

Die biologische Evolution

KLIMATISCHE UND GEOLOGISCHE VERÄNDERUNGEN BRINGEN BIOTISCHE VIELFALT HERVOR

Die natürliche Evolution hat mit den Dinosauriern und Walen die mächtigsten Tiere geschaffen, die die Erde je bewohnt haben. Und mit winzigen Spitzmäusen, hummelgroßen Kolibris und stechnadelkopfkleinen Taufiegen hat sie Formen hervorgebracht, die sich trotz ihrer Zwergenhaftigkeit genauso perfekt in der Welt orientieren und bewegen wie die Riesen.¹

Die faszinierende biologische Evolution seit der Entstehung der Erde beleuchtet ein Wissenschaftler des Instituts für Geobotanik.

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. Rund siebenzig 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.

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 Nach-

barplaneten 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 5.900 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.

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. 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.

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. 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.

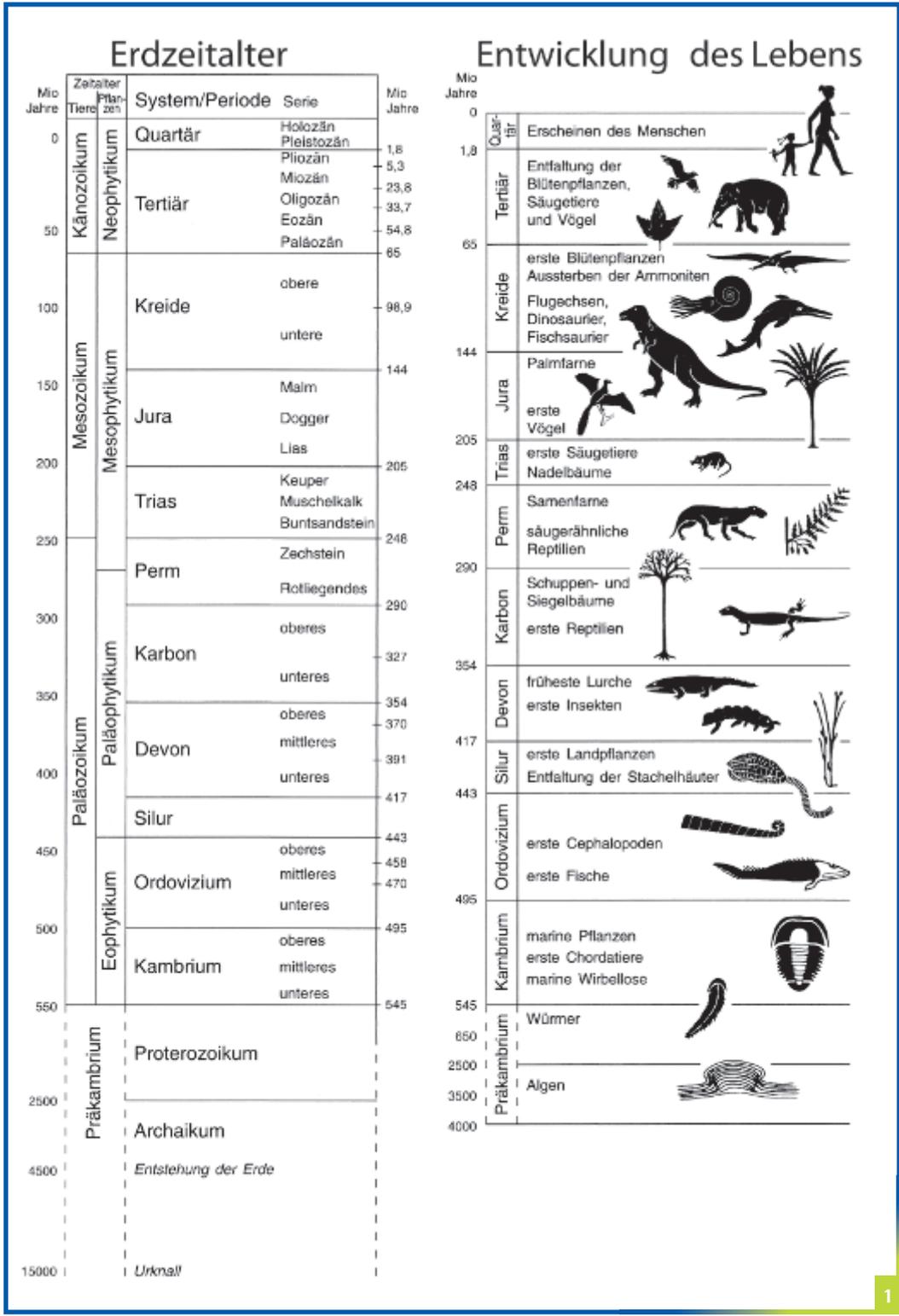


Abbildung 1
 Übersicht über die geologischen Epochen und die Entwicklung des Lebens.
 Quelle: R. Pott 2005, nach Verlag Dr. F. Pfeil, © Wissenschaftlicher Verlag, München

Das älteste datierbare, durch Wasser geformte Sedimentgestein der Erde lässt vermuten, dass die ersten Ozeane vor 3,8 Milliarden Jahren entstanden sind.

Heute sind etwas über 70 Prozent der Erdoberfläche von Wasser bedeckt, und die Ozeane haben eine komplizierte Topographie aus Ozeanbecken, Gräben und unter-

meerischen Gebirgen. Wie ist so etwas zu erklären? Nach den heutigen Erkenntnissen waren vom Karbon vor etwa 350 Millionen Jahren bis noch in der Triaszeit vor rund 220

1 Molloy, 2003

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

len 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.

In der nachfolgenden geologischen Epoche des **Kambrium** ab etwa 540 Millionen waren mit Ausnahme der Wirbeltiere 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.

Beginnend vor etwa 550 Millionen Jahren im Kambrium also kam es offenbar durch

Abbildung 2
Trilobiten sind die Leitfossilien der Erdepochen vom Kambrium bis zum Karbon vor etwa 330 Millionen Jahren. Im Ordovizium erreichten sie ihre höchste Formenvielfalt. Links (2a): *Phacops rana crassituberculata*, rechts (2b): *Ceratrages spec.*
Quelle: R. Pott, 2005; Foto: Daniel Grzegorzcyk, Münster



in den Süden Eurasiens eingefügt ist. Auch Nord- und Südamerika stießen durch Driftbewegungen zusammen.

Der schalenförmige Aufbau des Erdinnern ist ja hinlänglich bekannt: Die auf der zähflüssigen Schmelze des Erdmantels driftenden Kontinentalplatten reichen tief in den Erdmantel hinein. Nach der geologischen Hypothese der **Plattentektonik** ist die Erdkruste also in verschiedenen 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 Erdbebenwel-

Evolution der Pflanzen- und Tierwelt

Zum **Präkambrium** gehört die Anfangszeit der Erde zunächst ohne organisches Leben, welches auch als **Archaikum** bezeichnet wird. Die klassische geologische Gliederung dieser ältesten Epoche 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 Paläozoologen diese Epoche auch das **Proterozoikum**, das sehr lange bis 550 Millionen Jahre andauert hat.

heftigen Vulkanismus mit gleichsowohl 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 mit einer bislang beispiellosen Beschleunigung der biologischen Evolution in rascher Folge eine Vielzahl neuer Lebewesen. 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 Stoffwechsellenzyme 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 Schiefen und Kalen, und diese sind wichtige Leitfossilien für ihre Zeit. Dieses Erdzeitalter endet mit einem ersten Massensterben auf unserem Planeten: Der »*Ordovician Event*« vor 443 Millionen Jahren führte – wohl infolge der Kontinentaldrift nach Süden in die kalte Polarregion – zu sich abwechselnden Warm- und Kaltzeiten und der gleichzeitigen Hebung der Appalachen zu entsprechendem Klimawandel, so dass mehr als 50 Prozent aller Gattungen und mehr als 80 Prozent aller damaligen Arten ausstarben.

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*. 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 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. So genannte Farnsamer, die Pteridospermae, entstehen, und am Ende der Steinkohlenzeit treten die ersten Nadelbäume auf.

Evolution der Gymnospermen

Mit der geologischen Periode des **Perm** endet um 250 Millionen Jahren vor heute das Paläozoikum. Das Perm ist in tektonischer Sicht eine zunächst unruhige Zeit: Die variskische Gebirgsbildung, die in Europa und Asien die langgestreckte 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.

Der Rückgang der Gefäßsporenpflanzen wird nicht nur mit dem zunehmend trockenen kontinentalen Klima, sondern auch mit Abkühlung der Erde in Verbindung gebracht. Die gigantischen Bärlappgewächse starben Ende der Rotliegenden fast völlig aus, auch die Cordaiten verschwanden.

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 Ginkkogewächse. Im sehr trockenen und warmen Zechstein herrschten die verhältnismäßig gut an Trockenheit angepassten Koniferen.

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. 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.

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.

In den Meeren erreichten die Ammoniten damals den Höhepunkt ihrer Entwicklung. Im Tethys-Meer, welches in jener Zeit großenteils 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*.

bildeten zusammen mit den schon existierenden Gymnospermen, den zapfentragenden Nadelhölzern, eine wichtige Grundlage für die Entfaltung der Vögel und Säugetiere.

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 mo-



Abbildung 3
Der Berliner Urvogel *Archaeopteryx lithographica* gilt als das bekannteste Fossil der Welt. Es ist etwa 150 Millionen Jahre alt und wurde in Kalksteinablagerungen in Solnhofen, Bayern, entdeckt. Quelle: Museum für Naturkunde, Berlin; Foto: Richard Pott

Abbildung 4
Sequoia gigantea, der Mammutbaum ist ein Paläoendemit aus der Kreidezeit und lebt heute nur noch im Yosemite-Nationalpark in Kalifornien. Foto: Joachim Hüppe, Hannover

Evolution der Angiospermen

Die letzte Epoche des Mesozoikums, die **Kreidezeit**, datieren wir ab 144 Millionen Jahren bis 65 Millionen Jahren vor heute. In der Pflanzenwelt gab es eine wichtige evolutive Neuerung: Während am Beginn der unteren Kreidezeit noch die jurassischen Bärlappe, Farne und Ginkogewächse vorherrschten, traten am Ende der Unterkreide, in der Gault-Epoche ab etwa 110 Millionen Jahren, erstmals Bedecktsamer, also **Angiospermen**, auf und

Jetzt »erwachen« 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

dernen Pflanzenwelt. Die Cycadeen mit ihren heute nur etwa zehn Gattungen blieben als Relikte in den Tropen und Subtropen erhalten.

In kurzer Zeit vor 130 bis 140 Millionen Jahren entfalteten sich die Angiospermen 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 Fruchtbildung, die Evolution einjähriger bis ausdauernder, krautiger und holziger Pflanzen ermöglichen es den Angiospermen, bis an die Grenze des Lebens vorzustoßen. Dazu kommt ihre Anpassungsfähigkeit an trocken-heiße Halbwüstenklimate und kälte dominierte Tundren- oder Hochgebirgslebensräume.

Das Fünfte Massensterben (»Cretaceous Event«) fand am Übergang von der Kreidezeit zum **Paläogen** vor 65,5 Millionen Jahren statt. Es wurde verursacht durch einen Asteroideneinschlag auf der Yucatan-Halbinsel am heutigen Golf von Mexiko. Ihm 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**. Hohe Iridium-Anomalien dienen hier vor Ort als wichtiger Beweis für einen großen Meteoriteneinschlag mit der Folge mächtiger Tsunamis, hoher Staubbefreiung, 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.

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 be-

reits in der Kreidezeit gebildet hatten. So entstand der große Gebirgsbogen vom Atlas in Nordafrika über die Sierra 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 zwei 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. Als zu jener Zeit der südliche Kontinent in Südamerika, Afrika und Australien zerbrach, konnte sich ein kalte Meeresströmung rund um die Antarktis ausbilden, wodurch die Temperaturen am Ende des Eozäns drastisch abfielen. Im frühen Oligozän gab es danach keine polare 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.

Das Eiszeitalter, das **Pleistozän**, als jüngster Abschnitt der Erdgeschichte seit 1,8 Millionen Jahren ist nahezu weltweit durch mehrfach zyklische wechselnde Klimabedingungen charakterisiert. Kaltzeiten wurden durch Warmzeiten mit entweder gleichen oder sogar höheren Temperaturen als heute voneinander getrennt. 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.

Das heutige Bild aller Großlebensräume unserer Erde ist das Ergebnis einer seit mehr als 3,5 Milliarden Jahren andauernden biologischen Evolution, die bereits im Präkambrium ihren Anfang nahm. Seither haben unter anderem ständige Kontinentalbewegungen, Gebirgsbildungen, vulkanische Aktivitäten sowie Vegetations- und Klimawandel das Bild unseres Globus bis auf den heutigen Tag verändert und gestaltet.

Literatur

- Molloy, J. E. (2003): Light driven molecular walkers. Körper-Preis 2003, Impulse für morgen, 35–43. Körber-Stiftung, Hamburg.
- Pott, R. (2005): Allgemeine Geobotanik, Biogeosysteme und Biodiversität. 652 S., Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- White, M. (1998): The Greening of Gondwana, the 400 Million Year story of Australian Plants. 3rd ed., 256 pp, Rosenberg Publ.



Prof. Dr. Richard Pott

Jahrgang 1951 ist seit 1987 Leiter des Instituts für Geobotanik der Leibniz Universität Hannover. Sein Forschungsschwerpunkt ist: Globale Biogeosysteme und Biodiversität. Kontakt: pott@geobotanik.uni-hannover.de