©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

Ber. d. Reinh.-Tüxen -Ges. 25, 7-36, Hannover 2013

Biodiversitätskrise und das „Sechste Massensterben“ auf der Erde?

– Richard Pott, Hannover –

Abstract: Biodiversity-crisis and the “Sixth Extinction” on Earth?

Biodiversity is a term for the genetic diversity, the species diversity and the ecosystem diversity on Earth. It constitutes the uniqueness of our planet and forms the base for the entirety of life, including humankind. Biodiversity does not only encompass the diversity of ecosystems and habitats, it covers the water and solid land of the whole planet and we are a part of that infinite diversity. We share our planet Earth with countless other creatures – today, about 1.75 million species of animals, plants and microorganisms are registered and we know that a lot more species exist: it might be between 10 and 100 million species. However, a portion will go extinct before even being discovered.

We use uncountable services of nature in our daily lives: air, water, soil, food and energy for our existence – absolutely for free. By the destruction and overexploitation of the natural habitats by human activity, the number of today’s known species and ecosystems on Earth decreased by about 40 percent between 1970 and 2000: a decline of nearly a half in just 30 years! This led to the creation of the term “The Sixth Extinction” to describe the crisis on our planet. In comparison, the dinosaurs went extinct in slow motion during the Fifth Extinction some 65.5 million years ago. We expect between 70 and 100 animal and plant species to disappear from planet Earth every single day, and we do not even have an idea what value for biotechnology, the nourishment of humanity and medicine is irretrievably lost. It is a matter of fact that our unprecedented overexploitation of nature endangers our own base of existence in the middle to long term.

A solution for the future is to conserve sufficient amounts of pristine nature and the web of life in all climate-related major biomes and the oceans of the biosphere in order to ensure the required services of the global ecosystems for the future well-being of humanity.

Keywords: “Big Five”, global mass extinction, Anthropocene

1. Einleitung

Wir wissen aus der Darwinschen Evolutionslehre, dass die Entwicklung des Lebens auf der Erde mit Jahrmilliarden und Jahrmillionen insgesamt sehr lange Zeiträume benötigte und erst seit der frühen Neuzeit kennen wir die solide Basis für Zeit und Raum. Seitdem die Astronomen Nikolaus KOPERNIKUS (1473-1543), Tycho BRAHE (1546-1601) und Johannes KEPLER (1571-1630) die Erde aus dem Zentrum des Alls auf eine Bahn unter mehreren Planetenbahnen um die Sonne und sogar diese in eine eher unbedeutende Position in der Milchstraße verschoben hatten, begann die wissenschaftliche Erdgeschichte. Und es brauchte nochmals fast dreihundert Jahre, bis Alfred WEGENER (1880-1930) im Jahre 1912 auf die paläontologischen Zusammenhänge zwischen Südamerika und Afrika aufmerksam wurde und seine Theorie der Kontinentalverschiebung formulierte. Seitdem wissen wir von der Dynamik unseres Planeten, von der Wirkung Mittelozeanischer Rücken und deren Konvektionsströme

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

als den wahrscheinlichsten Motor der Plattentektonik. Wenig bekannt sind Alfred Wegeners Arbeiten auf dem Gebiet der Impaktforschung. Ein Meteorit, der am 3. April 1916 bei Schwalmstadt in Hessen einschlug, veranlasste ihn, sich mit Einschlagkratern zu beschäftigen, und er schrieb eine Abhandlung über die Entstehung der Mondkrater (WEGENER 1915, 1921). Schon damals galten die Fossilien als zentraler Forschungsgegenstand der Paläontologie, der Wissenschaft vom Leben vergangener Zeiten.

Inzwischen wissen wir auch, dass die organismische Vielfalt die Voraussetzung und gleichermaßen das Resultat der Evolution, der Basis des Lebens, darstellt. Die genetische Vielfalt von Arten, deren Populationen und deren komplexe Artengemeinschaften sind grundlegend für das Überleben aller Arten und das Funktionieren von Ökosystemen in einer sich ständig ändernden Umgebung. Die Funktionsfähigkeit von Ökosystemen hängt dazu von der Gemeinschaft von Organismen ab, aus denen sie aufgebaut sind (HAMBLIN & CHRISTIANSEN 1998; CONDIE 2011).

Unter **Biodiversität** wird im Allgemeinen die Vielfalt aller Lebensformen, das heißt der Artenreichtum beziehungsweise die taxonomische und genetische Vielfalt der Natur auf der Erde verstanden. Einbezogen sind auch die Lebensgemeinschaften, die Ökosysteme, die Landschaften unseres Globus, die sich in verschiedene aquatische, marine und terrestrische Lebensräume differenzieren lassen von den arktischen Tundren, den borealen Nadelwäldern, den temperaten Laubwäldern, den mediterranoiden immergrünen Hartlaubregionen, den Wüsten und Halbwüsten, bis hin zu den subtropischen Trockenwäldern und Savannen, den tropischen Regenwäldern, den Mangroven und den Korallenriffen der tropischen Meere. Dazu kommen die marinen Ökosysteme aller Ozeane von der Arktis bis in die Antarktis sowie die limnischen und fluviatilen Süßwassersysteme und die Moore (vgl. u.a. BARTHLOTT et al. 2000; BOX 2000; BRECKLE 2000; DIERSCHKE 2000; HAEUPLER 2000; KLÖTZLI 2000; LÜPNITZ 2000; MUELLER-DOMBOIS 2000; WILDPRET & MARTIN OSORIO 2000 sowie POTT 2005). Diese Vegetationslandschaften und Ökosysteme entsprechen der zonalen Klimadifferenzierung der Erde konkret als Vegetationszonen von den Polen bis zum Äquator auf beiden Erdhemisphären nach den geographischen Breiten differenziert (GRISEBACH 1872; BRYANT 1997; BARTHLOTT 1998; BURNETT et al. 1998; LINSENMAIR 2000; BEIERKUHNLEIN 2001).

Dass Arten sich neu bilden und vergehen ist zumindest langfristig betrachtet nichts Außergewöhnliches, sondern ein fester Bestandteil der natürlichen Evolution auf der Erde. Seit Beginn des Lebens vor 3.5 Milliarden Jahren dürften etwa 99 Prozent aller Tier- und Pflanzenarten, die je unseren Planeten besiedelt haben, wieder verschwunden sein. Doch der heute lebende Bestand an natürlichen Lebensräumen in den verschiedenen Klimazonen der Erde ist derzeit stark gefährdet. Wahrscheinlich stehen wir vor dem „Sechsten Massensterben“ auf der Erde (BARNOSKY et al. 2011). Die gegenwärtigen und zukünftigen weltweiten Verluste von Arten infolge von Landumwandlungen mit Habitatverlusten und der direkten Zerstörung gewachsener Lebensräume sind mit denen der fünf bekannten großen Massenaussterben der Erdgeschichte vergleichbar, die in den vergangenen 500 Millionen Jahren stattgefunden haben, wie es auch R. POTT (2005, 2011) und C. KÖRNER (2012) formulieren. Der weitaus größte Teil der Arten, deren Ausrottungsgeschichte wir kennen, verschwand zwischen dem 16. und dem 19. Jahrhundert, als die Europäer die Erde zu kolonisieren begannen, eroberten und ausbeuteten. Bekannte Beispiele für die Ausrottung dieser Zeit sind die Dronte (*Raphus cucculatus*) von Mauritius, Stellers Seekuh (*Hydrodamalis gigas*) aus Alaska und das Kapzebra (*Equus quagga quagga*), das Quagga (Abb. 1) in Südafrika. Noch weiter zurückliegende Auslöschungen betrafen die Elefantenvögel (*Aepyornis* div. spec.) von Madagaskar, die Moas (Dinornithidae) von Neuseeland und den Auerochsen (*Bos primigenus*) in Eurasien. In heutiger Zeit sollen globale Natur- und Artenschutzprogramme solche Artensterben verhindern;

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

die derzeitige Lebensraumvernichtung an zahlreichen Orten der Erde spricht aber dafür, das heutige Artensterben plakativ als „Sechste Massenauslöschung“ zu bezeichnen, wenn auch dieser Begriff vielleicht als zu übertrieben erscheinen mag (REICHHOLF 2012).

Seit mehr als dreieinhalb Milliarden Jahren gibt es also Organismen auf dem Globus, die sich zu einem immer umfangreicheren Lebensstrom entwickelten, der wiederum seine jeweilige unbelebte Umwelt immer wieder verändert, beeinflusst und gestaltet hat. Ehemaliges

Abb. 1: Das endemische Kapzebra (*Equus quagga quagga*) ist eine Unterart des Steppenzebras (*Equus quagga)* welches sich im Saale-Hochglazial vor etwa 200.000 Jahren im äußersten Südafrika genetisch abgezweigt hat. Es hat eine vergleichsweise deutliche Reduktion der Bestreifung an Rumpf und Beinen. Das Quagga wurde um 1883 durch exzessive Bejagung vom Menschen ausgerottet (aus dem Museum f. Naturkunde, Berlin, 2013).

marines Leben ist heute in den Fossilien mancher Kalkgebirge vorhanden und baut diese sogar auf, wie wir es von den Dolomiten und den anderen Kalkgebirgen Europas kennen. Sie sind emporgehobener Meeresgrund und geben Zeugnis von der natürlichen Dynamik unserer Erde im Zeitenfluss. Auf solchen epochalen Grundlagen der Evolution beruht auch die Geschichte unserer derzeitigen Umwelt, der Ökosysteme, in denen wir leben, die wir nutzen und gestalten und die alle organismische Vielfalt repräsentieren, in der auch wir Menschen verwurzelt sind. Darum geht es in der aktuellen Diskussion über die Sechste Massenauslöschung auf der Erde!

2. Bildung des Sonnensystems

Unser blauer und grüner Planet „Erde“ ist ein Unikat unseres Sonnensystems: Nur auf ihm ist bisher Leben nachgewiesen, und dieses ist im Verlauf der Evolution ein gestaltendes Element der irdischen Lebensräume, der Geobiosphäre, geworden. Die Erde erscheint aus dem Weltraum betrachtet mehr als „Blauer Planet“, denn rund siebzig Prozent der Oberfläche sind von einer zusammenhängenden Wassermasse bedeckt. Das Sonnenlicht wird von dieser riesigen Wasseroberfläche in den Weltraum reflektiert und lässt aus der Perspektive eines Raumschiffes unsere Erde wegen ihres Wasserreichtums wie einen „Blauen Edelstein“ erstrahlen. Die Erde ist im gesamten Sonnensystem der einzige Planet, der über derart große Wassermassen in flüssiger Form verfügt. In der über 4,5 Milliarden Jahre währenden Geschichte unseres Planeten war das Wasser die Wiege des Lebens (BYATT et al. 2001).

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

Ein Schlüsselfaktor für die Entstehung und die Entwicklung von Leben auf der Erde ist die Entfernung zur Sonne: 150 Millionen Kilometer beträgt die Distanz. Einige Planeten unseres Sonnensystems, wie Merkur, Venus und Mars, liegen näher, andere, wie Saturn, Neptun und Pluto, sind weiter weg. Da die Sonne eine ungeheure Hitze ausstrahlt, hängen die jeweiligen Lebensbedingungen auf den Nachbarplaneten von der Nähe zu ihr ab. Auf dem rund 60 Millionen Kilometer von der Sonne entfernten Merkur herrschen Tagestemperaturen von etwa 350 Grad Celsius – heiß genug, um manche Metalle schmelzen zu lassen. Alles Wasser, das es hier einmal gab, ist schon lange verdunstet. Auf dem Pluto, der 5900 Millionen Kilometer von der Sonne entfernt ist, herrscht bei Oberflächentemperaturen von minus 230 Grad Celsius ewiges Eis. Glücklicherweise weist die Erde mildere Oberflächentemperaturen auf, mit einzigartigen günstigen Bedingungen für die Entwicklung von uns Lebewesen in der sogenannten habitablen Distanz zur Sonne.

3. Entstehung der Biosphäre

Infolge einer als Urknall bekannten kosmischen Explosion vor circa 13,7 Milliarden Jahren entstanden gleichzeitig Raum, Zeit und Materie. Das Universum war geboren. So sagt es uns die Astrophysik. Über 10 Milliarden Jahre später kondensierte eine interstellare Wolke aus wirbelndem Gas und Staub und begann sich zu erhitzen. Die große Hitze führte von nun an unmittelbar zu atomaren Reaktionen: Im Mittelpunkt der Gas-Staubwolke baute sich Druck auf: Was wir heute als Sonne kennen, begann vor 4,6 Milliarden Jahren zu scheinen. Die junge Sonne übte auf den Rest der Wolke eine immer stärker werdende Gravitation aus, bis sie sich in ihrem Einzugsgebiet alle Materie einverleibt hatte. Damals entstanden auch die Planeten – diese waren weit genug von der Sonne entfernt, und hier verschmolz deren Material ebenfalls durch die Gravitationskräfte, einschließlich Venus, Merkur, Mars, Pluto, der Erde und ihrer Monde. Auf die Weise, so nimmt man an, entstand unser Sonnensystem.

In jener Zeit war das junge Sonnensystem noch mit einer Vielzahl kosmischer Kleinkörper erfüllt, die auf die Planeten und Monde herabstürzten. Damals stieß nach heutigen Erkenntnissen die junge Erde mit einem marsgroßen Planeten zusammen, als der damalige Schwesterplanet Thaja vor 4,5 Milliarden Jahren auf Kollisionskurs geriet. Bei dem Aufprall wurden gewaltige Materiemengen von mehr als 20 Milliarden Kubikmetern ins Weltall geschleudert – aus diesen formte sich dann innerhalb einiger Millionen Jahre der Mond – der Erdtrabant. Aus dieser Periode des „schweren Bombardements“, die bis vor etwa 3,9 Milliarden Jahren andauerte, stammen überwiegend die Mondkrater. Solche Einschlagspuren sind auf der Erde durch Tektonik und Verwitterung weitgehend verschwunden, und nur der atmosphärenlose und lebensfeindliche Mond legt noch heute Zeugnis ab von der Jugend unseres Sonnensystems.

Die große Hitze bei der Entstehung der Erde hatte wahrscheinlich zur Folge, dass der gesamte Planet anfangs aus geschmolzener Materie bestand. Festere Materie sank zuerst in den Erdmittelpunkt, leichtere stieg an die Erdoberfläche. Als sich der Planet dann allmählich abkühlte, bildete diese leichtere Materie eine dünne Erdkruste, die Basis der vergangenen und heutigen Kontinente und der Ozeanbecken. Geschmolzene Lava brach aus den Tiefen hervor, Wasserdampf und andere Gase wurden freigesetzt. Ein Großteil unseres Wassers in den Ozeanen stammt daher – vielleicht gab es aber auch eisbepackte Kometen, die damals auf die Erde einstürzten und in das glutheiße System einverleibt wurden. Vor über vier Milliarden Jahren bestand die Erdatmosphäre hauptsächlich aus Wasserdampf. Doch mit zunehmender Abkühlung unseres Planeten begann dieser zu kondensieren und als Regen herabzufallen. Bäche wurden zu Flüssen, und so füllten sich in den tiefer gelegenen Regionen die Meere und Ozeane. Das älteste datierbare, durch Wasser geformte Sedimentgestein der Erde lässt vermuten, dass die ersten Ozeane vor 3,8 Milliarden Jahren entstanden sind.

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

Die ersten Kontinentalkrusten formten einen großen ersten Superkontinent, **Rodinia** genannt, der etwa bis eine Milliarde Jahre vor heute Bestand hatte und danach offenbar in drei größere Teile, Laurasia im Norden sowie Ostgondwana und Westgondwana im Süden zerfiel. Später im Kambrium und Ordovizium kollidierten diese frühen Gondwana-Kontinente erneut mit Laurasia und bildeten den ersten wirklich länger existierenden nächsten Superkontinent **Pangaea**, nach der griechischen Übersetzung „All-Erde" so zunächst genannt.

Auf den Kontinenten unserer Erde heben sich Tiefländer und Gebirge deutlich voneinander ab und sind in ihrer Ausdehnung und ihrem Verlauf gut zu verfolgen. Noch eindrucksvoller treten in den Ozeanen Berge, Gebirgsmassen und tiefe Grabenbrüche hervor, die den Meeresboden untergliedern. Sie sind ganz von Wasser bedeckt und nur durch Echolotungen auszumachen. In den Jahren von 1925 bis 1927 unternahm das deutsche Forschungsschiff „Meteor" eine erste große ausgedehnte Echolot-Erkundung des Atlantischen Ozeans und entdeckte mitten im Meer ein zerklüftetes Gebirge, den Mittelatlantischen oder **Mittelozeanischen Rücken**.

Das Gebirge erhebt sich bis fünftausend Meter über die angrenzenden ebenen Meeresbecken und ist zwischen fünfhundert und tausend Kilometer breit. Der Mittelatlantische Rücken im Atlantischen Ozean erstreckt sich beispielsweise über rund 16000 Kilometer Länge von der Antarktis im Süden bis in die Nähe des Nordpols; hier endet er in der vor Sibirien gelegenen Laptev-See. Das zwischen Spitzbergen und dem Nordpol verlaufende Endstück des Mittelatlantischen Rückens wird vom rund 1800 Kilometer langen und bis zu 3000 Meter hohen Gakkel-Rücken gebildet, der fünf Kilometer unter der Meeresoberfläche tiefer liegt als andere ozeanische Rücken. Hier ist die Erdkruste vergleichsweise sehr dünn, und die Spreizungsrate ist sehr gering. Dennoch gibt es eine große vulkanische Aktivität und eine damit verbundene Neubildung von Meeresboden an beiden Seiten des Rückens.

Heute sind etwas über 70 Prozent der Erdoberfläche von Wasser bedeckt, und die Ozeane haben eine komplizierte Topographie aus Ozeanbecken, Gräben und untermeerischen Gebirgen. Wie ist so etwas zu erklären? Nach den heutigen Erkenntnissen waren vom Karbon vor etwa 350 Millionen Jahren bis noch in die Triaszeit vor rund 220 Millionen Jahren alle Kontinente in der **Pangaea** vereint. Die Pangaea zerbrach nachfolgend in den nördlichen Urkontinent **Laurasia** und den südlichen **Gondwana**-Kontinent. Durch weiteres Aufbrechen und Verdriften der kontinentalen Schollen entstanden allmählich die Formen und Lagebeziehungen der heutigen Kontinente: Nordamerika und Eurasien gehen auf Laurasia zurück, Südamerika, Afrika, Madagaskar, die Antarktis, Indien und Australien sind Teile von Gondwana. Indien wurde so weit nach Norden verschoben, dass es heute in den Süden Eurasiens eingefügt ist. Auch Nord- und Südamerika stießen durch Driftbewegungen zusammen.

Die erwähnten meeresgeologischen und geophysikalischen Untersuchungen haben schließlich die grundlegenden Bausteine und Beweise geliefert, die die Drift der Kontinente, welche heute mit angrenzenden Bereichen der Ozeankruste **Platten** genannt werden, erklären. Ein charakteristischer Prozess bei den Bewegungen der Kontinentalplatten der Lithosphäre, also der Erdkruste und der allerobersten Zone des Erdmantels, ist das **Sea-Floor-Spreading**, wobei sich infolge des Auseinanderrückens der verschiedenen Platten ein tektonischer Graben durch Spreizen der Tiefseeböden bildet, gleichzeitig verbunden mit einem Aufwölben der Grabenränder und der Bildung Mittelozeanischer Rücken. Ursache für das Sea-Floor-Spreading ist das Aufsteigen von Magmakonvektionsströmungen in der Astenosphäre, einer Zone unterhalb der Lithosphäre im Erdinneren in einer Tiefe von 20 bis 80 Kilometern unter den Ozeanen und bis zu mehreren hundert Kilometern Tiefe unter den Kontinenten.

Der schalenförmige Aufbau des Erdinnern ist ja hinlänglich bekannt: Die auf der zähflüssigen Schmelze des Erdmantels driftenden Kontinentalplatten reichen tief in den Erdmantel

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

hinein. Nach der geologischen Hypothese der **Plattentektonik** ist die Erdkruste also in verschieden große, relativ starre Platten von bis zu durchschnittlich 200 Kilometern Dicke gegliedert, die mit vielen Grenzzonen entlang ozeanischer Rücken und Gräben aneinanderstoßen und sich aufgrund der beschriebenen konvektiven Strömungsprozesse im Erdmantel langsam passiv bewegen. Aus der Analyse von Erdbebenwellen hat man jüngst geschlossen, dass die obere Schale der Erde unter den Kontinenten maximal etwa 250 Kilometer tief reicht. Der große Unterschied zwischen Land und Meer ist auf das jeweilige Alter der Erdkruste zurückzuführen. Im geologischen Sinne ist nämlich die marine Erdkruste – anders als die kontinentale – verhältnismäßig jung; sie ist nirgendwo älter als 220 Millionen Jahre. Die zum Teil mehrere Milliarden Jahre alten Kontinente sind dicker, weil sich dort im Laufe der Erdgeschichte mehr Gestein angesammelt hat.

Bei der Plattendrift werden magnetische, beziehungsweise vulkanische Prozesse aktiviert: Jason MORGAN hat im Jahr 1972 die äußere Erdrinde in eine Reihe von solchen Platten unterteilt, deren Grenzen durch Erdbeben und erhöhte vulkanische Aktivität gekennzeichnet sind und die sich gegeneinander bewegen: Der ***Ring of Fire*** umgibt beispielsweise den gesamten Pazifik vom Tonga-Graben im Südwesten über den Marianen-Graben, den Japan-Graben, die Kurilen, die Aleuten entlang der nordamerikanischen Küste bis nach Kalifornien und über Mexiko nach Südamerika und ist gekennzeichnet durch eine Anhäufung aktiver Vulkane.

4. Evolution der Atmosphäre

Vor etwa 13,7 Milliarden Jahren begann also die Existenz der Universums mit der Entstehung aller Energie und Materie in einem Punkt. Wir nennen diesen Vorgang ***Big Bang*** oder **Existentiellen Urknall**. Seitdem dehnt sich das Weltall aus, und die Erde kühlt sich vergleichsweise schnell ab. Eine notwendige Voraussetzung für das Entstehen des Lebens auf der Erde war damals eine abiotische, das heißt ohne Mitwirkung von Organismen mögliche Bildung von einfachen organischen Stoffen, zum Beispiel von Zuckern als Basis für Kohlenhydrate und Fettsäuren oder Aminosäuren als Bausteine von Eiweißen oder Nukleotiden, den Bestandteilen der Erbsubstanz. Diese Verbindungen sind wichtige Aufbaustoffe lebender Zellen: Sie müssen also vor den ersten Zellen existiert haben. Chemisch gesehen handelt es sich dabei um organische Kohlenstoffverbindungen; das sind im Allgemeinen große, kompliziert aufgebaute Moleküle aus den Elementen Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Sauerstoff (O) und Stickstoff (N). Diese Elemente bilden miteinander aber auch einfache Verbindungen wie Methan (CH_4), Wasser (H_2O) oder Ammoniak (NH_3), die schon vor Milliarden Jahren auf der Ur-Erde reichlich vorkamen. Man nimmt heute an, dass diese kleinen Moleküle das Ausgangsmaterial für die Bildung organischer Verbindungen waren, dass es also auch bei den chemischen Molekülen eine Entwicklung vom Einfachen zum Komplizierten gegeben hat: eine **Chemische Evolution**. Organische Substanzen wie Aminosäuren, Zucker und Fettsäuren sind energiereicher als Wasser, Methan und Ammoniak. Sie können sich daher nur unter Einwirkung von Energie aus den energiearmen anorganischen Molekülen bilden. In dem fraglichen Zeitraum vor 4,5 bis 4 Milliarden Jahren waren geeignete Energiequellen im Übermaß vorhanden: Die kurzwellige ultraviolette Strahlung der Sonne wirkte intensiver als heute, weil die abschirmende Ozon-Schicht noch fehlte. Gewitter mit ihren elektrischen Entladungen der Blitze und radioaktive Vorgänge, bei denen energiereiche Strahlung freigesetzt wurde, traten sehr viel häufiger auf als gegenwärtig, und durch die zahlreichen Vulkanausbrüche wurde die Erdwärme in erhöhtem Maße wirksam. Im Jahre 1953 wies der amerikanische Biochemiker Stanley L. MILLER (1930-2007) nach, dass die Vorstellungen der Wissenschaftler vom Ablauf der ersten Schritte der chemischen Evolution zutrafen (ERTMER 2012; POTT 2012, SCHEPER 2012).

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

Heute weiß man, dass sich unter den Bedingungen, die auf der Ur-Erde herrschten, nahezu alle Substanzen bilden konnten, die für den praebiotischen Aufbau der lebenswichtigen chemischen Stoffe notwendig sind. Es gilt als wahrscheinlich, dass sich die abiotisch entstandenen organischen Moleküle im Schlamm der Meeresböden, im Sand von Uferzonen oder in den Poren von erkalteten vulkanischen Gesteinen anreicherten, wo sie vor der Einwirkung energiereicher Strahlung geschützt waren. Diese Strahlung war zwar einerseits als Energiequelle für ihren Aufbau notwendig, führte aber andererseits bei weiterer Einwirkung leicht wieder zum Zerfall der Moleküle. Der nächste Schritt in der chemischen Evolution war die Verknüpfung der bisher erwähnten abiotisch entstandenen organischen Moleküle zu komplizierter aufgebauten Riesenmolekülen. An diesen Reaktionen waren wahrscheinlich Mineralien als Katalysatoren beteiligt. Katalysatoren sind Stoffe, die eine Reaktion einleiten oder beschleunigen. Bei der Kondensation, der Verknüpfung von Aminosäuren zu eiweißähnlichen Stoffen wird zum Beispiel Wasser frei. Dieses Wasser muss aus dem System entfernt werden, weil die Endprodukte sonst wieder in ihre Bausteine zerfallen. Auf der Früherde war die Verdampfung des Wassers bei Temperaturen von 100 bis 180 Grad Celsius auf der Erdoberfläche oder seine chemische Bindung an Mineralien möglich (CONDIE & SLOAN 1998). Beide Wege konnten in Simulationsversuchen bestätigt werden. Es gilt daher als gesichert, dass auch organische Riesenmoleküle, die heute nur in lebenden Zellen vorkommen, vor Milliarden Jahren abiotisch aufgebaut werden konnten. Auch ihre Anreicherung zu Mikrosphären in kleinsten Tröpfchen war möglich.

Es entwickelten sich zuerst **Makromoleküle**, also Konzentrate von komplex angeordneten Molekülen innerhalb zellulärer Strukturen. Ein wichtiger Lebensraum für die Bildung solcher Strukturen können marine Wattenpools gewesen sein, wo wechselnde Sonneneinstrahlung, Austrocknung und Wasserbedeckung die Bedingungen für die Konzentration solcher selbständigen molekularen Strukturen ermöglichten; denn die ersten Makromoleküle enthielten hydrophobe, also wasserunlösliche, und hydrophile, also wasserlösliche Schichten, die kleine, geschlossene Vesikel bilden konnten, in denen sich Proteine erstmals vom Außenmedium separierten – ein ideales Umfeld für die Bildung erster Protozellen. Diese stammesgeschichtlich ältesten Lebewesen waren algenähnliche Zellen. Sie verfügten schon über photoaktive Farbstoffe und konnten daher im Sonnenlicht Kohlendioxid zerlegen und Sauerstoff freisetzen, wie es alle grünen Pflanzen auch heute bei der Photosynthese tun (CATTOLICO 1986).

Der freie Sauerstoff wurde zunächst vom Meerwasser und von der Lufthülle der Erde aufgenommen und reicherte sich später auch dort an. Damit entstand nach der ersten Phase, der rein anoxischen, chemischen, **primären Atmosphäre**, die zunächst sauerstoffarme, **sekundäre Atmosphäre** und schließlich die dritte, jetzige **tertiäre Atmosphäre**. Dieser vor allem von Algen und Pflanzen produzierte Sauerstoff ist die Grundlage für das tierische Leben (COLLINSON 1990; CHOPLEY 2001). Die Evolution der Organismen von den primitivsten Lebewesen bis zu den hochentwickelten Pflanzen und Tieren und bis zum Menschen hat mit rund 3,5 Milliarden Jahren mehr als doppelt so lange gedauert wie die chemische Evolution.

5. Evolution von Pflanzen- und Tierwelt

Zum **Präkambrium** gehört die Anfangszeit der Erde zunächst ohne organisches Leben, welches auch als **Archaikum** bezeichnet wird (Abb. 2). Die klassische geologische Gliederung dieser ältesten Epoche, die 86 Prozent der gesamten Erdgeschichte umfasst, ist regional teilweise sehr differenziert – sie umgreift allgemein die Zeitstellung von 4,5 bis 2,5 Milliarden Jahren. Für uns ist interessant, dass wir hier die Entwicklung der eukaryontischen Algen bei 4 bis 3,5 Milliarden Jahren ansetzen können; ab 2,5 Milliarden Jahren kennen wir die ersten tierischen Organismen, beispielsweise Würmer, und dementsprechend nennen die Paläo-

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

zoologen diese Epoche auch das **Proterozoikum**, das sehr lange bis 550 Millionen Jahre angedauert hat. In Paläoböden siliziklastischer Sedimente hat Charles H. WELLMANN (2010) limnische Cyanobakterien aus dem Präkambrium entdeckt. Sie sind für Arizona mit 1,2 Milliarden Jahren datiert (STROTHER et al. 2011).

Unveränderte Reste der vor 4,5 Milliarden Jahren entstandenen ersten Erstarrungskruste der Erde sind durch die nachfolgenden ständigen Umformungen nicht zu erwarten; das älteste datierte Material ist ein Zirkonkristall aus Westaustralien, etwa 4,3 Milliarden Jahre alt. Das bisher älteste bekannte Sediment mit biogenem Kohlenstoff ist etwa 3,8 Milliarden Jahre alt und stammt aus Grönland. Durch Vulkanismus metamorphisierte Magmen und Sedimente aus dem Präkambrium bilden auf allen Kontinenten die so genannten Grundgebirge und sind als Reste der ersten kontinentalen Kruste in mehreren Kontinentalkernen enthalten. Man nennt diese „Alte Masse", also die nicht mehr faltbaren Bereiche der Erdkruste, auch **Kratone**. Sehr alte Kratone sind die **Schilde**, die präkambrischen Urgebirgsmassive, wie der Kanadische Schild, Fennosarmatien und das Angaraland im Bereich des heutigen zentralen und nördlichen Sibiriens oder die mächtigen Landmassen des Australischen Schildes und des Brasilianischen Schildes auf der Südhalbkugel. Sie sind die wichtigsten Fundplätze von Fossilien zur Dokumentation der Evolution des Lebens auf der Erde, da diese nicht in die Prozesse des Sea-Floor-Spreading und der Plattentektonik einbezogen waren und sind.

In der nachfolgenden geologischen Epoche des **Kambrium** ab etwa 540 Millionen Jahren vor heute gliederten weite Ozeane die Landmassen unseres Planeten in Nord- und Südkontinente, die wir später als **Laurasia** und **Gondwana** bezeichnen werden. Mit Ausnahme der Wirbeltiere waren bereits alle wichtigen Tiergruppen, wie marine Wirbellose, erste Chordatiere und die marinen Pflanzen in der reichhaltigen Fauna und Flora des Kambriums vertreten. **Stromatolithen** dominieren in den damaligen Weltmeeren, in denen sich schon Riffkalke mit kalkabscheidenden Algen gebildet hatten (Abb. 3).

Beginnend vor etwa 550 Millionen Jahren im Kambrium also kam es offenbar durch heftigen Vulkanismus mit vergleichsweise schnell driftenden Landmassen zu einer enormen Veränderung der ehemaligen Lebensräume. Der alte Kontinent Gondwana rotierte damals innerhalb von „nur" 15 Millionen Jahren um etwa 90 Grad gegen den Uhrzeigersinn. Die resultierende, verhältnismäßig „rasche" Neuverteilung der Landmassen könnte in jener Zeit die so genannte **Kambrische Artenexplosion** verursacht haben – eine Art „Biologische Spontanzündung": Auf den damaligen Kontinenten entwickelten sich dementsprechend in rascher Folge eine Vielzahl neuer Lebewelten mit einer bislang beispiellosen Beschleunigung der biologischen Evolution (Abb. 4). Die Fixierung von elementarem Stickstoff aus der Luft spielte auch schon in jener Zeit in nährstoffreichen Ozeanen eine entscheidende Rolle für den Stoffhaushalt der Lebewesen. Verantwortlich dafür sind noch heute vor allem die Cyanobakterien, die über spezielle Stoffwechselenzyme verfügen, welche elementaren Stickstoff verwerten können.

Aus dem nachfolgenden **Ordovizium** ab 495 Millionen Jahren kennen wir die ersten Wirbeltiere; die Fische treten auf zusammen mit **Graptolithen**, kleinen koloniebildenden Meereslebewesen mit chitinartigem Skelett aus der Klasse der Kragentiere, die vom Mittelkambrium bis zum Unterkarbon bis etwa 330 Millionen Jahre vor heute lebten. Ihre Skelette finden sich heute in dunklen Schiefern und Kalken, und diese sind wichtige Leitfossilien für ihre Zeit. Dieses Erdzeitalter endet mit einem ersten Massensterben auf unserem Planeten: Der **„Ordovician Event"** (Tabelle 1) vor 443 Millionen Jahren führte wohl infolge der Kontinentaldrift nach Süden in die kalte Polarregion zu alternierenden Glazial- und Interglazialperioden mit marinen Transgressionen und Regressionen, der gleichzeitigen Hebung der Appalachen mit dazu entsprechendem Klimawandel, so dass mehr als 50 Prozent aller Gattungen und mehr als 80 Prozent aller damaligen Arten ausstarben (BERGGREN et al. 1986; BARNOVSKY

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

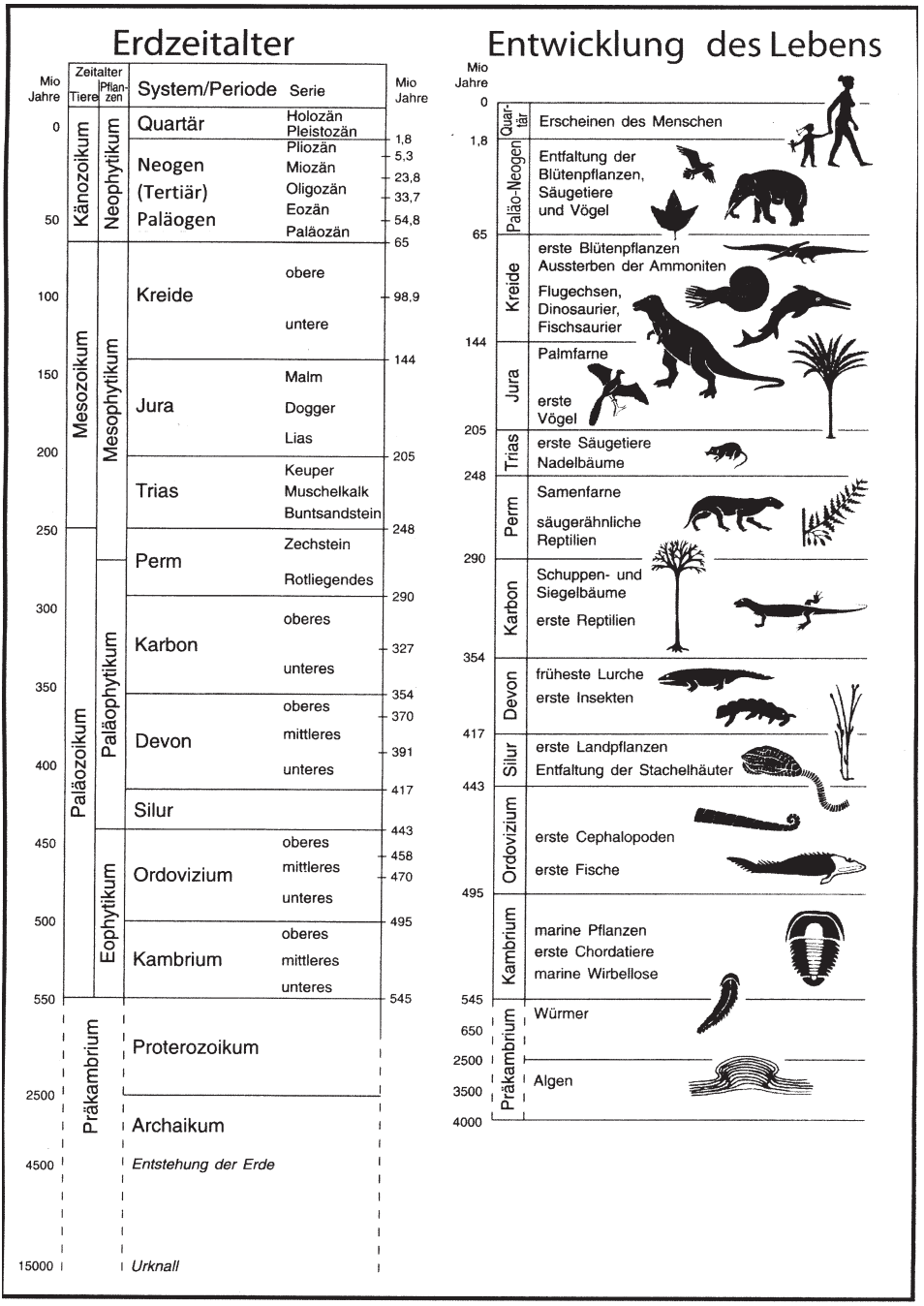

Abb. 2: Übersicht über die geologischen Epochen und die Entwicklung des Lebens (verändert nach Verlag Dr. F. Pfeil, © Wissenschaftlicher Verlag München, aus R. POTT 2005).

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

Abb. 3: Stromatolithen sind die ältesten bekannten Lebensformen der Erde. Ähnlich Korallen ragen zahllose dunkle Höcker und Kuppen – manche bis zu 60 cm hoch. Sie verdanken ihre Existenz verschiedenen Cyanobakterien, die wichtige Sedimentpartikel aus dem Salzwasser binden und so Schicht für Schicht aufbauen. Auf ihrer Sauerstoffproduktion basiert alles irdische höhere Leben (Lake Tethys, Westaustralien, 2004).

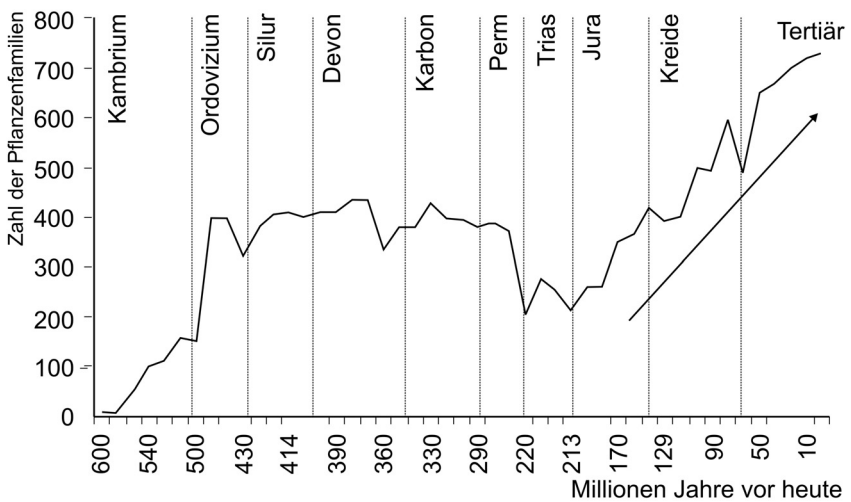

Abb. 4: Geologische Epochen und Biodiversität nach der Zahl der Pflanzenfamilien sowie der Dynamik der Aussterberate-Kurve von SEPKOSKY 1996 und FERNANDEZ & PLASTINO 1997 (aus POTT et al. 2003).

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

et al. 2011). Hinweise auf Vereisungen am Übergang zum Silur wurden in Afrika gefunden, der Kontinent lag damals am Südpol. Die **Trilobiten** erreichten damals den Höhepunkt ihrer Formenvielfalt und Körperfülle (Abb. 5).

Den dritten Abschnitt des Paläozoikums bildet das **Silur** ab etwa 440 Millionen Jahren. Die Kaledonische Geosynklinale zog damals in Europa von den Britischen Inseln über Norwegen und Spitzbergen nach Ostgrönland. Das entsprechend verlaufende Kaledonische Gebirge erreichte in dieser Zeit seinen Höhepunkt und vereinte die ursprüngliche baltisch-russische Platte mit der kanadisch-grönländischen Platte zu einem geschlossenen Nordkontinent.

In den damaligen Meeren und Flachwasserbereichen wurde reichlich Sediment abgelagert. Fossilführende Schiefer und Korallenkalke zeugen noch heute davon. Die älteste bekannte Landpflanze der Erde aus dieser Zeit gehört zu den fossilen Nacktfarnen, den Psilophyten: erste Funde von *Cooksonia caledonica* stammen aus dem Obersilur Englands (Abb. 6); die Pflanze ist nach der australischen Paläontologin Isabel Clifton COOKSON (1893-1973) benannt (BERNER 1997; BATEMAN et al. 1998). Sie ist vom Obersilur bis zum Unterdevon in Europa und Sibirien nachgewiesen worden (CHALONER 1970). Im Silur entwickelten sich aus den ursprünglichen Vorläufern der Landpflanzen, die im Ordovizium entstanden waren, höher organisierte Formen. Diese waren zunehmend besser an die Bedingungen des Landlebens angepasst. Wie ihre Algen-Vorfahren waren sie zunächst relativ klein und einfach gebaut und

Tab.1: Die „Big Five"-Massensterbe-Ereignisse (erweitert nach BARNOSKY et al. 2011).

Ereignis	**Wahrscheinliche Ursachen**
Ordovician Event Endete vor ca. 443 Millionen Jahren, Dauer: 3,3 – 1,9 Millionen Jahre; 57 Prozent aller Gattungen und etwa 86 Prozent aller Arten ausgelöscht.	Glazial-Interglaziale Episoden, marine Transgressionen und Regressionen, Uplift der Appalachen, CO_2-Freisetzung.
Devonian Event Endete vor ca. 359 Millionen Jahren, Dauer: 29 – 2 Millionen Jahre; 35 Prozent aller Gattungen und 75 Prozent aller Arten ausgelöscht.	Global Cooling, Evolution und Diversifikation von Landpflanzen, Pedogenese, Globale CO_2-Bindung, Tiefwasser-Anoxien, Meteoriten- oder Boliden-Impakt?
Permian Event Endete vor 251 Millionen Jahren, Dauer: 2,8 Millionen bis 160.000 Jahre; 56 Prozent aller Gattungen und 96 Prozent aller Arten ausgelöscht.	Sibirischer Trapp-Vulkanismus, Global Warming, Tiefsee-Anoxien, H_2S- und CO_2-Freisetzung, Methanhydrat-Freisetzung, Meteoriten- oder Boliden-Impakt?
Triassic Event Endete vor 200 Millionen Jahren, Dauer: 8,3 Millionen bis 600.000 Jahre, 47 Prozent der Gattungen und 80 Prozent aller Arten ausgelöscht.	Central Atlantische Magmatische Provinz (CAMP) mit atmosphärischem CO_2-Anstieg und Freisetzung von Methanhydrat, Globaler Temperatur-Anstieg, Acidification der Ozeane.
Cretaceous Event Endete vor 65 Millionen Jahren, Dauer: 2,5 Millionen Jahre bis weniger als 1 Jahr, 40 Prozent aller Gattungen und etwa 76 Prozent aller Arten ausgelöscht.	Boliden-Impakt von Yukatan (Chicxulub), Globale Kataklysmen nach schneller Abkühlung der Erde. Gleichzeitig Deccanischer Trapp-Vulkanismus mit entsprechenden Folgen.

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

wurden wegen ihrer Blattlosigkeit „Nacktpflanzen“, also *Psilophyten* genannt. Sie waren aber erstmals homoiohydre Pflanzen mit eigenem Regulationssystem für den Wasserhaushalt und mykorrhizierten Rhizoiden. Im Silur entwickelten sich auch die ersten Flechten auf dem Land.

Die letzten Phasen Kaledonischer Gebirgsbildungen im **Devon,** – benannt nach der südenglischen Grafschaft Devonshire –, wo Gesteinsserien aus der Zeit von 417 bis 354 Millionen Jahren vor heute ausgebildet sind, veränderten das Aussehen der Nordhalbkugel: Ein riesiges Land reichte von Nordamerika über die Britischen Inseln bis nach Nordeuropa, nach den rotgefärbten Sedimenten **Old Red-Kontinent** genannt (Abb. 7). Es erstreckte sich jetzt fast

Abb. 5: Trilobiten sind die Leitfossilien von den Erdepochen des Kambrium bis zum Karbon vor etwa 330 Millionen Jahren. Im Ordovizium vor 495 bis 445 Millionen Jahren erreichten sie ihre höchste Formenvielfalt. Links: *Phacops rana crassituberculata*, rechts: *Ceratarges* spec. (Foto: D. GRZEGORCZYK, Münster, aus R. POTT 2005).

um den gesamten nördlichen Erdball. Südlich anschließend bildete sich in jener Zeit von Nordfrankreich über das Rheinische Schiefergebirge bis zum Harz das Variskische Gebirge. Die Variskische Gebirgsbildung hat praktisch die gesamte damalige Erde umspannt und eine große zusammenhängende Landmasse, das nachfolgende **Pangaea**, aus vielen Erdteilen zusammengefügt. Diese erreichte ihren Höhepunkt im Karbon, endete im Perm und verdrängte das Meer aus Mitteleuropa.

Dort, wo im schottischen Rhynie nahe Aberdeen offenbar der vorkeltische Volksstamm der Silurer lebte, fand man auch die Fossilien weiterer früher Landpflanzen, die zur Psilophytengruppe der Nacktfarne mit ihren ersten Pionieren, den 20 bis 50 cm hohen *Rhynia gwynne-vaughani* und *R. major*, gehören.

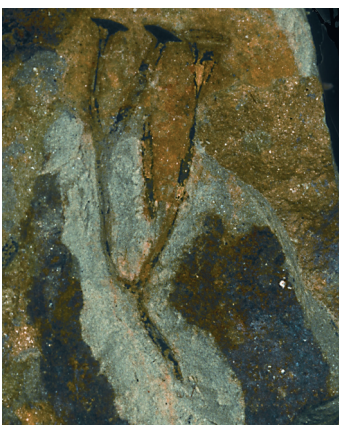

Abb. 6: *Cooksonia pertonii*, (Foto H. KERP, Münster, aus R. POTT 2005).

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

Diese waren schon völlig mit Spaltöffnungen, Gefäß- und Leitbündeln und Wurzelsymbiosen mit Pilzen an das Landleben angepasst (KERP & HASS 2009). Eine etwas jüngere Flora als die Moorflora von Rhynie ist vom Kirberg bei Wuppertal bekannt. Hier fand man neben Psilophyten auch Farne mit fein gegliederten Seitensprossen, die Farnwedeln ähnlich, jedoch in alle Richtungen verzweigt sind, und *Asteroxylon*, eine Übergangsform von Psilophytatae und Lycopodiatae, den Bärlappgewächsen. *Asteroxylon* war die häufigste Pflanze dieser ehemaligen Lebensgemeinschaft und ist eine der ältesten Landpflanzen Deutschlands. Sie wurzelte im flachen Wasser, nachgewiesen bei Wuppertal-Elberfeld als *A. elberfeldense*. Ihre Sprosse wurden bis einen Meter hoch und erreichten den Luftraum. Sie trugen in den bodennahen Abschnitten kleine schuppenförmige Auswüchse ohne Blattadern; an den kahlen Enden befanden sich die Sporangien. Der Name *Asteroxylon* bedeutet Sternholz und weist auf die im Querschnitt sternförmige Anordnung der Leitbündel hin. Für *Asteroxylon* wurde nach V. STORCH et al. (2001) ebenfalls eine Pilz-Symbiose nachgewiesen und diese ersten Landpflanzen dürften eine erste Pedogenese in Gang gesetzt haben. Dieses hatte die Bindung großer CO_2-Mengen zur Folge mit der Konsequenz einer globalen Abkühlung, welche unter anderen wohl das zweite Massensterben der Erdgeschichte, den **Devonian Event** vor 359 Millionen Jahren ausgelöst haben mag (s. Tab. 1).

Im warmen, jahrmillionenlangen Klima des nachfolgenden **Karbon** entwickelte sich die Pflanzenwelt in beeindruckendem Umfang weiter. Dominierend sind jetzt unter den höheren Sporenpflanzen die Bärlappgewächse mit den mächtigen Siegelbäumen der Gattung *Sigillaria*. Der Deutsche Siegelbaum (*Sigillaria germanica*) war eine der am weitesten verbreiteten Pflanzen im gesamten Karbon Mitteleuropas mit bis zu vierzig Meter hohen Bäumen, die lange, starre und fast zylindrische Blätter hatten. Im Karbon rückten der damalige nördliche Kontinent und der Südkontinent näher aneinander und bildeten den durch einen in west-östlicher Richtung verlaufenden Meeresarm getrennten globalen Großkontinent, eben noch immer Pangaea, obwohl im Norden und Süden dieses Urkontinents zur Steinkohlenzeit offenbar verschiedene Lebensbedingungen herrschten: Zum ersten Mal in der Erdgeschichte kam

Abb. 7: Old-Red-Sandstein als Rest der Kaledonischen Gebirgsbildung am Cap Down Patrick Hill in Nordwestirland (2003).

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

es damals zu wirklich umfangreichem Pflanzenwachstum und anschließend zu riesigen Ablagerungen von organischem Material, aus denen die mächtigsten Steinkohlelager der Erde entstanden.

Die wohl wichtigste Entwicklung der Pflanzenwelt im Karbon stellt der Übergang zur Samenbildung dar. Sogenannte Farnsamer, die Pteridospermae, entstehen, und am Ende der Steinkohlenzeit treten die ersten Nadelbäume auf. Wenn der Steinkohlenwald auch ein Tropenwald war, so darf er doch nicht mit heutigen Tropenwäldern verglichen werden: Blüten und blütenbesuchende Insekten fehlten noch, ebenso wie Früchte und früchtefressende Vögel. Es dominierten vielmehr Gefäßsporenpflanzen wie Riesenbärlappe, Riesenschachtelhalme und Baumfarne sowie Farnsamer. Diese Gruppen erreichten im Karbon und dem folgenden Unterperm ihre größte Entfaltung. Als große Bäume waren sie an das tropische Klima angepasst. Sie besaßen keine Jahresringe und keine ruhenden Knospen. Ihre allerdings sehr viel kleineren Nachkommen existieren bis heute. Eine Vorstellung über die enorme Biomasse und die Struktur der riesigen Steinkohlenwälder des Karbon kann man gewinnen, wenn man im Februar oder März eines Jahres über die großen und üppigen Sumpfwälder des Igapó, eines der andinen Nebenflüsse des Amazonas an der Grenze zwischen Equador und Kolumbien überfliegt.

6. Evolution der Gymnospermen

Mit der geologischen Periode des **Perm** endet um 250 Millionen Jahren vor heute das Paläozoikum. Benannt wird diese Epoche nach einem ehemaligen Regierungsbezirk in Russland im westlichen Uralvorland. Das Perm ist in tektonischer Sicht eine zunächst unruhige Zeit: Die variskische Gebirgsbildung, die in Europa und Asien die langgestreckten Kettenmittelgebirge geschaffen hatte, ging mit heftigen Vulkanausbrüchen und starken Erdkrustenbewegungen zu Ende. Auf den Südkontinenten im Gondwana-Bereich entwickelte sich die ausgedehnte **Permo-Karbonische Vereisung**. Auf dem beginnenden Nordkontinent Laurasia wurden dagegen unter einem trocken-heißen Klima rotgefärbte Sedimentgesteine, Gipse sowie Stein- und Kalisalze abgelagert. Dieses geschah vor allem im Zechsteinmeer, einem Flachmeer, welches damals von Norden und Süden in Phasen vorrückte und das Land bis zur damaligen Böhmischen Festlandsmasse überschwemmte.

In jener Zeit führte wechselhaftes Austrocknen der Flachmeere zur Bildung riesiger, evaporitischer Lagerstätten von Salzen und Gipsen gerade in Nordwesteuropa und im westlichen Nordamerika mit einem Höhepunkt im ausgehenden Perm unter heißen Klimabedingungen. Die zahlreichen Salzstöcke in Niedersachsen und in Schleswig-Holstein verraten hier noch die ehemalige Ausdehnung des Zechsteinmeeres im heutigen Westeuropa. Die damalige Landschaft war durch flache Sedimentationsbecken bestimmt, in denen das Wasser wegen des warmen und trockenen Klimas allmählich verdampfte. So bildeten sich Steinsalzschichten und Kalisalzflöze von großer Mächtigkeit: Bis zu tausend Meter Salz wurden in weiten Bereichen des Zechsteinmeeres abgelagert: dazu musste eine mehr als sechzig Kilometer mächtige Schicht Meerwasser verdampfen, um einmal eine Vorstellung von den Dimensionen zu geben. Unter extrem hohem Druck wird Salz plastisch verformbar. In geologischen Zeiträumen, also äußerst langsam, sind unter solchen Bedingungen die ursprünglich horizontal gelagerten Salzschichten bei tektonischen Bewegungen der Erdkruste in Form von Salzstöcken und Salzdiapiren aufgedrungen und stehen heute in Form pilzartiger „Salzhüte“ oft nur hundert bis zweihundert Meter unter der Erdoberfläche.

Der Rückgang der Gefäßsporenpflanzen wird nicht nur mit dem zunehmend trockenen kontinentalen Klima, sondern auch mit Abkühlung der Erde in Verbindung gebracht (BROUTIN & KERP 1994). Die gigantischen Bärlappgewächse starben Ende der Rotliegenden fast

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

völlig aus, auch die Cordaiten verschwanden, das war die Zeit des dritten globalen Massensterbens, des **Permian Event** vor 251 Millionen Jahren, den gewaltige CO_2-, H_2S- und Methanhydrat-Freisetzungen im Verlauf des Sibirischen Trapp-Vulkanismus ausgelöst haben dürften (s. Tab. 1). Etwa an der Grenze zwischen Rotliegendem und Zechstein liegt auch ein wichtiger Einschnitt in der Entwicklung der Pflanzenwelt: Die bislang dominierenden Sporenpflanzen wurden zunehmend durch Gymnospermen ersetzt; ihre mannigfaltigen Gruppen waren die Cycadophytina, die Palmfarne, Koniferen und Gingkogewächse. Im sehr trockenen und warmen Zechstein herrschten die verhältnismäßig gut an Trockenheit angepassten Koniferen (BECK 1988; POTT et al. 2008).

Dass der Übergang vom Perm zur **Trias** eine Zeit des großen Sterbens war, ist seit langem bekannt: Meerestiere wurden vor 250 Millionen Jahren ebenso dezimiert wie Landbewohner, Wirbeltiere ebenso wie Weichtiere und Insekten. Manche Fachleute schätzen, dass damals 80 Prozent der Wirbellosen ausstarben. Der **Triassic Event** endete vor 200 Millionen Jahren. Atmosphärische CO_2-Anstiege mit global erhöhten Temperaturen hatten offenbar starke Vulkanausbrüche der Central Atlantischen Magmatischen Provinz im heutigen Südamerika (CAMP) verursacht. Zu jenen Organismen, die das Ende des Erdaltertums nicht überlebten, gehören zum Beispiel die Trilobiten, die einst sehr artenreiche und vielgestaltige Gruppe der Gliederfüßer. Und der Flora ist es offenbar nicht besser ergangen als der Fauna: Bärlappgewächse, Farne und Schachtelhalme, die mit baumhohen Exemplaren die Steinkohlenwälder geprägt hatten, spielten im Perm nur noch eine untergeordnete Rolle. In den Wäldern des Perm dominierten dagegen bereits die Nadelbäume und andere urtümliche Samenpflanzen. *Gingko biloba* ist der letzte Nachfahre jener Nadelbäume aus dieser Zeit, die statt schmaler Nadeln breite Blätter trugen (Abb. 8).

Abb. 8: Der moderne *Ginkgo biloba* ist zweihäusig. Die Bäume werden bis zu 30 Meter hoch. Das Foto zeigt eine weibliche Pflanze mit Früchten (Campus Peking-University, Beijing, 2009).

Die nachfolgende Epoche des **Jura** beginnt ab etwa 205 Millionen Jahren. Die Zeit war zunächst einheitlich warm bis heiß und feucht mit später weltweit bereits in verschiedene Biome gegliederte Klimazonen und einer artenreichen Flora. Im Jura rückt das Meer weltweit vor: Große Teile des Festlandes wurden überflutet, darunter auch weite Teile Mitteleuropas. Flachwasserablagerungen aus dieser Zeit sind sehr viel umfangreicher als aus der Trias. Fünf distinkte Vegetations- und Klimazonen kann man für die Frühe Jurazeit identifizieren: Kühltemperate Biome finden sich in den Breitenlagen über 60 Grad nördlicher und südlicher Breite auf beiden Hemisphären (Abb. 9). Die Fossilien zeigen hohe Anteile an sommergrünen Arten, die eine Saisonalität des Klimas andeuten: Es sind Gingkos und großblättrige Koniferen der Volziales und der Pinaceae zusammen mit Farnen und Sphenopsiden. Die kühl tem-

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

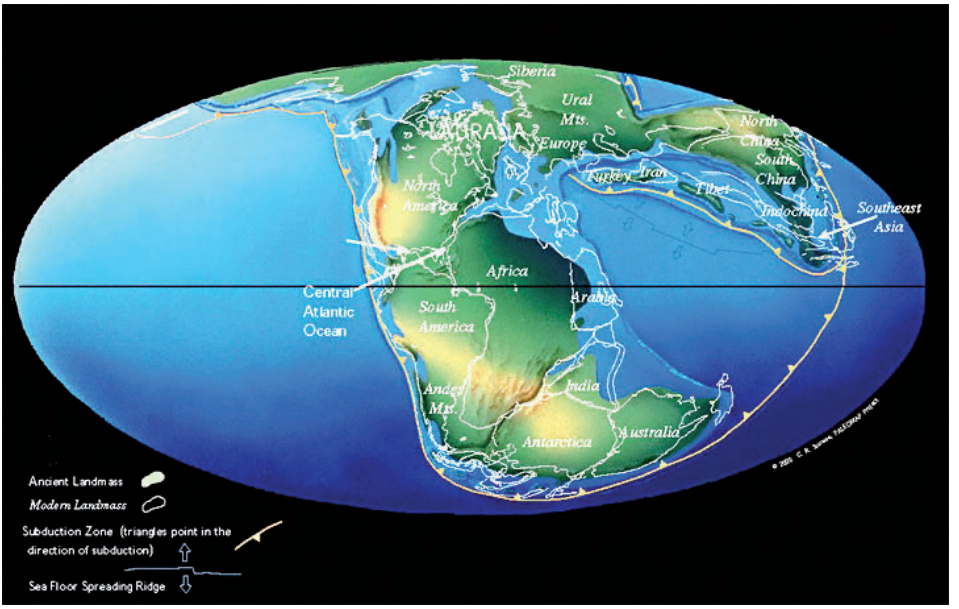

Abb. 9: Globale paläogeographische Rekonstruktion der Lebensräume in der Frühen Jurazeit vor 206 bis 180 Millionen Jahren (nach SCOTESE 2004).

peraten Zonen gehen über in warm temperate Biome zwischen den 60. und 40. Breitengraden der damaligen Kontinente. Eine wärmeliebende Vegetation erstreckte sich bis ungefähr 60 Grad nördlicher und südlicher Breite. Sie enthielt nach neueren Funden aus China sogar schon Pflanzen der fossilen *Archaefructus liaoningensis* mit deutlichen Fruchtachsen und entwickelten Karpellen, wie wir sie von den Angiospermen kennen. Diese sind nach radioaktiven ^{40}Argon-Datierungen etwa 125 Millionen Jahre alt (SUN, G. et al. 1998).

Abb. 10: Der Berliner Urvogel *Archaeopteryx lithographica* aus dem Museum für Naturkunde, Berlin (2011).

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

In den Meeren erreichten die Ammoniten damals den Höhepunkt ihrer Entwicklung. Im Tethys-Meer, welches in jener Zeit größtenteils in den Tropen lag, nahmen auch Korallenriffe große Flächen ein. Auf dem Festland wurden die **Dinosaurier** die bestimmenden Formen. Die ersten Vögel entstanden. Besonders bekannt ist der „Urvogel“ *Archaeopteryx* (Abb. 10).

7. Evolution der Angiospermen

Die letzte Epoche des Mesozoikums, die **Kreidezeit**, datieren wir ab 144 Millionen Jahren bis 65 Millionen Jahren vor heute; ihre Differenzierung in Ober- und Unterkreide erfolgt nach den wichtigen Leitfossilien unter anderem der Ammoniten, Muscheln und der Foraminiferen. Umfangreiche Flachmeere müssen in dieser Zeit existiert haben, als sich Laurasia und Gondwana endgültig voneinander lösten und der Südatlantik sich bildete (ARCHANGELSKY 1990). Die alten Ozeane überschwemmten bei diesen ausgedehntesten Überflutungen der jüngeren Erdgeschichte selbst alte Landflächen und lagerten dort zunächst tonige, dann stärker kalkige Schichten ab, auf die in der Oberkreide oft in vielen Aufschlüssen die weiße „Schreibkreide“ folgt. Die Tethys wurde durch die beginnende Norddrift Indiens verschmälert und schließlich nachfolgend endgültig verdrängt. In der Pflanzenwelt gab es eine wichtige evolutive Neuerung: Während am Beginn der unteren Kreidezeit noch die jurassischen Bärlappe, Farne und Gingkogewächse vorherrschten, traten am Ende der Unterkreide, in der Gault-Epoche ab etwa 110 Millionen Jahren, massiv die **Angiospermen** auf und bildeten zusammen mit den schon existierenden Gymnospermen, den zapfentragenden Nadelhölzern, beispielsweise den Sumpfzypressengewächsen der Gattung *Taxodium* und Mammutbäumen der Gattungen *Sequoia* und *Sequoiadendron*, eine wichtige Grundlage für die Entfaltung der Vögel und Säugetiere (ARBER & PARKIN 1907; ARMBRUSTER 1992; AXELROD 1966).

Jetzt „erwachen“ evolutiv die Angiospermen, wie es Mary E. WHITE (1998) treffend formuliert, und die Vegetation wird revolutioniert: In der ausgehenden Kreidezeit war das Klima überwiegend noch warm-feucht, außer im südlichen Gondwana-Bereich. Die Abkühlung in diesem Gebiet und der voranschreitende Gondwana-Zerfall sowie ein ansteigender Meeresspiegel führten beispielsweise zur Überflutung weiter Landstriche Australiens; die altertümlichen Pflanzengruppen der Koniferen, der Cycadeen und der Baumfarne waren genetisch nicht in der Lage, auf diese Veränderungen zu reagieren. Der Weg war frei für die Entfaltung einer modernen Pflanzenwelt. Die Cycadeen mit ihren heute nur etwa zehn Gattungen blieben als Relikte in den Tropen und Subtropen erhalten (Abb. 11).

In kurzer Zeit vor 130 bis 140 Millionen Jahren entfalteten sich die Angiospermen endgültig und übernahmen von nun an die Vorherrschaft. Ihre größte Plastizität hinsichtlich der anatomischen Differenzierung mit Tracheen und Tracheiden, die Ausbildung von Blütenhüllen und zwittrigen Blüten, der Einschluss der Samenanlagen, die Samen- und Fruchtausbildung, die Evolution einjähriger bis ausdauernder, krautiger und holziger Pflanzen ermöglichen es ihnen bis an die Grenze des Lebens vorzustoßen. Dazu kommt ihre ökophysiologische Plastizität mit der Anpassungsfähigkeit an trocken-heiße Halbwüstenklimate und kältedominierte Tundren- oder Hochgebirgslebensräume.

In der mittleren Kreidezeit waren die Hauptgruppen der Angiospermen entfaltet, und am Ende der kretazischen Epoche erreichte deren Diversität bereits etwa 50 bis 80 Prozent der heutigen Sippen. Sie sind eine monophyletische Gruppe, das heißt, sie gehen auf einen Stammbaum zurück, wie man seit etwa zwanzig Jahren aus morphologischen und molekularen Untersuchungen von Else M. FRIIS et al. (1987, 2010), Mark W. CHASE et al. (1993) und Peter R. CRANE et al. (1995, 2010) weiß. Die Monocotyledonae stellen ebenfalls monophyletisch einen frühen Zweig der Angiospermen dar (ENDRESS 2010).

Die Dicotyledonae sind mit ihren durch drei runde Austrittslöcher versehenen, also tria-

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

perturaten oder tricolpaten Pollen ab 125 Millionen Jahren vor heute nachweisbar. Ungeklärt ist noch der eindeutige Entstehungsort der Angiospermen: Man vermutet den südlichen Gondwana-Bereich, denn die höchste Konzentration lebender primitiver Angiospermen gibt es noch heute in den Regenwäldern von Queensland in Australien. Pollenfunde, Blüten- und Blattreste und molekulare Daten von Ribonukleinsäuren lassen eindeutig darauf schließen (Abb. 12). Am Beginn der Kreidezeit waren die Angiospermen gegenüber den Gymnospermen wohl noch in der Minderzahl, und der Austausch der Vegetationstypen fand erst im nachfolgenden Paläogen statt.

Das Fünfte Massensterben („**Cretaceous Event**“) fand am Übergang von der Kreidezeit zum **Paläogen** vor 65,5 Millionen Jahren statt (Tab. 1). Es wurde verursacht durch einen Asteroideneinschlag auf der Yucatan-Halbinsel am heutigen Golf von Mexiko. Dem Impact fielen die Dinosaurier, welche 160 Millionen Jahre lang die vorherrschenden Lebewesen waren, vollständig zum Opfer. Dieses Fünfte Massensterben markierte den Wendepunkt vom Erdmittelalter zur **Erdneuzeit**. Die Maya auf der mexikanischen Yukatan-Halbinsel benannten die durch den Einschlag des Meteoriten entstandenen Brüche, Verwerfungen und dolinenartigen Kalksteinhöhlen, die Cenoten, mit dem Namen **Chicxulub**, der diesem Ereignis auch die heutige internationale Bezeichnung lieferte: **Chicxulub-Impact**. Hohe Iridium-Anomalien

Abb. 11: *Cyathea calcicola*, Cycadatae, als „lebende Fossilien“ von der Südhemisphäre, Northern Territory, Australien (2002).

dienen hier vor Ort als wichtiger Beweis für einen großen Meteoriteneinschlag mit der Folge mächtiger Tsunamis, hoher Staubfreisetzung, der sich in der gesamten Erdatmosphäre verteilte, tektonischer Schockwellen mit weltweiten Erdbeben und Vulkanausbrüchen, Verringerung der Sonneneinstrahlung und dem Zusammenbruch ganzer Nahrungsketten. Dieses Ereignis schuf Raum für die Entfaltung neuer Tier- und Pflanzenarten: Vor allem der Säugetiere und der Angiospermen.

8. Vom Paläogen bis zum Holozän

Im **Paläogen** und im **Neogen** von 65 bis 1,8 Millionen Jahren vor heute entstand letztendlich weitgehend das heutige Erdbild; Pole und Kontinente näherten sich ihrer heutigen Lage; im „Restmittelmeer“, der Tethys kam es zu einer intensiven Tektonik, in deren Verlauf die alpidischen Gebirge aufgefaltet wurde, deren Kernzonen sich ja bereits in der Kreidezeit gebildet hatten. So entstand der große Gebirgsbogen vom Atlas in Nordafrika über die Sierra

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

Abb. 12: Der tropische Regenwald von Daintree in Queensland, Australien, gilt als ältester lebender Regenwald der Erde. Hier wachsen noch heute zahlreiche „lebende Fossilien" aus der Frühzeit der Angiospermen (s. HÜPPE & POTT 2007).

Nevada in Südspanien, die Pyrenäen, die Alpen, Apenninen, Karpaten, der Kaukasus sowie die gigantischen Gebirge des Himalaya und Karakorum. An den Westküsten Amerikas erhoben sich die Anden und die Gebirgsketten der Rocky Mountains. Auch große Grabensysteme bildeten sich, vor allem das Ostafrikanische Grabensystem, der Oberrhein-Rhone-Graben und der Baikal-Graben, als neue Ansatzstellen für die Aufspaltung kontinentaler Platten, wie man es schon am Roten Meer im Ostafrikanischen Graben sehen kann.

Im **Oligozän** wird es erneut kühler, und am Ende des **Miozäns** vor 5 Millionen Jahren verschwinden die Palmen aus Mitteleuropa. Schon im Oligozän vor etwa 30 Millionen Jahren setzt die erstmalige Vergletscherung der Antarktis ein, und im **Pliozän**, vor circa 2 Millionen Jahren, beginnt die Vereisung Grönlands. Dieser Klimawandel hatte natürlich für die Vegetation und Flora einschneidende Folgen: Schon während des **Eozäns** vor 53 bis 37 Millionen Jahren wuchsen in Mitteleuropa üppige tropische und subtropische Urwälder, Palmen waren bis nach Grönland und Alaska verbreitet (CERLING et al. 1997). Ein Blick zurück in die paläogenen Braunkohlenmoore zeigt uns noch einmal den sensationellen neuen Artenreichtum nach dem ersten Auftreten der Angiospermen: Über Waldtorf wachsen Bruchwälder aus *Sequoia*, *Sciadopitys* und *Taxodium*, den immergrünen oder teilimmergrünen Nadelbäumen in der oberen Baumschicht; darunter *Liquidambar*, *Nyssa, Rhus* und *Sabal* als Laubhölzer und Palmen zusammen mit Gebüschen aus *Myrica* und *Juniperus*. Epiphyten gibt es von den *Lygodium*-Farn-Lianen, den Tillandsien und den schmarotzenden Loranthaceen. *Osmunda*-Farne und Araceen-Pflanzen wuchsen am Waldboden. Wo es feuchter wird, bildeten *Phragmites* und *Cladium* mächtige Röhrichte über Schilf- und Seggentorf, und in den Verlandungszonen bilden *Nymphaea* und *Brasenia* dichte Seerosendecken, unter denen sich die Alligatoren verstecken (Abb. 13).

Als zu jener Zeit der südliche Kontinent in Südamerika, Afrika und Australien zerbrach, konnte sich eine kalte Meeresströmung rund um die Antarktis ausbilden, wodurch die Temperaturen am Ende des Eozäns drastisch abfielen. Im frühen Oligozän gab es danach keine

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

polaren Laubwälder mehr, und die Antarktis trug von nun an eine Eiskappe. Durch den Aufbau der Eisschilde wurden große Mengen Wasser gebunden, und der Meeresspiegel sank weltweit.

Durch die Drift der Kontinentalplatten und die Kontinentalverschiebung verbreiterten sich nachher sukzessive der Atlantische, der Indische und der Pazifische Ozean, während die Tethys weitgehend verschwand und das Mittelmeer als „Restmeer" übrig blieb. Dieses trocknete zu allem Überfluss am Ende des Neogen, im Miozän vor etwa 5,8 bis 5,4 Millionen Jahren aus als Folge einer Unterbrechung der Gibraltar-Verbindung mit dem Atlantischen Ozean, welche offenbar tektonisch bedingt war. In jener Zeit, in der Oberen Miozän-Stufe, waren besonders randliche Bereiche des heutigen Mittelmeeres teilweise trocken gefallen. Während dieser Periode bildeten sich in Gebieten des heutigen Siziliens, der Balearen, des südöstlichen Spaniens und der Umgebung des Tyrrhenischen Meeres bedeutende Ablagerungen von Evaporiten, vor allem Gipse und örtlich auch Salze (CERLING et al. 1997).

Nach der Stadt Messina in Süditalien wird der betreffende Zeitabschnitt von Geologen als Messinische Stufe oder **Messinium** bezeichnet. Aus der Separation des damaligen „Mittelmeeres" resultierte damals die **„Messinische Salinitätskrise"** mit einer starken Reduktion der Wassermassen des Mittelmeeres, das in dieser Zeit aus einem System von Salzseen bestand mit entsprechenden freigelegten Landmassen und Landbrücken, die für den damaligen Floren- und Faunenaustausch von großer Bedeutung waren. Die verstärkte Verdunstung des Meereswassers in dieser Zeit führte nun zum enormen Anwachsen der Gletscher auf den Polen und in den gerade entstandenen Hochgebirgen – ein erster Hinweis auf den Beginn der nachfolgenden Eiszeiten.

Evaporite bei Gela in Südsizilien sind jüngst als internationale Standardablagerungen definiert, wo wir den Beginn des jüngsten geologischen Zeitalters, das **Quartär** finden (Abb. 14). Hier haben GIBBARD et al. (2010) den Ort gefunden, wo die Belege für das Ende des Neogen und der Anfang des nachfolgenden Eiszeitalters liegen: Seit genau 2.588 bis 1.806 Millionen Jahren vor heute datieren wir das **Gelasium**, als die Temperaturen auf der Erde zu schwanken begannen, wie M. MILANKOVITCH (1941) berechnet hat. Die steten Wechsel zwischen Eiszeiten und Warmzeiten werden danach durch die zyklischen Wechsel in der Geometrie der Erdbahn um die Sonne beeinflusst und gesteuert. Zahlreiche Wechsel von Warm- und Kaltzeiten waren die Folge. Das Eiszeitalter, das **Pleistozän**, als jüngster Abschnitt der Erdgeschichte seit 1.8 Millionen Jahren ist nahezu weltweit durch mehrfach zyklische wechselnde Klimabedingungen charakterisiert. Kaltzeiten (Glaziale) wurden durch Warmzeiten (Interglaziale) mit entweder gleichen oder sogar höheren Temperaturen als heute voneinander getrennt (BURGA 2000; POTT 2008, 2010). Für Norddeutschland kennen wir beispielsweise sehr gut die letzten drei Vereisungen, die **Elster-Eiszeit** vor 385.000 bis 335.000 Jahren, die **Saale-Eiszeit** vor 300.000 bis 128.000 Jahren und die **Weichsel-Eiszeit** vor 117.000 bis 11.560 Jahren vor heute. Die Geestlandschaften Nordeuropas, die Moore, die Fluss- und Küstenmarschen sowie die Strandwälle, Düneninseln, Geestkerninseln, Halligen und Watten der südlichen Nordsee sind erst danach in ihrer heutigen Struktur entstanden (POTT 2003; KÜSTER 2004).

9. Das „Sechste Massensterben"

Was haben der Sibirische Tiger (*Panthera tigris altaica*), der Pandabär (*Ailuropoda melanoleuca*), die Seychellen-Nuss (*Lodoicea maldivica*) und die Nebrodi-Tanne (*Abies nebrodensis*) gemeinsam? Alle stehen auf den Roten Listen stark gefährdeter Arten. Die natürliche Biodiversität nimmt derzeit weltweit kontinuierlich ab. In den vergangenen 40 Jahren hat seit 1970 die globale Artenvielfalt somit um etwa 40 Prozent abgenommen, erdgeschichtlich

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

Abb. 13: Sumpflandschaften in den Everglades im Big Cypress National Preserve. Im Vordergrund ausgedehnte Röhrichte aus *Typha angustata* und *Cladium jamaicensis*. Im Hintergrund „Tree Island" auf erhöhten Kalkrücken, die man „Hard wood Hammoks" nennt, aus *Quercus virginiana, Bursera simaruba, Sideroxylon foetidissimum, Ocotea coriacea* sowie den Palmen *Roystonia regia und Sabal palmetto* (2003).

Abb. 14: Am Monte San Nicola bei Gela in Sizilien finden wir den „Locus classicus", die Grenze zwischen Neogen und Pleistozän vor 2.588 Millionen Jahren (Exkursion Institut für Geobotanik, 2011).

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

eventuell vergleichbar mit den Folgen vergangener Naturkatastrophen; nur heute wird der Mensch als Hauptverursacher für das aktuelle Massensterben auf der Erde angesehen. Hauptursachen für das derzeitige Geschehen sind Ausbeutung natürlicher Ressourcen, Lebensraumzerstörung, Flächenversiegelung und Überdüngung, mit dem Ergebnis des vielleicht aktuellen, sogenannten „Sechsten Massensterbens" auf der Erde. Um auf den weltweit akut drohenden Verlust der biotischen Vielfalt von Tieren und Pflanzen aufmerksam zu machen, haben die Vereinten Nationen das Jahr 2010 zum „Internationalen Jahr der Biologischen Vielfalt" erklärt. Damit sollen die Bedeutung der biologischen Vielfalt sowie die Folgen ihres Verlustes für die globale wirtschaftliche und humanpolitische Entwicklung stärker in das allgemeine Bewusstsein rücken.

Es ist heute nicht exakt bekannt, wie viele Arten derzeit auf der Erde leben. Schätzungen gehen von zirka 15 Millionen aus. Benannt und beschrieben sind etwa 1,75 Millionen Arten, auf ihre Gefährdung hin untersucht wurden allerdings bisher nur gut 40.000 Arten. Möglicherweise gibt es beispielsweise viel weniger Pflanzenarten auf der Erde als bisher angenommen. Zwar sind bislang etwa 1 Million Namen beispielsweise für Pflanzenarten vergeben, gesichert ist aber nur die Existenz von etwa 280000 Arten. Nach jahrelangen Vergleichen entpuppte sich eine große Zahl nur als Synonym oder gar als Variante für bereits bekannte oder beschriebene Pflanzen. Wir wissen aber auch, dass eine viel größere Zahl von Mikroorganismen, Pflanzen und Tieren derzeit auf der Erde zu finden ist, als wir kennen. Diese Arten sind noch unerforscht und ihre Zahl liegt wahrscheinlich zwischen 10 und 100 Millionen.

Erstmals hat der amerikanische Paläontologe Jack SEPKOSKI (1986) den Begriff des Massensterbens definiert. Aus der seitdem berühmten Sepkoski-Kurve (Abb. 15) lassen sich generell zwei Trends ableiten: Erstens hat die Artenvielfalt in geologischer Zeit ständig zugenommen – trotz kurzer Rückgänge nach den Massensterbeereignissen – und zweitens hat das periodische Aussterben in der Erdgeschichte der biologischen Evolution immer neue Schübe und Artenwechsel gegeben, und solche evolutiven Umbruchszeiten gehören zur natürlichen Dynamik unserer Erde (vgl. auch z.B. HALLAM & WIGNALL 1997, 1999; BAMBACH 2006).

Dass es Massensterben von Arten in der Evolution immer wieder gegeben hat, erkannte zuerst der französische Baron Georges Leópold Chrétien Frédéric Dagobert CUVIER (1769-1832). Am Pariser Naturkundemuseum entwickelte dieser zu Beginn des 19. Jahrhunderts die Theorie, dass Lebewesen mehrfach durch große Katastrophen vernichtet wurden (Kataklysmentheorie von 1817) und anschließend immer wieder aufs Neue entstanden. Wenn sich auch seine Ansichten nicht gegen die darwinischen Evolutionstheorien durchsetzen konnten, so waren seine sogenannten „Faunenschnitte" aus heutiger Sicht richtig, und er gilt zu Recht als wissenschaftlicher Begründer der Paläontologie und der Vergleichenden Anatomie.

Mindestens fünf größere Aussterbeereignisse in geologischer Zeit sind inzwischen identifiziert (s. Tab. 1). Sämtliche dieser sogenannten **„Big Five"** in der Geschichte des Lebens sind durch tiefe Einschnitte und unmittelbar anschließend erneuten Evolutionsschüben charakterisiert und fossil überliefert. Als Ursachen kommen immer in Frage: Kontinentaldrift, Vulkanausbrüche, Klimawandel mit CO_2- und Methanfreisetzung (vgl. WIGNALL 2001; LARSON 1991; SCOTESE 2004), sowie Klimawandel mit Erderwärmung (s. HARRIES & LITTLE 1999; TAKASHIMA et al. 2006).

Neu beim derzeitigen sogenannten sechsten Artensterben ist aber die Tatsache, dass der Mensch durch die unkontrollierte Zerstörung und Beeinträchtigung der natürlichen Lebensräume der Erde direkt oder indirekt die Ursache des aktuellen drastischen Artenrückgangs ist (z.B. LOVEJOY 1980; PIECHOCKI 2011). Der weltweit zu beobachtende alarmierende Rückgang der biotischen Vielfalt zeigt sich direkt am Verlust an Arten, - besonders der Säugetiere -, und an Lebensräumen. So verarmt die Natur und damit sind die Lebensgrundlagen der Men-

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

schen bedroht. Verloren gegangene Biodiversität lässt sich nicht wieder herstellen – der Verlust vor allem aus evolutionsbiologischer Sicht ist irreversibel. Wir löschen gerade die „Festplatte der Natur“. Das wird uns gerade heute besonders deutlich bei der irreversiblen Zerstörung der tropischen Regenwälder des Amazonas-Gebietes vor Augen geführt: Die Wälder des Amazonas beherbergen derzeit die höchste Biodiversität aller terrestrischen Ökosysteme der Erde. Sie existieren dort seit 55 Millionen Jahren seit dem Paläogen (MORLEY 2004; HOORN & WESSELING 2010; STROPP 2011). Vergleichbares gilt für die alten tropischen Tieflands- und Bergwälder im Staat Queensland in Australien (HEISE-PAVLOV et al 2008; HÜPPE & POTT 2007).

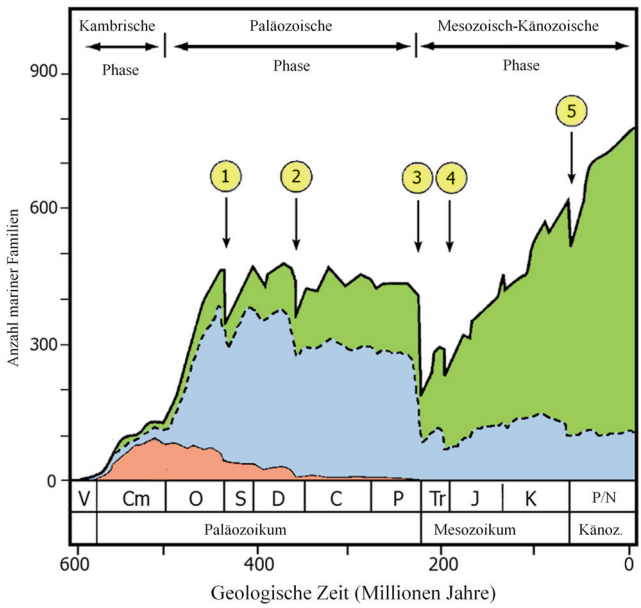

Abb. 15: Die „Big Five“-Massenaussterbeereignisse in der Zeit vom Kambrium bis zum Neogen (verändert nach SEPKOSKY 1996, http://en.wikipedia.org./wiki/Extinction_event.)

Vielfach wird das derzeitige Artensterben auch mit den großen Massenaussterbeereignissen der Erdvergangenheit verglichen und in ihrer Wirkung gleichgesetzt. Der bedeutendste Unterschied früherer Massensterben in geologischer Zeit zur derzeitigen Situation ist aber der, dass heute nur der Mensch mit seinen Aktivitäten und seinem Raum- und Ressourcenanspruch als Verursacher in Frage kommt. Die Weltbevölkerung umfasste beim Jahreswechsel 2012/2013 rund 7,1 Milliarden Menschen (Abb. 16). Man erwartet bis zum Jahre 2025 etwa 8 Milliarden Menschen; und wir haben nicht einen Quadratmeter Erdoberfläche mehr!

10. Das Anthropozän

Überall auf der Erde sind heutige Kulturlandschaften das Produkt einer langen Folge von zivilisatorischen Prozessen. Von Menschen geschaffene und beeinflusste Kulturlandschaften sind im Laufe der letzten 10 Jahrtausende, seit dem Neolithikum, aus natürlichen Lebensräumen hervorgegangen. Mit zunehmender Technisierung war der Mensch in der Lage, sich mehr und mehr über natürliche Bedingungen und Grenzen in der Landschaft hinwegzusetzen und sie weitgehend nach seinen Plänen und Zwecken zu gestalten. Im Zusammenhang mit den wachsenden technischen Möglichkeiten, sich Landschaft und Vegetation dienstbar zu machen, änderte sich auch die geistige Einstellung des Menschen gegenüber seiner Umwelt:

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

Er versteht sich nicht mehr als Glied der Natur sondern als ihr Beherrscher, und genau wie er hat die Natur dem Fortschritt zu dienen. Das schrieb mein akademischer Lehrer Ernst BURRICHTER schon im Jahre 1977 (BURRICHTER 1977)! Der moderne Mensch ist bereit, die Natur seinen ökonomischen Zielsetzungen unterzuordnen. Der italienische Geologe Antonio STOPPANI schuf bereits im Jahre 1873 für dieses Verhalten der industrialisierten Gesellschaft den Begriff des **Anthropozän** für die Fähigkeit des Menschen, es „mit den großen Gewalten der Natur aufzunehmen" (CRUTZEN 2002). Die globalisierte Land- und Forstwirtschaft steht dafür Beispiel.

Das **Anthropozän**, also die vom Menschen seit Beginn des Neolithikums oder seit der Industrialisierung geprägte neue erdgeschichtliche Epoche, steht aber auch als Ausdruck für die Gefahr, die Umweltbedingungen, wie sie in den vergangenen zwölftausend Jahren im Holozän, nach dem Ende der letzten Weichseleiszeit, geherrscht haben, unumkehrbar zu zerstören (CRUTZEN & STOERMER 2000).

„Die Zukunft, die wir wollen", so lautete das Motto des letzten globalen Umweltgipfels in Rio de Janeiro im Juni 2012. Doch dieses „wir" täuschte nur eine Gemeinsamkeit von Werten aller Nationen der Erde vor, die auch zwanzig Jahre nach dem Erdgipfel von „Rio 1992" in vielen Kulturen differenziert gesehen wird. Nachhaltige Umweltpolitik wird auch von manchen wohlhabenden Staaten, die sie sich leisten könnten, abgelehnt oder zumindest nicht förderlich behandelt. Bei den heutigen Nachhaltigkeitszielen geht es darum, Wachstumsgrenzen zu definieren und günstigstenfalls auch messbar festzulegen. Naturräume sollen einen geldwerten, also pekunären Preis erhalten und in Bilanzen auftauchen. Artenschwund soll in finanziellen Bilanzen erscheinen, die Obergrenzen schädlicher Emissionen sollen definiert und festgelegt werden (z. B. BALMFORD et al. 2002; BALMFORD & BOND 2005; BALMFORD & COWLING 2006; SUKHDEV 2008; KUMAR 2010). Das sind neue ökonomische Forderungen und Notwendigkeiten der globalen humanen Zivilisation.

Abb. 16: Weltbevölkerung am 1. Januar 2013 um 15 Uhr, Weltuhr, Hannover.

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

Denn bei uns in Westeuropa und in den USA ging es schon vor einem halben Jahrhundert richtig los mit dem Massenkonsum und der permanenten Ausweitung exploitierter Landschaften. Die Kehrseite dieses Aufstiegs bildeten exponentielle Steigerungsraten im Material- und Energieverbrauch, bei den Emissionen und beim Abfall – genau wie jetzt in den Schwellenländern. Das zugrunde liegende Prinzip ist simpel: Es gibt in Wachstumswirtschaften viel mehr Treiber für Entwicklung als für Nachhaltigkeit. Während heute jeden Tag 50.000 Hektar Wald gerodet werden, Arten verschwinden und 350.000 Tonnen Fisch aus dem Meer geholt werden, kaufen Investoren überall auf der Welt Land auf. Zugleich wird mehr denn je zuvor gebohrt, gefördert, planiert, gerodet und konsumiert, die Anbauflächen, die großindustriell mit Pflanzen bebaut werden, werden ausgedehnt, um kurzfristig höhere Erträge zu erzielen. Das ist mehr, als eine nachhaltige Nutzung erlauben würde. Diese expansiven Strategien werden desto mehr intensiviert, je deutlicher die Knappheiten zunehmen (vgl. u.a. HABER 2008).

Mit der **AGENDA 21** – dem globalen Aktionsprogramm für das 21. Jahrhundert –, welches auf der Konferenz der Vereinigten Nationen für Umwelt und Entwicklung (UNCED) im Juni 1992 in Rio de Janeiro damals von fast allen 180 Teilnehmerstaaten ratifiziert worden war, gibt es nun ein international getragenes Aktionsprogramm zum Schutz und zum Erhalt der globalen Biodiversität, das von Beginn an von vielen als wichtigstes völkerrechtliches Dokument seit der Deklaration der Menschenrechte im 18. Jahrhundert angesehen wird. Diese **Rio-Deklaration** von 1992 ging zurück auf den Bericht einer von der UNO eingesetzten „Weltkommission für Umwelt und Entwicklung“ unter der Leitung der damaligen norwegischen Ministerpräsidentin Go Harlem BRUNDTLAND (s. BRUNDTLAND-REPORT 1987). Dies war übrigens keine völlig neue politische Strömung: Schon Ende der 1960er Jahre wurde in den USA ein erstes umfassendes Modell der Weltentwicklung erarbeitet, welches damals vom **„Club of Rome“** aufgegriffen und mit dem Buch von Dennis MEADOWS et al. (1972): „Die Grenzen des Wachstums“ allgemein bekannt wurde.

Die Ursachen für den derzeit starken Schwund der Biodiversität weltweit sind unterschiedlich: Man kann zwischen unmittelbaren Direktwirkungen, beispielsweise vor allem den großflächigen Waldrodungen in den Tropen und Subtropen sowie in den borealen Regionen und den mittelbaren Gründen unterscheiden. Ein mittelbarer Grund ist sicherlich der Anstieg der Erdbevölkerung mit dem gestiegenen Ressourcenbedarf, speziell dem höheren Bedarf an Bodenfläche, Energie, Rohstoffen und Nahrungsmitteln. Als unmittelbare Hauptursachen für den Rückgang der Biodiversität werden heute angegeben:

- Biotopzerstörung und -veränderung,
- Unkontrollierte Jagd und Fischfang,
- Umweltbelastungen von Boden, Wasser und Luft,
- Verdrängung durch invasive Arten.

Meist liegen Kombinationen verschiedener Ursachen vor und oft ist es nicht einfach, natürliche und anthropogene, also vom Menschen verursachte Komplexwirkungen zu unterschieden (STEFFEN et al. 2007; POTT 2008, 2010; KOWARIK 2010; VÖRÖSMARTY et al. 2010).

Nachdem anfangs die Aufmerksamkeit besonders der Naturraumbedrohung tropischer Landökosysteme, vor allen der Regenwälder und der Zerstörung der Korallenriffe galt, sind mittlerweile auch die Ozeane, die Meere, Inseln, Wüsten, die Antarktis und selbst die Arktis in den Fokus gerückt. Die Unterzeichner der Biodiversitätskonvention von 1992 haben sich vor allem verpflichtet, die natürliche Biodiversität des gesamten Globus zu erhalten, einen nachhaltigen Umgang mit ihr zu pflegen und die genetischen Ressourcen der Erde fair zu verteilen. So ist erstmals ein weltweites politisches Mandat entstanden, welches neben dem Kli-

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

maschutz die zentrale Umweltaufgabe für das 21. Jahrhundert bildet (s. auch POTT 1998; EHLERS 2008; HABER 2003, 2011; GROBER 2010; RADKAU 2011, 2012).

Die derzeitige Aussterberate der Lebewesen übertrifft die vermutete natürliche Rate heute um das 100-1000-fache und ist durch menschliches Handeln bedingt. Die Neuentwicklungsrate von Arten im Rahmen der biologischen Evolution ist dagegen vergleichsweise sehr klein. Geht man beispielsweise von einer globalen Artenzahl von 10 Millionen und von einer durchschnittlichen Überlebensdauer einer Art von einer bis 10 Millionen Jahren aus, dürften auf Grund der natürlichen Prozesse pro Jahrhundert lediglich 100 bis 1000 Arten (0,001-0,01%) verloren gehen. Die gegenwärtig zu beobachtende Verlustrate beispielsweise für Vögel und Säugetiere von etwa 1 Prozent pro Jahrhundert liegt also um den Faktor 100-1000 über der natürlichen Aussterberate. Auf Grund ungenauer Schätzungen der globalen Artenvielfalt sind jedoch Aussagen über die globale Gefährdungssituation deshalb auch nur näherungsweise möglich. Nach der Roten Liste der Weltnaturschutzorganisation IUCN von 2006 sind 20-23 Prozent der Säugetiere, 12 Prozent der Vögel und 31 Prozent der Amphibien weltweit derzeit akut gefährdet.

Auch zahlreiche Ökosysteme sind konkret bedroht: 60 Prozent aller Ökosysteme und die damit verbundene Ökosystemleistungen, die das menschliche Überleben sichern, haben in den vergangenen Jahren große Schäden genommen. Das betrifft vor allem die natürlichen Waldgesellschaften der Erde und die marinen Lebensräume. Ihre Zukunft ist mit der Zukunft des Menschen auf unserem Globus untrennbar verbunden.

11. Literatur

ARBER, E. A. N. & J. PARKIN (1907): On the origins of angiosperms. – Journal of the Linnean Society of Botany **38**: 29-80.

ARCHANGELSKY, S. (1990): Plant distribution in Gondwana during the Late Paleozoic. In: TAYLOR, T. N. & E. L. TAYLOR (eds): Antarctic paleobotany: its role in the reconstruction of Gondwana, pp 102-117, Springer, New York.

ARMBRUSTER, W. S. (1992): Phylogeny and the evolution of plant-animal interactions. – Bioscience **42**: 12-20.

AXELROD, D. J. (1966): Origin of deciduous and evergreen habitats in temperate forests. – Evolution **20**: 1-15.

BALMFORD, A. & W. BOND (2005): Trends in the state of nature and implications for human well-being. – Ecology Letters **8**: 1218-1234.

BALMFORD, A., BRUNER, A., COOPER, S., COSTANZA, R., FARBER, S., GREEN, R. E., JENKINS, M., JEFFERISS, P, JESSAMY, V., MADDEN, J., MUNRO, K., MYERS, N., NAEEM, S., PAAVOLA, J., RAYMENT, M. TRUMPER, S. & R. K. TURNER (2002): Economic reasons for conserving wild nature. – Science **297**: 950-953.

BALMFORD, A. & R. M. COWLING (2006): Fusion of failure? The future of conservation biology. – Conserv. Biol. **20**: 692-695.

BAMBACH, R. (2006): Phanerozoic Biodiversity Mass Extinctions. – Ann. Review of Earth and Planetary Sciences **34**(1): 127-155. DOI: 11.1146annurev.earth.33.092203.122654.

BARNOSKY, A. D., MATZKE, N., TOMIYA, S., WOGAN, G. O. U., SWARTZ, B., QUENTAL, T. B., MARSHALL, C., MCGUIRE, J. L., LINDSEY, E. L., MAGUIRE, K. C., MERSEY, B. & E. A. FERRER (2011): Has the Earth s sixth mass extinction already arrived? – Nature **471**: 51-57.

BARTHLOTT, W. (1998): The uneven distribution of global biodiversity. In: EHLERS, E. & T. KRAFT (eds.) German Global Change Research 1998, p. 36.

BARTHLOTT, W., MUTKE, J., BRAUN, G. & G. KIER (2000): Die ungleiche globale Verteilung pflanzlicher Artenvielfalt – Ursachen und Konsequenzen. – Ber. d. Reinh. Tüxen Ges. **12**: 67-84. Hannover.

BATEMAN, R. M., CRANE, P. R., DIMICHELE, W. A., KENRICK, P, ROWE, N. P. & T. SPECK (1998): Early evolution of land plants: phylogeny, physiology, and ecology of the primary terrestrial radiati-

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

on. – Annual Review of Ecology and Systematics **29**: 263-292.
BECK, C. B. (ed., 1988): Origin and evolution of gymnosperms. 504 S., Columbia University Press, New York.
BEIERKUHNLEIN, C. (2001): Die Vielfalt der Vielfalt – Ein Vorschlag zur konzeptionellen Klärung der Biodiversität. – Ber. d. Reinh. Tüxen Ges. **13**: 103-118. Hannover.
BERGGREN, W. A. & J. A. VAN COUVERING (1986): Catastrophes and Earth history. The new uniformitarism. Woods Hole Oceanographic Institution Symposium, Princeton University Press, Princeton/NJ.
BERNER, R. A. (1997): The rise of plants and their effect on weathering and atmospheric CO_2. – Science **276**: 544-546.
BOX, E. (2000): Biodiversität Nordamerikas. – Ber. d. Reinh. Tüxen Ges. **12**: 223-239. Hannover.
BRECKLE, S.-W. (2000): Biodiversität von Wüsten und Halbwüsten. – Ber. d. Reinh. Tüxen Ges. **12**: 207-222. Hannover.
BROUTIN, J. & H. KERP (1994): Aspects of Permian palaeobotany and palynology. XIV. A new form-genus of broad-leaved Late Carboniferous and Early Permian northern hemisphere coniferns. – Rev. Palaeobot. Palynol. **83**: 241-251.
BRUNDTLAND-REPORT (1987): Unsere gemeinsame Zukunft – Der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung. Hrsg.: HAUFF, v. Eggenkamp Verlag, Greven.
BRYANT, E. (1997): Climate process and change. Cambridge University Press, Cambridge.
BURGA, C. A. (2000): Natürliche Änderungen der Phyto-Biodiversität in der Erdgeschichte. – Ber. d. Reinh. Tüxen Ges. **12**: 173-185. Hannover.
BURNETT, M., AUGUST, P. V., BROWN, J. H. and K. T. KILLINGBECK (1998): The influence of geomorphological heterogenity on biodiversity. I. Patch-scale perspective. – Conserv. Biol. **12**: 363-370.
BURRICHTER, E. (1977): Vegetationsbereicherung und Vegetationsverarmung unter dem Einfluss des prähistorischen und historischen Menschen. – Natur und Heimat **37**,2: 46-51. Münster.
BYATT, A., FOTHERGILL, A. & M. HOLMES (2001): Unser blauer Planet. 3 DVDs – Eine Naturgeschichte der Meere. Egmont, Köln.
CARSON, R. (1962): Silent Spring. 1st publ., 365 S., Houghton Mifflin.
CATTOLICO, R. A. (1986): Chloroplast evolution in algae and land plants. – Tree I: 64-66.
CERLING, T. E., HARRIS, J. M., MACFADDEN, B. J., LEAKEY, M. G., QUADE, J., EISENMAN, V. & J. R. EHLERINGER (1997): Global vegetation change through the Miocene/Pliocene boundary. – Nature **389**: 153-158.
CHALONER, W. G. (1970): The rise of first land plants. – Biological reviews **45**: 353-377.
CHASE, M. W., SOLTIS, D. E. & R. G. OMSTEDT (1993): Phylogenetics of seed plants: an analysis of nucleotide sequences from the plastid gene rbe L., Ann. – Missouri Bot. Garden **80**: 528-580.
CHOPLEY, J. (2001): The evolution of the atmosphere. – Nature **410**: 862-864.
COLLINSON, M. E. (1990): Plant evolution and ecology during the early Cainozoic diversification. – Advances in Botanical Research **17**: 1-98.
CONDIE, K. C. (2011): Earth as an Evolving Planetary System. 2nd Ed., Academic Press, London.
CONDIE, K. C. & R. E. SLOAN (1998): Origin and evolution of Earth. Principles of Historical Geology, 485 S., Prentice Hall/NJ.
CRANE, P.R., FRIIS, E. M. & K. R. PEDERSEN (1995): Angiosperm diversification and palaeolatitudinal gradients in cretaceous floristic diversity. – Science **246**: 675-678.
CRANE, P.R., FRIIS, E. M. & W. G. CHALONER (2010): Darwin and the evolution of flowers. – Phil. Trans. R. Soc. London Biol. Sci. **365**: 347-350.
CRUTZEN, P. (2002): Geology of mankind. – Nature **415**(6867): 23. doi:10.1038/415023aPMID11780095.
CRUTZEN, P. & E. F. STOERMER (2000): The Anthropocene. – Global Change Newsletter **41**: 17-18.
CUVIER, G. L. (1817): La régne animal; distribute d aprés son organization; pour server de base á l histoire naturelle des animaux et d introduction á l anatomic compare. 4 Bände, Paris (Brockhaus, Leipzig, 1831-1843, deutsch).
DIERßEN, K. (2000): Zur Biodiversität borealer und arktischer Vegetationskomplexe. – Ber. d. Reinh. Tüxen Ges. **12**: 335-350. Hannover.
EHLERS, E. (2008): Das Anthropozän. Die Erde im Zeitalter des Menschen. 284 S., Wiss. Buchgesellschaft, Darmstadt.
ENDRESS, P. K. (2010): The evolution of floral biology in basal angiosperms. – Phil. Trans. R. Soc. Lon-

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

don Biol. Sci. **365**: 411-421.
ERTMER, W. (2012): Raum, Zeit und Raum-Zeit. Eine Reise durch die Zeit von Newton bis Einstein. – Uni-Magazin **3/4**: 4-7. Leibniz Universität Hannover.
FERNANDEZ, J. & A. PLASTINO (1997): Dynamical mechanisms for biological evolution. – Physical Review, PACS Nr. 87.10, Vol. **56**,1: 842-847.
FRIIS, E.M., CHALONER, W. G. & P. R. CRANE (1997): The origins of angiosperms and their biological consequences. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
FRIIS, E.M., PEDERSEN, K. R. & P. R. CRANE (2010): Diversity in obscurity: fossil flowers and the early history of angiosperms. – Phil. Trans. R. Soc. London Biol. Sci. **365**: 389-392.
GIBBARD, P. L., HEAD, M. J., WALKER, M. J. C. & THE SUBCOMMISSION OF QUARTERNARY STRATIGRAPHY (2010): Formal ratification of the Quarternary System / Period and the Pleistocene Series / Epoch with a base at 2.58 Ma. – Journal of Quarternary Science **25**: 96-102.
GRISEBACH, A. (1872): Die Vegetation der Erde nach ihrer klimatischen Anordnung. Ein Abriss der vergleichenden Geographie der Pflanzen. 2 Bde. 601 S. und 709 S., Wilhelm Engelmann, Leipzig.
GROBER, U. (2010): Die Entdeckung der Nachhaltigkeit: Kulturgeschichte eines Begriffs. 298 S., Kunstmann, München.
HABER, W. (2003): Biodiversität – ein neues Leitbild und seine Umsetzung in die Praxis. Sächsische Landesstiftung Natur und Umwelt. Vortragsveranstaltung am 30. Oktober 2002 im Blockhaus, Dresden.
HABER, W. (2008): Naturschutz und Kulturlandschaften im Widerspruch. – Ber. d. Reinh. Tüxen Ges. **20**: 23-34. Hannover
HABER, W. (2011): Ökologie – eine Wissenschaft unbequemer Wahrheiten. – Ber. d. Reinh. Tüxen-Ges. **23**: 7-27, Hannover.
HAEUPLER, H. (2000): Biodiversität in Zeit und Raum – Dynamik oder Konstanz? – Ber. d. Reinh. Tüxen Ges. **12**: 113-129. Hannover.
HALLAM, A. & P. B. WIGNALL (1997): Mass-extinctions and their aftermath. 320 S., Oxford Univ. Press, New York.
HALLAM, A. & P. B. WIGNALL (1999): Mass-extinctions and sea-level changes. – Earth Science Reviews **48**: 217-250.
HAMBLIN, W. K. & E. H. CHRISTIANSEN (1998): Earth s dynamic systems, 8th ed., Prentice Hall, New Jersey.
HARRIES, P. J. & C. T. S. LITTLE (1999): The early Toarcian (Early Jurassic) and the Cenomanian-Turonian (Late Cretaceous) mass extinctions: Similarities and contrasts. – Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology **154**: 39-66.
HEISE-PAVLOV, S., HÜPPE, J. & R. POTT (2008): Revisiting factors affecting deciduousness in tropical rainforests at a study site in coastal lowland rainforest in NE-Australia. – Phytocoenologia **38**,3: 213-219.
HOORN, C. & F. P. WESSELINGH (2010): Amazonia landscape and species evolution: A look into the past. 447 S., Wiley-Blackwell.
HÜPPE, J. & R. POTT (2007): Die Regenwälder von Queensland – Where the rainforest meets the reef. – Ber. d. Reinh. Tüxen-Ges. **19**: 91-116, Hannover.
KERP, H. & H. HASS (2009): Ökologie und Reproduktion der frühen Landpflanzen. – Ber. d. Reinh. Tüxen-Ges. **21**: 111-127, Hannover.
KLÖTZLI, F. (2000): Savannen – in globaler Betrachtung. – Ber. d. Reinh. Tüxen Ges. **12**: 31-63. Hannover.
KÖRNER, C. (2012): Biodiversität – Fundament für Leben und Ökosysteme. – Naturwissenschaftliche Rundschau **65**,4: 169-174.
KOWARIK, J. (2010): Biologische Invasionen. Neophyten und Neozoen in Mitteleuropa. 2. Aufl., 492 S., Ulmer, Stuttgart.
KUMAR, P. (2010): The Economics of Ecosystems and Biodiversity – Ecological and Economic Foundations. 410 S., Earthscan Publ. London, Washington DC.
KÜSTER, H. (2004): Die Ostsee. Eine Natur- und Kulturgeschichte. 2. Aufl., 357 S., Verlag C. H. Beck, München.
LARSON, R. L. (1991): Geological consequences of superplumes. – Geology **19**: 963-966.
LINSENMAIR, K. E. (2000): Funktionale Aspekte der Biodiversität. – Ber. d. Reinh. Tüxen Ges. **12**: 85-100. Hannover.

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

LOVEJOY, T. E. (1980): Changes in biological diversity. – In: The Global 2000 Report to the President. Vol. 2 (The Technical Report), Harmandsworth, Penguin Books.

LÜPNITZ, D. (2000): Die Biodiversität australischer Lebensräume. – Ber. d. Reinh. Tüxen Ges. **12**: 283-318. Hannover.

MEADOWS, D., MEADOWS, D., ZAHN, F. & P. MILLING (1972): Die Grenzen des Wachstums. Der Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit. Deutsche Verlagsgesellschaft, Stuttgart.

MILANKOVITCH, M. (1941): Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitproblem. – Acad. Royal Serb. Spec. Sect. Science Math. et Nat. Tom **83**, Stamparija Mihaila Curcica.

MILLER, S. L. (1953): A Production of Amino Acids under Possible Primitive Earth Conditions. – Science **117**, 3046.

MORGAN, W. J. (1972): Plate motions and deep mantle convection. – The American Association of Petroleum Geologists Bulletin **56** (2): 203-213.

MORLEY, R. J. (2004): Origin and Evolution of tropical rain forests, 3rd reprint, Wiley & Sons, New York.

MUELLER-DOMBOIS, D. (2000): Die Vegetation der pazifischen Inseln im tropischen Bereich. – Ber. d. Reinh. Tüxen Ges. **12**: 373-388. Hannover.

PIECHOCKI, R. (2011): Biodiversität – Gesellschaftliches Bewusstsein in Europa. – Naturw. Rundschau **64**,3: 148-149.

POTT, R. (1998): Vegetation Analysis. In: AMBASHT, R. S. (ed.): Modern Trends in Ecology and Environment, pp 55-89, Backhuys Publ. Leiden, Netherlands.

POTT, R. (2003): Die Nordsee – Eine Natur- und Kulturgeschichte. 351 S., Verlag C. H. Beck, München.

POTT, R. (2005): Allgemeine Geobotanik, Biogeosysteme und Biodiversität. 652 S., Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

POTT, R. (2008): Klimawandel in der Erdvergangenheit und Gegenwart. – Abhandl. d. Braunschw. Wiss. Ges. **59**: 73-109, Braunschweig.

POTT, R. (2010): Klimawandel im System Erde. – Ber. d. Reinh. Tüxen-Ges. **22**: 7-33, Hannover.

POTT, R. (2011): Biogeosysteme und Biodiversität – Das Netzwerk der Biotischen Vielfalt auf der Erde. – Akad. Geowiss. Geotechn. **28**: 103-112, Hannover.

POTT, R. (2012): Die biologische Evolution. Klimatische und geologische Veränderungen bringen botanische Vielfalt hervor. – Uni-Magazin **3/4**: 12-19. Leibniz Universität Hannover.

POTT, R., FREUND, H., PETERSEN, J. & G. R. WALTHER (2003): Aktuelle Aspekte der Vegetationskunde. – Tuexenia **23**: 11-39, Göttingen.

POTT, C., KRINGS, M. & H. KERP (2008): The Carnian Clate Triassic flora from Lunz in Lower Austria: Paleoecological considerations. – Palaeoworld **17**: 172-182.

RADKAU, J. (2011): Die Ära der Ökologie. Eine Weltgeschichte. 750 S., C. H. Beck, München.

RADKAU, J. (2012): Natur und Macht: Eine Weltgeschichte der Umwelt. 2. Aufl., 469 S., C. H. Beck, München.

REICHHOLF, J. H. (2012): Naturgeschichte(n), über fitte Blesshühner, Biber mit Migrationshintergrund und warum wir die Umwelt im Gleichgewicht wünschen. 319 S., Randon House, München.

SCHEPER, T. (2012): Vom Atom zum Leben. Die chemische Evolution. – Uni-Magazin **3/4**: 8-11. Leibniz Universität Hannover.

SCOTESE, C. R. (2004): A continental drift flipbook. – Journ. of Geology **112**: 729-741.

SEPKOSKI, J. J. (1986): Phanerozoic overview of mass extinction. In: RAUP, D. M. & D. JABLONSKI (eds.): Patterns and Processes in the History of Life, 277-295, Springer, Berlin.

STEFFEN, W., CRUTZEN, P. J. & MCNEILL, J. R. (2007): The Anthropocene: are humans now overwhelming the great forces of nature? – Ambio **36**, 614-621.

STEWART, W. N. & G. W. ROTHWELL (1993): Palaeobotany and the Evolution of Plants. 2nd ed., 521 pp, Cambridge.

STOPPANI, A. (1873): Corso di Geologica, 3 Bde., Cogliati, Milano.

STORCH, V., WEISCH, U. & M. WINK (2001): Evolutionsbiologie. 446 S. Springer Verlag Heidelberg, Berlin, New York.

STROPP, J. (2011): Towards an understanding of tree diversity in Amazonian forests. Proefschrift Univ. Utrecht. 160 S., Proefschriftenmaken.nl.

STROTHER, P. K., BATTISON, L., BRASIER, M. D. & C. H. WELLMAN (2011): Earths earliest non-marine eukaryotes. – Nature **473**: 505-509.

SUKHDEV, P. (2008): The Economics of Ecosystems and Biodiversity – Studie, Zwischenbericht, Euro-

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

päische Gemeinschaft.
SUN, G., DILCHER, D. L., ZHENG, S. & Z. ZHOU (1998): In search of the First Floor: A Jurassic Angiosperm, *Archaefructus*, from Northeast China. – Science **282**: 1692-1695.
TAKASHIMA, R., NISHI, H., HUBER, B. T. & M. R. LECKIE (2006): Greenhouse World and the Mesozoic Ocean. – Oceanography **19**: 64-74.
VÖRÖSMARTY, C. J., MCINTYRE, P. B., GESSNER, M. O., DUDGEON, D., PRUSEVICH, A., GREEN, P., GIDDEN, S., BUNN, S. E., SULLIVAN, C. A., REIDYLIERMANN, C. & M. P. DAVIES (2010): Global threats to human water security and river biodiversity. – Nature **467**, 555-561.
WEGENER, A. (1912): Die Herausbildung der Großformen der Erdrinde (Kontinente und Ozeane) auf geophysikalischer Grundlage. – Petermanns Geographische Mitteilungen **65**: 185-195, 253-256, 305-309. Präsentiert auf der Jahrestagung der Deutschen Geolog. Ges. am 6.1.1912 in Frankfurt/M.
WEGENER, A. (1915): Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. Mit handschriftlichen Bemerkungen von Alfred Wegener, Notizen und Briefen sowie neu erstelltem Index. Hrsg.: Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung. Vieweg, Braunschweig 1915, 1929; Bornträger Berlin 2005 (Repr. D. 4. Aufl.).
WEGENER, A. (1921): Die Entstehung der Mondkrater. 48 S., Vieweg & Sohn, Braunschweig.
WELLMAN, C. H. (2010): The invasion of the land by plants: When and where? – New Phytologist **188**: 306-309.
WHITE, M. (1998): The Greening of Gondwana, the 400 Million Year story of Australian Plants. 3rd ed., 256 pp, Rosenberg Publ.
WIGNALL, P. B. (2001): Large igneous provinces and mass extinctions. – Earth-Science Reviews **53**: 1-33.
WILDPRET DE LA TORRE, W. & V. E. MARTIN OSORIO (2000): Biodiversität der Kanarischen Inseln am Beispiel der Insel Fuerteventura. – Ber. d. Reinh. Tüxen Ges. **12**: 253-262. Hannover.

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. Richard Pott, Institut für Geobotanik, Leibniz Universität Hannover, Nienburger Str. 17, D-30167 Hannover

pott@geobotanik.uni-hannover.de

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Berichte der Reinhold-Tüxen-Gesellschaft

Jahr/Year: 2013

Band/Volume: 25

Autor(en)/Author(s): Pott Richard

Artikel/Article: Biodiversitätskrise und das "Sechste Massensterben" auf der Erde? 7-36