

Zeitschrift: Neujahrsblatt der Naturforschenden Gesellschaft Schaffhausen
Herausgeber: Naturforschende Gesellschaft Schaffhausen
Band: 66 (2014)

Artikel: Das grüne Kleid der Erde : Pflanzenevolution und Erdgeschichte
Autor: Demmerle, Susi / Stössel-Sittig, Iwan
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-585006>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

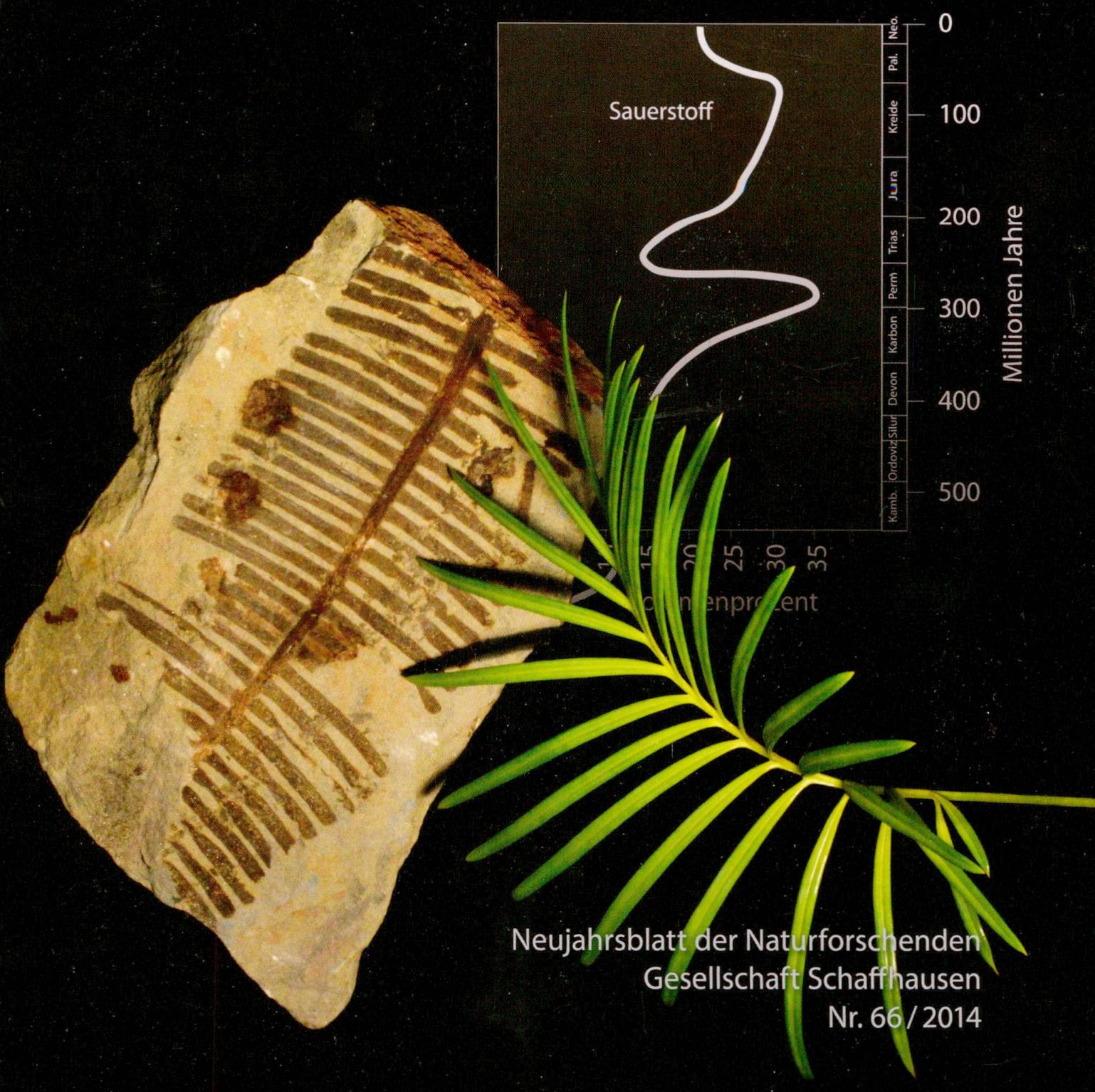
Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 02.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Das grüne Kleid der Erde – Pflanzenevolution und Erdgeschichte



Neujahrsblatt

der Naturforschenden Gesellschaft Schaffhausen

Nr. 66/2014

Impressum

REDAKTION:

Dr. Jakob Walter, Buchenstrasse 65, 8212 Neuhausen am Rheinfall

BILDNACHWEIS FOTOS:

Abb. 3.2: <http://de.wikipedia.org>

Abb. 6.5: www.indiana9fossils.com

Abb. 10.1: <http://en.wikipedia.org>; Objekt aus Houston Museum of Natural Science, Houston, Texas, USA

Abb. 10.2: <http://de.wikipedia.org>

Abb. 11.13, 13.22, 13.23, 13.24, 13.25, 13.29: E. Knapp

Abb. 13.2: Kantonsarchäologie Schaffhausen

Alle anderen Bilder sind von den Autoren.

Fossilienfotos aus folgenden Sammlungen

Slg. Schule Stein a/Rh, MzA: Abb. 8.24, 8.25

Slg. ETH: Abb. 13.9, 13.12, 13.13

Slg. Fam. Würtemberger, MzA: Abb. 13.16, 13.17, 13.18

Private Sammlungen von I. Stössel: Abb. 5.6, 5.7, 6.5–6.7 und S. Demmerle: 12.4

Alle anderen aus der Slg. F. Schalch

BILDNACHWEIS GRAFIKEN:

Abb. 6.4: Nach www.creaweb.fr

Abb. 8.2 und Abb. 10.4: Erstellt mit Paleo Map Software Plate Tracker von J. Eldridge, D. Walsh und C.R. Scotese

Abb. 8.27: Zusammengestellt aus verschiedenen Quellen; v.a. GEOCARB III: A Revised Model of Atmospheric CO₂ over Phanerozoic Time, R. Berner 2002

Abb. 9.12: Nach Strasburger 2008

Abb. 10.5: Samenstand aus Steinmann 1903

Abb. 10.9: Verändert nach Niklas et al. 1983, gezeichnet U. Weibel

Abb. 13.7: Verändert nach Heer 1985: Die tertiäre Flora der Schweiz, gezeichnet U. Weibel

Abb. 13.21: Nach Labandeira und Sepkoski 1993

Abb. 14.1: Nach Gould 1999

Beiträge:

Die Neujahrsblätter werden gedruckt mit Beiträgen aus dem Legat Sturzenegger und mit Unterstützung der Swiss Academy of Science (SCNAT).

DRUCK:

Unionsdruckerei Schaffhausen, Platz 8, 8201 Schaffhausen

AUFLAGE:

1800 Exemplare

Dank

Unser Dank geht an Urs Weibel für seine Hilfsbereitschaft in allen Dingen, die das MzA betreffen: von der Handhabung der Gesteinsschubladen bis zum Fotografieren und zu den fachlichen Ratschlägen.

Egon Knapp half uns mit seinen Kenntnissen über Bienen und seinen Fotos.

Jakob Walter hat das Manuskript mit Akribie durchgeschaut und manche Klarstellung angeregt.

© 2013 by Naturforschende Gesellschaft Schaffhausen

ISBN 978-3-033-04321-3

Susi Demmerle & Iwan Stössel-Sittig

Das grüne Kleid der Erde – Pflanzenevolution und Erdgeschichte

Neujahrsblatt der Naturforschenden Gesellschaft Schaffhausen

Nr. 66/2014

Naturforschende Gesellschaft Schaffhausen (NGSH), gegründet 1822

Die Naturforschende Gesellschaft will das Interesse an den Naturwissenschaften und an der Technik fördern, naturwissenschaftliche Zusammenhänge erklären und Verständnis für die Umwelt, insbesondere im Raum Schaffhausen, wecken. Ihr Jahresprogramm besteht aus allgemein verständlichen Vorträgen zu naturwissenschaftlichen Themen und Besichtigungen im Winterhalbjahr und naturkundlichen Exkursionen, teils zusammen mit Partnerorganisationen, im Sommerhalbjahr. In den «Neujahrsblättern der NGSH» werden naturwissenschaftliche Arbeiten veröffentlicht und so allen Mitgliedern wie auch einem breiteren Publikum zugänglich gemacht. Ein Verzeichnis der lieferbaren Neujahrsblätter befindet sich hinten in diesem Heft.

Die aktuellen Programme sind im Internet unter www.ngsh.ch abrufbar oder können bei der unten stehenden Adresse bezogen werden. Die Gesellschaft unterhält verschiedene Sammlungen und unterstützt die naturkundliche Abteilung des Museums zu Allerheiligen. Sie betreibt zudem eine moderne Sternwarte mit Planetarium; Informationen dazu sind zu finden unter www.sternwarte-schaffhausen.ch.

Die NGSH zählt rund 720 Mitglieder (davon über 100 Familienmitgliedschaften). Alle naturwissenschaftlich interessierten Personen sind herzlich willkommen. Der Mitgliederbeitrag pro Jahr beträgt für Erwachsene Fr. 50.–, für Schülerinnen, Schüler, Studenten und Studentinnen Fr. 25.– und für Familien Fr. 80.–. Wer sich für eine Mitgliedschaft interessiert, kann sich bei der unten stehenden Adresse oder im Internet unter www.ngsh.ch anmelden.

Postadresse der Gesellschaft:

NGSH, Präsident Dr. Kurt Seiler
Postfach 1007, 8201 Schaffhausen
PC 82-1015-1

info@ngsh.ch
www.ngsh.ch und
www.sternwarte-schaffhausen.ch

Autoren



Susi Demmerle (geb. 1936) hat ihr Studium in Biologie und Chemie 1965 an der Universität Zürich mit einer Dissertation in Hydrobiologie abgeschlossen. Danach folgten Forschungsarbeiten mit hydrobiologischen Themen an der Universität Helsinki in Finnland und beim Staat New York in den USA. Studien zum Wachstum von Cyanobakterien wurden in einem Forschungsteam von ROCHE in Sydney unternommen. Danach Rückkehr an die Kantonsschule Schaffhausen als Biologie- und Chemielehrerin. Das Interesse an fossilen Pflanzen begann nach der Pensionierung bei Arbeiten am MzA.



Iwan Stössel-Sittig (geb. 1968) studierte und doktorierte in Erdwissenschaften an der ETH in Zürich. Anschliessend arbeitete er als Umweltgeologe in der Privatwirtschaft, bevor er als Kurator ans Museum zu Allerheiligen in Schaffhausen wechselte. Seit 2007 arbeitet er am Interkantonalen Labor in Schaffhausen im Bereich Umweltschutz. Seit Kindesbeinen interessiert er sich für die Geschichte des Lebens auf der Erde.

Inhaltsverzeichnis

1. Vorwort	1
2. Prolog	2
3. Die Evolution	3
3.1 Die DNS als chemischer Informationsträger	5
3.2 Evolution in Aktion	6
4. Die Entstehung des Lebens	9
4.1 Energiebeschaffung	11
4.2 Wo ist das Leben entstanden?	12
5. Eine chemische Reaktion verändert die Welt: die Fotosynthese	15
5.1 Das Chlorophyll als Sammler von Energie	15
5.2 Die ersten «Pflanzen»	17
5.3 Fotosynthese und Klima	18
5.4 Weitere Verwendung von Molekülen	21
6. Die ersten Pflanzen steigen aus dem Wasser	23
7. Das Blatt und seine Funktionen	27
8. Die Pflanzen des Karbonzeitalters	30
8.1 Farne aus dem Karbon	33
8.2 Schachtelhalme aus dem Karbon	34
8.3 Bärlappgewächse aus dem Karbon	37
8.4 Die Welt des Karbons – ein Sonderfall der Erdgeschichte	39
9. Verschiedene Fortpflanzungsarten	43
9.1 Sporenpflanzen	43
9.2 Samenpflanzen	47
10. Perm: Der Urkontinent Pangaea	50
10.1 Rätselhaftes Gondwana	50
10.2 Perm-Fossilien am Museum zu Allerheiligen	54
10.3 Das grosse Sterben	56

11. Trias: Nach dem Weltuntergang	58
11.1 Erholung nach dem Aussterbeereignis	59
12. Moderne Pflanzen entstehen	66
13. Erdneuzeit: Der Aufstieg der Blütenpflanzen	72
13.1 Bernstein: ein faszinierendes Fenster in die Vergangenheit	72
13.2 Die ersten Blütenpflanzen	73
13.3 Co-Evolution	79
13.4 Die heutige Flora unserer Gegend	85
14. Epilog	88
15. Weiterführende Literatur	91
16. Glossar	92
Anhang	94
Bisher erschienene Neujahrsblätter	99

1. Vorwort

Schätze zu heben, ist ein Traum Vieler. Museumssammlungen bieten wachen Geistern dazu ein weites Feld. Sie ermöglichen Entdeckungsreisen zu längst vergangenen Epochen, Kontinenten und Lebensformen.

In der mehrere zehntausend Objekte umfassenden Sammlung von Ferdinand Schalch (1848–1918), die er kurz vor seinem Tode der Stadt Schaffhausen schenkte, liegen immer noch unentdeckte Kostbarkeiten. Wegen der Wirren der Zeit blieben namhafte Sammlungsteile «terrae incognitae». Für das vorliegende Neujahrsblatt haben Susi Demmerle und Iwan Stössel in jahrelanger geduldiger Arbeit einige Schätze fossiler Pflanzen gehoben, nicht nur in der Sammlung Schalch sondern auch in denjenigen von Johann Conrad Laffon (1801–1882), Bernhard Schenk (1833–1893) und anderen mehr. Die Paläobotanik, die Wissenschaft fossiler Pflanzen, hat bisher ein Mauerblümchendasein gefristet. Völlig zu Unrecht, wie dieses Heft zeigt.

Fossile Pflanzen faszinieren. Einerseits sind sie ein ästhetisches Vergnügen. Filigranste Strukturen – Knospen, Samen, Spaltöffnungen, Blattnervaturen und Frassschäden – blieben über Jahrmillionen erhalten. Selbst die sonst so vergänglichen Blütenblätter wurden konserviert, ein flüchtiger Augenblick für die Ewigkeit festgehalten. Andererseits bieten die erhaltenen Fossilien tiefe Einblicke in die Evolution. Mit diesem Wissen begegnen wir Farn-, Schachtelhalm- und Bärlappgewächsen, den lebenden Fossilien im Pflanzenreich, mit andern Augen und mehr Ehrfurcht. Im Weiteren erlauben versteinerte Pflanzen Rückschlüsse auf das Klima vergangener Zeiten.

Susi Demmerle und Iwan Stössel ist es gelungen, die Fakten zum Augenschmaus zu machen. Gleichzeitig ermöglichen sie einen einmaligen Einblick in einen Teilbereich der naturkundlichen Sammlungen der Naturforschenden Gesellschaft Schaffhausen und des Museums zu Allerheiligen. Sie zeigen dabei, dass die akribische Sammlertätigkeit früher Naturforscher nicht antiquiert oder gar unnütz ist, sondern zu verstehen hilft, wie das Leben entstanden ist und vielleicht auch, wie es sich weiter entwickelt. Auch die modernste Wissenschaft ist immer wieder auf Sammlungsobjekte angewiesen, und deren Ästhetik offenbart sich immer wieder den Museumsbesuchern.

Dr. Urs Weibel, Kurator Fachbereich Natur, Museum zu Allerheiligen

2. Prolog

Wer an die Entwicklungsgeschichte des Lebens denkt, wird – geprägt von unzähligen Lehrbüchern – vor allem Mammuts, Dinosaurier, vielleicht sogar die urtümlichen Dreilappkrebse vor seinem geistigen Auge vorbei ziehen sehen. Pflanzen sind dabei im Hintergrund, eigentliche Kulisse für das Schauspiel der Evolution der Tiere.

Doch wenn wir hinabsteigen in die schier unendlichen Tiefen der geologischen Zeit, auf der Suche nach den Grundprinzipien des Lebens, zeigt sich oft ein anderes Bild. Pflanzen waren nicht nur Bühnenbild, sondern in vielerlei Hinsicht eigentliche Hauptdarsteller in der Geschichte des Lebens. Tatsächlich ist das nicht erstaunlich, denn es sind vor allem die Tiere, die auf Pflanzen angewiesen sind, und viel weniger umgekehrt. Denken wir an die Zusammensetzung der Atmosphäre, an den Einfluss der Bodenbildung auf den globalen Stoffkreislauf oder an die Wirkung der Pflanzendecke auf die Strahlenbilanz unserer Erde: Überall spielen und spielten die Pflanzen und ihre Vorgänger eine Schlüsselrolle.

Doch natürlich lässt sich die Geschichte des Lebens nicht einfach auf «Ursache» und «Wirkung» reduzieren. Die Aussage, die Erde sei ein von den Lebewesen «gesteuertes System» stimmt natürlich auch nicht. Vielmehr ist es ein Jahrtausende alter Tanz zwischen der unbelebten und der belebten Natur, und innerhalb der belebten Natur zwischen Mikroorganismen, Pflanzen, Tieren und Pilzen, der ein fein ausbalanciertes System von gegenseitigen Abhängigkeiten und vielfältigen Rückkoppelungen schuf.

Wir möchten uns mit diesem Neujahrsblatt auf die Suche nach der vergessenen Rolle der Pflanzen machen. Es ist auch eine Entdeckungsreise zu den Grundprinzipien des Lebens. Dabei dienen uns die Objekte aus der naturhistorischen Sammlung des Museums zu Allerheiligen als Orientierungshilfe. Unsere Spurensuche erhebt keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit. Es sind exemplarische Blitzaufnahmen aus dem unendlichen Strom der Zeit. Manchmal erlauben wir uns jedoch auch einen Blick über die Sammlungsbestände hinaus, in andere Sammlungen oder in die heutige Natur, um Zusammenhänge, die uns wichtig scheinen, sichtbar zu machen.

Folgen Sie uns auf diese Reise! Wenn sich auch nur ein kleiner Teil des Staunens, das uns immer wieder erfasste, auch auf Sie überträgt, ist unser Ziel erreicht!

3. Die Evolution

Die Evolutionslehre wurde 1859 von Charles Darwin (Abb. 3.1) und Alfred Russel Wallace (Abb. 3.2) begründet. Andere Wissenschaftler wie Cuvier, Owen, Lamarck, Lyell, Hooker u.a.m. hatten schon vor ihnen über die Evolution der Lebewesen und das Alter der Erde nachgedacht, und Darwin konnte auf ihr geologisches und biologisches Wissen aufbauen. Er war selbst in einem naturwissenschaftlichen Umfeld aufgewachsen und hatte schon früh mit anderen Wissenschaftlern regen Gedankenaustausch gepflegt. In langer und äußerst präziser Arbeit hatte er die Grundlagen für die Theorie der natürlichen Auslese schließlich umfassend untermauern und formulieren können. Wallace kam unabhängig von Darwin fast zur gleichen Zeit zu den selben Schlussfolgerungen; doch seine Argumentationsreihe war deutlich weniger ausfeilt und lückenhafter. Im historischen Rückblick droht seine Figur daher oft und zu Unrecht im Schatten des gewaltigen Charles Darwin zu verschwinden.

Evolution heißt Entwicklung. Darwin und Wallace zeigten, dass sich das Leben auf der Erde im Lauf der Zeit verändert hatte. Arten von Lebewesen sind nicht unveränderlich, aus jeder Lebensform kann sich über geologische Zeiträume eine neue Lebensform entwickeln.

Der Grundgedanke Darwins basiert auf zwei Beobachtungen:

- Die Nachkommen eines Lebewesens unterscheiden sich immer geringfügig von den Eltern. Diese Unterschiede können je nach Umfeld und Konkurrenz günstig oder weniger günstig für das Überleben der Nachkommen sein. Einige dieser Merkmale sind vererbt von einem Elternteil; andere Merkmale treten neu auf (Mutation).

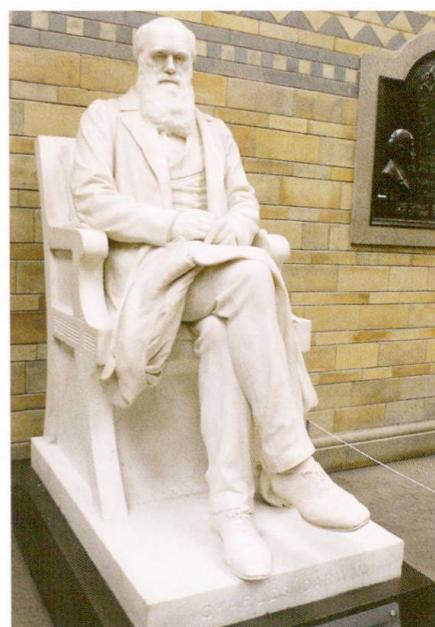


Abb. 3.1: Charles Darwin, 1809–1882

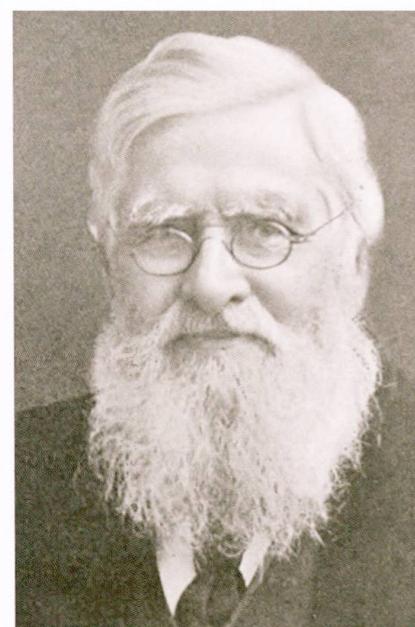


Abb. 3.2: Alfred Russel Wallace, 1823–1913

- Sämtliche Tier- und Pflanzenarten hinterlassen sehr viel mehr Nachkommen, als für das Überleben der Art notwendig sind. So sterben viele dieser Nachkommen, bevor sie selbst das fortpflanzungsfähige Alter erreichen. Diejenigen mit etwas günstigeren Erbanlagen haben dabei leicht höhere Überlebenschancen.

Wer die besten Überlebenschancen hat, entscheidet die Umwelt. Die Umwelt verändert sich aber laufend. Klima, Feinddruck, Konkurrenz und Nahrungsangebot, Verteilung der Kontinente und Vulkanismus sind nur einige Beispiele. Veränderungen sind oft nicht kontinuierlich, sondern ereignen sich innerhalb geologisch kurzer Zeit. Deshalb verläuft auch die Evolution nicht immer langsam und gradlinig, sondern oft rasch und sprunghaft.

Neue Arten können sich auch bilden, wenn Nachkommen einer Art geographisch etwa durch Wasser, Gebirge, Wüsten oder Täler getrennt und dadurch an der Paarung gehindert werden. Die Umwelt kann sich in der Folge in den getrennten Lebensräumen unterschiedlich entwickeln und andere Auslesekriterien werden wirksam.

Die Evolution kann als ein sich selbst optimierendes System betrachtet werden, in dem ungeeignete Lebensentwürfe verworfen werden und geeignete Lösungen überleben. Dadurch entsteht eine scheinbar gerichtete Entwicklung zu Komplizierterem. Während zu Beginn nur ganz einfache Lebensformen vorgekommen sein dürften, haben sich im Laufe der Erdgeschichte auch immer kompliziertere Lebewesen entwickelt.

Diese scheinbare Entwicklung hin zu komplizierten Lebensformen wird immer wieder so interpretiert, als hätte die Evolution ein zu erreichendes Ziel (und dieses Ziel sei natürlich der Mensch als Krone der Schöpfung). Das ist aber bei der Evolution des Lebens nicht der Fall. Da die einfachst mögliche Lebensform am Anfang gestanden haben muss, ist jede Entwicklung eine Entwicklung hin zu höherer Komplexität.

Darwin und Wallace beschrieben das Phänomen der Evolution, aber sie konnten noch nichts über die biochemischen Hintergründe wissen. Heute wissen wir: Jede Zelle enthält Gene, diese Gene bestehen aus Desoxiribonu-

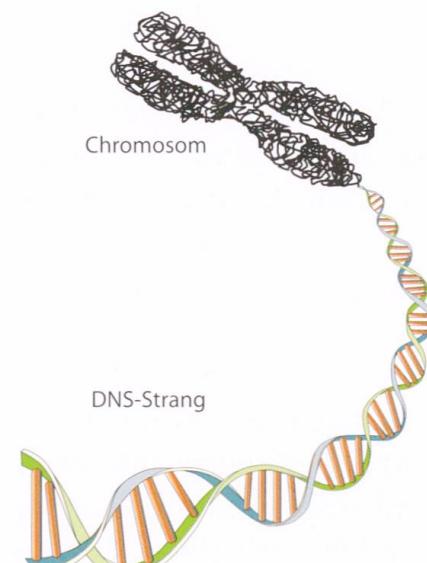


Abb. 3.3: DNA-Molekül, aus dem Chromosom heraus vergrößert

kleinsäure (DNS). Mutationen in dieser Erbsubstanz entstehen zufällig, wenn sie durch energiereiche Strahlung (radioaktive Strahlung, UV-Licht etc.) oder chemische Einflüsse umformiert wird, oder wenn während der Zellteilung «Kopierfehler» auftreten. Solche Mutationen können die Eigenschaften eines Lebewesens beeinflussen und können unter Umständen an die Nachkommen weiter gegeben werden. Viele dieser Mutationen sind für das Überleben ungünstig, nur einige wenige sind vorteilhaft. Träger dieser Mutationen haben einen Überlebensvorteil und können ihre Gene bevorzugt an die Nachkommen weiter geben.

Wenn man diese Grundgedanken nicht nur über zwei bis drei Generationen, sondern über Jahrmillionen weiter denkt, landet man unweigerlich bei der Evolution: Alle Nachkommen sind also etwas verschieden von ihren Eltern und die Umwelt ändert sich immer wieder, so dass die Individuen immer wieder einem neuen Anpassungsdruck ausgesetzt sind. So können schliesslich neue Arten entstehen.

Es stellt sich aber auch die Frage, wie das alles begann. Welche Lebensform stand ganz am Anfang? Oder waren es gar mehrere? Und wie konnte aus unbewohnten Vorgängersubstanzen ein erstes Lebewesen entstehen? Dazu weiss die Wissenschaft auch heute noch keine abschliessende Antwort (vgl. Kapitel 4).

3.1 Die DNS als chemischer Informationsträger

Das DNS-Molekül (Abb. 3.3 und Abb. 3.4) besteht aus fünf verschiedenen Atomen: Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff und Phosphor. Es sind lange aperiodische Fäden, die zu Chromosomen aufspiralisiert werden. Die DNS schreibt das Lebensprogramm aller Lebewesen auf dieser Erde auf chemische Art in einem grossen Biomolekül. Diese chemische Information ist universell, d.h. sie kann von allen Lebewesen gelesen und umgesetzt werden,

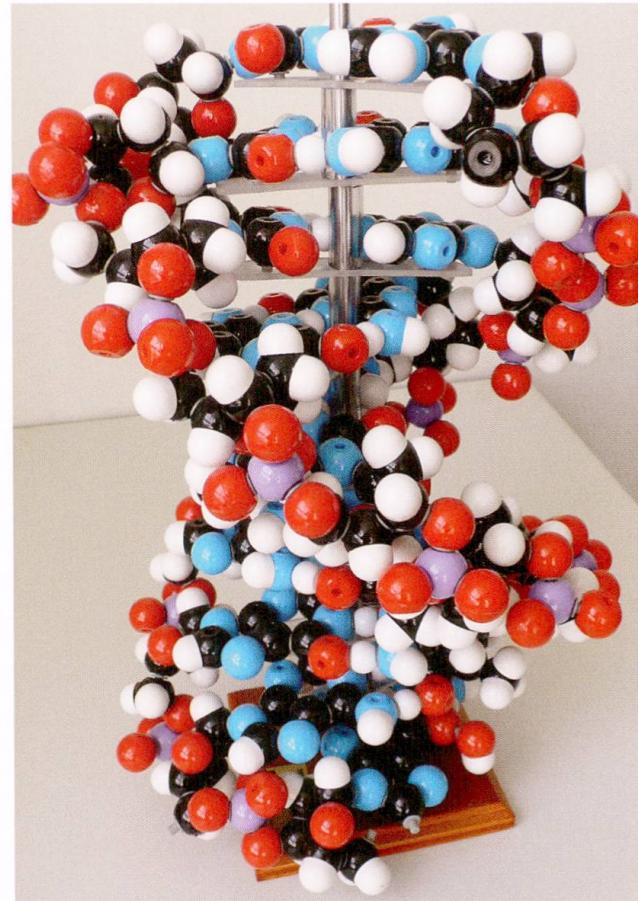


Abb. 3.4: DNS-Modell mit den Atomen, aus denen es aufgebaut ist (Ausschnitt): Kohlenstoff C (schwarz), Wasserstoff H (weiss), Sauerstoff O (rot), Stickstoff N (blau) und Phosphor P (lila).

daher spricht man von einem «universellen Code». DNS ist «unsterblich», sie wird von den Eltern via Chromosomen auf die Kinder vererbt und dabei wird ihre Erbinformation neu gemischt. Gentechniker benutzen die Tatsache der Universalität des genetischen Codes rege und können so Eigenschaften – Stücke der DNS – von Art zu Art oder gar von Tieren auf Pflanzen und umgekehrt übertragen. Man kann sich die Stücke wie Legosteine vorstellen, die in verschiedene Bauwerke eingesetzt werden können.

DNS-«Legoklötzte» (Gene) und ihre Veränderungen dienen den Wissenschaftlern auch, um Alter und Verwandtschaftsgrad von Lebewesen untereinander zu bestimmen. Diese Möglichkeit ergänzt und präzisiert Erkenntnisse, die man aus fossilen Funden gewinnen kann (siehe Anhang).

Da alle Lebewesen auf der Erde den Informationscode der DNS benützen, nimmt man heute an, dass sie alle den selben Ursprung haben.

3.2 Evolution in Aktion

Evolution ist nicht graue Theorie. Sie lässt sich konkret beobachten. Das wohl eindrücklichste Beispiel dafür ist die Entwicklung von Antibiotika-Resistenzen in Bakterien:

Bakterien vermehren sich durch Zweiteilung. Ihre Reproduktionszeit ist sehr schnell, sie können sich in 20 – 30 Minuten verdoppeln, wenn ihre Umwelt stimmt. Wenn nun Penicillin zur Bekämpfung einer Infektion verabreicht wird, sterben die meisten Bakterien. Einige wenige können aber eine Mutation enthalten, die sie gegen das Gift resistent macht. Vielleicht wären sie ihren Artgenossen unter normalen Umständen unterlegen und würden wieder verschwinden, aber unter Penicillineinfluss überleben sie als Einzige und geben die Mutation an ihre Nachkommen weiter, so dass nach kurzer Zeit nur noch resistente Bakterien vorkommen. Nun sucht die Pharma-Industrie nach neuen Antibiotika, die an einer anderen Stelle in den Stoffwechsel der Bakterien eingreifen und sie schädigen. Moleküle, die in der Natur eventuell gar nicht vorkommen, werden produziert und helfen eine Weile bei der Bekämpfung von Infektionen. Dasselbe wie vorher passiert erneut, und ein Stamm von resistenten Keimen entsteht. Das ist die Ursache der heute so gefürchteten Resistenz – oft sogar multiplen Resistenz – gegen die meisten Arten von Antibiotika.

Übrigens: Gene können auch «horizontal», d.h. von einem Bakterium auf das einer anderen Art, übertragen werden. So kann eine Resistenz auch auf anderen Bakterien wirksam werden, was natürlich in der Medizin äußerst unerwünscht ist.

Eine ähnliche Art der Übertragung nutzt die Gentechnik – diesmal gezielt. Da, wie oben erwähnt, der DNS-Code universell ist, kann er von allen Lebewesen gelesen und umgesetzt werden, d.h. Gene können selektiv ausgeschnitten und auf ein anderes Lebewesen übertragen werden.

Ein bekanntes Beispiel ist die Herstellung von menschlichem Insulin durch Bakterien. Der «Legostein» für Insulinproduktion wird aus dem menschlichen Erbgut ausgeschnitten und in ein harmloses Bakterium übertragen. Ist diese Rekombination gelungen, kann das Bakterium in grossen Fermentern gezüchtet werden, wo es Insulin produziert, das «geerntet» werden kann. Alle Nachkommen dieses Bakteriums tragen nun das Insulin-Gen, das sie für sich selbst niemals gebrauchen würden.

Veränderungen in den Lebewesen sind zufällig, die Umwelt entscheidet, welche Formen überleben und welche aussterben müssen.

Das war Darwins grosse Erkenntnis.

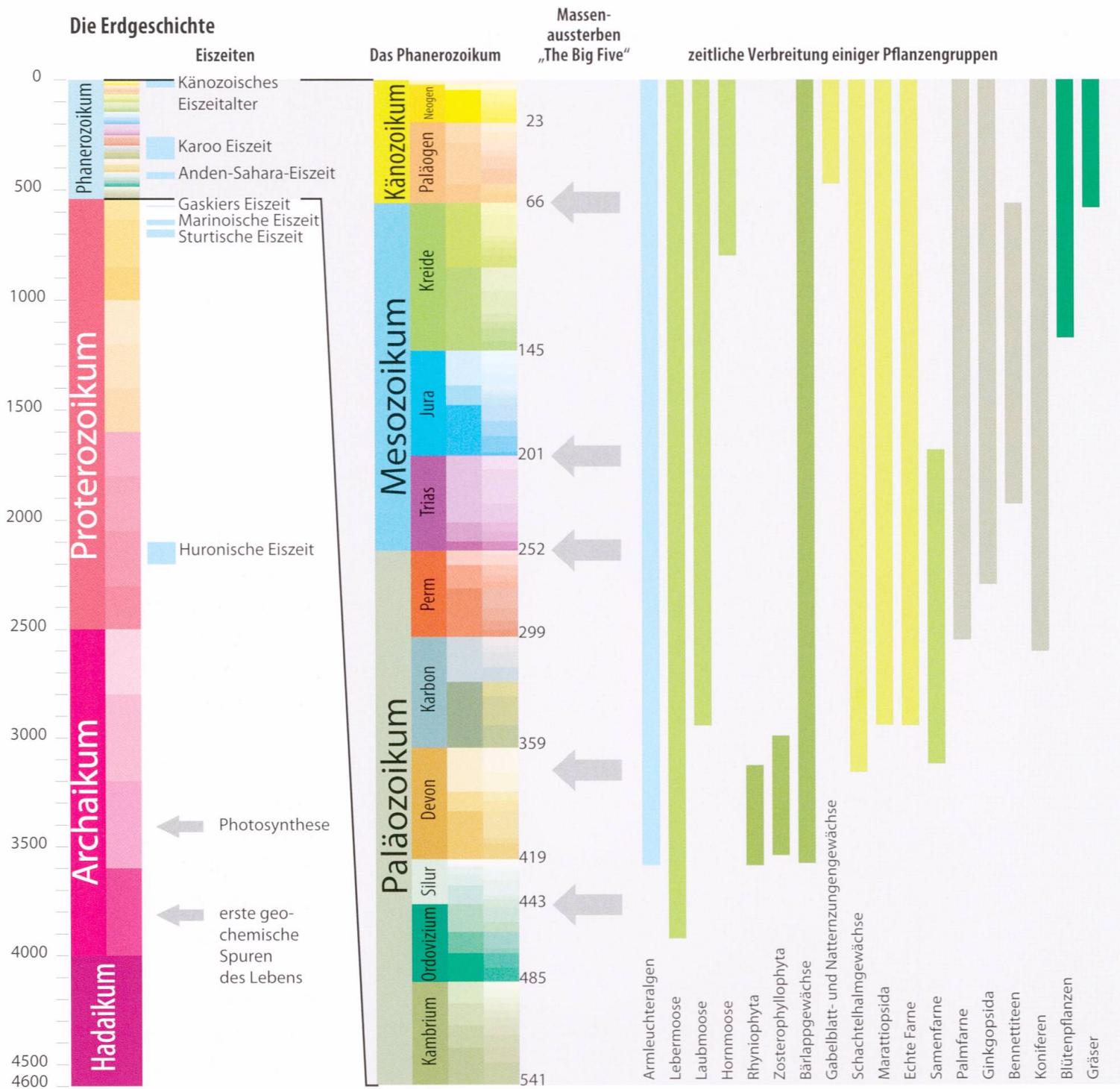


Abb. 4.1: Massstäbliche Darstellung der Zeiträume von der Entstehung der Erde bis heute.
 Beachten Sie: Die rote Säule links stellt ein Zeitintervall von rund 4 Milliarden Jahren dar, in dem auf der Erde vorwiegend einzellige Lebewesen existierten.
 Zahlen: Millionen Jahre vor heute.

4. Die Entstehung des Lebens

Durch die Zusammenarbeit von Biologen, Geologen, Chemikern, Mikrobiologen, Biochemikern, Molekularbiologen, Atmosphärenphysikern und Mathematikern hat man in der letzten Zeit eine immer bessere Vorstellung davon erhalten, was auf der jungen Erde vor sich gegangen ist und wie sich das Leben entwickelt haben könnte.

Es ist schwierig sich vorzustellen, wie viel Zeit zu Verfügung stand für die Entstehung des Lebens, für die Evolution, für das Ausprobieren verschiedener Lebensweisen, bis moderne «höhere» Lebewesen die Erde bevölkerten (Abb. 4.1). Einzelne Prozesse sind noch längst nicht klar, doch die verschiedensten Wissenschaftler entwerfen Möglichkeiten auf Grund ihrer gegenwärtigen Forschungen und Erkenntnisse und vernetzen sie mit den Resultaten anderer Forscher. In der letzten Zeit wurden dadurch sehr viele neue Erkenntnisse gewonnen.

Hier vorgestellte Mechanismen werden von der Wissenschaft in Details diskutiert und stellen etwa den gegenwärtigen Stand der Erkenntnisse dar, wie Leben entstanden sein könnte. Sie geniessen weitgehende Anerkennung. Es ist aus Platzgründen unmöglich, hier alle Vorschläge zu berücksichtigen und zu diskutieren, und es ist durchaus möglich, dass durch weitere Forschungen in Zukunft neue Erkenntnisse gewonnen und Einzelheiten präzisiert werden.

Vor etwa 3,5 Milliarden Jahren bestand die Atmosphäre der Erde aus Wasserstoff (H_2), Stickstoff (N_2) und aus Gasen, die durch den aktiven Vulkanismus aus dem Erdinneren austraten wie Schwefelwasserstoff (H_2S), Methan (CH_4), Kohlendioxid (CO_2), Ammoniak (NH_3) sowie Wasserdampf (H_2O). Sauerstoff (O_2) war nur in Spuren vorhanden. Die Atmosphäre war zu jener Zeit also giftig und lebensfeindlich, jedenfalls für heutige mehrzellige Lebewesen.

Diese Gase lösten sich im Meerwasser und reagierten während Milliarden von Jahren miteinander. Die UV-Strahlung, die damals ungehindert von der Sonne auf die Erde traf, Erdwärme, Energie aus Blitzen und vulkanische Prozesse lieferten die Reaktionsenergien für biochemische Vorgänge im Wasser. Es bildeten sich einfache organische Moleküle, die oft sogleich wieder zerfielen.

Einige aber blieben stabil und ermöglichen weitere Reaktionen, die zu wiederum komplizierteren Molekülen führten. Aber auch diese wurden zum grössten Teil wieder zerstört bis auf solche, die unempfindlich waren gegen

energiereiche Strahlungen aller Art. Es entstanden möglicherweise Moleküle in der Art von RNS (Ribonukleinsäure), Zuckern, Eiweissen, Fetten usw.

Der Evolutionsbiologe Richard Dawkins geht so weit zu sagen, dass das Leben eigentlich dadurch entstanden ist, dass sich ein Molekül bildete, das sich unter günstigen Bedingungen selbst verdoppelte. Dies könnte beispielsweise ein Ribonukleinsäure- (RNS-)molekül gewesen sein. Das Molekül war zuerst kurz und trug Informationen, die es durch die Verdoppelung weiter geben konnte. Gleichzeitig wirkte es auch als Katalysator für andere chemische Vorgänge und ermöglichte damit die Entstehung von weiteren Molekülen, z.B. von Eiweissen. Dazu ist Energiezufuhr notwendig. Aus thermodynamischen Gründen ist daher anzunehmen, dass diese Prozesse dort ihren Ursprung haben, wo durch chemische Reaktionen laufend Energie freigesetzt wurde (siehe unten).

Die Zeiten, die für diese Reaktionen gebraucht wurden, sind unvorstellbar lang (Abb. 4.1) und der Vorgang wird als «biochemische Evolution» bezeichnet. Man versteht darunter einen sich selbst optimierenden Prozess, der durch Energiezufuhr von der Sonne, aus dem Weltall und dem Erdinnern einerseits, aus anorganischen Verbindungen andererseits, selbstständig ablaufen konnte.



Entscheidend für diese Vorgänge waren auch die Eigenschaften des Kohlenstoff- (C-)atoms. Kohlenstoff ist ein kleines Atom, das wie kein anderes die Möglichkeit hat, eine Vielzahl von chemischen Bindungen einzugehen. Das C-Atom weist vier Bindungselektronen auf und kann sich demzufolge mit maximal vier anderen Partnern verbinden – auch und sehr oft mit weiteren C-Atomen (Abb. 4.2). Das kann dann zu dreidimensionalen Molekülen führen, die unendliche Kombinationsmöglichkeiten aufweisen. Charakteristisch für alles iridische Leben sind Verbindungen aus Wasserstoff und Kohlenstoff. Die Produktion dieser Verbindungen erfordert die Zufuhr von Energie; die Auftrennung dieser Verbindungen durch Oxidation setzt diese Energie wieder frei.

Abb.4.2: C-Atom mit vier gleichwertigen Bindungselektronen
(-> Tetraeder)

Mit der Entstehung der Zellmembran konnten sich Individuen bilden, die sich von der Umwelt abgrenzen und selbst wählen konnten, welche Moleküle sie in die Zelle hereinlassen und welche sie hinausbefördern wollten.

Die ersten Lebewesen, die sich auf der Erde entwickelten, waren vermutlich einzellige Archaeen (Urbakterien) und Bakterien. Sie besaßen wohl vorerst Ribonukleinsäure (RNS) als Erbsubstanz, aber noch keinen echten Zellkern.

Die Fäden der Erbsubstanz wurden nur lose in der Zelle eingeschlossen. Im Laufe der Jahrtausende entstanden viele verschiedene Zellarten (Archaeen und Bakterien) die unglaublich viele verschiedene Stoffwechsel-eigenschaften aufwiesen.

4.1 Energiebeschaffung

Zum Leben braucht es Energie, denn das Wachstum und die Vermehrung können nur unter Energiezugabe ablaufen. In verschiedenen Stadien der Evolution wurde das Problem unterschiedlich gelöst.

Eine der ersten Lösungen war die **Chemosynthese**. Bestimmte Bakterien konnten ihre Energie aus Gesteinen, die z.B. Schwefel- oder Eisenverbindungen enthielten, oder aus anderen anorganischen Verbindungen gewinnen.

Eine andere grosse Gruppe von Bakterien ernährte sich von den vielen unterschiedlichen organischen Molekülen, die in den Ozeanen («Ursuppe») entstanden waren. Da noch kaum Sauerstoff im Wasser gelöst war, müssen die meisten dieser Organismen anaerob (ohne Sauerstoff) funktioniert haben. Diese Art von Energiegewinnung nennt man **Gärung**.

Ein Bakterium entwickelte eine folgenreiche Eigenschaft; es erfand ein Molekül, das die Lebensenergie aus dem Sonnenlicht beziehen konnte: das Chlorophyll. Man nennt diese Art der Energiegewinnung **Fotosynthese**. Sie und ihre Folgen für Luft und Lebewesen werden in einem eigenen Kapitel erklärt.

Irgendwann begannen sich gewisse Bakterien andere Bakterien einzuhüllen und zwar solche, die andere Stoffwechseltricks beherrschten. Diese wurden nun nicht verdaut, sondern als «Mitarbeiter im Stoffwechsel» (Symbionten) in der Zelle deponiert. Bakterien mit Mitarbeitern, die das Sonnenlicht nutzen konnten, hatten nun einen Vorteil gegenüber den andern. Das geschah vor etwa 3,4 Mrd. Jahren, und diese Bakterien nennt man heute Cyanobakterien oder ungenau auch Blaualgen. Die Konsequenz dieser Zusammenarbeit werden wir im Kapitel 5 weiter verfolgen.

Einige Bakterien begannen auch, den entstehenden Sauerstoff in der Umwelt zu brauchen, um das vorhandene organische Material zu oxidieren und

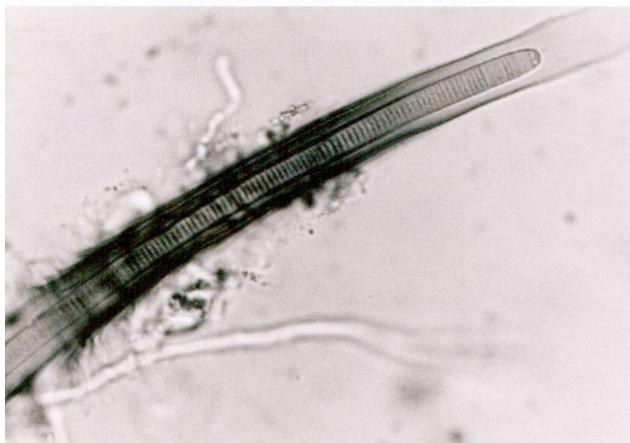


Abb. 4.3: Cyanobakterie aus Stromatolithen der Shark Bay, Australien (Breite der Cyanobakterie ca. 7 µm)

dadurch Energie zu gewinnen. Diese Lebewesen lebten aerob (mit Sauerstoff) und ihre Art von Energiegewinnung nennt man **Atmung**.

Noch heute sind bei weitem nicht alle Bakterien und ihre Stoffwechsel erforscht. Im menschlichen Körper, in der Erde und im Meer, auch in Gesteinen tief im Inneren der Felsen leben ungezählte unbekannte, kleine, spezialisierte Lebewesen. Zum Teil sind sie für uns lebenswichtig und unverzichtbar, bestimmt werden sie uns in Zukunft noch manche Überraschung bereiten!

4.2 Wo ist das Leben entstanden?

Sicher ist das Leben nicht im freien Meer entstanden; die kleinen Moleküle hätten sich nie getroffen, um miteinander zu reagieren. Im Meer herrscht zudem ein weitgehendes chemisches Gleichgewicht, so dass sich hier kaum neue Moleküle mit hohem Energieinhalt bilden können. Es müssen begrenzte Umwelten mit stetigem Energiezufluss gewesen sein, in denen sich die «Ursuppe» ausbilden konnte. Ob das Leben in einer seichten Meeresbucht oder in der Tiefsee bei den «Schwarzen Rauchern» oder gar in vulkanischen heißen Quellen entstanden ist, weiß man heute noch nicht genau. Sicher ist aber, dass Archaeen noch heute existieren und dass sie aus vulkanischen Quellen und im Meer bei den «Schwarzen und Weissen Rauchern» (Heisse Quellen in der Tiefsee) isoliert werden können. Ihr Stoffwechsel kann darum heute im Labor studiert werden.

Die aus dem Erdinnern herausströmenden heißen Lösungen bilden um die Raucher herum eine Art Glocke. An der Grenze zum Meerwasser entsteht dann ein chemisches Gefälle, das von Bakterien zur Energiegewinnung ausgenutzt werden kann. Es wurde in diesen Tiefseeinseln eine ganz eigene Lebewelt entdeckt, die jedoch ebenfalls auf dem universellen DNS-Code beruht.

Aus Beobachtungen im Yellowstone-Nationalpark weiß man, dass es auch an der Erdoberfläche Varianten der Energiegewinnung gibt. Zudem bevölkern gerade die scheinbar ursprünglichen Arten Orte, die man zunächst als absolut lebensfeindlich betrachtete. Gewisse Arten von Archaeen und Bakterien können in bis zu 115°C heissem vulkanischem Wasser noch munter

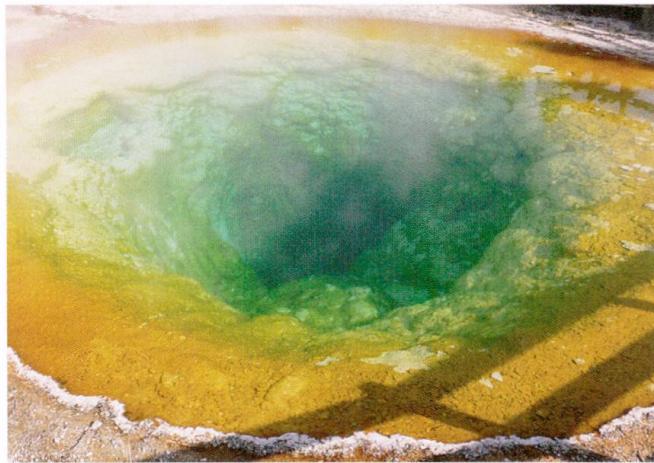


Abb. 4.4: Morning Glory Pond, Yellowstone Park: An den Wänden des Schlotes: weisse Bakterienmatten, aussen: Bakterien, die Fotosynthese machen können (Cyanobakterien u.a.). Die grüne Farbe im Zentrum wird durch Brechung des Sonnenlichtes im klaren Wasser erzeugt.

leben und sich auch vermehren. In gewissen heißen Quellen dort ist das Wasser zudem auch noch sauer, hundert Mal saurer als Zitronensaft, nämlich pH 0! Andere Arten leben in einem pH-Bereich von > 10, d.h. in starken Laugen.

Auch bestimmte Cyanobakterien und andere fotosynthetische Bakterien sind also bei extremen Lebensbedingungen aktiv, wie man heute noch sehen kann.

Im Yellowstone-Nationalpark kann man auch von den Bewohnern der heißen Quellen direkt auf die Temperatur des Wassers schliessen (Abb. 4.4 und 4.5). Archaeen, die oft weiss sind, wachsen zwischen 60°C und 115°C, Bakterien, die Fotosynthese machen können (Cyanobakterien), wachsen bei Wassertemperaturen von bis zu 70 – 73°C. Sie bilden Matten, die im Sommer leuchtend gelb-orange und im Winter tief grün sind. Wegen der starken Sonnenstrahlung im Sommer wird das grüne Chlorophyll vom gelben Carotin geschützt, sodass die Matten gelb-orange erscheinen. Im Winter hingegen tritt das Carotin zurück, weil das grüne Chlorophyll nun seine günstigsten Lichtverhältnisse hat.



Abb. 4.5: Auslauf einer sehr heißen Quelle im Bisquit Basin, Yellowstone Park: grün-gelbe Cyanobakterienmatten in der Mitte, die rot-braune Farbe am Rand wird durch Bakterien erzeugt, die Eisen oxidieren können.

Vielleicht ist diese aussergewöhnliche Lebensgemeinschaft ein Rest aus der Urzeit? Oder einfach ein Beispiel für die vielfältigen Stoffwechselmöglichkeiten, welche Bakterien aus der Frühzeit der Erde bereits beherrschten?

Der Stammbaum in Abb. 4.6 zeigt auf, wie vielseitig die Lebewesen heute sind. Sie alle haben irgendwo einen gemeinsamen Vorfahr, aus dem sich eine unendliche Zahl von Organismen entwickelt hat. Viele sind unscheinbar, und ihre Lebensweisen sind uns noch gänzlich unbekannt, viele haben nicht einmal einen echten Zellkern. Der Mensch gehört – zusammen mit allen Pflanzen und Tieren – zu den Organismen mit einem echten Zellkern.

Die Evolution der Lebewesen darf man sich nicht als Baum mit Stamm und Seitenästen vorstellen, bei dem die obersten (modernsten) Organismen den Gipfel einer zielstrebigen Entwicklung darstellen. Die Evolution verlief eher buschförmig, wobei einige Ästchen ausstarben, andere sich eine Weile halten und weitere Ästchen erzeugen konnten, von denen wieder einige ausstarben.

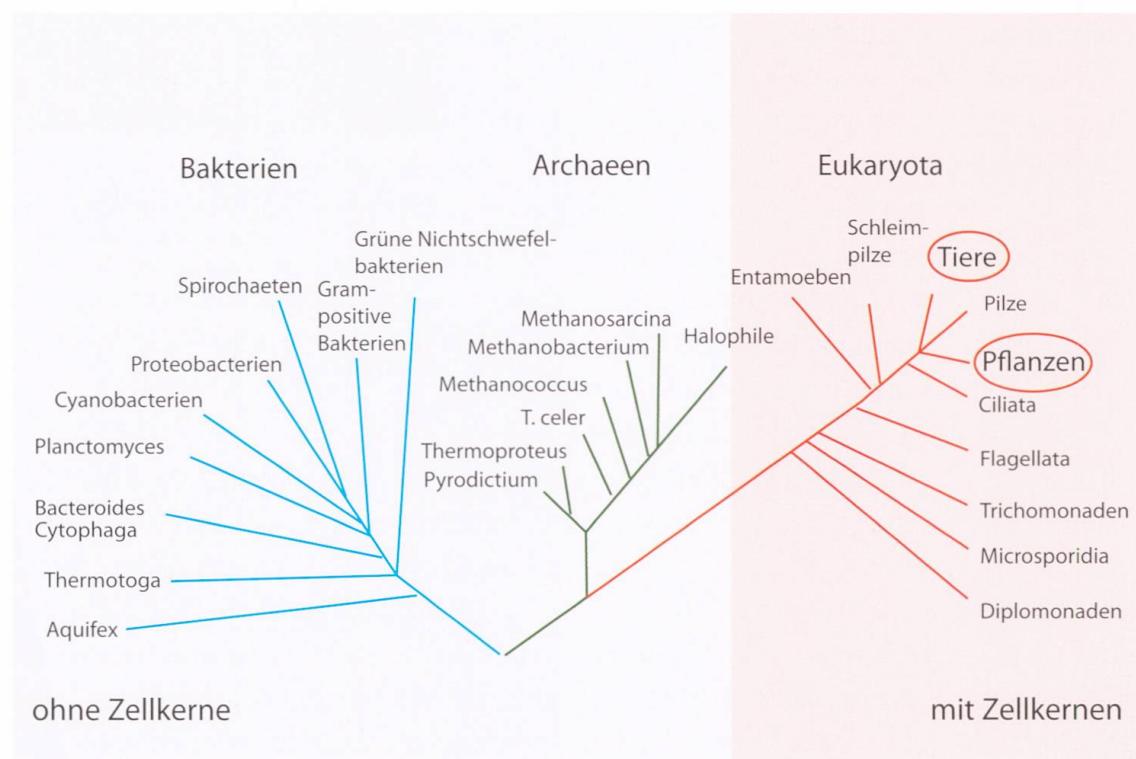


Abb. 4.6: Stammbaum der Lebewesen, abgeleitet von neuen molekularbiologischen Erkenntnissen. Tiere und Pflanzen besetzen eine vergleichsweise «randliche Position».

5. Eine chemische Reaktion verändert die Welt: die Fotosynthese

Wie unsere Gesellschaft als Ganzes benötigt auch jede noch so kleine Lebensform Energie. Die allerfrühesten Lebensformen scheinen dafür chemische Energie genutzt zu haben. Der ganz grosse Durchbruch gelang aber, als es gewisse sehr ursprüngliche Lebewesen schafften, die Energie des Sonnenlichtes in chemische Energie umzuwandeln. Nach unserem heutigen Wissen verdanken wir einerseits sämtlichen freien Sauerstoff der Atmosphäre diesem Prozess. Andererseits beziehen heute fast alle höheren Lebewesen entweder direkt (Pflanzen) oder indirekt (Tiere) die für das Leben notwendige Energie von der Sonne.

5.1 Das Chlorophyll als Sammler von Energie

Chlorophyll ist das Zauber-Molekül, das die Sonnenenergie einfangen kann. Es ist grün und kann den roten und blauen Anteil des Lichtspektrums der Sonne absorbieren und die dabei gewonnene Energie zur Herstellung von organischen Verbindungen benutzen, also Fotosynthese betreiben. Das ist etwas ganz Entscheidendes für die gesamte Evolution, für Pflanzen und für Tiere. Höheres Leben ist ohne die in Pflanzenteilen gespeicherte Energie nicht vorstellbar, wir alle sind auf die Leistungen der Pflanzen angewiesen und könnten bald nicht mehr existieren, wenn das Pflanzenkleid der Erde zerstört würde.

Bei der Fotosynthese entstehen mit Hilfe von Wasser (H_2O) und Kohlenstoffdioxid (CO_2) unter Einwirkung des Sonnenlichtes hochenergetische organische Stoffe, wie zum Beispiel Traubenzucker ($C_6H_{12}O_6$). Dabei wird durch die Spaltung des Wassers Sauerstoff frei und Energie gebunden. Es ist im Detail ein sehr komplizierter Prozess, lässt sich aber mit einer stark vereinfachten chemischen Summenformel beschreiben (Abb. 5.1).

Die Photosynthese funktioniert dank dem Molekül Chlorophyll und einigen anderen sogenannten Assimilationspigmenten.

Das Chlorophyll (Abb. 5.2) liegt in den höheren Pflanzen in Chloroplasten oder Chlorophyllkörnern vor, die ihre eigene Erbsubstanz (DNS) besitzen. Wie bereits oben erwähnt sind sie eigentlich Symbionten, die ihre Selbständigkeit z.T. noch behalten haben. Man erkennt das daran, dass sie sich in einem eigenen, von der Zelle unabhängigen Rhythmus teilen.

Der Traubenzucker (Abb. 5.3), der als erstes Produkt der Fotosynthese entsteht, ist einerseits **Energielieferant** für viele Lebensvorgänge. Da er was-

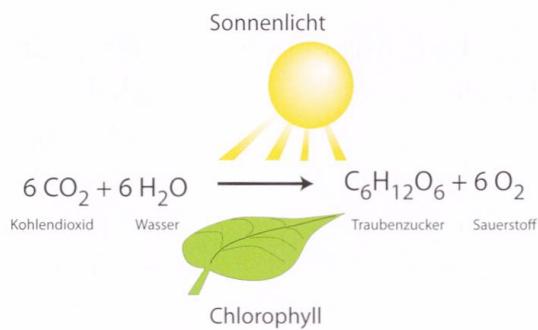


Abb. 5.1: Die Summenformel der Fotosynthese

so die Energie aus der Fotosynthese gefahrlos aufbewahren und bei Bedarf die Traubenzuckermoleküle wieder abspalten.

Anderseits kann Traubenzucker auch als Baustein für organisches Material verwendet werden. Wenn der Traubenzucker zu einer anderen Kette

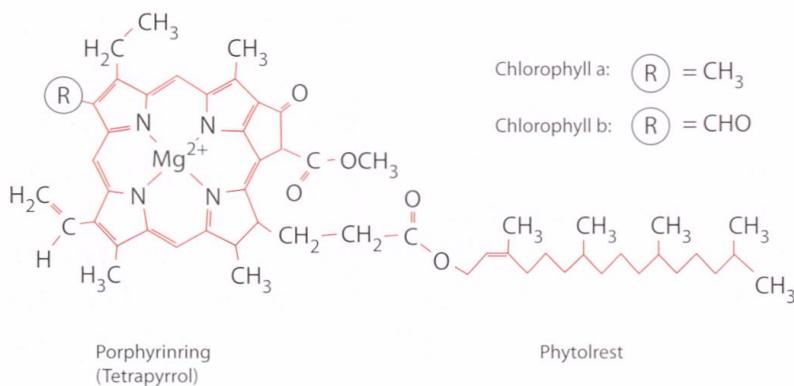


Abb. 5.2:
Das Chlorophyll:
Summenformel
 $\text{C}_{55}\text{H}_{72}\text{MgN}_4\text{O}_5$

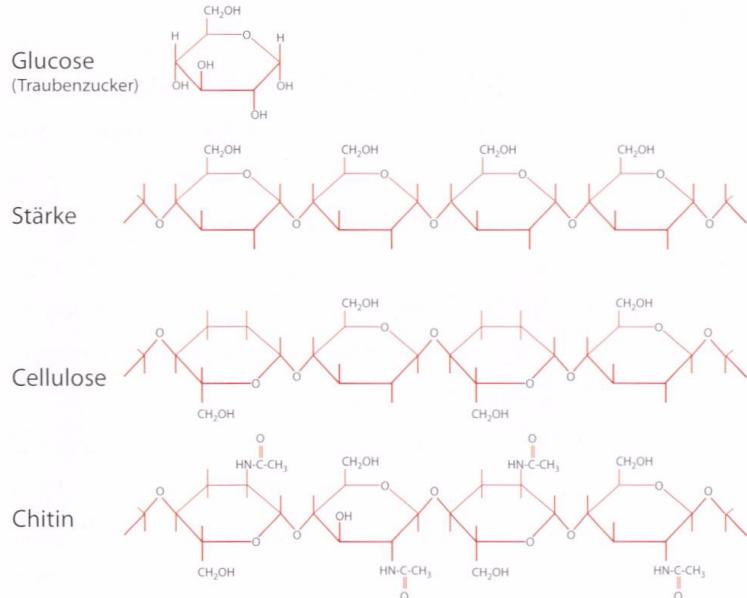


Abb. 5.3: Traubenzucker (Glucose), Stärkekette, Cellulose und Chitin

von Molekülen verknüpft wird, entsteht die **Cellulose** (Abb. 5.3). Sie bildet Pflanzenfasern und ist auch im Holz vorhanden und nicht wasserlöslich.

Wird einer Traubenzuckerkette an gewissen Stellen eine Stickstoffgruppe eingefügt, so entsteht **Chitin** (Abb. 5.3). Auch auf diese andere Weise ist der Traubenzucker ein Baustein für eine derbe Struktur, sie ist der Baustoff für die Panzer von Insekten und anderen Gliedertieren. Auch Stützelemente in Pilzen bestehen aus Chitin.

Ein Molekül kann also, wiederum ähnlich wie ein Legosteine, auf verschiedenste Arten genutzt werden.

Durch die Fotosynthese entstanden sehr früh grosse Mengen von organischem Material, das von Bakterien und später auch von höheren Organismen als Baumaterial oder als Nahrung genutzt werden konnte.

5.2 Die ersten «Pflanzen»

Chlorophyll ist nicht das einzige Biomolekül, das Sonnenenergie umwandeln kann, also ein sogenanntes Assimilationspigment ist. Das tintenblaue Phyco-cyan, das aus Cyanobakterien extrahiert werden kann, absorbiert nicht genau dieselben Wellenlängen des Lichtes, ist aber ebenfalls ein Assimilationspigment. Sein Bau ist verwandt mit dem des Chlorophylls, der Porphyrinring ist aber noch nicht geschlossen, sondern gestreckt.

Carotine, gelbe, anders gebaute Moleküle, sind als Fotosyntheshelfer praktisch in allen grünen Pflanzen vorhanden. Sie funktionieren auf komplexe Art als Lichtsammler und schützen auch das Chlorophyll vor Schädigung durch das Licht.

Die Cyanobakterien (Abb. 4.3) waren vor etwa 3,4 Milliarden Jahren die Erfinder der Fotosynthese und somit die ersten «Pflanzen» (im weitesten Sinne). Sie lebten für Hunderte von Millionen Jahren im Meer. Sie bildeten matenförmige Verbände, und sie fällten Kalk aus, indem sie CO_2 aus einem chemischen Gleichgewicht im Meerwasser aufnahmen. Lagenweise wurden auch Tonminerale, Silt und Sand in den klebrig-schleimigen Matten eingelagert. Dadurch bildeten sich charakteristisch geschichtete Gesteine, die Stromatolithen, die als Zeugen eine unvergängliche Spur frühen Lebens hinterliessen. Auf der vom Licht abgewandten Seite der Matten lebten andere Bakterien mit den fotosynthetisch aktiven Cyanobakterien zusammen.

Ähnliche Vorkommen von Stromatolithen, wie man sie schon aus rund 2 Milliarden Jahre alten Gesteinen kennt, sind noch heute von verschiedenen Orten auf der Erde bekannt: z.B. in Baja California (Mexico), um die Bahamas und in Westaustralien (Shark Bay; Abb. 5.4). Die australischen Vorkom-

men findet man in warmem, seichtem, klarem Wasser mit hohem Salzgehalt, der sie z.B. vor Schneckenfrass schützt. Ähnliche, wenn auch meist nicht ganz so prominente Gebilde gibt es aber auch anderswo auf der Erde. Heute sind an ihrer Bildung in der Regel nicht mehr nur Cyanobakterien beteiligt; oft sind auch Grünalgen oder Rotalgen mit dabei. Dass sich solche «Stromatolithen» auch heute noch bilden können, zeigen eindrücklich die «Schnegglisande» vom Unter- und Bodensee (Abb. 5.5). Hier wachsen die organischen Matten nicht flach auf dem Gewässergrund, sondern rund um Schneckenhäuser, Muschelschalen, Steine oder Holz.

Stromatolithen treten im Laufe der Erdgeschichte immer wieder auf (Abb. 5.6, 5.7); fossile Beispiele kennt man auch von mehreren Orten in der Schweiz (z.B. Säntis, Jura, Tessin, Graubünden).

5.3 Fotosynthese und Klima

Die Formel der Fotosynthese zeigt: mit jedem organischen Molekül, das entsteht, wird auch Sauerstoff (O_2) freigesetzt. Damit wurde mit der Verbreitung der ersten Organismen, die Fotosynthese betrieben, auch Sauerstoff an die Umgebung abgegeben.

Zunächst wurde dieser Sauerstoff sofort wieder verbraucht, indem er im Wasser neue chemische Verbindungen einging. Auch Eisen und andere im Meerwasser gelöste Metalle wurden oxidiert und dadurch teilweise ausgefällt,



Abb. 5.4: Stromatolithen aus der Shark Bay, Australien (einzelne Körper ca. 40 cm bis 1 m)



Abb. 5.5: «Schnegglisand» am Grund des Rheins bei der Insel Werd; Bildausschnitt oben rechts Querschnitt durch kalkige Algenknollen (grösseres Exemplar: 3.5 cm im Durchmesser)



Abb. 5.6: Fossiler Stromatolith mit der typischen unregelmässigen und welligen Lamination (Hauptdolomit, Trias, Ofenpass, Breite 16 cm)

z.B. als Hämatit. Es entstanden ausgedehnte Eisenerz-Lagerstätten auf dem Meeresboden. Wo sie hochgehoben wurden, können sie heute im Bergbau kommerziell genutzt werden: als gebänderte Eisenerze, oder Banded Iron Ore (Abb. 5.8).

Nachdem die Metallionen oxidiert waren, erhöhte sich die Konzentration des freien Sauerstoffes im Wasser und in der Atmosphäre. Das war für viele der ursprünglichen Einzeller eine Katastrophe, sie wurden selbst oxidiert und getötet. Sauerstoff war für die damaligen Lebewesen ein gefährliches Gift.

Wie im Kapitel 4 «Die Entstehung des Lebens» erwähnt, existierten schon früh Bakterien, welche die Sauerstoffatmung als Energiegewinnungsart beherrschten, die also mit Hilfe des Sauerstoffes Energie aus organischen Molekülen gewinnen konnten. Eine dieser Bakterienarten wurde in der Folge als Mitochondrium in die Zellen aller Sauerstoff atmenden Lebewesen aufgenommen. Jede Zelle mit Sauerstoff-Stoffwechsel hat sehr viele Mitochondrien; diese haben wie die Chloroplasten eigene DNS und können sich ebenfalls unabhängig von der Wirtszelle vermehren.



Abb. 5.7: Fossiler Stromatolith aus Bolivien mit der charakteristischen Schichtung (El Molina Formation, Oberkreide, Breite 19.5 cm)



Abb. 5.8: Gebändertes Eisenerz (Northern Territory, Australien, 2.4 Mia. Jahre, Breite 18 cm)

Auch sie wurden als Stoffwechselhelfer und im Speziellen als Umsetzungs-maschinerie des giftigen Sauerstoffes in energiereiche Moleküle (ATP, siehe Abschnitt 5.4) unentbehrlich für das Überleben der Zellen im aeroben Mi-lieu.

Da infolge der Fotosynthesetätigkeit der Algen die Sauerstoffkonzentra-tion im Wasser zunahm, erweiterten sich die Möglichkeiten für diese O_2 -atmenden Lebewesen gegenüber den anderen, die anaerob lebten.

Die alten Strategien zur Energiegewinnung, nämlich Chemosynthese und Gärung, wurden nun von der moderneren Atmung konkurreniert, aber nicht ausgelöscht.

Der Prozess der Fotosynthese verbraucht, wie man sieht, CO_2 und produ-ziert O_2 und zwar im Mengenverhältnis 1 : 1. Während der Sauerstoff an die Umgebung abgegeben wird, wird das CO_2 in Pflanzenmaterial eingebaut und so «fixiert». Es wird erst wieder frei, wenn das organische Material verrottet, verbrennt oder veratmet wird. Wenn das organische Material als Kohle oder Öl abgelagert wird, bleibt pro CO_2 ein Sauerstoffmolekül in der Atmosphäre.

Die CO_2 -Konzentration der Atmosphäre hatte und hat noch immer einen fundamentalen Einfluss auf die Temperatur der Erde, wie wir noch sehen werden.

Die Anreicherung von O_2 in der Atmosphäre hatte aber auch einen an-deren, gefährlichen Aspekt. Durch den langsam folgenden Anstieg der Sau-erstoffkonzentration in der Luft begann sich unter UV-Einfluss Ozon (O_3) zu bilden. In Bodennähe ist dieses Gas sehr aggressiv und oxidiert alles, aber es begann sich in die Stratosphäre zu verschieben, wo es interesseranterweise für die Erde als Schutzschild gegen UV-Strahlung wirkt. Nur Dank dieser Schutzschicht war es Pflanzen und Tieren überhaupt erst möglich, aus dem Wasser zu steigen und das Land zu erobern.

Ohne die Erfindung der Fotosynthese würde die Erde fundamental anders aussehen, Tiere wären wohl nie entstanden.

5.4 Weitere Verwendung von Molekülen

In der Evolution werden einmal erfundene Moleküle später oft umgebaut und für andere Zwecke verwendet.

Der Porphyrinring, der das Grundgerüst des Chlorophylls darstellt (vgl. Abb. 5.2), wird in Abwandlungen für viele andere Moleküle verwendet, die alle mit der Atmung und dem Sauerstoff in Verbindung stehen, z.B. Hämoglobin, Atmungsfermente (Cytochrome), Katalasen, Peroxidasen, Vitamin B12. Es sind alles Hilfsstoffe des Sauerstoffwechsels.

Ein anderes Molekül, das an wichtigen Stellen des Stoffkreislaufes eine Schlüsselstellung einnimmt und als Ausgangsmolekül für weitere Wirkstoffe fungiert, ist Adenin (Abb. 5.9).

Adenin ist einer der vier Bausteine der DNS und der RNS und damit ein Teil des genetischen Codes. Es ist aber auch Ausgangsstoff für biologische Lock- und Schreckstoffe.

Wird an Adenin eine Ribose (Zucker) angehängt, so wird es zu Adenosin und damit zum Grundgerüst für das ATP/ADP/AMP-System, also für die universellen Energiemoleküle Adenosin-Tri-, -Di- oder -Monophosphat (Abb. 5.10 und 5.11).

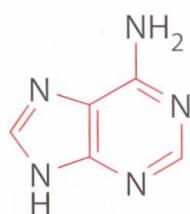


Abb. 5.9: Das Molekül von Adenin

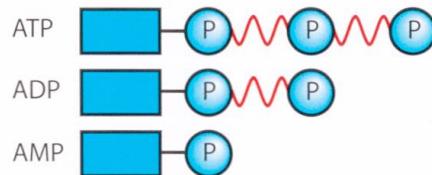


Abb. 5.10: Adenosin- Tri-, -Di- oder Monophosphat



Abb. 5.11: Das Molekül von Adenosin

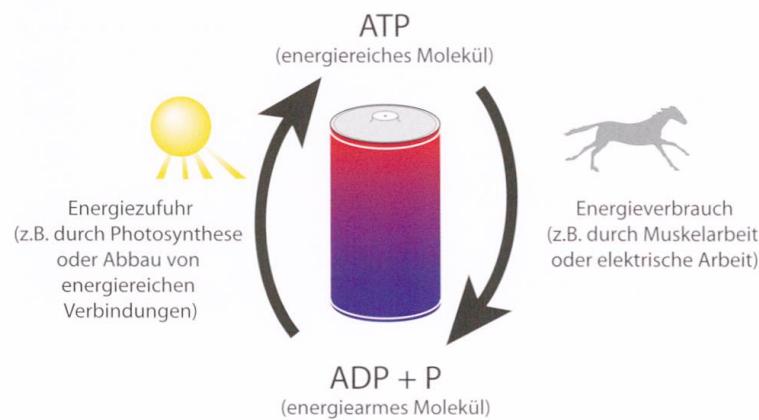


Abb. 5.12: ADP/ATP- «Batterie»

Überall wo im Stoffwechsel Energie freigesetzt wird tritt das Adenosin in Funktion. Unter Energieaufwand können diesem Molekül eine, zwei oder drei Phosphatgruppen angehängt werden. Die gewonnene Energie wird so in chemische Bindungsenergie umgewandelt und kann überall dort, wo gerade Energie benötigt wird, durch Abspaltung der Phosphatgruppe wieder freigesetzt werden – für alle möglichen «Arbeiten» des Lebewesens, z.B. für die Synthese von organischen Molekülen, für Muskelarbeit, Nervenreizleitung oder als osmotische Arbeit. Auch für das Leuchten der Leuchtkäfer liefert ATP die Energie.

Nicht immer wird die Energie genau dann benötigt, wenn sie im Stoffwechsel anfällt. Das ATP/ADP/AMP-System kann sie also speichern und dann abgeben wenn sie gebraucht wird. Es wirkt wie eine Batterie, die man, je nach Bedarf, auf- oder entladen kann (Abb. 5.12)

Im Stoffwechsel höherer Organismen wirkt das Adenosin auch noch ganz anders; es beeinflusst das Nervensystem, indem es Neurotransmitter blockieren kann.



Abb. 6.1: Die Makroalge *Chara* (Armleuchteralge) ist vermutlich nahe mit den Vorfahren der ersten Landpflanzen verwandt. Man kennt ihre fossilen Eibehälter aus 400 Millionen Jahre alten Gesteinen. Die «Zerbrechliche Armleuchteralge» (links, Bildbreite ca. 15 cm) lebt auch heute noch bei Schaffhausen im Rhein (rechts: Flussbett beim Schaaren).

6. Die ersten Pflanzen steigen aus dem Wasser

Während Hunderttausenden von Jahren lebten Mikroorganismen im Urmeer. Ihre Zellen waren weich und wenig widerstandsfähig. Ausser den Cyanobakterien, die Kalk ausschieden und Sedimente in ihre Algenmatten einbauten (vgl. Kapitel 5), haben die ein- bis wenigzelligen Lebewesen keine harten Zeugen ihrer Existenz hinterlassen und man weiss wenig von ihnen. Was sie aber weiter gegeben haben, ist ihre Erbsubstanz. Die Stoffwechsel-eigenheiten, die sie entwickelt hatten, gingen nicht alle verloren. Molekular-genetiker finden in den heute lebenden Organismen noch immer Anwei-sungen von anno dazumal. Dieses Erbe zeigt eindrücklich die ungeheure Komplexität des Lebens, die sich schon zu Urzeiten entwickelt hat.

Wenn die Fossilien nach dem Erdzeitalter geordnet werden, zeigt sich eine auffallende Abfolge der Pflanzenevolution. Im Folgenden werden diese Schritte nachvollzogen, meistens mit Fossilien aus Sammlungen des MzA. Wo das nicht möglich ist, sollen Fotos von anderswo das Verständnis erleichtern.

Die ersten Lebewesen, die das Festland eroberten, waren wohl Mikroben und Algen, möglicherweise auch Pilze und Flechten, und zwar lange bevor die Vorfahren der modernen Pflanzen an Land gedeihen konnten. Hinweise aus fossilen Böden sind immerhin 1.2 Milliarden Jahre alt!

Die eigentlichen Vorfahren der Landpflanzen waren vermutlich nicht diese ersten Landgänger, sondern im Wasser lebende Algen. Aufgrund der Zellstrukturen, von biochemischen Prozessen und Vergleichen der DNS und der RNS nimmt man heute an, dass die Landpflanzen aus den Grünalgen hervorgegangen sind. Insbesondere in der eigenartigen Gruppe der Arm-leuchteralgen (Charophyceae; Abb. 6.1) finden sich viele Merkmale (z.B. im Bereich der sexuellen Fortpflanzung oder der Photosynthese), die sonst für Landpflanzen typisch sind.

Mit der Zerbrechlichen Armleuchteralge (Abb. 6.1) lebt im Rhein bei Schaffhausen noch heute eine vermutlich nahe Verwandte der ersten Landpflanzen. Ein lebendes Fossil vor unserer Haustür!

Mit der Eroberung des Festlandes mussten die Pflanzen mit mehreren grossen Herausforderungen fertig werden. Am Land sind die Auswirkungen der Schwerkraft viel deutlicher; Landpflanzen mussten ein Stützgewebe ent-wickeln, um in die Höhe und dem Licht entgegen wachsen zu können. Sie mussten sich zudem vor Verdunstung schützen und das Wasser mit einem Leitgewebe von den Wurzeln zu den Organen in grösserer Höhe transpor-



Abb. 6.2: Brunnenlebermoos; Lebermoose gehören zu den uraltesten Pflanzen und sind fossil bereits aus dem Devon bekannt. Schirmchen: Männliche Sporeenträger.



Abb. 6.3: Laubmoos *Atrichum undulatum*; fossile Laubmossen wurden erstmals in Gesteinen des Karbons gefunden (Bildbreite ca. 6 cm).

sind viel seltener, aber bei uns auch vertreten. Diese drei Abteilungen bilden jeweils natürliche Abstammungslinien. Die Moose insgesamt bilden jedoch keine natürliche Verwandtschaftsgruppe.

Gefäßpflanzen, also Pflanzen mit einem System von wasserleitenden Gefäßen, scheinen von der dritten Abteilung von Moosen abzustammen: den Hornmoosen.

Die ersten makroskopischen Fossilien von Landpflanzen wurden in England in Gesteinen des Silur gefunden; sie sind damit etwa 425 Mio. J. alt. Es handelt sich um ***Cooksonia***, eine sehr ursprüngliche Gefäßpflanze. Sie

tieren können. Nach dem, was wir heute wissen, erfolgte der Übergang schrittweise: er begann mit Moosen.

In Gesteinen mit einem Alter von rund 470 Mio. J. die ersten Fossilien auf, die auf Landpflanzen hindeuten. Es sind jedoch noch unspektakuläre Funde: mikroskopisch kleine Sporen. Möglicherweise handelt es sich um Sporen von Verwandten der heutigen Lebermoose (Marchantiophyta; Abb. 6.2), aber eigentliche «Grossfossilien» von Lebermoosen stammen erst aus der deutlich jüngeren Zeit des späten Devons (350 Mio. J.).

Moose zeichnen sich dadurch aus, dass sie noch keine Wurzeln und kein Stütz- oder Leitgewebe besitzen. Dadurch sind sie noch heute sehr direkt ans Wasser gebunden. Sie haben die Fähigkeit, Wasser zu speichern und können daher für ihr Biotop sehr wichtig sein. Sie sind aber auch an feuchte Lebensräume gebunden und bleiben gezwungenermaßen klein.

Unsere häufigsten Moose gehören zu den weit verbreiteten Laubmossen (Abb. 6.3). Lebermoose und die dritte Abteilung, die Hornmossen,

befindet sich damit bereits auf einer höheren Entwicklungsstufe als die Moose. Sie bestand aus nur wenigen Zentimeter hohen, gegabelten Stängeln mit Sporenkapseln (Sporangien) an den Enden. Blätter zum Einfangen des Sonnenlichtes gab es noch nicht; die Photosynthese fand nur in den Stängeln statt. Ob sie im Boden verankert war, ist unbekannt, denn sie besaß keine Wurzeln, sondern eine Art Rhizom (kriechender Stängel).

Vor etwa 408 Mio. J. lebte die Pflanze ***Rhynia*** (Abb. 6.4). In Rhynie in Schottland wurde sie in Hornstein (Chert) eingeschlossen in perfekter Erhaltung gefunden. *Rhynia* besaß nun eine einfache Form von Wurzeln und ein funktionstüchtiges Wasserleitungssystem, das verdickt war und gleichzeitig als Stütze für ein aufrechtes Wachstum diente. Man muss sie sich als etwa kniehohes, buschiges Gewächs vorstellen.

Aglaophyton (Abb. 6.5, Abb. 6.6) ist eine nah verwandte, aber noch etwas ursprünglichere Form. Sie besaß noch keine Verdickungen im Wasserleitungssystem. *Aglaophyton* ist die häufigste Art im Hornstein von Rhynie.

Abb. 6.6: *Aglaophyton* ist oft von einer Anomalie betroffen, auf Querschnitten sichtbar als konzentrischer Ring dunkel gefüllter Zellen, verstreut zwischen normalen Zellen, gelegen in einer Tiefe von wenigen Zelldurchmessern unterhalb der Epidermis. Bei hoher Vergrößerung erweist sich die dunkle Substanz in den Zellen als dichtes Gewirr winziger verzweigter Pilzfäden, sehr ähnlich heutigen Formen von Symbiose, bekannt als Arbuskuläre Mykorrhiza. Die Erscheinung ist eingehend beschrieben und dem Pilz *Glomites rhyniensis* zugeordnet worden (Unterdevon, Schottland, Breite 7 mm).

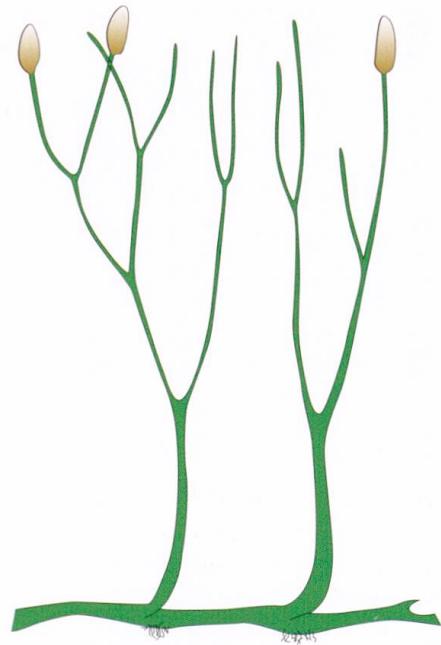


Abb. 6.4: Rekonstruktion von *Rhynia*

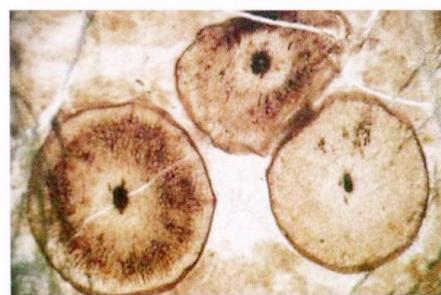
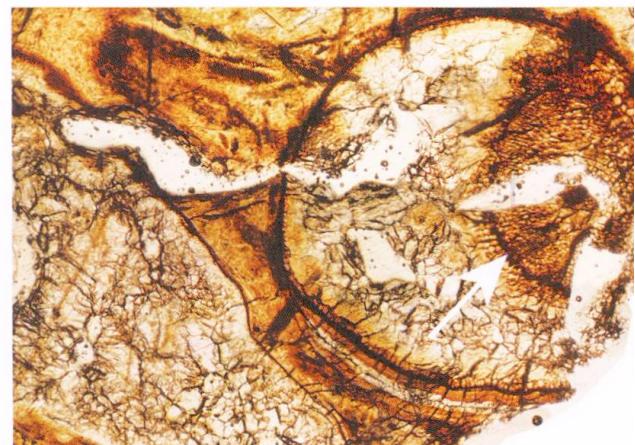


Abb. 6.5: Stielquerschnitte von *Aglaophyton* (Unterdevon, Schottland, Breite 1 cm)



Ein sehr ähnliches Gewächs, ebenfalls aus der frühen Devon-Zeit, war *Zosterophyllum* (Abb. 6.7). Diese Pflanze trug die Sporenkapseln jedoch nicht mehr an den Enden, sondern seitlich am Stängel.

Landpflanzen prägen das Gesicht der Erdoberfläche seit ihrem ersten Auftreten. Sie verstärken die chemische Verwitterung und beeinflussen die Bodenbildung. Gleichzeitig behindern sie mit ihrem Wurzelwerk das Abschwemmen der Böden und Lockergesteine. Es gelangen durch ihre Aktivität mehr gelöste Nährstoffe in die Gewässer und ins Meer. In der Devon-Zeit soll dieser Nährstoffeintrag aufgrund der raschen Ausbreitung der Landpflanzen möglicherweise zu einer ausserordentlichen Algenblüte und damit zu einem Aussterbeereignis im flachen Wasser geführt haben.

Sehr deutlich veränderte sich auch die Art der Fliessgewässer. Bevor es eine Vegetationsdecke gab, waren die Flüsse breit, mit flachen, unstabilen Uferbereichen und mit einem hohen Anteil an Geschiebe. Mit dem Auftreten der Pflanzen wurden die Flüsse schmäler, mit klarer definierten Ufern. Bei Überschwemmungen wurde das Land mit feinkörnigem Ton und Silt überdeckt, ein eindeutiges Zeichen für intensivere chemische Verwitterung im Hinterland. Es entstanden schliesslich Überschwemmungsebenen mit mäandrierenden Flüssen. Diese Entwicklung hätte ohne Vegetationsdecke in der Form nicht stattfinden können. Die Pflanzen schufen damit aber auch neue Lebensräume, auf die sich dann wiederum andere Pflanzen und Tiere spezialisieren konnten. Man denke nur an die vielfältigen Lebensräume, die ein Regenwald im Vergleich mit einer flachen, vegetationslosen Küstenebene bieten kann.

Während der Devonzeit entwickelten sich die Pflanzen von wenigen Zentimeter kleinen, einfachen, stängeligen Gewächsen (siehe *Cooksonia*, weiter oben) zu riesigen, bis 30 m hohen Bäumen (z.B. *Archaeopteris*, eine Pflanze zwischen Farn und Samenpflanze). Gleichzeitig scheint sich jedoch auch die

Vegetationsdecke räumlich stark ausgedehnt zu haben. Dies hatte grosse Auswirkungen nicht nur auf die Erdoberfläche, sondern gar auf die Zusammensetzung der Atmosphäre. Doch dazu mehr im folgenden Kapitel.



Abb. 6.7: Fragmente von *Zosterophyllum llanoveranum* (Unterdevon, Llanover, Wales; Breite 5 cm)

7. Das Blatt und seine Funktionen

Die Fotosynthese der ersten Landpflanzen fand direkt im Stiel oder Stamm der Pflanze statt, Blätter waren noch keine vorhanden. Nach der Eroberung des Landes dauerte es noch 50 Millionen Jahre, bis sich aus schuppenartigen Auswüchsen an den Stängeln die hochspezialisierten Organe der Blätter bildeten.

Unsere Welt wäre wohl eine andere, hätten die Pflanzen nicht Blätter entwickelt. Blätter sind die Nahrungsquelle der Festländer – von Bakterien und Pilzen über Motten und Käfer bis hin zu den Kühen oder uns selbst: wir alle leben letztlich von Blättern – oder von anderen Tieren, die Blätter fressen. Weite Teile der Erdoberfläche sind heute von Blättern bedeckt. Vom Flugzeug aus wird deutlich: ob Regenwälder, Grasländer oder Tundra, das Grün der Blätter bestimmt das Gesicht grosser Teile des Festlandes.

Um die Funktion der Blätter zu verstehen, muss man zuerst deren Aufbau studieren.

Blätter sind flache, dünne Sonnenkollektoren, die als Fotosyntheseapparate funktionieren und gleichzeitig dem Gasaustausch dienen. Sie sind so gebaut, dass sie bei einem Sturm nicht zerriissen und doch die grösstmögliche Oberfläche aufweisen. Natürlich haben sich die Blätter später im Lauf der Evolution an zahlreiche Lebensbedingungen angepasst und dabei auch



Abb. 7.1: Querschnitt durch ein Efeu-Blatt (Dicke des Blattes ca. 0.3 mm)

zusätzliche Funktionen übernommen. Nur so kann ihre schier unerschöpfliche Formenvielfalt verstanden werden.

Der Aufbau folgt immer dem selben Muster (Abb. 7.1). Im Querschnitt finden wir oben zuerst eine durchsichtige Membran, welche die darunter liegenden Teile schützt. Darauf folgt das Palisadengewebe, das der Hauptort der Fotosynthese ist. Es enthält die Chloroplasten, das eigentliche biochemische Fotosyntheselabor. Darunter liegen lockere Zellen mit Chlorophyll, und dazwischen besteht ein Luftraum, in dem Luft und die Gase der Assimilation zirkulieren können (Schwammgewebe). Die Unterseite wird wieder mit Deckzellen abgeschlossen, in denen die Spaltöffnungen stecken, die den Gasaustausch mit der Umwelt ermöglichen. Ausnahmen von diesem Bau zeigen die Gräser mit Spaltöffnungen auf beiden Blattseiten sowie Wasserpflanzen mit Schwimmblättern, bei denen die Spaltöffnungen auf der Oberseite liegen.

Diese Spaltöffnungen (Abb. 7.2) sind von enormer Wichtigkeit. Zwei bohnenförmige Zellen, die Chlorophyll enthalten, bilden eine Öffnung, die reguliert werden kann. Hier wird das CO_2 aufgenommen und das Abfallprodukt der Fotosynthese, der Sauerstoff, abgegeben. Aber: wenn die Spalten offen sind, verliert das Blatt und somit die Pflanze auch Wasserdampf. Dieser Wasserverlust ist einerseits ein Problem (Welken der Pflanze), anderseits ist das Verdampfen Antrieb des Massenstromes. Dieses für die Pflanze lebenswichtige Transportsystem

bringt gelöste Nährstoffe von der Wurzel in alle anderen Pflanzenteile. Die Spaltöffnungen müssen ein Optimierungsproblem lösen, das für das Funktionieren des pflanzlichen Lebens entscheidend ist.

Eine Möglichkeit der Steuerung beruht darauf, dass die Schließzellen der Spaltöffnungen selbst Wasser enthalten. Wenn sie prall voll sind, öffnet sich der Spalt und der Stoffaustausch funktioniert. Haben die beiden bohnenförmigen Zellen hingegen wenig Wasser, werden sie schlaff und der Spalt schließt sich. Da die Schließzellen Chlorophyll

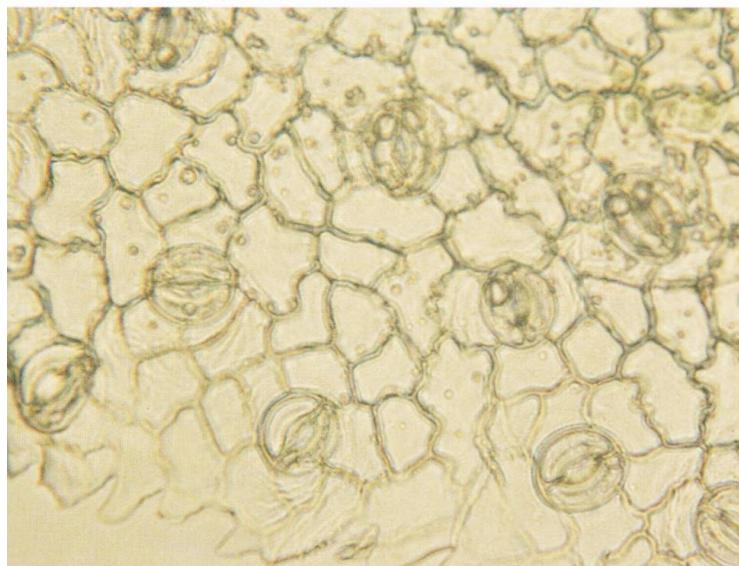


Abb. 7.2: Mikrofoto der Blattunterseite von Liguster. Es gibt rund 300 Spaltöffnungen pro mm^2 (Länge der Spaltöffnungen ca. 30 μm).

enthalten, können sie auch selbst Energie produzieren und dadurch den Öffnungszustand des Spaltes aktiv beeinflussen.

Ein weiterer wichtiger Effekt der Verdunstung von Wasser am Blatt ist bei Hitze eine sehr effektive Kühlung der Pflanze. Die Anzahl der Spaltöffnungen hängt ab von der Pflanzenart und der Lichtexposition des Blattes: Sonnenblätter haben mehr Öffnungen als Schattenblätter. Zudem hat man festgestellt, dass die Anzahl der Spaltöffnungen in erdgeschichtlichen Zeiten stark vom CO_2 -Gehalt der Luft abhing: bei tiefer CO_2 -Konzentration bildeten die Blätter mehr, bei höherer weniger Spaltöffnungen aus.

Warum dauerte es rund 40 Millionen Jahre, bis die Pflanzen die Blätter erfanden?

Die ersten Pflanzen waren klein und hatten noch keine richtigen Wurzeln. Im Laufe der Zeit hatte sich langsam eine Erdkrume gebildet und im Boden standen nun Nährstoffe zur Verfügung. Jetzt konnten die Pflanzen wachsen, aber das bedingte eine bessere Infrastruktur: Wasserleitungsgefäße und ein stabiles Wurzelwerk wurden nötig, damit die im Wasser gelösten Nährstoffe aufgenommen und transportiert werden konnten. Es bildete sich ein Röhrensystem (Xylem), das verholzte Wände hatte und die Stängel stabilisierte, sodass sie nicht einknickten. Auch wurde dadurch das Röhrensystem vor dem Kollabieren durch den Unterdruck geschützt, der beim Massenstrom entsteht. Das alles plus ein Pumpensystem für den Wassertransport brauchte Energie, und die Stängel boten nicht mehr genügend Oberfläche für die Energiegewinnung durch Fotosynthese; zudem begann auch die CO_2 -Konzentration der Luft abzunehmen. Eine grössere Fläche für die Fotosynthese war nötig geworden – das Blatt war die optimale Lösung.

Die Evolution von Wurzeln, Wasserleitungssystem, Dickenwachstum und des komplexen Blattes muss gleichzeitig erfolgt sein, denn das Eine bedingt das Andere. Es dauerte sehr lange, bis die Blätter völlig entwickelt waren, erste richtige Blattstrukturen finden sich in den Fossilien des mittleren und späten Devon, d. h. vor ca. 390 – 354 Millionen Jahren.

Die Blätter sind die Lungen (Gasaustausch) und die Assimilationsorgane (Einbau von C-Atomen in organische Moleküle) der Pflanze; sie wurden nötig, als die Pflanzen grösser wurden.

8. Die Pflanzen des Karbonzeitalters

Steinkohle – kaum ein anderes Gestein hat die westliche Gesellschaft so nachhaltig geprägt. Der Begriff ist fest mit der industriellen Revolution verbunden – und noch heute ist Steinkohle einer der wichtigsten Energieträger weltweit!

Steinkohle (Abb. 8.1) verlieh auch einer geologischen Zeitperiode den Namen: «Karbon». Viele der kommerziell genutzten Kohlelager in Deutschland, England, Nordamerika, China oder anderswo stammen aus dieser Zeit. Steinkohle ist nichts anderes als über Jahrtausende umgewandeltes Pflanzenmaterial und scheint sich in dieser Zeit in gigantischem Ausmass gebildet und bis in unsere Zeit erhalten zu haben. Dieses Ereignis ist in dieser Dimension in der Erdgeschichte einmalig. Die Untersuchung dieser Extremsituation könnte vielleicht auch helfen, unser heutiges System «Erde» zu verstehen.

Zu Beginn des Karbons herrschte auf der Erde ein mehrheitlich warmes Klima. Die Kontinente vereinigten sich zusehends zum Riesenkontinent Pangaea. Der Meeresspiegel war tief, und im warmfeuchten Klima konnten sich in den Küstengebieten ausgedehnte Küstenwälder und -sümpfe bilden (Abb. 8.2). Riesenartige Schachtelhalme, Verwandte der Bärlappgewächse, Farne und Samenfarne dominierten das Bild eines «Regenwaldes» mit Baumriesen und üppigem Unterwuchs. Gliedertiere und Insekten enormen Ausmasses bevölkerten diese urtümlichen Wälder. *Arthropleura*, ein Vorfahre der Tausendfüssler, soll 2 m Länge erreicht haben. Ur-Libellen mit Flügelspannweiten von bis zu 70 cm schwirrten durch die Lüfte, riesige Kakerlaken krabbelten durchs Unterholz. Reptilien spielten noch eine untergeordnete Rolle, aber Lurche, einige Formen davon meterlang, sind ebenfalls dokumentiert.

Die enorme Menge an organischem Material konnte aber ganz offensichtlich nicht oder zumindest nicht annähernd so schnell abgebaut werden, wie sie gebildet wurde; ein grosser Anteil wurde als Kohle abgelagert und nicht zu CO_2 abgebaut (Abb. 8.3). Die abgestorbenen Bäume fielen in den Sumpf und blieben liegen. Einige Wissenschaftler sehen den Grund dafür in der Verholzung – oder genauer: in der Bildung von Lignin. Lignin ist ein komplexes und sehr stabiles Molekül, ein sogenanntes Biopolymer, das Pflanzen in ihre Zellwände einbauen. Vieles



Abb. 8.1: Steinkohle als Gestein
(Breite 10 cm)

deutet darauf hin, dass es noch kaum Mikroorganismen gab, die dieses Lignin abbauen konnten. Und Lignin scheinen die Bäume des Karbons, speziell die Bärlappbäume, in grossen Mengen in ihre dicke Rinde eingebaut zu haben. Im Laufe von Tausenden und Millionen von Jahren bildeten sich unter Druck und Luftabschluss die Steinkohleflöze. Erstaunlicherweise findet man in den Kohleflözen selbst kaum erkennbare Pflanzenfossilien. Die Strukturen wurden bei der Umwandlung in Kohle zerstört. Aber dort, wo die Kohleflöze in Sand-, Silt- oder Tonsteine übergehen, sind oft Fossilien in Form von schwarzen Abdrücken erhalten. Sie erlauben es, ein Bild der damaligen Urwälder zu entwerfen.

In der Sammlung Schalch sind viele fossile Pflanzen aus dieser Zeit vorhanden, hauptsächlich aus Sachsen und Böhmen, einige auch aus Westdeutschland. Wenige Pflanzen dieser Funde sind nach der heutigen gültigen Nomenklatur bestimmt, denn Schalch war ja in erster Linie Geologe. Wir

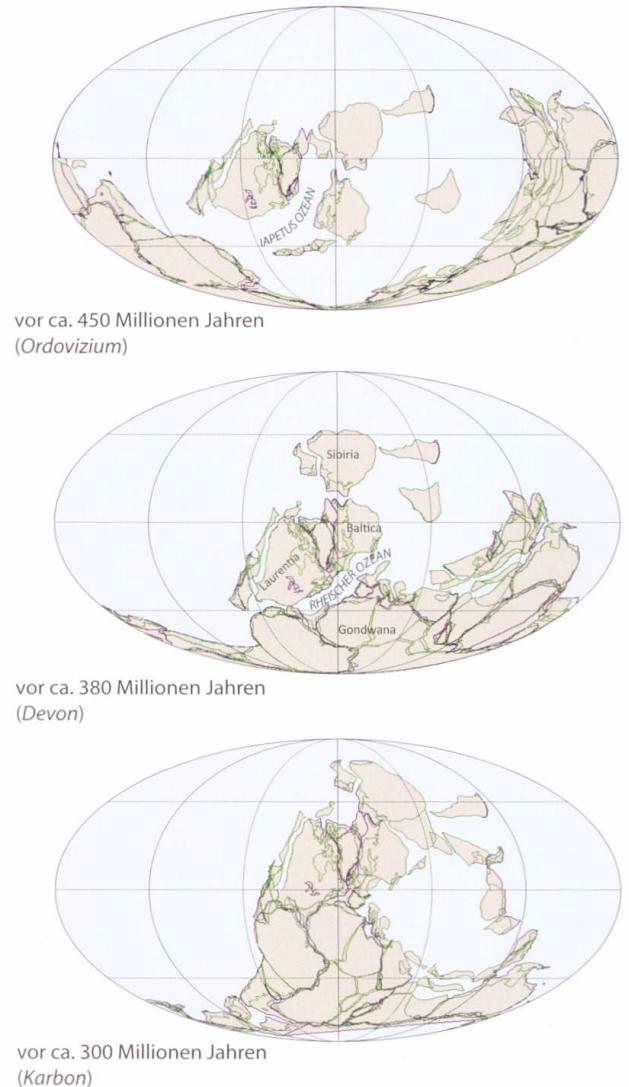


Abb. 8.2: Paläogeographische Karten Ordovizium bis Karbon

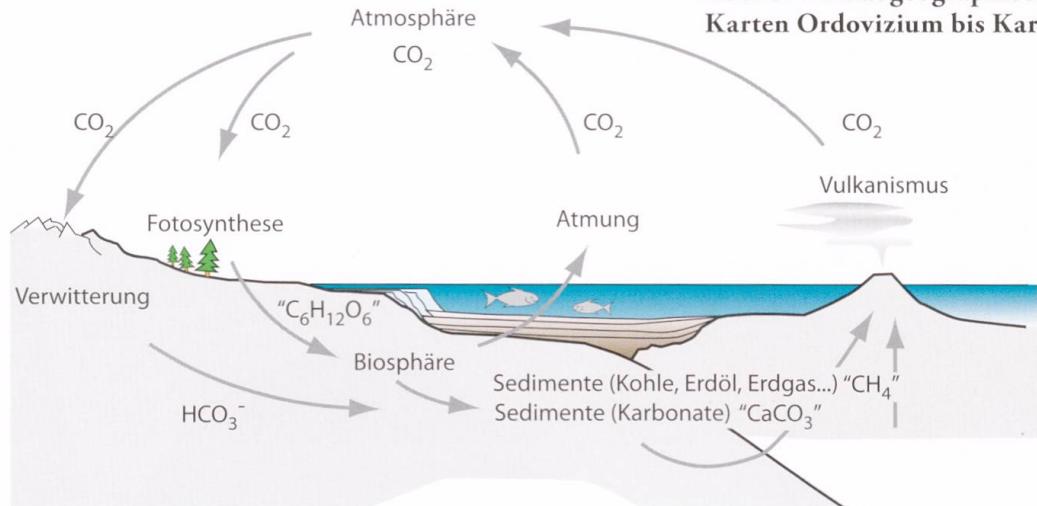


Abb. 8.3: Kohlenstoff-Kreislauf



Abb. 8.4: Heutiger Farn
(Wurmfern, *Dryopteris filix-mas*)



Abb. 8.5: Heutiger Schachtelhalm
(Riesenschachtelhalm, *Equisetum telmateia*), bis 1.5 m hoch

haben auf eine Nachbestimmung verzichtet und verwenden hier die ursprüngliche Namengebung des Sammlers.

Die Paläobotaniker («Pflanzenpaläontologen») versuchen, sich aus Bruchstücken von fossilen Pflanzen ein Bild von den damaligen Organismen zu machen. Sie müssen dafür ein Puzzle zusammensetzen, von dessen Gestalt sie noch keine Vorstellung haben – ein anspruchsvolles Stück Arbeit, das nur bewältigt werden kann durch genaueste Beobachtung und durch den Vergleich von sehr vielen Fundstücken.



Abb. 8.6: Heutiger Bärlapp (Berg-Bärlapp, *Lycopodium annotinum*), ca. 15 cm hoch

Der grösste Anteil der damaligen Pflanzenwelt gehörte zur Gruppe der Sporenpflanzen, sie pflanzten sich also mit Hilfe von Sporen und nicht von Samen fort (vgl. Kapitel 9). Dazu gehörten Farne (Abb. 8.4), Schachtelhalme (Abb. 8.5) und Bärlappgewächse (Abb. 8.6). Es gab aber auch grosse Bäume, die Cordaiten, die zur Gruppe der frühen Samenfarne gehörten und die ebenfalls einen beträchtlichen Teil der Flora ausmachten.

Von diesen grossen, einst die Erde dominierenden Pflanzengruppen leben heute nur noch kleine Verwandte, die Cordaiten sind ausgestorben.

8.1 Farne aus dem Karbon

Die ersten Farne existierten schon im Devon, erlebten aber im Karbon eine ungeheure Entfaltung (Abb. 8.7 – 8.10). Sie lebten als Bodenbedecker, als gebüscht hohe Pflanzen mit vielen verschiedenen Wedeltypen und sogar als bis 8 m hohe Farnbäume.

Alle Fossilien in den Sammlungen des MzA sind von den «Stämmen» getrennte Wedelbruchstücke, gelegentlich mit Strukturerhaltung.



Abb. 8.7: *Pecopteris* (Baumfarn, Zwickau, Sachsen, Breite 21 cm)



Abb. 8.8: *Neuropteris* (Samenfarn, Zwickau, Sachsen, Breite 15 cm)



Abb. 8.9: *Pecopteris cyathea* (Wettin, Sachsen-Anhalt, Breite 13.5 cm)

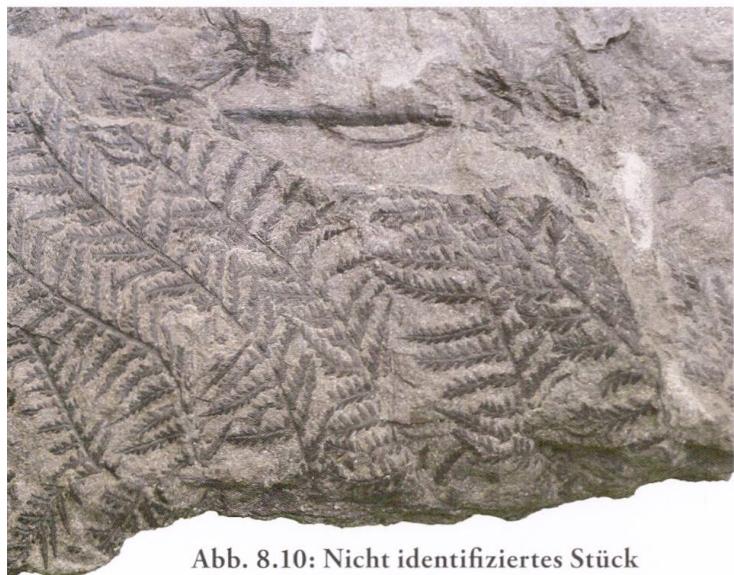


Abb. 8.10: Nicht identifiziertes Stück
(Sachsen, Breite: 15 cm)

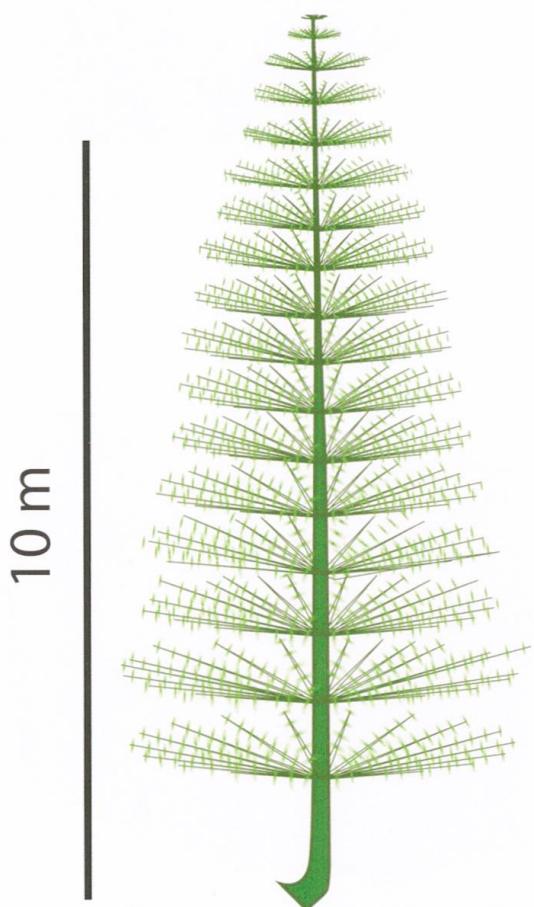


Abb. 8.11: Rekonstruktion eines *Calamites*,
eines ungefähr 10 m hohen Baumes

8.2 Schachtelhalme aus dem Karbon

Wie auch heute noch haben die alten Verwandten der Schachtelhalme einen ganz typischen Aufbau (Abb. 8.11): der Stamm oder Stängel ist aus länglichen Gliedern zusammengesetzt, an deren Grenze jeweils ein Kranz aus Blättern entspringt. Die Art der Blätter führt in der Systematik zu verschiedenen Untergruppen, die wir aber der Übersichtlichkeit wegen nicht berücksichtigen wollen. Die Pflanzen bildeten im Boden eine Art Rhizom, einen liegenden Stamm, aus dem die Stängel oder Stämme in die Höhe wuchsen.

Calamites war ein baumgrosser Schachtelhalm (Abb. 8.11, 8.12). Er konnte über 10 m hoch werden und wuchs an Gewässerrändern und in sumpfigen Urwäldern. Er besass ein ausgedehntes Wurzelwerk, über das er sich offensichtlich ungeschlechtlich vermehrten konnte. Erst Ende Perm starb diese wichtige Form aus.

Asterophyllites (Abb. 8.13) und *Annularia* (Abb. 8.14 und 8.15) sind nach heutiger Erkenntnis keine unabhängigen biologischen Formen, sondern Blattwerk von *Calamites*-Bäumen. Das schöne Fossil von *Asterophyllites* (Abb. 8.13) zeigt, wie man sich diese Pflanzen etwa vorstellen kann.

Sphenophyllum (Abb. 8.16, 8.17, 8.18) hingegen scheint von einer anderen Pflanze zu stammen. Sie besass



Abb. 8.12: *Calamites* (Sachsen, Länge 20 cm)

phyllum haben sehr ähnliche, wirtelig angeordnete Blätter. Die Unterscheidung ist daher oft nicht ganz einfach.

Bei den Fossilien von grösseren Schachtelhalmstängeln handelt es sich meistens um Kernausgüsse, d.h. das ursprünglich hohle Innere des Stammes wurde mit Sediment ausgefüllt und versteinerte dann. Die parallelen

einen eher schlanken Stängel, der die Pflanze vermutlich nicht selber tragen konnte. Man nimmt deshalb an, dass es sich bei einigen Arten dieser Gattung um Kletterpflanzen handelte, die sich an anderen Gewächsen in die Höhe rankten um näher zum Licht zu kommen, wie das heute die wilde Rebe tut.

Die Gattungen *Asterophyllites*, *Annularia* und *Sphenophyllum*



Abb. 8.13: *Asterophyllites*
(Fundort unbekannt, Breite 23 cm)

Strukturen sind die Leitgefässe, die am inneren Rand des Stängels verlaufen. Manchmal wurde der hohle Stamm auch platt gedrückt (siehe Abb. 8.19).



Abb. 8.14: *Annularia stellata*
(Zwickau, Sachsen, Breite 17 cm)

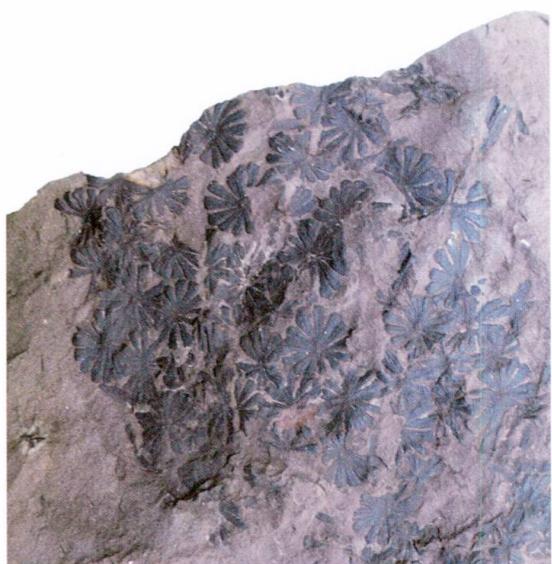


Abb. 8.15: *Annularia brevifolia*
(Zwickau, Sachsen, Breite 10 cm)



Abb. 8.16: Keilblatt (*Sphenophyllum*);
Zwickau, Sachsen, Höhe 16 cm



Abb. 8.17: Keilblatt (*Sphenophyllum*),
Fundort unbekannt, Höhe 12 cm



Abb. 8.18: Keilblatt (*Sphenophyllum*), Rekonstruktion. *Sphenophyllum* konnte bis zu 1 m hoch werden.



Abb. 8.19: Platt gedrückter *Calamites*-Stängel (Länge ca. 20 cm).

8.3 Bärlappgewächse aus dem Karbon

Die wohl eindrücklichsten Gewächse des Karbon waren die **Schuppenbäume** (Lepidodendren, Abb. 8.20, 8.21, 8.22). Sie wuchsen bis 30 m hoch und verzweigten sich erst ganz oben zu einer Baumkrone, die Wurzeln waren eher flach, denn sie wuchsen in Sumpfwäldern.

An den jungen Stämmen wuchsen Blätter, die später abfielen und typische «Blattpolster» hinterliessen. Von diesem auffälligen und graphisch überaus ansprechenden Rindenmuster kommt auch der Name Schuppenbaum. Der Stamm war wahrscheinlich grün und konnte Fotosynthese betreiben. Von den länglichen Blättern der Krone besitzt das MzA kein Fossil, ebenfalls keines von den Sporenständen an den Enden der Äste.

Mit den Schuppenbäumen verwandt und ebenfalls hoch gewachsen waren die **Siegelbäume** (*Sigillaria*, Abb. 8.23 – 8.25). Ihre Kronen waren schopfartig verzweigt.

Im oberen Teil des Stammes finden sich ebenfalls Blattnarben, die eine Siegelform haben und feiner sind als die der Schuppenbäume. Unten am Stamm findet man bastartige Strukturen. Auch der Stamm der Siegelbäume war wahrscheinlich grün und fähig zur Fotosynthese.

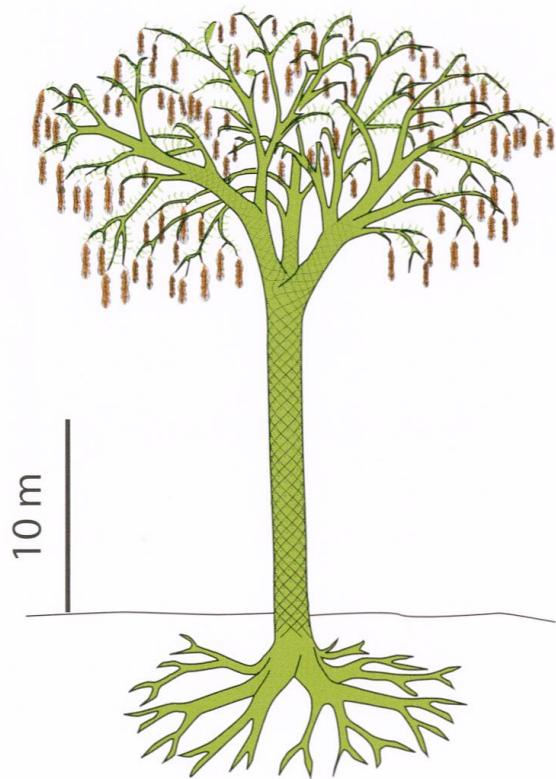


Abb. 8.20: *Lepidodendron* (Rekonstruktion)



Abb. 8.21: Schuppenbaum (*Lepidodendron*, Fundort unbekannt, Höhe 8 cm)



Abbildung 8.22: Schuppenbaum (*Lepidodendron*, Fundort unbekannt; Breite des Steines 15 cm)

Schuppen- und Siegelbäume wuchsen im Karbon fast auf der ganzen Erde und starben im Perm aus. Der Schaffhauser Geologe Dr. E. Witzig fand bei seinen Studien in Ostgrönland fossile Lepidodendren. Grönland lag damals deutlich näher am Äquator als heute.

Unter «Stigmaria» fasst man Formen zusammen, die man heute als Wurzeln von Schuppen- und Siegelbäumen interpretiert (Abb. 8.26). Die runden «Narben» stammen von abgefallenen Sekundärwurzeln.

Wenn man das Karbon als Zeitalter der Sporenpflanzen bezeichnet, heisst das nicht, dass keine anderen

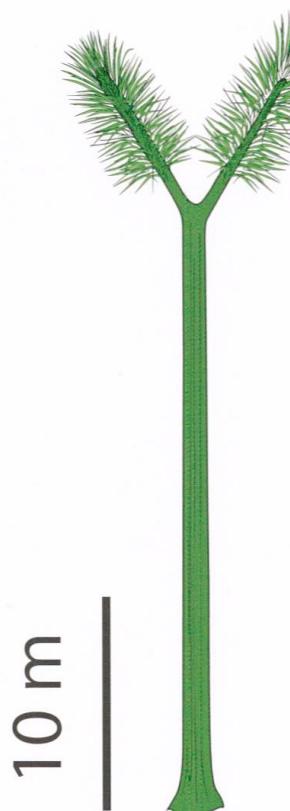


Abbildung 8.23: *Sigillaria*, Rekonstruktion



Abb. 8.24: Siegelbaum (*Sigillaria elongata*, Fundort unbekannt, Höhe: 15 cm)

Pflanzen gewachsen wären. Sie waren schon da, aber in geringer Zahl.

8.4 Die Welt des Karbons – ein Sonderfall der Erdgeschichte

Die Bildung von gigantischen Mengen von Kohle bedeutete auch eine Veränderung der Atmosphäre. Pflanzen wachsen durch Photosynthese: Aus CO_2 und Wasser wird organische Substanz und Sauerstoff. Normalerweise wird die organische Substanz nach dem Tod der Pflanze durch Pilze, Insekten, Mikroben und anderes wieder zersetzt, dadurch wird wiederum Sauerstoff gebunden und CO_2 in die Atmosphäre ent-



Abb. 8.25: Siegelbaum (*Sigillaria elegans*, Fundort unbekannt, Höhe 8 cm)



Abb. 8.26: *Stigmaria ficoides*
(Fundort unbekannt, Breite: 12 cm)

lassen (Atmung). Wenn nun damals das organische Material nicht genügend rasch zersetzt werden konnte, sondern im geologischen Untergrund vergraben wurde, muss dadurch die Atmosphäre ärmer an CO_2 und reicher an Sauerstoff geworden sein (siehe Abb. 8.3, Abb. 8.27). Tatsächlich deuten geochemische Untersuchungen genau auf diese Entwicklung hin. Trotz hohem O_2 -Gehalt gab es offensichtlich keine grossen Waldbrände in dieser Zeit, denn es gibt keine Hinweise auf fossile Holzkohle. Möglicherweise hatten die hohen Bäume eine schlecht brennbare Rinde, wie sie heute noch die Mammutbäume und die Redwoods in Kalifornien haben. Auch sie überleben Brände spielend, nutzen sogar die Chance, dass ihre Rivalen verbrennen, zu ihren Gunsten aus.

Vielleicht war dieser hohe Sauerstoffgehalt auch der Grund für das riesenhafte Wachstum der Gliedertiere und der Amphibien. Heute wäre eine Libelle mit 70 cm Flügelspannweite (Abb. 8.28) kaum lebensfähig. Gliedertiere versorgen ihren Körper mit Hilfe eines Systems von feinen Röhrchen mit Sauerstoff, den sogenannten Trachen. Dieses System ist hocheffizient für kleine Tiere; bei zunehmender Grösse stösst das System jedoch schnell an seine physiologischen Grenzen. Eine Libelle mit 70 cm Flügelspannweite wäre heute nicht in der Lage, ihre Flugmuskeln mit genügend Sauerstoff zu versorgen. Doch vor 300 Millionen Jahren scheint der Sauerstoffgehalt auf rund 35% gestiegen zu sein (heute sind es rund 21%). Unter diesen Bedingungen war es den Gliedertieren offensichtlich möglich, auch mit grösserem Körper erfolgreich zu überleben (Abb. 8.28 und 8.29).

Mehr noch, erst durch den hohen Sauerstoffgehalt und die dadurch dichtere Luft war es den Riesenlibellen mechanisch vermutlich überhaupt möglich, sich in die Luft zu erheben. Auch die Lurche, die nicht nur über die Lunge,

sondern auch über ihre feuchte Haut Sauerstoff aufnehmen können, profitierten sicherlich von der Situation.

In der zweiten Hälfte des Karbons wurde es kühler und trockener, unter anderem weil der Kontinent Gondwana zunehmend gegen den Südpol wanderte, so dass Gletscher sich ausbreiten konnten. Möglicherweise hatte auch der rasche Rückgang des Treibhausgases CO_2 in der Atmosphäre einen wichtigen Einfluss. Gletscherspuren aus jener Zeit finden sich heute in Südamerika, Afrika, Madagaskar, Arabien, Indien, Antarktis und Australien. In den niederen Breiten ist in dieser Zeit ein eigentlicher Kollaps des Steinkohle-Regenwaldes dokumentiert. Zahlreiche optimal an diesen Lebensraum angepasste Pflanzen und Tiere überlebten diesen Kollaps nicht. Andere profitierten: Die Stunde der Reptilien hatte geschlagen; sie waren besser an trockene Klimabedingungen angepasst und konnten ihren Siegeszug antreten, der erst durch das Aussterbeereignis vor 66 Millionen Jahren beendet wurde.

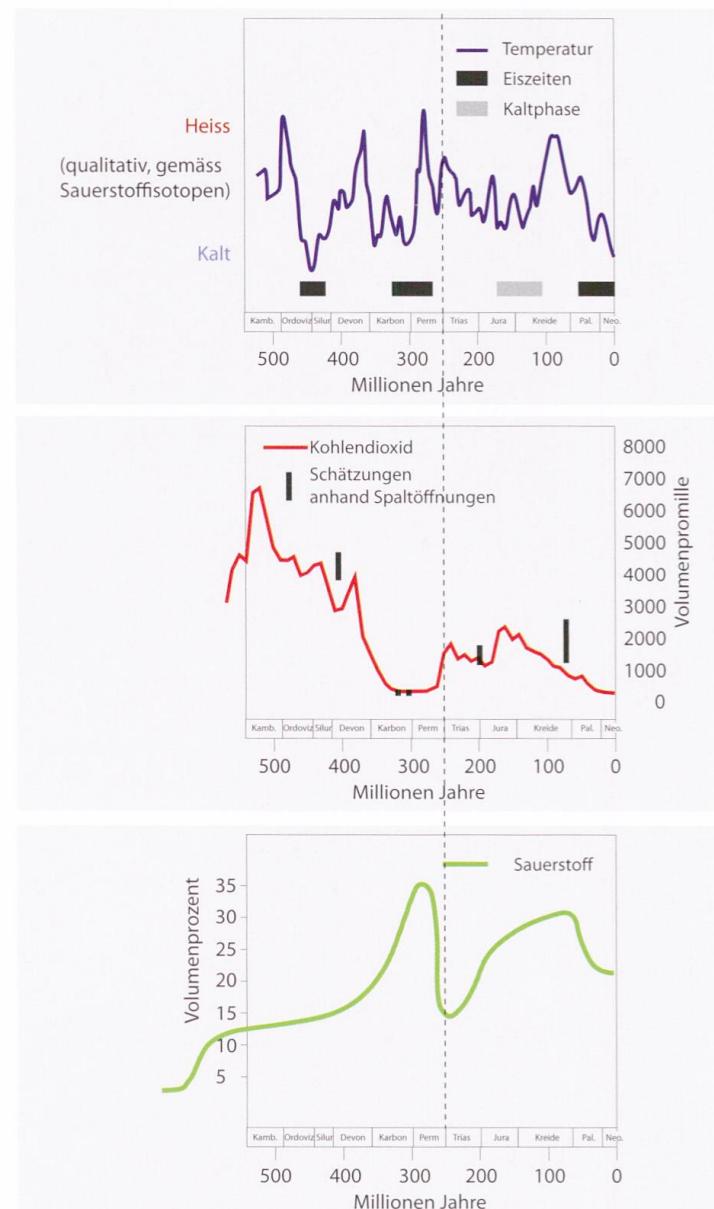


Abb. 8.27: Veränderung von Temperatur, Kohlendioxid und Sauerstoff in der Atmosphäre, über die Zeit. Die gestrichelte Linie markiert die Grenze Perm/Trias mit dem Massenaussterbeereignis.

Abb. 8.28: Rekonstruktion der Ur-Libelle *Meganeura*, eine Libelle mit 70 cm Spannweite. Wie es wohl tönte, wenn dieser «Heliokopter» durch die Luft flog? (Abbildung mit freundlicher Genehmigung des Museums für Naturkunde, Chemnitz).



Abb. 8.29: Rekonstruktion eines Riesen-gliederfüsslers *Arthropleura*: 2,5 m lang
(Abbildung mit freundlicher Genehmigung
des Museums für Naturkunde, Chemnitz)

Die Nahrungskette in den Karbonwäldern war wohl ziemlich kurz. Viele Insekten ernährten sich von den Pflanzen. Räuber waren sicher die Libellen, die Skorpione und die Spinnen. Möglicherweise erlegte ein primitives Reptil, das aus den Sümpfen kroch, einmal eine Libelle oder eine Spinne. Höhere Wirbeltiere existierten noch nicht.



Abb. 8.30: Platte mit diversen Pflanzenfossilien (Sachsen; Breite 53,5 cm)

9. Verschiedene Fortpflanzungsarten

Hunderte von Millionen Jahre lang pflanzten sich die Bakterien des Urmee- res durch Zweiteilung fort. Die Zelle wuchs bis zu einer bestimmten Grösse und teilte sich dann durch Mitose in zwei gleiche Teile (Tochterzellen) mit denselben Erbinformationen (ausgenommen Mutationen). So blieb die Zelle organisierbar.

Neben den Braun- und Rotalgen entwickelte auch eine uralte grüne Makroalge, die Armleuchteralge, neue Möglichkeiten zur Fortpflanzung. Schon vor 400 Mio. J. bildete sie eigene Organe, die nur zur Fortpflanzung dienten: Oogonien (Abb. 9.1), die Eizellen enthielten, und Antheridien (Abb. 9.2), die bewegliche, kleine Zellen produzierten. Die Pflanze ist haploid und bildet ihre Geschlechtsprodukte ohne Reduktionsteilung. Die entstehende Zygote, die dann einen doppelten Chromosomensatz aufweist, teilt sich aber sofort wieder und es entstehen wiederum Algen mit n Chromosomen.

9.1 Sporenpflanzen

Mit der Eroberung des Landes ent- stand eine neue Art der Fortpflan- zung: Die Pflanzen bildeten sehr viele, winzige Sporen, die an die Luft abgegeben wurden und sich weit ver- breiten konnten.

Moose sind die ältesten Sporen- pflanzen mit einer solchen Fortpflan- zungsart (Abb. 9.3 und 9.4). Da sie aber keine Wurzeln und keine Was- serleitungsgefässe ausbildeten, blie- ben sie klein und an feuchte Stellen gebunden.

Die Moospflanze (Abb. 9.4) ist haploid; auf ihr werden die Ge- schlechtszellen gebildet und die Eizelle befruchtet. Aus der Zygote wächst dann der diploide Sporen- träger, der aus Zellen mit doppeltem Chromosomensatz aufgebaut ist und auf der Moospflanze «parasitiert».



Abb. 9.1: Oogonien von Armleuchteral- gen (*Chara*) sind seit 400 Mio. J. (Devon) bekannt und haben heute noch praktisch dieselbe Gestalt (Grösse: Oogonium ca. 0.8mm).



Abb. 9.2: Antheridien (orange) einer Armleuchteralge aus dem Rhein (Durchmesser Antheridien ca. 0.6 mm)



Abb. 9.3: Lebermoos gehört zu den ersten Eroberern des Festlandes.

Durch Meiose entstehen die Sporen in den Kapseln, die später ausgestreut werden und aus denen neue Moospflänzchen wachsen.

Die anderen Sporenpflanzen hatten leistungsfähige Wurzeln und Wasserleitungsgefäße gebildet und konnten sich deshalb weiter entwickeln. Zu ihnen gehören heute die **Farne**, die **Schachtelhalme** und die **Bärlappgewächse**. Sie pflanzen sich ebenfalls mittels Generationswechsel



Abb. 9.4: Laubmoos (*Bryum sp.*) mit roten Sporenträgern und grünen Sporenkapseln (Kapselstiele ca. 2 cm)

($2n - n - 2n$ Chromosomen, Abb. 9.5) fort, er kann bei verschiedenen Pflanzen unterschiedlich ablaufen.

Die haploiden Sporen entstehen auf der Blatt-Unterseite des Farnwedels durch Reduktionsteilung (Abb. 9.6). Sie werden weggeschleudert und keimen zu einem fingernagelgrossen, herzförmigen Vorkeim aus. Auf diesem entstehen die Geschlechtsprodukte und dort werden auch die Eizellen befruchtet. Die entstehende Zygote wächst schliesslich aus zur stattlichen Farnpflanze, während der Vorkeim vertrocknet.

Allgemein gilt: die Geschlechtsprodukte der Sporen pflanzen werden in einem feuchten Milieu gebildet. Die Moospflanze ist schon als Ganzes stark an feuchte Standorte gebunden, während die Farnpflanzen und die Schachtelhalme ihren Vorkeim tief unten am Boden bilden, wo die beweglichen Spermatozoiden Regen oder Bodenfeuchte benützen, um die Eizellen aktiv mit ihren Geisseln schwimmend erreichen zu können. Die Sporen hingegen werden an einem Stängel oder einer höheren Pflanze gebildet und können dann dem Wind zur Verbreitung überlassen werden. Der Generationswechsel verbindet rasche Ausbreitung mittels ungeschlechtlich entstehender Sporen mit der Neukombination des Erbgutes durch Befruchtung.

Pilze vermehren sich ebenfalls durch Sporen. Sie sind aber **keine Pflanzen**, denn sie besitzen kein Chlorophyll. Ihr Stoffwechsel ist mit dem der Tiere näher verwandt, sie sind keine Produzenten, sondern Reduzenten und bilden neben den Pflanzen und den Tieren ein eigenes Reich. Sie gewinnen ihre Lebensenergie durch Abbau von organischem Material, etwa durch Zersetzen von Pflanzenteilen oder Fleisch.

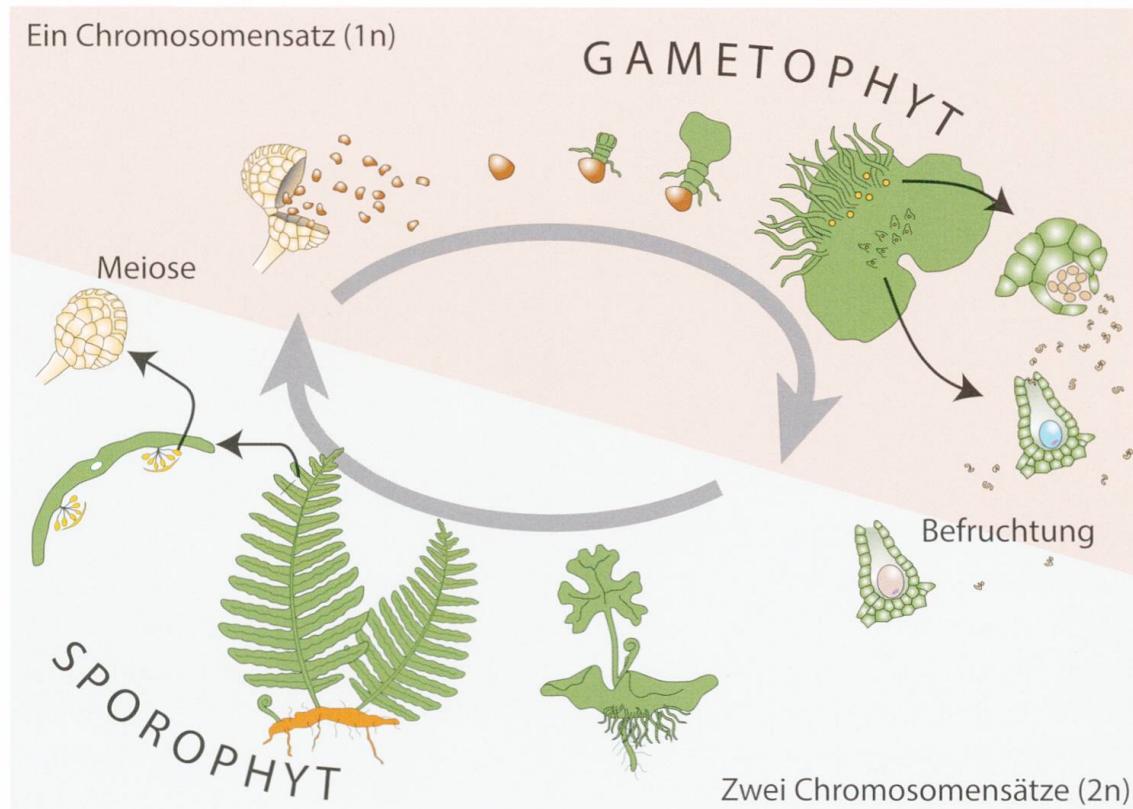


Abb. 9.5: Schematische Darstellung des Generationswechsels bei den Farnen.



Abb. 9.6: Sporenbehälter auf der Unterseite einer Farnpflanze: die Sporen werden bei Trockenheit fortgeschleudert. Die Sporenbehälter haben einen Durchmesser von 1.5 mm.



Abb. 9.8: Sporeenträger des Riesenschachtelhalmes. Detailaufnahme

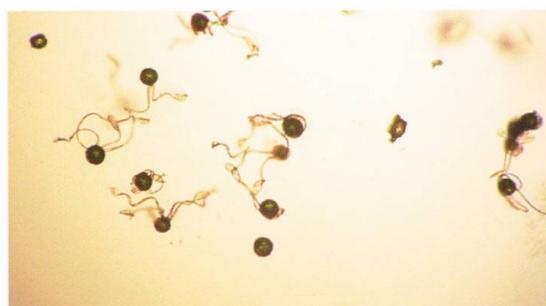


Abb. 9.10: Freigesetzte Sporen eines Riesenschachtelhalmes. Sie besitzen klebrige Fäden, mit denen sie sich aneinander und auch am Boden festhalten können.

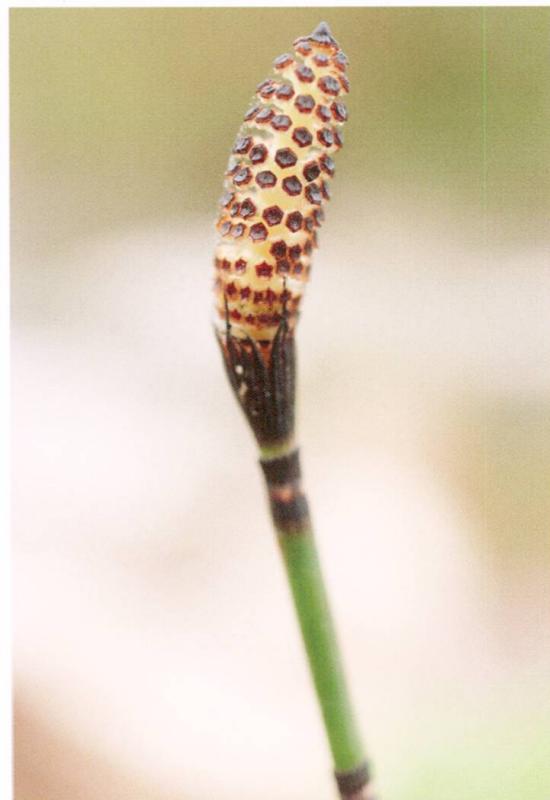


Abb. 9.7: Sporeenträger des Riesenschachtelhalmes: er hat kein Chlorophyll und stirbt bald ab. Der Sporeenträger ist etwa 4 cm lang.



Abb. 9.9: Offene Sporenkapsel des Riesenschachtelhalmes

9.2 Samenpflanzen

Die Samenpflanzen teilen sich in zwei Gruppen auf: die Nacktsamer (Nadelhölzer) und die Bedecktsamer (Laubbäume, Blumen und Gräser; Abb. 9.11). Ein Same ist – im Gegensatz zu einer haploiden Spore – ein viel komplizierteres Gebilde. Er besteht aus der befruchteten Eizelle, die bereits zu einem Keimling ausgewachsen ist, aus Nährgewebe (Fett, Eiweiss oder Stärke), das dem Keimling das Auskeimen und Wachsen erleichtert, und aus einer schützenden Samenhaut. Der Same besitzt also bereits $2n$ Chromosomen. Die Bedecktsamer bilden einen Fruchtknoten aus, in dem der oder die Samen geschützt sind (Abb. 9.12).

Die Pollenkörner sind haploid, sie entstehen in den Staubbeuteln. Sie müssen auf die Narbe des Fruchtknotens gelangen (Bestäubung) und dann auskeimen. Es wächst ein Pollenschlauch, der wenig haploide Zellen enthält, durch den Griffel zur Eizelle hin. Eine davon, die Spermazelle, verschmilzt dann mit der Eizelle und befruchtet sie (Zygote). Der Same ist somit wieder diploid und enthält je einen Chromosomensatz vom Vater und von der Mutter.

Die Tatsache, dass der junge Keimling mit Nahrung versehen wurde, ist wohl die Ursache der raschen, erfolgreichen Entwicklung der Samenpflanzen.

Die Geschlechtsorgane bei den Nadelhölzern (Nacktsamern) werden auf unterschiedlichen Zapfen gebildet. Die Pollensäcke öffnen sich, wenn es trocken ist und der Pollen weit fliegen kann. Weil meist eine Windbestäubung stattfindet, müssen sehr viele Pollen produziert werden (Abb. 9.13).

Die Fruchtblätter werden geschützt durch Schuppen, die später verholzen; sie liegen aber frei, es gibt keinen Fruchtknoten, und sie können vom Pollen direkt angeflogen werden (Abb. 9.14 und 9.15).

Viel sicherer ist aber die Bestäubung bei den bedecktsamigen Pflanzen. Einige benutzen immer noch den Wind, z.B. die Gräser. Aus ihrer Blüte hängen klebrige Narben, an denen der Graspollen hängen bleibt. Andere Bedecktsame wie Hasel oder Erle bilden «Würstchen» oder Kätzchen aus, die Pollen in grossen Mengen produzieren. Diese fliegen dann – wenn sie Glück haben – auf eine sehr reduzierte weibliche Blüte oder ein weibliches Kätzchen und bestäuben sie. Wenn sie weniger Glück haben, landen sie in der Nasenschleimhaut von Allergikern, die dann auch kein Glück haben!

Raffinierter machen es die Blumen und z.B. die Weiden: Sie locken Helfer herbei, die den Pollen gezielt auf eine andere Blüte tragen. Dazu mehr im Kapitel 13.3.

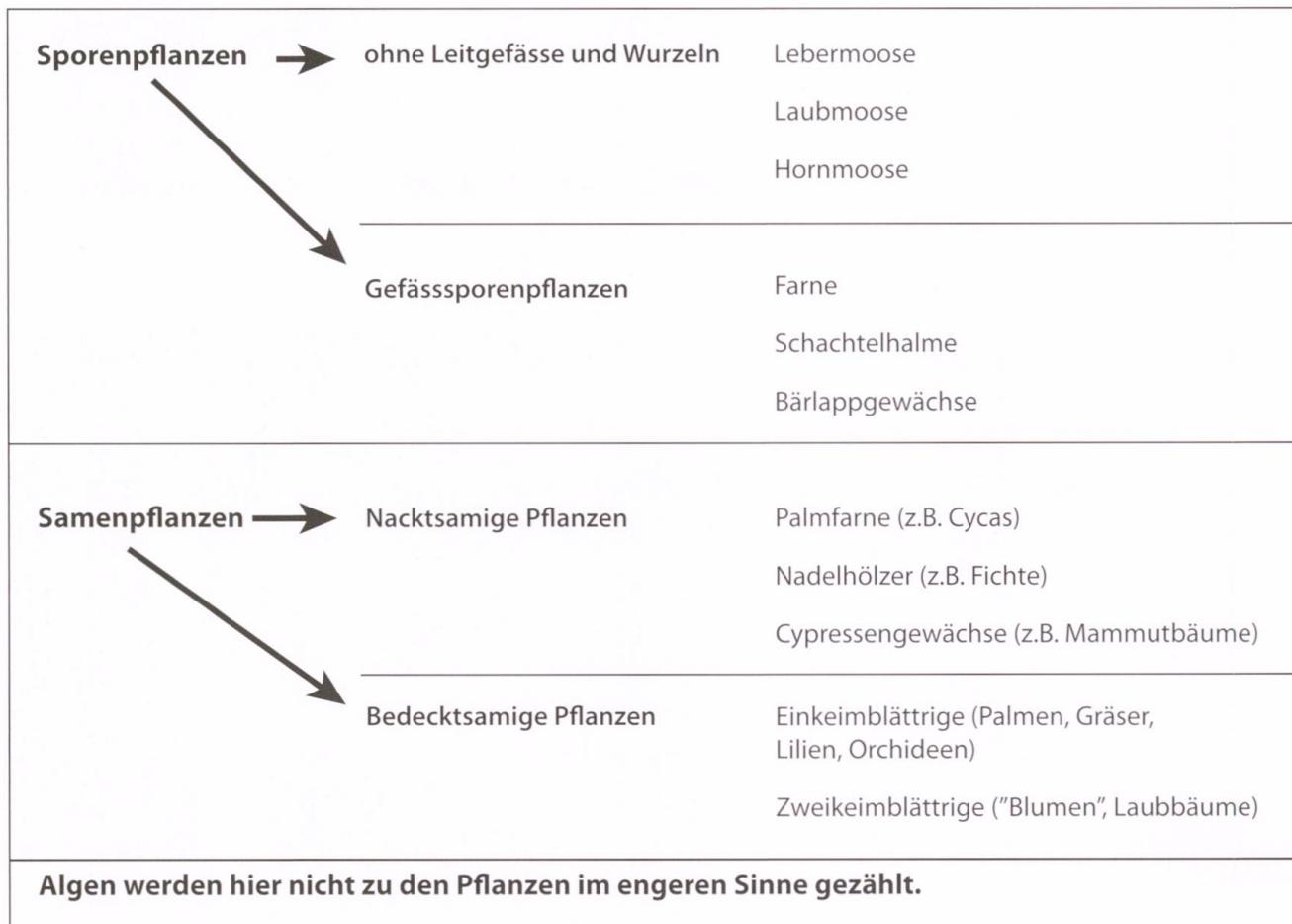


Abb. 9.11: Grob-Einteilung der Pflanzen

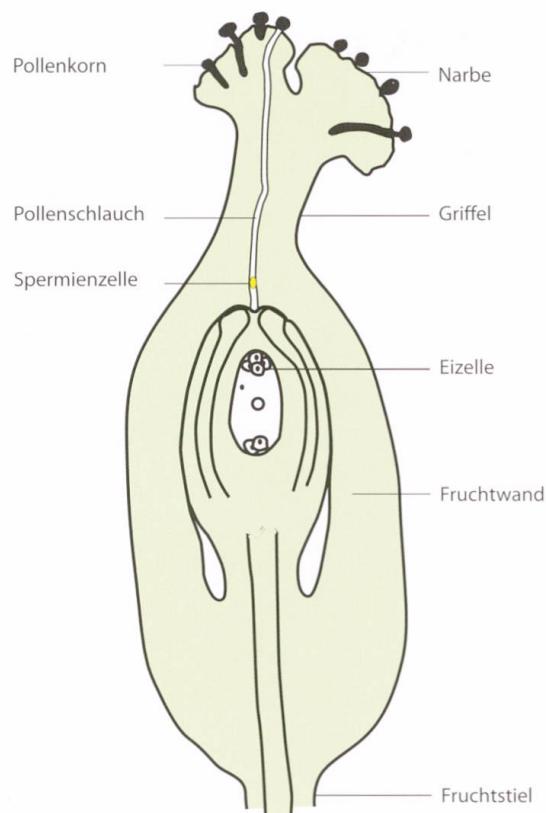


Abb. 9.12: Beispiel eines Fruchtknotens: Das Fruchtblatt bildet die *Eizelle* und umschliesst sie und ihre Hüll- und Helperzellen. Die Narbe ist das Kontaktorgan zur Außenwelt, auf ihr landen die Pollen und senden einen Pollenschlauch mit der *Spermienzelle* zur Eizelle (nach Strasburger, 2008).



Abb. 9.13: Fichtenpollen



Abb. 9.15: Fichtenzapfen-Schuppe und nackte Fichtensamen



Abb. 9.14: Männliche (gelb) und weibliche (rot) Zapfen der Fichte

10. Perm: Der Urkontinent Pangaea

In der zweiten Hälfte des Karbons kühlte sich das globale Klima merklich ab. Vereisungen auf dem Gondwana-Kontinent dehnten sich aus. Mitauslöser dieser Krise war vermutlich der nun sehr tiefe CO_2 -Gehalt der Atmosphäre. Es wurde auch zunehmend trockener. Als ein gewisser Schwellenwert erreicht wurde, kam es zu einem eigentlichen Kollaps der Regenwälder. Viele baumartige Bärlappverwandte starben dabei aus, Baumfarne wurden wichtiger. Es war einer der grössten Einschnitte in der Entwicklung der Pflanzen.

Dieser Klimatrend hielt an bis in die nachfolgende Periode, das Perm. Gegen das mittlere Perm aber schmolzen die Gletscher langsam zurück, das Innere des nun zusammengefügten Grosskontinents Pangaea wurde wärmer und trockener. Gegen Ende des Perms war das globale Klima charakterisiert durch weitverbreitete Trockenheit im Innern des Kontinents und entlang des Äquators, durch grosse Temperaturschwankungen und Monsun-Bedingungen auf Nord- und Südhalbkugel. Der Sauerstoffgehalt der Luft sank Ende Perm auf ca. 15% ab, vermutlich da es nun viel weniger Pflanzen gab.

Es wurde für viele Pflanzen unwirtlich. Nur an Fluss- und Seeufern oder am Meeresstrand gab es genügend Wasser zum Überleben. Nadelhölzer waren trockenresistenter und drängten die alten Sporenpflanzen zurück. Neue Samenpflanzen wie Cycadeen und Ginkgos traten auf. Auf der Südhalbkugel verbreitete sich eine sehr wichtige Gruppe von Samenfarnen, die *Glossopteris*-Flora (siehe unten, Abb. 10.1).

10.1 Rätselhaftes Gondwana

Das 18. und 19. Jahrhundert standen im Zeichen der naturwissenschaftlichen Erkundungsfahrten. Die unerschöpfliche Neugier der Weltreisenden füllte die Sammlungen der europäischen Museen. Unzählige Beschreibungen von fremdländischen Pflanzen, Tieren, Gesteinsformationen und Landschaften wurden in das schnell wachsende Gebäude der naturkundlichen Erkenntnis eingefügt. Dabei wurde zunehmend deutlich, dass es zwischen den Kontinenten der Südhemisphäre eine eigenartige Verbindung gab, die sich in der Verwandtschaft von lebenden und fossilen Pflanzen und Tieren äusserte. 1840 beschrieb der englische Botaniker Sir Joseph Dalton Hooker (Abb. 10.2) die Beobachtung, dass die Floren Südamerikas und Australiens sieben Familien der Blütenpflanzen und 48 Gattungen gemeinsam hatten, die es sonst nirgends gab. Ähnliche Muster zeigten auch Vergleiche dieser Kontinente mit den Floren Afrikas und Indiens. Wie konnte man das ange-

sichts der riesigen trennenden Ozeane erklären? Ende des 19. Jahrhunderts wurde die Idee eines grossen Kontinents geboren, der auf irgend eine Weise in einer unbekannten geologischen Vergangenheit die heutigen Kontinente miteinander verbunden haben musste. Der österreichische Geologe Eduard Suess prägte für diesen geheimnisvollen und imaginären Kontinent den Namen «Gondwana» (nach einer Region in Zentralindien, abgeleitet aus dem Sanskrit für «Waldland des Volkes der Gond»). Es gab verschiedene Spekulationen, wie diese Verbindung ausgesehen haben könnte; bis zur Erklärung sollten aber noch rund 100 Jahre vergehen.

Die wohl charakteristischste fossile Pflanze dieses Südkontinents wurde bereits 1828 vom französischen Paläobotaniker Adolphe Brongniart beschrieben: *Glossopteris* (Abb. 10.1). Die zungenförmigen Blätter (griech: «glossis» = Zunge, «pteris» = Farn) dieser Pflanze werden regelmässig in Gesteinen des Perms aus Indien, Südamerika, Afrika und Australien gefunden. Es handelt sich um eine Gattung der ausgestorbenen Pflanzengruppe der Samenfarne, die offensichtlich im gemässigten und saisonalen Klima gelebt hat, wie die Jahresringe in ihrem Holz andeuten. Man nimmt an, dass die mehrere Meter hohen Pflanzen sommergrün und Laub werfend waren und ähnlich wie die heutige Sumpfzypresse in sumpfigen Böden gediehen. Der Name «*Glossopteris*» steht noch heute für die Flora des Perms der Südkontinente, oder eben allgemeiner für das Verbindende der Pflanzenwelten Indiens, Afrikas, Südamerikas und Australiens.



Abb. 10.1: *Glossopteris* sp.

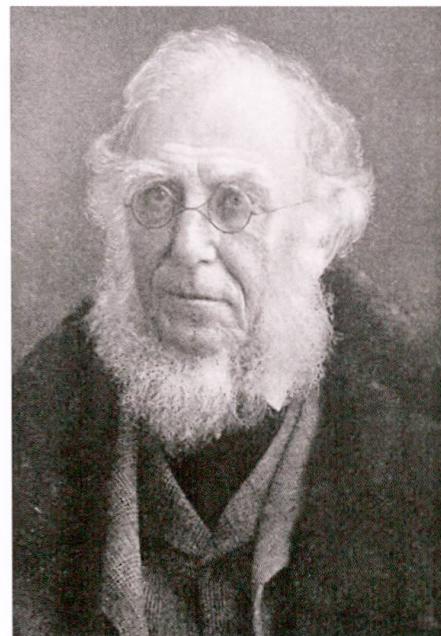


Abb. 10.2: Sir Joseph Dalton Hooker, 1817–1911

Zunächst erklärte man sich die Florenverwandtschaft mit hypothetischen Landbrücken, die einmal existiert haben müssten. Erst als 1912 der deutsche Meteorologe Alfred Wegener seine Theorie der Kontinentaldrift der skeptischen Wissenschaftsgemeinde präsentierte – und dabei die *Glossopteris*-Flora auch spezifisch als Beweis anführte – bot sich eine alternative Erklärung.

Wegeners Kontinentaldrift-Theorie schien in der damaligen Zeit allerdings wenig glaubwürdig und fand nur wenige Anhänger. Zu fest war das «Wissen» um die fixe Position der Kontinente im Denken der damaligen Zeit verankert.

Erst in den 1960er Jahren gelang der Kontinentaldrift-Theorie der Durchbruch; allerdings in der veränderten Form der Plattentektonik.

Es ist offensichtlich, dass diese Bewegung der Kontinente die Evolution und Verbreitung der Pflanzen beeinflusste. Nun bestätigte sich: tatsächlich existierte im Erdaltertum während mehr als 500 Millionen Jahren der Kontinent Gondwana, auf dem sich eine recht einheitliche Flora der Südhalbkugel bilden konnte.

Als sich Gondwana an der Wende vom Erdaltertum zum Erdmittelalter mit dem Nordkontinent Laurasia zum einzigen Grosskontinent Pangaea vereinigte, war das aber nicht das Ende der spezifischen Flora (Abb. 10.4). Zwar wurde die Flora auf beiden Seiten kosmopolitischer (u.a. mit neuen Formen

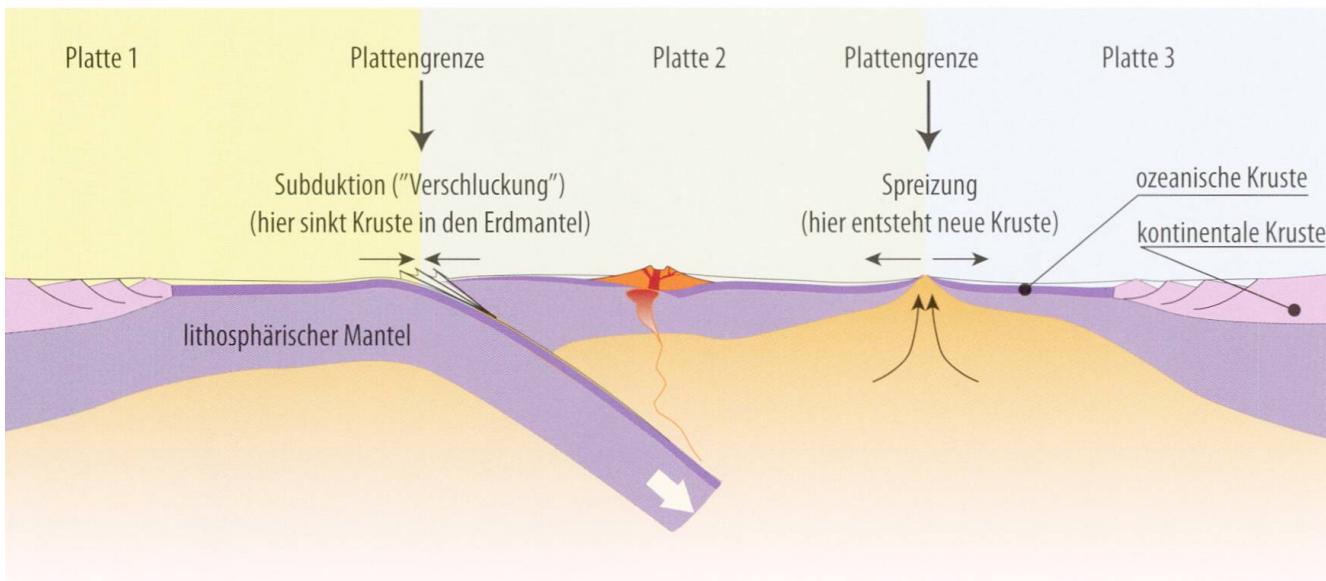


Abb. 10.3: Die Erdoberfläche ist in Platten gegliedert, die sich gegeneinander verschieben. An Subduktionszonen sinken schwere Platten in den Erdmantel, an Spreizungszonen (mittelozeanische Rücken) wird neue Erdkruste gebildet.

von Koniferen und Bennettitales, siehe Kapitel 11, Trias), doch interessanterweise behielten sie einen Teil ihres Provinzialismus. Möglicherweise liegt einer der Gründe darin, dass Laurasia und Gondwana mehr oder weniger symmetrisch zum Äquator aneinander geschweisst wurden. Ein Austausch über den Äquator bzw. über die Klimazonen hinweg scheint sehr stark eingeschränkt gewesen zu sein.

Später, mit dem Zerfall von Pangaea, brach auch das Gebiet des ehemaligen Gondwana auseinander; das dauerte rund 150 Millionen Jahre. Es bildeten sich auf den einzelnen Landmassen jeweils eigene, neue Florenelemente, wenn sich auch eine noch bis heute erkennbare Verwandtschaft durch all die Jahrmillionen durchgepauert hat.

Allerdings: die Bildung von Gondwana und der anschliessende Zerfall kann viele Eigenheiten der Floren der Südkontinente erklären, aber nicht alle. Insbesondere genetische Analysen beispielsweise der Familie der Silberbaumgewächse (Proteacea) zeigen eine enge Verwandtschaft über die Ozeane hinweg, die nicht mit der langen paläogeographischen Trennung vereinbar ist. Ausbreitung über die Ozeane hinweg scheint ebenfalls eine wichtige Rolle zu spielen. Natürlich dürfte sie früher, als die ozeanische Trennung noch nicht so weit fortgeschritten war, noch intensiver gewesen sein.



Abb. 10.4: Paläogeographie in der frühen Trias (vor ca. 240 Millionen Jahren)

10.2 Perm-Fossilien am Museum zu Allerheiligen

Leider gibt es in unserer Gegend sehr wenig fossile Pflanzen aus dem Perm, denn geeignete Gesteine fehlen praktisch völlig. Klassische Fundstellen liegen im Karoobecken in Südafrika und im Gebiet der russischen Stadt Perm, die dem Zeitalter ihren Namen gab.

Entsprechend verfügt das MzA nur über wenige Zeugen aus jener Zeit, u.a. Samen eines *Cordaites*: *Cordaispermum*, vermutlich aus dem Perm von Chemnitz (Abb. 10.5).

Cordaites waren Bäume, die lange, grasartige Blätter trugen und in ihrem Aufbau einerseits Samenfarnen, anderseits auch Nadelhölzern (Araukarien) glichen. Offenbar nahmen sie eine Zwischenstellung ein. Sie bildeten schon im Karbon ganze Waldbestände und sind nicht unerheblich an der Kohlebildung beteiligt. Ende Perm starben sie aus.

Ein ganz besonderes Vorkommen permischer Fossilien ist in der Region der deutschen Stadt Chemnitz bekannt: Durch einen katastrophalen Vulkanaustrbruch in der frühen Permzeit wurde ein ganzes Wald-Ökosystem in vulkanischer Asche konserviert (Abb. 10.7).

Gewisse Stammteile, die man ausgrub, nannte man erst «Madensteine» wegen ihres seltsamen Querschnittes (Abb. 10.6). Die «Maden» erwiesen sich bald als angeschnittene Wurzeln, die sich zu Bündeln und zu stammähnlichen Gebilden zusammenlegten. Das ergab eine Art Dickenwachstum, das der Pflanze Stabilität für ihr Höhenwachstum verlieh.

Nadelbäume wie *Walchia* (Abb. 10.8) und Verwandte hatten im schwierigen Klima des Perm eine erste Chance, die Erde zu erobern.

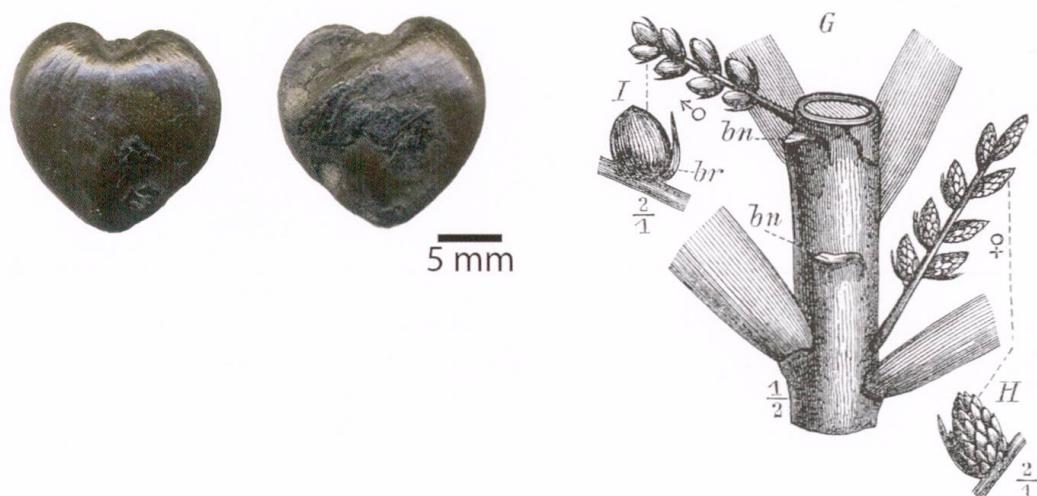


Abb. 10.5: *Cordaispermum*: Samen mit Rekonstruktion des Samenstandes aus Steinmann (1903)



Abb. 10.6: *Psaronius*-Stamm («Madenstein», Chemnitz; Breite 15 cm)



Abb. 10.7: Aufgestellte fossile Bäume aus dem Perm von Chemnitz (mit freundlicher Genehmigung des Naturwissenschaftlichen Museums Chemnitz)



Abb. 10.8: *Walchia*, ein frühes Nadelholz aus dem Karbon und Perm (vor 310 – 290 Mio. J., Fundort und -schicht unbekannt; Breite ca. 11 cm)

10.3 Das grosse Sterben

Am Ende des Perms zeichnet sich im Archiv der Gesteine ein gigantisches, aber rätselhaftes Ereignis ab: Innerhalb kurzer Zeit starben 9 von 10 Tierarten im Meer aus, die Hälfte aller Familien verschwand für immer. Was war passiert?

Über die gesamte Erdgeschichte betrachtet herrscht auf der Erde ein ständiges Kommen und Gehen von biologischen Arten. Es entstehen laufend neue Formen, während alte Formen aussterben. Es gibt jedoch Zeiten, in denen das Sterben den Neubeginn deutlich übertrifft: Man spricht von einem Aussterbeereignis, oder im Extremfall, wenn es sehr gross ist, den gesamten Globus und verschiedenste Gruppen betrifft, von einem Massenaussterbeereignis. In der Erdgeschichte kennt man fünf grosse Ereignisse («The Big Five»). Zwei von ihnen waren so markant, dass man nach ihnen die Erdgeschichte unterteilt, in ein Erdaltertum, ein Erdmittelalter und eine Erdneuzeit. Das letzte Ereignis dieser Big Five ist wohl das berühmteste, wenn auch nicht das grösste: Bei diesem Ereignis am Ende der Kreidezeit starben die Dinosaurier aus. Doch das Ereignis am Ende der Perm-Zeit stellt selbst das Aussterben der Dinosaurier in den Schatten.

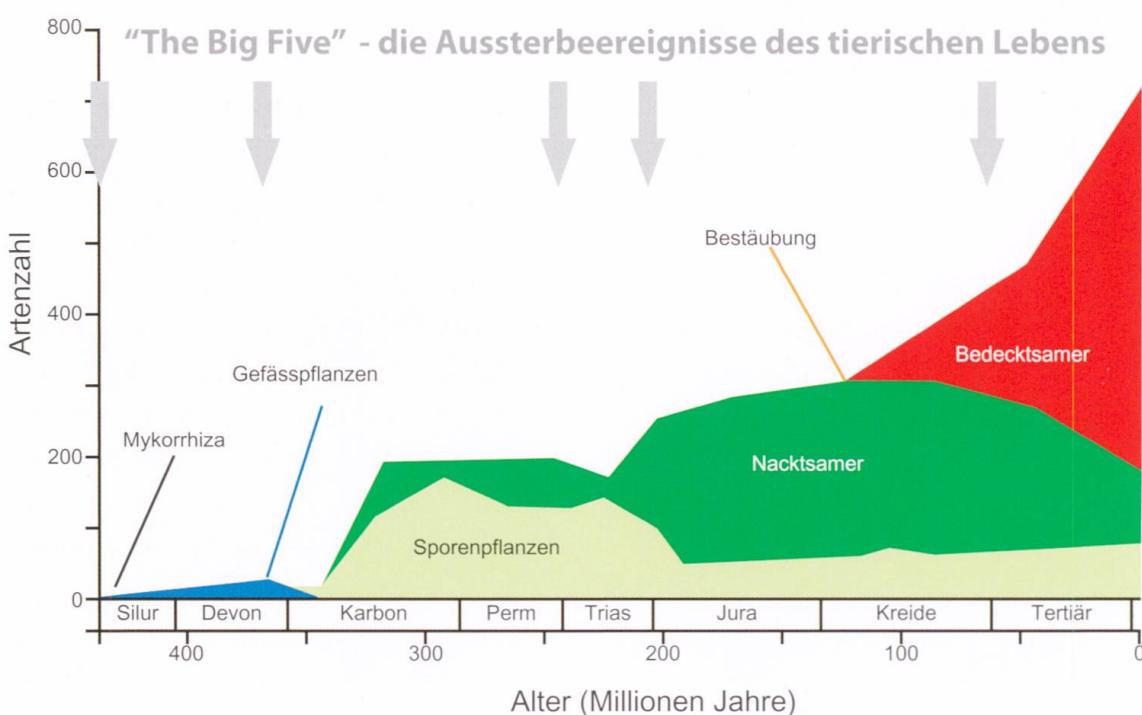


Abb. 10.9: Die Pflanzengruppen in der Erdgeschichte; Pfeile: die fünf Aussterbeereignisse. Der Florenwechsel der Pflanzen ist mit den Aussterbeereignissen der Tiere wahrscheinlich nur teilweise zeitgleich.

Interessanterweise scheinen sich die Pflanzen auf den ersten Blick diesem Rhythmus tierischen Aussterbens nicht unterzuordnen. Weshalb das so ist, ist bis heute nicht restlos geklärt (Abb. 10.9).

Tatsächlich, wenn man die Zahl der Pflanzenformen als Funktion der Zeit darstellt, sind die meisten dieser Ereignisse in der Evolution der Pflanzen nicht sehr auffällig. Erst wenn man statt Arten ganze Ökosysteme betrachtet, werden die Aussterbeereignisse deutlicher.

Das fossile Archiv der Landpflanzen ist sehr viel lückenhafter als jenes der Meerestiere. Damit wird die exakte Datierung des Verschwindens einer Art und damit auch die Datierung von Florenveränderungen sehr schwierig. Man muss sich in diesen Fällen dann oft an die Pollen und Sporen halten, die aber oft nicht eindeutig mit der Makroflora gleichgesetzt werden können.

Ein Spezialfall ist das Ereignis am Ende des Perms. Hier sind nicht nur unzählige Tierarten, sondern anscheinend auch rund 50% aller Pflanzenarten verschwunden. Es ist damit mit Abstand das dramatischste aller Aussterbeereignisse der Erdgeschichte. Tatsächlich war das Perm aufgrund der schwierigen klimatischen Verhältnisse für die Pflanzenwelt bereits eine ungemütliche Zeit; das Ereignis am Ende des Perms scheint noch dazu gekommen zu sein. Zahlreiche Arten von *Cordaites*, Samenfarnen und der ersten Nadelhölzer erhielten dadurch den Gnadenstoss.

Über die Ursachen der Massenaussterben ist sich die Wissenschaft oft nicht ganz einig. Sicher waren bei den einzelnen Ereignissen verschiedene Mechanismen am Wirken. Beim Ereignis am Ende der Kreidezeit herrscht weitgehende Übereinstimmung, dass der Einschlag eines grossen Meteoriten im Golf von Mexiko eine zentrale Rolle spielte. Die Meinungen zum Ereignis an der Perm-Trias-Grenze gehen hingegen noch auseinander. Eine plausible Hypothese sieht den schubweisen Anstieg von vulkanischen Gasen (CO_2 , SO_2 , Chlor- und Fluorverbindungen) in der Atmosphäre, die unter anderem zu saurem Regen führten, als Auslöser. In dieser Zeit wurden nämlich in Sibirien gigantische Mengen von Lava an die Erdoberfläche befördert. Gegen 7 Millionen km^2 wurden innerhalb kurzer Zeit (weniger als eine Million Jahre) mit bis 3 km dicken Lava-Schichten überzogen. Normalerweise wird der Anstieg von Treibhausgasen durch Ausgleichsmechanismen in der Biosphäre kompensiert. Doch die schiere Menge und das pulsartige Freisetzen scheinen diese Mechanismen ausser Kraft gesetzt zu haben. Statt dessen setzte eine Art Teufelsspirale ein. Das Klima erlebte heftige Schwankungen, wurde aber schliesslich heiß und trocken... zu viel für viele Tier- und Pflanzenarten.

11. Trias: Nach dem Weltuntergang

In der geologischen Periode der Trias unterschied sich die Erdoberfläche noch immer sehr deutlich vom heutigen Zustand. Während der ganzen Periode blieben alle grossen Kontinente der Erde zum Superkontinent Pangaea vereint. Der Riesenkontinent erstreckte sich fast von Pol zu Pol. Ein keilförmiges Meeresbecken an der Ostseite des Kontinents, die Tethys, gliederte den Kontinent in einen Nordteil (Laurasia) und einen Südteil (Gondwana, Abb. 11.1).

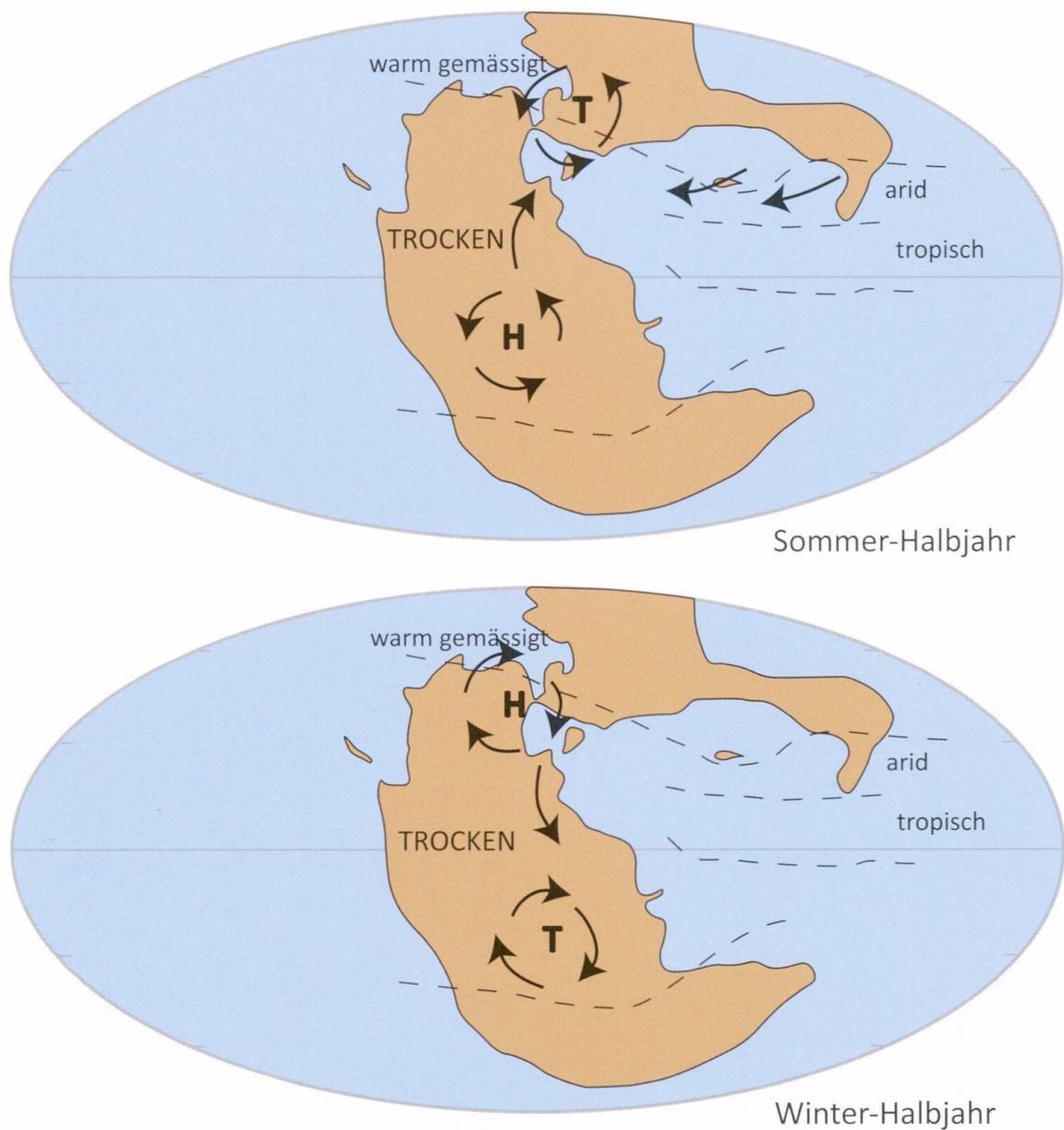


Abb. 11.1: Paläogeographie Trias mit Klimasystem; Erklärung siehe Text

Die Meeresströmungen wurden durch die Ausdehnung von Pangaea deutlich beeinflusst: Meeresströmungen von Nord nach Süd und umgekehrt sorgten für einen ständigen Wärmeaustausch zwischen dem Äquator und den Polen. Das globale Klima war dadurch sehr ausgeglichen; bis zum 70. Breitengrad der damaligen Welt konnten Pflanzen nachgewiesen werden, die auf ein warm-gemässigtes Klima hindeuten. Die Pole waren eisfrei.

Klimamodellierungen zeigen, dass die symmetrische Verteilung der Landmassen über den Äquator zu einem sehr eigenartigen Klimasystem auf dem Festland führen musste: dem Mega-Monsun. Im Bereich des Äquators scheint das Klima ausgesprochen trocken gewesen zu sein, mit hohen Tages- und eher tiefen Nachttemperaturen. Ausgedehnte Ablagerungen von Gips und Salz waren die Folge (Abb. 11.2). In den mittleren Breiten herrschte jedoch ein Klima mit nassen, warmen Sommern und trockenen, kühleren Wintern.

Im Nordsommer erwärmten sich die Landmassen von Laurasia stark. Die warme Luft stieg auf, so dass Luft von Süden (Gondwana) her nachströmen konnte. Ein ausgeprägter Luftstrom zog im Sommer von Süd nach Nord, wobei die Luft über dem Tethys-Ozean mit Feuchtigkeit angereichert wurde. Im Winter drehte sich das System und der Luftstrom verlief von Nord nach Süd.

Eine Analyse der Klimasignaturen in den Ablagerungsgesteinen bestätigt dieses System, wenn natürlich auch in der Trias die Verhältnisse aufgrund der Topographie, des Küstenverlaufs etc. erheblich variierten.

Heute können wir nirgends auf der Welt ein Klimasystem beobachten, das dem System der Trias auch nur annähernd gleicht.

11.1 Erholung nach dem Aussterbeereignis

Das Aussterbeereignis am Ende des Perms hinterliess eine wüste Erde. Es ist unklar, was schliesslich den Teufelskreis des Klimas bremste bzw. unterbrach. Viel scheint nicht gefehlt zu haben, und die Erde wäre als toter und lebensfeindlicher Planet zurückgeblieben. Vielleicht waren Algen Retter in der Not: eine globale Algenblüte, ausgelöst durch das heisse Klima und hohe



Abb. 11.2: Gipsablagerungen im Gipsstollen von Schleitheim: ein Hinweis auf trocken-heisse (aride) Klimabedingungen während der Triaszeit.

CO_2 -Gehalte, vergiftete zwar möglicherweise die Meere und trug das Ihre zum Aussterbeereignis bei. Auf der anderen Seite könnte durch die Ablagerung des Algenmaterials der Atmosphäre CO_2 entzogen worden sein. Tatsächlich findet man in den Ablagerungen direkt nach dem Ereignis grosse Mengen von Sporen, die eventuell von Algen stammen. Andere Autoren ordnen diese Sporen allerdings Pilzen zu, die demnach durch den Abbau der abgestorbenen Wälder eine Blüte erlebt hätten.

Zu Beginn der Trias-Zeit gehörte die Erde den unspezialisierten Opportunisten, die mit Glück und mit ökologischer Unempfindlichkeit das Ereignis überlebt hatten. In der frühen Triaszeit waren das während rund vier bis fünf Millionen Jahren vor allem *Pleuromeia* und *Isoetes*, zwei Bärlappgewächse. Allerdings waren die Bestände locker; eine geschlossene Vegetationsdecke war wohl nicht vorhanden. Natürlich gab es noch andere Pflanzen, diese waren aber zahlenmäßig stark unterlegen. Insbesondere gab es in dieser Anfangsphase keine Wälder; in dieser Zeit scheint es auch nirgendwo auf der Erde zur Bildung von Kohle gekommen zu sein; man spricht von einer eigentlichen «Kohle-Lücke».

Wie konnten diese Pflanzen den «Weltuntergang» überleben?

Bei den Pflanzen ging das wahrscheinlich etwas einfacher als bei den Tieren, denn ihr Lebensrhythmus hat natürliche Pausen, die möglicherweise verlängert werden konnten. Auch von der Gestalt her sind sie besser gewappnet für ein Überleben in der Krise:

- Strukturen wie Wurzeln und Rhizome, die im Boden geschützt waren
- Sporen, die sehr widerstandsfähig waren
- Samen, die lange Überlebenszeiten hatten
- ökologische Nischen wie Canyons waren ev. für lange Zeit Rückzugsgebiete (ein modernes Beispiel ist *Wollemia*, Kapitel 12).

Gegen die mittlere Triaszeit konnten die Koniferen Boden gut machen, und erstmals seit der Katastrophe kam es zum Wiederaufleben grösserer Bestände holzbildender Gewächse, zum Beispiel Voltzien (Abb. 11.3), also früher Koniferen. Dazu kamen neben den bereits im Perm verbreiteten Cycadeen und Farnen auch die Bennettiteen. Diese Samenpflanzen waren äusserlich den Cycadeen sehr ähnlich; einige Merkmale in der Fortpflanzung zeichnen sie aber als eigenständige Gruppe aus. Im Gegensatz zu den Cycadeen starben die Bennettiteen in der Kreidezeit aus.

Auch im Kanton Schaffhausen fehlen Pflanzenfossilien aus der frühen und mittleren Triaszeit. Die ersten Hinweise auf Pflanzen findet man in der nur



Abb. 11.3: *Voltzia heterophylla*
(Elsass, Breite 10.5 cm)

selten zugänglichen «Lettenkohle» an der Basis der Obertrias-Ablagerungen. Bestimmbare Fossilien sind im MzA jedoch nicht dokumentiert.

Bedeutendere pflanzenführende Ablagerungen aus der späten Trias finden wir in unserem Kanton jedoch in Schleitheim im Seewisteinbruch (Abb. 11.4, 11.5). Der Schilfsandstein tritt dort an die Oberfläche. Alle erhaltenen Pflanzen sind durch Fluss- oder Bachströmungen fortgerissen und irgendwo deponiert worden. Sie sind oft bruchstückhaft und in sandigem Trägermaterial eingebettet. Schachtelhalme, insbesondere *Equisetites arenaceus*, sind hier sehr dominant.

Dieser Schachtelhalm wurde mehrere Meter hoch und der Stängel hatte einen Durchmesser bis zu 20 cm, doch die Grösse der Calamiten des Karbon erreichte er nicht mehr.

Ferdinand Schalch war 1871 – 1875 Lehrer an der Bezirksschule Böckten (BL) und untersuchte während dieser Zeit den Schilfsandsteinbruch in Hemmiken (BL). Zahlreiche kleine fossile Pflanzenteile sind deshalb in seiner Sammlung zu finden. Es sind hauptsächlich Farne, Schachtelhalme und Bennettiteen (Abb. 11.7, 11.8, 11.9 und 11.10).



Abb. 11.4: Palmfarn
aus dem Seewisteinbruch



Abb. 11.5: *Equisetites arenaceus* aus dem Seewi-Steinbruch (Länge 54 cm)

Weitere Funde stammen aus der Trias vom Südost-Schwarzwald (Abb. 11.11 und 11.12). Schalch sammelte dort Mineralien und Fossilien für seine Doktorarbeit. Dabei fanden vor allem prächtige Exemplare von *Pterophyllum* auf, eine in jener Zeit verbreitete Bennettiteen-Gattung. Bennettiteen hatten im Gegensatz zu den Palmfarne zwischen sterilen Schuppen eingeschlossene Früchte. Die Schuppen konnten zu einem festen Panzer verwachsen sein. Damit hatten die Bennettiteen einen Entwicklungsstand erreicht, der nach einigen Autoren gar einen Übergang zu den Bedecktsamern darstellen könnte.

Palmfarne oder Cycadeen (Abb. 11.11, 11.12) hatten ihre Blütezeit von der Trias bis in die Kreidezeit. Ihre Stämme sehen aus wie die Stämme einer Palme, die Blätter aber äh-



Abb. 11.6: Seewi-Steinbruch mit dem rötlichen Schilfsandstein.



Equisetites arenaceus
Schilfsandstein
Hemmiken
BL
26 cm
Länge 54 cm

Abb. 11.7: *Equisetites arenaceus*, Schilfsandstein (Hemmiken, BL, Breite 26 cm)

neln denen der Farne (Name!), sind aber ganz derb. Die Pflanzen gehören zu den Nacktsamern, weil ihre Samen nicht in einem Fruchtblatt eingeschlossen sind. Es gibt männliche und weibliche Pflanzen, die ihre Geschlechtsprodukte in etwas unterschiedlichen Zapfen produzieren. Die Schuppen am Stamm sind Narben von abgefallenen Blättern.

Cycaspflanzen leben heute noch in China, Afrika und Australien. Die Pflanzengruppe existiert seit 250 Mio. J.; man spricht von «lebenden Fossilien».

Im Buntsandstein der Triaszeit begannen die Nadelhölzer, die schon im Karbon und Perm existierten, sich weiter zu verbreiten (Abb. 11.3, 11.15). Sie wurden so zahl- und formenreich, dass sie die Sporenpflanzen sehr stark zurückdrängten. Man kann feststellen, dass Pflanzen – übrigens auch Tiere –, die später das Land oder die Meere beherrschten, schon lange vorher ihre Besonderheiten entwickelt hatten und eher im Hintergrund blieben, aber dann, wenn die Lebensbedingungen für sie günstig wurden, die alten Formen verdrängten und die frei werdenden ökologischen Nischen rasch besetzten.

Voltzia, ein stattliches Zypressengewächs, ist ein Beispiel für diese Nadelhölzer; es wurde im Voltzien-sandstein der Vogesen sehr häufig gefunden.



Equisetum arenaceum (Bro.)
Schiffssandstein der Vogesen
Kaingrube bei Hemmiken
(Alt. Baselland)
Aug. 1862. Leg. F. Schuh

Abb. 11.8: Blattscheide von *Equisetites arenaceus*, Schiffsandstein (Hemmiken, BL, Breite 8.5 cm)



Pecopteris triasica (Hedw.)
Schiffssandstein der Vogesen
Kaingrube bei Hemmiken
(Alt. Baselland)

Abb. 11.9 *Pecopteris triasica*, Baumfarn (Hemmiken, BL, Länge 9.5 cm)



Abb. 11.10 unbestimmte Bennettitee oder Cycadee (Hemmiken, BL, Breite 6.8 cm)



Abb. 11.11: *Pterophyllum jaegeri*, (Bennettitee), Schilfsandstein (Iphofen, D, Breite 18 cm)



Abb. 11.12: *Pterophyllum jaegeri* (Bennettitee), Schilfsandstein (Eppingen, D, Breite 22 cm)



Abb. 11.14: Cycas (*Encephalartos altensteinii*), lebt seit 200 J. in Kew Gardens in London.



Abb. 11.13: Palmfarn (Cycas), männliche Blüte aus dem Botanischen Garten von Stellenbosch (Südafrika)



Abb. 11.15: *Voltzia sp.* (Elsass, Breite 10.5 cm)

Voltzia heterophylla hatte nadelförmige sowie auch schuppenförmige Blätter. Wie alle Nadelhölzer trug sie Zapfen mit den Fortpflanzungsorganen.

Voltzien sind mit den Walchien des Perm nahe verwandt.

Die berühmtesten fossilen Pflanzen der Trias findet man im Petrified Forest, in Arizona in den USA (Abb. 11.16, 11.17). Ganze Wälder von Nadelbäumen wurden im Laufe der Zeit von Flüssen überschwemmt und vom Sand begraben. Dank speziellen geologischen Verhältnissen löste sich Kieselsäure (SiO_2) im Wasser und drang in die toten Stämme ein. Im Laufe der Zeit verkieselten die Hölzer. Alle biologischen Strukturen wurden durch Quarz ersetzt und im Wasser gelöste Metallionen färbten diese Fossilen in ganz einmaliger Weise: Eisen schwarz und rot, Mangan lila und schwarz, Chrom gelb, Quarz weiß.

Die Bäume wurden bis 60 m hoch mit einem Stammdurchmesser bis 3 m, bildeten also ansehnliche Wälder. Sie waren dominant im Chinle Becken von Arizona (vor 225 – 220 Mio. J.) und lebten vergesellschaftet mit Cycadeen, Bennettiteen und Ginkgos.

Ende Trias begann das Zeitalter der Nacktsamer (Nadelbäume), sie drängten die alten Sporenplanten stark zurück.



Abb. 11.16: Zerbrochener Stamm von Araucaria. Petrified Forest NP (USA)



Abb. 11.17: Oft sind Rinde und Jahrringe deutlich sichtbar. Petrified Forest NP (USA).

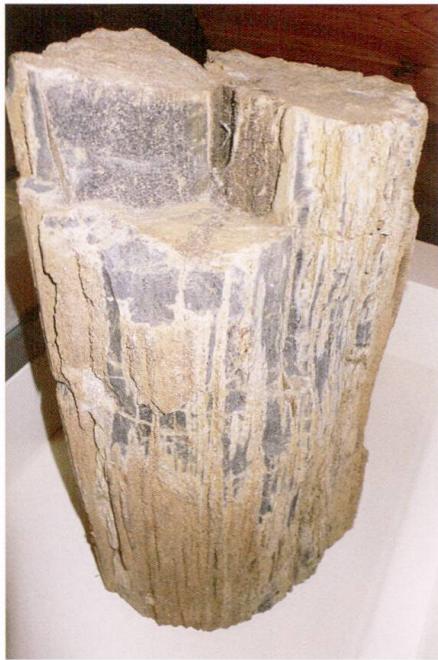


Abb. 12.1: Verkieseltes Holz; vermutlich von einer Araukarie (Früher Jura, Beggingen, Höhe ca. 50 cm)

12. Moderne Pflanzen entstehen

Alle Jura-Fossilien, die wir auf dem Randen sammeln können, stammen aus dem Meer, natürlich sind darum Landpflanzen nur ausnahmsweise zu finden (Abb. 12.1). Aber es gab andernorts Festland und dort wuchsen Pflanzen: Es war die Blütezeit der Nacktsamer, der Nadelhölzer. Sie waren die Nahrungsgrundlage für viele Dinosaurier, die nun das Land beherrschten. Einige dieser Pflanzenarten sind von der Erde verschwunden, aber andere gibt es noch – sie haben sich seit über 200 Mio. J. gehalten, aber oft leicht verändert.

Auf Inseln im wenig tiefen Jurameer und auf dem Festland gab es Moose, Farne, Schachtelhalme und auch Cycaspflanzen (Palmfarne). Nadelhölzer wurden jedoch dominanter.

Die Dinosaurier, die während dieser Zeit ihre Nahrung suchen mussten, hatten wohl weiche Farne zur Verfügung, aber sie muss-



Abb. 12.2: *Ginkgo biloba*, weibliche Pflanze mit Früchten

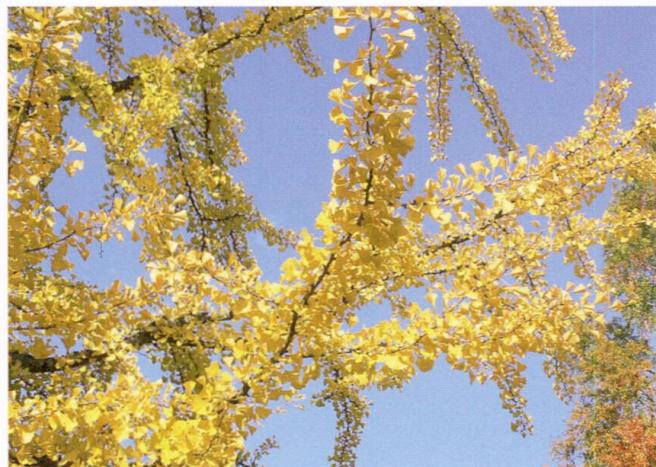


Abb. 12.3: *Ginkgo biloba*. In vielen Gärten und Parkanlagen wird dieses «lebende Fossil» sehr gerne angepflanzt.

ten auch mit den derben Blättern der Cycaspflanzen und der aufkommenden Nadelhölzer zurecht kommen. Kein Wunder, dass sie im Magen Steine hatten, die ihnen halfen, die zähe Kost zu zerkleinern. Wie Mühlsteine quetschten sie die Nahrung, damit sie überhaupt verdaut werden konnte. Noch heute nutzen manche Vögel – also die modernen Verwandten der Dinosaurier – diesen Trick.

Eine eigene Pflanzengruppe stellen die Ginkgos (Abb. 12.2, 12.3) dar. Sie lebten in verschiedenen Arten schon früher, ihr erstes Auftreten wird auf vor 280 Mio. J. (Perm) datiert. Sie lebten zirkumpolar, ihre Fossilien wurden z.B. in Spitzbergen gefunden. (Der Schweizer O. Heer spricht von Trias-Funden in Spitzbergen und Basel.)



Abb. 12.4: Fossiler Araukarienzapfen aus Südamerika (Höhe ca. 6 cm)



Abb. 12.5: Araukarie oder «Zimmertanne» (*Araucaria heterophylla*)



Abb. 12.6: Diese Chilenische Araukarie (*Araucaria araucana*) steht im Ungarbühl-Quartier in Schaffhausen, sie ist etwa 40 Jahre alt.



Abb. 12.7: Männliche Zapfen der Chilenischen Araukarie (Kew Gardens, London)



Doch in der Neuzeit starben sie weltweit bis auf eine einzige Art aus. *Ginkgo biloba* wurde Anfang 18. Jh. in Asien entdeckt und von Seefahrern als Zierpflanze nach Europa gebracht.

Der Siegeszug der Nadelbäume, der im Jura begann, wurde erst in der Kreidezeit durch das Aufkommen der Blütenpflanzen aufgefangen.

Fossilien aus jener Zeit finden wir im MzA wenige, doch sind uns viele moderne Formen der alten Nadelhölzer bekannt.

Araukarien (Abb. 12.4–12.7) lebten in verschiedenen Varianten, besonders in Gondwanaland. Heute wachsen sie noch in Südamerika, Australien und Neu Guinea, man nennt diese Gebiete «Relikt-Areale». Bei uns sind sie eher Zimmerpflanzen; besonders die «Zimmertanne» (*Araucaria heterophylla*) ist bekannt (Abb. 12.5).

Drei verschiedene Zypressenarten aus der Kreidezeit (vor 150 Mio. J.) leben noch heute auf der Erde, alle an sogenannten Reliktstandorten. Sie alle brauchen viel Feuchtigkeit.

Mammutbäume (*Sequoiadendron giganteum*; Abb. 12.8) leben noch in Berggebieten von Süd-Kalifornien. Sie sind die grössten und schwersten Lebewesen überhaupt, sie werden bis 120 m hoch. Vom «President» wurde kürzlich das Alter neu bestimmt: er ist mindestens 3200 Jahre alt! Und er wächst noch immer weiter. Die Rinde dieser Riesen ist dick und faserig, sie widersteht erfolgreich

Abb. 12.8: Mammutbäume (*Sequoiadendron giganteum*) werden oft in Gärten und Anlagen angepflanzt, hier ein Exemplar am Lindli in Schaffhausen, das etwa 145 Jahre alt ist.

Waldbränden. Ja, Waldbrände sind sogar nötig, damit sich ihre Zapfen öffnen und den Samen entlassen können. Der trifft dann auf fruchtbare Asche und das gibt ihm die grosse Chance, ohne Konkurrenz auskeimen zu können.

An nebelfeuchten Standorten in Nordkalifornien wachsen noch heute die Redwood-Bäume (*Sequoia sempervirens*, Abb. 12.9 und 12.10). Auch sie werden über 100 m hoch und sind ebenfalls feuerresistent. Sie wachsen so dicht, dass kaum Unterholz gedeihen kann. Auch sie werden mehrere hundert Jahr alt und sie können am selben Standort dank der Symbiose mit Wurzelpilzen (Mykorrhiza) immer genügend Nährstoffe mobilisieren und munter weiter wachsen.



Abb. 12.9: Redwood (*Sequoia sempervirens*) in Muir Woods, Kalifornien; weil sie so hoch sind, kann man sie kaum fotografieren.

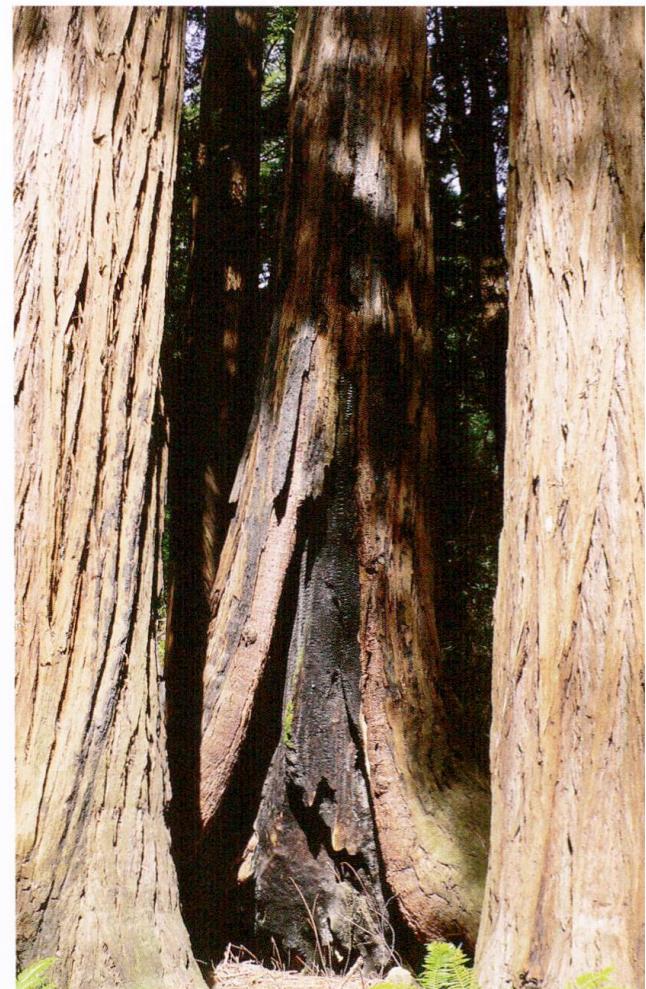


Abb. 12.10: Die jungen Bäume wachsen dicht bei dem Mutterbaum und stehen darum oft in Kreisen. Sie können Waldbränden widerstehen, weil sie eine schlecht brennbare Rinde haben.

Der Urweltmammutbaum (*Metasequoia glyptostroboides*; Abb. 12.11 und Abb. 12.12) wurde 1941 in China entdeckt, er ist die dritte Zypressenart, die seit der Kreidezeit auf dieser Erde lebt.

Die Stadtgärtnerei Schaffhausen hilft mit ihren gezielten Anpflanzungen von interessanten Bäumen, unsere Vorstellungen auch von solchen «lebenden Fossilien» zu beleben.

Wie der Ginkgo und der Urwelt-Mammutbaum ist die *Wollemia* (Abb. 12.13 – Abb. 12.15) auch ein «lebendes Fossil». Im Jahr 1994 wurde

ca. 100 km nördlich von Sydney, Australien in einem tiefen, kaum zugänglichen Canyon dieser Baum gefunden – es war eine Sensation! Es war, als ob man gerade einen lebenden Dinosaurier gefunden hätte. Der Baum gehört zu den Araukarien-

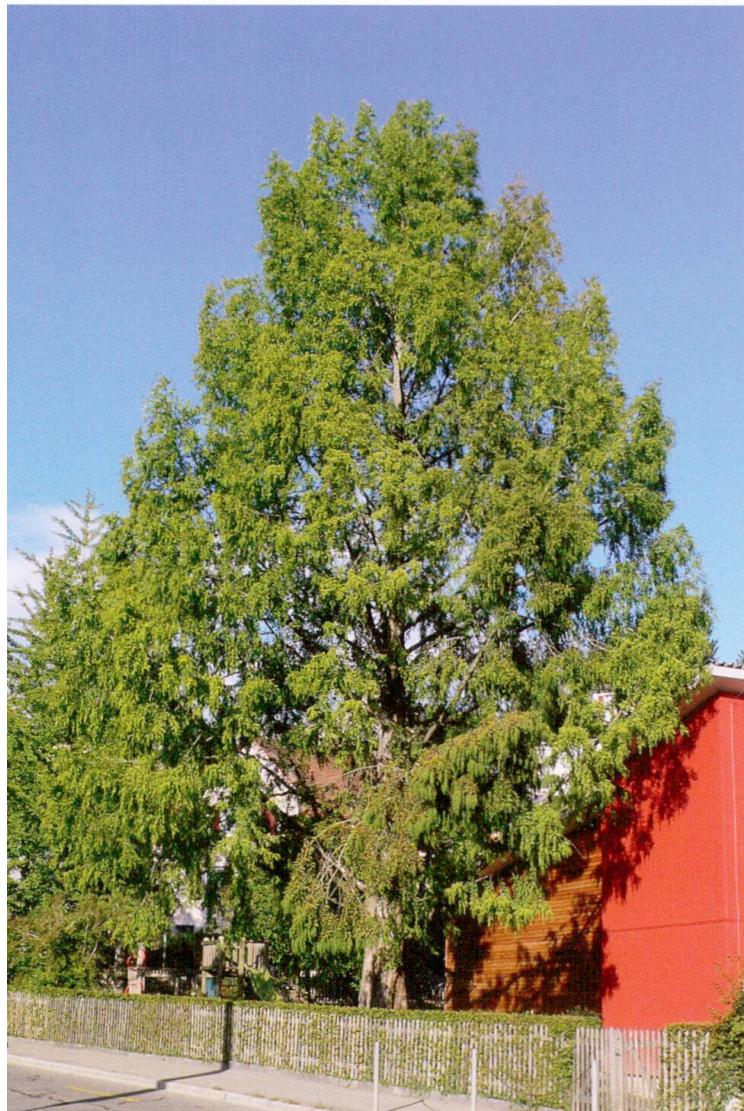


Abb. 12.11: Urwelt-Mammutbaum (*Metasequoia glyptostroboides*) beim Kindergarten Neubrunn, Schaffhausen). Eine Rest-Population dieses uralten Baumes wurde 1941 in China wieder entdeckt.



Abb. 12.12: Urwelt-Mammutbäume sind laubwerfend. Hier das Winterstadium am Lindli (Schaffhausen).



Abb. 12.13: *Wollemia nobilis*

gewachsen und fossile Pflanzen sind seit 90 Mio. Jahren (untere Kreide) bekannt. Sicher haben die Saurier einst von ihren Nadeln gefressen. Eine genetische Untersuchung ergab, dass alle bis heute gefundenen etwa 100 Bäume Klone voneinander sind, dass sie also identisches Erbgut besitzen.

Das gezeigte Exemplar wurde in einer Baumschule gekauft, denn die Wollemien werden durch Stecklinge vermehrt und zum Kauf angeboten. Der Erlös geht in den Schutz dieser sehr seltenen Pflanze.



Abb 12.14: *Wollemia nobilis*, männliche Zapfen



Abb 12.15: *Wollemia nobilis*, weibliche Zapfen
(Kew Gardens, London)

13. Erdneuzeit: Der Aufstieg der Blütenpflanzen

13.1 Bernstein: ein faszinierendes Fenster in die Vergangenheit

Nadelhölzer (Nacktsamer) waren von der Trias bis in die Kreidezeit die bedeutendsten Landpflanzen. In der Kreide, aber dann vor allem im Paläogen, begann der Aufstieg der Blütenpflanzen. Nadelhölzer spielten und spielen aber nach wie vor eine wichtige Rolle. Davon zeugt auch ein faszinierendes Kuriosum der Erdgeschichte: Bernstein!

Vor 40 – 50 Mio. J. wuchs ein Nadelwald in Süd- und Ostskandinavien: es waren hauptsächlich Goldlärchen und Schirmtannen. Während vielleicht 10 Mio. J. produzierten diese Bäume Harz, das «versteinerte» und heute als Baltischer Bernstein bekannt ist. Viele kleine Insekten wurden vom Harz angeklebt und eingesargt, sodass noch heute winzigste Details von ihnen studiert werden können (Abb. 13.1)

Von der Altsteinzeit bis ins späte Mittelalter wurde Bernstein als Schmuck oder Zahlungsmittel verwendet: er war das «Gold der Ostsee». Schon für die Pharaonenzeit (vor 3'000 J.) konnte eine Handelsstrasse Ostsee – Ägypten nachgewiesen werden, an der Bernstein verschoben wurde. Immer noch ist er als Schmuck sehr beliebt – nicht mehr nur bei Königen und Potentaten.

Eine Frau aus der damaligen Oberschicht wurde in Schleitheim in einem Alemannen-grab aus ungefähr 420 n. Chr. gefunden. Sie trug eine wunderschöne Bernsteinkette, und aus ihrer Kleidung konnte man entnehmen, dass sie aus dem mittleren Elbegebiet eingewandert war (Abb. 13.2). Die Rekonstruktion des Grabes und die Bernsteinkette aus dem Baltikum befinden sich im MzA in Schaffhausen.

Man kennt heute Bernstein von vielen Fundstellen weltweit (z.B. Dominikanische Republik). Offensichtlich gibt es sogar in der Region Schaffhausen ein Vorkommen: Aus der Oberen Süßwassermolasse (OSM) vom Schienerberg bei Ramsen SH befinden sich Bernsteinstücke im MzA (Abb. 13.3). Der genaue Fundort und damit die Fund-



Abb. 13.1: Mücke in baltischem Bernstein (Länge 4 mm)

schicht konnte bisher nicht mit Sicherheit rückverfolgt werden. Im Bereich der Steinbalmensande und der unteren Öhninger-Schichten kommen jedoch Gesteinseinheiten vor, die als Quelle dieser Bernsteine in Frage kommen.

13.2 Die ersten Blütenpflanzen

In der Kreidezeit begann langsam aber sicher der Aufstieg der Blütenpflanzen. Man nennt sie auch Bedecktsamer, weil sie ihren Samen in ein Fruchtblatt verpacken, also bedecken.

Die ersten fossilen Bedecktsamer wurden in Gesteinen der unteren Kreidezeit (vor etwa 130 Mio. J.) gefunden. Beide Gruppen der Bedecktsamer, die einkeimblättrigen Pflanzen (Palmen, Gräser, Orchideen und Lilienartige) und die zweikeimblättrigen (Blumen und Laubbäume) wurden in den selben geologischen Schichten erstmals gefunden, sind also wahrscheinlich gleichzeitig entstanden.

Diese alten Pflanzen trugen Blüten, die sich aber noch deutlich von heutigen Formen unterscheiden. Immerhin kann man sie schon in die heute bekannten Pflanzenfamilien einreihen.

Von den einkeimblättrigen Pflanzen blieben aus dieser Zeit nicht viele fossile Zeugen erhalten, da sie krautig und leicht zersetzbare sind. Graspollen sind seit der Kreidezeit bekannt. Man fand auch in etwa 80 Mio. J. alten Koprolithen (versteinertem Tierkot) Hinweise auf Gräser. Die meisten Funde einkeimblättriger Pflanzen betreffen aber Palmen.

Palmen sind die einzigen einkeimblättrigen Pflanzen, die einen Stamm ausbilden

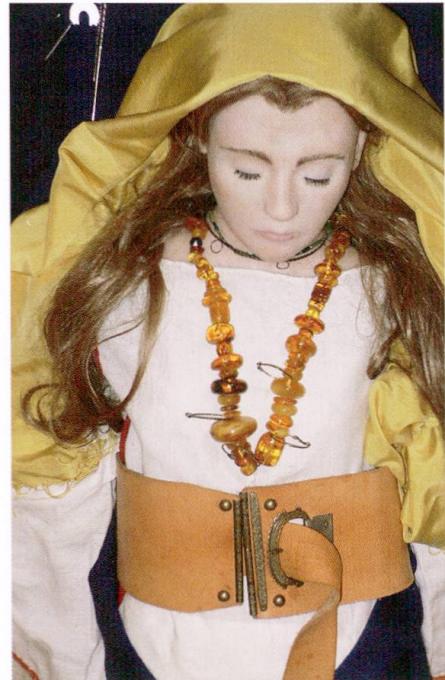


Abb. 13.2: «First Lady von Schleitheim» mit Bernsteinkette aus dem Ostseeraum, gefunden in einem Grab in Schleitheim

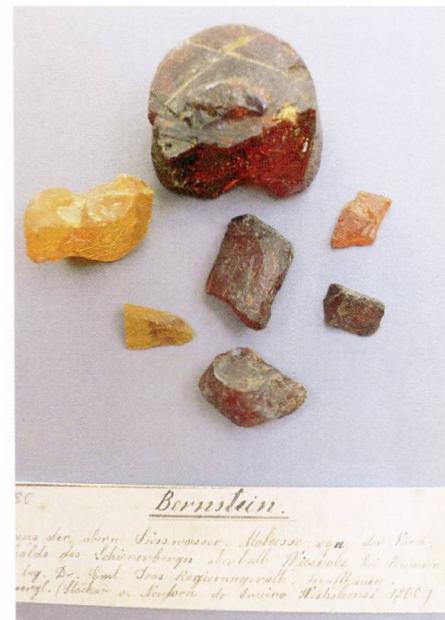


Abb. 13.3: Roh-Bernstein, gefunden in Ramsen



Abb. 13.4: Palmen aus West-Australien

dann farbig und dienten als «Aushängeschild». Meist wurden sie mit Staub- und Fruchtblättern, die ebenfalls von grünen Blättern abstammen, zu einer Blüte vereinigt. Neben Pollen wurde später in den Blüten auch Nektar produziert, um Tiere als Bestäuber anzulocken. Damit begann eine faszinierende Co-Evolution zwischen Tieren – speziell Insekten – und den Blütenpflanzen.

Die Magnolie (Abb. 13.5 und 13.6) zählt zu den ursprünglichsten Blütenpflanzen, sie ist vielleicht 95 Mio. J. alt. Die Blütenorgane weisen keine bestimmte Zahl auf, die vielen Blüten-, Staub- und Fruchtblätter sind in einer Spirale angeordnet. Man spricht von einem «gestauchten Spross».

Ähnliche Blütenverhältnisse weisen auch die Seerosenverwandten auf, auch sie gehören zu den ursprünglichsten Blütenpflanzen.

und deshalb häufiger versteinern (Abb. 13.4). Palmen gibt es seit der späten Kreide (etwa seit 70 Mio. J.). Sie waren damals sehr weit verbreitet. Noch heute sind sie äusserst vielgestaltig in Bezug auf Grösse, Blütenverhältnisse, Bestäubungsart und Blätter. Immer aber sind sie unverzweigt und weisen kein echtes Dickenwachstum auf. Ihr Stammumfang beruht auf einer grossen Sprossachse, den eingebauten Bastfasern und den Blattspuren der abgefallenen Blätter. Sie kommen auf allen Kontinenten vor und sind nicht nur in den Tropen wesentliche Resourcen für die Menschen.

Welches waren nun die ältesten zweikeimblättrigen Bedecktsamer?

Die «Kätzchenpflanzen» wie Erle und Birke entstanden sehr früh. Sie benutzten noch den Wind als Bestäuber.

Ganz anders machte es eine weitere Gruppe von Bedecktsamern, sie bildete auffällige Blüten aus. Grüne Laubblätter wurden erst weiss und

In unserer Gegend gibt es verschiedene Fundorte von Blütenpflanzen aus dem Tertiär. Sie stammen aus der Unteren (USM) und Oberen Süßwassermolasse (OSM), sind also z.T. in den feinkörnigen Ablagerungen der mächtigen Flüsse aus dem Alpenraum und in Seen abgelagert worden. Fundorte liegen in der Nachbarschaft von Stein a/Rh. und auch im nahen deutschen Klettgau – im Molassegebiet.

Oswald Heer beschrieb in seinem klassischen Werk «Die Urwelt der Schweiz» die tertiären Pflanzen der Schweiz sehr anschaulich. Er unterschied die Pflanzen von eher trockenen Standorten aus der USM von denen des oberen Miozäns aus feuchten Urwäldern.

Wir wollen uns zunächst auf den weltbekannten Fundort für fossile Pflanzen aus dem Miozän (vor 13 Mio. J.) bei Öhningen, D, am Untersee konzentrieren (Abb. 13.7).

Die südlichere Fundstätte stammt vermutlich aus einem Maarsee, der im Zusammenhang mit dem Hegauvulkanismus entstand. Der ruhige See war wahrscheinlich tief und am Grund sauerstoffarm und die hineingefallenen Blätter des umliegenden feuchten Urwaldes wurden von feinem Kalk bedeckt. Das waren ideale Bedingungen für eine gute Erhaltung der Strukturen. Der Fundort wurde schon im 18. Jh. entdeckt und nach J. J. Scheuchzer befassten sich O. Heer (1809 – 1883), R. Handke (* 1925) und andere eingehend mit der Bestimmung der Funde. Das MzA besitzt eine eindrückliche Sammlung von Fossilien dieses Fundortes, die von B. Schenk und F. Schalch zusammengestellt wurde.

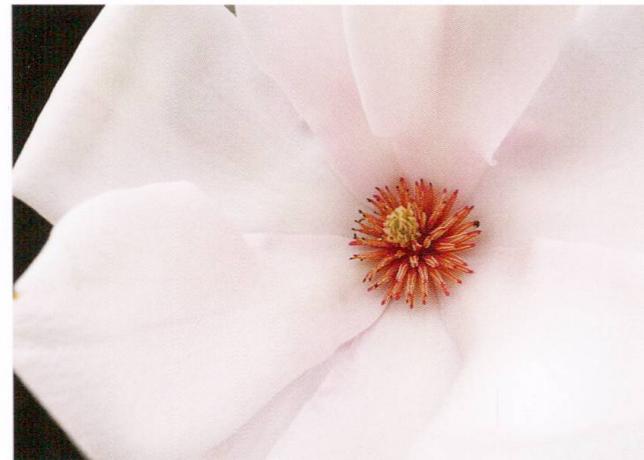


Abb. 13.5: Magnolie: während der Eiszeit bei uns ausgestorben und in jüngster Vergangenheit als Zierpflanze wieder eingeführt

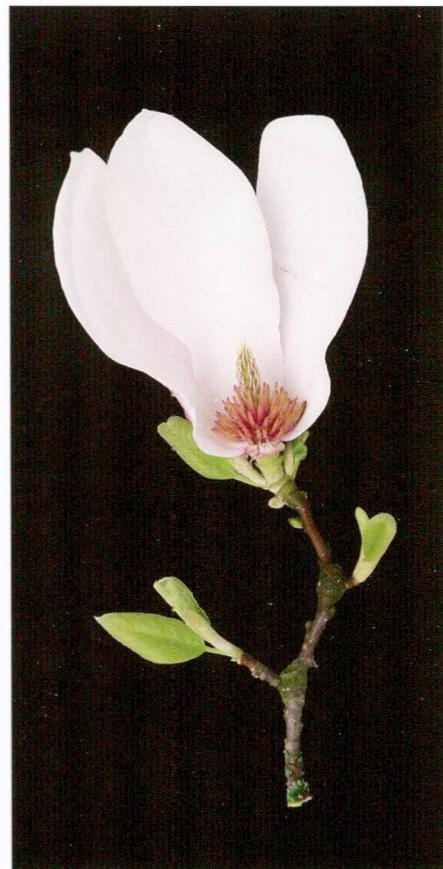


Abb. 13.6: Aufgeschnittene Blüte einer Magnolie mit der Vielzahl an Blütenteilen

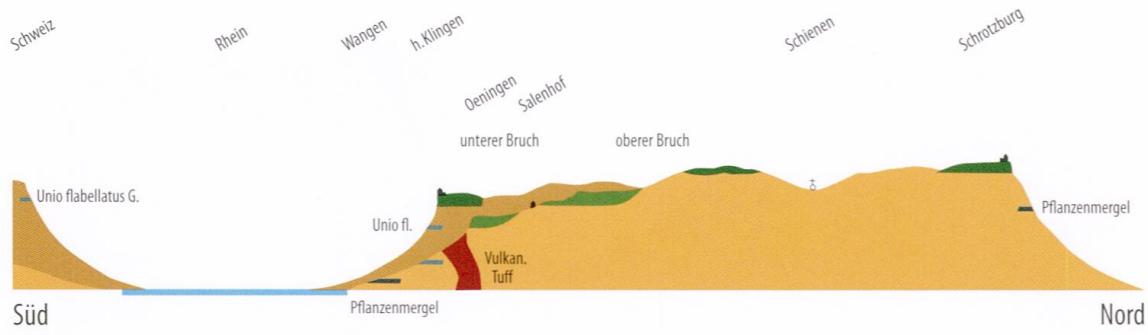


Abb. 13.7: Geologischer Querschnitt durch die Fundstelle Oehningen; verändert aus Heer: Die tertiäre Flora der Schweiz (1865)

Der damalige Urwald wuchs in einem subtropischen Klima, das warme Sommer, aber nicht sehr kalte Winter aufwies. Diese Aussage wird gestützt durch Vergleiche mit verwandten Pflanzen, die heute noch leben. Man findet sie z.B. in den südöstlichen Staaten der USA, auf Madeira oder in Ostasien (Abb. 13.8)

Der Urwald muss sehr reichhaltig gewesen sein, denn in den tertiären Molassegebieten fand Heer total 296 verschiedene fossile Holz- und Straucharten (Abb. 13.9 – 13.12). Diese Zahl ist mit Vorsicht zu behandeln, spätere Forscher reduzierten die Artenzahlen von Heer um Einiges, indem sie viele

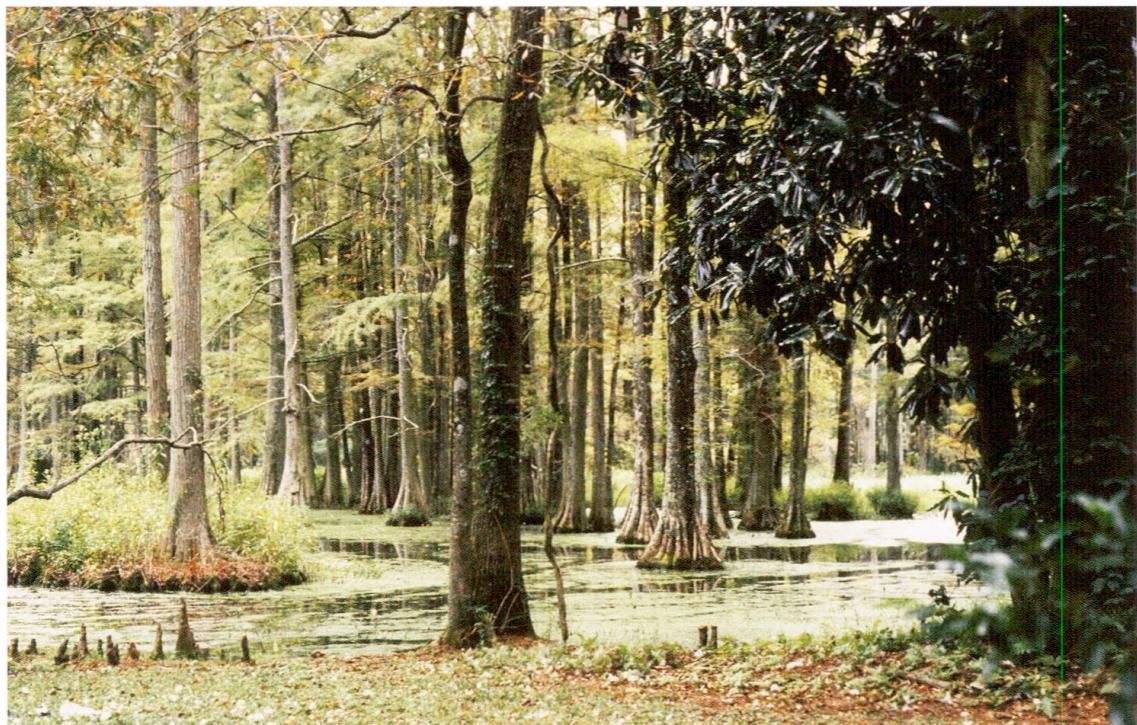


Abb. 13.8: Die tertiären Wälder in Oehningen muss man sich vorstellen wie die Wälder der Sumpfzypressen in den Südstaaten der USA, hier in South Carolina.



Abb. 13.9: Amberbaum (*Liquidambar*, Öhningen, Sammlung ETH Zürich, Breite ca. 7 cm)



Abb. 13.10: Ahorn mit Virenbefall (*Acer*, Öhningen)



Abb. 13.11: Die einzige erhaltene Blüte der Sammlung stammt von *Porana oeningensis*, einer windenartigen Pflanze. Blüten sind sehr selten fossil zu finden, weil sie zart und vergänglich sind (Öhningen, Blüte 2 cm breit).



Abb 13.12: Pappel (*Populus*, Öhningen; Breite 7.5 cm)



Abb. 13.13: Von den einkeimblättrigen Pflanzen finden sich Teile von Schilfpflanzen und Verwandten in der Sammlung: Schilfblatt (Öhningen).

Blätter als biologische Varianten einstuften und nicht als selbständige Arten. Mit Sicherheit kann aber gesagt werden, dass der miozäne Wald in Öhningen sehr artenreich war. Über die damaligen Kräuter kann wenig Konkretes ausgesagt werden, weil sie hinfällig sind und schlecht versteinern.

Auf Grund der vielen ebenfalls gefundenen Insektenarten kann man, mit dem heutigen Wissen über Insekten, Korrelationen herstellen. Der Fund von Dungkäfern (Abb. 13.14) lässt darauf schliessen, dass damals Wiederkäuer lebten. Auf Grund einer gefundenen Zikade, die nur auf einer einzigen Pflanze lebt, kann man annehmen dass eine Eschenart existierte. *Lema*, ein Blattkäfer, zeigt an, dass Lilien wuchsen, denn er lebt wie das verwandte Lilienhähnchen nur auf Lilien (Stefan Ungricht, pers. Mitteilung).

In Öhningen (USM) wurden hingegen keine Palmen gefunden. Vielleicht ist das Zufall, in der Molasse von Lausanne sind solche oft versteinert erhalten geblieben. Es gab nur sehr wenige Tannen. Auch vereinzelte Föhrennadeln konnten bestimmt werden, denn sie wuchsen wohl in trockeneren Gebieten, weiter weg vom Maarsee. Die Nadelhölzer sind durch Zypressenarten (z.B. *Glyptostrobus*, Sumpfzypresse) vertreten, die heute noch in China existieren (Abb. 13.15).

Welche Pflanzen allenfalls im trockenen Hinterland wuchsen, kann nicht gesagt werden. Pflanzen, die unmittelbar nach ihrem Tod ins Wasser fallen, versteinern leichter, während längere Transportdistanzen meist sämtliches Pflanzenmaterial zerstören.

Weitere Fossilien aus der Süßwassermolasse wurden auch in der Umgebung von

Stein am Rhein (z.B. Schienerberg) und von Baltersweil im deutschen Klettgau gefunden (Abb. 13.16 – 13.18).

Die gefundenen Pflanzen wachsen in dieser Art nicht mehr in unserer Gegend, sie starben während den folgenden Eiszeiten bei uns aus. Hingegen findet man sie immer noch an Reliktstandorten, wie oben erwähnt. Manchmal überlebten jedoch nah verwandte Arten.

Vertreter einzelner Gattungen wie Feige oder auch Eiche haben heute andere Blattformen und sind jeweils zu anderen Arten geworden.

13.3 Co-Evolution

Nach dem Aussterben der Dinosaurier, vor 66 Mio. J., nahmen aufkommende Säugetiere deren ökologische Nischen ein, und ihre Evolution erfolgte rasch. Sie hatten lange Zeit ein untergeordnetes Leben neben den Sauriern geführt, sie waren klein und eher unbedeutend – nun war ihre Zeit gekommen, und das Pflanzenkleid der Erde spielte eine entscheidende Rolle dabei.

In der späten Kreidezeit begannen neben den «Blumen» auch die Gräser ihren Aufstieg in der Evolution. Gras-Steppen begannen sich erst im Tertiär auszubreiten. Traditionell nahm man als Grund an, dass das Klima kühler und trockener wurde. Neuere Forschungen zeigen aber, dass es auch umgekehrt gewesen sein könnte: Es wurde kühler und trockener, da die Gras-Steppen sich auszubreiten begannen. Böden von Gras-Steppen speichern nämlich mehr Kohlenstoff und Wasser als beispielsweise Waldböden; damit wurden Treibhausgase



Abb. 13.14: Dungkäfer (*Coprius druidum*, Slg. ETH Zürich)



Abb. 13.15: *Glyptostrobus*, eine Verwandte der Chinesischen Sumpfzypresse, ist eine häufige Nadelholzart aus der Ohninger Süßwassermolasse (Slg. ETH Zürich).



Abb. 13.16:
Dryandrodes banksiae



Abb. 13.17: *Quercus* sp. Eiche



Abb. 13.18: Unbekannte Pflanzen
(Schienerberg, Blatt 9 cm lang)

im Boden gebunden. Und vielleicht waren die weidenden Säugetiere mitschuldig an der Entwicklung. Die meisten Pflanzen leiden nämlich unter der Beweidung stärker als Gräser. So könnte die Beweidung die Ausbreitung der Gras-Steppen unterstützt haben. Weidende Säugetiere, insbesondere Pferde, passten sich wiederum den neuen Gegebenheiten an: sie wurden grösser, die Füsse passten sich an den harten Steppenboden an, und ihre Zähne wurden hochkroniger, um mit den harten Gräsern fertig zu werden. Die Gräser wiederum bauten vermehrt «Phytolithen», also Kieselsäure in ihr Blattwerk ein, um die Weidetiere abzuschrecken, die darauf ihre Zähne noch weiter spezialisierten. Das Resultat dieses Wettrüstens sind hochspezialisierte Grasfresser (Pferde) auf der einen Seite und starke, weideresistente Gräser auf der anderen Seite (Abb. 13.19).

Auch kleinere Säugetiere entwickelten sich rasch in den Steppen und Savannen. Hasen, Nagetiere (Mäuse, Biber und Lemminge) lernten, das Gras zu fressen und ihre Lebensweise der neuen Umwelt anzupassen. Ihre Aktivitäten verhinderten eine Verbuschung und hielten die Grasflächen offen.

Eine ähnliche Entwicklung machten auch die Vorläufer der Nashörner durch (Abb. 13. 20).

Weitere Beispiele für eine Co-Evolution – diesmal mit Blumen – sind die Insekten. Farbige Blüten, deren Blütenblätter nicht verwachsen sind, werden von verschiedensten Insekten besucht, der Zugang zum Lockfutter ist einfach und die Blüten werden durch die Gäste an der Nektarquelle

sicher bestäubt. Blumen mit nicht verwachsenen Kronblättern sind älter als Blüten mit einer geschlossenen Kronröhre. Man kann verfolgen, wie letztere immer raffinierter wurden bis hin zu den Orchideen.

Zusammen mit der Entwicklung der Blütenpflanzen zeigt sich auch eine Ausbreitung der Insektenarten (Abb. 13.21). Alle Insektenfamilien gibt es schon seit der Kreidezeit, Käfer sind schon 250 Mio. J. alt. Auf Grund des reichereren Nahrungsangebotes durch die Blüten begannen sich allgemein neue Arten innerhalb bestimmter Insektenfamilien zu entwickeln, ganz deutlich ist der Zuwachs bei den Schmetterlingen.

Vorerst boten die Blüten Pollen an, der von Käfern gesammelt und weiter getragen wurde zur nächsten Blüte. Das war aber recht aufwändig für die Pflanzen, denn Pollen sind eiweissreich und brauchen viel Energie zur Produktion.

Im Laufe der Zeit begannen die Blütenpflanzen Nektar zu produzieren, seine Produktion benötigte weniger Energie. Nun kam die Zeit der Fliegen (Diptera), der Schmetterlinge (Lepidoptera) und der Hautflügler (Hymenoptera). Die beissenden Fresswerkzeuge der Insekten, die geeignet waren die Pollensäcke aufzubeissen und den Pollen zu sammeln, entwickelten sich zu Rüsseln, die in der Folge einer Co-Evolution mit den Blütenformen eine beträchtliche



Abb. 13.19: Unterkiefer eines hirschartigen Tieres (Benken, ZH, Breite 4 cm)



Abb. 13.20: Unterkiefer eines Waldnashorns aus dem Quelltuff von Flurlingen (Länge 40 cm)

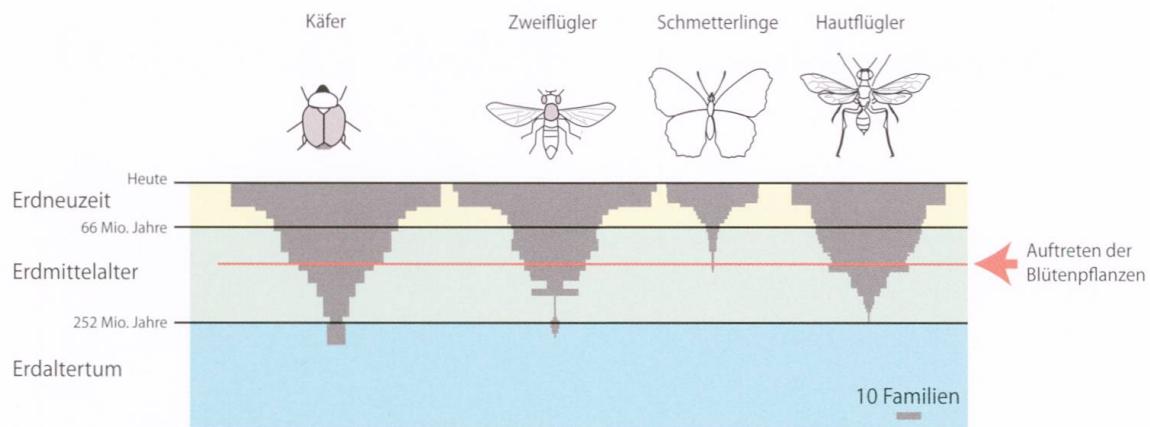


Abb. 13.21: Entwicklung der Vielfalt wichtiger Insektengruppen in der Erdgeschichte (nach Labandeira und Sepkoski 1993)

Länge aufweisen konnten. Die ältesten Nachtfalter weisen oft noch beissende Mundwerkzeuge auf, während die Tagfalter, die in der Evolutionsgeschichte jünger sind, ausschliesslich Saugrüssel besitzen.

Besonders die Bienen waren effektive Bestäuber: sie erfanden Bestäubungsarten, welche die Konkurrenten nicht beherrschten. Bald wandelten sich Blüten so ab, dass gewisse Bienen nur bestimmte Pflanzenfamilien bestäuben konnten. Andere Bienen, die nicht so spezialisiert waren, konnten verschiedene Nahrungsangebote nutzen.

Schmetterlingsblütler, die ihren Staubbeutel unten im Schiffchen der Blüte verstecken, werden besonders gut von Bauchsammlerinnen bestäubt. Sie sind schwer und können das Schiffchen gut nach unten drücken (Abb. 13.22). Mit ihren Sammelhaaren am Bauch können sie den Pollen von Korbblütlern beim Darüberkrabbeln ebenso gut sammeln.

Andere Blüten wie der Wiesen-salbei entwickelten ein Schlagbaum-system, das der sammelnden Biene beim Krabbeln den Pollen auf den Rücken drückt (Abb. 13.23). Beim Besuch der nächsten Blüte streift die Narbe, die ebenfalls in der Oberlippe sitzt, den Pollen ab.



Abb. 13.22: *Megachile*, eine Bauchsammlerin beim Nektarsammeln

Am raffinertesten sind die Blüten einiger Orchideen, die den Körper und den Duft eines Insektes imitieren. Bienen werden irregeleitet und versuchen sich mit dem vermeintlichen Weibchen zu paaren. Beim Paarungsversuch drücken sie den Kopf in die Orchideenblüte und bekommen dabei ein Paket Pollen auf die Stirn geklebt. Oft wird nicht einmal Nektar angeboten, aber der Paarungstrieb der Bienen ist so stark, dass sie bei der nächsten Insekten-Orchidee ihr Glück nochmals versuchen und dabei das Pollenpaket zielgerecht an der Narbe deponieren. Das ist wohl die raffinertesten Art der Bestäubung (Abb. 13.24).

Die Co-Evolution kann aber noch viel weiter gehen, indem Bienen nur eine einzige Pflanzenart besuchen, bei der die Nektarquelle so platziert ist und die Pollensäcke derart versteckt sind, dass nur eine einzige Bienenart zum Ziel kommt. Diese Abhängigkeit hat den Vorteil, dass nur eine Bienenart eine sichere Bestäubung garantiert und dass keine untauglichen Bestäuber gefüttert werden müssen. Anderseits kann die enge Abhängigkeit dazu führen, dass, wenn der eine Partner aus irgend einem Grund ausfällt, der andere auch zu Grunde geht.

Weitere Arten von symbiotischem Verhalten sind bekannt, z.B. Prachtbienen (Abb. 13.25), die Blütendüfte sammeln und umherfliegen, um Weibchen anzulocken. Der Duft wird an speziellen Haaren an den Hinterbeinen gesammelt. Auch sie bestäuben beim Herumkrabbeln die Pflanzen.

Die Tatsache, dass viele Insekten Farben sehen können, weist ebenfalls auf einen Zusammenhang zwischen Blütenfarben und Insekten hin.

Dass Honigbienen die Farbe Rot nicht sehen, dafür aber das UV-Licht, ist vielleicht bekannt. Blüten, die es auf die Honigbienen als Bestäuber abge-



Abb. 13.23: Wiesensalbei und Honigbiene



Abb. 13.24: Langhornbiene auf Hummelorchis

sehen haben, bilden oft in der Nähe der Nektarquelle ein Gewebe aus, das das UV-Licht reflektiert und der Biene den Weg weist (Abb. 13.26).

Der im Diagramm (Abb. 13.21) gezeigte Anstieg der Artenzahl der Insekten mit dem Aufkommen der Blütenpflanzen erklärt sich zum grossen Teil durch Co-Evolution.

Neben Grasfressern und Insekten betrifft die Co-Evolution auch die **Vögel**: sie sind die einzigen noch lebenden Nachkommen der Dinosauier. Viele von ihnen haben sich nach der Katastrophe vor 66 Mio. J. mit dem Aufkommen der Blütenpflanzen und im Zusammenhang mit der Evolution der Insekten entwickelt. Gewisse Vögel fanden nun eine lohnende Eiweissquelle in der sich stark entwickelnden Insektenwelt. Andere



Abb. 13.25: Prachtbienen



Abb. 13.26: Nachtkerze im UV-Licht (links) und im Tageslicht (rechts). Die Saftmale im Zentrum der Blüte sind nur im UV-Licht sichtbar.

Vögel wie Kolibris entdeckten den zuckerhaltigen Saft aus der Bar der neuen Blütenpflanzen und betätigten sich ungewollt auch als Blütenbestäuber.

Nicht vergessen dürfen wir die **Fledermäuse**, die in den Tropen heute noch Blüten besuchen und mit ihrer langen Zunge den Nektar ernten. Dabei wirken auch sie als Bestäuber dieser Blüten. In erster Linie profitierten sie aber vom steigenden Insektenangebot – auch hier eine Co-Evolution!

Wie im Kapitel Fortpflanzung erklärt wurde, haben sich um den Embryo der Blütenpflanzen herum Gebilde entwickelt, die Fett (Nüsse), Stärke (Weizen), Eiweiss (Bohnen) oder saftiges Fruchtfleisch (Beeren, Obst) produzieren. Manchen Vögeln und Insekten ist der Tisch nun reich gedeckt: Früchte und Samen, allenfalls auch Nektar stehen auf dem Speiseplan. Sowohl die Blüten als auch die Früchte der Pflanzen erlaubten somit vielen Vögeln und anderen Tieren eine erfolgreiche Entwicklung.

13.4 Die heutige Flora unserer Gegend

Die Eiszeiten bedeuteten für viele Pflanzen in unserer Gegend den Tod. Weil sowohl Alpen als auch Mittelmeer einen Ost-West-ausgerichteten Riegel darstellten, konnten die wärmeliebenden Pflanzen nicht nach Süden ausweichen; sie überlebten teilweise im Osten (China), z.B. *Glyptostrobus*. *Liquidambar* existiert heute noch im Westen, in den Südstaaten der USA. In Nordamerika verlaufen die Gebirgszüge von Nord nach Süd. Die Eiszeiten hatten daher dort einen viel geringeren Einfluss auf die Flora; noch heute ist die Artenvielfalt dort deutlich höher.



Abb. 13.27: Gemeine Küchenschelle,
Pulsatilla vulgaris



Abb. 13.28: Frauenschuh,
Cypripedium calceolus

Nachdem das Eis der letzten Eiszeit weggeschmolzen war und das Klima deutlich wärmer wurde, ist unsere derzeitige Flora aus allen Himmelsrichtungen, oft entlang von Flüssen, neu eingewandert.

Aus dem Südosten, entlang der Donau, haben u.a. die Küchenschelle (Abb. 13.27) oder der Frauenschuh (Abb. 13.28) und gewisse andere Orchideenarten (Bocksriemenzunge; Abb. 13.29) den Weg zu uns gefunden. Die Rhone-Rhein-Verbindung haben die Flaumeiche (*Quercus pubescens*), die Insektenorchideen (*Ophrys*-Arten) u.a.m. benutzt. Von Norden oder aus den Alpen erreichten uns Reliktpflanzen, welche die Eiszeit auf eisfreien Berggipfeln überlebt hatten.

Einen schönen Einblick in diese Pflanzenwanderungen geben die Bücher von Hans Walter: Biologische Kostbarkeiten und Erwin Litzelmann: Pflanzenwanderungen (vergriffen). Sie erklären, warum wir im Kanton Schaffhausen eine ausserordentliche Vielfalt an Pflanzen besitzen.

Die Entwicklung der Blütenpflanzen hat entscheidend zur Vielfältigkeit der heutigen Lebewelt beigetragen. Säugetiere, Insekten und Vögel haben sich parallel zu ihnen entfalten können.



Abb. 13.29: Bocksriemenzunge, *Himantoglossum hircinum*

14. Epilog

Im Meer wurde die Fotosynthese erfunden, die Algen entstanden. Nach unendlich langer Zeit haben sich einfache Pflanzen aufs Land gewagt und den steinigen Planeten zu einem wunderschönen bewohnbaren Ort gemacht.

Anfangs waren sie eng ans Wasser gebunden, die Fortpflanzung war bei Moosen, Farnen, Schachtelhalmen und Bärlappgewächsen nur mit Hilfe des Wassers möglich. Sporen sorgten für die Verbreitung der Gewächse. Später wurden Samen erfunden, die vorerst noch nackt waren, aber bereits Nährstoffe für die zukünftige Pflanze enthielten. Die Chance, vom Wasser weg zu kommen und das trockene Land zu erobern, wurde wahrgenommen. So wurde die Erde immer grüner und die Pflanzenarten immer zahlreicher. Als die Samen noch eine solide Hülle bekamen und die Pflanzen für die Bestäubung allerlei Tiere benutzten und dafür Blüten ausbildeten, wurden auch noch Farbtupfer in das grüne Kleid der Erde gesetzt.

All das lief aber nicht in Ruhe und kontinuierlich ab. Die Kontinente der Erde wurden verschoben, Meeresströmungen umgeleitet, Vulkane brachen aus, Meteoriten stürzten auf die Erde. Katastrophe reihte sich an Katastrophe, oft wurde das Leben beinahe ausgelöscht. Viele Arten starben aus, aber die ökologischen Zusammenbrüche waren auch die eigentliche Triebkraft für die Überlebenden. Sie hatten ein fast «leeres Feld» vor sich und neue Mutationen oder ältere, vorher wenig erfolgreiche Abwandlungen erwiesen sich nun als vorteilhaft im Überlebenskampf. Diese «Nadelöhre» der Evolution lösten für viele Lebewesen eine unglaubliche Fülle von neuen Lebensformen aus.

Die Pflanzen ermöglichten das Leben von Tieren, nur durch sie konnte die Besiedelung des Festlandes und deren Evolution überhaupt erfolgreich sein. Durch die wechselnden Auslesekriterien wurden auch ihre Lebensformen immer vielfältiger.

In Abb. 12.1 wird die zunehmende Komplexität gegen die Anzahl der Lebewesen in einer Kurve dargestellt. Ganz links beginnen die Einzeller. Bei fortschreitender Evolution erscheinen immer komplexere Tiere, die aber zahlenmäßig im Vergleich zu den Einzellern unbedeutend sind. Man erkennt darin, dass Wirbeltiere und wir Menschen nur einen kleinen Ausschnitt aus dem riesigen Spektrum des Lebens ausmachen. Die Hauptmasse der Lebewesen besteht aus Einzellern. Die Zeitkomponente ist in dieser Grafik nicht berücksichtigt, doch ist klar, dass hochspezialisierte Lebewesen auch sehr empfindlich auf Veränderungen der Umwelt sind. Das Beispiel der Saurier, die vor 66 Millionen Jahren ausstarben, ist wohl am bekanntesten.

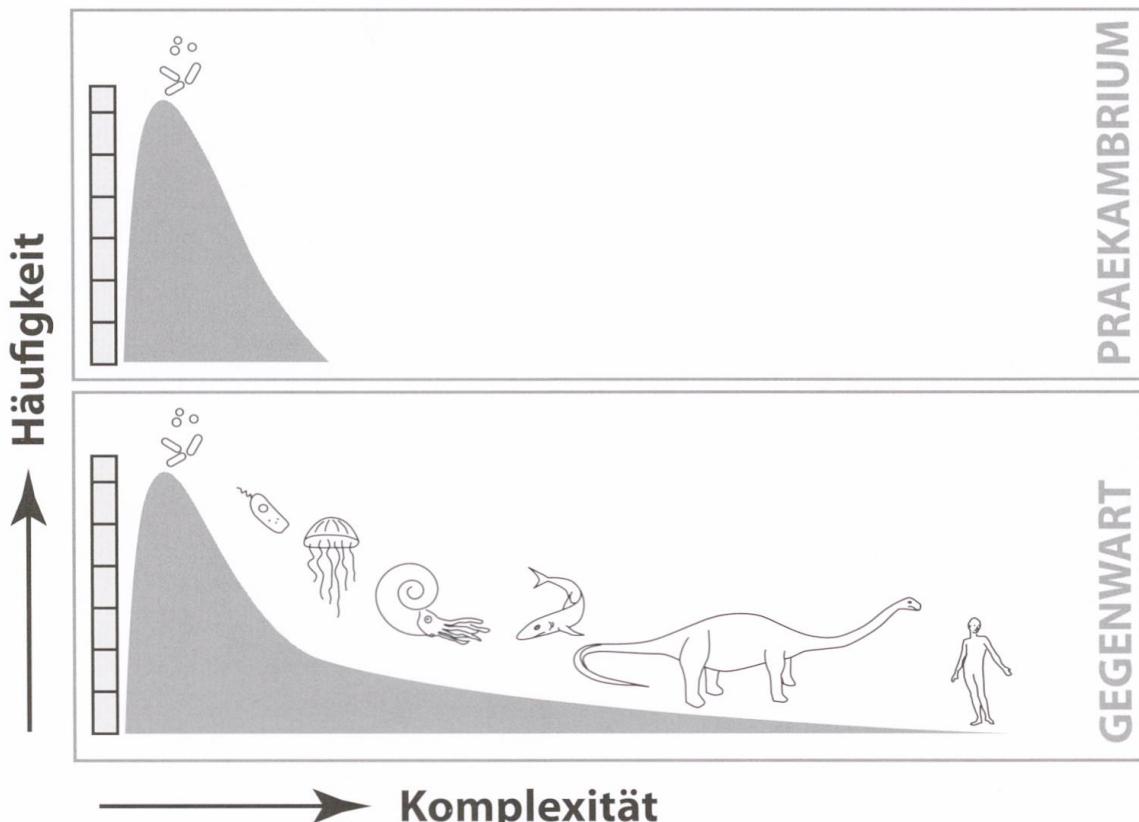


Abb. 14.1 Darstellung der Komplexität der Lebewesen, siehe Text

Analog zur schießen Verteilungskurve der Artenzahlen der Tiere müssten wir bei einer ähnlichen Darstellung für Pflanzen die Blütenpflanzen als sehr spezialisierte Formen (Symbiose mit Insekten, etc.) ganz rechts aussen ansiedeln. Somit wären auch sie ziemlich sicher gegen Umweltveränderungen schlecht geschützt.

Es ist klar, dass weitere geologische oder kosmische Ereignisse das Angesicht der Erde verändern werden, wir leben nicht ausserhalb der Naturgewalten.

95% aller jemals auf der Erde existierenden Lebewesen sind wieder ausgestorben. Die Ursachen wurden geschildert. Man kann fünf grosse Aussterbeereignisse («Big 5») verfolgen, wenn man die Aussterberaten der Tiere analysiert. Wohin in Zukunft die Reise gehen wird, kann man aber nicht vorhersagen.

Verursacht der Mensch die 6. Aussterbekatastrophe?

Spätestens seit der Mensch zum Ackerbauer wurde, hat er in die Pflanzenwelt eingegriffen. Er hat Gärtchen und Äcker angelegt, die er für seine Zwecke nutzte und in denen nur die Pflanzen gedeihen durften, die ihm und

seinem Vieh einen Vorteil brachten. Zuerst geschah das nur im kleinen Rahmen, denn es lebten nicht viele Menschen auf der Erde – sie waren ein Teil des ökologischen Gleichgewichtes.

Durch Ackerbau und Viehzucht verbesserte sich die Ernährungssicherheit der Menschen mehr und mehr und ihre Fortpflanzung wurde immer erfolgreicher, sie wurden zahlreicher und zahlreicher. Dank ihren grossen Gehirnen wurden sie erfindungsreich, holzten Wälder ab zu verschiedenen Zwecken, und ihr Einfluss auf das Pflanzenkleid der Erde wurde immer grösser.

Das Aufkommen der Seefahrt hatte einen grossen Einfluss auf die Ökologie unserer Umwelt. Pflanzen wurden von hier nach dort verschoben, in ganz andere ökologische Umfelder. Kartoffeln, Mais etc. nach Europa, Kaffee nach Südamerika, Gummipflanzen nach Asien usw. usw. Die einheimischen Wälder und Pflanzen mussten weichen, um den Feldern, Weiden und Monokulturen aller Art Platz zu machen. Ausserdem wurden wegen der Seefahrt schon im Mittelalter ganze Wälder vernichtet, weil man das Holz für die Schiffe brauchte.

Nach 1800, mit der industriellen Revolution, ging der Verlust des Pflanzenkleides immer schneller: Holzkohle wurde gebraucht, Erze und andere Bodenschätze wurden abgebaut und die Landschaft zerstört, Städte, Strassen und Eisenbahnlinien brauchten Platz und die Flora musste weichen. Weitere Urwälder verschwanden und wurden durch Kuhweiden, Sisalplantagen, Gummibäume, Kokosplantagen etc. ersetzt, Sümpfe wurden trocken gelegt, um den Ackerbau zu vereinfachen ...

Wenn wir ehrlich sind, befinden wir uns mitten im 6. Massensterben von Pflanzen und Tieren, es wird vom Menschen verursacht und es geht rasend schnell. Nur noch was der Mensch will, darf wachsen und nur dort wo er es will, natürliche Biotope gibt es kaum mehr.

Ob diese riesigen Veränderungen schliesslich zu einem neuen ökologischen Gleichgewicht führen werden wissen wir nicht, klar ist nur, dass es nicht unbedingt ein neues geologischen Desaster braucht, um das Gleichgewicht der Erde aus den Fugen zu bringen und dass es am Menschen liegt, seine Ansprüche in Grenzen zu halten und einzusehen, dass er ein Teil eines verletzlichen, wunderbaren Systemes ist.

15. Weiterführende Literatur

- Beerling**, David, (2007): *The Emerald Planet*, Oxford University Press.
- Brock**, Thomas, D. (1994): *Life At High Temperatures*, Yellowstone Ass. for Nat. Sc, History & Education.
- Davies**, P. (2000): *Das fünfte Wunder*, Scherz Verlag.
- Dawkins**, Richard, (2009): *Geschichten vom Ursprung des Lebens*, Ullstein.
- Fortey**, Richard und **Griese**, Friedrich, (1999): *Leben. Die ersten vier Milliarden Jahre*, C.H. Beck.
- Gould**, Steven Jay, (1999): *Illusion Fortschritt*, Fischer Taschenbuch.
- Hauschke**, N. und **Wilde**, V. (Hrg.), (1999): *Trias, eine ganz andere Welt*, F.Pfeil Verlag.
- Heer**, Oswald, (1993/1855): *Die tertiäre Flora der Schweiz*, Faksimile dokumenta naturae.
- Heer**, Oswald, (1865): *Die Urwelt der Schweiz*, Verlag Schulthess.
- Lane**, Nick, (2002): *Oxygen*, Oxford University Press.
- Palfy**, Jozsef, (2005): *Katastrophen der Erdgeschichte*, Schweizerbart
- Palmer**, D. et.al. (2009): *Evolution*, Gerstenberg.
- Ryan** Frank, (2009): *Virolution*, Spektrum Sachbuch.
- Schalch**, F. (1873): *Beiträge zur Kenntniss der Trias im Südlichen Schwarzwald*, Dissertation.
- Schlatter**, R. (1980): *Sammlung Schalch*, Neujahrsblatt der NGSH 32.
- Stow**, Dorrik (2010): *Vanished Ocean*, Oxford University Press.
- Sues**, H.-D., **Fraser**, N.C. (2002): *Triassic Life on Land*, Columbia University NY.
- Taylor**, Thomas, N, **Taylor**, Edith, L. und **Krings**, Michael (2009): *Paleobotany, The Biology and Evolution of Fossil Plants*, Academic Press Publications
- Walter**, Hans, (1991): *Botanische Kostbarkeiten*, Karl Augustin Verlag Thayngen.
- Willis**, K.J., **McElwain**, J.C., (2002): *The Evolution Of Plants*, Oxford University Press.

16. Glossar

Aerob: Mit Sauerstoff

Anaerob: Ohne Sauerstoff

Archaeen: Urbakterien

Atmung: Energiegewinnung mit Sauerstoff

ATP/ADP: Adenosintriphosphat/Adenosindiphosphat, Energiespeichersystem in den Zellen

Chemoautotrophie: Energiegewinnung aus anorganischen Verbindungen

Co-Evolution: Gleichzeitige Evolution zweier voneinander abhängiger Partner

Chromosomen: Anfärbbare Zellbestandteile, die u.a. aus DNS bestehen

Cyanobakterien: «Blaualgen», Bakterien mit Pigmenten für die Fotosynthese

diploid: Zwei Chromosomensätze enthaltend (2 n Chromosomen)

DNS/DNA: Desoxyribonukleinsäure, doppelstrangiges Riesenmolekül, das die Erbinformation enthält (DNA ist die englische Schreibweise von DNS)

Energiereiche Strahlung: UV-Licht, radioaktive oder energiereiche kosmische Strahlung

Evolution: Entwicklung der Lebewesen im Verlauf der Stammesgeschichte

Fotosynthese: Aufbau von organischem Material mit Hilfe von Sonnenlicht

Gametophyt: Haploide Generation (n Chromosomen) bei Pflanzen mit Generationswechsel. Er bildet männliche und weibliche Geschlechtszellen (Gameten) aus.

Gärung: Energiegewinnung durch Abbau von organischen Molekülen in sauerstofffreiem Milieu

Geschlechtliche Fortpflanzung: Fortpflanzung durch Verschmelzung zweier haploider Geschlechtsprodukte

Gondwanaland: Grosskontinent, der während eines grossen Teils der Erdgeschichte die Südhalbkugel dominierte. Er bestand aus dem heutigen Afrika, Südamerika, Australien, Indien und der Antarktis.

haploid: Einen einfachen Chromosomensatz (n Chromosomen) enthaltend

Isotope: Atome desselben Elementes mit unterschiedlicher Neutronenzahl

Laurasien: Grosskontinent, der während eines grossen Teils der Erdgeschichte die Nordhalbkugel dominierte. Er bestand aus Nordamerika, Europa und Asien (ohne Indien).

Maarsee: Kraterförmiger See, der durch vulkanische Explosion entstanden ist

Massenaussterben: Durch drastische Umweltveränderungen bedingte, überproportionale Aussterbeereignisse im Verlaufe der Erdgeschichte

Mitochondrien: Bestandteile der Zellen, sind für die O_2 -Atmung zuständig (ATP-Bildung), Kraftwerke der Zelle

Mutation: Veränderung der Erbsubstanz des DNS-Moleküles

MzA: Museum zu Allerheiligen, Schaffhausen

Nahrungskette: Beziehungsnetz des Energieflusses in der Biologie: Fressen und gefressen werden

Palaeontologie: Wissenschaft der ausgestorbenen Lebewesen

Pangaea: Grosskontinent, bestehend aus allen heutigen Grosskontinenten, der vor etwa 300 bis 150 Millionen Jahren existierte

Plattentektonik: Gliederung der äussersten Erdhülle, der Lithosphäre, in einzelne Platten, die dem tieferen Erdmantel aufliegen und sich gegeneinander verschieben. Folgen sind Erdbeben, Vulkanismus und Gebirgsbildung; es besteht jedoch auch ein erheblicher Einfluss auf das Klima.

Primärproduktion: Synthese von organischem Material mit Hilfe von Sonnenlicht oder anorganischen chemischen Verbindungen. Basis der -> Nahrungskette

Radioaktiver Zerfall: Zerfall von Atomen unter Aussendung radioaktiver Strahlung

RNS/RNA: Ribonukleinsäure, einstrangig, Vorläufer der DNS auch Katalysator und Informationsüberträger in der Zelle (RNA ist die englische Schreibweise von RNS)

Schwarze Raucher: Durch schornsteinförmige mineralische Ablagerungen gekennzeichnete Austrittsstellen von heissem Wasser (hydrothermale Quellen) am Grund der Tiefsee

Sporen: Meist in Sporangien gebildete Fortpflanzungsprodukte (n Chromosomen) für die ungeschlechtliche Vermehrung

Sporophyt: Diploide Generation (2n Chromosomen) bei Pflanzen mit Generationswechsel

Symbiose, Symbionten: Zusammenleben zweier Organismen, bei dem beide Partner (Symbionten) voneinander abhängig sind

Thermophile Bakterien: Urbakterien, die in heißen Gewässern leben

Treibhauseffekt: Durch bestimmte Gase (CO_2 , CH_4 , H_2O etc.) verursachte Wärmespeicherung in der Atmosphäre, die sich auf das Weltklima auswirkt

Uratmosphäre: Gashülle der Uerde bestehend aus H_2 , N_2 , H_2O , NH_3 , CH_4 , H_2S , He

Ursuppe: Meer bei der Entstehung des Lebens, mit den im Wasser gelösten Gasen, organischen Molekülen und Ionen

Anhang

Datierung von Fossilien und geologischen Schichten

Niklaus Steno (1638 – 1687), ein dänischer Arzt, erkannte aufgrund seiner Beobachtung von Fossilien im italienischen Apennin eine Ordnung in der Lagerung der Gesteine: Jüngere Schichten lagern über älteren. Diese Beobachtung erscheint heute banal; doch damals war sie revolutionär, da erstmals in den Gesteinen eine Zeitdimension erkannt wurde.

William Smith (1769 – 1839) war Kanalbauer in England und Schottland. Seine Arbeit erforderte eine genaue Analyse des geologischen Untergrundes. Er erkannte, dass Gesteinsabfolgen als «kartierbare Formationen» zusammengefasst werden können, die eine charakteristische Abfolge zeigen. Er erkannte zudem, dass sich die Formationen in ihrem Fossilinhalt unterscheiden. Er gilt damit als «Begründer der Biostratigraphie», die es erlaubt, Gesteine überregional in Bezug auf ihr Alter zu vergleichen: Schichten, welche dieselben Fossilien aufweisen, sind gleich alt, die oberen jünger und die unteren älter. Das ermöglichte eine relative Datierung. Die Biostratigraphie liess aber die Frage nach dem Alter der Erde und damit auch nach der Vereinigung von geologischen Beobachtungen mit der biblischen Schöpfungsgeschichte offen.

Es gab eine ganze Reihe von Versuchen, das absolute Alter von Gesteinen oder gar der Erde zu bestimmen. Der anglikanische Bischof James Ussher (1581 – 1656) berechnete 1650 den Schöpfungszeitpunkt der Erde aufgrund der biblischen Überlieferung auf den 23. Oktober 4004 vor Christus. Der charismatische Geologe Charles Lyell (1797 – 1875) vertrat die Auffassung, dass die Erde weder einen Anfang hatte, noch je ein Ende haben wird. Charles Darwin schätzte, dass die Erde 100 Millionen Jahre alt war. Der berühmte Physiker Lord Kelvin (1824 – 1907) errechnete das Alter aufgrund der Abkühlungsgeschichte der Erde auf 20 bis 40 Millionen Jahre. Erst an der Wende zum 20. Jahrhundert wurde erkannt, dass gewisse Atome nach strengen physikalischen Gesetzmässigkeiten zerfallen: der **radioaktive Zerfall**. Bereits kurze Zeit später wurde diese Erkenntnis genutzt, um das Alter der Gesteine und schliesslich gar das Alter der Erde zu berechnen.

Auch das Alter von Lebewesen oder organischen Materialien kann mit der Methode des radioaktiven Zerfalles bestimmt werden. Sehr bekannt ist die **C¹⁴-Methode**, die für biologische Funde eingesetzt werden kann. Da die Halbwertszeit von C¹⁴ nur 5760 Jahre beträgt, kann diese Methode nur für junge Funde, wie zum Beispiel den «Ötzi», gebraucht werden. Sie reicht maximal 60'000 Jahre zurück.

Andere Atome haben andere, auch längere Halbwertszeiten. Diese Isotope können aber nur dann vernünftig angewendet werden, wenn in der Nähe des Fundortes vulkanische Ablagerungen vorkommen.

Eine weitere wohlbekannte Methode dürfte die **Dendrochronologie** sein, welche die Anordnung und Dicke der Jahrringe von Bäumen benutzt. Je nach Klima bilden die Bäume engere oder weitere Jahrringe aus, die miteinander zur Deckung gebracht werden können. Diese Methode reicht aber höchstens ein paar Jahrtausende zurück, sagt aber gleichzeitig etwas aus über den Klimaverlauf, in dem der Baum gewachsen war.

Eine andere Zeitbestimmungsmethode ist möglich, indem die Mutationen desselben **Genes** in verschiedenen heute existierenden Lebewesen verfolgt werden. Die Mutationsrate eines Genes kann so ermittelt und extrapoliert werden.

Ganz neu ist die Technik der biochemischen Bestimmung der **Mutationsrate der DNS**. Das ist nicht dasselbe wie die Mutationsrate der Gene, denn sie untersucht das DNS-Molekül und ist deshalb genauer als die vorhergehende Methode. Sie ist im Moment im Aufbau. Viele Lebewesen werden jetzt auf diese Weise miteinander verglichen und man findet DNS-Sequenzen, die sehr alt sind und die z.B. nicht nur in den Säugetieren, sondern auch in älteren Organismen wie Würmern, Bakterien oder auch Viren vorhanden sind.

Heute ist die Wissenschaft bemüht, diese verschiedenen Altersbestimmungsarten gegen einander zu eichen.

Aus verschiedenen Gründen ist hier kein Raum, um die aufgezählten Methoden genauer zu beschreiben. Sie sind hier genannt um zu zeigen, dass immer mehr Zweige der Wissenschaft ihren Beitrag zur Altersbestimmung von Gesteinen und Fossilien leisten und dass diese darum immer genauer wird.

Pflanzen in Stein

Wer schon einmal das Glück hatte, beim Auseinanderbrechen einer Gesteinsplatte feingliedrige Reste einer versteinerten Pflanze zu finden, wird sich vermutlich staunend gefragt haben, wie ein derart zerbrechliches Objekt die Zeitreise durch Jahrtausende überstehen konnte.

Tatsächlich ist jedes Fossil ein unglaublicher Glücksfall. Nur wenn viele günstige Faktoren zusammenspielen, kann die Zeitreise gelingen. So werden sich vom Löwenanteil aller Lebewesen, die je die Erde bevölkert haben, nie irgendwelche Reste finden lassen. Die Fauna und Flora, die wir heute aus den Fossilien für einzelne Zeitabschnitte rekonstruieren, ist immer nur ein lückenhaftes Bild der tatsächlichen Lebewelt. Die Reste des toten Organismus müssen rasch eingebettet werden, bevor sie vom Heer der Pilze, Bakterien und anderen vollständig zersetzt wurden. Doch auch nach der Einbettung nagen die Mikroorganismen weiter an dem toten Körper. Das Einbetten muss in einem Sediment erfolgen, das fein genug ist, um die Strukturen zu erhalten. Das zu Beginn weiche Sediment muss so weit eingegraben werden, dass es in ein festes Gestein umgewandelt wird. Dabei dürfen sich die Bedingungen chemisch und physikalisch nur in einem bestimmten Bereich bewegen, sonst wird der tote Körper weiter bis zur Unkenntlichkeit zerstört. Zu hohe Druck- oder Temperaturbedingungen (Metamorphose), zirkulierende Flüssigkeiten, biochemische Aktivitäten und vieles anderes: All das kann dazu führen, dass von dem Organismus nichts Erkennbares übrig bleibt. Und schliesslich muss das Gestein durch geologische Prozesse nicht nur wieder den Weg an die Erdoberfläche zurückfinden, sondern es muss auch das seltene Glück haben, in unsere Hände zu fallen.

Wer das Archiv der Fossilien liest, muss sich dieses «erdwissenschaftlichen Filters» bewusst sein. Pflanzen und Tiere, die in Gebirgen leben, haben beispielsweise kaum eine Chance, je in das Archiv der Fossilien einzugehen. Im Gebirge wird erodiert, nicht abgelagert. Tiere und Pflanzen, die am Ufer von Seen oder Meeren lebten, oder im Wasser selbst, sind hingegen in diesem Archiv viel besser repräsentiert. Organismen ohne Hartteile, also ohne Skelett, ohne Zähne oder ähnlichem haben nur in Ausnahmefällen die Chance, sich dem zerstörerischen Zahn der Zeit zu widersetzen. Jede Rekonstruktion fossiler Ökosysteme bleibt daher ein lückenhaftes und oft auch verzerrtes Abbild. Dies muss bei der Interpretation berücksichtigt werden.

Dazu ist ein Verständnis der Prozesse der Fossilbildung, der Fossilisation erforderlich. Die Fossilisation von Pflanzenfossilien kann sich von derjenigen von tierischen Fossilien unterscheiden.

Man kann Pflanzenfossilien aufgrund ihrer Entstehung grob in drei Gruppen unterteilen:

Pflanzenreste können vor allem im Meer, in Seen, Flüssen, Sümpfen, Lagunen und anderen vom Wasser dominierten Bereichen in Schichten von Ton-, Silt- oder Sandablagerungen gelangen. Mit der zunehmenden Überlagerung von jüngeren Schichten wird das Wasser aus Sediment und Pflanzenresten ausgepresst, das Sediment wird kompakter, und die Pflanzenreste werden zusammengepresst. Oft wird der Pflanzenrest selbst durch (bio-)chemische Prozesse aufgelöst: Zurück bleibt ein Abdruck. In anderen Fällen wird der Pflanzenrest in Kohle umgewandelt («inkohlt»); es bleibt ein oft dünner Film von Kohle zurück, der durchaus noch gewisse chemische Signaturen der Ursprungspflanze enthalten kann. Manchmal, vor allem wenn Sauerstoff bei dem ganzen Prozess fehlte, kann dabei die robuste «Schutzschicht» der Pflanze, die Cuticula, strukturell erhalten bleiben. Gerade in diesen Fällen können oft auch mikroskopische Details erkennbar sein.

Wenn das abgestorbene Pflanzenmaterial von Wasser, reich an gelösten Mineralien, durchtränkt wird, können sich in den feinsten Poren und Hohlräumen Mineralien ausscheiden, so dass das pflanzliche Gewebe schrittweise aushärtet und in ein Gestein umgewandelt wird. Je schneller und vollständiger dieser Prozess, desto besser die oft dreidimensionale Erhaltung von Strukturen, manchmal gar bis auf die Ebene einzelner Zellen. Je nach ausgeschie-



Nur in Ausnahmefällen wird der Recycling-Kreislauf durchbrochen, und Pflanzenmaterial wird als Fossil konserviert.



Verkieseltes Holz: die feinsten Strukturen blieben erhalten
(Wyoming, Kreide; Breite: 2 mm)

denen Mineralien (z.B. Kalk, Limonit, Pyrit oder Kieselsäure) unterscheidet sich dann natürlich die Qualität der Erhaltung.

Die letzte Form der Erhaltung schliesslich ist die chemisch vollständigste Erhaltung: Wenn das Pflanzenmaterial durch irgend einen Umstand umfassend von mikrobiellen Abbauprozessen geschützt wird, kann sich ursprüngliches Material erhalten. Hier können sich Farbstoffe, Fettmoleküle, ja selbst Fragmente der DNS erhalten! Solche aussergewöhnliche Bedingungen kennt man aus gewissen Seesedimenten, aus Bernstein und – kurioserweise – aus «fossilen Toiletten» von Säugetieren unter wüstenartigen Bedingungen. Hier blieben Pflanzen in kristallisiertem Urin bis 40'000 Jahre fast unverändert erhalten.