

 **WISSEN**

C.H. BECK

S. Rahmstorf

H. J. Schellnhuber

**DER KLIMAWANDEL**



reguliert hat. Klimawissenschaftler haben gleich mehrere solcher Regelkreise ausfindig machen können. Der wichtigste beruht auf dem langfristigen Kohlenstoffkreislauf, der über Zeiträume von Jahrtausenden die Konzentration von Kohlendioxid in der Atmosphäre reguliert. Durch Verwitterung von Gestein an Land (hauptsächlich im Gebirge) wird  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre gebunden und gelangt durch Sedimentation teilweise in die Erdkruste. Gäbe es keinen gegenläufigen Mechanismus, würde auf diese Weise im Lauf der Jahrtausenden alles  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre verschwinden und ein lebensfeindliches eisiges Klima entstehen. Zum Glück gibt es aber auch einen Weg, auf dem das  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  freigesetzt und entweicht durch Vulkane zurück in die Atmosphäre. Da die Verwitterungsrate stark vom Klima abhängt, entsteht ein Regelkreis: Erwärmt sich das Klima, läuft auch die chemische Verwitterung schneller ab – dadurch wird  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$ -Senke der Atmosphäre (nämlich die Verwitterung) kommt unter dem Eis zum Erliegen, die Quelle (Vulkanismus) aber bleibt bestehen. So steigt die  $\text{CO}_2$ -Konzentration der Atmosphäre im Lauf von Jahrtausenden 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  $\text{CO}_2$ -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 folgende 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<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre gibt es für diesen Zeitraum Abschätzungen aus Daten (Abb. 1.2). Man geht davon aus, dass diese Schwankungen im CO<sub>2</sub>-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<sub>2</sub> aus der Erdkruste in die Atmosphäre freigesetzt und mit der es wieder aus der Atmosphäre entfernt wird. Dadurch variiert auch die Konzentration von CO<sub>2</sub> in der Luft.

Die Daten zeigen zwei Phasen mit niedrigem CO<sub>2</sub>-Gehalt: die jüngere Klimageschichte der vergangenen Millionen Jahre und einen Zeitraum vor etwa 300 Millionen Jahren. Ansonsten lag der CO<sub>2</sub>-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<sub>2</sub>-Konzentration. Zu Zeiten hoher CO<sub>2</sub>-Konzentration war die Erde weitgehend eisfrei.

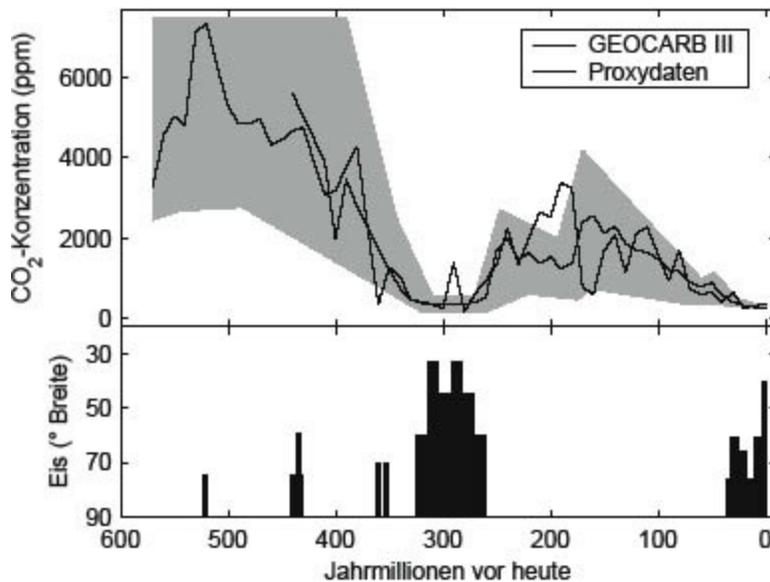


Abb. 1.2: Verlauf von CO<sub>2</sub>-Konzentration und Klima über die abgelaufenen 600 Millionen Jahre. Die schwarze Kurve zeigt eine Rekonstruktion aus vier unabhängigen Typen von Proxy-Daten. Die graue Kurve (mit dem grauen Unsicherheitsbereich) ergibt sich aus einer Modellsimulation des Kohlenstoffkreislaufs. 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<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre fallen mit Vereisungsphasen zusammen. (Quelle: Royer et al. 2004[10])

Eine solche warme Phase ist die Kreidezeit 140 bis 65 Millionen 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<sub>2</sub>-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.

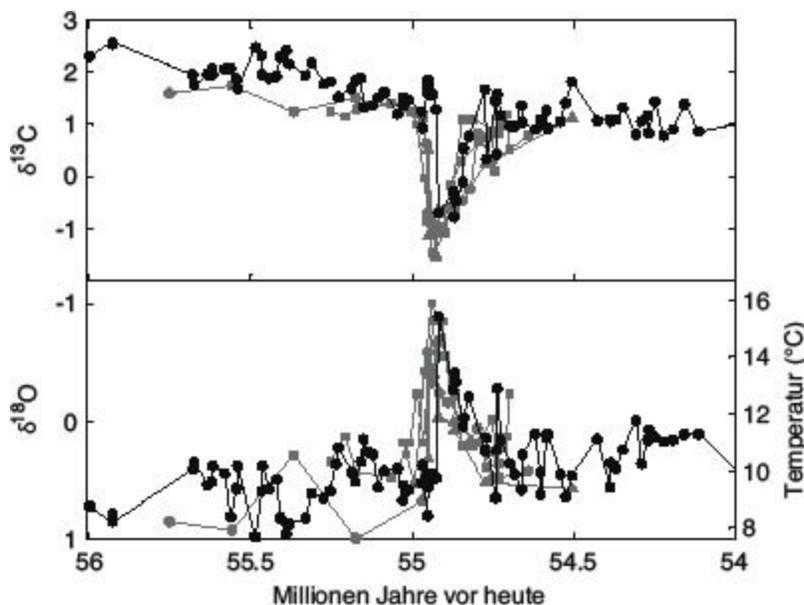


Abb. 1.3: Eine abrupte Klimaerwärmung vor 55 Millionen Jahren. Die oberen Kurven (aus mehreren Sedimentkernen) zeigen die plötzliche Abnahme des Anteils des Isotops C-13 in der Atmosphäre, die unteren Kurven die gleichzeitige Zunahme der Temperatur. (Quelle: Zachos 2001[12])

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.

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 Gebirgszüge 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<sub>2</sub> 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 zurecht 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]