Printed in Germany
ISBN 978 3 406 72672 9

www.chbeck.de

Inhalt

Einleitung	7
1. Aus der Klimageschichte lernen	9
Klimaarchive	9
Was bestimmt das Klima?	12
Die Frühgeschichte der Erde	14
Klimawandel über Jahrmlionen	17
Eine plötzliche Warmphase	18
Die Eiszeitzyklen	20
Abrupte Klimawechsel	23
Das Klima des Holozän	25
Einige Folgerungen	28
2. Die globale Erwärmung	29
Etwas Geschichte	29
Der Treibhauseffekt	30
Der Anstieg der Treibhausgaskonzentration	32
Der Anstieg der Temperatur	36
Die Ursachen der Erwärmung	38
Die Klimasensitivität	41
Projektionen für die Zukunft	45
Wie sicher sind die Aussagen?	49
Zusammenfassung	51
3. Die Folgen des Klimawandels	53
Der Gletscherschwund	55
Rückgang des polaren Meereises	57
Tauen des Permafrosts	58
Die Eisschilde in Grönland und der Antarktis	59
Der Anstieg des Meeresspiegels	61
Änderung der Meeresströmungen	65

Wetterextreme	68
Auswirkungen auf Ökosysteme	72
Landwirtschaft und Ernährungssicherheit	74
Ausbreitung von Krankheiten	76
Zusammenfassung	77
4. Klimawandel in der öffentlichen Diskussion	79
Die Klimadiskussion in den USA	80
Die Lobby der «Klimaskeptiker»	82
Zuverlässige Informationsquellen	83
Zusammenfassung	86
5. Die Lösung des Klimaproblems	88
Vermeiden, Anpassen oder Ignorieren?	88
Gibt es den optimalen Klimawandel?	91
Globale Zielvorgaben	95
Der Gestaltungsraum für Klimailösungen	98
Das Kyoto-Protokoll	98
Der WBGU-Pfad zur Nachhaltigkeit	101
Anpassungsversuche	109
Die Koalition der Freiwilligen oder «Leading by Example»	115
Der Pariser Klimavertrag	119
Epilog: Der Geist in der Flasche	132
Quellen und Anmerkungen	135
Literaturempfehlungen	143
Sachregister	143

Einleitung

Der Klimawandel ist kein rein akademisches Problem, sondern hat große und handfeste Auswirkungen auf die Menschen – für viele ist er sogar eine Bedrohung für Leib und Leben (siehe Kap. 3). Gegenmaßnahmen erfordern erhebliche Investitionen. Deshalb ist es noch wichtiger als in den meisten anderen Bereichen der Wissenschaft, immer wieder die Belastbarkeit der gegenwärtigen Kenntnisse zu hinterfragen und die verbleibenden Unsicherheiten zu beleuchten. Fragen wir daher, worauf die Erkenntnisse der Klimatologen beruhen.

Viele Menschen glauben, dass die Bedrohung durch den globalen Klimawandel eine theoretische Möglichkeit ist, die sich aus unsicheren Modellberechnungen ergibt. Gegenüber solchen Modellrechnungen haben sie ein verständliches Misstrauen – schließlich ist ein Klimamodell für den Laien undurchschaubar und seine Verlässlichkeit kaum einzuschätzen. Manch einer glaubt gar, wenn die Computermodelle fehlerhaft sind, dann gibt es vielleicht gar keinen Grund zur Sorge über den Klimawandel.

Dies trifft jedoch nicht zu. Die wesentlichen Folgerungen über den Klimawandel beruhen auf Messdaten und elementarem physikalischen Verständnis. Modelle sind wichtig und erlauben es, viele Aspekte des Klimawandels detailliert durchzurechnen. Doch auch wenn es gar keine Klimamodelle gäbe, würden Klimatologen vor dem anthropogenen Klimawandel warnen.

Der Anstieg der Treibhausgase in der Atmosphäre ist eine gemessene Tatsache, die selbst Skeptiker nicht anzweifeln. Auch die Tatsache, dass der Mensch dafür verantwortlich ist, ergibt sich unmittelbar aus Daten – aus den Daten unserer Nutzung der fossilen Energien – und unabhängig davon nochmals aus Isotopenmessungen. Wie außerordentlich dieser Anstieg ist, zeigen die Daten aus den antarktischen Eisbohrkernen – niemals zumindest seit fast einer Million Jahre war die CO_2 -Konzentra-

tion auch nur annähernd so hoch, wie sie in den letzten hundert Jahren geklettert ist.

Die erwärmende Wirkung des CO_2 auf das Klima wiederum ist seit mehr als hundert Jahren akzeptierte Wissenschaft. Die Strahlungswirkung des CO_2 ist im Labor vermessen, der Strahlungstransfer in der Atmosphäre ein bestens bekannter, ständig bei Satellitenmessungen verwendeter Aspekt der Physik. Die durch den Treibhauseffekt erwartete Zunahme der an der Erdoberfläche ankommenden langwelligen Strahlung wurde 2004 durch Messungen des Schweizer Strahlungsmessnetzes belegt.¹ Über die Störung des Strahlungshaushaltes unseres Planeten durch den Menschen kann es daher – man möchte hinzufügen: leider – keinen Zweifel geben.

Entscheidend ist letztlich die Frage: Wie stark reagiert das Klimasystem auf diese Störung des Strahlungshaushaltes? Modelle sind hier sehr hilfreich. Arrhenius hat jedoch 1896 gezeigt, dass man dies auch mit Papier und Bleistift abschätzen kann,² und die antarktischen Eiskerne erlauben eine davon unabhängige Abschätzung mittels Regressionsanalyse direkt aus Daten.³ Auch die frühere Klimageschichte deutet, wie wir sehen werden, auf eine stark klimaverändernde Wirkung des CO_2 hin.

Auch die Tatsache, dass das Klima sich derzeit bereits verändert, ergibt sich direkt aus Messungen – die Jahre 2016, 2017 und 2015 waren laut der meteorologischen Weltorganisation WMO in Genf die drei global wärmsten seit Beginn der Aufzeichnungen im 19. Jahrhundert. Die Gletscher gehen weltweit zurück (siehe Kap. 3), und Proxy-Daten zeigen, dass das Klima im ersten Jahrzehnt des 21. Jahrhunderts wahrscheinlich so warm war wie nie zuvor seit mindestens tausend Jahren.

Ohne detaillierte Klimamodelle wären wir etwas weniger sicher, und wir könnten die Folgen weniger gut abschätzen – aber auch ohne diese Modelle würde alle Evidenz sehr stark darauf hindeuten, dass der Mensch durch seine Emissionen von CO_2 und anderen Gasen im Begriff ist, das Klima einschneidend zu verändern.

1. Aus der Klimageschichte lernen

Das Klima unseres Heimatplaneten hat immer wieder spektakuläre Wandlungen durchgemacht. In der Kreidezeit (vor 140 bis 65 Millionen Jahren) stapften selbst in arktischen Breiten riesige Saurier durch subtropische Vegetation, und der CO₂-Gehalt der Atmosphäre war ein Vielfaches höher als heute. Dann kühlte sich die Erde langsam ab und pendelt nun seit zwei bis drei Millionen Jahren regelmäßig zwischen Eiszeiten und Warmzeiten hin und her. In den Eiszeiten drangen gigantische Gletscher bis weit nach Deutschland hinein vor, und unsere Vorfahren teilten sich die eisige Steppe mit dem pelzigen Mammut. Mitten in der jetzigen Warmzeit, dem seit 10 000 Jahren herrschenden Holozän, trocknete plötzlich die Sahara aus und wurde zur Wüste.

Nur vor dem Hintergrund der dramatischen Klimaveränderungen der Erdgeschichte lässt sich der gegenwärtige Klimawandel verstehen und einordnen. Ist er durch den Menschen wesentlich mit verursacht, oder ist er Teil natürlicher Klimazyklen? Zur Beantwortung dieser Frage brauchen wir ein Grundverständnis der Klimageschichte. Wir beginnen das Buch deshalb mit einer Zeitreise. In diesem Kapitel diskutieren wir, wie sich das Klima auf unterschiedlichen Zeitskalen entwickelt hat: von Hunderten von Jahrmillionen bis zu den abrupten Klimasprüngen, die in jüngster Zeit die Klimaforscher beschäftigen. Vor allem wird uns dabei interessieren, welche Kräfte für die Klimaänderungen verantwortlich sind und was sich aus der Reaktion des Klimasystems in der Vergangenheit lernen lässt.

Klimaarchive

Woher wissen wir überhaupt etwas über das Klima vergangener Epochen? Manche Zeugen früherer Klimawechsel stehen unübersehbar in der Landschaft – zum Beispiel die Endmoränen

längst abgeschmolzener Gletscher. Das meiste Wissen über die Geschichte des Erdklimas ist jedoch das Ergebnis einer mühsamen Detektivarbeit mit ständig verfeinerten Methoden. Wo immer sich etwas über längere Zeiträume ablagert oder aufbaut – seien es Sedimente am Meeresgrund, Schneeschichten auf Gletschern, Stalaktiten in Höhlen oder Wachstumsringe in Korallen und Bäumen –, finden Forscher Möglichkeiten und Methoden, daraus Klimadaten zu gewinnen. Sie bohren jahrelang durch das massive Grönlandeis bis zum Felsgrund oder ziehen aus tausenden Metern Wassertiefe Sedimentkerne, sie analysieren mit empfindlichsten Messgeräten die Isotopenzusammensetzung von Schnee oder bestimmen und zählen in monatelanger Fleißarbeit unter dem Mikroskop winzige Kalkschalen und Pflanzenpollen.⁴

Am Beispiel der Eisbohrkerne lässt sich das Grundprinzip gut verstehen. Gigantische Gletscher, Eisanpanzer von mehreren tausend Metern Dicke, haben sich in Grönland und der Antarktis gebildet, weil dort Schnee fällt, der aufgrund der Kälte aber nicht wieder abtaut. So wachsen die Schneelagen immer mehr in die Höhe; der ältere Schnee darunter wird durch das Gewicht der neuen Schneelast zu Eis zusammengepresst. Im Laufe der Jahrtausende stellt sich ein Gleichgewicht ein: Die Eismasse wächst nicht mehr in die Höhe, weil das Eis zu den Rändern hin und nach unten abzufließen beginnt. Im Gleichgewicht wird jährlich genauso viel Eis neu gebildet wie an den Rändern abschmilzt. Letzteres geschieht entweder an Land, wenn das Eis in niedrigere und damit wärmere Höhenlagen hinuntergeflossen ist – dies ist bei Gebirgsgletschern der Fall und auch typisch für den grönländischen Eisschild. Oder es geschieht, indem das Eis bis ins Meer fließt, dort ein schwimmendes Eisschelf bildet und von unten durch wärmeres Seewasser abgeschmolzen wird – so geschieht es um die Antarktis herum.

Bohrt man einen solchen Eisschild an, dann findet man mit zunehmender Tiefe immer älteres Eis. Wenn die Schneefallmengen groß genug sind und einen deutlichen Jahresgang haben (wie in Grönland, wo durch den Schneefall jährlich eine 20 Zentimeter dicke neue Eisschicht entsteht), kann man sogar einzelne Jahres-

schichten erkennen. Denn in der Saison mit wenig Schneefall lagert sich Staub auf dem Eisschild ab, und es entsteht eine dunklere Schicht, während in der schneereichen Jahreszeit eine hellere Lage entsteht. Diese Jahresschichten kann man abzählen – dies ist die genaueste Datierungsmethode für das Eis.⁵ In Grönland reicht das Eis ca. 120 000 Jahre in die Vergangenheit zurück. In der Antarktis, wo das Klima trockener und damit die Schneefallrate gering ist, hat das Europäische EPICA-Projekt im Jahr 2003 sogar über 800 000 Jahre altes Eis geborgen.⁶

An dem Eis kann man eine Vielzahl von Parametern messen. Einer der wichtigsten ist der Gehalt an Sauerstoff-Isotop 18. Bei vielen physikalischen, chemischen oder biologischen Prozessen findet eine so genannte Fraktionierung statt: Sie laufen für verschiedene Isotope unterschiedlich schnell ab. So verdunsten Wassermoleküle mit dem «normalen» Sauerstoff-16 schneller als die etwas schwereren mit Sauerstoff-18. Die Fraktionierung ist dabei abhängig von der Temperatur. Dies gilt auch für die Fraktionierung bei der Bildung von Schneekristallen – deshalb hängt der Gehalt an Sauerstoff-18 im Schnee von der Temperatur ab. Nach einer geeigneten Eichung kann man den Sauerstoff-18-Gehalt im Eisbohrkern als ein annäherndes Maß (als so genanntes Proxy) für die Temperatur zur Zeit der Entstehung des Schnees nehmen.

Andere wichtige Größen, die im Eis gemessen werden können, sind der Staubgehalt und die Zusammensetzung der in kleinen Bläschen im Eis eingeschlossenen Luft – so verfügt man sogar über Proben der damaligen Atmosphäre. Man kann daran den früheren Gehalt an Kohlendioxid, Methan und anderen Gasen bestimmen. Zu Recht berühmt ist der in den achtziger und neunziger Jahren in der Antarktis gebohrte französisch-russische Wostok-Eiskern,⁷ mit dem erstmals eine genaue Geschichte des Temperaturverlaufs und der atmosphärischen CO₂-Konzentration der letzten 420 000 Jahre gewonnen wurde (Abb. 1.1).

Aus den verschiedenen Klimaarchiven werden mit einer Vielzahl von Verfahren ganz unterschiedliche Proxy-Daten gewonnen. Manche davon geben Auskunft über die Eismenge auf der Erde, über den Salzgehalt der Meere oder über Niederschlagsmengen. Diese Proxy-Daten haben unterschiedliche Stärken

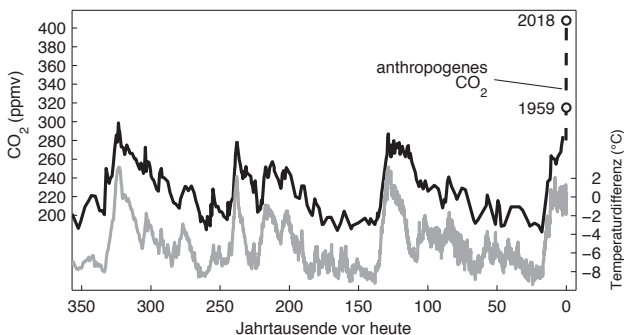


Abb. 1.1: Verlauf der Temperatur in der Antarktis (graue Kurve, Änderung relativ zu heute) und der CO_2 -Konzentration der Atmosphäre (schwarze Kurve) über die abgelaufenen 350 000 Jahre aus dem Wostok-Eiskern.⁷ Man erkennt drei Eiszeitzyklen. Am Ende ist der vom Menschen verursachte Anstieg des CO_2 gezeigt.

und Schwächen – so ist etwa bei Tiefseesedimenten die zeitliche Auflösung in der Regel deutlich geringer als bei Eiskernen, dafür reichen die Daten aber viel weiter zurück, bis zu Hunderten von Millionen Jahren. Bei vielen Proxies gibt es noch Probleme mit der genauen Datierung und Unsicherheiten in der Interpretation. Aus einer einzelnen Datenreihe sollten daher nicht zu weit reichende Schlüsse gezogen werden; erst wenn Ergebnisse durch mehrere unabhängige Datensätze und Verfahren bestätigt wurden, können sie als belastbar gelten. In ihrer Gesamtheit betrachtet liefern Proxy-Daten heute jedoch bereits ein erstaunlich gutes und detailliertes Bild der Klimageschichte.

Was bestimmt das Klima?

Unser Klima ist im globalen Mittel das Ergebnis einer einfachen Energiebilanz: Die von der Erde ins All abgestrahlte Wärmestrahlung muss die absorbierte Sonnenstrahlung im Mittel ausgleichen. Wenn dies nicht der Fall ist, ändert sich das Klima. Würde etwa mehr absorbiert als abgestrahlt, würde das Klima immer wärmer, so lange, bis die dadurch zunehmende Wärmestrahlung die ankommende Strahlung wieder ausgleicht und

sich ein neues Gleichgewicht einstellt. Es gilt also ein einfacher Erhaltungssatz der Energie: Die auf der Erde ankommende Sonnenstrahlung abzüglich des reflektierten Anteils ist gleich der von der Erde abgestrahlten Wärmestrahlung. (Die durch Pflanzen zur Photosynthese «abgezweigte» Energie, der Wärmefluss aus dem Erdinnern und die vom Menschen freigesetzte Verbrennungswärme sind hier vernachlässigbar.) Ozean und Atmosphäre verteilen die Wärme innerhalb des Klimasystems und spielen für das regionale Klima eine wichtige Rolle.

Klimaänderungen sind die Folge von Änderungen in dieser Energiebilanz. Dafür gibt es drei grundsätzliche Möglichkeiten. Erstens kann die ankommende Sonnenstrahlung durch Änderungen in der Umlaufbahn um die Sonne oder in der Sonne selbst variieren. Zweitens kann der ins All zurückgespiegelte Anteil sich ändern. Diese so genannte Albedo beträgt im heutigen Klima 30%. Sie hängt von der Bewölkung und der Helligkeit der Erdoberfläche ab, also von Eisbedeckung, Landnutzung und Verteilung der Kontinente. Und drittens wird die abgehende Wärmestrahlung durch den Gehalt der Atmosphäre an absorbierenden Gasen (oft Treibhausgase genannt) und Aerosolen (also Partikeln in der Luft) beeinflusst – siehe Kapitel 2. All diese Möglichkeiten spielen beim Auf und Ab der Klimageschichte eine Rolle. Zu unterschiedlichen Zeiten dominieren dabei jeweils unterschiedliche Faktoren – welcher Einfluss für einen bestimmten Klimawandel verantwortlich ist, muss also von Fall zu Fall untersucht werden. Eine allgemeine Antwort – etwa dass generell entweder die Sonne oder das CO₂ Klimaveränderungen bestimmt – ist nicht möglich.

Zum Glück ist die Berechnung von Klimagrößen (also Mittelwerten) einfacher als die Wettervorhersage, denn Wetter ist stochastisch und wird stark durch Zufallsschwankungen geprägt, das Klima dagegen kaum. Stellen wir uns einen Topf mit brodelnd kochendem Wasser vor: Wettervorhersage gleicht dem Versuch zu berechnen, wo die nächste Blase aufsteigen wird. Eine «Klimaussage» wäre dagegen, dass die mittlere Temperatur kochenden Wassers bei Normaldruck 100°C beträgt, im Gebirge auf 2500 Meter Höhe durch den geringeren Luftdruck (also bei ver-

änderten Randbedingungen) dagegen nur 90 °C. Aus diesem Grund ist das quantitative Verständnis vergangener Klimaänderungen (oder die Berechnung von Zukunftsszenarien) kein aussichtsloses Unterfangen, und es wurden in den vergangenen Jahrzehnten große Fortschritte auf diesem Gebiet erzielt.

Die Frühgeschichte der Erde

Vor 4,5 Milliarden Jahren entstand aus einem interstellaren Nebel am Rande der Milchstraße unser Sonnensystem, einschließlich der Erde. Die Sonne in seinem Zentrum ist eine Art Fusionsreaktor: Die Energie, die sie abstrahlt, entspringt einer Kernreaktion, bei der Wasserstoffkerne zu Helium verschmolzen werden. Die Entwicklungsgeschichte anderer Sterne und das physikalische Verständnis des Reaktionsprozesses zeigen, dass die Sonne sich dabei allmählich ausdehnt und immer heller strahlt. Wie bereits in den 1950er Jahren von Fred Hoyle berechnet wurde, muss die Sonne zu Beginn der Erdgeschichte 25 bis 30% schwächer gestrahlt haben als heute.⁸

Eine Betrachtung der oben erläuterten Energiebilanz zeigt, dass bei derart schwacher Sonne das Klima global ca. 20 °C kälter und damit deutlich unter dem Gefrierpunkt gewesen sein müsste, wenn die anderen Faktoren (Albedo, Treibhausgase) gleich geblieben wären. Die Albedo nimmt bei kälterem Klima allerdings deutlich zu, weil Eismassen sich ausdehnen – es wird also ein größerer Teil der Sonneneinstrahlung reflektiert. Außerdem nimmt der Gehalt der Atmosphäre an Wasserdampf, dem wichtigsten Treibhausgas, in einem kälteren Klima ab. Beide Faktoren hätten das frühe Klima noch kälter gemacht. Berechnungen zeigen, dass die Erde daher während der ersten 3 Milliarden Jahre ihrer Entwicklungsgeschichte komplett vereist gewesen sein müsste. Zahlreiche geologische Spuren belegen dagegen, dass während des größten Teils dieser Zeit fließendes Wasser vorhanden war. Dieser scheinbare Widerspruch ist als «faint young sun paradox» bekannt – das Paradoxon der schwachen jungen Sonne.

Wie lässt sich dieser Widerspruch auflösen? Wenn man die

obigen Annahmen und Argumente akzeptiert, gibt es nur einen Ausweg: Der Treibhauseffekt (siehe Kap. 2) muss in der Frühgeschichte der Erde erheblich stärker gewesen sein, um die schwächere Sonneneinstrahlung auszugleichen.

Welche Gase könnten den stärkeren Treibhauseffekt verursacht haben? In Frage kommen vor allem Kohlendioxid und Methan.⁸ Beide kamen in der frühen Erdatmosphäre wahrscheinlich in erheblich höherer Konzentration vor. Leider verfügen wir nicht über Proben der damaligen Luft (jenseits der Reichweite der Eisbohrkerne), sodass die Vorstellungen über die frühe Entwicklung der Erdatmosphäre stark auf Indizien und Modellannahmen beruhen. Klar ist jedoch: Beide Treibhausgase können das Problem lösen, ohne dass man unplausible Annahmen über die Konzentration machen müsste. Andererseits ist es kaum wahrscheinlich, dass die Treibhausgase durch Zufall über Jahrmilliarden gerade im richtigen Maße abgenommen haben, um die Zunahme der Sonneneinstrahlung auszugleichen.

Eine befriedigendere Erklärung als der Zufall wäre ein globaler Regelkreis, der – ähnlich wie ein Heizungsthermostat – die Konzentration der Treibhausgase reguliert hat. Klimawissenschaftler haben gleich mehrere solcher Regelkreise ausfindig machen können. Der wichtigste beruht auf dem langfristigen Kohlenstoffkreislauf, der über Zeiträume von Jahrmillionen die Konzentration von Kohlendioxid in der Atmosphäre reguliert. Durch Verwitterung von Gestein an Land (hauptsächlich im Gebirge) wird CO_2 aus der Atmosphäre gebunden und gelangt durch Sedimentation teilweise in die Erdkruste. Gäbe es keinen gegenläufigen Mechanismus, würde auf diese Weise im Lauf der Jahrmillionen alles CO_2 aus der Atmosphäre verschwinden und ein lebensfeindliches eisiges Klima entstehen. Zum Glück gibt es aber auch einen Weg, auf dem das CO_2 wieder in die Atmosphäre zurück gelangen kann: Da die Kontinente driften, wird der Meeresgrund mit seiner Sedimentfracht an manchen Stellen ins Erdinnere gedrückt. Bei den dort herrschenden hohen Temperaturen und Drücken wird das CO_2 freigesetzt und entweicht durch Vulkane zurück in die Atmosphäre. Da die Verwitterungs-

rate stark vom Klima abhängt, entsteht ein Regelkreis: Erwärmt sich das Klima, läuft auch die chemische Verwitterung schneller ab – dadurch wird CO_2 aus der Atmosphäre entfernt und einer weiteren Klimaerwärmung entgegengewirkt.

Dieser Mechanismus könnte erklären, weshalb sich das Klima trotz stark veränderter Sonnenhelligkeit nicht aus dem lebensfreundlichen Bereich bewegt hat.⁸ Die Erdkruste (Gestein und Sedimente) enthält mit rund 66 Millionen Gigatonnen fast hunderttausendmal mehr Kohlenstoff als die Atmosphäre (gegenwärtig 870 Gigatonnen), sodass dieser Regelkreis über ein fast unbegrenztes Reservoir an Kohlenstoff verfügen kann. Allerdings kann er schnellere Klimaänderungen nicht abdämpfen, dafür ist der Austausch von CO_2 zwischen Erdkruste und Atmosphäre viel zu langsam.

Die oben erwähnte verstärkende Eis-Albedo-Rückkopplung dagegen wirkt schnell, und so wurden in den letzten Jahren Belege dafür gefunden, dass sie in der Erdgeschichte mehrmals zu einer Katastrophe geführt hat: zu einer fast kompletten Vereisung unseres Planeten.⁹ Die letzte dieser «Snowball Earth» genannten Episoden fand vor etwa 600 Millionen Jahren statt. Die Kontinente waren selbst in den Tropen mit Eispanzern bedeckt, die Ozeane mit einer mehrere hundert Meter dicken Eisschicht. Am Ende half der Kohlendioxid-Regelkreis der Erde wieder aus dem tiefgefrorenen Zustand heraus: Die CO_2 -Senke der Atmosphäre (nämlich die Verwitterung) kommt unter dem Eis zum Erliegen, die Quelle (Vulkanismus) aber bleibt bestehen. So steigt die CO_2 -Konzentration der Atmosphäre im Lauf von Jahrmillionen unaufhaltsam um ein Vielfaches an (möglicherweise bis zu einer Konzentration von 10%), bis der Treibhauseffekt so stark wird, dass er die Eismassen zu schmelzen vermag, obwohl sie den Großteil des Sonnenlichts reflektieren. Ist das Eis weg, kommt die Erde vom Gefrierschrank in einen Backofen: Die extrem hohe CO_2 -Konzentration führt zu Temperaturen bis zu 50 °C, bis sie allmählich wieder abgebaut wird. Die geologischen Daten zeigen tatsächlich, dass auf die Schneeball-Episoden eine Phase großer Hitze folgte. Manche Biologen sehen in dieser Klimakatastrophe die Ursache für die dann fol-

gende Evolution der großen Vielfalt moderner Lebensformen – bis dahin hatte für Jahrmilliarden lediglich primitiver Schleim die Erde beherrscht.

Klimawandel über Jahrmillionen

Betrachten wir nun die Zeit nach diesen Katastrophen: die letzte halbe Milliarde Jahre. Je mehr wir uns der Gegenwart nähern, desto mehr Informationen haben wir über die Bedingungen auf der Erde. Über die letzten 500 Millionen Jahre ist die Position von Kontinenten und Ozeanen bekannt, und aus Sedimenten lässt sich für diesen Zeitraum das Auf und Ab des Klimas zumindest grob rekonstruieren. Kaltphasen mit Eisbedeckung wechseln sich mit eisfreien warmen Klimaphasen ab.

Auch über den Verlauf der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre gibt es für diesen Zeitraum Abschätzungen aus Daten (Abb. 1.2). Man geht davon aus, dass diese Schwankungen im CO_2 -Gehalt der Atmosphäre durch den oben geschilderten langsamen Kohlenstoffkreislauf verursacht werden. Denn die Geschwindigkeiten, mit denen die Kontinente driften, sind nicht konstant: In unregelmäßigen Abständen kollidieren Kontinente miteinander und türmen dabei hohe Gebirge auf – dadurch wird die Rate der Verwitterung stark beschleunigt. So kommt es zu Schwankungen in der Rate, mit der CO_2 aus der Erdkruste in die Atmosphäre freigesetzt und mit der es wieder aus der Atmosphäre entfernt wird. Dadurch variiert auch die Konzentration von CO_2 in der Luft.

Die Daten zeigen zwei Phasen mit niedrigem CO_2 -Gehalt: die jüngere Klimageschichte der vergangenen Millionen Jahre und einen Zeitraum vor etwa 300 Millionen Jahren. Ansonsten lag der CO_2 -Gehalt zumeist wesentlich höher, über 1000 ppm (parts per Million). Abbildung 1.2 zeigt auch die Verbreitung von Eis auf der Erde, die sich aus geologischen Spuren rekonstruieren lässt. Größere Eisvorkommen fallen dabei zusammen mit Zeiten niedriger CO_2 -Konzentration. Zu Zeiten hoher CO_2 -Konzentration war die Erde weitgehend eisfrei.

Eine solche warme Phase ist die Kreidezeit 140 bis 65 Millio-

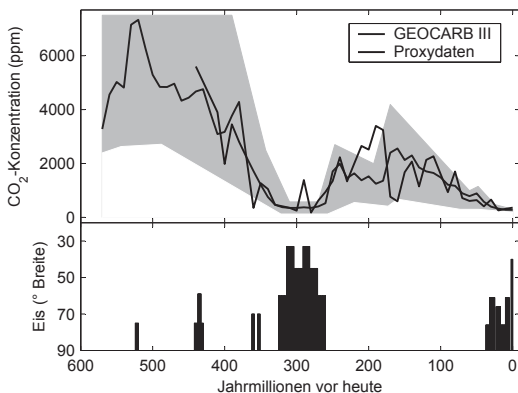


Abb. 1.2: Verlauf von CO_2 -Konzentration und Klima über die abgelaufenen 600 Millionen Jahre. Die schwarze Kurve zeigt eine Rekonstruktion aus vier unabhängigen Typen von Proxy-Daten. Die graue Kurve (mit dem grauen Unsicherheitsbereich) ergibt sich aus einer Modellsimulation des Kohlenstoffkreislaufs. Der untere Teil der Grafik zeigt, als Hinweis auf das Klima, bis zu welchem Breitengrad Kontinental-Eis auf der Erde vorgedrungen ist. Phasen mit niedrigem CO_2 -Gehalt der Atmosphäre fallen mit Vereisungsphasen zusammen. (Quelle: Royer et al. 2004¹⁰)

nen Jahre vor heute. Damals lebten Dinosaurier selbst in polaren Breitengraden – dies zeigen archäologische Funde z. B. aus Spitzbergen und Alaska.¹¹ Seither ist der CO_2 -Gehalt der Atmosphäre langsam, aber stetig abgesunken, bis die Erde vor zwei bis drei Millionen Jahren in ein neues Eiszeitalter geriet, in dem wir bis heute leben. Selbst in den relativ warmen Phasen dieses Eiszeitalters, wie im derzeitigen Holozän, verschwindet das Eis nicht ganz: Die Pole der Erde bleiben eisbedeckt. In den Kaltphasen des Eiszeitalters breiteten sich dagegen gigantische Eispanzer auf den großen Kontinenten des Nordens aus.

Eine plötzliche Warmphase

Die allmähliche Abkühlung der letzten 100 Millionen Jahre geschah jedoch nicht gleichförmig und ungestört: Vor 55 Millionen Jahren wurde sie durch ein dramatisches Ereignis unterbrochen, das so genannte Temperaturmaximum an der Grenze vom

Paläozän zum Eozän (im Fachjargon PETM – Paleocene-Eocene Thermal Maximum).¹² Dieses Ereignis wird unter Klimaforschern in den letzten Jahren viel diskutiert, da es einige Parallelen zu dem aufweist, was der Mensch derzeit verursacht.

Was wissen wir über dieses Ereignis? Kalkschalen aus Sedimenten verraten uns zweierlei: erstens, dass eine große Menge Kohlenstoff in kurzer Zeit in die Atmosphäre gelangte, und zweitens, dass die Temperatur um ca. 5 bis 6 °C anstieg (Abb. 1.3). Auf die Freisetzung von Kohlenstoff kann geschlossen werden, weil sich die Isotopenzusammensetzung des atmosphärischen Kohlenstoffs veränderte. Dass die Konzentration des Isotops C-13 sprunghaft abnahm, lässt sich nämlich nur damit erklären, dass eine Menge Kohlenstoff mit einem niedrigen C-13-Gehalt der Atmosphäre beigemischt wurde. Dies geschah innerhalb von tausend Jahren oder weniger (was sich wegen der geringen Auflösung der Sedimentdaten nicht genauer feststellen lässt). Die Quelle von solchem Kohlenstoff könnten Methaneisvorkommen am Meeresgrund gewesen sein, so genannte Hydrate, ein Konglomerat aus gefrorenem Wasser und Gas, das ähnlich wie Eis aussieht. Methanhydrat ist nur bei hohem Druck und niedrigen Temperaturen stabil. Möglicherweise könnte ein Hydratvorkommen instabil geworden sein, und in einer Kettenreaktion wäre dann durch die damit verbundene Erwärmung immer mehr Hydrat freigesetzt worden. Es gibt aber auch andere Möglichkeiten: die Freisetzung von Kohlendioxid aus der Erdkruste durch starke Vulkanaktivität oder den Einschlag eines Meteoriten.

Wenn man wüsste, wie stark sich die atmosphärische Konzentration der Treibhausgase durch diese Freisetzung verändert hat, dann könnte man etwas darüber lernen, wie stark der dadurch verursachte Treibhauseffekt war. Im Prinzip könnte man dies auch aus den Isotopendaten berechnen – aber nur, wenn der C-13-Gehalt des zugefügten Kohlenstoffs bekannt wäre. Leider hat jede der drei oben genannten möglichen Quellen – Methan-Eis, vulkanischer Kohlenstoff, Meteoriten – eine andere charakteristische Kohlenstoffzusammensetzung. Daher sind quantitative Folgerungen nach dem heutigen Forschungsstand noch nicht möglich – die Spurensuche geht weiter.

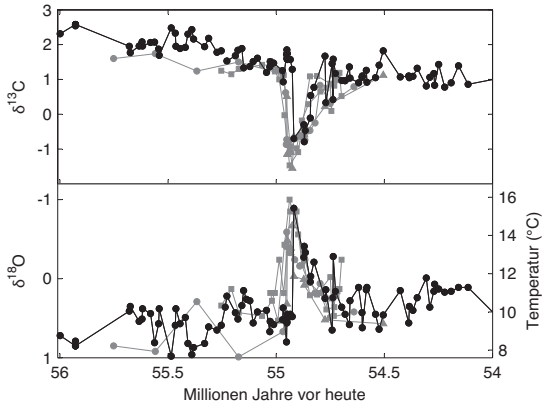


Abb. 1.3: Eine abrupte Klimaerwärmung vor 55 Millionen Jahren. Die oberen Kurven (aus mehreren Sedimentkernen) zeigen die plötzliche Abnahme des Anteils des Isotops C-13 in der Atmosphäre, die unteren Kurven die gleichzeitige Zunahme der Temperatur. (Quelle: Zachos 2001¹²)

Doch eines ist bereits heute klar: Das PETM zeigt, was passieren kann, wenn große Mengen Kohlenstoff in die Atmosphäre gelangen. Das Klima kann sich rasch um mehrere Grad erwärmen, ganz ähnlich wie es auch durch die derzeit ablaufende Freisetzung von Kohlenstoff aus der Erdkruste durch den Menschen erwartet wird.

Die Eiszeitzyklen

Wir bewegen uns nun noch näher an die jüngere Vergangenheit heran und betrachten die letzten ein bis zwei Millionen Jahre der Klimageschichte. Die Geographie der Erde sieht für uns in dieser Zeit vertraut aus: Die Position der Kontinente und Ozeane und die Höhe der Gebirgskzüge entsprechen der heutigen Situation. Auch Tiere und Pflanzen sind uns weitgehend vertraut, auch wenn etliche der damals lebenden Arten (wie das Mammut) inzwischen ausgestorben sind. Der Mensch geht bereits seinen aufrechten Gang. Vor 1,6 Millionen Jahren findet man *Homo erectus* in Afrika und in Südostasien. Vor 400 000 Jahren lebten mehrere Arten von Hominiden, unter

ihnen Neandertaler und Vorläufer des *Homo sapiens*, auch in Europa.

Das Klima dieser Zeit ist geprägt von zyklisch wiederkehrenden Eiszeiten, die vor zwei bis drei Millionen Jahren begannen – sehr wahrscheinlich deshalb, weil seit der Kreidezeit die Konzentration von CO_2 in der Atmosphäre langsam, aber stetig abgesunken war (Abb. 1.2). Die bislang letzte dieser Eiszeiten erreichte vor rund 20 000 Jahren ihren Höhepunkt – zu der Zeit waren unsere Vorfahren bereits moderne Menschen, *Homo sapiens*, sie schufen Werkzeuge und die Höhlenmalereien von Lascaux, sie dachten und kommunizierten ähnlich wie wir. Aber sie mussten mit einem viel harscheren und unstetigeren Klima zurande kommen als die heutigen Menschen.

Die Ursache der Eiszeitzyklen gilt heute als weitgehend aufgeklärt: Es sind die so genannten Milankovitch-Zyklen in der Bahn unserer Erde um die Sonne (Abb. 1.4). Angefangen mit den Arbeiten des belgischen Mathematikers Joseph Adhemar in den 1840er Jahren, hatten Forscher darüber spekuliert, dass Schwankungen der Erdumlaufbahn und die dadurch veränderte Sonneneinstrahlung im Zusammenhang stehen könnten mit dem Wachsen und Abschmelzen von Kontinentaleismassen. Im frühen 20. Jahrhundert wurde diese Theorie dann durch den serbischen Astronomen Milutin Milankovitch genauer ausgearbeitet.¹³ Die dominanten Perioden der Erdbahnzyklen (23 000, 41 000, 100 000 und 400 000 Jahre) treten in den meisten langen Klimazeitreihen deutlich hervor.⁴

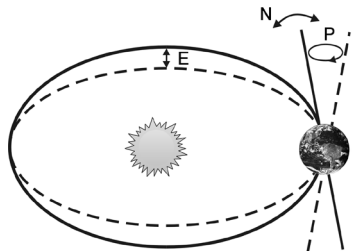
In den letzten Eiszeitzyklen haben die Kaltphasen meist viel länger angehalten (~90 000 Jahre) als die Warmphasen

Abb. 1.4: Schwankungen in der Erdbahn um die Sonne verursachen die Eiszeitzyklen.

E: Variation der Exzentrizität der Erdbahn.

N: Variation des Neigungswinkels der Erdachse.

P: Präzession der Äquinoccien.



(~ 10 000 Jahre). Wenn das für unser Holozän auch gälte, müsste es bald zu Ende sein. Man geht dennoch heute davon aus, dass unsere Warmzeit noch sehr lange anhalten wird. Besonders lange Warmzeiten gibt es immer dann, wenn die Erdbahn in einem Exzentrizitätsminimum (also fast kreisrund) ist, wie zuletzt vor 400 000 Jahren. Die nächste Eiszeit käme demnach wahrscheinlich erst in 50 000 Jahren auf uns zu. Die Milankovitch-Zyklen sind auch in die Zukunft berechenbar, und erst dann wird wieder der kritische Wert für die Sonneneinstrahlung auf der Nordhalbkugel unterschritten.¹⁴ Diese These stützen auch einfache Modellrechnungen, mit denen sich der Beginn der vergangenen zehn Vereisungen korrekt aus den Milankovitch-Zyklen berechnen lässt.¹⁵ Ob es allerdings überhaupt zu dieser nächsten Eiszeit kommt, wird inzwischen von vielen ernsthaft in Frage gestellt. Mehrere der Modelle ergeben nämlich, dass der in diesem Jahrhundert vom Menschen verursachte Anstieg des CO₂ so lange nachwirken könnte, dass dadurch die natürlichen Eiszeitzyklen für mehrere hunderttausend Jahre verhindert würden. Wenn dies stimmt, hätte tatsächlich (wie vom Nobelpreisträger Paul Crutzen vorgeschlagen) eine neue erdklimatische Epoche begonnen: das Anthropozän.¹⁶

Eine Theorie der Eiszeiten muss auch quantitativ erklären, wie die durch die Milankovitch-Zyklen verursachte Änderung der Strahlungsbilanz zu Vereisungen gerade in der richtigen Größe, an den richtigen Orten und in der richtigen zeitlichen Abfolge geführt hat. Dies ist schwierig, aber inzwischen in wichtigen Teilen gelungen. Eine Schwierigkeit ist, dass die Milankovitch-Zyklen die gesamte ankommende Strahlungsmenge kaum beeinflussen, sie ändern lediglich die Verteilung über die Jahreszeiten und Breitengrade. Um dadurch die Erde insgesamt um die beobachteten 4 bis 7 °C abzukühlen, müssen Rückkopplungsprozesse mitspielen.

Die Forschungen haben gezeigt, dass dabei Schnee eine Hauptrolle spielt: Das Eis beginnt immer dann zu wachsen, wenn die Sonneneinstrahlung im Sommer über den nördlichen Kontinenten zu schwach wird, um den Schnee des vorherigen Winters abzuschmelzen. Dann kommt eine Art Teufelskreis in Gang, denn Schnee reflektiert viel Sonnenstrahlung und kühlt damit das

Klima weiter, die Eismassen wachsen langsam auf mehrere tausend Meter Dicke an.

Doch wenn die Sommersonne im Norden schwach ist, ist sie auf der Südhalbkugel umso stärker. Wieso sollte sich also die Südhalbkugel zur gleichen Zeit abkühlen? Die Lösung fand sich in den winzigen Luftbläschen, die im antarktischen Eis eingeschlossen sind: Kohlendioxid. Der Wostok-Eiskern hat gezeigt, dass der CO_2 -Gehalt der Atmosphäre in den letzten 420 000 Jahren im Rhythmus der Vereisungen pendelte, zwischen ca. 190 ppm auf dem Höhepunkt der Eiszeiten und 280 ppm in Warmzeiten (Abb. 1.1). CO_2 wirkt als Treibhausgas (Kap. 2): Berücksichtigt man diese Strahlungswirkung im Klimamodell, dann erhält man realistische Simulationen des Eiszeitklimas.¹⁷ Da das CO_2 aufgrund seiner langen Verweilzeit in der Atmosphäre gut durchmischt ist und daher das Klima global beeinflusst, kann es auch die – sonst unerklärliche – Abkühlung in der Antarktis während der Eiszeiten erklären.

Das CO_2 funktioniert hier als Teil einer Rückkopplungsschleife: Fällt die Temperatur, so fällt der CO_2 -Gehalt der Luft, dies verstärkt und globalisiert wiederum die Abkühlung. Im Gegensatz zum zweiten Teil dieser Rückkopplung (also der Wirkung des CO_2 auf die Temperatur) ist der erste Teil derzeit in der Forschung noch nicht ganz verstanden: Wieso sinkt der CO_2 -Gehalt, wenn die Temperatur fällt? Offenbar verschwindet das CO_2 im Ozean, aber welche Mechanismen daran welchen Anteil haben, ist noch unklar. Klar ist aus den Eiskerndaten jedoch eines: Diese Rückkopplung funktioniert. Dreht man an der Temperatur (etwa durch die Milankovitch-Zyklen), so folgt mit einer für den Kohlenstoffkreislauf charakteristischen Verzögerung das CO_2 ; dreht man dagegen am CO_2 (wie derzeit der Mensch), so folgt wenig später die Temperatur.

Abrupte Klimawechsel

Die Klimageschichte hat auch handfeste Überraschungen zu bieten. Im Verlauf der letzten Eiszeit kam es über zwanzigmal zu plötzlichen, dramatischen Klimawechseln¹⁸ (Abb. 1.5). Inner-

halb von nur ein bis zwei Jahrzehnten stieg in Grönland die Temperatur um bis zu 12 °C an und blieb dann mehrere Jahrhunderte warm.^{19, 20} Auswirkungen dieser so genannten «Dansgaard-Oeschger-Ereignisse» (kurz DO-events) waren weltweit zu spüren – eine internationale Arbeitsgruppe hat bereits im Jahr 2002 Daten von 183 Orten zusammengetragen, an denen sich synchron das Klima änderte.²¹

Im Zusammenspiel solcher Messdaten mit Modellsimulationen entstand am Anfang dieses Jahrhunderts eine Theorie der Dansgaard-Oeschger-Ereignisse, die die meisten Beobachtungsdaten gut zu erklären vermag, u. a. den charakteristischen Zeitablauf und das spezifische räumliche Muster von Erwärmung und Abkühlung.²² Demnach handelt es sich bei diesen abrupten Klimawechseln um sprunghafte Änderungen der Meeresströme im Nordatlantik, die riesige Wärmemengen in den nördlichen Atlantikraum bringen und teilweise für das milde Klima bei uns verantwortlich sind. Wahrscheinlich benötigten diese Strömungsänderungen nur einen minimalen Auslöser. Dies legen jedenfalls unsere Modellsimulationen nahe, und auch in den Klimadaten deutet nichts auf einen starken äußeren Auslöser hin. Die Atlantikströmung stand während der Eiszeit wohl regelrecht auf der

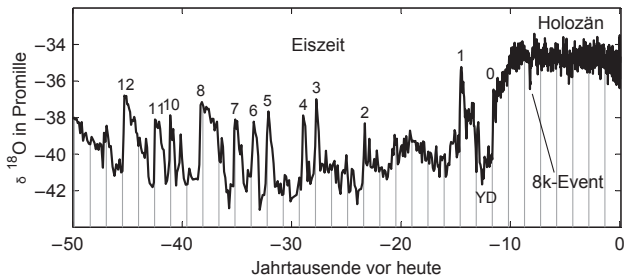


Abb. 1.5: Klimaentwicklung in Grönland in den abgelaufenen 50 000 Jahren. Die abgelaufenen zehntausend Jahre, das Holozän, sind durch ein stabiles, warmes Klima gekennzeichnet. Das Eiszeitklima in der Zeit davor wird durch plötzliche Warmphasen unterbrochen, die Dansgaard-Oeschger-Ereignisse (nummeriert). Die senkrechten Linien markieren Intervalle von 1470 Jahren Länge. Die letzte Kaltphase der Eiszeit ist die Jüngere Dryas (YD). Zu Beginn des Holozän, vor 8200 Jahren, gab es eine kleinere Abkühlung: das 8k-Ereignis. (Quelle: Rahmstorf 2002²³)

Kippe zwischen zwei verschiedenen Strömungsmustern und sprang ab und zu zwischen diesen hin und her.

DO-Events sind aber nicht die einzigen abrupten Klimasprünge, die die jüngere Klimageschichte zu bieten hat. Während der letzten Eiszeit kam es in unregelmäßigen Abständen von mehreren tausend Jahren zu so genannten Heinrich-Ereignissen. Man erkennt sie in den Tiefseesedimenten aus dem Nordatlantik, wo jedes dieser spektakulären Ereignisse anstatt des sonstigen weichen Schlamms eine bis zu einige Meter dicke Schicht von Steinchen hinterließ.²⁴ Diese Steinchen sind zu schwer, um vom Wind oder von Meeresströmungen transportiert worden zu sein – sie können nur von schmelzenden Eisbergen herab auf den Meeresgrund gefallen sein. Offenbar sind also immer wieder regelrechte Armadas aus Eisbergen über den Atlantik getrieben. Man geht davon aus, dass es sich um Bruchstücke des Nordamerikanischen Kontinentaleises handelte, die durch die Hudsonstraße ins Meer gerutscht sind. Ursache war wahrscheinlich eine Instabilität des mehrere tausend Meter dicken Eispanzers. Durch Schneefälle wuchs er ständig an, bis Abhänge instabil wurden und abrutschten – ähnlich wie bei einem Sandhaufen, bei dem gelegentlich Lawinen abgehen, wenn man immer mehr Sand darauf rieseln lässt.

Sedimentdaten deuten darauf hin, dass infolge der Heinrich-Events die Atlantikströmung vorübergehend ganz zum Erliegen kam.²³ Klimadaten zeigen eine damit verbundene plötzliche Abkühlung vor allem in mittleren Breiten, etwa im Mittelmeerraum.

Mehr Informationen zu diesem und vielen weiteren Büchern aus dem Verlag C.H.Beck finden Sie unter: www.chbeck.de