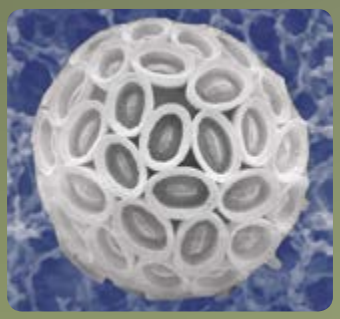
Leseproben

Gerold Wefer
Frank Schmieder
Herausgeber

Expedition **Erde**

Wissenswertes und Spannendes aus den Geowissenschaften

Vierte, überarbeitete und erweiterte Auflage



marum Bibliothek
Verständliche Geowissenschaften

Einleitung

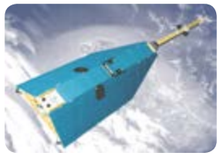
10 **Geowissenschaften – Inhalte und Aufgaben**
von Gerold Wefer, Bremen

Sonnensystem

12 **Entstehung des Sonnensystems und der Erde**
von Herbert Palme, Frankfurt

22 **Kollisionen im Sonnensystem – Impaktkrater – Zeugen eines kosmischen Bombardements**
von Alexander Deutsch, Münster

Planet Erde



34 **Unsere Erde: ein ruheloser Planet – das Erdinnere als treibende Kraft geologischer Prozesse**
von Michael Weber, Potsdam

40 **Die Vereinigten Platten von Europa**
von Wolfgang Franke, Frankfurt

46 **Gondwana – ein Kontinent zerbricht**
von Gabriele Uenzelmann-Neben, Bremerhaven

50 **Von der Schließung des Tethys-Ozeans und der Entstehung des Himalaya**
von Helmut Willems, Ines Wendler und Qinghai Zhang, Bremen

58 **Antarktis und Australien, die nahezu Unzertrennlichen**
von Georg Kleinschmidt, Frankfurt, Andreas L. Läufer, Hannover und Frank Lisker, Bremen

70 **Fossile Zeugen wandernder Kontinente**
von Jens Lehmann, Bremen

76 **Vom zerfallenden Atom zum zerbrechenden Superkontinent**
von Martin Olesch und Frank Lisker, Bremen

80 **Erdbeben in Südamerika – Zusammenstoß zwischen ozeanischer und kontinentaler Kruste**
von Claus-Dieter Reuther, Hamburg

86 **Erdbeben! Der Untergang von Lissabon im Jahre 1755**
von Achim Kopf, Bremen

90 **Erdbeben, Hangrutschungen und Tsunamis an Ozeanrändern**
von Achim Kopf, Bremen

100 **Erdbeben und Tsunami vor Japan 2011**
von Gerold Wefer, Bremen

104 **Naturrisiken**
von Bruno Merz, Potsdam

108 **Feuer aus den Tiefen der Erde – Vulkane: Zerstörer und Lebensspender**
von Colin W. Devey, Kiel

114 **Neptun, Pluto und die tiefen Wasserkreisläufe unseres Planeten Erde**
von Lars Rüpke, Oslo und Jason Phipps Morgan, London

122 **Submarine Hydrothermalquellen – Treffpunkte von Geologie und Biologie**
von Wolfgang Bach, Bremen

130 **Der Ozean unter dem Meeresboden – Kalte Quellen als Oasen der Tiefsee**
von Erwin Suess und Peter Linke, Kiel

144 **Kalte Quellen im Golf von Mexiko**
von Gerhard Bohrmann und Heiko Sahling, Bremen

150 **Vulkane, die Schlamm statt Lava speien**
von Gerhard Bohrmann, Achim Kopf und Volkhard Spiess, Bremen

158 **Leben im Untergrund der Tiefsee – die tiefe Biosphäre**
von Kai-Uwe Hinrichs, Verena Heuer und Julius Lipp, Bremen

164 **Wüste und submarine Canyons – ein vermeintliches Paradoxon vor Mauretanien**
von Rüdiger Henrich, Till J. J. Hanebuth, Sebastian Krastel und Christine Zühlsdorff, Bremen und Kiel

170 **Das Magnetfeld der Erde**
von Ulrich Bleil und Tilo von Dobeneck, Bremen

180 **Was ist Luft?**
von Helmut Kraus, Bonn

Ressourcen

186 **Schwarzes Gold – Geologischer Aufbau des Ruhrgebietes, Entstehung der Steinkohle und Geschichte des Bergbaus**
von Diethard E. Meyer, Essen

200 **Fossile Energierohstoffe: Wachsender Bedarf – Begrenzte Verfügbarkeit**
von Harald Andruleit und Peter Gerling, Hannover

210 **Rohstoffe**
von Friedrich-Wilhelm Wellmer, Hannover

214 **Energie aus den Tiefen der Erde**
von Horst Rüter, Dortmund

216 **Reichtum der Erde – Vorkommen und wirtschaftliche Bedeutung von Bodenschätzen**
von Gregor Borg, Halle-Wittenberg

226 **Zeolithe: vom Mineral zum Material**
von Reinhard X. Fischer, Bremen

230 **Müssen wir wirklich Wasser sparen?**
von Horst D. Schulz, Warnemünde

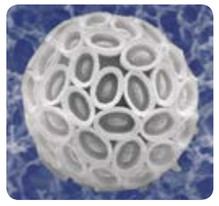
238 **Boden – Basis für das Leben**
von Gabriele Broll, Osnabrück

240 **Unter der Erde ist noch viel Raum – Erkundung und Nutzung des Untergrundes**
von Günter Borm, Karlsruhe

248 **Brennendes Eis – Vorkommen, Dynamik und Umwelteinflüsse von Gashydraten**
von Erwin Suess, Kiel und Gerhard Bohrmann, Bremen

258 **Erzfabriken der Tiefsee – Heiße Quellen am Meeresboden**
von Peter M. Herzig, Kiel

266 **Tiefseebergbau – eine nachhaltige Option für die zukünftige Versorgung mit strategischen Wertmetallen?**
von Andrea Koschinsky, Bremen



Klima und Leben

278 **Fossilien, die Dokumente der Evolution**
von Wighart von Koenigswald, Bonn

288 **Biologie, Lebensweise und Aussterben der Ammoniten**
von Jens Lehmann, Bremen

296 **Zeitreise ins Erdmittelalter – Die Paläobiologie der Dinosaurier**
von Martin Sander, Bonn

308 **Vom Land ins Meer – Evolution der Wale**
von Wighart von Koenigswald, Bonn und Philip D. Gingerich, Ann Arbor

316 **Gletscher in der Wüste? Tropen im Ruhrgebiet? Das Klima im Wandel der Zeit**
von Werner Buggisch, Erlangen

322 **Kurzfristige Krisen in der Erdgeschichte während der letzten 100 Millionen Jahre – Was Flachmeerablagerungen berichten**
von Jochen Kuss, Christian Scheibner, Stefan Höntzsch und Jens Wendler, Bremen

328 **Klimageschichte aus der Tiefsee – Der Weg vom Treibhaus zum Eiszeitklima**
von Gerold Wefer, Ursula Röhl und Wolfgang H. Berger, Bremen und La Jolla

340 **Erforschung der Eiszeit – Erkenntnisse aus der Klimageschichte**
von Wolfgang H. Berger, Stefan Mulitza und Gerold Wefer, Bremen und La Jolla

352 **Was ist eigentlich Klima?**
von Martin Claußen, Hamburg, Ralf Greve, Sapporo und Ulrich Cubasch, Berlin

360 **Wind, Wasser und Wärme in der Luft – Die Atmosphäre schafft optimale Lebensbedingungen**
von Peter Lemke, Bremerhaven

370 **Die Luft, die uns wärmt – Biogeochemische Kreisläufe klimarelevanter atmosphärischer Spurengase**
von Jürgen Hahn und Wolfgang Seiler, Garmisch-Partenkirchen

380 **Niederschlag, Starkregen und Hochwasser**
von Bruno Rudolf, Offenbach und Clemens Simmer, Bonn

390 **Wind und Sturm**
von Kai Radtke, Cottbus und Gerd Tetzlaff, Leipzig

400 **Der bewegte Ozean – Veränderungen der ozeanischen Zirkulation**
von Jürgen Holfort, Tromsø

408 **Der globale Kohlenstoffkreislauf**
von Venugopalan Ittekkot, Tim Rixen und Andreas Suthhof, Bremen

420 **Eisendünger für die ozeanische Wüste**
von Victor Smetacek, Bremerhaven

424 **Manche mögen's kalt – Der europäische Korallengürtel von Norwegen bis ins Mittelmeer**
von Dierk Hebbeln, Bremen und André Freiwald, Wilhelmshaven

432 **Mensch und Küste – eine jahrtausendealte Schicksalsgemeinschaft**
von Dierk Hebbeln und Gerold Wefer, Bremen

440 **Forschung für Nachhaltigkeit: Der Mensch als Akteur im Erdsystem**
von Frauke Kraas, Köln und Tabea Bork-Hüffer, Singapur

Kultur und Geowissenschaften

448 **Die kleine Eiszeit dokumentiert in Landschaftsbildern und den Sedimenten eines Maarsees**
von Ulrike Kienel und Jörg F. W. Negendank, Potsdam

454 **Schichten enthalten die Geschichte – Archäologen und Geologen rekonstruieren die Bucht von Cádiz**
von Horst D. Schulz, Warnemünde und Oswaldo Arteaga, Sevilla

458 **Geowissenschaften im Geographieunterricht**
von Karl-Heinz Otto, Bochum

462 **Kunst und Geologie**
von Thomas Deecke und Katharina Kiesinger, Bremen

472 **»Was aber bleibet, stiften die Dichter« – Geologie und Literatur**
von Ilse und Eugen Seibold, Freiburg

Anhang

484 **Glossar**

489 **Geologische Zeitskala**

490 **Bildnachweis**

Entstehung des Sonnensystems und der Erde

von Herbert Palme, Frankfurt am Main

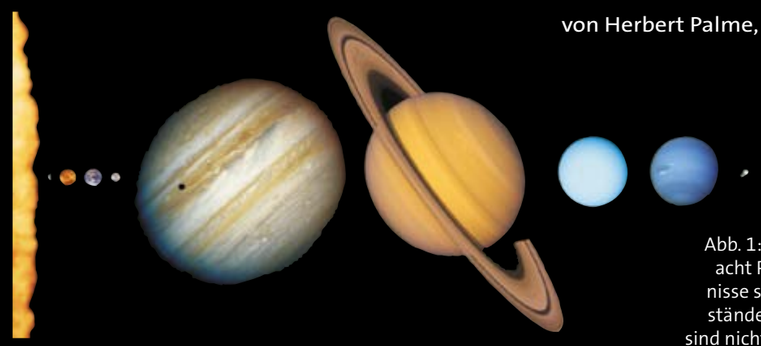


Abb. 1: Der Rand der Sonne und die acht Planeten. Die Größenverhältnisse sind ungefähr richtig. Die Abstände der Planeten von der Sonne sind nicht maßstabsgetreu. Von links: Sonne, Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun und Pluto, dem der Planetenstatus 2006 aberkannt wurde.

Unser Sonnensystem

Sonne und Planeten

Im Mittelpunkt unseres Sonnensystems steht naturgemäß die Sonne, ein ganz normaler ›Wald und Wiesen Stern‹. Diese Sorte gibt es haufenweise in unserem Teil der Milchstraße, der Milchstraßengalaxie. Die Sonne hat etwa fünf Milliarden Jahre – die Hälfte ihrer Lebenserwartung – hinter sich. In weiteren fünf Milliarden Jahren wird ihr der Brennstoff, ihr Wasserstoffvorrat, ausgehen. Sie wird sich dann zunächst so weit aufblähen, bis ihr äußerster Rand die Umlaufbahn der Venus erreicht. Dabei wird sie bis zu einem Viertel ihrer Masse in den interstellaren Raum hinausschleudern. Ihr Ende ist absehbar: ein extrem dichter ›weißer Zwerg‹, etwa von der Größe der Erde, der schließlich völlig erkaltet und damit unsichtbar wird.

Umgeben ist unsere Sonne von acht Planeten (Abb. 1), die selbst kaum Strahlung abgeben und nur durch das von ihnen reflektierte Sonnenlicht zu sehen sind. Selbst der größte Planet Jupiter, der hauptsächlich aus Wasserstoff und Helium besteht, ist viel zu klein für die Umwandlung von Wasserstoff in Helium. Dies ist die Reaktion, die Sterne wie unsere Sonne mit Energie versorgt. Die acht Planeten werden von insgesamt 166 Satelliten, ihren Monden, umkreist. Man unterscheidet zwei Gruppen von Planeten. Da sind zunächst die vier inneren, erdähnlichen Planeten Merkur, Venus, Erde und Mars. Sie sind aus festem Gestein aufgebaut, haben mittlere Dichten von fast vier bis fünfeinhalb Gramm pro Kubikzentimeter und besitzen alle einen Metallkern. Die Erde macht etwa die Hälfte der Gesamtmasse dieser vier inneren Planeten aus. Außer ihr wird von den inneren Planeten nur der Mars noch selbst umkreist. Er besitzt sogar zwei Monde: Phobos and Deimos.

Im Gegensatz zu den inneren Gesteinsplaneten stehen die äußeren, gasreichen Riesenplaneten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun. Sie sind wesentlich größer, aber haben nur eine etwa vier- bis sechsmal geringere Dichte als die inneren Planeten. Jupiter und Saturn bestehen hauptsächlich aus Wasserstoff und Helium, während die etwas kleineren Planeten Uranus und Neptun größere Mengen Wassereis enthalten. Alle äußeren Planeten haben mehrere Satelliten: Jupiter 63, Saturn 16, Uranus 27 und Neptun 13. Pluto wurde zwar 2006 von der Internationalen Astronomischen Union der Status eines Planeten aberkannt, dafür werden heute Pluto und eine Reihe

weiterer, jüngst entdeckter Objekte jenseits der Neptunbahn als Plutoiden oder transneptunische Zwergplaneten bezeichnet. Dazu gehören, neben Pluto mit 3 Monden, und Eris, dem mit 2.400 Kilometer Durchmesser größten, bekannten Plutoiden, Makemake und Haumea, mit etwa 30 Prozent der Masse von Pluto. Haumea ist nach einer hawaiischen Göttin benannt und dreht sich in nur vier Stunden um seine eigene Achse. Die rasche Rotation führt vermutlich zu einer stark elliptischen Form. Unter den über 100.000 Asteroiden, die die Erde zwischen Mars und Jupiter umkreisen, hat nur der größte Asteroid Ceres mit etwa 900 Kilometern Durchmesser den Status eines Zwergplaneten.

Alle Planeten und Zwergplaneten umlaufen die Sonne gegen den Uhrzeigersinn. Ihre Umlaufbahnen liegen annähernd in einer Ebene, der Ekliptik. Nach dem ersten Keplerschen Gesetz haben die Bahnen die Form von Ellipsen, wobei die Sonne in einem Brennpunkt steht. (Will man eine Ellipse zeichnen, so kann man zwei Nägel einschlagen und um diese eine Schnur legen. Mit einem Stift zeichnet man den mit gespannter Schnur größtmöglichen Umfang. Die beiden Nägel sind dann die Brennpunkte der entstehenden Ellipse). Abgesehen von den Plutoiden weichen die Bahnen der Planeten aber nur geringfügig von einer Kreisbahn ab. Der Kreis ist eine Sonderform der Ellipse, die nur einen Brennpunkt hat. Die Achsen, um die sich die Sonne und die Planeten drehen, stehen annähernd senkrecht zu der Ebene der Bahn, auf der sie sich umeinander bewegen. Das kann man sich ungefähr vorstellen wie Kreisel, die sich auf einer ebenen Fläche um ihre eigene Achse und zusätzlich umeinander drehen. Die Kreisel drehen sich dabei ebenfalls gegen den Uhrzeigersinn.

Alle bis jetzt angesprochenen Bewegungen finden also in einer Richtung und in derselben Ebene statt. Ausnahmen sind vor allem Venus mit einer entgegengesetzten Rotation und Uranus, dessen Drehachse um 90 Grad gekippt ist und so in der Ebene der Ekliptik liegt. Bildlich gesprochen wäre Uranus also ein umgekippter Kreisel, der sich trotzdem weiter dreht. Auch die anderen Planeten zeigen kleinere Abweichungen ihrer Drehachsen von der Senkrechten. Vermutlich sind diese Unregelmäßigkeiten auf Einschläge großer Projektile in der Frühgeschichte des Sonnensystems zurückzuführen.

Kleinere Körper im Sonnensystem

Zwischen Mars und Jupiter, also im Grenzbereich zwischen den erdähnlichen Planeten und den riesigen Gasplaneten, kreisen mehr als 100.000 Kleinplaneten, die Asteroiden, um die Sonne. Sie bilden den Asteroidengürtel. Manche dieser Asteroiden haben Satelliten, ähnlich wie die ›richtigen‹ Planeten. So wird beispielsweise der kartoffelförmige Asteroid Ida mit einer Längsausdehnung

Abb. 2: Der Asteroid Ida (58 Kilometer Länge) und sein ihn in etwa 24 Stunden umkreisender Mond Dactyl (1,6 Kilometer Durchmesser); Entfernung Ida – Dactyl ungefähr 100 Kilometer

von bis zu 60 Kilometern von einem über anderthalb Kilometer großen Satelliten begleitet (Abb. 2). Der größte Asteroid Ceres hat einen Durchmesser von 930 Kilometern, das ist ungefähr ein Drittel des Monddurchmessers.

Einige der Asteroide sind durch die Anziehungskraft des Riesenplaneten Jupiter auf exzentrische Bahnen geraten. Sie können in den Raum zwischen Erde und Sonne hineinreichen. Auch wenn es unwahrscheinlich ist, kann nicht ausgeschlossen werden, dass diese erdbahnkreuzenden Asteroide auf der Erde einschlagen. Etwa 1.100 dieser Objekte haben einen Durchmesser von mehr als einem Kilometer. Von 800 dieser größeren Asteroiden kennt man die Umlaufbahnen genau. Keiner dieser Asteroiden befindet sich auf Kollisionskurs mit der Erde, jedenfalls nicht innerhalb der nächsten hundert Jahre. Es wird zurzeit fieberhaft daran gearbeitet, die Bahnen der übrigen Asteroiden festzustellen, die groß genug sind, um der Erde gefährlich werden zu können.

Meteorite sind aus dem All kommende Gesteinsbruchstücke, die Durchmesser von einem Zentimeter bis zu mehreren Metern haben können. Sie werden durch den Luftwiderstand der Atmosphäre stark gebremst und schlagen daher nur mit relativ geringer Geschwindigkeit auf die Erde auf. Sie entstehen, wenn Asteroiden aus dem Gürtel zwischen Mars und Jupiter zusammenstoßen. Wenn die resultierenden Gesteinsfragmente durch die Schwerkraft des Jupiter auf Kollisionskurs mit der Erde gehen, werden sie zu Meteoroiden und wenn sie auf der Erde auftreffen zu Meteoriten.

Kometen hingegen sind kilometergroße Körper aus Staub und Eis, deren Umlaufbahnen um die Sonne weit von der Kreisform entfernt sind. Nähern sie sich der Sonne, beginnt das Eis zu verdampfen und der Komet bildet einen Schweif aus. Kometen werden in zwei Gruppen unterteilt: die kurzperiodischen mit weniger und die langperiodischen mit mehr als 200 Jahren Umlaufzeit. Fast alle kurzperiodischen Kometen umkreisen die Sonne in der selben Richtung wie die Planeten. Ihre Bahnen sind nur wenig gegen die Ekliptik geneigt. Sie gehören zu unserem Sonnensystem und kommen vermutlich aus dem Kuipergürtel, jenseits des Neptun, etwa 500 Astronomische Einheiten (1 AE = Abstand Erde – Sonne) entfernt. Langperiodische Kometen kommen aus der Oortschen

Leseprobe

Erdbeben und Tsunami vor Japan 2011

von Gerold Wefer, Bremen

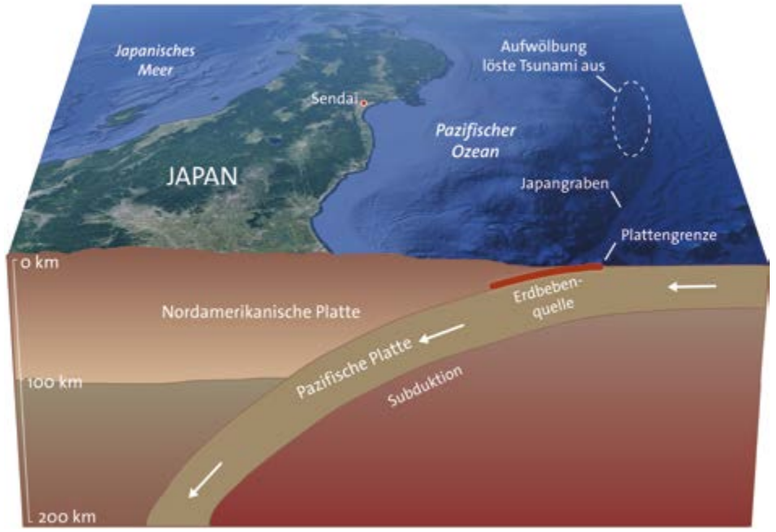


Abb. 1: Vor Japan schiebt sich die Pazifische Platte mit einer Geschwindigkeit von neun Zentimetern pro Jahr unter die Nordamerikanische Platte. Das Epizentrum des Erdebens vom 11. März 2011 lag an dieser Plattengrenze in nur etwa 30 Kilometern Tiefe. Die ruckartige Anhebung des Meeresbodens übertrug sich auch auf die darüber liegenden Wassermassen und löste einen gewaltigen Tsunami aus.

Am 11. März 2011 ereignete sich vor der Küste vor Japan das Tōhoku-Oki Erdbeben mit einer Stärke von 9,0. Es war das stärkste Beben in Japan seit Beginn der dortigen Aufzeichnungen. Das Epizentrum lag relativ nah vor der Küste, etwa 70 Kilometer östlich der Oshika-Halbinsel der Insel Tōhoku. Das Besondere an diesem Erdbeben war, dass das Hypozentrum nur etwa 30 Kilometer tief lag (Abb. 1). Das Erdbeben entstand durch eine Druckentlastung, die im Rahmen der Kollision der Pazifischen Platte mit einem Sporn der Nordamerikanischen Platte entstanden war. Mit einer Geschwindigkeit von etwa neun Zentimetern pro Jahr stoßen dort diese beiden Platten zusammen und dabei schiebt sich die Pazifische Platte unter die Nordamerikanische. Durch das Erdbeben und die damit verbundenen morphologischen Änderungen im Bereich des Kontinentalhangs und des Tiefseegrabens wurde ein Tsunami mit Wellenhöhen von bis zu 38 Metern ausgelöst (Abb. 2), der einen großen

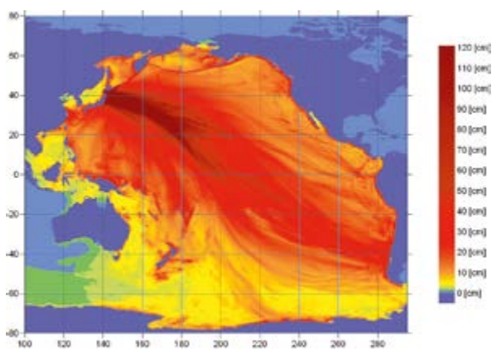


Abb. 2: Der vom Erdbeben ausgelöste Tsunami überquerte den gesamten Pazifik. Die Karte zeigt die von der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) berechneten Wellenhöhen. An der japanischen Küste türmten sich durch die abnehmende Wassertiefe die Wellen bis zu 38 Meter hoch auf.

Bereich der nordöstlichen Küste von Honshu überflutete (Abb. 3). Mehr als 15.000 Menschen starben, viele werden immer noch vermisst. Auch die Küste der Präfektur Fukushima wurde von einer über zehn Meter hohen Welle getroffen, die die Sperranlage um das dort küstennah gelegene Atomkraftwerk Fukushima I überwand und durch die Zerstörungen Kernschmelzen in drei der sechs Blöcke auslöste.

Sofort nach dem Erdbeben machten sich weltweit Forscherteams daran, die Ursachen und Auswirkungen zu studieren: lokale und weltweite Netzwerke registrierten die Ausweitung seismischer Wellen, das Global Positioning System erfasste die Krustendeformation und die Ausbreitung der Tsunamiwellen wurde registriert. Zwei Drucksensoren, die 40 und 70 Kilometer vor der Küste am Meeresboden installiert waren, registrierten den genauen Zeitpunkt und auch die Höhe der Tsunamiwellen bis der Tsunami die Station an der Küste zerstörte.

Expedition mit FS Sonne

Im Frühjahr 2012, also ein Jahr nach der Katastrophe, erhielten wir die Möglichkeit, unterstützt durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMBF) und die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), mit dem deutschen Forschungsschiff Sonne (Abb. 4 oben) das Erdbeben- und Tsunamigebiet mit unterschiedlichen Methoden zu untersuchen. Geplant wurde diese Expedition in enger Zusammenarbeit mit japanischen Institutionen: der University of Tokyo, der Kyoto University, dem Fukada Geological Institute (Tokyo), der Tōhoku University (Sendai) und der Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology. Beteiligt war ferner die ETH Zürich (Schweiz). Die japanischen Kollegen hatten die Morphologie des Gebiets bereits im Jahr 1999 engmaschig vermessen und sofort nach dem Erdbeben Vergleichsmessungen mit einem hochauflösenden Echolotsystem durchgeführt. Der Vergleich dieser beiden Vermessungen zeigte, dass signifikante Veränderungen am Meeresboden und in der Bathymetrie stattgefunden hatten, die Auslöser für den Tsunami waren. Der Fuß des kontinentalen Talhangs hatte sich etwa 50 Meter in Richtung Südosten verschoben. Auch die Morphologie im Tiefseegraben hatte sich signifikant verändert.

Während unserer etwa vierwöchigen Reise wurden weitere Gebiete mit einem hochauflösenden Fächerecholotsystem vermessen (Abb. 5) und mit der Aufnahme von 1999 verglichen. Die Ergebnisse zeigen überraschenderweise, dass die morphologischen Veränderungen nur auf einen engen Bereich bei 38°N begrenzt sind. Nördlich und südlich von diesem Gebiet konnten keine Veränderungen in der Morphologie des Kontinentalhangs festgestellt werden.

Mit dem Tauchroboter MARUM-Quest suchten wir zwei Meeresbodenbeobachtungssysteme auf. Eines war stark beschädigt und durch die Wucht des Erdbebens verbogen während das andere noch weitgehend intakt war.

Abb.3: Der durch das Erdbeben ausgelöste Tsunami überschwemmte einen bis zu zehn Kilometer breiten Küstenstreifen.

Abb. 4: Das frühere, im Jahr 2014 durch einen Neubau ersetzte deutsche Forschungsschiff Sonne (oben) und das japanische Bohrschiff Chikyu (unten)

Leseprobe

Submarine Hydrothermalquellen –

Treffpunkte von Geologie und Biologie

von Wolfgang Bach, Bremen

Bei einer ›Expedition Erde‹ lohnt sich ein Besuch von Hydrothermalquellen in der Tiefsee (Abb. 1). Diese Quellen entstehen bei der Zirkulation von Meerwasser durch die sehr junge und heiße Kruste an ozeanischen Spreizungszentren. Im Stoff- und Wärmehaushalt unseres Planeten spielen hydrothermale Vorgänge eine zentrale Rolle. Reaktionen zwischen Meerwasser und Ozeankruste sind für die Zusammensetzung der Ozeane genauso relevant wie Abtragungs- und Verwitterungsprozesse an Land. Die Freisetzung von Kalzium aus der Ozeankruste ist wichtig im Silikat-Kohlensäure-Kreislauf, der die Bilanz des Kohlendioxids in den Ozeanen und der Atmosphäre auf langen Zeitskalen bestimmt. Bei der Subduktion der Ozeankruste werden Elemente mit unterschiedlicher Effizienz in den Erdmantel zurückgeführt. Dabei spielen die durch hydrothermale Prozesse eingestellten mineralogischen und stofflichen Eigenschaften der Ozeankruste eine große Rolle. Somit sind submarine hydrothermale Vorgänge in Stoffkreisläufen der Erde von enormer Wichtigkeit.

Hydrothermale Reaktionen finden vielerorts im Meeresboden statt: an den Spreizungsachsen, in Rückenflanken, in Seebergen sowie über Subduktionszonen (Abb. 2). Die physikalischen und chemischen Rahmenbedingungen variieren in diesen Systemen sehr stark. In zunehmendem Maße erkennen Wissenschaftler, dass diese geochemischen und physikochemischen Bedingungen an Hydrothermalquellen sehr stark die Natur der assoziierten Mikro- und Makrofaunen beeinflussen. Diese enge Verknüpfung geht auf eine Bedingung zurück, die alle Lebewelten in der Tiefsee teilen – Dunkelheit!

Abb. 1: Garnelen besiedeln einen Black Smoker am Mittelatlantischen Rücken

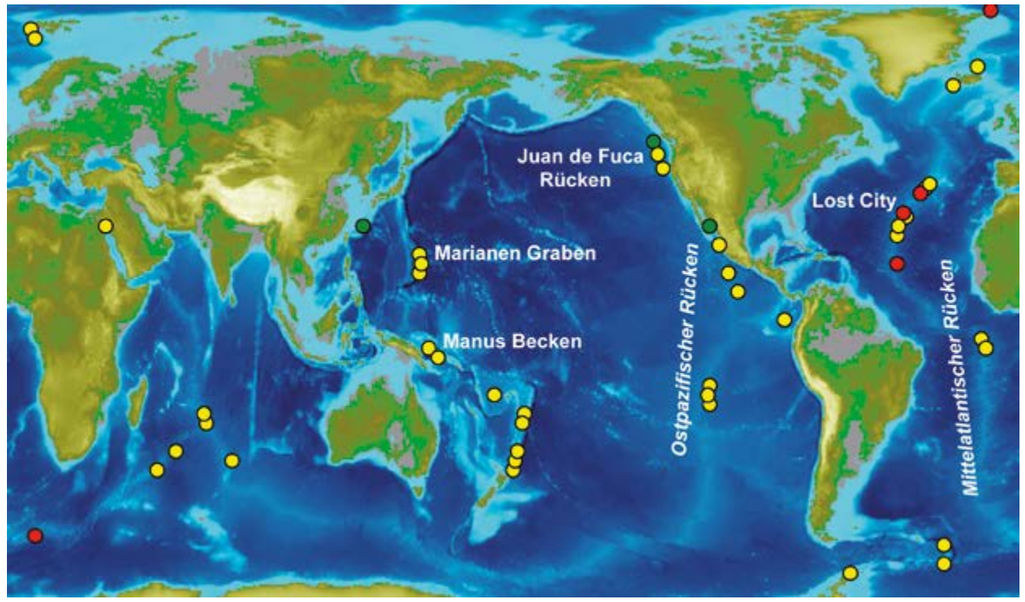


Abb. 2: Lage bekannter Hydrothermalsysteme an ozeanischen Spreizungszentren sowie in Backarc-Becken und submarinen Inselbögen. Gelbe Punkte markieren Systeme, die in Vulkaniten beherbergt sind. Grüne Punkte weisen auf den Einfluss sedimentärer Lithologien, rote auf die Präsenz ultramafischer Gesteine hin.

Die Isolation der Tiefsee von der Versorgung durch Sonnenenergie bedingt die Ausbildung eines besonderen Stoffwechsels, der Chemosynthese. Bei der Chemosynthese nutzen Organismen Energie aus chemischen Redox-Reaktionen, die sie gezielt ablaufen lassen. Anders als an der Erdoberfläche, wo quasi die gesamte Primärproduktion von Biomasse auf Photosynthese zurückgeht, kommt in der Tiefsee der Chemosynthese eine viel größere ökologische Bedeutung zu.

Obwohl in der globalen Bilanz langsam und unscheinbar ablaufende Austauschprozesse die größte Rolle spielen, ziehen uns die spektakulären Black-Smoker-Hydrothermalquellen in der Tiefsee in besonderem Maße an. Heiße Hydrothermalquellen sind vergleichbar mit viele Millionen Jahre alten hydrothermalen Kupferlagerstätten, z. B. die auf Zypern. Bei Temperaturen oberhalb von 350 Grad Celsius werden Buntmetalle, Eisen und Sulfid-Schwefel im aufgeheizten Meerwasser gelöst und über einige Kilometer transportiert, bevor sich beim Vermischen mit Meerwasser am Meeresboden Metallsulfide abscheiden (Abb. 3; s. auch Artikel von P. M. Herzig). Nicht nur Erze wachsen aus diesen Lösungen, sondern auch Mikroorganismen, die aufströmenden gelösten Schwefelwasserstoff oxidieren. Der Fluss von Schwefelwasserstoff ist derart hoch, dass die Bakterien im Verhältnis zu anderen Umgebungen in der Tiefsee unglaublich rasch wachsen können. So entstehen auf engstem Raum enorme Akkumulationen von Biomasse, und es bilden sich Oasen des Lebens in der ansonsten kargen Tiefsee (Abb. 1). Symbiotische Beziehungen zwischen den sulfidoxidierenden Bakterien und Weichtieren spielen in diesen heißen Biotopen eine besonders wichtige Rolle.

Submarine Heiße Quellen: Nach 30 Jahren erneut im Rampenlicht

Schon bald nach ihrer Entdeckung im Jahr 1977 schienen die geologischen und geochemischen Prinzipien von Hydrothermalquellen am Meeresboden in ihren Grundzügen geklärt. An mittelozeanischen Spreizungsachsen wird neue, zunächst permeable Ozeankruste gebildet, und dabei treibt die Wärme von Magmensystemen die Zirkulation von Meerwasser innerhalb der Kruste an. Das Meerwasser wird dabei stofflich sehr stark modifiziert, laugt unter anderem Sulfidschwefel und Metalle aus der basaltischen Kruste und tritt durch Black Smoker am Meeresboden aus.

Die ersten Hydrothermalquellen, die eingehend untersucht wurden, liegen im Pazifik – am Galapagos Spreizungsrücken und am Ostpazifischen Rücken bei 21°N. Der Chemismus der Hydrothermalfluide ließ sich rasch erklären, denn es gelang innerhalb weniger Jahre die erfolgreiche Erfassung wesentlicher hydrothermaler Vor-

Leseprobe

Kalte Quellen im Golf von Mexiko

Besondere Fluid- und Gasaustritte einer Kohlenwasserstoffprovinz

von Gerhard Bohrmann und Heiko Sahling, Bremen

Abb. 1: Bartwürmer an Kalten Quellen

Zusätzlich zu dem Wasser der Ozeane existieren große Wassermengen in den darunterliegenden Sedimenten und Krustengesteinen (s. Artikel von E. Suess & P. Linke). Aufgrund unterschiedlicher geologischer Prozesse können die Fluide an Kalten Quellen, häufig als Cold Seeps oder Cold Vents bezeichnet, am Meeresboden austreten. Diese sind im Unterschied zu den Heißen Quellen der Hydrothermalsysteme durch deutlich geringe Temperaturen gekennzeichnet. Während an Hydrothermalquellen der Mittelozeanischen Rücken Temperaturen von 100 bis 400 Grad Celsius auftreten, sind Fluide der Kalten Quellen nur durch geringe Temperaturerhöhungen von wenigen Grad über den Bodenwassertemperaturen charakterisiert. Auch sind die Austrittsgeschwindigkeiten an Cold Seeps deutlich geringer als an Hydrothermalquellen. Trotzdem sind die Kalten Quellen für den Stoffhaushalt des Ozeans von globaler Bedeutung. Weiterhin sind die aktiven Fluidaustrittsstellen der Kalten Quellen in Wassertiefen von mehr als 300 bis 400 Metern durch speziell angepasste Ökosysteme gekennzeichnet, die chemische Verbindungen mit Hilfe der Chemosynthese zum Leben nutzen. Die chemische Energie wird entweder direkt aus den Kohlenwasserstoffen, wie z.B. Methan, von in Symbiose lebenden Bakterien gewonnen oder indirekt über die anaerobe Methanoxidation in Form von Dihydrogensulfid.

Der nördliche Golf von Mexiko

Der Golf von Mexiko ist nach den ersten Entdeckungen der Cold Seeps in den frühen 80er Jahren des letzten Jahrhunderts zu einem der wichtigsten Untersuchungsgebiete aktiver Fluidaustrittstellen geworden. Er ist Teil eines Mittelmeeres, welches sich als Becken seit dem Mesozoikum entwickelt hat, in dem mehr als 10 Kilometer mächtige Sedimente unterschiedlicher Faziesräume abgelagert wurden. Mächtige jurassische Salzaberlagerungen entlang des nördlichen Kontinentalrands und im Süden in der Campeche Bucht spielen aufgrund ihrer Halokinese und den damit verbundenen Kohlenwasserstofffallen eine wichtige Bedeutung für die Erdöl- und Erdgasgewinnung. Solche Salzstrukturen sind aus Texas und Louisiana an Land bekannt und reichen über den Schelf und einen sehr breiten und extrem flach einfallenden Kontinentalhang bis an den Kontinentalfuß, wo die Salzablagerungen des nördlichen Golf von Mexiko in einer Salzkissenfront enden. An den Flanken der Salzdiapire und Salzwälle, sowie im Dachbereich treten Kohlenwasserstoffe in Form von Fluiden und Gasen entlang von Störungssystemen zum Meeresboden aus, wo sie aktive Seep-Gebiete nähren. Das am längsten bekannte Seep im Golf von Mexiko ist Bush Hill im Pachtblock Green Canyon 185 welches u. a. durch seine gewaltigen Büschel von Bartwürmern (Vestimentifera) charakterisiert ist. Die Bartwürmer (Abb. 1) sind neben den Muscheln die bedeutendsten Organismengruppen, welche mit chemoautotrophen Bakterien in Symbiose leben. Die Mikroorganismen nutzen

Abb. 2: Öltropfen am Meeresboden

das an den Cold Seeps auftretende Dihydrogensulfid zur Energiegewinnung und zum Wachstum, sie sind chemoautotroph. Die Bartwürmer versorgen die in ihrem umgestalteten Darm lebenden Bakterien mit allen aus der Umgebung benötigten anorganischen Verbindungen und versorgen die Bakterien damit in idealer Weise. Im Austausch dafür bekommen die Bartwürmer organisches Material von den Bakterien, welches ihre einzige Nahrungsquelle darstellt.

Im nördlichen Golf sind heute etwa 50 Seeps aus Beobachtungen mit Tauch-Booten und -Robotern bekannt, wobei die Zahl der tatsächlich vorkommenden Seeps mindestens 10 mal so hoch liegt, wenn man die aus Satel-

Abb. 3: Weißes Gashydrathandstück

Leseprobe

Schwarzes Gold

Geologischer Aufbau des Ruhrgebietes, Entstehung der Steinkohle und Geschichte des Bergbaus

von Diethard E. Meyer, Essen

Abb. 1: Untertage im Ruhrgebiet: Steinkohlegewinnung im Streb mit Schildausbau. Kohleflöz mit Hangendschichten (Quelle: RAG, um 1970)

Das Ruhrgebiet ist der größte urban-industrielle Ballungsraum Europas. Hier leben heute 5,2 Millionen Menschen in einem Gebiet von nur 4.400 Quadratkilometern, davon fast 80 Prozent in zahlreichen Großstädten. Fast ein Drittel der Bevölkerung des Landes Nordrhein-Westfalen lebt und arbeitet hier. Wie konnte es zu einer derartigen Ballung von Industrie und Siedlungsraum kommen? Wie wird in Zukunft der Strukturwandel das ›Ruhrrevier‹ verändern, nachdem der Bergbau und die Montanindustrie mit Kohle, Eisen und Stahl sich im Niedergang befinden? Bis zum Jahr 2018 wird der subventionierte Steinkohlenbergbau hier vollkommen eingestellt.

Zum Verständnis der Region und ihrer industriellen und wirtschaftlichen Entwicklung in den letzten 200 Jahren ist ein Blick in die Anfänge des Ruhrbergbaus ebenso wichtig wie der in die erdgeschichtliche Entwicklung vom Oberkarbon (318 bis 299 Millionen Jahren vor heute) bis in das Quartär (s. Tabelle ›Erdzeitalter‹ am Ende des Buches). Die reichen Georessourcen dieses Gebietes (Steinkohle, Erze und weitere mineralische Rohstoffe) bildeten die Grundvoraussetzung dafür, dass sich innerhalb von nur 150 Jahren aus einem landwirtschaftlich genutzten und nur dünn besiedelten Gebiet, in welchem nur eine Reihe von Ackerbürgerstädten zwischen Duisburg und Dortmund existierte, eine Metropolregion mit Siedlungsdichten von 3.000 bis 4.000 Menschen pro Quadratkilometer entwickeln konnte.

Das Ruhrgebiet erstreckt sich über 115 Kilometer in Ost-West-Richtung vom linken Niederrheingebiet (Moers/Kamp-Lintfort) bis Hamm/Ahlen. In nord-südlicher Richtung reicht es über zum Teil mehr als 60 Kilometer vom Raum Marl/Haltern an der Lippe bis südlich der Ruhr (Raum Hagen im Südosten bzw. Mülheim/Ruhr und Duisburg im Südwesten). Heute versteht man unter dem Namen ›Ruhrgebiet‹ das Verbandsgebiet des ›Regionalverbandes Ruhrgebiet‹ (RVR, dem Nachfolger des Kommunalverbandes KVR), das 53 Kommunen samt Großstädten umfasst.

Auslöser der Entwicklung zum Bergbau und in der Folge zur Schwerindustrie ist zweifellos das Vorkommen der Steinkohle im Oberkarbon, das sich unter dem gesamten Ruhrgebiet erstreckt. Es ist als ›Niederrheinisch-Westfälisches Steinkohlengebiet‹ (Abb. 2 und 3) Teil des vor rund 300 Millionen Jahren im Oberkarbon entstandenen Kohlegürtels, der sich von Oberschlesien bis nach Großbritannien und Irland zieht. Die im Ruhrgebiet seit den Anfängen des Kohlebergbaus bis heute gewonnene Steinkohlemenge beträgt fast 10,3 Milliarden Tonnen. Diese Zahl allein unterstreicht die enorme Bedeutung des Ruhrreviers, dessen Wiege anfänglich beiderseits der Ruhr lag, als die Kohle noch oberhalb des Wasserspiegels der Ruhr im Stollenbergbau gewonnen wurde. Erst die ständige Weiterentwicklung bergbaulicher Techniken ermöglichte im 19. und 20. Jahrhundert ein Fortschreiten einerseits zur Tiefe, andererseits nach Norden in das Emscher- und Lippe-Gebiet bzw. nach Westen zum linken Niederrhein.

Ein weiterer entscheidender Faktor für das Entstehen einer blühenden Eisen- und Stahlindustrie war neben der Verfügbarkeit der Steinkohle als Energieträger und als Steinkohlenkoks das Vorkommen von Eisenerzen im Ruhrkarbon. Zeitweise wurde sogar auf rund 70 Kohle-Zechen gleichzeitig Eisenerz gewonnen. Die Fortschritte in der Bergbautechnologie und in der Verhüttungstechnik im 19. Jahrhundert, aber auch im Verkehrswesen (Schiffbarmachung der Ruhr 1774 bis 1780, Köln-Mindener Eisenbahn ab 1847, Duisburg-Ruhrorter Hafen ab 1872, Kanalbau) ermöglichten die Erschließung neuer Felder im Steinkohlenbergbau, modernere Zechenanlagen mit tieferen Schächten und mit eigenen Kokereien sowie rasch steigende Förderziffern. Dass der Bergbau nach Norden in immer größere Tiefen

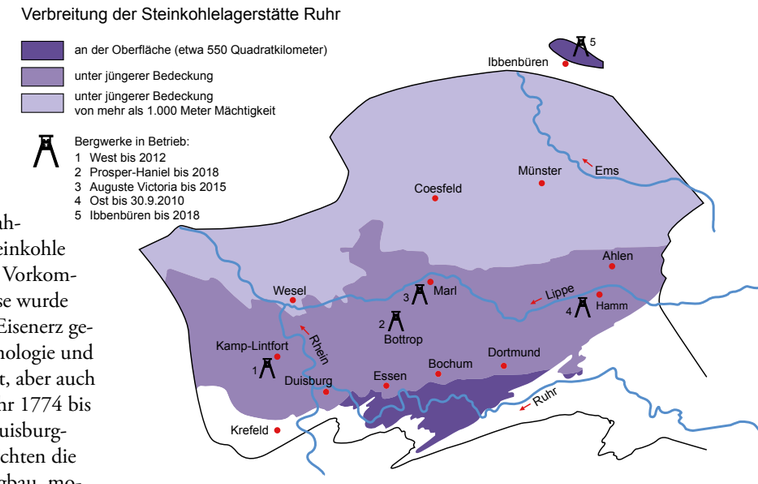


Abb. 2: Die mit 3° Nord einfallenden Oberkreide-Schichten bilden die Hauptüberdeckung des Oberkarbons – zum Nordrand des Reviers auf 1.000 Meter, im nördlichen Münsterland bis auf über 2.000 Meter Mächtigkeit zunehmend.

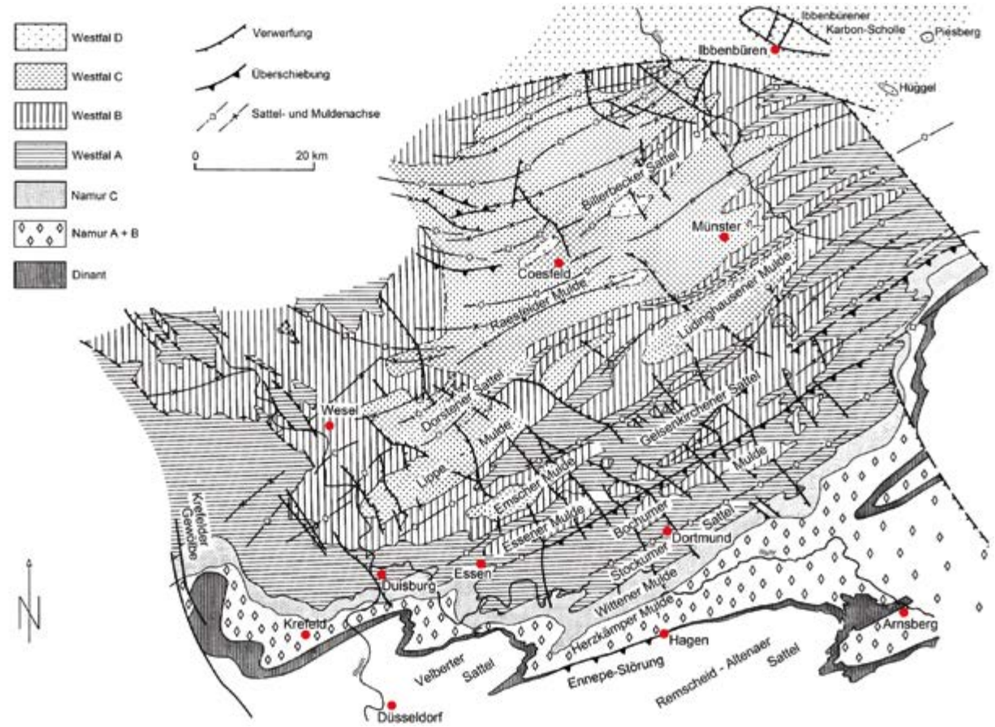


Abb. 3: Abgedeckte geologisch-tektonische Karte des Niederrheinisch-Westfälischen Steinkohlengebietes. Sie zeigt das Streichen der Großsättel und Großmulden (WSW – ONO) im Ruhrgebiet und Münsterland bis zu den Karbonschollen im Raum Ibbenbüren, wo die Schichten bis ins Westfal D hinauf reichen. Sie verdeutlicht die quer zu den Faltenstrukturen verlaufenden Hoch- und Tiefschollen (Horste und Gräben). Die Abbauschwerpunkte und damit die meisten Schachtanlagen liegen im Überschneidungsbereich der großen Muldenstrukturen mit den Hochschollen, da hier die Flöze relativ flach und der Oberfläche am nächsten gelagert waren.

Leseprobe

Tiefseebergbau –

eine nachhaltige Option für die zukünftige Versorgung mit strategischen Wertmetallen?

von Andrea Koschinsky, Bremen

Eine Seegurke, ein typischer Bewohner der Tiefseeebenen mit Manganknollenfeldern im deutschen Lizenzgebiet in der Clarion-Clipperton Zone

Wie im Beitrag von G. Borg dargelegt, sind mineralische Rohstoffe eine wichtige Grundlage unseres wirtschaftlichen Wohlstands, und ihre uneingeschränkte Verfügbarkeit ist ein wichtiges strategisches Kriterium für Industrienationen wie Deutschland. Es gibt eine Reihe von Gründen, die diese Verfügbarkeit empfindlich einschränken können, wie die Abhängigkeit vom Import aufgrund fehlender Vorkommen im eigenen Land und die damit verbundenen Risiken, z. B. durch politische Konflikte oder marktwirtschaftliche Beschränkungen. Auch ist durch neue technologische Entwicklungen, etwa im Bereich der Erneuerbaren Energien einschließlich Windkraft und Photovoltaik der Bedarf an bestimmten Wertstoffen wie z. B. seltenen Metallen in den vergangenen Jahren kontinuierlich gestiegen. Aus diesem Grund haben in den letzten Jahren viele Länder, unter anderem Deutschland, verstärkt auch den tiefen Ozean als mögliche zukünftige Quelle für kritische Hochtechnologie-Metalle ins Visier genommen. Viele Lagerstätten, die heute an Land abgebaut werden, sind ursprünglich im Meer entstanden, und auch heute noch ist der Ozean einschließlich der Tiefsee ein Entstehungsort verschiedenster Arten von nichtbiologischen Rohstoffen. Während in den Küsten- und Schelfbereichen vor allem fossile Energieträger wie Öl und Gas, aber auch Gashydrate vorkommen, ebenso wie Phosphorite, die im Wesentlichen für die Produktion von mineralischen Düngemitteln abgebaut werden, finden sich die großen Vorkommen metallreicher Lagerstätten vor allem im tiefen Ozean. Als Tiefsee werden ozeanische Bereiche mit Wassertiefen über 1.000 Metern bezeichnet, die durch lichtlose Verhältnisse, niedrige Wassertemperaturen (mit Ausnahme hydrothermal aktiver Bereiche), hohen Druck und durch eine speziell an diese extremen Bedingungen angepasste Lebewelt charakterisiert sind. Neben den Phosphoriten, die auch in größeren Wassertiefen wie z. B. dem Chatham Rise vor Neuseeland vorkommen, handelt es sich bei den mineralischen Erzvorkommen in der Tiefsee im Wesentlichen um Manganknollen, Mangankrusten und Massivsulfide. Diese drei Typen von marinen Rohstoffen der Tiefsee sind neben ihrer wissenschaftlichen Bedeutung vor allem auf Grund ihrer hohen Gehalte an strategisch wichtigen Wertmetallen auch von wirtschaftlichem Interesse.

In den vergangenen Jahren haben steigende Rohstoffpreise, der stetig steigende Bedarf an Wertmetallen für Stahlverarbeitung, Elektroindustrie und erneuerbare Energie-Technologien wie Windkraft und auch der Fortschritt in der Entwicklung von Tiefseetechnologien wie z. B. Manganknollen-Kollektoren das Interesse an mineralischen Rohstoffen der Tiefsee deutlich gesteigert. Neben den traditionell interessanten Metallen wie Kupfer, Zink, Kobalt, Nickel, Gold und Silber rücken nun auch zunehmend andere Metalle wie Seltene Erden, Molybdän, Zirkon, Tellur und Platin in den Fokus, da diese für viele Zukunftstechnologien unverzichtbar sind und landgebundene Ressourcen teils zur Neige gehen. Bei einigen Metallen ist die Versorgung z. B. aufgrund existierender oder potentieller politischer Konflikte mit den Lieferländern oder sonstiger Einschränkungen langfristig nicht sichergestellt. Ein prominentes Beispiel hierfür ist die Monopolstellung Chinas beim Abbau der Seltenen Erden an Land, die z. B. durch Ausfuhrbeschränkungen eine dauerhafte Versorgung mit diesen strategisch bedeutsamen Metallen gefährden kann. Somit wird seit einiger Zeit sowohl in Wirtschaft und Politik als auch von Wissenschaftlern und der Öffentlichkeit die Möglichkeit eines zukünftigen Bergbaus in der Tiefsee intensiv diskutiert.

Mineralische Rohstoffvorkommen in der Tiefsee – Typen und Entstehung

Seit einigen Jahren sind vor allem Manganknollen mit ihren signifikanten Gehalten an strategisch wichtigen Metallen wieder in den Fokus politischen und wirtschaftlichen Interesses gerückt. Die Existenz von Manganknollen ist bereits seit den frühen Forschungsreisen des britischen Schiffes Challenger in den Jahren 1872 bis 1876 bekannt, als neben anderen spektakulären Erkenntnissen und Funden die ersten Manganknollen aus der Tiefsee an Bord geholt wurden. In den 70er Jahren des vergangenen Jahrhunderts wurden Manganknollen aufgrund ihrer hohen Gehalte an Metallen wie Kupfer, Kobalt und Nickel von Wissenschaft und Industrie schließlich als potentiell abbauwürdige metallische Rohstoffe eingestuft, was zu intensiven Explorationsaktivitäten verschiedener Länder vor allem im Pazifik führte. In Deutschland wurden unter Leitung der Preussag AG in einem Pilotprojekt mehrere Tonnen Manganknollen im zentralen Ost-Pazifik geborgen und auf Wertmetalle analysiert. Als jedoch die Rohstoffpreise in den 1980er Jahren sanken und die Wirtschaftlichkeit von Tiefseebergbau nicht mehr gegeben schien, wurden die Explorationsvorhaben und Aktivitäten weitgehend eingestellt.

Manganknollen messen in der Regel einige Zentimeter bis maximal etwa 20 Zentimeter im Durchmesser (Abb. 1 und 2) und kommen vor allem in den großen sedimentgefüllten Becken aller Ozeane in Tiefen zwischen etwa 3.000 und 6.000 Metern vor. Ihre Entstehung findet sehr langsam statt, mit Wachstumsgeschwindigkeiten von einigen Millimetern bis maximal Zentimetern in einer Million Jahre. Das Alter der Manganknollen liegt in der Regel im Bereich von mehreren Millionen Jahren. Somit sind Manganknollen, wie andere mineralische Lagerstätten, keine erneuerbaren Rohstoffe, auch wenn das Mangan-

Abb. 1: Manganknollen verschiedener Herkunft mit typischen Größen zwischen einem und zehn Zentimetern im Durchmesser.

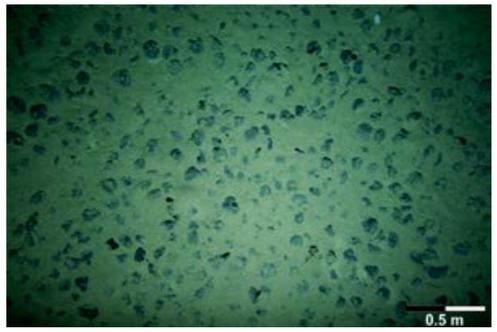


Abb. 2: Meeresbodenfoto einer dicht mit Manganknollen belegten Tiefseeebene in der Clarion-Clipperton Zone; das untere Foto zeigt eine in diesem Gebiet mit einem Kastengreifer genommene Probe mit bis zu zehn Zentimeter großen Manganknollen

Leseprobe

Abb. 2: Lebendrekonstruktion eines Ammoniten. Die Form des Körpers und auch die Anzahl der Arme sind hypothetisch.

Abb. 3: Ein heutiger *Nautilus*, fotografiert am Great Barrier Reef vor Australien.

sind und das Vorderende in einer etwas breiteren Basis steckt. Fossilien können uns die Frage nach der Anzahl der Arme von Ammoniten nicht beantworten. Einen Hinweis gibt aber die Entwicklung des Embryos von *Nautilus*: Dieser hat nämlich zehn Arme, und da in der frühesten Entwicklung eines Tieres angelegte Merkmale oft den ursprünglichen Zustand widerspiegeln, dürfte dieses dem ursprünglichen Bauplan der tintenfischverwandten Tiere entsprechen.

Es ist erstaunlich, dass, obwohl Körperumrisse und Arme nicht erhalten sind, einige Organe mit Resten des Verdauungstraktes, die Reibezunge (Abb. 4) und sogar die Augenkapsel und möglicherweise Eileiter in einigen Fossilien sehr wohl überliefert wurden. Bemerkenswert ist auch, dass es in Deutschland (Holzmaden bei Stuttgart), in Frankreich (nahe Lyon) und in England (bei Bristol) eine Reihe von Fundstellen gibt, an denen sehr gut erhaltene Tintenfischfossilien gefunden wurden, die eine ganze Reihe anatomischer Details zeigen. Wieso findet man diese nicht bei Ammoniten? Waren die Arme und Haut der Ammoniten viel zu filigran, um überhaupt überliefert zu werden? Oder ist es wie mit einem Lottogewinn und die Millionen von Ammonitenfossilien, die bislang gefunden wurden, reichen noch nicht, um einen Glücksfund mit der Erhaltung von Armen und Haut zu erfassen? Vielleicht fehlen uns auch nur starke und einfach handzuhabende Röntgengeräte um eine große Anzahl von Ammonitenfossilien zu scannen. Potentielle Weichteile könnten im Gestein verborgen liegen und nur in den seltensten Fällen werden sie durch das Herauslösen der Schalen aus dem Gestein sichtbar. Wenn dem so ist, liegt bereits Basiswissen über Ammoniten in einer Sammlung verborgen – ein unerkannter Schatz der möglicherweise gut etikettiert ist und nur darauf wartet, gehoben zu werden.

Raspelnde Reibezungen und klappende Kiefer

So wie Schnecken und ursprünglich alle Weichtiere besaßen auch Ammoniten eine sogenannte Radula, eine aus winzigen Chitin-Zähnchen bestehende Reibezunge mit deren Hilfe sie Nahrung abtragen bzw. zerkleinern konnten (Abb. 4). Tatsächlich ist es diese Reibezunge, die eine relativ enge Verwandtschaft zu den Schnecken belegt, und nicht etwa das von Laien oft zu Unrecht als Schnecke bezeichnete Ammonitengehäuse. Dass Ammoniten eine Radula besaßen, wissen wir allerdings nur aufgrund einiger weniger Funde. Aus dem Erdaltertum sind gerade einmal Nachweise von Radulae von drei verschiedenen Ammoniten bekannt, aus dem Erdmittelalter sind es nur fünf. Die Unterschiede zwischen den Radulae der bisher bekannten Ammonitenarten sind dabei sehr deutlich, aber sie sind alle nach demselben Muster konstruiert: sieben nach hinten gebogene Zähnchen pro Querreihe und jeweils links und rechts davon eine Reihe flacher Randplatten. Die außen gelegenen Zähne der Ammonitenradulae sind deutlich verlängert – gerade im Vergleich mit denen moderner Tintenfische – so dass man vermutet, dass damit

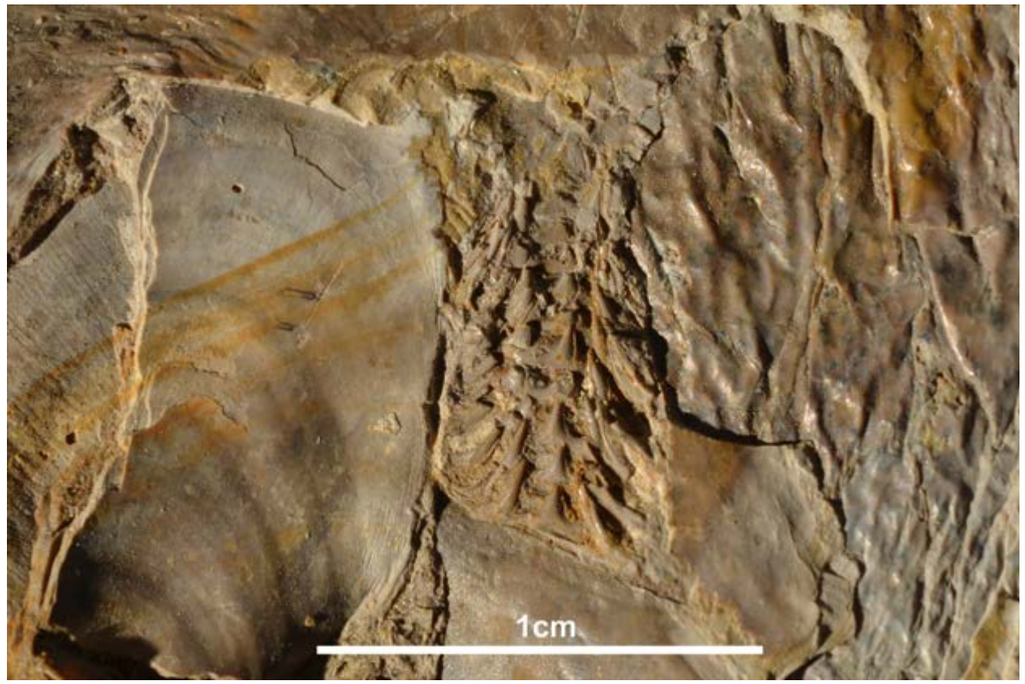


Abb. 4: In feinen, dicht nebeneinander gepackten Reihen stehen die Zähne der Ammoniten – sie bilden die Raspelzunge. Links und unterhalb der Raspelzunge sind hier noch die Kieferelemente erhalten.

kleinere Nahrungspartikel wie mit einer Bürste optimal in Richtung des Verdauungstraktes weitergeleitet werden konnten.

Bei der Beantwortung der Frage, wie der Kiefer der Ammoniten konstruiert war und funktioniert hat, hilft uns ein Blick auf die Kiefer heutiger Kopffüßer. Auf den ersten Blick sind deren Kiefer wie Papageienschnäbel konstruiert. Anders als bei diesen Vögeln umgreift bei ihnen aber der Unterkiefer den Oberkiefer und der Schnabel hat kein Scharnier. Muskeln öffnen den Kiefer und Muskeln dienen auch dazu, ihn in der richtigen Position zu halten. Damit diese Konstruktion gut funktioniert, ist sie von vielen Muskelschichten umgeben. Zusammen mit den Kieferelementen und den einhüllenden Häuten bildet sie eine widerstandsfähige Einheit, die Buccalmasse genannt wird. Die Kieferelemente bestehen aus festem, hornartigen Material und innerhalb der heutigen Kopffüßer ist deren Spitze nur bei *Nautilus* durch kalkige Einlagerungen und Auflagen verstärkt.

Bei den Ammoniten gibt es zwei Typen von Unterkiefern. Die einen sind seit dem ersten Auftreten dieser Tiere in der Devonzeit zu finden; sie sind einteilig und werden Anaptychen genannt (Abb. 5). Der zweite Typus – Aptychus (Abb. 6) – ist zweiteilig und oft auch durchgängig verkalkt und somit fossil weit verbreitet. Diese Unterkiefer sehen ein bisschen wie Muscheln aus und zeigen auch – wie viele Muscheln – eine lange gerade Scharnierseite, an der sie zu Lebzeiten des Tieres zusammenhingen. Findet man beide Klappen eines Aptychus gemeinsam, dann sind sie oft auseinandergeklappt (Abb. 6). Da viele Aptychen von der Form her gut in die Wohnkammer der Ammoniten passen und auch oft nahe der Mündung gefunden wurden (Abb. 7), kam die Theorie auf, sie hätten

Abb. 5: Der ursprüngliche Kiefertyp der Ammoniten besteht aus einem Element. Es wird Anaptychus genannt und war hornig-phosphatisch.

Leseprobe

Klimageschichte aus der Tiefsee

Der Weg vom Treibhaus zum Eiszeitklima

von Gerold Wefer, Ursula Röhl und Wolfgang H. Berger, Bremen, La Jolla

Wir studieren die Klimata früherer Zeiten, um Prozesse, die das Klima der Erde beeinflussen, besser verstehen zu können und so Hinweise auf zukünftige Klimaentwicklungen zu erhalten. Nur die Paläoklimaforschung bietet die Möglichkeit, Klimazustände zu erforschen, die völlig anders sind als die heutigen, die aber in ferner Zukunft eventuell wieder auftreten können. Außerdem erlaubt sie uns, die Qualität von Klima-Modellen zu testen, denn nur im Vergleich mit früheren Klimaszenarien ist dies möglich.

Der Ozean spielt im globalen Klimageschehen eine große Rolle, da er den Wärmehaushalt, also die Umverteilung von Wärme bestimmt und die Aufnahme und Abgabe von Treibhausgasen der Atmosphäre wie Wasserdampf, Kohlendioxid und Methan steuert.

Die Rolle des Ozeans für den Wärmehaushalt verdeutlicht ein Blick in die hohen Breiten des Atlantiks: An den Küsten Norwegens etwa gedeihen Äpfel und Birnen, wird Gemüse angepflanzt und Heu eingefahren. Nur die weit ins Land eingeschnittenen Fjorde frieren im Winter teilweise zu. Dagegen bleiben die wirtschaftlich wichtigen Seewege entlang der über 2.000 Kilometer langen Küste in der Regel eisfrei. Ursache dafür ist der warme Norwegenstrom, ein Ausläufer des Nordatlantikstroms, der seinerseits vom Golfstrom abstammt. Die Wirkungen des Norwegenstroms sind noch weit jenseits des Polarkreises zu spüren. So auf 80 Grad Nord an der Westküste Spitzbergens, wo das Thermometer selbst im kältesten Monat nur auf durchschnittlich minus zwölf Grad Celsius fällt. An der kanadischen Küste auf dem gleichen Breitengrad ist es zur selben Zeit 20 Grad Celsius kälter, weil die mildernde Meeresströmung fehlt. Die besondere Bedeutung des Ozeans für das Klimageschehen liegt also in seinem Wärmehaushalt.

Meeresströmungen

Um die klimawirksamen Vorgänge im Ozean zu verstehen, ist ein Blick auf die Zirkulation hilfreich. Dabei zeigt sich, dass die Meeresströmungen an der Oberfläche ganz anders verlaufen können als in den darunter liegenden Tiefen des Weltmeeres. Riesige Wirbel prägen heute das Bild der Meeresströmungen in den Ozeanbecken (Abb. 1). Bedingt durch die Erdrotation drehen sich diese Wirbel auf der Nordhalbkugel im Uhrzeigersinn, auf der Südhalbkugel indes gegen den Uhrzeigersinn. Angetrieben werden diese Wasserbewegungen hauptsächlich durch die Passatwinde; sie treiben die Nord- bzw. Südäquatorialströme an, welche von Ost nach West verlaufen.

Die subtropischen Großwirbel des Ozeans bestehen aus ausgedehnten rotierenden Warmwasserscheiben von mehreren tausend Kilometern Durchmesser. Sie nehmen etwa die Hälfte der Ozeanoberfläche ein, sind mit etwa 100 bis 200 Metern Dicke aber nicht sehr mächtig. Die dünne, sehr warme Deckschicht ist stabil und verhindert, dass kühleres, nährstoffreiches Wasser aus der Tiefe an die Meeresoberfläche quellen kann. Große Bereiche des Ozeans weisen daher Nährstoffmangel auf. Sie sind unproduktiv und werden zu Recht als Wasserwüsten bezeichnet.

Polwärts der subtropischen ozeanischen Wüsten herrschen kräftige westliche Winde vor. In dieser Westwind-

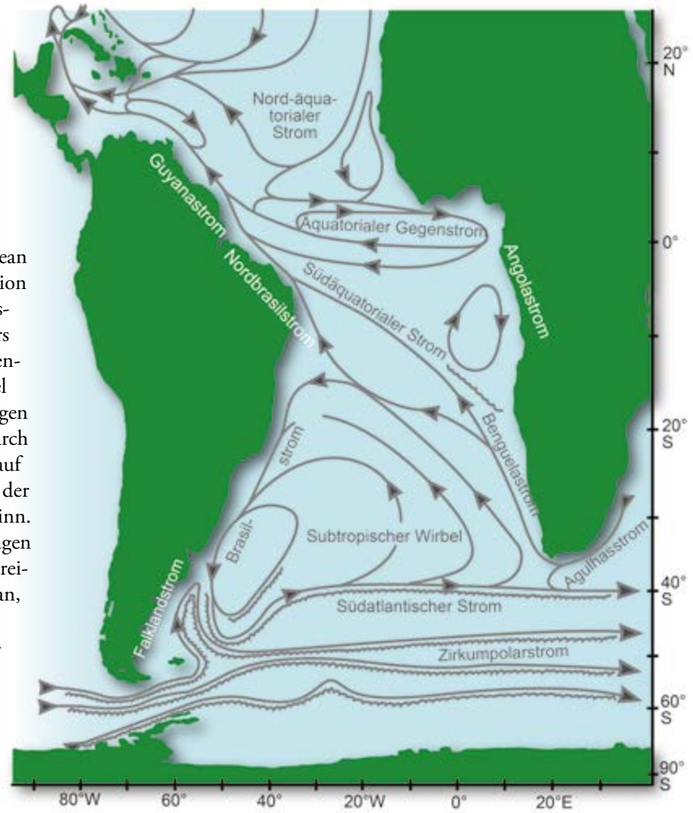
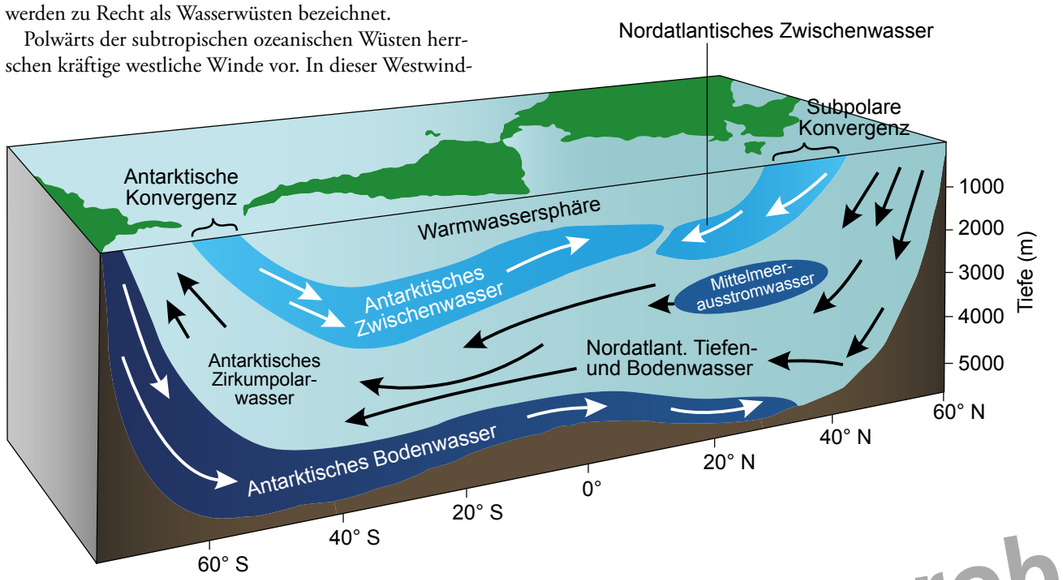
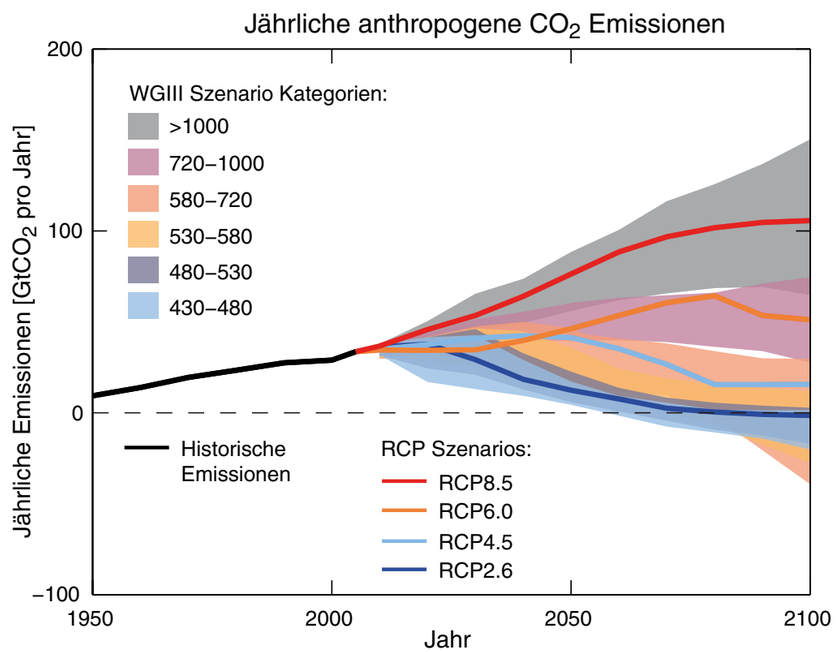
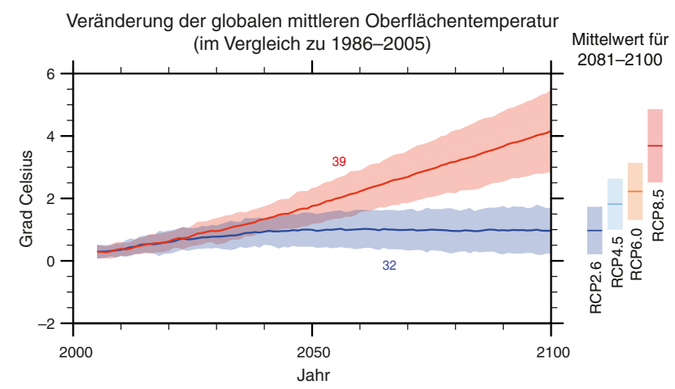


Abb. 1: Oberflächenströmungen (oben) und Stockwerke (unten) im Atlantischen Ozean



Leseprobe





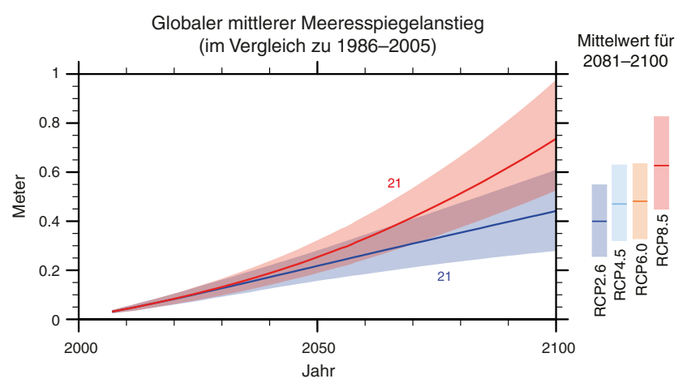


Abb. 6: Verschiedene Szenarien für die mögliche Entwicklung von CO_2-Emissionen (oben) und daraus resultierende Änderung der globalen Jahresmitteltemperatur (rechts) und des Meeresspiegels (unten). Die farblich hell schattierten Bereiche geben die Unsicherheit der Modellrechnungen an (RCP: Representative Concentration Pathways).

Nach IPCC (2014), Details im Bildnachweis im Anhang

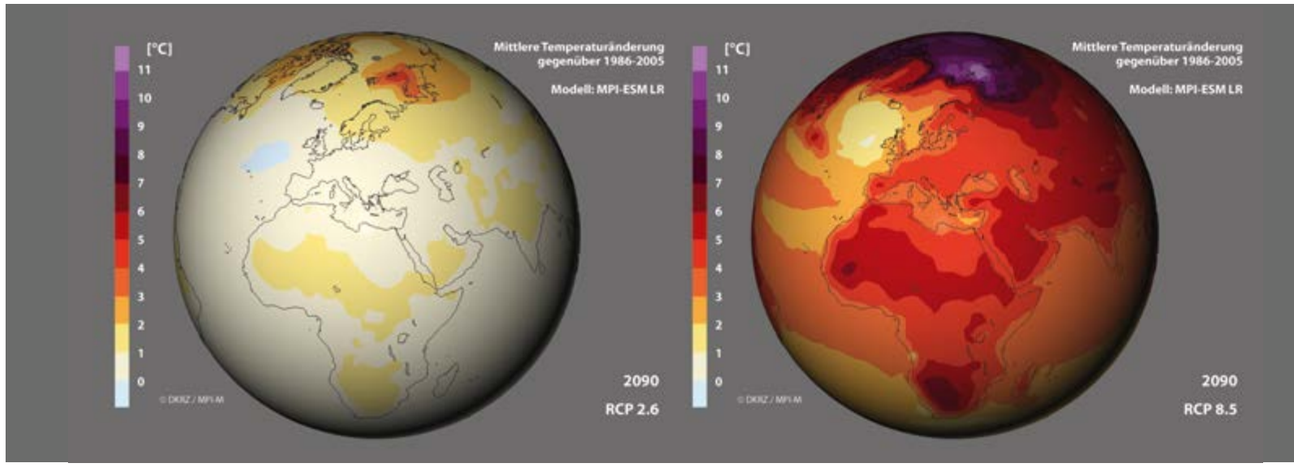


Abb. 7: Mittlere Änderungen der bodennahen Lufttemperatur bis zum Zeitraum 2081 bis 2100 im Vergleich zum Mittelwert der Jahre 1986 bis 2005, berechnet für zwei verschiedene RCP-Szenarien (vgl. Abb. 6)

1800) große Mengen zusätzlicher Treibhausgase in die Atmosphäre freisetzt, die den Treibhauseffekt verstärken. Die größte Rolle spielt dabei Kohlendioxid (CO_2) mit einem Beitrag von circa 60 Prozent, die verbleibenden 40 Prozent verteilen sich auf Methan (CH_4), Distickstoffoxid (N_2O, auch als Lachgas bekannt) und Halogenkohlenwasserstoffe (FCKW = Fluorchlorkohlenwasserstoffe und andere).

Die atmosphärische Konzentration von CO_2 betrug während der letzten zwei Jahrtausende bis zum Jahr 1750 relativ gleichförmig 280 ppm (ppm: parts per million, Teile pro Million; 10.000 ppm = 1 Prozent). Seitdem steigt die Konzentration aufgrund anthropogener Emissionen kontinuierlich, im 20. Jahrhundert beschleunigte sich dieser Prozess massiv, so dass gegenwärtig die Konzentration bei etwa 400 ppm liegt. Dass dieser CO_2-Anstieg im Wesentlichen auf die Verbrennung fossilen Kohlenstoffs zurückzuführen ist, und nicht etwa auf ein Ausgasen aus dem Ozean oder dem Erdinneren, kann mittlerweile einwandfrei nachgewiesen werden. Der Ausstoß von CO_2 durch die Nutzung von fossilen Brennstoffen (Öl, Kohle, Gas) beläuft sich zurzeit auf etwa 33 Milliarden Tonnen pro Jahr (!). Somit nimmt die CO_2-Konzentration in der Atmosphäre jedes Jahr um weitere etwa 2 ppm zu.

Nicht zu verwechseln mit dem anthropogenen Treibhauseffekt ist die Problematik des Ozonlochs. Dies kommt zustande, weil besonders im Frühjahr in etwa 20 Kilometer Höhe in der Atmosphäre über der Antarktis – und in abgeschwächter Form auch über der Arktis – Ozon abgebaut wird. Da die Ozonschicht einen großen Teil der gewebsschädigenden ultravioletten Strahlung der Sonne absorbiert, hat dieser Abbau schwerwiegende Konsequenzen. Für das Ozonloch, dessen Auswirkung sich auch auf bewohnte Gebiete (hauptsächlich Australien, Neuseeland, Südamerika) erstreckt, sind die früher als Kühlmittel in Kühlschränken verwendeten FCKW verantwortlich, welche über eine komplizierte Kette von chemischen Reaktionen den Ozonabbau katalysieren. Wie oben erwähnt, spielen die FCKWs eine, wenn auch zurzeit noch untergeordnete Rolle als Treibhausgas.

Mögliche Klimaänderungen

Im Jahr 1988 wurde gemeinsam von der Weltmeteorologischen Organisation und dem UN-Umweltprogramm das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, zwischenstaatliche Kommission zum Klimawandel) eingesetzt. Das IPCC hat 2013/14 seinen fünften Bericht zum Klimawandel vorgelegt, an dem mehrere hundert Wissenschaftler mitgewirkt haben. Er dokumentiert ausführlich den gegenwärtigen Forschungsstand der Klimaforschung, einschließlich kontroverser Diskussion.

Wir müssen davon ausgehen, dass der Anstieg der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur in den letzten Jahrzehnten wahrscheinlich zu einem Großteil durch die Emission von Treibhausgasen verursacht worden ist, auch wenn Medien oder populärwissenschaftliche Literatur dies manchmal anders darstellen. Die Klimaänderungen vor Beginn der industriellen Revolution können auf verschiedene natürliche Faktoren zurückgeführt werden: Schwankungen in der Leuchtkraft der Sonne und der Vulkanaktivität sowie die sogenannte interne Klimavariabilität. Letztere entsteht durch die Wechselwirkung zwischen den Komponenten des Klimasystems auch ohne äußere Störungen. Durch Landnutzung, insbesondere durch Rodung, hat der Mensch allerdings auch schon vor der industriellen Revolution das regionale Klima beeinflusst.

Eine Klimaprognose für das 21. Jahrhundert kann – im Gegensatz zur Wetterprognose für die nächsten Tage – nicht abgegeben werden, da menschliches Handeln

Leseprobe

Forschung für Nachhaltigkeit:

Der Mensch als Akteur im Erdsystem

von Frauke Kraas, Köln und Tabea Bork-Hüffer, Singapur

Abb. 1: In der Megastadt Ho Chi Minh City in Vietnam leben etwa sieben Millionen Menschen, die zumeist mit Motorrad oder öffentlichen Verkehrsmitteln zwischen Wohn- und Arbeitsort pendeln.

Schon seit dem Neolithikum lassen sich deutliche Einflüsse des Menschen auf seine natürliche Umwelt nachweisen. Seit der industriellen Revolution hat der Mensch dann die Entwicklungen in weiten Teilen des ›Systems Erde‹ so tiefgreifend dominiert, dass die anthropogenen Veränderungen über die lokale und regionale Ebene hinaus globale Dimensionen angenommen haben und oft unumkehrbar geworden sind. Diese neue Phase der Erdgeschichte, oft als ›Anthropozän‹ bezeichnet, bringt zahlreiche Herausforderungen für die Menschheit mit sich, darunter globale Umweltveränderungen, demographische Ungleichheiten und Migration, Urbanisierungsprozesse – in Regional- wie Megastädten –, politisch gesteuerte Strategien der Ressourcensicherung, natürliche und sozioökonomische Risiken und Konflikte sowie Probleme schwacher Regier- und Steuerbarkeit (Governance).

Abb. 2: Das Stadtzentrum von Jakarta, Indonesien wird von Büro- und Wohnhochhäusern, zumeist finanziert von internationalen Investoren, überprägt.

Der Mensch: ›Faktor‹ oder ›Akteur‹?

Während man unter dem Begriff ›System Erde‹ die vielfältigen natürlichen Wechselwirkungen der Prozesse im Erdinneren und an der Erdoberfläche (mit Lithosphäre, Atmosphäre, Hydrosphäre, Biosphäre und Anthroposphäre) versteht, rückt der Begriff ›System Mensch-Erde‹ die Bedeutung des Menschen innerhalb dieses Gesamtsystems stärker ins Zentrum der Wahrnehmung. Oft wird der Einfluss ›des‹ Menschen auf seine Umwelt undifferenziert als ein ›Faktor‹ neben andere (z.B. Klima, Boden, Vegetation) gestellt. Bei genauerem Hinsehen erkennt man jedoch eine große Bandbreite unterschiedlichen menschlichen Handelns – basierend auf sehr verschiedenen Ursachen, Motiven, Werten und Normen in Gesellschaftssystemen. Der Vielfalt von Gesellschaften und Akteuren wird man nur dann in angemessener Weise gerecht, wenn ein Perspektivenwechsel vollzogen wird und fortan der Mensch nicht allein als ein (undifferenzierter) ›Faktor‹ verstanden wird, sondern als ›Akteur‹ mit Urteilsvermögen, gewissen begrenzten Entscheidungsalternativen und Handlungsfreiheiten.

Dieser auf den ersten Blick scheinbar belanglose Perspektivenwechsel hat für die Forschung wichtige Konsequenzen: Wenn man vom ›Faktor Mensch‹ spricht, geht man primär davon aus, dass sich eine Art Durchschnittsverhalten ermitteln, messen oder errechnen lässt: Errechenbar ist zum Beispiel, wie viel Wasser, Nahrung oder Energie ein Mensch durchschnittlich zum Leben braucht und verbraucht sowie wie viel Abwasser, Abfall oder CO_2-Ausstoß ein Mensch weltweit statistisch gemittelt verursacht. Mit Durchschnittswerten wie diesen können innerhalb komplizierter und komplexer mathematisch-statistischer Modelle Berechnungen für Bevölkerungszahlen vorgenommen werden – was etwa für eine Modellbildung im Rahmen globaler Berechnungen relevant sein kann. Demgegenüber zielt die wissenschaftliche Perzeption vom Menschen als ›Akteur‹ jedoch auf eine Berücksichtigung der Vielfältig- und Vielschichtigkeit des menschlichen Handelns bzw. gesellschaftlichen Gestaltens, welche auf sehr unterschiedlich wirksamen Werten, Normen, Orientierungen, Entscheidungsprozessen und -potentialen in unterschiedlichen Gesellschaften basiert. Entsprechend werden in komplexeren, oft regional differenzierenden Analysen ein tiefer gehendes Verständnis und eine differenzierte sozialwissenschaftliche Bewertung von Sachverhalten, Prozessen und Entwicklungen erreicht, z.B. bei der Untersuchung des unterschiedlichen Ressourcenverbrauchs etwa eines

Abb. 3: Dhaka in Bangladesch, mit 1970 noch etwa 1,5 Millionen Einwohnern, gehört zu den am schnellsten wachsenden Megastädten der Erde, die zumeist ohne Stadtplanung und informell entsteht.

Leseprobe

»Was aber bleibet, stiften die Dichter«

Geologie und Literatur

von Ilse und Eugen Seibold, Freiburg

»Was aber bleibet, stiften die Dichter« – dieses Wort Hölderlins trifft einen grundlegenden Unterschied zwischen den beiden großen Domänen der Wissenschaft – in unserem Fall der Naturwissenschaft – und der Kunst. Wissenschaft ist nie abgeschlossen, sie schreitet fort über ihre Erkenntnisse wie über ihre Irrtümer, die oft lange als Wahrheiten Geltung hatten. Ein Kunstwerk dagegen, hat es einmal seine Form erhalten, bleibt bestehen, seine Aussage ist nicht mehr wandelbar. Sofern sich Dichtung mit Wissenschaft befasst, finden wir deshalb auch manchen, jeweils zeitgebundenen Irrtum, was aber dem Kunstwerk als Ganzem nichts anhaben kann. Das muss man im Kopf haben, wenn man auf geologische Bezüge in der Literatur aus verschiedenen Jahrhunderten blickt. Für diesen Artikel können nur Beispiele aus Werken besonders bekannter Dichter herangezogen werden. Sie können hier nur in Ausschnitten zitiert werden, die dazu anregen mögen, sich weiter damit zu befassen. Es gibt manche weitere Literatur, in der die Geologie eine Rolle spielt. Hinweise zu früheren Arbeiten über unser Thema sind dem Literaturverzeichnis zu entnehmen.

Es gibt, vor allem in der Lyrik, Gedichte, die explizit die Geologie zum Sujet haben, bei anderen bildet sie nur den Rahmen zu weiterführenden Gedanken über Menschenlos und Weltgeschick. Unsere Gliederung richtet sich jedoch nicht danach, sondern geht chronologisch vor.

Die Geologie im engeren Sinn begann sich in der Zeit der Aufklärung, im 18. Jahrhundert, zu entwickeln. Ihre Wurzel ist der Bergbau, auf dessen Kenntnissen sie aufbaute. Deshalb finden wir in dieser Frühzeit auch die Gedichte, die sich auf den Bergbau beziehen und ihn verherrlichen.

Abb.1: Der Geologe. Gemälde von Carl Spitzweg, um 1860 (Von-der-Heydt-Museum, Wuppertal)

Lessing

Beginnen wir mit dem großen Pionier deutscher Dichtung, Gotthold Ephraim Lessing (1729–1781). Er schrieb 1748 im ›Naturforscher‹, 72. Stück:

»Bald in dem finstern Schacht, wo Graus und Reichtum thronet,
Und bei dem Nutz Gefahr in hohlen Felsen wohnet.
Der Steine theure Last, der Erze hart Geschlecht,
Der Gänge Wunderlauf, was schimmert und was ächt,
mit mühsamer Gefahr und fährlichen Beschwerden,
Neugierig auszuspähn und so ihr Herr zu werden...
Dazu gehöret mehr, als wenn beim Glase Wein,
der Dichter ruhig singt, besorgt nur um den Schein.«

Novalis

Von Novalis (1772–1801), der unter seinem bürgerlichen Namen Georg Friedrich Philipp Baron von Hardenberg ein Vorzugsschüler des berühmten Mineralogen Abraham Gottlob Werner an der Bergakademie Freiberg war und nach seinem Studium 1799 Salinenassessor wurde, zitieren wir aus seinem 1798 bis 1801 niedergeschriebenen, postum erschienenen Werk ›Heinrich von Ofterdingen‹:

»Der ist der Herr der Erde,
der ihre Tiefen misst,
und jedlicher Beschwerde
in ihrem Schoß vergisst.

Der ihrer Felsenglieder
geheimen Bau versteht
und unverdrossen nieder
zu ihrer Werkstatt geht ...

Er führt des Goldes Ströme
in seines Königs Haus
Und schmückt die Diademe
mit edlen Steinen aus...

Zwar reicht er treu dem König
den glückbegabten Arm
doch fragt er nach ihm wenig
und bleibt mit Freuden arm ...«

Der letzte Satz hat seither zu mancher Betrachtung angeregt – mit Freuden arm zu sein, war damals wie heute kein weit verbreiteter Wunsch. Carl Spitzweg hat indessen einen solchen Geologen gekannt (Abb. 1).

Körner

In Freiberg studierte auch Karl Theodor Körner (1791–1813), lange gefeiert wegen seiner patriotischen Dichtungen aus dem Freiheitskrieg gegen Napoleon, wo er sich dem Lützowschen Freikorps angeschlossen hatte und fiel. Seine Freiberger Zeit von 1808 bis 1810 regte ihn auch zu seinem Gedicht ›Bergmannsleben‹ an:

»In das ew'ge Dunkel nieder
Steigt der Knappe, der Gebieter
Einer unterird'schen Welt.
Er, der stillen Nacht Gefährte,
Atmet tief im Schoß der Erde,
Den kein Himmelslicht erhellt.
Neu erzeugt mit jedem Morgen
Geht die Sonne ihren Lauf.
Ungestört ertönt der Berge
Uralt Zauberwort: »Glück auf!...

Durch der Stollen weite Länge,
Durch das Labyrinth der Gänge
Wandern wir den sichern Weg.
Über nie erforschte Gründe,
Über dunkle Höllenschlünde
leitet schwankend uns der Steg;
Ohne Grauen, ohne Zaudern
Dringen wir in's düstre Reich,
Führen auf metallne Wände
Jauchzend den gewalt'gen Streich.«

Hier haben wir in vollem Pathos das Geologenmotto: ›Mente et Malleo‹ (›mit Verstand und Hammer‹) versinnbildlicht.

Leseprobe

Bildnachweis

Im Bildnachweis verwendete Abkürzungen

BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MARUM	Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen
NASA	National Aeronautics and Space Administration, USA

Titelseite

Hintergrund: NASA; Kl. Fotos von l. o. nach r.u.: RWE, Essen; C.-D. Reuther, Universität Hamburg; P. Gerling und BGR; F. Kraas, Geographisches Institut der Universität zu Köln; MARUM; Paläontologisches Museum Münster; Foto: Steinmann Institut (Paläontologie), Universität Bonn

Inhaltsverzeichnis S. 6 bis 9

Kl. Fotos: **S. 6:** C.-D. Reuther, Universität Hamburg; EADS Astrium; G. Kleinschmidt, Universität Frankfurt; H. G. Wilshire, USGS; **S. 7:** C. Devey, IFM-GEOMAR; Tainui Stephens; RWE, Essen; G. Borg, Halle; P. Gerling und BGR; **S. 8:** Paläontologisches Museum Münster; Foto: Steinmann Institut (Paläontologie), Universität Bonn; Museum für Naturkunde, Berlin; Foto: Steinmann Institut (Paläontologie), Universität Bonn; Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, Aktiengesellschaft in München, München; W. von Koenigswald, Steinmann Institut (Paläontologie), Universität Bonn; MARUM; F. Kraas, Geographisches Institut der Universität zu Köln; **S. 9:** The Yorck Project (2002): 10.000 Meisterwerke der Malerei, DVD-ROM, ISBN 3936122202. Distributed by DIRECTMEDIA Publishing GmbH; Gr. Foto: J. Stone, MARUM

Entstehung des Sonnensystems und der Erde (H. Palme) S. 12/13

Abb. 1: © C. J. Hamilton; **Abb. 2:** NASA

Erdbeben und Tsunami vor Japan 2011 (G. Wefer) S. 100/101

Abb. 1: A. Fischbeck, MARUM nach Sagiya, T. et al. (2011): Rebuilding Seismology. Nature 473, 146-148; **Abb. 2:** NOAA; **Abb. 3:** oben: U.S. Navy photo; von der US Navy mit der ID 110312-N-0000X-003 herausgegeben, lizenziert unter Gemeinfrei über Wikimedia Commons: http://commons.wikimedia.org; unten: U.S. Marine Corps photo by Lance Cpl. Garry Welch; von der US Navy mit der ID 110320-M-0145H-063 herausgegeben, lizenziert unter Gemeinfrei über Wikimedia Commons: http://commons.wikimedia.org; **Abb. 4:** oben: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); unten: International Ocean Discovery Program IODP / JAMSTEC

Submarine Hydrothermalquellen – Treffpunkte von Geologie und Biologie (W. Bach) S. 122/123

Abb. 1: Tauchroboter MARUM-Quest, MARUM; **Abb. 2:** W. Bach, MARUM

Kalte Quellen im Golf von Mexiko (G. Bohrmann & H. Sahling) S. 144/145

Abb. 1 und 2: I. R. McDonald, Department of Oceanography, Texas A & M University, College Station, Texas, USA; **Abb. 3:** G. Bohrmann, MARUM

Schwarzes Gold (D. E. Meyer) S. 186/187

Abb. 1: RAG Aktiengesellschaft, Herne; **Abb. 2:** J. Kück, MARUM, verändert und ergänzt nach Geologisches Landesamt NRW (Hrsg.): Lagerstätten in NRW, 3. Aufl., 1989, S. 2; **Abb. 3:** verändert nach R. Walter (2007): Geologie von Mitteleuropa. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, S. 511; http://www.schweizerbart.de

Tiefseebergbau – eine nachhaltige Option für die zukünftige Versorgung mit strategischen Wertmetallen? (A. Koschinsky) S. 266/267

Titelfoto und Abb. 2: BGR; **Abb. 1:** A. Koschinsky

Biologie, Lebensweise und Aussterben der Ammoniten (J. Lehmann) S. 290/291

Abb. 2: J. Lehmann; **Abb. 3:** MARUM; **Abb. 4 und 5:** M. Krogmann, Geowissenschaftliche Sammlung des Fachbereichs Geowissenschaften, Universität Bremen;

Klimageschichte aus der Tiefsee – Der Weg von Treibhaus zum Eiszeitklima (G. Wefer, U. Röhl & W. H. Berger) S. 328/329

Titelfoto: K. Achenbach, Wiesbaden; **Abb. 1:** nach M. Tomczak & J. S. Godfrey (2003): Regional Oceanography: an Introduction. 2nd improved ed., Daya Publishing House, Delhi

Was ist eigentlich Klima? (M. Claußen, R. Greve & U. Cubasch) S. 356/357

Abb. 6: Nach Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Figure SPM.5 und Figure SPM.6. [Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Meyer, L. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland; **Abb. 7:** Visualisierung: M. Böttinger, Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ), Simulation: MPI-M/DKRZ

Forschung für Nachhaltigkeit: Der Mensch als Akteur im Erdsystem (F. Kraas & T. Bork-Hüffer) S. 440/441

Alle Fotos: F. Kraas, Geographisches Institut der Universität zu Köln

»Was aber bleibet, stiften die Dichter« (I. & E. Seibold, Freiburg) S. 472/473

Abb. 1: The Yorck Project (2002): 10.000 Meisterwerke der Malerei. DVD-ROM, ISBN 3936122202. Distributed by DIRECTMEDIA Publishing GmbH

Leseprobe