



Grüne und purpurne Schwefelbakterien besiedeln heiße Quellen wie diese. Deren Wasser enthält keinen Sauerstoff, dafür aber reichlich Schwefelwasserstoff. Bei Phasen massenhaften Artensterbens in der Vergangenheit waren Schwefelbakterien auch in Ozeanen weit verbreitet. Demnach dürften damals in den Meeren ähnliche Bedingungen wie an dieser Quelle geherrscht haben.

WUNSCHARTIKEL

# Tod aus der Tiefe

Sehr wahrscheinlich verursachten nicht Asteroiden, sondern erstickende Hitze und Giftgase, die aus fauligen Ozeanen aufstiegen, die meisten Massensterben der Vergangenheit. Treibt die Erde wieder auf eine solche Treibhauswelt zu?

Von Peter D. Ward

Der Philosoph und Wissenschaftstheoretiker Thomas S. Kuhn behauptete einst, wissenschaftliche Ideengebäude verhielten sich ähnlich wie Lebewesen: Anstatt sich langsam und kontinuierlich zu entwickeln, durchliefen sie lange Phasen der Stagnation, unterbrochen von seltenen Revolutionen, bei denen eine allgemein anerkannte Theorie plötzlich durch ein neues »Paradigma« ersetzt wird – analog etwa zum Untergang der lange die Erde beherrschenden Dinosaurier und dem Aufstieg der Säugetiere.

Diese Charakterisierung trifft speziell auf meinen Forschungsbereich zu: die Untersuchung der Ursachen und Folgen von Massensterben. Bei diesen periodisch wiederkehrenden biologischen Umbrüchen starb jeweils ein großer Teil der Lebewesen auf der Erde aus. Nachher war nichts mehr wie zuvor.

Nachdem die Paläontologen Ende des 18. Jahrhunderts diese Episoden massenhaften Artentods in der Erdgeschichte entdeckt hatten, vermuteten sie dahinter zunächst Vorgänge, die sich über einen längeren Zeitraum hinzogen und durch Klimaänderungen oder Phasen massiven Vulkanismus hervorgerufen wurden. Doch 1980 ereignete sich ein Kuhn'scher Paradigmenwechsel, als der Geologe Walter Alvarez und seine Mitarbeiter an der Universität von Kalifornien in Berke-

ley das berühmte Dinosauriersterben vor 65 Millionen Jahren als Folge einer plötzlichen ökologischen Katastrophe darstellten, ausgelöst durch den Sturz eines Asteroiden auf die Erde.

In den folgenden zwei Jahrzehnten fand der Gedanke, eine Bombe aus dem All könne jeweils einen großen Teil des irdischen Lebens vernichtet haben, weithin Anklang. Viele Forscher meinten schließlich, dass kosmischer Schutt wohl mindestens drei weitere der fünf größten Artensterben ausgelöst habe. In der Öffentlichkeit verhalten Hollywood-Reißer wie »Deep Impact« und »Armageddon – Das jüngste Gericht« dieser Vorstellung zu großer Popularität.

Jetzt bahnt sich meines Erachtens erneut ein Umbruch in der Sicht auf die einstigen Massensterben an. Anlass sind neue geochemische Hinweise in den Gesteinsschichten, in denen sich die Katastrophen stratigrafisch abbilden. Für Aufregung sorgt dabei vor allem die Entdeckung organischer Biomarker. Darunter versteht man chemische Überreste winziger Lebensformen, die in der Regel keine Fossilien hinterlassen.

Den neuen, verfeinerten Daten zufolge verursachten Einschläge großer Asteroiden oder Meteoriten offenbar nur einen Teil der Massensterben. In den meisten Fällen scheint die Erde selbst zum schlimmsten Feind des Lebens geworden zu sein – in einer Weise, die sich bisher niemand träumen ließ. Was an die-

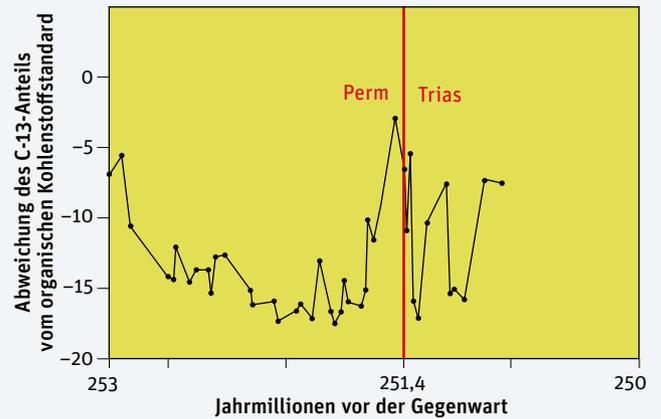
ser Erkenntnis vor allem beunruhigt: Heutige menschliche Aktivitäten könnten die Biosphäre wieder in Gefahr bringen.

Basis der Einschlagtheorie war der Fund von Iridium, das sich in einer Staubschicht, welche die Grenze zwischen der Kreidezeit und dem Tertiär markiert, in ungewöhnlich hoher Konzentration abgelagert hat. Aus der Menge dieses Elements, das auf der Erde sehr selten, in außerirdischen Gesteinen aber recht häufig ist, schloss Alvarez gemeinsam mit seinem Vater, dem Physiker Luis W. Alvarez, sowie den Nuklearchemikern Helen V. Michel und Frank Asaro, dass vor 65 Millionen Jahren ein Asteroid mit einem Durchmesser von etwa zehn Kilometern auf die Erde gestürzt sei. Die ökologischen Folgen dieses Einschlags hätten mehr als die Hälfte aller Tier- und Pflanzenarten ausgelöscht.

Knapp zehn Jahre später fand sich auch die Stelle, wo der mutmaßliche Massenkiller aufgeprallt war: der Chicxulub-Krater vor der Halbinsel Yucatán in Mexiko. Seine Entdeckung zerstreute die letzten Zweifel daran, dass die Herrschaft der Dinosaurier mit einem gewaltigen Feuerwerk zu Ende gegangen war. Zugleich erhob sich die Frage, ob die anderen bekannten Massensterben ebenfalls durch einen Asteroideneinschlag verursacht wurden. Fünfmal innerhalb der letzten 500 Millionen Jahre hörten die meisten irdischen Lebensformen einfach auf zu existieren. ▷

VERSCHIEDENE MUSTER DES ARTENSTERBENS

**DATEN ÜBER DIE HÄUFIGKEIT** des Isotops Kohlenstoff-13 (C-13) in Gesteinsschichten lassen darauf schließen, dass sich zwei der drei letzten großen MasseneXTinktionen relativ lange hinzogen. Die Atmosphäre enthält umso mehr C-13, je besser die Vegetation gedeiht. Wenn gewaltige Mengen an Pflanzen absterben, sinkt also das Mengenverhältnis von C-13 zu C-12 in der Atmosphäre. In Gesteinsschichten am Ende des Perms (links) und der Trias (Mitte) fiel dieses Verhältnis gegenüber dem heutigen Wert mehrfach für längere Zeit stark ab. Diese Einbrüche lassen auf wiederholte »Schübe« von Artensterben schließen, die sich über Hunderttausende von Jahren hinzogen. Im Gegensatz dazu weist ein einzelner, abrupter C-13-Abfall mit rascher Erholung am Übergang von der Kreide zum Tertiär (rechts) auf eine plötzlich eingetretene ökologische Katastrophe hin.



▷ Zum ersten massenhaften Artentod kam es am Ende des Ordoviziums vor rund 443 Millionen Jahren. Die zweite solche Katastrophe geschah vor 374 Millionen Jahren zum Abschluss des Devons. Im ausgehenden Perm – vor 251 Millionen Jahren – löschte die größte MasseneXTinktion neunzig Prozent der Meeresbewohner und siebzig Prozent der Pflanzen und Tiere (sogar der Insekten) an Land aus (Spektrum der Wissenschaft 9/1996, S. 72). Ein weiteres globales Artensterben fand vor 201 Millionen Jahren am Ende der Trias statt. Dem fünften und letzten schließlich fielen vor 65 Millionen Jahren die Dinosaurier zum Opfer.

Anfang der 1990er Jahre prophezeite David M. Raup in seinem Buch »Ausgestorben. Zufall oder Vorsehung?«, dass sich als Auslöser all dieser großen Artensterben und auch der kleineren letztlich Asteroideneinschläge erweisen würden. Die Belege für den Aufprall einer kosmischen Bombe am Übergang zwischen Kreide und Tertiär (K/T) waren überzeugend und sind es noch heute. Außer dem Chicxulub-Krater und der ungewöhn-

lichen Iridiumschicht umfassen sie auch andere weltweit vorkommende Einschlags Spuren wie durch den Druckstoß zerrüttete (»geschockte«) Quarzkristalle oder von Stoßwellen deformierte Gesteine. Ferner dokumentieren chemische Analysen alter Sedimente rasche Veränderungen in der Zusammensetzung der Erdatmosphäre und im Klima als Folge des Impakts.

**Reihenweise Killer aus dem All?**

Für einige andere Massensterben schienen die Indizien seinerzeit ebenfalls ins All zu weisen. Geologen hatten schon Anfang der 1970er Jahre eine dünne Iridiumschicht mit der Extinktion am Ende des Devons in Verbindung gebracht. Und 2002 legten mehrere Entdeckungen unabhängig voneinander Asteroideneinschläge an den Grenzen Perm/Trias und Trias/Jura nahe. So fanden sich in Gesteinsschichten aus der oberen Trias geringe Spuren von Iridium. Und für das Perm bildeten Fullerene, in deren fußballartigem Kohlenstoffkäfig extraterrestrische Gase eingefangen waren, eine

weitere faszinierende Spur (Spektrum der Wissenschaft 7/2002, S. 60).

Viele Wissenschaftler hielten es deshalb für wahrscheinlich, dass Asteroiden oder Kometen vier der fünf großen MasseneXTinktionen verursacht hätten. Als Ausnahme blieb nur das große Artensterben am Ende des Ordoviziums. Diese Katastrophe schrieben die Forscher einem Stern zu, der nicht weit vom Sonnensystem explodiert sein sollte.

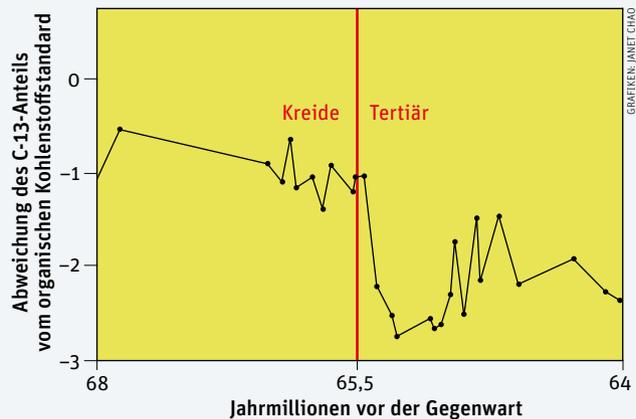
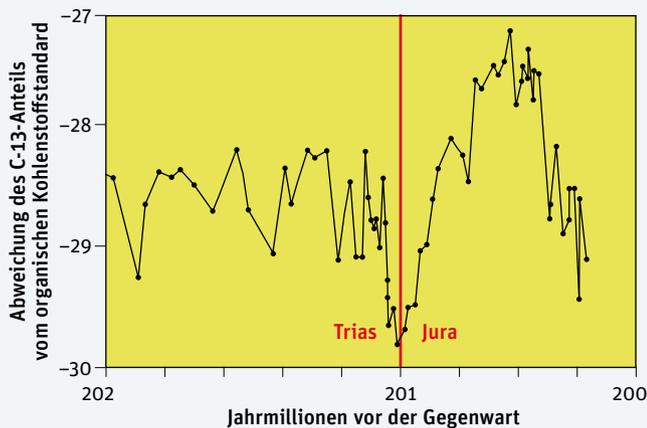
Die genauere Analyse des Datenmaterials in jüngster Zeit ergab jedoch einige Unstimmigkeiten. So legten akribische Auswertungen von Fossilfunden nahe, dass sich die MasseneXTinktionen am Ende des Perms und der Trias über Hunderttausende von Jahren hinzogen. Zugleich ließen neue Erkenntnisse über heftige Schwankungen des Kohlendioxidgehalts der Atmosphäre darauf schließen, dass die Biosphäre einer lang anhaltenden Serie schwerer Störungen der Umwelt ausgesetzt war und nicht nur einem einzigen katastrophalen Schlag.

Das Massensterben an der KT-Grenze lehrte, dass der Einschlag eines größeren Himmelskörpers einem verheerenden Erdbeben ähnelt, das eine Stadt dem Erdboden gleich macht. Die Katastrophe kommt plötzlich, zerstört alles, aber hält nicht lange an. Nur Tage später beginnt der Wiederaufbau. Beim KT-Ereignis spiegelt sich das rasche Tempo von Zerstörung und anschließender Erholung sowohl in Kohlenstoffisotopen-Daten wider als auch in der Abfolge von Fossilien.

Um Letzteres nachzuweisen, benötigten die Wissenschaftler allerdings einige Zeit. Das plötzliche Aussterben an der KT-Grenze war bei den kleinsten und häufigsten Fossilien – Kalk- und Kiesel-

**In Kürze**

- ▶ Bei mehreren **MasseneXTinktionen** in den vergangenen 500 Millionen Jahren wurde jeweils über die Hälfte des irdischen Lebens ausgelöscht.
- ▶ Eine dieser Katastrophen, bei der unter anderem die Dinosaurier ausstarben, dürfte vom **Einschlag eines Asteroiden** herrühren. Für die anderen gab es bisher keine überzeugende Erklärung.
- ▶ Neue Fossilfunde und geochemische Daten weisen auf einen Umweltmechanismus hin, der die meisten größeren und vielleicht auch einige kleinere Extinktionen ausgelöst hat: Als **Folge einer starken globalen Erwärmung** verpesten sauerstofffreie Ozeane die Luft mit giftigem Schwefelwasserstoff.



plankton sowie Pflanzensporen – klar zu erkennen. Je größer aber die Lebewesen, desto mehr schien sich ihr Untergang in die Länge gezogen zu haben.

Erst allmählich begriffen die Paläontologen, dass es sich hierbei womöglich um eine Täuschung handelte. Der Eindruck einer Extinktion in Raten entsteht offenbar nur deshalb, weil große Fossilien in den meisten untersuchten Boden- und Gesteinsschichten ziemlich selten sind. Um diesen Verzerrungseffekt zu eliminieren, entwickelte der Paläontologe Charles Marshall von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) eine neue Methode zur statistischen Analyse der Verbreitung von fossilen Resten. Indem das Verfahren die Wahrscheinlichkeit dafür ermittelt, dass eine bestimmte Spezies innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne ausgestorben ist, holt es sogar aus seltenen Fossilien ein Maximum an Informationen heraus.

Im Jahr 1996 taten Marshall und ich uns zusammen, um sein System an stratigraphischen Profilen von der KT-Grenze zu testen. Dabei betrachteten wir speziell in Europa gefundene Ammoniten. Diese Weichtiere mit schneckenartigem, gekammertem Gehäuse, die mit dem heute noch lebenden Perlboot (*Nautilus*) verwandt sind, kommen unter den größeren fossilen Meerestieren am häufigsten vor. Lange hatte ihr Aussterben als allmählicher Vorgang gegolten. Doch jetzt erwies sich, dass das zeitliche Muster der Fossilfunde sehr wohl mit einer plötzlichen Extinktion an der KT-Grenze vereinbar ist.

Bei den früheren Massensterben lieferten analoge Analysen durch verschiedene Forscher, mich eingeschlossen, jedoch ein

anderes Bild. So sprachen Untersuchungen meiner Gruppe an Gesteinsschichten, die sowohl marine als auch nicht-marine Milieus gegen Ende des Perms und der Trias repräsentierten, für ein allmählicheres Artensterben, das an der stratigraphischen Grenze jeweils kulminierte.

Gleiches galt für die Verteilung der Kohlenstoffisotope – ein weiterer Anhaltspunkt für Aussterbegeschwindigkeiten. Kohlenstoffatome kommen in drei Sorten vor. Diese so genannten Isotope unterscheiden sich in der Anzahl der im Kern enthaltenen Neutronen. Viele Menschen kennen das Isotop Kohlenstoff-14 (C-14), weil seine Zerfallsrate oft zur Datierung fossiler Skelette oder alter Sedimentproben dient. Für Aussagen über die Dauer eines Extinktionsvorgangs ist jedoch das Verhältnis zwischen den Isotopen C-13 und C-12 besser geeignet, da sich darin widerspiegelt, wie gut pflanzliches Leben zur fraglichen Zeit gedieh. Durch die Photosynthese verschiebt sich dieser Wert nämlich erkennbar.

Pflanzen produzieren mit Hilfe der Sonnenenergie aus Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Wasser organische Verbindungen, die sie zum Aufbau ihrer Zellen und als Energiequelle benötigen. Dabei wird bevorzugt CO<sub>2</sub> mit dem Isotop C-12 umgesetzt, da es wegen seiner geringeren Masse etwas reaktionsfreudiger ist als das Molekül mit dem schwereren C-13. Bei reichlichem Vorhandensein pflanzlichen Lebens – sei es in Form von Photosynthese treibenden Mikroben, im Meer treibenden Algen oder höheren Pflanzen an Land – bleibt daher eine größere Menge C-13 in der Atmosphäre zurück, und sein Anteil im CO<sub>2</sub> der Luft steigt.

Das Kohlenstoff-Isotopenverhältnis in Proben aus der Zeit vor, während und nach einem Massensterben liefert also einen verlässlichen Indikator dafür, wie sich die Menge pflanzlichen Lebens sowohl an Land als auch im Meer verändert hat. Die betreffende Grafik für das Extinktionsereignis an der KT-Grenze ist schlicht und klar. Praktisch zeitgleich mit der Ablagerung der Schicht, die mineralogische Hinweise auf den Einschlag eines Himmelskörpers enthält, sackt der Anteil von C-13 drastisch ab, steigt aber bald wieder. Das spricht für ein plötzliches Absterben der Vegetation und eine rasche Erholung – in Einklang mit dem Häufigkeitsmuster von Fossilien sowohl größerer Landpflanzen als auch mikroskopisch kleinen Meeresplanktons: Beide Gruppen erlitten starke Verluste bei der KT-Massenextinktion, vermehrten sich danach jedoch rasch wieder.

### Katastrophe in Raten

Im Gegensatz dazu dokumentieren die Kohlenstoffprofile, die meine Arbeitsgruppe Anfang 2005 für das Perm und kürzlich auch für die Trias ermittelte, ein ganz anderes Schicksal von Pflanzen und Plankton während dieser zwei Extinktionsphasen. In beiden Fällen zeigen mehrfache Isotopenverschiebungen, die sich jeweils über Zeiträume von 50 000 bis mehr als 100 000 Jahren erstreckten, dass die Pflanzengemeinschaften stark dezimiert wurden, sich wieder erholten und durch das nächste Extinktionsereignis erneut fast ausstarben (siehe Kasten oben).

Damit ein solches Muster entsteht, müsste im Abstand von einigen Jahrtausenden jeweils ein Asteroid auf die Erde geprallt sein. Doch es gibt keinerlei mi- ▷

▷ neralogische Hinweise auf eine Serie von Einschlägen zu einem der beiden fraglichen Zeiträume. Stattdessen wecken neuere Untersuchungen Zweifel, ob damals überhaupt ein Impakt stattgefunden hat.

So konnte seit dem Bericht, wonach Schichten des oberen Perms mit extraterrestrischem Gas gefüllte Fullerene enthalten sollen, keine andere Forschergruppe diesen Fund bestätigen. Eine zunächst bekannt gegebene Entdeckung von geschocktem Quarz aus dieser Zeit musste zurückgezogen werden. Auch gibt es kein Einvernehmen darüber, ob Krater in der Tiefsee bei Australien und unter dem ant-

arktischen Eis, die von dem vermuteten Einschlag stammen sollen, nicht in Wahrheit gewöhnliche irdische Bildungen sind. Das in der oberen Trias gefundene Iridium wiederum liegt in so geringer Konzentration vor, dass es allenfalls den Einschlag eines kleinen Himmelskörpers bezeugt, nicht aber den eines kilometerdicken Brockens, der – wie an der KT-Grenze – fast alles Leben vernichtete.

Wenn diese Massensterben aber nicht von kosmischen Bomben herrührten, was löste sie dann aus? Neuerdings gibt es Hinweise darauf, dass die Erde selbst ihre Bewohner weit gehend auslöschen

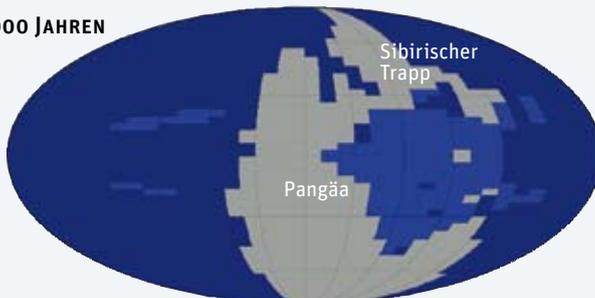
kann und dies in der Vergangenheit wohl auch mehrfach getan hat.

Vor rund fünf Jahren begannen kleine Gruppen von Geologen, gemeinsam mit organischen Chemikern die Umweltbedingungen in kritischen Momenten der Erdgeschichte zu untersuchen. Die Idee war, organische Überreste aus alten Schichten zu extrahieren, um auf diese Weise »chemische Fossilien« aufzuspüren. Einige Lebewesen hinterlassen nämlich widerstandsfähige organische Moleküle, die den Zerfall ihrer Körper überleben und in Sedimentgesteine eingeschlossen werden. Diese so genannten Biomarker können als Hinweis auf einstige Lebensformen dienen, die keine Skelett-Fossilien hinterlassen haben. Das gilt beispielsweise für Einzeller. Von etlichen Mikrobenarten sind Spuren der Lipide (Fette und fettähnlichen Substanzen) in ihren Zellmembranen erhalten, die sich mit neuen Methoden der Massenspektrometrie aufspüren lassen. Dabei werden die Moleküle nach ihrer Masse getrennt und identifiziert.

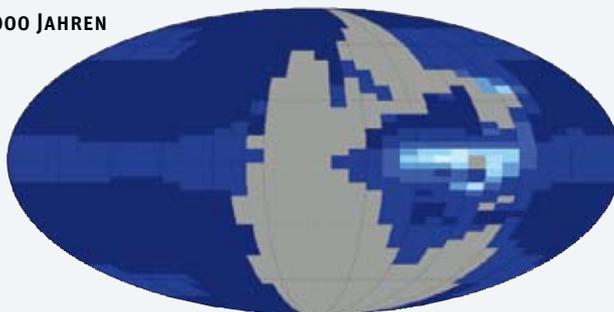
## SCHLEICHENDE VERGIFTUNG

**AM ENDE DES PERMS** nahm in einem Teil der Weltmeere die Konzentration an giftigem Schwefelwasserstoff im oberflächennahen Wasser zu und die an Sauerstoff entsprechend ab. Das ergibt sich aus einem Computermodell, das Katja M. Meyer und Lee R. Kump von der Pennsylvania State University in University Park entwickelt haben. Auslöser der Vergiftung war demnach großräumige vulkanische Aktivität, die vor rund 251 Millionen Jahren die riesigen Plateaubasalte des Sibirischen Trapps innerhalb des Superkontinents Pangäa schuf. Das dabei freigesetzte Kohlendioxid verursachte eine rasante globale Erwärmung, die sich auf die Chemie und Biologie der Ozeane auswirkte und so die ökologische Katastrophe in Gang brachte.

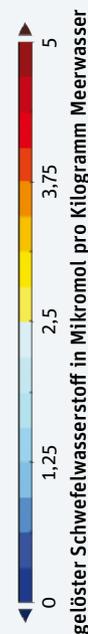
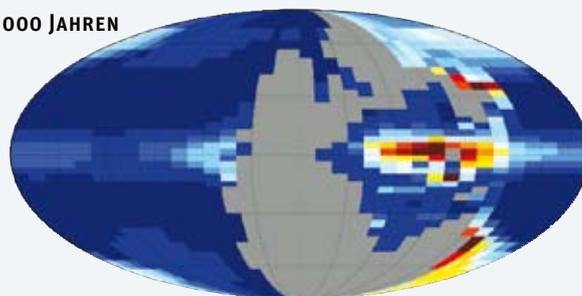
NACH 20 000 JAHREN



NACH 80 000 JAHREN



NACH 200 000 JAHREN



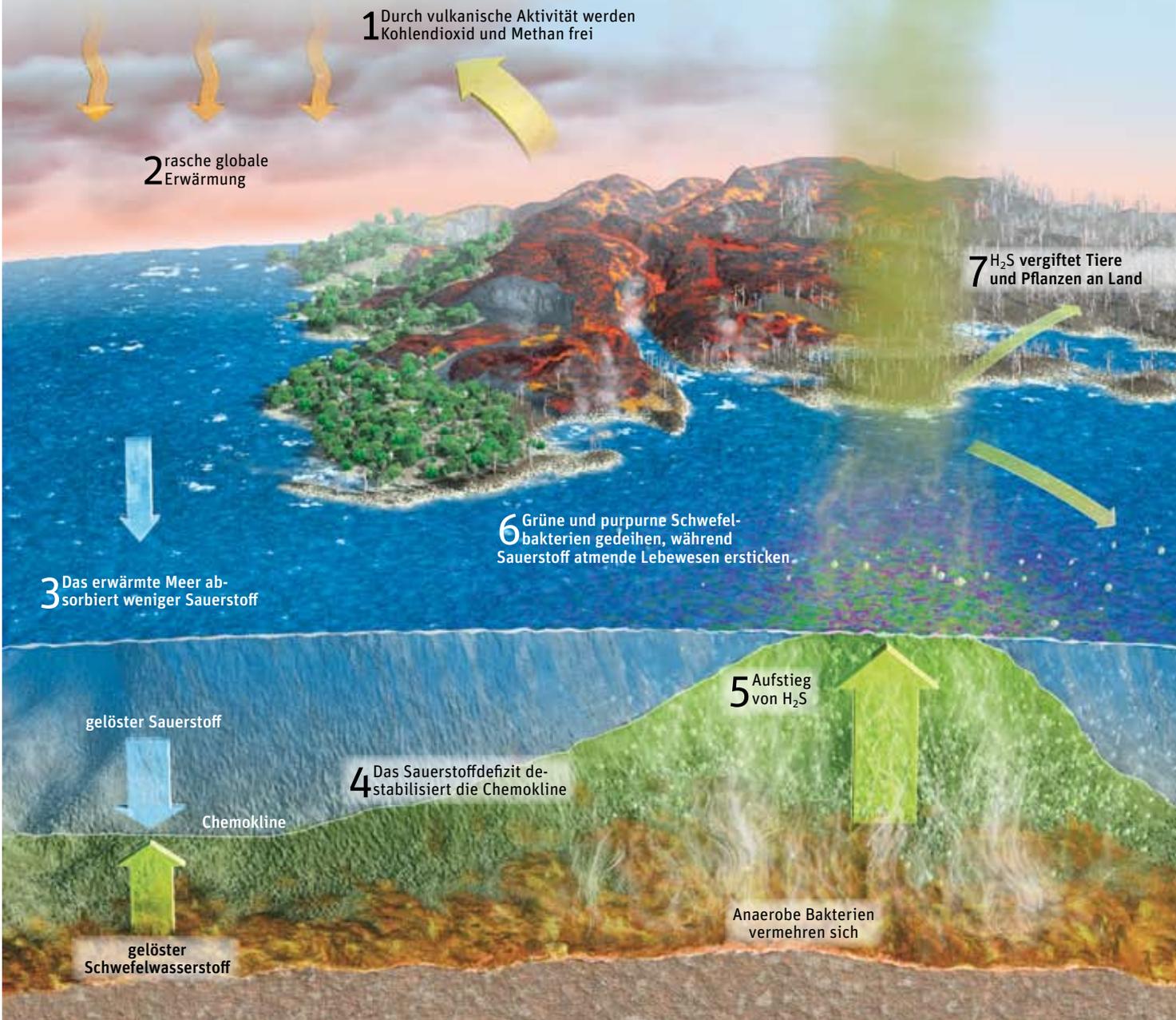
## Biomarker zeigen Meere ohne Sauerstoff

Anfangs konzentrierte sich diese Suche auf Biomarker in Gesteinen, die sich zu einer Zeit gebildet hatten, als es noch keine Tiere und Pflanzen auf der Erde gab. So wollte man feststellen, wann und unter welchen Bedingungen das irdische Leben entstand. In den letzten Jahren analysierten Forscher aber auch zunehmend Gesteinsproben aus Schichtgrenzen, an denen sich Massensterben ereignet hatten. Zu ihrer großen Überraschung ließen die erhaltenen Daten darauf schließen, dass damals – außer beim Übergang von der Kreide zum Tertiär – die Weltmeere wiederholt in den gleichen anoxischen, also fast sauerstofffreien Zustand zurückgefallen waren, wie er herrschte, als es noch kaum Pflanzen und Tiere auf unserem Planeten gab.

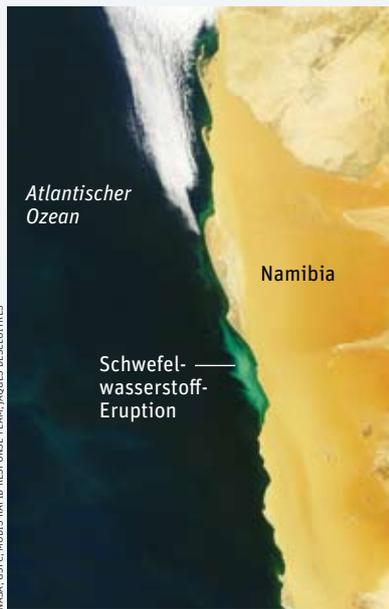
Zu den entdeckten Biomarkern gehören Überreste unzähliger Photosynthese treibender grüner Schwefelbakterien. Heute leben diese Mikroben gemeinsam mit ihren Verwandten, den ebenfalls phototrophen Schwefelpurpurbakterien, in anoxischem Wasser, wie es sich in den Tiefen stehender Seen und im Schwarzen Meer findet. Als Elektronenspende für die Photosynthese benutzen sie statt Wasser gasförmigen Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S), der für die meisten anderen Orga- ▷

# TÖDLICHES TREIBHAUS

EINE JÜNGST DURCHFÜHRTE SIMULATION des Massensterbens am Ende des Perms vor 251 Millionen Jahren und – 50 Millionen Jahre später – in der ausgehenden Trias macht deutlich, wie eine rasante globale Erwärmung tödliche Bedingungen im Meer und an Land herbeiführen kann. Die Katastrophe beginnt mit großräumiger vulkanischer Aktivität, wobei enorme Mengen an Kohlendioxid und Methan frei werden (1). Diese Treibhausgase heizen die Erdoberfläche stark auf (2). Der erwärmte Ozean absorbiert weniger Sauerstoff aus der Atmosphäre (3). Dadurch hebt sich die Chemokline, wo sauerstoffreiches Wasser an Wasser grenzt, das von Schwefelwasserstoff ( $H_2S$ ) durchdrungen ist, den anaerobe Bakterien in Bodennähe liefern (4). Oberhalb einer kritischen  $H_2S$ -Konzentrationen verlagert sich diese Grenzschicht abrupt an die Meeresoberfläche und löst sich auf (5). Photosynthese treibende grüne und purpurne Schwefelbakterien, die  $H_2S$  verbrauchen und normalerweise unterhalb der Chemokline leben, gedeihen nun im Oberflächenwasser, während auf Sauerstoff angewiesene Meeresorganismen ersticken (6). Aus dem Ozean entweichender Schwefelwasserstoff verteilt sich in der Luft, sodass er auch Tiere und Pflanzen an Land vergiftet (7). Schließlich erreicht das stinkende Gas die Troposphäre, wo es die Ozonschicht angreift (8). Ohne diesen Schutzschild vernichtet die ultraviolette Sonnenstrahlung (UV) einen Großteil des verbliebenen Lebens (9).



## KATASTROPHE IM KLEINFORMAT



### SCHWEFELWASSERSTOFF-ERUPTIONEN

vor der Küste Namibias erscheinen auf diesem Satellitenfoto als blassgrüne Wirbel im Wasser. Bei diesem wiederkehrenden lokalen Phänomen steigt das von Bakterien in Sedimenten am Meeresboden gebildete giftige Gas bis an die Meeresoberfläche auf. Dabei vermittelt es einen kleinen Eindruck von den mutmaßlichen Verhältnissen bei mehreren Massensterben während der Erdgeschichte, als weltweit  $H_2S$  aus dem Tiefenwasser empordrang: Stinkbombenartiger Schwefelgestank erfüllt die Luft, tote Fische treiben im Wasser und vom Ersticken bedrohte Hummer fliehen vor dem Gift auf die Strände.

▷ nismen giftig ist, und wandeln ihn in Schwefel um. Ihr reichliches Vorkommen in Zeiten massenhaften Artensterbens weist so den Weg zu einer neuen Sicht auf die Ursache dieser Katastrophen.

Schon lange war bekannt, dass die Meere bei großen Extinktionsereignissen weniger Sauerstoff enthielten als heute. Allerdings wurde der Grund dafür nie hinreichend geklärt. Großräumige vulkanische Aktivität, wie sie bei den meisten Massensterben auftrat, könnte einen Anstieg der  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre und dadurch eine starke globale Erwärmung verursacht haben. Lange Zeit war dies eine alternative Theorie zu den Asteroideneinschlägen. Die Auswirkungen des Vulkanismus erklären jedoch nicht ohne Weiteres, warum gegen Ende des Perms massenhaft Lebensformen im Meer zu Grunde gingen. Auch das Aussterben von Landpflanzen lässt sich damit schwerlich erklären; denn die Vegetation sollte vom erhöhten  $CO_2$ -Gehalt der Atmosphäre sogar profitieren und die Erwärmungsphase somit überleben.

Die Biomarker in den Meeressedimenten aus dem letzten Abschnitt des Perms und den jüngsten Gesteinen der Trias liefern chemische Hinweise auf eine Blüte der  $H_2S$  konsumierenden Bakterien in allen Weltmeeren. Diese Mikroben können nur in einer sauerstofffreien Umgebung leben, benötigen jedoch Sonnenlicht für ihre Photosyn-

these. So ist ihr Vorkommen in Schichten, die Flachmeerablagerungen repräsentieren, schon an sich ein Zeichen dafür, dass das oberflächennahe Wasser der Ozeane am Ende des Perms anoxisch und mit  $H_2S$  gesättigt war.

### Zerstörung der Ozonschicht

Die heutigen Meere enthalten Sauerstoff in für das Leben ausreichenden, konstanten Konzentrationen von der Oberfläche bis zum Grund, weil das Wasser das Gas aus der Atmosphäre aufnimmt und durch Zirkulationsströmungen in die Tiefe befördert. Nur unter ungewöhnlichen Umständen wie denen im Schwarzen Meer herrschen schon ab einer Tiefe von etwa 150 Metern anoxische Bedingungen, sodass eine breite Palette von Organismen, die keinen Sauerstoff vertragen, in der Wassersäule gedeiht.

Die in größeren Tiefen lebenden anaeroben Mikroben produzieren ständig große Mengen an Schwefelwasserstoff, der sich im Meerwasser löst. Mit zunehmender Konzentration wandert das  $H_2S$  nach oben, wo es schließlich auf Sauerstoff trifft, der nach unten diffundiert. So entsteht eine Grenzschicht zwischen beiden, die so genannte Chemokline.

Die Lage dieser Schicht, die mit Sauerstoff und mit Schwefelwasserstoff gesättigtes Wasser trennt, bleibt stabil, solange keine Störung des Gleichgewichts

auftritt. Hier leben in der Regel die grünen und purpurnen Schwefelbakterien, da sie von unten Schwefelwasserstoff und von oben Sonnenlicht erhalten.

Bei Abnahme der Sauerstoffkonzentration im Ozean werden die Bedingungen für die anaeroben Bakterien in der Tiefe natürlich günstiger, sodass sie sich stark vermehren und größere Mengen an Schwefelwasserstoff produzieren. Die Geowissenschaftler Lee R. Kump und Michael A. Arthur von der Pennsylvania State University in University Park haben die Folgen einer solchen Anoxie-Phase in Computermodellen berechnet. Das Resultat: Wenn die  $H_2S$ -Konzentration in tiefen Wasserschichten einen kritischen Schwellenwert übersteigt, kann sich die Chemokline abrupt an die Oberfläche verlagern. Dann wird das Meer zur stinkenden Kloake, aus der giftiger Schwefelwasserstoff ausgast und die Atmosphäre verpestet.

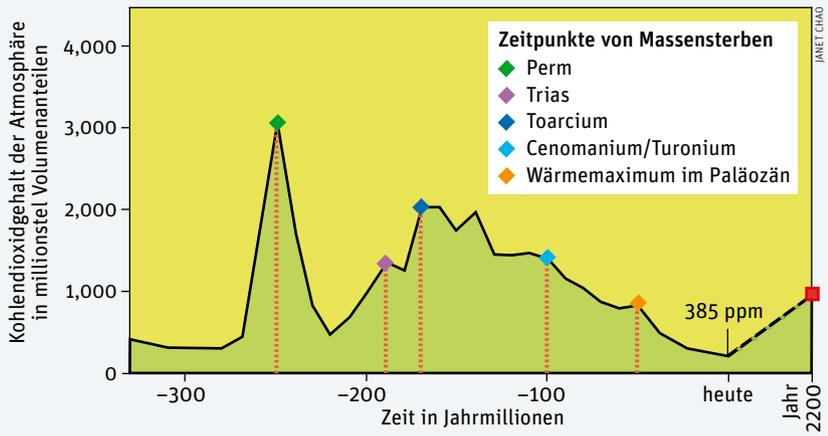
Nach den Berechnungen der beiden Forscher dürfte das  $H_2S$ , das bei solchen Ereignissen am Ende des Perms produziert wurde, ausgereicht haben, ein Massensterben sowohl im Meer als auch an Land auszulösen (siehe Kasten auf S. 30). Doch damit nicht genug: Wie Modellierungen durch Alexander Pavlov von der Universität von Arizona in Tucson zeigen, hätte der Schwefelwasserstoff zugleich die irdische Ozonschicht angegriffen, die das Leben vor der ultravioletten Sonnenstrahlung schützt.

Tatsächlich liefern fossile Sporen aus Grönland Hinweise auf eine Zerstörung dieses Schutzschildes am Ende des Perms. Missbildungen, die sie aufweisen, deuten darauf hin, dass sie längere Zeit hoher UV-Strahlung ausgesetzt waren. Aus demselben Grund schrumpft, wie Untersuchungen ergaben, heute unter dem Ozonloch in der Antarktis die Biomasse des pflanzlichen Planktons. Wenn aber die Basis der Nahrungskette zerstört ist, leiden über kurz oder lang auch die Lebewesen auf höheren Stufen.

Nach Schätzungen von Kump und Arthur entwich gegen Ende des Perms mehr als das Zweitausendfache dessen, was heutige Vulkane an Schwefelwasserstoff ausstoßen, aus den Ozeanen in die Atmosphäre. Damit erreichte das Gas in der Luft eine Konzentration, in der es viele Tiere und Pflanzen gleichermaßen tötete. Das gilt umso mehr, als seine Giftigkeit mit der Temperatur zunimmt. Auch andere größere und kleinere Extinktions-

## STEUERN WIR AUF EIN MASSENSTERBEN ZU?

**BEI ALLEN VERGANGENEN MASSENEXTINKTIONEN** enthielt die Atmosphäre sehr viel von dem Treibhausgas Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>). Das unterstreicht die Rolle der globalen Erwärmung. Heute beträgt der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft 385 millionstel Volumenanteile (ppm). Bei einem prognostizierten Anstieg von 2 bis 3 ppm pro Jahr würde der Wert gegen Ende des nächsten Jahrhunderts 900 ppm erreichen – kaum weniger als beim Massensterben während des paläozänen Wärmemaximums vor 54 Millionen Jahren.



ereignisse scheinen während kurzer Intervalle globaler Erwärmung stattgefunden zu haben. Hier nun kommt die vulkanische Aktivität ins Spiel.

Ungefähr zeitgleich mit mehreren Massensterben ereigneten sich größere Vulkanausbrüche, bei denen Lava in riesigen Mengen austrat und Tausende von Quadratkilometern auf dem Festland oder am Meeresboden überflutete. Nebenher dürften enorme Mengen vulkanischer Gase – hauptsächlich Kohlendioxid, aber auch Methan – freigesetzt worden sein, die eine rasche globale Erwärmung verursachten. Tatsächlich schoss, wie die Analyse der Kohlenstoff-Isotope in den betreffenden Schichten belegt, gegen Ende des Devons, des Perms und der Trias, desgleichen im frühen Jura, in der mittleren Kreide und im ausgehenden Paläozän sowie in weiteren Perioden, in denen bedeutende Artensterben stattfanden, kurz zuvor jeweils der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre in die Höhe und blieb dann für hunderttausende bis einige Millionen Jahre auf diesem Niveau.

### Keine Lebensform blieb verschont

Entscheidend aber dürfte die Auswirkung auf die Ozeane gewesen sein. Warmes Wasser kann weniger Sauerstoff aus der Atmosphäre aufnehmen. Das begünstigt anoxische Bedingungen im Meer. Dadurch konnten anaerobe Tiefseebakterien besser gedeihen und mehr

H<sub>2</sub>S produzieren, das immer weiter nach oben vordrang. Zuerst und am härtesten hätte dies Sauerstoff atmende Lebewesen im Ozean getroffen. Für die Photosynthese treibenden grünen und purpurnen Schwefelbakterien wären die Lebensbedingungen an der Oberfläche des sauerstofffreien Meeres dagegen ideal gewesen.

Da der Schwefelwasserstoff die Landbewohner erstickte und die UV-Schutzschicht der Erde beschädigte, blieb so gut wie keine Lebensform verschont. Kumps Hypothese stellt also eine Verbindung zwischen dem marinen und dem terrestrischen Massensterben her. Vulkanismus und erhöhte CO<sub>2</sub>-Werte könnten beides zugleich verursacht haben. Diese Theorie erklärt auch, warum zum Beispiel in allen Fundstätten des ausgehenden Perms seltsamerweise Schwefel vorkommt. Der Umstand, dass sowohl der Ozean als auch die Atmosphäre vergiftet waren, macht zudem verständlich, weshalb sich das Leben nach dem Massenaussterben nur sehr allmählich regenerierte.

Interessanterweise hatten Wissenschaftler zuvor schon das weniger massive Artensterben am Ende des Paläozäns – vor 54 Millionen Jahren – einer Phase mit Sauerstoffarmut im Meer zugeschrieben, ausgelöst durch eine vorübergehende globale Erwärmung. Betrachtet man die hier diskutierte Vielzahl der Fälle, scheinen durch den Treibhauseffekt ausgelöste extreme Extinktionseignisse

also ein immer wiederkehrendes erdgeschichtliches Phänomen zu sein.

Das wirft die Frage auf, ob unserer Spezies durch diesen Mechanismus Gefahr droht. Was in der Vergangenheit mehrfach passierte, könnte sich durchaus wieder ereignen. Schätzungen darüber, wie schnell der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre während der früheren Massensterben anstieg, sind zwar noch ungenau. Aber wir kennen die Grenzwerte, ab denen es zur Katastrophe kam.

Während des Wärmemaximums im späten Paläozän lag der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre knapp unter 1000 millionstel Volumenanteile (*parts per million*, ppm), am Ende der Trias etwas darüber. Heute, bei ungefähr 385 ppm, scheinen wir also auf der sicheren Seite zu sein. Wenn dieser Wert jedoch, wie prognostiziert, um zwei und demnächst wahrscheinlich sogar drei ppm pro Jahr ansteigt, könnten wir gegen Ende des nächsten Jahrhunderts 900 ppm erreichen. Das ließe in der Tat befürchten, dass es zu anoxischen Bedingungen in den Ozeanen kommt. Wie viel Zeit bliebe dann noch bis zu einem erneuten, durch den Treibhauseffekt verursachten Massensterben? Wir sollten es nicht dazu kommen lassen, das herausfinden zu müssen. ◀



**Peter D. Ward** ist Geologieprofessor im Sektor Erd- und Raumwissenschaften an der Universität von Washington in Seattle. Er interessiert sich speziell für paläontologische Themen und erforscht für das Astrobiologische Institut der Nasa potenzielle außerirdische Lebensräume. Für Spektrum der Wissenschaft hat er schon den Artikel »Nautilus und Ammoniten« (12/1983, S. 68) verfasst und war Koautor des Beitrags »Lebensfeindliches All« (12/2001, S. 38).

Massive release of hydrogen sulfide to the surface ocean and atmosphere during intervals of oceanic anoxia. Von Lee R. Kump et al. in: *Geology*, Bd. 33, S. 397, Mai 2005

Abrupt and gradual extinction among late permian land vertebrates in the Kairou Basin, South Africa. Von Peter D. Ward et al. in: *Science*, Bd. 307, S. 709, 4. 2. 2005

Photic zone euxinia during permian-triassic superanoxic event. Von Kliti Grice et al. in: *Science*, Bd. 307, S. 706, 4. 2. 2005

Rivers in time: the search for clues to earth's mass extinctions. Von Peter D. Ward. Columbia University Press, 2002

Weblinks zum Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/864271](http://www.spektrum.de/artikel/864271).