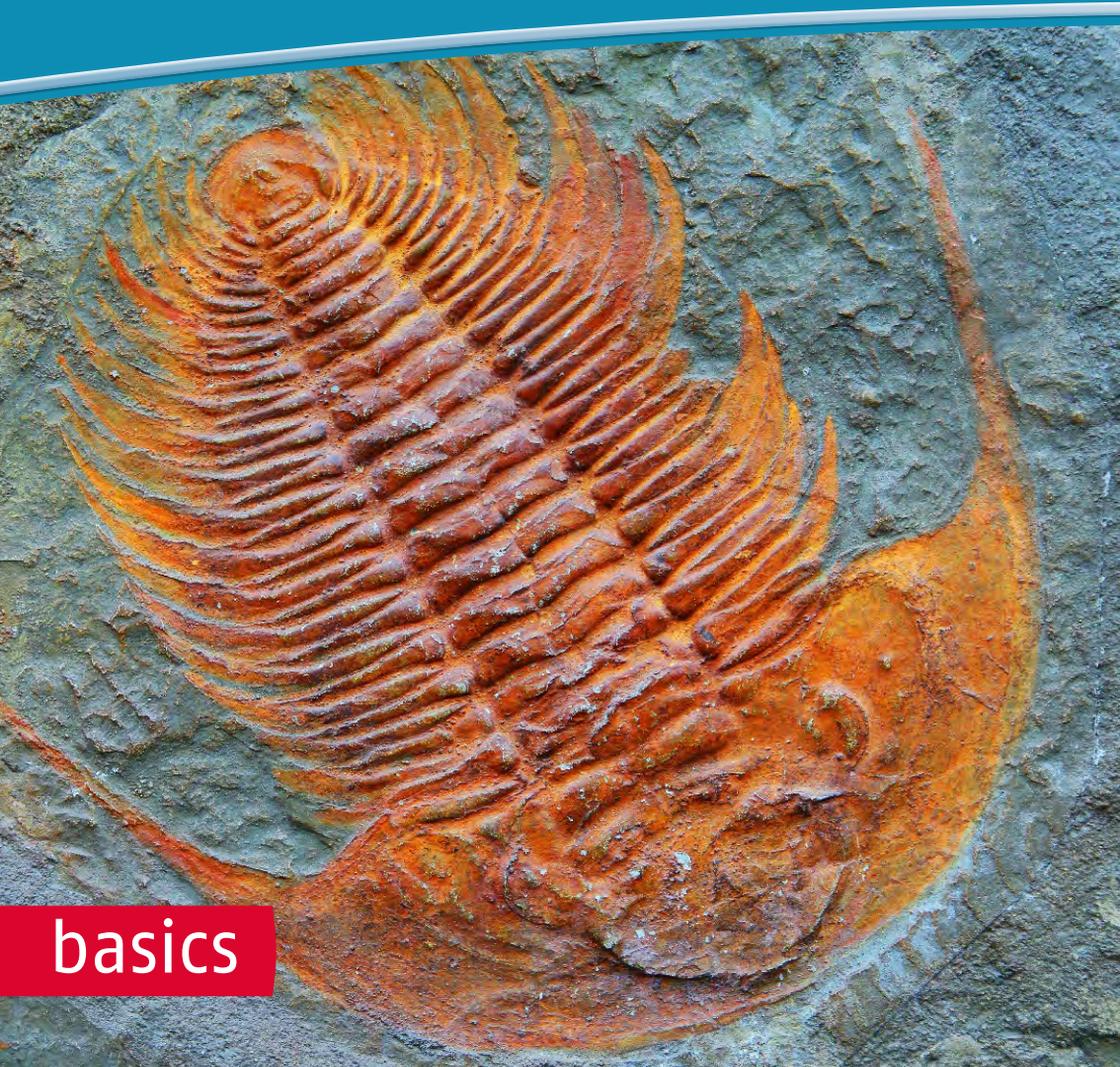


utb.

Wolfgang Oschmann

Evolution der Erde

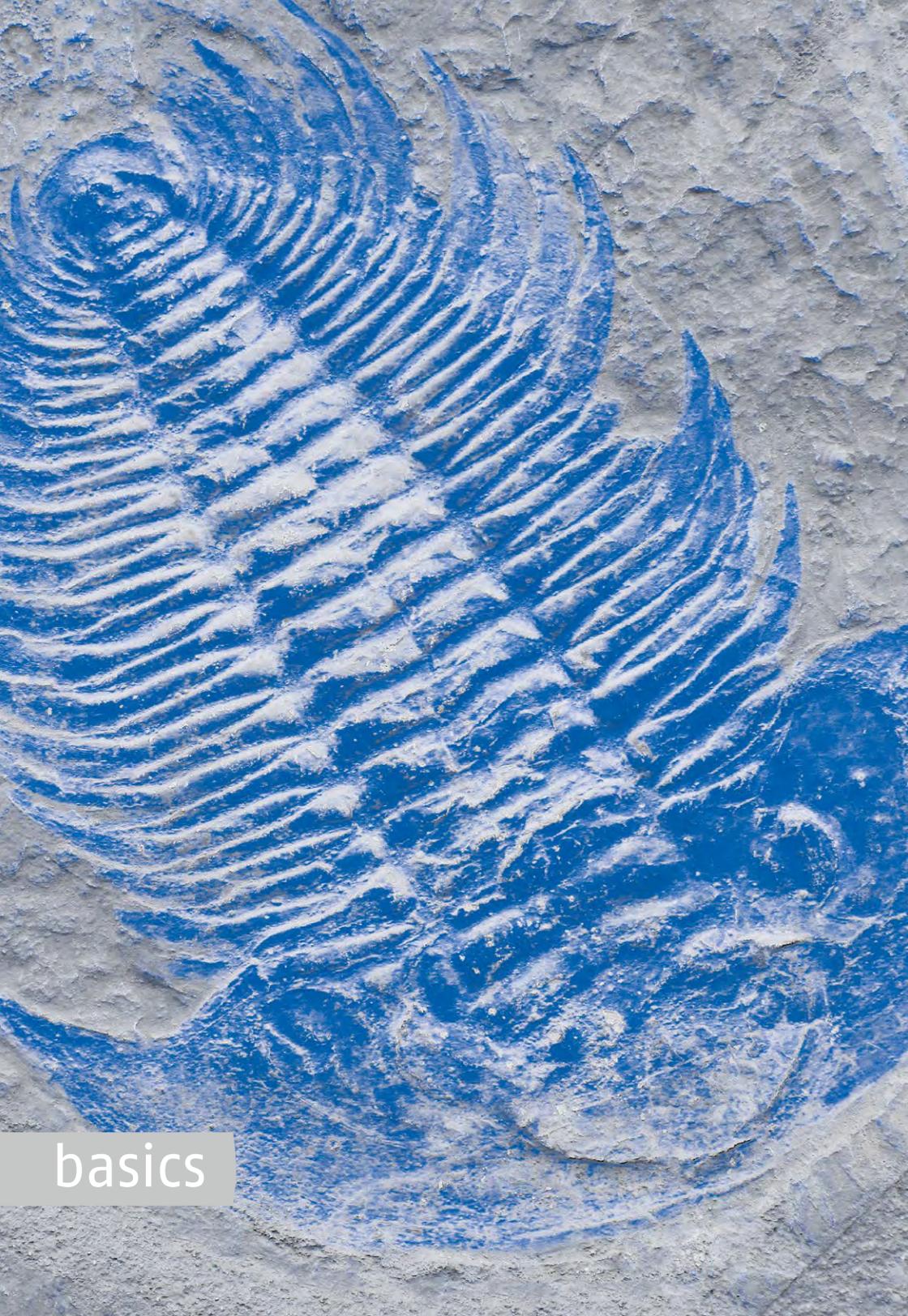
3. Auflage



basics

Eine Arbeitsgemeinschaft der Verlage

Böhlau Verlag · Wien · Köln · Weimar
Verlag Barbara Budrich · Opladen · Toronto
facultas · Wien
Wilhelm Fink · Paderborn
Narr Francke Attempto Verlag / expert verlag · Tübingen
Haupt Verlag · Bern
Verlag Julius Klinkhardt · Bad Heilbrunn
Mohr Siebeck · Tübingen
Ernst Reinhardt Verlag · München
Ferdinand Schöningh · Paderborn
transcript Verlag · Bielefeld
Eugen Ulmer Verlag · Stuttgart
UVK Verlag · München
Vandenhoeck & Ruprecht · Göttingen
Waxmann · Münster · New York
wbv Publikation · Bielefeld



basics



Wolfgang Oschmann

Evolution der Erde

Geschichte der Erde
und des Lebens

3., korrigierte Auflage

Haupt Verlag

Prof. Dr. Wolfgang Oschmann, *1954, promovierte an der Ludwig-Maximilians-Universität in München. Nach Aufhalten an den Universitäten Lucknow (Indien), Bremen und Würzburg wurde er 1993 an die Universität Tübingen berufen. Seit 1998 ist er Professor für Paläontologie am Institut für Geowissenschaften der Goethe Universität in Frankfurt.

3. Auflage: 2021

2. Auflage: 2018

1. Auflage: 2016

Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Copyright © 2021 Haupt, Bern

Das Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Umschlaggestaltung und Satz: Atelier Reichert, Stuttgart

Titelbild: © Jaroslav Moravcik / Shutterstock.com

Printed in Germany

UTB-Band-Nr.: 4401

ISBN: 978-3-8252-5526-8

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	9
1 Aspekte und Methoden der Erd- und Lebensgeschichte	11
1.1 Raum	11
1.2 Zeit	15
1.3 Archive der Erd- und Lebensgeschichte	20
2 Der Platz der Erde im Weltall	23
2.1 Die Entstehung des Kosmos und die Entwicklung des Weltalls	24
2.2 Die Entwicklung der Galaxien und der Sterne	25
2.3 Kernfusion, Supernovae und Sterne späterer Generationen	27
2.4 Stern- und Planetenentstehung am Beispiel der Sonne	29
Präkambrium: 4.56 bis 0.54 Milliarden Jahre	36
3 Hadaikum: 4.56 bis 4 Milliarden Jahre	37
3.1 Die frühe Phase der Erde und die Entstehung des Mondes .	37
3.2 Die Bildung von Kruste, Atmosphäre und Hydrosphäre	39
3.3 Das Klima auf der jungen Erde	45
3.4 Die Entstehung des Lebens	46
3.5 Die Entwicklung der Stoffwechselwege	49
4 Archaikum: 4 bis 2.5 Milliarden Jahre	53
4.1 Die Bildung der alten Kratone	55
4.2 Sedimente im Archaikum	60
4.3 Das Klima im Archaikum	63
4.4 Älteste Lebensreste	65
5 Proterozoikum: 2.5 bis 0.54 Milliarden Jahre	67
5.1 Das Wachstum der Kontinente	67
5.2 Sedimentgesteine	70
5.3 Das Klima im Proterozoikum	73
5.4 Der Sauerstoffgehalt der Atmosphäre im Proterozoikum ...	76
5.5 Die Entwicklung des Lebens	77

Phanerozoikum	84
Paläozoikum	84
6 Kambrium: ~ 542 bis 488 Millionen Jahre	85
6.1 Paläogeographie und Geotektonik	85
6.2 Meeresspiegelentwicklung, Klima und Atmosphäre	87
6.3 Kambrische Ablagerungsbereiche	89
6.4 Die Entstehung der Hartteile und die Kambrische Explosion	90
6.5 Die Entwicklung der Organismen im Kambrium	94
6.6 Berühmte Fossilagerstätten	102
7 Ordovizium: ~ 488 bis 444 Millionen Jahre	105
7.1 Paläogeographie und Geotektonik	105
7.2 Meeresspiegelentwicklung, Klima und Atmosphäre	107
7.3 Ordovizische Ablagerungsbereiche	109
7.4 Die Entwicklung der Organismen im Ordovizium	111
7.5 Das Massenaussterben am Ende des Ordoviziums	121
8 Silur: 444 bis 417 Millionen Jahre	123
8.1 Paläogeographie und Geotektonik	123
8.2 Meeresspiegelentwicklung, Klima und Atmosphäre	125
8.3 Silurische Ablagerungsbereiche	126
8.4 Die Entwicklung der Organismen im Silur	130
8.5 Die Besiedlung der Festländer	137
9 Devon: 417 bis 359 Millionen Jahre	139
9.1 Paläogeographie und Geotektonik	139
9.2 Meeresspiegelentwicklung, Klima und Atmosphäre	144
9.3 Devonische Ablagerungsbereiche	145
9.4 Die Entwicklung der Organismen	149
9.5 Das Leben auf dem Festland	158
9.6 Das enddevonische Massenaussterben	164

10	Karbon: ~ 359 bis 296 Millionen Jahre	167
10.1	Paläogeographie und Geotektonik	168
10.2	Meeresspiegelentwicklung, Klima und Atmosphäre	169
10.3	Karbonische Ablagerungsbereiche	171
10.4	Kohlebildung	174
10.5	Die Entwicklung der Organismen	175
10.6	Das Leben auf dem Festland	182
11	Perm: 296 bis 251 Millionen Jahre	191
11.1	Paläogeographie und Geotektonik	191
11.2	Meeresspiegelentwicklung, Klima und Atmosphäre	193
11.3	Permische Ablagerungsbereiche	194
11.4	Die Entwicklung der Organismen	197
11.5	Das Leben auf dem Festland	203
11.6	Das Massenaussterben am Ende des Perms	208
	Mesozoikum	212
12	Trias: ~ 251 bis 200 Millionen Jahre	213
12.1	Paläogeographie und Geotektonik	213
12.2	Meeresspiegelentwicklung, Klima und Atmosphäre	215
12.3	Ablagerungsbereiche in der Trias	216
12.4	Die Entwicklung der Organismen	221
12.5	Das Leben auf dem Festland	229
12.6	Das Massenaussterben am Ende der Trias	236
13	Jura: ~200 bis 142 Millionen Jahre	239
13.1	Paläogeographie und Geotektonik	239
13.2	Meeresspiegelentwicklung, Klima und Atmosphäre	241
13.3	Ablagerungsbereiche im Jura	243
13.4	Die Entwicklung der Organismen	249
13.5	Das Leben auf dem Festland	258

14	Kreide: ~ 142 bis 66 Millionen Jahre	267
14.1	Paläogeographie und Geotektonik	267
14.2	Meeresspiegelentwicklung, Klima und Atmosphäre	270
14.3	Ablagerungsbereiche in der Kreide	272
14.4	Die Entwicklung der Organismen	277
14.5	Das Leben auf dem Festland	287
14.6	Das Massenaussterben am Ende der Kreide	294
	Känozoikum	298
15	Tertiär (Paläogen und Neogen): 66 bis 2.6 Millionen Jahre ...	299
15.1	Paläogeographie und Geotektonik	301
15.2	Meeresspiegelentwicklung, Klima und Atmosphäre	302
15.3	Ablagerungsbereiche des Tertiärs	305
15.4	Die Entwicklung der Organismen	312
15.5	Das Leben auf dem Festland	318
16	Quartär: 2.6 Millionen Jahre bis heute	333
16.1	Paläogeographie und Geotektonik	333
16.2	Klima, Meeresspiegelentwicklung und Atmosphäre	334
16.3	Die Entwicklung der Organismen	345
16.4	Das Leben auf dem Festland	347
16.5	Die Entstehung des Menschen	351
17	Ausblick: Welche Entwicklung nimmt unsere Erde?	362
17.1	Mögliche Szenarien der Klimaentwicklung während der nächsten 1000 bis 100 000 Jahre	364
17.2	Plattentektonische Entwicklung	365
17.3	Langzeittrends des Klimas und der Evolution	367
18	Glossar	369
19	Literatur	372
20	Register	380

Vorwort

Die Erd- und Lebensgeschichte erstreckt sich über 4.5 Mia. Jahre und beinhaltet die Fülle an Erkenntnissen, die Geowissenschaftler seit mehr als 200 Jahren zusammengetragen haben. Diese Erkenntnisse alle in einem Buch unterzubringen, ist unmöglich. Das Ziel dieses Buches ist daher bescheidener; nämlich einen zusammenfassenden Überblick über die wesentlichen Aspekte und Prozesse der Erdgeschichte zu geben. Es soll ein plausibles Bild darüber vermitteln, wie unsere Erde entstanden und ihre Entwicklung verlaufen ist und wie dabei eine immer komplexere Organismenwelt entstanden ist. Die Geschichte beginnt zunächst mit abiotischen (physikalischen und chemischen) Prozessen, die zur Bildung der Geosphäre (Erdkern, Mantel und Kruste), Hydrosphäre und Atmosphäre führten. Erst später kamen Organismen und damit die Biosphäre dazu. Die abiotischen und biotischen Prozesse entwickeln sich seither in enger gegenseitiger Beeinflussung. Die Erd- und Lebensgeschichte sind folglich geprägt von permanenten Umwälzungen und Neuerungen, aber auch von massiven Störungen, Krisen und Katastrophen, die mehrmals zu Massenaussterben geführt haben.

Es gibt bereits einige Lehrbücher zur Erd- und Lebensgeschichte. Wozu also noch ein weiteres? Grund dafür ist, dass bei den meisten Büchern primär die Erdgeschichte im Vordergrund steht. Mein Blickwinkel liegt stärker auf der Seite der Biosphäre und ihrer Entwicklung durch die Zeit. Eine reine Erdgeschichte könnte auch anhand von Fallbeispielen wie Plattenwanderungen, Gebirgsbildung, Füllung von sedimentären Becken usw. konzipiert werden. Eine strenge Orientierung an der zeitlichen Entwicklung ist dabei nicht unbedingt notwendig. Sobald aber die Lebensgeschichte Thema ist, wird die Bindung an den Zeitstrahl jedoch zwingend, woraus sich zwangsläufig die Gliederung des Buches ergibt.

Der Grundstock für dieses Buch bestand in den Vorlesungsunterlagen zur gleichnamigen Vorlesung, die ich 1989 zum ersten Mal gehalten und im Laufe der Zeit erweitert und aktualisiert habe. Damit wird auch der Kreis, den ich mit diesem Buch ansprechen möchte, deutlich: Es ist als Unterstützung für Studierende der Geowissenschaften im Bachelor- und Masterstudium gedacht. Möglicherweise ist es auch für Lehrende hilfreich und für interessierte Laien attraktiv. Die Arbeit an diesem Buch bestand für mich aus zwei Herausforderungen: zum einen

in der Darstellung von Themenfeldern, die außerhalb der eigenen Kernkompetenz liegen, und zum anderen in der Komprimierung der Themenfelder, mit denen ich mich über Jahrzehnte intensiv beschäftigt habe. Ich hoffe, dass ich beiden Herausforderungen einigermaßen gerecht werden konnte.

Abbildungen zu dem Buch wurden dankenswerterweise von Frau Dr. Susanne Feist-Burkhardt, Stefan Rümmele, Frau Dr. Annette Schmid-Röhl und Dr. Armin Zeh zur Verfügung gestellt; Andreas Baumeler hat einige neu gezeichnet. Mit vielen Frankfurter Kollegen und Kolleginnen, vor allem Joachim Blau, Wolfgang Dörr, Jens Fiebig, Eberhard Gischler, Jörg Pross (jetzt Heidelberg), Rainer Petschick und Silke Voigt konnte ich stimulierende Diskussionen führen. Priv. Doz. Dr. Joachim Blau hat das Manuskript gelesen und sehr wertvolle Hinweise gegeben. Frau Stefanie Raulfs hat dank ihrer minutiösen Lektüre dazu beigetragen, zahlreiche Fehler aus früheren Auflagen zu eliminieren. Zuletzt möchte ich mich aber vor allem auch bei meiner Frau Christine bedanken, die auf viele Wochenenden verzichtet hat, die für die Arbeit an diesem Buch notwendig waren.

Aspekte und Methoden der Erd- und Lebensgeschichte

| 1

Inhalt

1.1 Raum

1.2 Zeit

1.3 Archive der Erd- und Lebensgeschichte

Die Geowissenschaften, und dabei besonders die Geologie und die Paläontologie, liegen im Schnittpunkt zwischen den Naturwissenschaften und den historischen Wissenschaften. Die räumliche Dimension erfasst dabei den ganzen Planeten Erde und seine Umgebung im Sonnensystem. Der zeitliche Rahmen von der Entstehung unseres Sonnensystems mit der Erde bis hin zur Gegenwart beträgt etwa 4.6 Mia. Jahre. Da die Entstehung des Planetensystems nicht ohne die Entwicklung des Kosmos abgelaufen sein kann, muss der zeitliche Rahmen sogar auf 13.7 Mia. Jahre, dem Alter des Weltalls, gespannt werden.

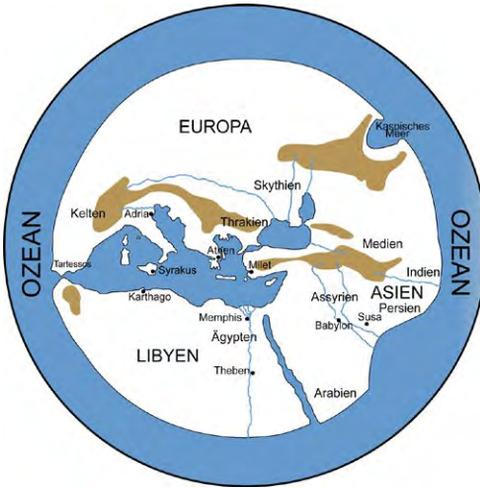
Raum

| 1.1

Es dauerte mehrere 1000 Jahre, bis die Menschheit sich der räumlichen Dimension unserer Erde klar wurde und ihre Geographie im Detail erfasste. Bereits im 6. Jahrhundert vor unserer Zeitrechnung entwarf der griechische Philosoph Anaximander eine Karte seiner damals bekannten Welt; sie wurde später von den Geschichtsschreibern Hekataios von Milet und Herodot erweitert und umfasste «erst» den Mittelmeerraum und angrenzende Gebiete (→ Abb. 1-1A). Eine ähnliche Karte entwarf auch Eratosthenes von Kyrene, ein griechischer Universalgelehrter, der etwa 200 Jahre später lebte. Seine herausragende Leistung war aber die erstaunlich genaue Berechnung des Erdumfangs, was logischerweise die Kenntnis der Kugelgestalt der Erde einschließt. Etwa um die gleiche Zeit postulierte der griechische Astronom Aristarch von Samos das heliozentrische Weltbild.

Abb. 1-1

A: Rekonstruktion der Weltkarten des Hekataios von Milet aus der griechischen Antike des 5. Jahrhunderts vor Christus mit der Darstellung der damals bekannten Welt. Sie gilt als eine der ältesten geographischen Karten. B: Die Karte des muslimischen Gelehrten Al-Idrisi, die er im 12. Jahrhundert für König Roger II von Sizilien fertigte. Gemäß der arabischen Tradition ist auf der Karte Süden oben.



Im Verhältnis zum Wissensstand der alten Griechen ist das Mittelalter als eine dunkle Epoche der Naturwissenschaften zu bezeichnen. Die Errungenschaften der griechischen Antike gerieten in Vergessenheit, die Erde wurde wieder zur Scheibe und in das Zentrum eines Sphärenmodells gerückt. Viele Karten des Hochmittelalters waren auf Jerusalem zentriert und hatten wenig Gemeinsamkeiten mit der realen Geographie. Zum Glück haben sich die Kenntnisse der Griechen in den islamischen Wissenschaftszentren Bagdad und Cordoba erhalten. Sie wurden dort auch weiterentwickelt und fanden schließlich wieder Eingang in das christliche Abendland, so etwa durch den Gelehrten Al-Idrisi, der im 12. Jahrhundert für König Roger II von Sizilien eine Karte der damals bekannten Welt fertigte. Auch sie zeigt «nur» Teile unserer Erde (→ Abb. 1-1B).

Der entscheidende Entwicklungsschub in der Kartographie fand schließlich mit dem Beginn der Neuzeit und der erneuten Hinwendung zu empirischen Naturbeobachtungen statt. Die Entdeckungsfahrten der Seefahrer ab dem 15. Jahrhundert hatten einen großen Anteil daran. So zeigt die Karte von Martin Waldseemüller (1507) gut erkennbar und detailreich die alte Welt, und auch das erst 1492 (wieder-)entdeckte

Amerika ist enthalten (→ Abb. 1-2). Von da an ging die Entwicklung rasch und stetig weiter bis zu unseren heutigen satellitengestützten Karten.

Ähnlich wie in der Geographie geht es auch in der **Paläogeographie** darum herauszufinden, wie die Land-Meer-Verteilung und die Anordnung der Kontinente auf der Erde in vergangenen Zeiten aussah. Bis in das 19. Jahrhundert ging man allgemein von starren, weitgehend unveränderlichen Kontinenten aus. Erst 1915 postulierte Alfred Wegener (1880–1930) die Kontinentaldrift in seinem Buch «Die Entstehung der Kontinente und Ozeane». Anhand der Küstenlinien von Südamerika, Afrika, der Antarktis, Indien und Australien sowie der Verbreitung bestimmter Pflanzen- und Reptilienarten aus dem Jungpaläozoikum rekonstruierte er den großen Südkontinent Gondwana und später auch Pangaea (→ Abb 1-3). Seine Theorie war lange umstritten und wurde erst in den 1960er-Jahren durch John Tuzo Wilson bestätigt und anerkannt. Im heute nach ihm benannten Wilson-Zyklus beschrieb er 1970 das plattentektonische Geschehen als **Rift-Phase** (Zerbrechen der Kontinente), **Spreading-Phase** (Wachstum der Ozeane durch aufdringendes Mantelmagma) und schließlich als **Subduktion** (Versinken der Ozeanplatten im Erdmantel). Erst dadurch wurde ein plausibles Modell für das Zusammenwachsen und Zerfallen von Kontinenten und

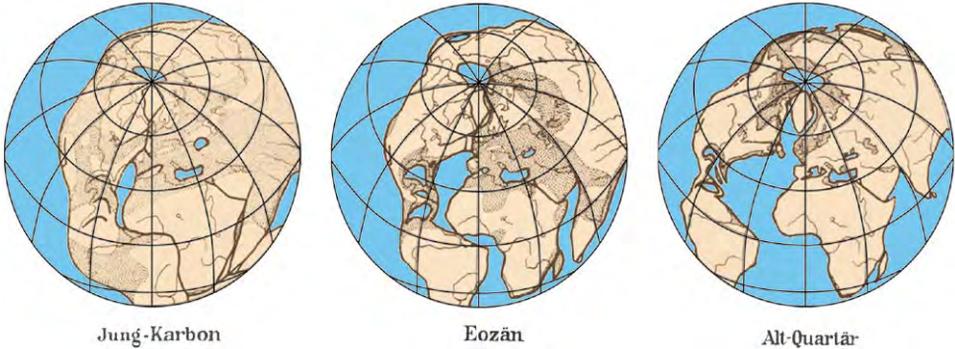
Die geographische Karte von Martin Waldseemüller (1507) zeigt die alte Welt, und auch das erst 1492 (wieder-)entdeckte Amerika ist bereits enthalten. Australien wurde hingegen erst 100 Jahre später entdeckt.

Abb. 1-2



Abb. 1-3

Alfred Wegener rekonstruierte 1920 den Superkontinent Pangaea anhand der heutigen Küstenlinien und der Verbreitung bestimmter Pflanzen und Reptilien aus dem Jungpaläozoikum. Auch der spätere Zerfall des Superkontinents ist dargestellt. Auch wenn einige Details und der zeitliche Verlauf nicht richtig sind, kommen Wegeners Vorstellungen den heutigen doch recht nahe (Wegener 1929).



ihre Drift über die Erdoberfläche gefunden. Im Zusammenhang mit der Paläoklimatologie erklärt dieses Modell auch, warum der Meeresspiegel im Verlauf der Erdgeschichte stark variiert. Durch die Detailarbeit von Geologen, Geophysikern und Paläontologen entstanden in der Folgezeit immer genauere paläogeographische Karten, die ein mittlerweile recht gutes Bild der Veränderungen durch die Erdgeschichte ergeben. Logischerweise wird die Unsicherheit der Darstellungen für weiter zurückliegende Zeiten zunehmend größer. Die Entwicklung ist aber keineswegs abgeschlossen: Durch Bohrungen an Land und im Ozean, durch Seismik, Geomagnetik und viele andere Methoden wird die Genauigkeit der rekonstruierten paläogeographischen Karten auch zukünftig weitere Fortschritte machen.

Zeit

| 1.2

In weiten Teilen der Welt wurde die Zeitvorstellung über das Alter unserer Erde durch die drei sogenannten Buchreligionen (Judentum, Christentum und Islam) geprägt, deren Schöpfungsgeschichten weitgehend ähnlich sind. Dabei wurde immer von einer relativ kurzen Zeitspanne (kleiner als 10 000 Jahre) vom Beginn der Schöpfung bis zur Gegenwart ausgegangen. Am deutlichsten wird das in der «Berechnung» des Schöpfungszeitpunkts durch James Ussher, der anglikanischer Bischof (1581–1656) in Irland war. Er setzte den 23. Oktober 4004 v. Chr. (einen Sonntag) als Anfangsdatum fest. Kurioserweise gibt es eine ähnliche Berechnung auch von Isaac Newton. «Datierungen» dieser Art werden noch heute von Kreationisten (creare = erschaffen) verwendet. Deren Anhänger sind hauptsächlich fundamentalistische Christen und Muslime sowie ultraorthodoxe Juden. Allen ist eine Ablehnung der biologischen Evolutionstheorie gemeinsam. Abgewandelte Formen des Kreationismus, wie die «intelligent design» Bewegung, geben sich zwar einen pseudowissenschaftlichen Anstrich, haben aber die gleiche Grundhaltung zur Evolutionstheorie: Biologische Arten werden als unveränderlich in der Zeit angesehen. In anderen Kulturen und Religionen wurde die Zeit oft als ein Rad (oder mehrere ineinandergreifende Räder) dargestellt, was lange und wiederkehrende Zeitperioden zulässt.

Auch hier waren die alten Griechen in ihren Ansichten bereits moderner. Die griechischen Philosophen Empedokles (4. Jh. v. Chr.) und Aristoteles (3. Jh. v. Chr.) postulierten bereits eine Veränderung der Flora und Fauna im Laufe der Zeit. Sie erkannten zumindest teilweise, dass Fossilien Spuren ehemaliger Lebewesen sind. Im Mittelalter wurden sie hingegen als absonderliche Dinge und Launen der Natur angesehen, die durch eine besondere Kraft geformt wurden. Erst der Zürcher Arzt und Naturforscher Conrad Gessner (1516–1565) beschrieb in seiner «*Historia animalum*» wieder Fossilien als ehemalige Lebewesen. Auch das stratigraphische Grundprinzip, nach dem bei normaler Lagerung jüngere Schichten über älteren liegen, wurde schon in der Frühen Neuzeit, von Nicolaus Steno (1638–1686), erkannt. William Smith (1769–1839) wiederum erkannte als Erster den Nutzen von Fossilien zur Altersbestimmung und erstellte 1799 mithilfe des Fossilvergleichs in verschiedenen Gesteinstypen gleichen Alters die erste geologische Karte von Südengland. In der Folge wurde von Leopold von Buch (1774–1853) das Leitfossilkonzept aufgestellt, welches besagt, dass bestimmte Fossilien für bestimmte Zeitabschnitte der Erdgeschichte charakteristisch sind. Es wurde von zahlreichen anderen

Forschern und für alle Zeitalter weiterentwickelt und immer detaillierter untergliedert. Leider erlaubte das Leitfossilienkonzept keinerlei Aussagen über die absoluten Alter der Gesteine. Dennoch waren bereits im 19. Jahrhundert viele Geologen und Paläontologen überzeugt, dass die Erde viele Millionen Jahre alt ist. Charles Lyell (1797–1875) etwa, ein britischer Geologe, postulierte sogar schon ein Alter von Milliarden Jahren. Ihm widersprach jedoch Lord Kelvin (1824–1907), der eine Berechnung zur Abkühlungsdauer der glutflüssigen Erde vornahm und auf ein Erdalter von maximal 24 Mio. Jahren kam. Das Problem war, dass weder Lyell noch Kelvin eine verlässliche Methode zur Hand hatten, um ihre widersprüchlichen Angaben zu beweisen. Erst mit der Entdeckung der Radioaktivität durch den französischen Physiker Antoine Henri Becquerel im Jahr 1896 stand eine Methode zur absoluten Zeitbestimmung zur Verfügung. Ein erste Berechnung auf dieser Basis nahm der englische Geologe Arthur Holmes 1913 mit einer Radioisotopenmessung der Uran-Blei-Zerfallsreihe vor und datierte den Beginn des Kambriums auf etwa 600 Mio. Jahre. Damit lag er schon nahe am heutigen Wert von 542 Mio. Jahren. Der Fehlerbereich war allerdings noch recht hoch, und es dauerte noch etliche Jahrzehnte, bis man in der Lage war, reproduzierbare Werte mit kleinen Fehlerbereichen zu berechnen. Heute weiß man, dass die ältesten uns bekannten Gesteine auf der Erde 4 Mia. Jahre alt sind, und die ältesten Zirkonminerale 4.4 Mia. Jahre alt.

Neben den radiogenen Isotopenmessungen zur Altersbestimmung (**Geochronologie**), die nicht an allen Gesteinen durchführbar sind, werden heute eine Reihe weiterer Methoden zur Altersbestimmung verwendet. Die **Biostratigraphie** ist die bis heute am weitesten verbreitete Methode in Sedimentgesteinen. Hierbei wurden früher vor allem Makrofossilgruppen verwendet. Inzwischen werden sehr häufig Mikrofossilgruppen (z. B. Phyto- und Zooplankton, Pollen und Sporen) zur relativen Altersbestimmung genutzt. Weitere hilfreiche Methoden für die jüngere Erdgeschichte sind die **Paläomagnetik**, **Event-**, **Sequenz-**, **Chemo-** und **Zyklostratigraphie** (→ Box 1-1). Ziel dieser meist kombiniert verwendeten Methoden ist es, ein verbindliches, zeitliches Bezugssystem zu erstellen (→ vorderer und hinterer Buchumschlag).

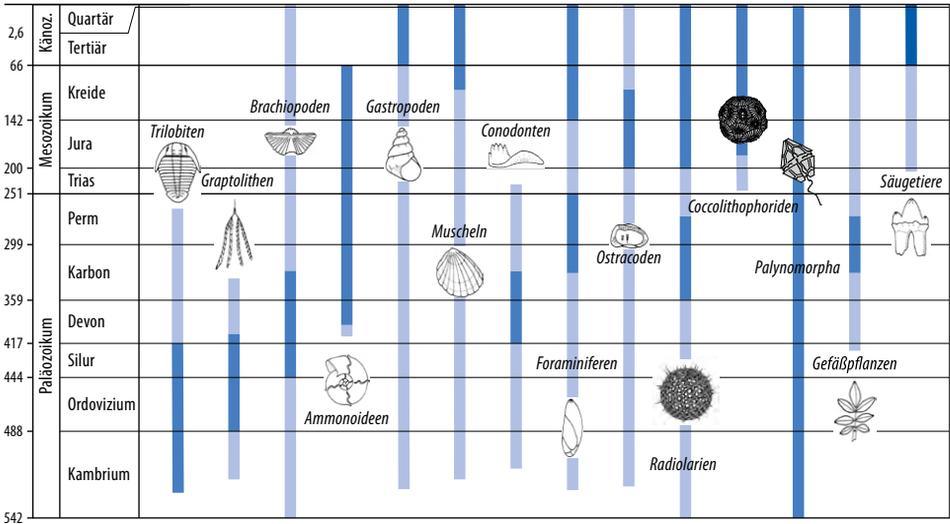
Box 1.1

Stratigraphische Methoden

Gebräuchliche **Stratigraphische Methoden** und ihre Anwendungsbereiche sind die **Lithostratigraphie**, die nur nach Gesteinsmerkmalen gliedert. Diese Methode ist faziesabhängig und hat ihre wesentliche Bedeutung in der Darstellung von

Verschiedene Leitfossilgruppen durch die Erdgeschichte. Die dicken Linien geben den Zeitbereich an, in dem die Fossilgruppen wichtige Leitfossilien stellen (modifiziert nach Ziegler 1972).

Abb. 1-4



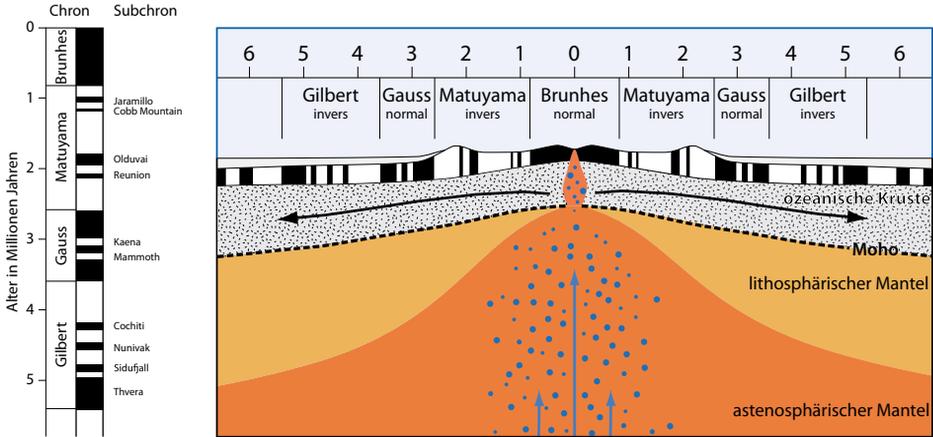
Gesteinseinheiten in geologischen Karten. Zur zeitlichen Gliederung findet sie vor allem Verwendung in fossilarmen bis fossilfreien Sedimenten eines regionalen Ablagerungsbereiches.

Die **Biostratigraphie** gliedert nach dem Fossilinhalt (→ Abb. 1-4) mithilfe von **Leitfossilien**. Dazu sind nicht alle Fossilien gleichermaßen geeignet. In den verschiedenen Abschnitten der Erdgeschichte werden verschiedene Leitfossilien verwendet. Die Biostratigraphie ist im Wesentlichen auf das Phanerozoikum, also den Zeitraum vom Kambrium bis heute beschränkt. Leitfossilien sind im Idealfall fazies-unabhängig und überregional bis global verbreitet. Die damit ermittelten Altersbeziehungen sind z. T. sehr genau, geben aber nur das Relativalter an. Kriterien für gute Leitfossilien sind eine **weite Verbreitung**, die eine möglichst weite Korrelation erlaubt (z. B. Plankton im Meer, Pollen an Land), eine **große Häufigkeit**, die den Nachweis der Fossilien einfach macht (z. B. Plankton), eine **große Merkmalsvielfalt**, die eine gute Unterscheidbarkeit erlaubt (z. B. Ammoniten), sowie eine rasche **evolutive Merkmalsänderung**, wodurch eine gute zeitliche Auflösung möglich ist. In der Praxis sind selten alle Kriterien optimal erfüllt.

Die **Magnetostratigraphie** benutzt die Umpolungen des irdischen Magnetfelds zur Altersbestimmung. Die Ursachen der Umpolung liegen wahrscheinlich an Änderungen der Konvektionsströmungen im Inneren der Erde. Sie wurden erstmalig von Bernhard Brunhes, einem französischen Geophysiker, 1905 nachgewiesen. Seit

Abb. 1-5

Die geomagnetische Polarität der letzten 5 Mio. Jahre. Die normale Polarität ist schwarz, die inverse Polarität weiß angegeben (modifiziert nach United States Geological Survey).



den 1960er-Jahren wurden die Umpolungen in den Basalten der mittelozeanischen Rücken detailliert untersucht (→ Abb. 1-5). Für das Känozoikum sind 34 Umpolungen bekannt, für das Mesozoikum 41; die älteste stammt aus dem mittleren Jura. Das liegt daran, dass es auf der Erde keine älteren Ozeanböden gibt, da alte Ozeanplatten kalt und schwer werden und durch Subduktion in den Erdmantel zurücksinken.

Auf dem Zerfall radioaktiver Elemente beruht die Datierung der **Geochronologie**. Sie ist eine absolute Datierungsmethode auf der Basis des Zerfalls eines radioaktiven Elements in ein stabiles (z. B. von ^{14}C Kohlenstoff in ^{14}N Stickstoff) oder auf der Basis von Zerfallsreihen, bei denen ein radioaktives Element wieder in ein radioaktives Tochterelement zerfällt und so möglicherweise viele Zwischenschritte durchläuft, bevor am Ende der Zerfallskette ein stabiles Element entsteht (z. B. die ^{238}U Uran- ^{206}Pb Blei-Zerfallsreihe). Bei den vielen Zwischenschritten kommen sowohl α -Zerfälle (d.h. Abgabe eines Heliumkerns) als auch β^- Zerfälle (Zerfall eines Neutrons in je ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino) vor. Grundlage der Datierung ist die Dauer des Zerfalls einer bestimmten Ausgangsmasse eines radioaktiven Elements. Sie wird definiert durch die Halbwertszeit, d.h. der Zeit, nach der die Hälfte einer Ausgangsmasse zerfallen ist. Bei bekannten Zerfallsreihen mit bekannten Halbwertszeiten kann aus dem Verhältnis von Ausgangselement zu Tochterelement das Alter bestimmt werden (→ Abb. 1-6). Die damit erzielten Alter sind sogenannte Absolutalter und, abhängig von der Methode, z. T. sehr genau. Zur Datierung eignen sich aber nur Gesteine, in denen die radiogenen Isotope ausreichend vorhanden sind (z. B. Vulkanaschenlagen für Uran und Thorium oder Kalk bzw. organische Substanz für ^{14}C).

Die **Eventstratigraphie** gliedert mithilfe besonderer Ereignisse (englisch: events), die im Gesteinsverband ablesbar sind. In der Regel handelt es sich um Katastrophen, (z. B. Vulkanausbrüche, Impaktereignisse, Massenaussterben etc.). Bei Vulkanausbrüchen und Impaktereignissen können geochronologisch auch Absolutalter bestimmt werden.

In der **Sequenzstratigraphie** werden aus dem Gesteinsverband charakteristische Abschnitte (Sequenzen) identifiziert, die durch bestimmte Meeresspiegelstände (Regressionen oder Transgressionen) erzeugt wurden. Die Gliederung erfolgt dabei meist mithilfe von seismischen Profilen, auf denen progradierende und retrogradierende Sedimentationseinheiten erkennbar sind.

Schwankungen der Erdbahnparameter werden in der **Zyklostratigraphie** genutzt. Die nach dem serbischen Mathematiker Milutin Milanković (1879–1958) benannten Milanković-Zyklen verursachen Schwankungen in der Strahlungsintensität der Sonne. Durch sich überlagernde Zyklen der Präzession (einer Kreisbewegung der Erde mit 21 000 Jahren Dauer), der Obliquität (der Variation in der Schrägstellung der Erdachse, die im 41 000-Jahre-Zyklus zwischen 22.1° und 24.5° schwankt) und der Exzentrizität (bei der in einem 100 000-Jahre-Zyklus die Erdbahn zwischen geringer und stärker elliptisch variiert) können sich die Primärproduktion, der Eintrag klastischer Sedimente und andere Sedimentcharakteristika verändern (→ Abb. 16-3).

Die Zyklostratigraphie zeigt methodisch einen fließenden Übergang zur **Chemostratigraphie**, bei der die Gliederung bestimmter Gesteine anhand chemischer Sig-

Das stratigraphische System gliedert hierarchisch entweder nach abstrakten zeitlichen Abschnitten (Geochronologie), oder nach Gesteinsabfolgen (Lithostratigraphie), wenn nur die Gesteinsmerkmale Verwendung finden. Die Chronostratigraphie kombiniert alle stratigraphischen Informationen. Je nach Gliederungsmethode werden dabei verschiedene Begriffe verwendet, die sich aber entsprechen.

Abb. 1-6

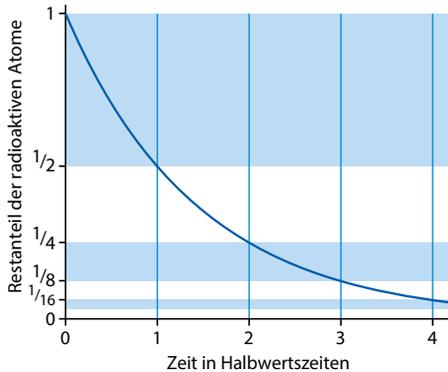
Geochronologie	Chronostratigraphie	Lithostratigraphie	Beispiel
Äon	Äonothem		Phanerozoikum
Ära	Ärathem		Paläozoikum
Periode	System	Abteilung	Devon
Epoche	Serie	Gruppe	Ober-Devon
Alter	Stufe	Formation	Frasium
Chron	Zone	Glied (member)	gigas-Zone
		Schicht (Horizont)	Unterer Kellwasserkalk

Die zeitliche Reichweite chronostratigraphischer Einheiten beträgt dabei etwa:

Äonothem (100er-Mio. Jahre)	Ärathem (10er–100er- Mio. Jahre)	System (10er Mio. Jahre)	Serie (Millionen Jahre)	Stufe (Millionen Jahre)	Zone (> 500 000 Jahre)
-----------------------------------	--	--------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	------------------------------

Abb. 1-7

Die Menge einer radioaktiven Substanz nimmt mit der Zeit exponentiell ab. Wenn die Hälfte der Ausgangsmasse zerfallen ist, spricht man von der Halbwertszeit (modifiziert nach Stanley 2001). Links: Nach zwei- oder dreimaligem Durchlauf der Halbwertszeit reduziert sich die Ausgangsmasse auf ein Viertel bzw. ein Achtel der Ausgangsmasse. Rechts: Die Halbwertszeiten einiger radioaktiver Elemente, die zur Datierung verwendet werden.



Radioaktives Isotop	Halbwertszeit (Jahre)	Zerfallsprodukt
87 Rubidium	48,6 Milliarden	87 Stontium
232 Thorium	13,9 Milliarden	208 Blei
238 Uran	4,5 Milliarden	206 Blei
40 Kalium	1,3 Milliarden	40 Argon
235 Uran	700 Millionen	207 Blei
234 Uran	250 000	230 Thorium
14 Kohlenstoff	5720	14 Stickstoff

nale vorgenommen wird. Die chemischen Signale können Spurenelementanteile, charakteristische Verhältnisse stabiler Isotope (z. B. $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$) oder der Gehalt an organischem Kohlenstoff sein.

1.3 | Archive der Erd- und Lebensgeschichte

Das wesentliche Datenarchiv, das Geowissenschaftlern als Informationsquelle zur Verfügung steht, sind die Gesteine. Für die jüngste Erdgeschichte sind auch die kontinentalen Eisschilde mit eingeschlossenen Gasbläschen verfügbar, aus denen die Zusammensetzung der Atmosphäre zur Zeit der Eisbildung erkennbar ist. Direkte Informationen über die Atmosphäre, Ozeane und Biosphäre sind aber in der Regel nicht zugänglich. Doch auch aus den Gesteinen (Lithosphäre) können Informationen darüber gewonnen werden. Die Sedimentgesteine geben uns Informationen über Verwitterungsprozesse, Transport und Ablagerung. Aus der Art der Ablagerungen können Geowissenschaftler das Klima und die ozeanographischen Rahmenbedingungen verschiedener Zeiten rekonstruieren (Paläoklimatologie und Paläoozeanographie). Aus dem Fossilinhalt (Körperfossilien, Spurenfossilien und Chemofossilien) kann auf die oft komplex vernetzte Biosphäre und ihre Veränderungen durch die Zeit geschlossen werden (Paläoökologie und

Evolution). Spurenelementuntersuchungen und die Analysen stabiler Isotopenverhältnisse in Gesteinen und Fossilien erlauben Rückschlüsse auf Temperatur und Salinität im Ozean und z. T. auch auf die Treibhausgasanteile in der Atmosphäre. Zur Rekonstruktion der Verhältnisse in Raum und Zeit ist die gedankliche Umsetzung der Beobachtungen an den Gesteinen durch Kombination und Abstraktion notwendig. Dazu einige Beispiele: *Klastische Sedimente* erlauben anhand ihrer Korngrößen Rückschlüsse auf die Wasserenergie bei der Ablagerung, Tone repräsentieren niedrige, Sand und Kiese hohe bis sehr hohe Wasserenergien. Reiche *Fossilgehalte* treten normalerweise im Flachwasser der Schelfbereiche auf. *Kohle* entsteht über Torf aus Wäldern und belegt somit eine üppige Vegetation und ein humides Klima. *Gipse, Chloride* (z. T. auch *Dolomite*) sind Eindampfungsgesteine, die teilweise oder ganz abgeschnürte Wasserbecken (Seen oder Nebenmeere) unter dem Einfluss eines ariden Klimas belegen.

Auch die endogenen Prozesse sind an den Gesteinsmerkmalen ablesbar. So sind etwa Gesteinsdeformation, Kompaktion, Faltung, Störungen und Diskordanzen durch Bewegungen der Erdkruste entstanden, oft im Zusammenhang mit Gebirgsbildungen und durch die Plattentektonik. Damit gehen in der Regel auch Gesteinsumwandlungen durch Lösung und Rekristallisation während der Diagenese und Metamorphose einher. Magmenbildung findet überwiegend an den Plattenrändern statt. An den ozeanischen Rücken dringt Magma aus dem oberen Mantel auf, an den Subduktionszonen kommt es durch Auspressung von Wasser aus der abtauchenden Platte zur partiellen Aufschmelzung und ebenfalls zum Magmenaufstieg. Petrologen können aus den Mineralparagenesen die Temperatur und Druckentwicklung bei der Metamorphose bzw. den Magmenaufstieg und die Erstarrungsgeschwindigkeit rekonstruieren. Magmenaufstieg findet auch an den sogenannten Plumes statt, an denen sehr heißes Magma aus dem tiefen Erdmantel aufsteigt. Aus der Erdgeschichte sind Plumes als riesige Flutbasaltareale bekannt und häufig mit Katastrophen und Massenaussterben verbunden. Die Sibirischen Flutbasalte etwa treten an der Perm/Trias-Grenze auf, die Zentralatlantische Magmenprovinz an der Trias/Jura-Grenze und die Dekkan-Trapp Flutbasalte in Indien an der Kreide/Paläogen-Grenze. Auch extraterrestrische Ereignisse prägen die Erd- und Lebensgeschichte. Mehrere Massenaussterbeereignisse lassen Hinweise auf den Einschlag eines oder mehrerer Asteroiden oder Kometen erkennen. Am bekanntesten ist der Chicxulub-Krater in Yukatan (Südmexiko) mit einem Durchmesser von etwa 200 km, der an der Kreide/Paläogen-Grenze durch den Einschlag eines etwa 10–15 km großen Einschlagskörpers entstanden ist.

Diese kurze Auflistung zeigt, dass Informationen aus allen geowissenschaftlichen Teilbereichen zusammengetragen werden müssen, um die Geschichte unseres Planeten zu rekonstruieren.

Weiterführende Literatur

- Blakey, R.: <http://cpgeosystems.com/paleomaps.html>; Northern Arizona University; Paläogeographische Karten
- Boardman, R.S., Cheetham, A.H. & Rowell, A.J. (1987): Fossil invertebrates. - 713 S.; Oxford (Blackwell).
- de Boer, P. L. & Smith, D. G. (1994, eds.): *Orbital Forcing and Cyclic Sequences*. Blackwell 559 pp.
- Clarkson, E.N.K. (1998): *Invertebrate palaeontology and evolution*. 452 S., Blackwell; London.
- Deutsche Stratigraphische Kommission (2012): *Stratigraphische Tabelle von Deutschland*.
- Gradstein, F. M., Ogg, J. G. & Hilgen, F. J. (2012): On the geological time scale. - *Newsletters on Stratigraphy* 45: 171–188.
- Gradstein, F. M., Ogg, J. G., Schmitz, M. & Ogg, G. (2012): *The Geologic Time Scale*. - Vol. 1 & 2, Elsevier 1176 pp.
- Miall, A. D. (1997): *The geology of Stratigraphic sequences*. - 433 pp; Springer.
- Posamentier, H. W., Summerhayes, C. P., Haq, B. U., George P. & Allen, G. P. (1993, eds.): *Sequence Stratigraphy and Facies Associations*. - Special Publication 18: International Association of Sedimentologists. Blackwell 644 pp.
- Wegener, A. (1929): *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane*. - Vieweg, Braunschweig 1915, 1929; Borntraeger, Berlin 2005 (Repr. d. 4. Aufl.).
- Ziegler, B. (1972): *Allgemeine Paläontologie*. - 248 S. Schweizerbart; Stuttgart.
- Ziegler, B. (1983): *Einführung in die Paläontologie I*. - 408 S., Schweizerbart; Stuttgart.
- Ziegler, B. (1998): *Spezielle Paläontologie II*. - 666 S. Schweizerbart; Stuttgart.

Der Platz der Erde im Weltall

2

Inhalt

-
- 2.1 Die Entstehung des Kosmos und die Entwicklung des Weltalls

 - 2.2 Die Entwicklung der Galaxien und der Sterne

 - 2.3 Kernfusion, Supernovae und Sterne späterer Generationen

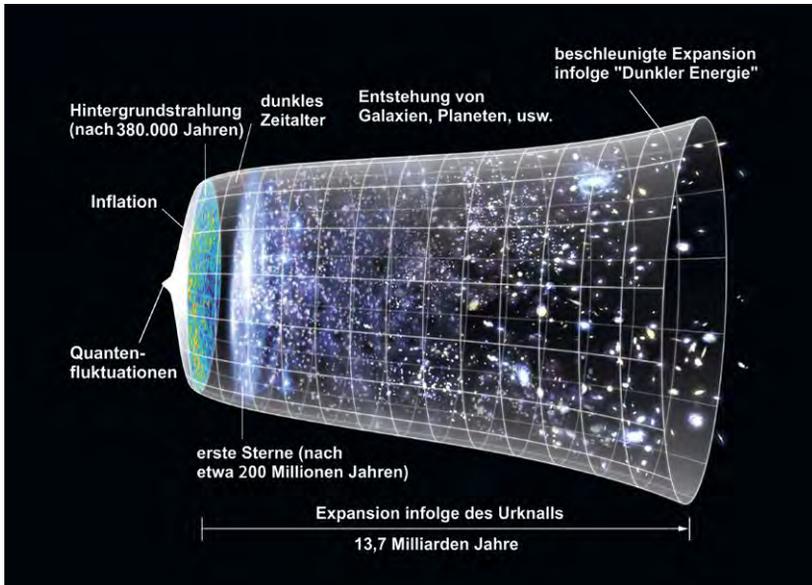
 - 2.4 Stern- und Planetenentstehung am Beispiel der Sonne

Nach der derzeitigen Vorstellung ist unser Kosmos und damit Materie, Raum und Zeit vor etwa 13.7 Mia. Jahren aus einer nicht definierbaren Singularität entstanden. Diese Theorie wurde 1927 vom belgischen Astronomen Lemaitre aufgestellt und wird heute oft als Urknall- oder «Big Bang»-Theorie bezeichnet. Die Bedingungen zur Zeit des «Big Bang» werden deshalb als Singularität bezeichnet, weil es in der heutigen Physik keine Theorie gibt, die den Zustand des Universums am Anfang beschreiben kann. Lemaitre und der amerikanische Astronom Edwin Hubble leiteten aus der bereits 1912 gemessenen Rotverschiebung die Ausdehnung der Raumzeit ab, die sich in immer größeren Fluchtgeschwindigkeiten weit entfernter Galaxien zeigt. Sie wird allgemein als Expansion des Weltalls bezeichnet. Das sich ausdehnende Weltall kühlte sich ab und bildete nach etwa 380 000 Jahren neutralen Wasserstoff und Helium, dadurch wurde der Kosmos «durchsichtig», was die Ausbreitung von Strahlung ermöglichte. Von da an konnte der «Nachklang» des Big Bang das gesamte Weltall erfüllen und ist noch heute in der kosmischen Hintergrundstrahlung (3K-Strahlung) in allen Raumrichtungen messbar. Durch die enorme Ausdehnung der Raumzeit ist die ursprünglich sehr heiße Strahlung auf heute etwa 3 K ($\approx -270^\circ\text{C}$) abgekühlt. Nach neuen Untersuchungen zeigt die kosmische Hintergrundstrahlung eine heterogene Verteilung. Daraus wird das Alter des Universums auf etwa 13.7 Mia. Jahre abgeleitet und vermutet, dass es eine euklidische räumliche Geometrie aufweist. Seine heutige Zusammensetzung besteht mutmaßlich aus 5% konventioneller Materie, 25% dunkler Materie und 70% dunkler Energie.

2.1 | Die Entstehung des Kosmos und die Entwicklung des Weltalls

Mit dem Big Bang entstand die Raumzeit. Bei ihrem Beginn waren die vier heute getrennten Grundkräfte noch vereint; dieser Abschnitt der Kosmologie wird nach dem deutschen Physiker Max Planck (1858–1947) als **Planck-Ära** bezeichnet. Nahezu unmittelbar nach der Entstehung kam es zur «Inflation», einer plötzlichen gewaltigen Aufblähung des Weltalls mit «Überlichtgeschwindigkeit» um mindestens den Faktor 10^{30} . Mit zunehmender Ausdehnung der Raumzeit und mit abnehmender Energiedichte und Temperatur trennten sich in der Anfangsphase des Kosmos, noch bevor er «durchsichtig» wurde, nacheinander die vier Grundkräfte, und es entstanden die **Eichbosonen (Wechselwirkungsteilchen)** und **Fermionen (Materieteilchen)**. Zu den Eichbosonen gehört das hypothetische **Graviton**, welches mutmaßlich die Ursache der Schwerkraft ist, die **Gluonen** für die starke Kraft, **W- und Z-Bosonen** für die schwache Kraft und **Photonen** für die elektromagnetische Kraft. Bei den Materieteilchen entstanden die **Quarks**, die sich später zu **Hadronen** (z. B. **Protonen** und **Neutronen**) zusammenfügten, und **Leptonen**

Abb. 2-1 | Graphische Darstellung der Entwicklung des Kosmos seit dem Urknall in Abhängigkeit von Zeit, Raum, Temperatur und Energie (NASA).



(z. B. Elektronen und Neutrinos). Dieser Abschnitt der Kosmosentwicklung war nach wenigen Sekunden abgeschlossen. In den nächsten drei Minuten wurden die ersten Elemente (Wasserstoff, Helium und Spuren von Lithium) während der **primordialen Nukleosynthese** gebildet. Die Temperatur des Kosmos betrug zu diesem Zeitpunkt noch 10^9 °C, alle Materie lag somit als Plasma vor. Durch die Ausdehnung der Raumzeit kühlte das Weltall ab und etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall bildeten sich neutrale Atome, wodurch das Weltall lichtdurchlässig wurde. Damit begann das sogenannte «dunkle Zeitalter»; dunkel, weil es noch keine Sterne als selbst leuchtende Himmelskörper gab.

Die Entwicklung der Galaxien und der Sterne

| 2.2

Bereits 200–400 Mio. Jahre nach dem Urknall entstanden die ersten Sterne und bald darauf auch die ersten Galaxien und Galaxienhaufen (→ Abb. 2-1). Die Zusammenballung von Sternen und Galaxien wird mit kleinen Inhomogenitäten beim Urknall erklärt, die sich im Laufe der Zeit durch die Wirkung der Gravitation verstärkt haben. Hierbei wird

Die Andromedagalaxie (links) ist die uns nächstgelegene große Spiralgalaxie in 2,5 Mio. Lichtjahren Entfernung. Sie besitzt die Masse von etwa 800 Milliarden Sonnen und erstreckt sich am Nachthimmel als nebliger Fleck über fünf Vollmonddurchmesser. Die ganze Ausdehnung ist aber nur in großen Teleskopen erkennbar. Rechts: Zahlreiche weit entfernte Galaxien und schwach leuchtende Sterne unserer Milchstraße. Das Bild rechts zeigt eine stark vergrößerte, sehr weit entfernte Galaxiengruppe (NASA, ESA).

| Abb. 2-2



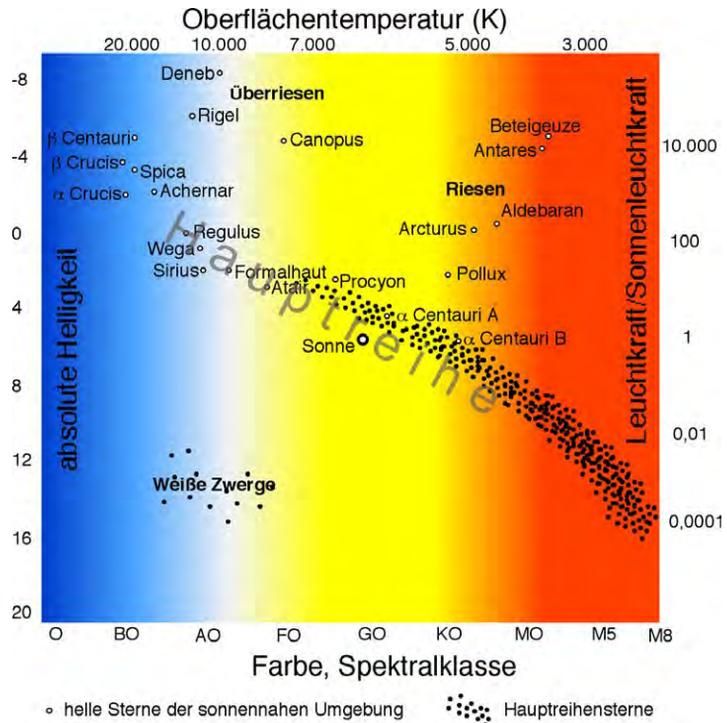
ein großer Einfluss der dunklen Materie vermutet. Die ersten Galaxien (sogenannte «Protogalaxien») waren vermutlich noch recht massearm, wuchsen aber durch Kollisionen mit anderen Protogalaxien ständig an, bis sie zu großen Galaxien, wie unsere Milchstraße eine ist, wurden, die eine Masse von etwa 1500 Milliarden Sonnen hat. Die Zahl der Galaxien im Weltall wird auf etwa 400 Mia. geschätzt. Die hellste und der Erde am nächsten stehende ist die Andromedagalaxie, die im Herbst und Winter als kleiner, unscharfer Fleck mit bloßem Auge zu sehen ist. Sie ist 2.5 Mio. Lichtjahre entfernt (→ Abb. 2-2).

Sterne und Sternentwicklung

Sterne sind selbst leuchtende massereiche Gaskörper. Sie gewinnen ihre Energie durch Fusionsprozesse, die in ihrem Inneren bei hohem Druck und hoher Temperatur ablaufen. Sie werden durch die nach innen gerichtete Gravitation und den nach außen gerichteten Strahlungsdruck stabilisiert. Sterne können sehr unterschiedliche Massen haben, die zwischen dem 0.08-fachen und dem 100-fachen unserer Sonne

Abb. 2-3

Das Hertzsprung-Russel-Diagramm für Sterne aus unserer Galaxie. Von rechts unten nach links oben zieht sich die Hauptreihe. Oberhalb der Hauptreihe ist das Feld der alten Sterne (Riesen und Überriesen), unterhalb der Bereich der «ausgebrannten» Weißen Zwerge.



liegen. Je massereicher ein Stern ist, desto höher ist seine Leuchtkraft und desto kürzer ist seine Lebensspanne als fusionierender Stern. Die Zustandsgrößen der Sterne werden im **Hertzsprung-Russel-Diagramm** (HRD) dargestellt (→ [Abb. 2-3](#)). Die meisten Sterne liegen im HRD auf der Hauptreihe, die sich im Diagramm von rechts unten nach links oben erstreckt. Dort befinden sich die Sterne, die sich im Stadium des stabilen und relativ lang andauernden **Wasserstoffbrennens** befinden. Die Masse der Sterne nimmt von rechts unten nach links oben zu, ebenso wie die Helligkeit. Die Spektralfarbe wechselt von rot nach blau, was eine Zunahme der Oberflächentemperatur von 3 000–20 000 K anzeigt. Sterne, die rechts oberhalb der Hauptreihe liegen, sind in ihrer Entwicklung weit fortgeschritten. Sie haben den Bereich des Wasserstoffbrennens verlassen und befinden sich in einem Fusionsprozess höherer Stufe. Sie blähen sich zu enormer Größe auf und werden als **Riesen** bzw. **Überriesen** bezeichnet. Links unterhalb der Hauptreihe finden sich die Sterne, deren Fusionsprozesse ausgelaufen sind. Ihre Anfangsmasse war kleiner als acht Sonnenmassen. Sterne von der Masse unserer Sonne schrumpfen nach Beendigung ihrer Fusionsprozesse dabei auf 5 000–10 000 km Durchmesser, bei gleichzeitig großer Dichte. Sie werden als **Weißer Zwerge** bezeichnet und kühlen langsam aus.

Sterne mit mehr als acht Sonnenmassen durchlaufen eine andere Entwicklung. Wegen ihrer großen Masse wirken enorme Gravitationskräfte, die nur durch eine sehr hohe Fusionsrate kompensiert werden können. Dadurch «verbrennen» diese Sterne in relativ kurzer Zeit (einige 10 Mio. Jahre). Sie enden in einer spektakulären kosmischen Katastrophe, einer **Supernova** (→ [Abb. 2-4](#) und [2-5](#)). Eine ähnliche Entwicklung können auch **Doppelsternsysteme** durchlaufen, wenn ein Partner eines solchen Systems an den jeweils anderen Masse abgibt, bis dieser die kritische Masse zur Supernova überschritten hat.

Kernfusion, Supernovae und Sterne späterer Generationen

| 2.3

Zu Beginn gab es im Weltall nur drei Elemente: Wasserstoff, Helium und geringe Mengen von Lithium. Alle weiteren Elemente bis zum Eisen (Ordnungszahl 26) entstanden bei der **Kernfusion** durch die **Nukleosynthese** in Abhängigkeit von der Ausgangsmasse des Sterns. Massereiche Sterne durchlaufen nur niedrige Fusionsstufen (z. B. unsere Sonne H zu He und He zu C), massereiche Sterne hingegen höhere Fusionsstufen (z. B. C zu O, O zu Si, Si zu Fe). Während das Heliumbrennen noch viele Millionen Jahre andauert, werden die Zeitinter-

Abb. 2-4 | Die Anfangsmasse des Sterns entscheidet über sein Ende (verändert nach Wikipedia).

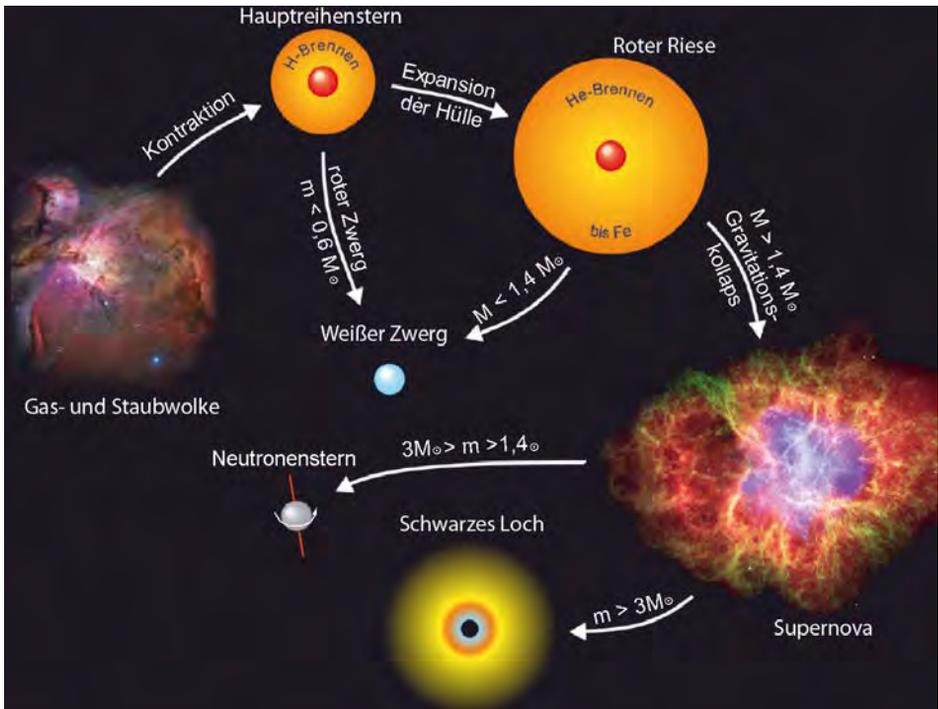


Abb. 2-5 | Supernova 1987A in der Großen Magellanschen Wolke (Links und Mitte). Diese Supernova in 150 000 Lichtjahren Entfernung konnte als Stern 3. Größe von der Erde aus mit bloßem Auge beobachtet werden (Copyright Anglo-Australian Observatory. Photograph by David Malin). Rechts: Der Krebsnebel im Sternbild Stier (Entfernung 6 300 Lichtjahre). Der Nebel expandiert rasch und stellt die abgesprengte Hülle des Vorläufersterns dar, der in der Supernova von 1054 explodierte. Im Zentrum des Nebels ist der Überrest als Neutronenstern erhalten (NASA).

