Als die Arktis tropisch war

Was wir aus vergangenen Warmzeiten lernen können

von Anne Hardy

Schon zu früheren Zeiten in der Erdgeschichte gab es Warmzeiten durch starke Treibhauseffekte, mit tropischen Temperaturen in weiten Teilen der Erde, hohem Meeresspiegel und massivem Artensterben. Das belegen Daten aus der Paläoklimatologie. Wenn man heutige Klimamodelle auf solche geologischen Warmzeiten anwendet, kann man sie testen und verbessern. So verhilft die Paläoklimatologie zu einem präziseren Blick in unsere Klimazukunft

Ende der 1980er Jahre entdeckten Geologen bei einer Tiefseebohrung in der Antarktis Hinweise auf ein weiteres, bisher unbekanntes Aussterbe-Ereignis. Es passierte zehn Millionen Jahre, nachdem die Dinosaurier verschwunden waren. Weitere Bohrungen an anderen Orten bestätigten die Ergebnisse, doch als die Arbeiten 1991 publiziert wurden, hielt sich das öffentliche Aufsehen in Grenzen. Das mag daran gelegen haben, dass die Mehrzahl der ausgelöschten Arten nur stecknadelkopfgroße Einzeller waren, Foraminiferen, die teils auf dem Meeresboden und teils im Wasser schwebend gelebt hatten. Sie verschwanden auch nicht so spektakulär wie die Dinosaurier durch den Einschlag eines Asteroiden, sondern während der wärmsten Warmzeit, die es in den vergangenen hundert Millionen Jahren der Erdgeschichte gegeben hat. Das macht sie heutzutage für die Klimaforschung so interessant.

Die extreme Warmzeit, von der die Rede ist, liegt am Übergang vom Paläozän zum Eozän vor 56 Millionen Jahren, weshalb Geologen vom »Paläozän/Eozän-Temperaturmaximum«, kurz PETM, sprechen. Die Phase dauerte rund 200 000 Jahre, was im Vergleich zur Erdgeschichte von 4,5 Milliarden Jahren kaum mehr als ein Wimpernschlag und in der Welttemperaturkurve nur eine feine, lange Nadelspitze ist. Zuvor war innerhalb von nur 4000 Jahren die Kohlendioxid-(CO_2)Konzentration in der Atmosphäre rasch angestiegen. Und dieser rasche CO_2-Anstieg macht das PETM angesichts des aktuellen, rapiden CO_2-Freisetzens durch menschliche Aktivitäten hochrelevant.

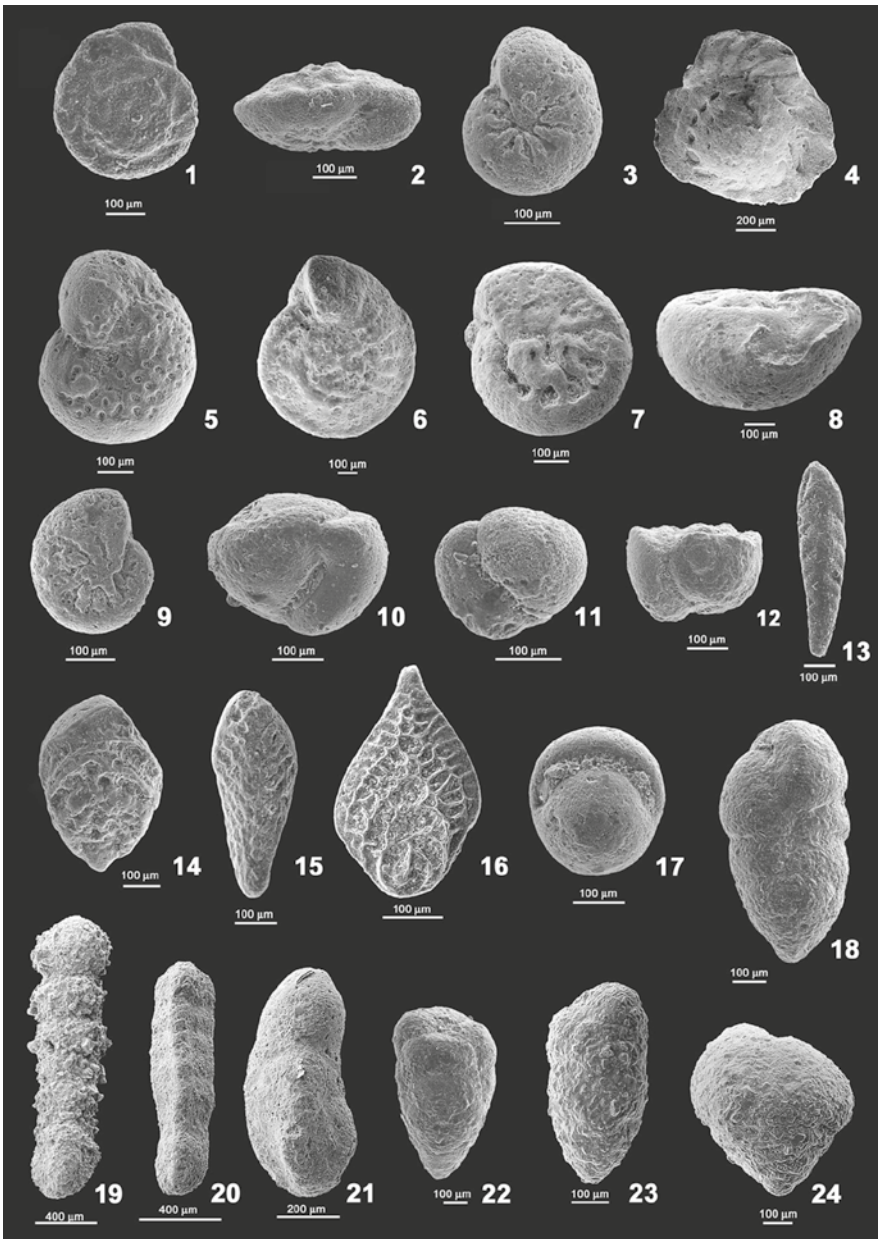
Die durchschnittliche Temperatur in der PETM-Warmzeit war etwa fünf bis acht Grad höher als davor und danach, und das in einer schon generell viel wärmeren Welt als heute. Es gab keine permanenten Eisschilde, die Antarktis war damals schon grün und der Meeresspiegel wesentlich höher.

Massensterben im Meer

Durch die hohe CO_2-Konzentration in der Atmosphäre während des PETM löste sich mehr CO_2 im Wasser. Es kam zu einer Versauerung der Meere, chemisch gesprochen zu einer Abnahme des pH-Werts. Dadurch starben viele Organismen mit Kalkschalen, da sich diese im sauren Wasser auflösten. In Bohrkernen erkennt man PETM-Ablagerungen daran, dass der helle Farbton abgelagerter Kalkschalen verschwindet und die Farbe stattdessen rötlich ist wie Tonerde.

Zusätzlich erwärmte sich das Meerwasser bis in die tieferen Schichten, was zum Aussterben vieler Meeresbewohner führte. Insbesondere waren die Tiefsee-Organismen betroffen, die weniger anpassungsfähig sind als oberflächennahe Meereslebewesen oder Landbewohner. Das bedeutete nicht nur das Ende von bodennah lebenden Foraminiferen, sondern auch

Im Inuit-Territorium Nunavut in Kanada hält Johnny Issaluk das Foto eines Sumpfes in South Carolina in den Händen. Während des Paläozän/Eozän-Temperaturmaximums vor 56 Millionen Jahren, bei dem die CO_2-Konzentration der Atmosphäre deutlich höher war als heute, sah die Arktis so aus wie dieser Sumpf.



Diese Foraminiferen-Fossilien geben einen Eindruck der ungeheuren Artenvielfalt der nur stecknadelkopfgroßen Einzeller. Alle hier abgebildeten Arten lebten auf dem Meeresboden und starben während des PETM aus. Denn durch den hohen CO_2-Gehalt der Atmosphäre waren die Ozeane so sauer, dass sie die Kalkgehäuse der Einzeller auflösten.

(aus: Guisberti, Galazzo, Thomas, Clim. Past, 12, 213-240, 2016)

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Am Übergang vom Paläozän zum Eozän vor etwa 56 Millionen Jahren war die CO_2-Konzentration in der Atmosphäre deutlich höher als heute.
- Der Temperaturunterschied zwischen den Dürre- und Wüstengebieten am Äquator und den tropischen Polarregionen war geringer als heute. Diese Zustände kann die Klima-Modellierung bislang nicht ausreichend reproduzieren.
- Die Rate, mit der Treibhausgase zurzeit vom Menschen in die Atmosphäre freigesetzt werden, übertrifft die natürliche Rate in früheren »Hoch-CO_2«-Zeiten um ein Vielfaches.

zahlreicher Seeigel-, Muschel- und Schneckenarten. Der Artenschwund in der Tiefsee wird auf 30 bis 50 Prozent geschätzt.

An Land verwandelten sich zuvor bewaldete Gebiete der Äquatorialregion in Dürregebiete und Wüsten mit örtlichen Temperaturspitzen von weit über 40 Grad, wie Fossilfunde von Pflanzen aus Wyoming oder Tansania belegen. Die Tiere passten sich an die Verknappung der pflanzlichen Nahrung durch Kleinwüchsigkeit an. In der Folge setzte die »Verzwergung« auch bei den Raubtieren ein.

Gleichzeitig erweiterte sich der Lebensraum von Reptilien bis zu den Polkappen hin. Die Arktis war tropisches Marschland, in dem, wie in den Everglades im heutigen Florida, Vorfahren der Alligatoren, Krokodile und Schlangen lebten. Das warme Klima und das vorherige Verschwinden der Dinosaurier läutete die Ära der Säugetiere ein, deren Lebensraum und Vielfalt sich enorm erweiterte. Neue Tierarten entstanden, unter ihnen Wale und Delphine, Kamele, Schafe, Kühe und schließlich Primaten.

Vulkane und Methan-Eis

Wie es zur Erderwärmung im PETM kam, ist bis heute nicht abschließend geklärt. Vermutlich gab es mehrere Faktoren. Da ist zunächst die verstärkte Aktivität von Vulkanen im Nordatlantischen Rücken, die nicht nur große Mengen CO_2 in die Atmosphäre freisetzten, sondern auch Grönland, Island, Norwegen, Irland und Schottland mit Lava bedeckten.

Zusätzlich müssen wohl noch große Mengen Methangas (CH_4) freigesetzt worden sein. Dieses Gas hat im Vergleich zu Kohlendioxid einen 30-mal stärkeren Treibhauseffekt. Methan entsteht bei organischen Zersetzungsprozessen, also auch im Meer, wo absterbende Organismen auf den Boden sinken und sich dort über Millionen Jahre aufeinanderschichten. Unter bestimmten Bedingungen wird das Gas von einem kugelförmigen Käfig aus Meerwasser-Eis umschlossen. Während des PETM erwärmte sich das Meerwasser bis in die Tiefe, und so schmolzen große Teile des Methan-Eises und setzten das potente Treibhausgas frei. An Land tauten Permafrostböden auf, in denen viel abgestorbene organische Materie wie in einem Gefrierschrank vor der Zersetzung bewahrt wird.

Eine Kombination dieser Prozesse bewirkte den ungeheuren Anstieg von CO_2 und anderen Treibhausgasen in der Atmosphäre. Innerhalb von 4000 Jahren kamen wohl 2400 bis 4500 Gigatonnen CO_2 zusammen. Diese natürliche Freisetzung von CO_2 vor 56 Millionen Jahren war allerdings mit einer Rate von etwa einer Gigatonne pro Jahr deutlich langsamer als heutige Emissionen: Der Mensch bringt es auf

zehn Gigatonnen pro Jahr. Damit zeigt das PETM-Ereignis zwar, wie das aktuelle Klima sich in der »Hoch-CO_2«-Welt entwickeln könnte. Andererseits stoßen Wissenschaftler aber bei der Suche nach vergleichbaren natürlichen geologischen Situationen inzwischen an Grenzen.

Tiefseebohrungen als Klimaarchiv

Die Vorstellung davon, welche ungeheuren natürlichen Schwankungen es im Erdklima vergangener Erdzeitalter gegeben hat, verdanken wir u. a. Experten für Isotopen-Geochemie wie Prof. Wolfgang Müller. »Ozeanische Ablagerungen sind das beste Langzeit-Klimaarchiv, das wir auf der Erde haben, weil die Schichtenfolge der abgestorbenen Organismen dort nicht gestört ist«, erklärt Müller. Er und sein Team haben Gehäuse von Foraminiferen aus solchen Ablagerungen untersucht. So können die Wissenschaftler auf die Temperatur und den CO_2-Gehalt des Meeres zu verschiedenen Zeiten schließen.

Ein großer Teil der einzelligen Foraminiferen, von denen sich die verschiedensten Arten im Meer tummeln, baut ihr Gehäuse aus Kalk, chemisch: Kalziumkarbonat. Dazu verwenden die Einzeller gelöstes Karbonat aus dem Meereswasser. Mit zunehmender Versauerung der Meere wird jedoch weniger Karbonat gebildet, so dass die Schale der Foraminiferen weicher wird. Auf diese Weise geben die Proben aus Tiefseebohrungen noch Jahrmillionen später Auskunft über den CO_2-Gehalt im Meer.

Zusätzlich können Geologen auf die damals herrschenden Temperaturen schließen, indem sie den Magnesium-Anteil untersuchen, der als Unreinheit in der Schale der Foraminiferen auftritt. Die Einzeller bauen es statt Kalzium in ihre Kalziumkarbonat-Schalen ein. Und zwar umso mehr, je wärmer das Meer wird. Dieses »Magnesium-Thermometer« hat Müllers Mitarbeiter Dr. David Evans weiterentwickelt und insbesondere erfolgreich auf die Umwelt des Eozäns angewandt.

Zusätzlich bauen Foraminiferen statt des Kalziumkarbonats zuweilen auch Borat (BO_4) in ihr Skelett ein. Bor hat verschiedene Isotope, das heißt, die Masse des Elements variiert wegen der unterschiedlichen Anzahl an Neutronen im Atomkern. Am häufigsten ist das Isotop mit sechs Neutronen, aber es gibt auch stabile Isotope mit nur fünf Neutronen. Die Paläoklimatologie macht sich zunutze, dass die Häufigkeitsverteilung der Bor-Isotope im Meerwasser vom pH-Wert abhängt. Deshalb erlaubt sie Rückschlüsse auf die CO_2-Konzentration im Wasser und indirekt auch in der Atmosphäre. Ähnliche Untersuchungen machen Müller und sein Team auch an anderen Meerestieren wie Korallen, Muscheln und Schnecken.

Klimamodelle verbessern

Müller ist Sprecher des von der hessischen Landesregierung geförderten LOEWE-Schwerpunktprojekts VeWA »Vergangene Warmzeiten als natürliche Analoge unserer ›Hoch-CO_2‹-Klimazukunft«, in dem die Goethe-Universität und die Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung (SGN) kooperieren. In diesem Konsortium, das im Sommer 2020 die Arbeit aufnahm, untersuchen Forscher in elf Teilprojekten unterschiedliche Klimazeugen von der Kreidezeit – der Ära der Dinosaurier – bis zum Ende des Eozäns, als die Antarktis wieder vereiste.

»Wenn wir möglichst präzise Daten über vergangene Warmzeiten und ihre ›Hoch-CO_2‹-Welt haben, ist das auch ein guter Test für heutige Klimamodelle«, erklärt Wolfgang Müller. Denn wenn diese im Rückblick gut mit den paläoklimatischen Daten übereinstimmen, kann man ihnen auch zuverlässige Vorhersagen zutrauen.

Noch exaktere Temperaturdaten aus früheren Erdzeitaltern verspricht eine in diesem Jahr am Institut für Geowissenschaften entwickelte Methode. Dieses Verfahren der Arbeitsgruppe von Prof. Jens Fiebig, die auch am VeWA-Schwerpunkt beteiligt ist, basiert darauf, dass die isotopische Zusammensetzung der Karbonate, genauer gesagt der Grad der »Verklumpung« ihrer schweren Isotope, in den Skeletten von Meeres- und Landbewohnern temperaturabhängig ist. Zusätzlich spielen aber auch die jeweiligen Umstände der Mineralisation eine Rolle, also der Mechanismus und die Geschwindigkeit der Karbonatbildung. Dieser Einfluss kann nun herausgerechnet werden. Im VeWA-Projekt soll diese isotopenbasierte Methode auf verschiedene Karbonatarchive der Kreidezeit und des Eozäns angewendet werden.

Zur Person

Prof. Dr. Wolfgang Müller, Jahrgang 1967, ist seit August 2017 Professor für Geologie und Paläoumweltforschung mit Schwerpunkt Isotopengeochemie an der Goethe-Universität. Er studierte Geologie an der Universität Wien. 1998 promovierte er an der Eidgenössisch-Technischen Hochschule (ETH) Zürich. Seine Postdoktoranden-Zeit verbrachte er in der Schweiz und vor allem in Australien. 2004 bis 2017 war er an der Royal Holloway University in London, an der er zuletzt eine Professur für Isotopengeochemie innehatte. Er ist Initiator und Sprecher des LOEWE-Projekts VeWA »Vergangene Warmzeiten«, das im Sommer 2020 begonnen hat.

www.vewa-project.de
w.muller@em.uni-frankfurt.de

Im PETM starben Foraminiferen rasch aus und konnten keine Sedimente mehr bilden. In Bohrkernen – hier ein Foto des Paläoklimatologen James Zachos – wird dies sichtbar als abrupte dunkelbraune Färbung der sonst eher kalkig-weißlichen Sedimentschichten.

Davon sollen auch die Klimasimulationen profitieren, die derzeit ein entscheidendes Kennzeichen vergangener Warmzeiten nicht gut reproduzieren können, und zwar das geringe Temperaturgefälle zwischen dem Äquator und den Polen. Der flache »meridionale Temperaturgradient«, wie er in der Fachsprache heißt, zeigt an, dass sich die tropischen Ozeane in Warmzeiten viel weniger stark erwärmen, dafür aber viel Hitze von den Tropen zu den Polen transportiert wird. Diesen Prozess wollen Forscher in mehreren VeWA-Teilprojekten untersuchen.

Lernen für die Zukunft

»Wenn wir darauf warten, dass die Treibhausgase auf natürlichem Weg wieder auf das vorindustrielle Niveau zurückgehen, dauert das auf der menschlichen Zeitskala viel zu lang«, sagt Müller. Nach dem PETM-Ereignis etwa erstreckte sich die Abkühlungsphase über 100 000 Jahre. Eine wichtige Rolle spielt dabei die Verwitterung von Silikat-Gesteinen wie Basalt, Granit oder Gneis. Dabei wird CO_2 der Luft in Form von Kohlensäure entzogen und als Karbonat mit dem Sediment der Flüsse in den Ozean transportiert. Dort bauen Meeresorganismen das Karbonat in ihre Schale ein, wo es lange gespeichert wird, so dass der CO_2-Gehalt in der Atmosphäre sinkt. In einem VeWA-Teilprojekt untersuchen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler um Prof. Silke Voigt insbesondere die temperaturabhängige Verwitterung von Silikaten mithilfe der Isotopenzusammensetzung des Elements Lithiums, des leichtesten Metalls überhaupt.

Können wir an früheren Warmzeiten ablesen, was passiert, wenn der CO_2-Ausstoß nicht gedrosselt wird? Für VeWA ist einer der Schwerpunkte das eozäne »Hothouse«, in dem die CO_2-Konzentration in der Atmosphäre bei 1000 Teilen pro Million (parts per million, ppm) lag. Im Vergleich dazu sind wir heute bei fast 415 ppm, was bereits mehr als 130 ppm über dem Wert der vorindustriellen Zeit liegt. Und derzeit steigt die CO_2-Konzentration jährlich um zwei bis drei ppm. Müller veranschaulicht, welche spürbaren Klimaeffekte schon bei relativ kleinen CO_2-Schwankungen von »nur« 100 ppm auftreten können: »Aus den Eisbohrkernen der Antarktis, die die acht Hauptzyklen von Warm- und Kaltzeiten der letzten 800 000 Jahre widerspiegeln, wissen wir: Während der letzten kältesten Phase vor 20 000 Jahren war der Meeresspiegel um 130 Meter tiefer als heute, und der CO_2-Gehalt lag bei 180 ppm. Das sind nur 100 ppm weniger als vorindustriell, aber trotzdem war es global vier Grad kälter.« Damals war die Nordsee trocken, Nordamerika mit Russland, Australien mit Papua-Neuguinea, Indonesien mit dem asiatischen Festland verbunden.

Für Paläoklimatologen wie Müller ist es höchste Zeit, den Trend umzukehren. »Wir nähern uns ohne rasches Gegensteuern einem Kipp-Punkt«, meint er. An diesen Punkten reicht bereits ein geringer äußerer Einfluss, um abrupte Änderungen im Klimasystem hervorzurufen. Ein solcher Kipp-Punkt könnte erreicht sein, wenn der CO_2-Ausstoß 500 ppm erreicht. Ab diesem Wert erwarten Klimatologen einen nicht mehr umkehrbaren, sich selbst verstärkenden Effekt bei der Erderwärmung. Wenn etwa durch einen noch stärkeren Treibhauseffekt die Polkappen abschmelzen, wird weniger Sonnenlicht reflektiert, was die Erde weiter erwärmt. Aus den aufgetauten Permafrostböden werden zusätzlich Klimagase, v. a. das schädliche Methan, freigesetzt, die den Treibhauseffekt weiter verstärken. Und der Meeresspiegel steigt rasant durch destabilisierte Eisschilde wie in Grönland.

»Leider sind die Menschen sehr träge beim Verändern ihrer Gewohnheiten«, bedauert Müller. Er verweist darauf, dass die letzten drei Sommer in Europa bereits überdurchschnittlich warm waren und wünscht sich rasch eine stärkere politische Steuerung durch einen CO_2-Preis. Dennoch ist er optimistisch, dass wir bei einem moderaten Gebrauch der Ressourcen und dem Einsatz erneuerbarer Energien noch vermeiden können, auf das Extremklima der geologischen Warmzeiten zuzusteuern. Wichtig ist ihm und seinen Kollegen im LOEWE-Projekt »Vergangene Warmzeiten« daher auch, dass sich das Wissen um die Zusammenhänge des Klimawandels rasch noch stärker in der Bevölkerung verbreitet. Die Ergebnisse des Projekts sollen deshalb in einer Reihe durch die LOEWE-Initiative geförderte Aktivitäten im Senckenberg Museum präsentiert werden. ●

Die Autorin

Dr. Anne Hardy, Jahrgang 1965, studierte Physik und promovierte in Wissenschaftsgeschichte. Sie ist als freie Wissenschaftsjournalistin auf Themen der Naturwissenschaft und Medizin spezialisiert.

anne.hardy@t-online.de