

## 1.5 Herkunft des Wassers, Entstehung des Lebens im Meer und der Verbleib des früheren Kohlendioxids

JOSÉ L. LOZÁN & LUDWIG KARBE

*Origin of the water, development of marine life and the fate of the early CO<sub>2</sub>: This chapter is focused on the origin of water from hypothetical sources, the formation of the primordial oceans, the origin of life, and the fate of the primordial atmospheric carbon dioxide. In the very beginning our planet was mainly formed by gaseous compounds. In the context of cooling, the solid mass consolidated and a first atmosphere characterized by high water content, and high concentrations of gases similar to those of volcanic sources. The cooling of the Earth induced big precipitation events and the formation of the primordial oceans. Under pre-biotic conditions, organic compounds were formed from inorganic matter, enriched and arranged at boundary layers (e.g. crystal surfaces), providing basic constituents for the origin of life and the Biological Evolution, starting about 4.1-3.8 Ga ago. An important event was the development of the oxygen producing photosynthesis by cyanobacteria, about 2.4 Ga ago, resulting in an increase of oxygen in waters and atmosphere, as well as a decrease of carbon dioxide in the atmosphere. The Biological Evolution reached a maximum during the Cambrium 542-488 mill. years ago. A high number of new phyla originates from this early period of time. After the stratospheric ozone layer had been formed the colonization of land by biota started. It was about 100 mill. years after the beginning of the Cambrium. Depositions of organic matter formed the basis for the origin of fossil oil and gas. Most of the primordial atmospheric carbon dioxide has been deposited undissolved in the lithosphere*

Als die Erde entstand, war die Uratmosphäre (Primordialatmosphäre) vermutlich eine hauptsächlich aus Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und Helium (He) bestehende Gas-hülle. Diese Gase waren jedoch infolge ihrer geringen Molekulargewichte und der daraus resultierenden geringeren Wirkung der Erdanziehung nur recht schwach an die Erde gebunden und gingen im Laufe einiger Millionen Jahren fast vollständig verloren. Auch in der Gegenwart entweichen sie aus der Erdatmosphäre ins Weltall. Obwohl die Sonnenstrahlung 30–35% geringer war als heute, herrschte zu dieser Zeit auf der Erde infolge von intensiven Einschlägen aus dem Weltall, exothermen Prozessen beim Zerfall von Radionukliden und der hohen Konzentration von Treibhausgasen (CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O) eine sehr hohe Temperatur. Dadurch bedingt lagen nahezu alle Bestandteile in flüssigem oder gasförmigem Zustand vor. Nach Abnahme der Einschläge und des Zerfalls von Radionukliden kühlte sich die Erde langsam ab und eine Erdkruste bildete sich. Nur im Erdinneren ist es noch bis heute mit Temperaturen von bis über 5.000 °C sehr heiß geblieben.

Im Zusammenhang mit Prozessen bei der Differenzierung der Erde in Erdkruste, Mantel und Kern (Akkretion des Erdkörpers) und der Bildung von Vulkanen gab es intensive Ausgasungen; diese prägten die Zusammensetzung der damaligen Atmosphäre, die als »erste Atmosphäre« bezeichnet wird und vermutlich zu etwa 4/5 aus Wasserdampf (H<sub>2</sub>O) bestand. Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Stickstoff (N<sub>2</sub>) und Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S) machten zusammen knapp 1/5 aus. Wasserstoff (H<sub>2</sub>), Kohlenmonoxid (CO), Helium (He), Methan (CH<sub>4</sub>) und Ammoniak (NH<sub>3</sub>) waren nur in geringen Mengen vertreten. Dies ist eine ähnliche Zusammensetzung wie man sie heute bei Gasen vulkanischen

Ursprungs kennt. Der hohe Anteil des Wasserdampfes erklärt sich dadurch, dass die Atmosphäre zum damaligen Zeitpunkt noch zu warm war (> 100 °C) für die Bildung von Niederschlägen. Das vorliegende Kapitel befasst sich mit der Herkunft des Wassers, der Bildung des Urmeeres und der Entstehung des Lebens im Meer sowie mit dem Verbleib des ursprünglichen Kohlendioxids in der Atmosphäre.

### Herkunft des Wassers und Bildung des Urmeeres

Es gibt zwei mögliche Herkunftsquellen des Wassers: 1) Nach Abkühlung der Erde setzte die Kondensation des Wasserdampfes ein, die vermutlich durch einen über viele Jahrhunderte andauernden Regen zur Bildung der ersten Gewässer führte. 2) Viele Fakten sprechen dafür, dass auch Einschläge von wasserhaltigen (Eis-) Kometen, Meteoriten und Asteroiden einen wesentlichen Beitrag zur Bildung des Urmeeres geleistet haben könnten. Eine zweite mögliche Quelle war demnach das anhaltende Bombardement, das am Anfang auf die Urerde und auf die anderen Planeten niederging und dessen Auswirkungen noch heute auf den atmosphärefreien oder -armen Oberflächen des Mondes und des Mars zu sehen sind.

Untersuchungen der letzten Jahrzehnte zeigen, dass Wasservorkommen im Solarsystem nicht ungewöhnlich sind. Dies ist nicht überraschend, da Wasserstoff und Sauerstoff sehr häufige Elemente im Sonnensystem sind und das Molekül Wasser sehr stabil ist. Die Verteilung des Wassers im Solarsystem ist asymmetrisch; es gibt mehr Wasser an der Peripherie als in der Nähe der Sonne. Der Kuiper-Gürtel (jenseits der Bahn

des Neptun) sowie die kugelförmige Oort-Wolke, die das Sonnensystem bis in einer Entfernung von 2 Lichtjahren umgibt, bestehen vor allem aus Eisklumpen.

Auf unserem Nachbarplaneten Mars mit Temperaturen zwischen +30 und -85°C findet man an den Polkappen Eis und sublimierten Wasserdampf, sowie ausgedehnte Eiswolken (Zirruswolken). Strukturen auf der Oberfläche des Mars, die wie »trockene Flusstäler« aussehen, deuten auf frühere größere Vorkommen von Wasser hin, die möglicherweise aufgrund des geringen Luftdrucks an der Oberfläche von nur 6,36 hPa (Erdluftdruck 1013 hPa) verloren gegangen sind. Auf der Venus gibt es wegen der dort in Bodennähe herrschenden höheren Temperatur von über 400°C kein frei fließendes Wasser; in der Atmosphäre der Venus findet man Wasserdampf, allerdings in einer nur geringen Konzentration von 20 ppm. Eine mögliche Ursache ist die hier im Vergleich zur Erde doppelt so starke UV-Strahlung und die dadurch bewirkte photolytische Zersetzung des Wassers.

Der Jupitermond Europa ist von einem etwa 100 km tiefen Ozean bedeckt, der eine Eisdecke von möglicherweise mehreren km Mächtigkeit aufweist. Auch auf anderen Monden (z.B. Ganymed) wird Wasser vermutet.

Messungen an Asteroiden und Meteoriten sowie Kometen ergaben das Vorkommen von Wasser in festem und gasförmigem Zustand. So konnten zwei Wissenschaftler im Oktober 2009 – unabhängig voneinander – mit Hilfe des NASA-Infrarot-Teleskops Eis an der Oberfläche des Asteroiden »24 Themis« aus dem Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter nachweisen. Die gesamte Oberfläche dieses Himmelskörpers scheint mit Eis bedeckt zu sein. Die Studie führte auch zum Nachweis organischer Verbindungen (Nature 2010). Nach dem heutigen Wissensstand sind Kometen hauptsächlich aus Wasser bestehende »gefrorene Zeitreisende«, die in den eisigen Fernen des äußeren Sonnensystems nicht wesentlich modifiziert wurden. Sie sind Überbleibsel der Geburt unseres Sonnensystems vor 4,56 Mrd. Jahren (ANON 2008).

Derzeit werden Kometen wie Tempel 1, Wild 2, Hartley 2, Churyumov-Gerasimenko intensiv untersucht, um unser Wissen über die Entstehung unseres Sonnensystems zu erweitern. Hierzu wurden Sonden wie »Stardust« und »Deep Impact« von der NASA und »Rosetta« von der ESA ins Weltall entsandt. Im Juli 2005 prallte das von »Deep Impact« mitgeführte 370 kg schwere Geschoss auf Tempel 1 auf, um Materie aus dem Kometenkern frei zu setzen. Die dabei erzeugte Auswurfwolke wurde mit Hilfe von Teleskopen und Satelliten analysiert (CROVISIER et al. 2009). Neben Wasser wurden auch in dieser Studie organische

Verbindungen festgestellt. Ein Höhepunkt der Untersuchungen der Rosetta-Mission ist bei der Landung der mitgeführten Minisonde »Phila« auf Churyumov-Gerasimenko im Mai 2014 zu erwarten.

Für die Annahme, dass zumindest ein Teil des Wassers der Erde aus dem Weltall stammen könnte, spricht die Ähnlichkeit im Verhältnis von Deuterium zu Wasserstoff im Wasser der Erde ( $1,6 \times 10^{-4}$ ) und im Eis verschiedener Kometen, z.B. Harley ( $0,6-4,8 \times 10^{-4}$ ). Ähnliche Werte werden auch in Steinmeteoriten (kohlige Chondrite) festgestellt (RAUCHFUSS 2005).

Geochemiker vermuten, dass die Erde nur wenige Millionen Jahre nach ihrer Entstehung und unmittelbar nach dem »Giant Impact« und der Entstehung des Mondes soweit abgekühlt war, dass sich ein Urmeer bildete. Dies sollen Untersuchungen an den Isotopen des Edelgases Xenon ergeben haben. Auch das Auftreten von Kissenlava oder »pillow lava« (unter Wasser erstarrte Lava) könnte ein Indiz dafür sein ([http://www.geokommission.de/Dynamische\\_Erde.html](http://www.geokommission.de/Dynamische_Erde.html)).

Insgesamt sind also sowohl die genaue Herkunft des Wassers als auch der Zeitpunkt der Bildung des Urmeeres noch umstritten. Die Bedeutung des flüssigen Wassers als eine der wichtigsten Voraussetzungen für die Entstehung des Lebens steht außer Frage. Aufgrund seiner ungewöhnlichen bipolaren Eigenschaften und sein sehr gutes Lösungsvermögen ist Wasser für alle Prozesse des Lebens unentbehrlich (LOZÁN et al. 2004, GORDALLA et al. 2004).

## Entstehung des Lebens im Meer

Mit der Verfügbarkeit des Wassers und Bildung des Urmeeres war eine der wichtigsten Voraussetzungen für die Entstehung des Lebens auf der Erde erfüllt. In der Erdgeschichte unterscheidet man zwischen der chemischen und der biologischen Evolution – zwei sich zeitlich überlappenden Phasen (Abb. 1.5-1).

### Chemische Evolution

Der englische Physiologe John B. S. Haldane und auch der russische Biochemiker Aleksandr Oparin schrieben in den 1920er Jahren, dass durch chemische Reaktionen in der Uratmosphäre vermutlich organische Verbindungen entstanden seien. Diese Vermutung regte Stanley Miller 1953 zur Durchführung seines berühmten Experiments an, in dem er die vermuteten Gase der Uratmosphäre starken elektrischen Entladungen aussetzte, um zu prüfen, welche organischen Substanzen dabei entstehen. Als Ergebnis konnte er u.a. die Bildung von Aminosäuren – den Bausteinen der Proteine (Eiweiße) – nachweisen. Miller wiederholte in den 1970er und 1990er Jahren das Experiment mit verbes-

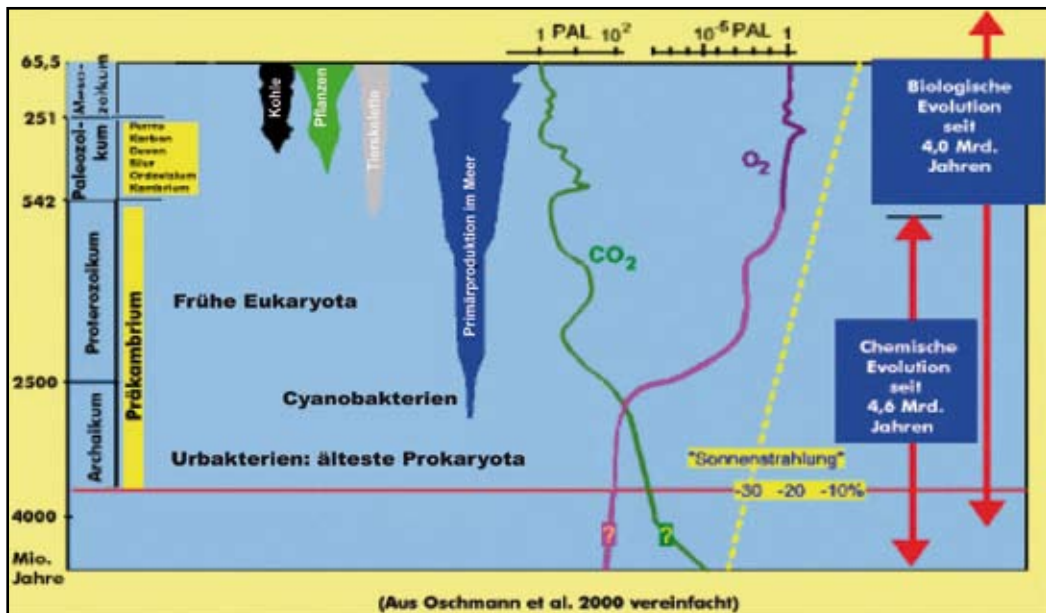
serten Geräten und leistungsfähigerer Analytik. Ausgehend von den Ergebnissen dieser und weiterer Experimente anderer Wissenschaftler weiß man heute, dass praktisch alle lebensrelevanten Verbindungen wie Aminosäuren, Lipide, Purine (Nucleotidbasen) und Zucker sowie sogar komplexere Verbindungen wie Porphyrine und Isoprene nicht nur unter den im Vergleich zu heute extrem abweichenden Bedingungen der Uratmosphäre, sondern auch in Hydrothermalquellen am Meeresboden entstanden sein können (siehe unten).

Wie bereits oben erwähnt, weiß man heute außerdem aufgrund der Erforschung von Meteoriten, Asteroiden und Kometen, dass organische Verbindungen auch im Weltall vermutlich durch Wirkung der Sonneneinstrahlung entstehen. Es ist daher sehr gut möglich, dass nicht nur Wasser, sondern auch organische Verbindungen mit Kometen und Meteoriten auf die Erde gelangt sein könnten.

Damit hätten wir eine plausible Erklärung zur Entstehung der ersten biologischen Bausteine. Wie könnte nun das Leben entstanden sein? Hierzu stellt sich die zentrale Frage: Wie und woraus gewannen die ersten Lebewesen Energie? Eng damit verknüpft ist auch die Frage nach geeigneten Orten, in denen das Leben entstanden sein könnte. Es gibt hierzu verschiedene Hypothesen. Der Biologe Ernst Haeckel postulierte bereits 1868, dass durch spontane Vereinigung geeigneter chemischer (organischer) Stoffe primitive Organismen entstanden sein könnten.

Nach unseren gegenwärtigen Kenntnissen scheinen Hydrothermalquellen oder Vulkane am Boden der Meere die Bedingungen zur Entstehung der ersten Lebensformen am besten zu erfüllen. Aufgrund der dort herrschenden hohen Temperaturen sind komplexe chemische Reaktionen in porösen Vulkangesteinen, die wie Durchflusssysteme wirken, möglich. Eisen, Schwefel und andere lebenswichtige Mineralien sowie energiereiche Verbindungen wie Methan kommen dort in ausreichender Menge vor, so dass Energiequellen für die ersten Lebensformen verfügbar waren. Es gab dort ferner einen Schutz vor der gefährlichen UV-Strahlung. Diese Hypothese wird inzwischen von vielen Wissenschaftlern unterstützt.

Wie eine internationale Gruppe von Wissenschaftlern 2007 zeigen konnte, kommt in den ausgedehnten Porensystemen der hydrothermalen Quellen ein Mechanismus zum Tragen, der eine Akkumulation von Biomolekülen erlaubt (BAASKE et al. 2007). Ferner können die dort auftretenden Temperaturunterschiede auch eine der wichtigsten biochemischen Reaktionen zur Replikation von Erbinformation antreiben. Es ist daher plausibel anzunehmen, dass neben der Bildung einer »Ursuppe« thermisch unterstützte Replikationsreaktionen an interaktiven Oberflächen zuerst wahrscheinlich katalytisch über aktive RNA-Moleküle möglich waren, wie POWNER et al. 2009 postuliert haben. Danach waren RNA-Moleküle die ersten sich selbst vervielfältigenden »Lebensformen« auf der Erde (SCINEXX 2010a). Für



**Abb. 1.5-1:** Evolution des Systems Erde bis zum Meteoriteneinschlag Ende der Kreidezeit. Geobiologische und paläobiologische Prozesse als Antrieb (aus OSCHMANN et al. 2000 vereinfacht). Vor 3,8 Mrd. Jahren strahlte die Sonne mit nur  $\frac{1}{4}$  ihrer heutigen Leuchtkraft (PAL = present atmospheric level).

diese Theorie spricht auch die heutige Existenz einer großen Vielfalt von Lebensformen in vielen Hydrothermalquellen, wobei Archaeobakterien chemische Verbindungen wie  $H_2S$  als Energiequelle (Chemoautotrophie) nutzen und die dortigen Nahrungsketten ohne Licht (ohne Photosynthese) möglich machen. Es gilt als unwahrscheinlich, dass die ersten Lebensformen in der »Ursuppe« von periodisch austrocknenden Tümpeln an der Erdoberfläche entstanden sein könnten, da es noch keine Ozonschicht gab, um das lebensfeindliche UV-Licht abzuschirmen. Auch tiefe Erdspalten kommen als ein Ort für die Entstehung des Lebens in Frage.

### **Biologische Evolution**

Die ersten Organismen auf der Erde waren vermutlich einfach gebaute bakterielle Lebensformen ohne Zellkern (Prokaryota, Prokaryonten). Sie entwickelten sich wahrscheinlich vor etwa 4,1–3,8 Mrd. Jahren. Heute unterscheidet man zwischen Archaeobakterien (Archaea oder Urbakterien) und Eubakterien. Die Archaea lebten (und leben auch heute) alle streng anaerob (sauerstofffrei). Schätzungsweise vor etwa 2,7 Mrd. Jahren, entstand dann eine weitere zu den Eubakterien zählende Gruppe – die Cyanobakterien. Diese begannen das reichlich vorhandene Kohlendioxid unter Nutzung von Sonnenenergie und Freisetzung von Sauerstoff zu organischen Verbindungen umzuwandeln (oxygene Photosynthese), wobei der freigesetzte Sauerstoff aus der Photolyse des Wassers stammt und  $CO_2$  der Grundstoff zur organischen Synthese ist. Das war ein entscheidender Schritt in der biologischen Evolution.

Nach und nach stellten sich als Folge der Photosynthese im Wasser aerobe Bedingungen ein und auch in der Atmosphäre nahm der Sauerstoffgehalt bei gleichzeitigem Rückgang der Kohlendioxidkonzentration zu. Der anaerobe Stoffwechsel hat gegenüber einem aeroben Stoffwechsel den großen Nachteil, dass der Energiegewinn erheblich geringer ist. Mit Zunahme des Sauerstoffgehalts setzten sich daher die aeroben Organismen durch. Die anaeroben Prokaryota, für die Sauerstoff toxisch wirkt, zogen sich in anaerob gebliebene Bereiche zurück. So kommt ihnen beispielsweise eine zentrale Bedeutung beim Abbau organischer Substanzen in sauerstofffreien Sedimenten zu. Sie leben auch in einer Art Partnerschaft (Symbiose) mit anderen Organismen, z.B. im Magen-Darmtrakt von Kühen. In den letzten Jahren werden häufig neue Formen von Symbiosen entdeckt. Man weiß heute, dass ohne Symbiosen die biologische Evolution nicht möglich gewesen wäre.

Erst viele Millionen Jahre nach dem Auftreten erster Prokaryota entwickelten sich die einfachen Formen der Eukaryota (Eukaryoten oder Eukaryonten), etwa vor 1800–1900 Mio. Jahren. Deren Erbanlagen sind

in einem umgrenzten Zellkern konzentriert. Nach der sogenannten Endosymbionten-Hypothese stammen in unseren heutigen Pflanzen die Plastiden (für die Photosynthese wichtige Chloroplasten) möglicherweise von primitiven Cyanobakterien ab und die Mitochondrien, welche in den rezenten Eucaryonten den Energiestoffwechsel betreiben, von primitiven Eukaryota.

Die Rekonstruktion der biologischen Evolution ist wegen der geringen Anzahl gut erhaltener Mikrofossilien in den Gesteinen aus dem Präkambrium (vor 4.600–542 Mio. Jahren) erschwert. Dies ist dadurch bedingt, dass die meisten Landmassen, die solche Spuren aus jener Zeit tragen könnten, zu feinstem Sand erodiert wurden. Ferner bildeten die einfachen Lebensformen dieser Zeit kaum Hartteile, die zu Fossilien führen konnten. Hinweise lassen sich aber aus geologischen Strukturen ableiten, die vermutlich unter dem Einfluss von Stoffwechselaktivitäten erster Organismen entstanden. So wurden Besonderheiten im Verhältnis der Einlagerung von Uran-Thorium- und Blei-Isotopen (deren Mobilität in unterschiedlichen Maße durch die Gegenwart von Sauerstoff beeinflusst wird) in vor etwa 3,8 Mrd. Jahren gebildetem Gestein als die ältesten Hinweise auf oxygene Photosynthese gedeutet (BUICK 2008).

Die ältesten bisher gefundenen Chemofossilien, also chemische Spuren von Lebewesen, sind erstmals in Südafrika und Grönland entdeckte mikroskopische »Fäden« bzw. »Kugeln« in Gesteinen, die als Überreste von 3,5 Mrd. Jahren alten Bakterien aus dem Präkambrium gelten könnten. Eindeutige biogene Fossilreste sind die in marinen Gewässern vor 2–3 Mrd. Jahren gebildeten Stromatolithen, die in Folge des Wachstums und Stoffwechsels von Cyanobakterien – wie heute noch in der Shark Bay, W-Australien – gebildet wurden. Es handelt sich meist um Sediment- oder Kalkpartikel, die durch einen Biofilm gebunden sind und in dem Bakterien eingebettet sind. Auf dem Pilbara-Gebiet in West-Australien wurden die ältesten bekannten Stromatolithen der Welt gefunden – sie sind rund 3,0 Mrd. Jahre alt. Die Stromatolithen-Funde in Bolivien mit einem Alter von 2,2 bis 2,4 Mrd. Jahre weisen deutliche Strukturen auf, die möglicherweise durch Organismen geschaffen wurden.

### **Die Kambrische »Lebensexplosion« im Meer**

Im Gegensatz zum langen Präkambrium (vor 4.600–542 Mio. Jahren) war das Kambrium (vor 542–488,3 Mio. Jahren) eine recht kurze Periode in der Erdgeschichte. Zahlreiche Fossilien belegen, dass in dieser Zeit viele mehrzellige Tiergruppen bereits lebten, deren Baupläne sich teilweise bis heute erhalten haben. Das Kambrium markiert somit für die Tierwelt einen sehr wesentlichen Einschnitt in der Erdgeschichte. Man spricht von einer

»explosiven« Lebensentwicklung im Meer. Viele Arten besitzen erstmals harte Skelette und Gehäuse, was als Schutz vor den ersten Räubern gewertet wird und als Hinweis, dass im Meerwasser bereits ein ansehnliches Angebot an Kalziumkarbonat vorhanden war. Das Auftreten von Gehäusen und Skeletten verbesserte auch das Fossilisationspotenzial. Das frühere Fehlen von Hartteilen ist eine mögliche Erklärung dafür, dass über die Vorfahren vieler Tierstämme nur wenig bekannt ist. Eine Ausnahme sind die bedeutende Fossilagerstätte der Ediacara Hills (Südaustralien, präkambrische Fauna) und des Burgess-Schiefers (Kanada, kambrische Fauna). Hier sind manchmal neben Skeletten auch Weichteile der Tierkörper erhalten geblieben. Hierzu gehört die Entdeckung von *Orthrozanclus reburrus*, das vor etwa 510 Mio. Jahren gelebt hat und als Vorfahre der Mollusken gilt, zu denen u.a. Schnecken, Muscheln und die Kopffüßer gehören.

Für die Wissenschaft ist es ein Rätsel, warum aus der Zeit zwischen der Ausbreitung der Cyanobakterien im Präkambrium und der explosiven Lebensentwicklung vor 540 Mio. Jahren nur wenige Fossilien gefunden werden. Es scheint, als hätte ein großes Ereignis mit einer gewaltigen Erosionskraft zum Verlust von geologischen Informationen geführt. Eine andere mögliche Erklärung ist die Hypothese, dass die biologische Evolution für lange Zeit durch eine globale »Vereisung« (»snowball earth«) bzw. durch mehrere Vereisungen gestoppt bzw. gebremst wurde. Das könnte vor ca. 600 Mio. Jahren im sogenannten Cryogenium oder auch schon früher infolge des Rückgangs des Treibhauseffekts durch die drastische Abnahme des Kohlendioxids in der Atmosphäre geschehen sein, als Massen von Cyanobakterien das Kohlendioxid in einer Art »Einbahnstraße« verbrauchten. Es gab damals noch keinen Mechanismus, um einen Kohlenstoffkreislauf zu gewährleisten. Diese »snowball earth«-Periode ging vermutlich zu Ende, als das Meer fast komplett von einer Eisschicht bedeckt war und daher das von Vulkanen emittierte CO<sub>2</sub> nicht aufnehmen konnte. So stieg die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft erneut an und mit ihr der Treibhauseffekt. Die heutigen Vulkane emittieren ca. 0,2 Gt C pro Jahr. Das entspricht etwa 2% der durch die Nutzung fossiler Energieträger und Landnutzungsänderungen freigesetzten 10 Gt C.

### **Die Bedeutung des Meeres zur Besiedlung des Landes**

Die Besiedlung des Festlandes begann einige Millionen Jahre nach Beginn der »Kambrischen Lebensexplosion« im Meer. Die Eroberung der Kontinente kann als außerordentlich erfolgreich bezeichnet werden, denn Lebensformen werden heute fast überall und sogar in

Gebieten mit extremem Klima wie Wüsten, Polarregionen und Höhlen sowie in ungefrorenen Salzwasserseen im antarktischen Eis und in heißen Schwefelquellen angetroffen.

Alle zurzeit bekannten 36 Tierstämme (SMITH & SMITH 2009) kommen im Meer vor, aber nur 12 davon auch an Land. Mehr als die Hälfte dieser Stämme leben also immer noch ausschließlich im Meer. Die hierzu gehörigen Tiere haben das Meer phylogenetisch niemals verlassen und sind daher primäre Meerestiere, bei denen der osmotische Druck ihrer interzellulären Flüssigkeit nur geringfügig größer ist als der des Meeres. Auch nach Jahrmillionen zeigen sie kaum evolutionsbiologische Veränderungen. Das ist auch Ausdruck für den Charakter des marinen Lebensraums, der verglichen mit dem Land relativ homogen ist und dadurch »hemmend« für die Evolution wirkt. Das Land bietet dagegen eine Vielfalt von Lebensräumen und Isolationsmöglichkeiten. Das ist der Grund, warum die Artenvielfalt auf dem Festland größer ist als im Meer. Von den zurzeit rund 1,75 Mio. weltweit bekannten Arten (Pflanzen und Tiere - ohne Bakterien) sind ca. 78% terrestrisch und nur ca. 15% marin (s. Kap. 1.4: Wiltshire et al.), obwohl das Meer über 70% der Erdoberfläche einnimmt. Die erfolgreichste Gruppe ist mit Abstand die der Insekten auf dem Land und im Süßwasser. Im Meer kommt diese Rolle den dort in einer Vielzahl von Arten vertretenen Krustentieren (Krebsartigen und Verwandten) zu. Etwa 5% aller Arten leben parasitisch oder symbiotisch in anderen Lebewesen.

Abgesehen von den marinen planktischen Algen kamen im Kambrium noch keine Pflanzen vor. Die ältesten Landpflanzenfossilien sind 470 Mio. Jahre alt. Die ersten Pflanzen waren wahrscheinlich zu zart, um gut erhaltene Fossilien zu ermöglichen, so dass die Landerobung durch Pflanzen möglicherweise bereits früher stattfand. Nach Wissenschaftlern um S. Heckman von der Pennsylvania State University wurde die Besiedlung des Festlandes wahrscheinlich durch Symbiosen zwischen Photosynthese treibenden Algen und Pilzen erleichtert und soll viel früher stattgefunden haben. Das haben genetische Untersuchungen an Algen, Pilzen und höheren Pflanzen ergeben (HECKMAN et al. 2001).

### **Das Meer und die Atmosphäre nach Entstehung des Lebens**

Nach der Kondensation des Wasserdampfes und Bildung des Urmeeres änderte sich vor etwa 3,5 Mrd. Jahren erneut die Atmosphäre. Diese »zweite« Atmosphäre bestand hauptsächlich aus Kohlendioxid und Stickstoff. Eine Ausnahme stellten Orte in der Nähe von Vulkanen dar, wo Methan und Ammoniak hö-

here Konzentrationen aufwiesen. Der Anteil des Treibhausgases Kohlendioxid in der Atmosphäre begann zu sinken, da der infolge der Abkühlung der Erde einsetzende Dauerregen das CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre wusch. Das Regenwasser nahm Kohlendioxid auf. Die daraus resultierende Kohlensäure (H<sub>2</sub>O + CO<sub>2</sub> = H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) löste dann einen Teil des auf der Erdoberfläche reichlich vorhandenen Kalziums auf und wurde als Kalziumkarbonat gebunden. Durch diese Prozesse entstanden im Laufe von Jahrmillionen mächtige Kalk-Ablagerungen (Abb.1.5-1 und Tab.1.5-1). Parallel zu diesem Prozess kühlte sich die Erde weiter ab.

Mit der Entwicklung der ersten primitiven kohlenstoff-autotrophen Organismen (Cyanobakterien) vor etwa 2,7 Mrd. Jahren, die über die Photosynthese einen Großteil des im Meerwasser gelösten Kohlendioxids unter Bildung von Sauerstoff aufnahmen, wurde dieser Abkühlungsprozess fortgesetzt, da durch die Aktivität der Organismen bedingt verstärkt Kohlendioxid aus der Atmosphäre ins Meer diffundierte. Der von den Organismen freigesetzte Sauerstoff reagierte zuerst mit Stoffen wie Methan, Mangan und Eisen und wurde somit chemisch gebunden. So wurden beispielsweise

Fe<sup>2+</sup>-Verbindungen, die im Wasser löslich sind, zu Fe<sup>3+</sup> Verbindungen oxidiert, die sich wegen ihrer geringen Löslichkeit am Meeresboden als riesige Eisenoxidablagerungen anreicherten.

Nachdem vor etwa 2,3–2,4 Mrd. Jahren fast das gesamte Eisen im Meer als Oxid ausgefällt war, diffundierte der Sauerstoff zunehmend in die Atmosphäre. Vor Einsetzen der biogenen Sauerstofferzeugung gab es in der Atmosphäre Sauerstoff nur in geringer Konzentration, die aus der H<sub>2</sub>O-Dissoziation (H<sub>2</sub>O = H<sub>2</sub> + O) stammte. Nun stieg der Anteil von Sauerstoff immer mehr an, bis er, wie Gaseinschlüsse in uralten Gesteinsschichten belegen, vor rund 350 Mio. Jahren im Wesentlichen das heutige Niveau von etwa 21% (und 78% Stickstoff) erreichte. Gleichzeitig nahm die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft bis auf einen kleinen Rest ab (s.o.).

Wie hoch der pH-Wert des Meerwassers damals war, ist umstritten. Bei Annahme eines hohen pH-Wertes ließe sich die Entstehung des Lebens leichter erklären. Die meisten Wissenschaftler vermuten jedoch, dass das Wasser des Urmeeres eher neutral mit einem pH-Wert zwischen 6–8 war. Wie Untersuchungen an Hornsteinen ergeben, hatte das Urmeer eine Tempera-

**Tab. 1.5-1:** Kohlenstoffvorrat auf der Erde in Gt C (aus BUCHAL & SCHÖNWIESE 2010, vereinfacht).

Lithosphäre anorganisch in Gesteinen (z.B. CaCO <sub>3</sub> )	80.000.000
Lithosphäre organisch als Ölschiefer oder Bitumen	20.000.000
Hydrosphäre: gelöst im Wasser	40.000
Fossiler Kohlenstoffvorrat: Gashydrate	10.000
Fossiler Kohlenstoffvorrat: Erdöl, Erdgas und Kohle	5.000
Biosphäre: Tote Biomasse (Torf und Humus)	1.500
Atmosphäre bei 387 ppm CO <sub>2</sub>	846
Biosphäre: Lebende Biomasse	600
<b>Summe</b>	<b>100.057.946</b>

(1 Gt C = ca. 3,6667 Gt CO<sub>2</sub>)



**Abb. 1.5-2:** Kreidefelsen von Rügen. Gigantische Menge von Kohlendioxid sind global gebunden in Karbonaten. Die etwa 11 km lange und 116 m hohe Kreideküste von Rügen besteht überwiegend aus Calciumcarbonat (CaCO<sub>3</sub>), das sich vor mehr als 70 Mio. Jahren am Grund der heutigen Ostsee gebildet hat. Ein feines, mikrokristallines Sedimentgestein, das durch marine Ablagerung von gefälltem Kalzit sowie den Schalen fossiler Kleinlebewesen wie Kalkalgen (Coccolithen) und Foraminiferen entstanden ist.

tur von rund 40 °C ([http://www.geokommission.de/Dynamische\\_Erde.html](http://www.geokommission.de/Dynamische_Erde.html)).

Die »dritte Atmosphäre« mit einer Anreicherung der Luft mit Sauerstoff stellte eine drastische Umweltveränderung dar. Der Sauerstoff agierte aggressiv, zerstörte rasch zahlreiche organische Verbindungen und wirkte oxidierend wie elementares Chlor ( $\text{Cl}_2$ ). Metalle wie z.B. Eisen werden durch Korrosion zerstört.

Die energiereiche UV-Einstrahlung der Sonne führte zur Spaltung eines Teils des in die Atmosphäre und Stratosphäre gelangten Sauerstoffs ( $\text{O}_2$ ) in eine hochreaktive atomare Form ( $\text{O}^\cdot$ ). Durch die Reaktion  $\text{O}^\cdot + \text{O}_2$  entstand das dreiatomige Ozon ( $\text{O}_3$ ). In 15–30 km Höhe bildete sich so die stratosphärische Ozonschicht aus, welche die Entwicklung des Lebens auch außerhalb des Meeres ermöglichte, da diese Schicht einen Großteil des lebensgefährlichen kurzwelligen Anteil der UV-Strahlung herausfiltert. Aufgrund der vorhandenen UV-Strahlung nahm die Ozonkonzentration wahrscheinlich schneller zu als die Anreicherung der Atmosphäre mit  $\text{O}_2$ . Man vermutet aber, dass die heutige Ozonschicht erst vor etwa 400 Mio. Jahren vollständig ausgebildet war.

### **Verbleib des Kohlendioxids der früheren Atmosphäre**

In *Tab. 1.5-1* sind die Kohlenstoffvorräte der Erde nach Kompartimenten gegliedert zusammengefasst. Der Kohlenstoffgehalt in der Atmosphäre kann auf der Basis zahlreicher Messwerte rechnerisch bestimmt werden und ist entsprechend am genauesten bekannt.

### **Lithosphäre**

Rund 99% des gesamten Kohlenstoffvorrats der Erde von rund 100 Mio. Gt befindet sich in den oberen Schichten der Lithosphäre. Diese Zahl ist verständlich, wenn man bedenkt, dass eine riesige Menge an Kohlendioxid durch mikroskopisch kleine »Algen« umgesetzt werden musste, um die hohe Sauerstoffkonzentration in der Atmosphäre zu erreichen. Außerdem ist zu bedenken, dass eine durch Niederschläge ausgelöste und durch Verwitterung über Jahrtausende gigantische Kohlenstoffmenge in ungelöster Form in der Lithosphäre gebunden und vor allem auf den Meeresboden deponiert wurde (*Abb. 1.5-2*). In tieferen Schichten der Erde sollen sich schätzungsweise noch rund 2,3 Mio. Gt C befinden.

### **Fossiler Kohlenstoffvorrat: Erdöl, Erdgas und Kohle**

Die Vorräte an Erdöl, Erdgas und Kohle werden global auf 5.000 Gt C geschätzt. Mikroskopisch kleine Lebewesen entwickelten sich massenhaft im Kambrium (vor 542–488 Mio. Jahren). Nach dem Absterben sanken sie

in großen Mengen ab und bildeten auf dem Meeresboden Faulschlämme. Überdeckung mit Sedimenten verhinderte die Zufuhr von Sauerstoff. In großer Tiefe entstanden in Ablagerungen durch anaerobe Zersetzung hohe Temperaturen. Ab 50 °C bildete sich dabei Erdöl und bei noch höheren Temperaturen auch Erdgas mit Methan als Hauptkomponente. Vor ca. 400 Mio. Jahren lagen alle heutigen bekannten Erdöl- und Erdgas-Lagerstätten im Meer. Neben der Annahme eines organischen Ursprungs des Erdöls gibt es eine andere Entstehungshypothese, die vor allem durch russische Wissenschaftler vertreten wird. Dieser entsprechend soll ein Teil des in größeren Tiefen lagernden Erdöls einen anorganischen Ursprung haben (SCINEXX 2010b).

Kohlevorkommen entstammen überwiegend frühzeitlichen höheren Pflanzen. Kohle entstand demnach auf dem Festland auf der Basis von Massensterben von Urfarnen, Calamiten sowie Siegel- und Bärlappbäumen während des Karbons (vor 345–290 Mio. Jahren) und teilweise auch während des Perms (vor 290–250 Mio. Jahren). Es gab damals ein warmes und feuchtes Klima mit einem ausgeprägten Pflanzenswachstum und einer Überproduktion von Biomasse, die sich in Sumpfböden anhäufte und z.B. infolge von Überschwemmungen durch Sedimente abgedeckt wurde. Dadurch zersetzte sich die Biomasse anaerob. Die Inkohlung begann dann erst später unter der Einwirkung von viel Wärme und hohem Druck. Dabei bildete sich zuerst Braunkohle und dann bei weiter erhöhtem Druck und einem noch geringeren Wasseranteil Steinkohle. Heutige Braunkohlelagerstätten entstanden erst im Tertiär (vor 65–2,5 Mio. Jahren).

### **Fossiler Kohlenstoffvorrat: Methan und Methanhydrate**

Bei tiefen Temperaturen und unter hohem Druck kommt Methanhydrat in fester Form im Meer weltweit in vielen Gebieten meist zwischen 500 und 1.000 m Tiefe vor. Auf dem Festland werden Methanhydrate in Dauerfrost-Regionen (Permafrostgebieten) wie z.B. Grönland (s. Kap. 3.12: Treude und Kap. 4.5: Wallmann et al.) in großen Mengen gefunden. Der Vorrat an Methanhydraten wird global auf 10.000 Gt C geschätzt – doppelt soviel wie die Vorräte von Öl, Gas und Kohle zusammen. Nach DICKENS (2003) bildeten sich große Mengen von Methanhydraten im Paläozän vor rund 55 Mio. Jahren, als die Temperaturen vier bis fünf Grad höher waren als heute und die Biomassebildung stark anstieg. Im Meer entstanden große Mengen von Methan durch bakterielle Aktivitäten in Tiefen, in denen das Wasser bei niedrigen Temperaturen und hohem hydrostatischen Druck mit vergleichsweise hohen  $\text{CO}_2$  Konzentrationen gesättigt war.



### **Hydrosphäre und Atmosphäre**

Obwohl die Meere über 70% der Erdoberfläche einnehmen und einen riesigen Lebensraum mit einer mittleren Tiefe von 3.800 m und einen 1,35 Mrd. km<sup>3</sup> mächtigen Wasserkörper darstellen, beherbergt dieser nur 0,2% der globalen lebenden Biomasse von 600 Gt C. Der Grund dafür ist, dass es sich bei weiten Bereichen der Meere um Wasserwüsten handelt, die durch Nährstoffmangel und Fehlen von Licht gekennzeichnet sind. Das führt dazu, dass hier nur verhältnismäßig geringe Mengen von Sedimenten organischer Herkunft mit Schichtdicken von nur wenigen Millimetern in 1.000 Jahren entstehen. Trotz einer größeren lebenden Biomasse findet auf den Kontinenten nur 53% und in den Meeren 47% der Primärproduktion statt und die Umwälzzeit (Umsatz) des Kohlenstoffes beträgt auf den Kontinenten 12 Jahre und in den Meeren 23 Tage. Der rasche Umsatz im Meer ist darauf zurückzuführen, dass die Primärproduktion dort überwiegend von Phytoplankton getragen wird. (1) Im Gegensatz zu den Landpflanzen besteht Phytoplankton aus Einzellern, welche zu fast 100% aus metabolisch aktivem Material bestehen, während die Landpflanzen einen hohen Anteil von metabolisch inaktivem Stützgewebe enthalten. (2) Die Stoffwechselaktivität pro Biomasse ist umgekehrt proportional der Körpergröße (TILZER 2009).

Die Meere haben auch eine hervorragende Bedeutung für das globale Klima aufgrund der großen Wärmekapazität von Wasser, dem Transport von Wärme mit den Meeresströmungen und der Rolle des Ozeans beim Gasaustausch. In der Atmosphäre sind zurzeit bei einer Kohlendioxidkonzentration von 390 ppm 853 Gt C enthalten; im Meer dagegen 40.000 Gt C, d.h. etwa 50mal mehr. Von den derzeitigen CO<sub>2</sub> Emissionen von ungefähr 10 Gt C/Jahr wird etwas weniger als ein Viertel (2,2 Gt C) durch das Meer aufgenommen. Seit Beginn der Industrialisierung schätzt man, dass das Meer etwa 120 Gt Kohlenstoff aufgenommen hat, was fast der Hälfte der gesamten bisherigen Emissionen entspricht (s. KAP. 3.8: SCHNEIDER).

### **Biologischer Kohlenstoffvorrat: Urwälder**

Die Urwälder breiteten sich im Mesozoikum (vor 251–65,5 Mio. Jahren) bis in hohe Breiten aus (POTT 2005). Sie spielten bei der Bildung der Braunkohlelagerstätten eine wichtige Rolle (s.o.). Im Laufe der Zeit sind die Urwälder jedenfalls in Mitteleuropa als Folge menschlicher Aktivitäten bis auf wenige Relikte verschwunden. Große Bestände ursprünglichen Waldes bilden die Regenwälder der feuchten Tropen in Asien, Afrika und Lateinamerika. Trotz intensiver Schutzbemühungen gehen jedoch jährlich beträchtliche Teile dieser Wälder verloren. Umfassende Aufforstungsprogramme werden

z.Z. in reichen Ländern und in China durchgeführt. Der derzeitige Kohlenstoffvorrat als lebende Biomasse wird insgesamt auf 600 Gt C geschätzt.

### **Zusammenfassung und Ausblick**

Bei Entstehung der Erde vor 4,56 Mrd. Jahren soll eine Uratmosphäre aus Helium und Wasserstoff bestanden haben; diese Gase gingen aufgrund ihrer Leichtigkeit ins Weltall verloren. Nach Bildung der Erdkruste war die Zusammensetzung der Atmosphäre den heutigen Abgasen der Vulkane ähnlich. Die Wasserdampfkonzentration war aufgrund der hohen Temperatur recht hoch. Erst als die Einschläge und der Zerfall der Radionuklide abnahmen, kühlte sich die Erde ab und es begann zu regnen. Die ersten Gewässer entstanden und das Urmeer begann sich zu bilden. Aufgrund der großen Wassermenge auf der Erde (allein im Meer 1,35 Mrd. km<sup>3</sup>) liegt es nahe zu vermuten, dass zumindest ein Teil des Wassers durch Einschläge von Kometen, Meteoriten und Asteroiden auf die Erde gelangt ist. Auf vielen Meteoriten und Asteroiden wurde Wasser in großer Menge entdeckt. Kometen bestehen sogar zu 50–60% aus Wasser. Auch die ähnliche Isotopenzusammensetzung des entdeckten Wassers mit der der Erde spricht dafür, dass Wasser von Einschlägen stammen könnte. Im Solarsystem ist nur auf dem Planet Erde flüssiges Wasser in großer Menge vorhanden. Der Grund dafür ist die Koinzidenz von mehreren Zufällen. Die ausreichende Anziehungskraft der Erde und ihr schützendes magnetisches Feld verhindern, dass das Wasser wieder verloren geht. Auch der Abstand zur Sonne ist gerade richtig, dass es weder verdampft noch zu Eis wird. Hinzu kommt die Bedeutung der Ozonschicht, die die photolytische Zersetzung des Wassers durch die UV-Strahlung verhindert. Dadurch ging das Wasser im Laufe der Zeit nicht verloren, wie möglicherweise auf dem Mars. Der Mars besitzt eine dünne Atmosphäre mit einem Druck von nur 6,36 hPa und ein sehr schwaches magnetisches Feld. Durch Eindringen des Sonnenwinds tief in seine Atmosphäre können leichter Luftbestandteile verloren gehen. Auf der Erde ist das Wasser ferner durch die starke Temperaturinversion an der Tropopause geschützt. Dieser »Cold trap«-Effekt verhindert, dass Wasser in höherer Konzentration in die Stratosphäre gelangt.

Viele Fakten sprechen dafür, dass die Entstehung des Lebens geschützt vor der UV-Strahlung des Sonnenlichtes in der Tiefe der Meere (Hydrothermalquellen) geschah. Die ersten autotrophen Organismen waren chemolithotrophe Mikroorganismen. Daraus entwickelten sich die photoautotrophen Cyanobakterien vor 2.7 Mrd. Jahren. Die Photosynthese mit Sauerstoffbildung war eine folgenreiche Revolution in der biologischen Evolution. Sauerstoff wurde freigesetzt als Abfall der Wasser-



spaltung. Durch die Photosynthese war organische und energiereiche Substanz als Basis für die Entwicklung der Eukaryota (vor 1.4–1.6 Mrd. Jahren) und später der mehrzelligen Tiere (vor ca. 0.6 Mrd. Jahren) vorhanden. Durch Diffusion des Sauerstoffs in die Atmosphäre bildete sich die stratosphärische Ozonschicht als Schutz gegen die UV-Strahlung. Dadurch war der Weg frei für die Eroberung der Kontinente durch die Meeresorganismen vor etwa 500 Mio. Jahren. Von den 36 bekannten Tierstämmen haben nur 12 das Meer verlassen und sich an der Besiedlung der Kontinente beteiligt

Eine der wichtigsten Eigenschaften des Wassers ist sein ausgeprägtes Lösevermögen. Ein beträchtlicher Teil des ursprünglichen Kohlendioxids reagierte mit dem Regenwasser zu Kohlensäure, die dann das in den Boden reichlich vorhandene Kalzium auflöste. Dabei bildeten sich Kalziumkarbonate, die durch die Flüsse ins Meer gelangten. Durch diese und anderen Prozesse entstanden im Laufe von Jahrmillionen gewaltige Kalkablagerungen. Man schätzt, dass etwa 99% des ursprünglichen Kohlendioxids der früheren Atmosphäre in ungelöster Form in der Lithosphäre eingelagert ist.

Ein weiterer Teil des ursprünglichen Kohlendioxids löste sich im Meerwasser. Mikroskopische Algen entwickelten sich massenhaft und nach Absterben sanken sie in großen Mengen ab und bildeten auf dem Meeresboden unter anaeroben Bedingungen in einem langen Prozess vor ca. 400 Mio. Jahren Erdöl und Erdgas. Alle heutigen bekannten Erdöl- und Erdgas-Lagerstätten lagen in Meeresgebieten. Kohle entstand auf dem Festland durch Massensterben von Urfarnen, Calamiten sowie Siegel- und Bärlappbäumen vor rund 300 Mio. Jahren. Erst viel später entstand bei tiefen Temperaturen und unter hohem Druck Methanhydrat in fester Form im Meer.

Eines der wichtigsten Probleme der Menschheit ist zurzeit der vornehmlich durch anthropogene Freisetzung von Treibhausgasen angeregte Klimawandel. Seit Beginn der Industrialisierung werden die Lagerstätten von Erdöl, Erdgas und Kohle als fossile Energiequellen intensiv genutzt. Die Menschheit ist dabei, in nur 200-300 Jahren die Kohlenstoffvorräte zu verbrauchen, die im Laufe von vielen Millionen von Jahren entstanden sind. Die Verweilzeit der Treibhausgase in der Atmosphäre ist recht lange. Beispielsweise bleibt dort das anthropogene Kohlendioxid im Durchschnitt über 100 Jahre. Entsprechend wird das Klima nur sehr träge auf Reduzierungen der anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emission reagieren. Die erforderliche drastische Reduzierung der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen muss daher dringend erfolgen, um das festgelegte Ziel einer Erwärmung von nicht über 2°C noch zu erreichen.

**Danksagung:** wir danken insbesondere Prof. Dr. Max Tilzer für die ergänzenden Fakten.

## Literatur

- ANON (2008): Mission Rosetta Reise zu einem Kometen. 18 Seiten. Published by Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, German Aerospace Center und Institut für Planetenforschung. 18 S.
- BAASKE PH., F. M. WEINERT, S. DUHR, K. H. LEMKE, M. J. RUSSELL & D. BRAUN (2007): Extreme accumulation of nucleotides in simulated hydrothermal pore systems. PNAS. 104(22): 9346–9351.
- BUCHAL CHRISTOPH & CHISTIAN-D. SCHÖNWIESE (2010): KLIMA – Die Erde und ihre Atmosphäre im Wandel der Zeiten. Wilhelm und Else-Heraeus-Stiftung – Helmholtz-Gemeinschaften Deutscher Forschungszentren. 206 S.
- BUICK R. (2008): When did oxygenic photosynthesis evolve? Phil. Trans. R. Soc. B 2008 363, 2731-2743
- CROVISIER J., N. BIVER, D. BOCKELÉE-MORVAN, J. BOISSIER, P. COLOM, A. LECACHEUX, R. MORENO, G. PAUBERT, D. C. LIS, M. SUMNER, U. FRISK, Å. HJALMARSON, M. OLBERG, A. WINNBERG, H. FLOREN, A. SANDQVIST & S. KWOK (2009): The Chemical Composition of 9P/Tempel 1 from Radio Observations. In: Deep Impact as a World Observatory Event: Synergies in Space, Time, and Wavelength. Springer Berlin / Heidelberg – ISBN 978-3-540-76958-3. 243-248.
- DICKENS G. R. (2003): Rethinking the carbon cycle with a large dynamic and microbially mediated gas hydrate capacitor. Earth and Planetary Science Letters, 213: 169-183.
- FAO (2007): FAO: Wald wächst, wo Geld ist. 28.03.2007 - Quelle/Text: Rat für Nachhaltige Entwicklung. <http://www.umweltschutz-news.de>
- GORDALLA B. M. MÜLLER & F. FRIMMEL (2004): Die physikalisch-chemischen Eigenschaften des Wassers und ihre Bedeutung für das Leben. In: WARNSIGNAL KLIMA: Genug Wasser für Alle? Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg. 25-31.
- HECKMAN S. D., D. M. GEISER, B. R. EIDELL, R. L. STAUFFER, N. L. KARDOS & S. B. HEDGES (2001): Molecular Evidence for the Early Colonization of Land by Fungi and Plants. Science 10 August 2001: Vol. 293, no. 5532, 1129 – 1133. DOI: 10.1126/science.1061457.
- LOZÁN J. L., S. MEYER & L. KARBE (2004): Wasser als Grundlage des Lebens. In: WARNSIGNAL KLIMA: Genug Wasser für Alle? Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg. 19-24.
- OSCHMANN W., DULLO C., MOSBRUGGER V. & STEININGER F. (2000) (Hrsg.): Evolution des Systems Erde. Geobiologische und paläobiologische Prozesse als Antrieb. - Kleine Senckenberg-Reihe, 35: 1-57; Frankfurt.
- POTT R. (2005): Allgemeine Geobotanik: Biogeosysteme und Biodiversität. Springer Berlin / Heidelberg – ISBN 3-540-23058-0. 652 pp.
- POWNER M., B. GERLAND & J. SUTHERLAND (2009): Synthesis of activated pyrimidine ribonucleotides in prebiotically plausible conditions. Nature 459, p. 239-242 (14. Mai 2009).
- RAUCHFUSS H. (2005): Chemische Evolution und der Ursprung des Lebens. Springer – ISBN 103504 23965-0. 421 S.
- SCINEXX (2010a): Evolution: RNA-Welt nimmt Formen an Erstmals Selbstfabrikation eines Ribozyms nachgewiesen. Scinexx – Das Wissensmagazin 16.5.2010.
- SCINEXX (2010b): Erdöl und -gas aus dem Erdmantel? Experiment belegt Entstehung von Ethan, Propan und Butan auch ohne organische Relikte. Scinexx – Das Wissensmagazin 29.5.2010.
- SMITH TH. M. & R. L. SMITH (2009): Ökologie. Pearson Education. 982 pp.
- TILZER M. M. (2009): The Fifth Element: On the Emergence and Proliferation of Life on Earth. Nova Acta Leopoldina NF 98, Nr. 360: 79-108.

*Dr. José Luis Lozán*

*Universität Hamburg -Wissenschaftliche Auswertungen  
Basselweg 5 - 22527 Hamburg - [jlozan@t-online.de](mailto:jlozan@t-online.de)*

*Dr. Ludwig Karbe*

*Universität Hamburg*

*Olbersweg 24 - 22767 Hamburg - [karbe@uni-hamburg.de](mailto:karbe@uni-hamburg.de)*