

Geowissenschaften erforschen Rund um den Erdball



Chris King

Approved by:
the International Geoscience Education Organisation
the International Union of Geological Sciences
the European Geosciences Union
for the teaching of the International Geoscience Syllabus



International
GeoScience
Education
Organisation



Copyright: Chris King, International Geoscience Education Organization

- In dieser Veröffentlichung enthaltenes veröffentlichtes Originalmaterial darf nur mit vorheriger schriftlicher Genehmigung des Autors oder ausdrücklich für Bildungszwecke oder Forschungsnutzung unter den Bedingungen, die mit den entsprechenden Vervielfältigungsrechten vereinbart wurden, vervielfältigt werden.
- Wenn der Autor die Erlaubnis erteilt, muss veröffentlichtes Originalmaterial entsprechend gekennzeichnet werden.
- Das Copyright für Material, das hier mit Genehmigung aus anderen Veröffentlichungen reproduziert wird, liegt beim ursprünglichen Verlag.

Erstveröffentlichung: 2019

ISBN: 978-1-9996264-0-2

Veröffentlicht unter: <http://www.igeoscied.org/teaching-resources/geoscience-text-books/>

Copyright: Chris King, im Namen der International Geoscience Education Organization



Deutsche Übersetzung: Prof. Dr. Martin Meschede

Erstveröffentlichung: 2023

ISBN: 978-1-9996264-8-8

Veröffentlicht unter: <http://www.igeoscied.org/teaching-resources/geoscience-text-books/>

Inhaltsverzeichnis

Zweck des Buches	0
0 Warum Geowissenschaften studieren?	0
1 1 Die Erde als sich veränderndes System	1
1.1 Charakteristische Eigenschaften.....	1
1.2 Wechselwirkungen	2
1.3 Feedback.....	3
1.4 Prozesse und Produkte	5
1.4.1 Zyklen	5
1.4.2 Der Wasserkreislauf	5
1.4.3 Stoffflüsse, Speicher und Verweilzeiten	7
1.4.4 Der Gesteinskreislauf	7
1.4.5 1.4.5 Der Kohlenstoffkreislauf	9
1.5 Energiequellen	10
2 Die Erde als System, innerhalb des Sonnensystems, innerhalb des Universums	12
2.1 Ursprünge.....	12
2.2 Die Sonne.....	17
2.3 Sonne, Erde und Mond	17
2.3.1 Tag/Nacht.....	17
2.3.2 2.3.2 Die Jahreszeiten	19
2.3.3 Die Mondphasen	19
2.3.4 Finsternisse (Eklipsen)	20
3 Die Erde - ein sich im Laufe der Zeit veränderndes System	22
3.1 Geologische Zeitspanne	22
3.2 Relative Datierung.....	22
3.3 Absolute Datierung.....	30
3.4 Geschwindigkeiten von Prozessen	32
4 Das Erdsystem besteht aus interagierenden Sphären	35
4.1 Geosphäre.....	35
4.1.1 Erdmaterialien und Eigenschaften	35
4.1.1.1 Minerale.....	35
4.1.1.2 Gesteine	37
4.1.1.3 Fossilien	39
4.1.1.4 Sedimentgesteine.....	43
4.1.1.5 Magmatische Gesteine	46
4.1.1.6 Metamorphe Gesteine.....	48
4.1.1.7 Boden	50
4.1.2 Prozesse im Erdsystem und deren beobachtete Eigenschaften	51
4.1.2.1 Oberflächenprozesse	51
4.1.2.2 Sedimentäre Prozesse	57
4.1.2.3 Magmatische Prozesse	59
4.1.2.4 Metamorphe Prozesse	63
4.1.2.5 Deformationsprozesse	65
4.1.3 Die Struktur der Erde und die Art der Nachweise	68
4.1.3.1 Nachweise	68

4.1.3.2	Erdmantel	72
4.1.3.3	Erdkern	72
4.1.3.4	Lithosphäre	73
4.1.4	Plattentektonik und die Art der Nachweise	74
4.1.4.1	Eine vereinende Theorie	74
4.1.4.2	Neubildung von Platten und Subduktion	78
4.1.4.3	Eigenschaften der Plattenränder	78
4.1.4.4	Bewegungsmechanismen und -raten	87
4.1.4.5	Nachweise für die Theorie	89
4.2	Hydrosphäre	94
4.2.1	Kontinentales Wasser	94
4.2.1.1	Kontinentale Wasserquellen	94
4.2.1.2	Wasserversorgung	98
4.2.1.3	Wasserverschmutzung	100
4.2.2	Ozeanwasser	101
4.2.2.1	Wasserzusammensetzung	101
4.2.2.2	Gezeiten	102
4.2.2.3	Wellen	103
4.2.2.4	Großmaßstäbliche Strömungen von Fluiden auf der Erde	104
4.3	Atmosphäre	109
4.3.1	Zusammensetzung der Atmosphäre	110
4.3.2	Atmosphärische Strömung	110
4.3.3	Veränderungen der Atmosphäre	113
4.4	Biosphäre	120
4.4.1	Evolution	120
4.4.2	Auswirkungen auf andere Systeme	125
5	Das Erdsystem produziert Ressourcen	128
5.1	Rohstoffe und fossile Brennstoffe	129
5.1.1	Massenrohstoffe für den Bau	129
5.1.2	Massenrohstoffe für die Industrie	130
5.1.3	Metallerze	132
5.1.4	Industrieminerale	134
5.1.5	Fossile Brennstoffe	134
5.1.5.1	Torf und Kohle	135
5.1.5.2	Erdöl und natürliches Gas	136
5.1.6	Prospektion	140
5.1.7	Umweltschutz und Sanierung	142
5.2	Energieverbrauch	146
5.2.1	Energie aus fossilen Brennstoffen	147
5.2.2	Erneuerbare Energie	147
6	Interaktionen zwischen Mensch und Erdsystem	151
6.1	Naturgefahren	151
6.1.1	Vulkanausbruch	151
6.1.2	Erdbeben	160
6.1.3	Tsunami	169

6.1.4	Erdrutsch	175
6.2	Umweltthemen	180
6.2.1	Erosion	180
6.2.2	Änderungen im Drainagesystem.....	183
6.2.3	Abfallentsorgung	183
6.2.4	Umweltverschmutzung	186
6.2.5	Bergbau/Abbau im Steinbruch	188
6.2.6	Verbrennung fossiler Brennstoffe und Treibhauseffekt	189
6.3	Auswirkungen auf die Menschheitsgeschichte	190
6.3.1	Ressourcenkriege	191
6.3.2	Migration aufgrund des Klimawandels	192
7	Erforschung des Erdsystems durch Feldarbeiten und Messungen	195
7.1	Beobachtung, Messung und Aufzeichnung	200
7.2	Synthese der Beobachtungen.....	203
7.3	Untersuchung und Überprüfung der Hypothesen	205
Appendix – International Geoscience Syllabus.....		199
Images and Image Credits		205
Figures		205
Boxes		211
Tables		217

Vorwort von Iain Stewart

Professor für geowissenschaftliche Kommunikation und Direktor des Sustainable Earth Institute, School of Geography, Earth and Environmental Sciences at Plymouth University, England.



Internationale Erhebungen zeigen, dass die schulische Ausbildung in Geowissenschaften weltweit sehr unterschiedlich ist. Die Unterstützung, die Lehrern der Geowissenschaften angeboten wird, ist im Allgemeinen schlecht, und die Lehrbücher sind in vielen Ländern oft mangelhaft und in manchen Bereichen gar nicht vorhanden.

Vor diesem eher grauen Hintergrund ist es wunderbar, dass das Lehrbuch „Erforschung der Geowissenschaften“ als ein farbiges und lebendiges Werk nun zur Verfügung steht. Es ist das Resultat einer Initiative einen International Geoscience Syllabus als international gültigen Lehrplan für die Geowissenschaften aufzubauen, die von internationalen Organisationen wie der Geoscience Education Organization, der International Union of Geological Sciences und der European Geosciences Union, unterstützt wurde.

Diese „internationale Version“ des Lehrbuchs ist eine Open-Source-Ressource, die kostenlos heruntergeladen und überall in der Welt von Lehrern, Schülern und Schulbuchautoren verwendet werden kann. Es wurde so geschrieben, dass es leicht verständlich und ansprechend ist, so dass es auch ohne weiteres in andere Sprachen übersetzbar ist. Sobald die "internationale Version" für verschiedene Regionen der Welt regionalisiert angepasst und ggf. übersetzt und durch Experten geprüft worden ist, existiert eine neue, umfangreiche Ressource, um das Lehren und Lernen in den Geowissenschaften zu unterstützen.

Es ist mir eine Freude, diese willkommene und zeitgemäße Initiative zu unterstützen. Ich möchte Interessierte Experten ermutigen, geowissenschaftliche Bildung auf der ganzen Welt zu unterstützen, indem die Aufgabe übernommen wird, das Lehrbuch zu „regionalisieren“ und zu übersetzen, um es in den eigenen Regionen zu nutzen und so die spannenden Inhalte und wichtigen Botschaften so weit wie möglich zu verbreiten.

Iain Stewart.

Zweck des Buches

Das Buch wurde erstellt, um Lehrern auf der ganzen Welt die Möglichkeit zu geben, ihren Unterricht nach dem internationalen geowissenschaftlichen Lehrplan (International Geoscience Syllabus – im Anhang wiedergegeben) durchzuführen. Der Lehrplan vermittelt die Geowissenschaften auf einem Stand, den alle 16-jährigen Schülerinnen und Schüler kennen und verstanden haben sollten. So wird es von der Internationalen Geowissenschaftlichen Bildungsgemeinschaft empfohlen.

Die Struktur der Kapitelüberschriften im Buch spiegelt den Lehrplan direkt wider. Der Text wurde in einer einfachen und allgemeinverständlichen Sprache verfasst, um ihn für Lehrerinnen und Lehrer, die ihn für ihre Lehre verwenden möchten, einfach zugänglich zu machen. Ein Großteil der erläuternden Beispiele wird in Tabellen dargestellt und durch Fotos illustriert, so dass die Beispiele nicht behindernd in die Textblöcke eingreifen.

Zusätzliches Material zum Lehrplan wird in „Interesse-Boxen“ präsentiert, um weiterführende Informationen zu bieten, Zusammenhänge zu erläutern und kurze Fallstudien vorzustellen. Es wird aber nicht erwartet, dass die Schüler in all dieses zusätzliche Material eingeführt werden.

Der Originaltext ist als „internationale Version“ mit dem Titel „Exploring Geoscience – across the Globe“ verfasst und wird durch ausgewählte Fotografien aus der ganzen Welt und „Interesse-Boxen“ von weltweitem Interesse illustriert. Er ist auf der International Geoscience Education Website unter

<http://www.igeosced.org/teachingresources/geoscience-text-books/>

veröffentlicht. Geowissenschaftliche Pädagogen auf der ganzen Welt wurden eingeladen, diesen Kerntext zu nehmen und Fotos und „Interesse-Boxen“ für ihre eigenen Regionen hinzuzufügen; sie wurden auch gebeten, den Text gegebenenfalls zu übersetzen, um ein Lehrbuch „Exploring Geoscience“ für ihre eigenen Regionen zu erstellen.

Das Lehrbuch ist in eine separat veröffentlichte „Aktivitätsergänzung“ integriert, die Einzelheiten zu einer Vielzahl von Unterrichtsaktivitäten für jeden Abschnitt enthält und Fragen bereitstellt, um das Wissen und das Verständnis der Schüler zu testen.

Der International Geoscience Syllabus ist veröffentlicht unter: http://www.igeosced.org/?page_id=269

Mitwirkende und Danksagungen (Chris King)

Wir danken Gillian Drennen (gillian.drennen@wits.ac.za) für den Vorschlag, ein Lehrbuch zum internationalen Lehrplan zu entwerfen, und für den Vorschlag, einen Workshop auf dem International Geological Congress in Kapstadt im Jahr 2016 zur Entwicklung dieser Idee zu veranstalten. Wir danken allen Mitwirkenden dieses Workshops für die Art und Weise, wie sie die frühen Ideen zum Lehrbuch gelenkt haben.

Der Originaltext und viele Diagramme wurden von Chris King† erstellt. Einige der Diagramme wurden aus anderen Quellen neu gezeichnet. Andere Diagramme und Fotos wurden direkt aus urheberrechtlich geschützten Bereichen des Internets bezogen. Die meisten Diagramme wurden von Tanja Reinhardt (reinhardt2@ukzn.ac.za) von der University of KwaZulu, Natal, Südafrika, neu gezeichnet, die auch das Buch und seine Umschläge gestaltet hat.

Wir sind Wikimedia Commons (https://commons.wikimedia.org/wiki/Main_Page) als Quelle vieler Fotos und einiger Diagramme unter urheberrechtsfreien Bedingungen sehr dankbar. Sie haben wesentlich zur Veranschaulichung in dem Buch beigetragen. Wir danken auch der Earth Science Education Unit (ESEU: <http://www.earthscienceeducation.com/index.html>) für die Bereitstellung von Bildern.

Wir sind Peter Craig, Elizabeth und Martin Devon, Sid Howells, Peter Kennett, Pete Loader, Giulia Realdon, Tanja Reinhardt (Kapitel 1), Ashvin Wickramasooriya und Sebastian Wolf (Kapitel 1, 2) sehr dankbar für all ihre Arbeit bei der fachlichen Überprüfung des Manuskripts, für das Korrekturlesen und für Verbesserungen zur Lesbarkeit des Textes.

Wir sind auch Anthony Tibbs sehr dankbar für seine formellen Korrekturanmerkungen. Alle verbleibenden Fehler bleiben allein bei mir. Das Lehrbuch wurde von der International Geoscience Education Organisation, der International Union of Geological Sciences durch ihre Commission on Geoscience Education and Technology Transfer und der European Geosciences Union für die Lehre des internationalen geowissenschaftlichen Lehrplans genehmigt. Wir sind ihnen sehr dankbar für die Unterstützung und Ermutigung.

Chris King.

0 Warum Geowissenschaften studieren?

Geowissenschaften beschäftigen sich mit der wissenschaftlichen Erforschung unseres gesamten Planeten. Heutzutage ist es sogar noch mehr, denn sie umfassen auch die Planetengeologie. Dazu gehören die vielen Disziplinen der Geologie, wie Geochemie, Geophysik, Paläontologie, Hydrogeologie und Ingenieurgeologie; sie umfassen aber die Meteorologie, Ozeanographie, Umweltwissenschaften, Bodenkunde und das Studium des Sonnensystems. Die Geowissenschaften verwenden Beweise aus der Vergangenheit und Gegenwart des Planeten, um die Zukunft vorherzusagen, aber sie verwenden auch Beweise aus der Gegenwart, um „vorherzusagen“, was in der Vergangenheit passiert ist. Sie verwenden Elemente der Biologie, Chemie, Physik, Mathematik, Geographie und Technik in einer Studie der Erde und der Planeten.

Eine der Freuden am Studium der Geowissenschaften ist, dass es jeder tun kann. Wenn Kinder am Strand interessante Kieselsteine aufheben und darüber nachdenken, warum sie interessant sind, beginnen sie, die Fragen zu stellen, die Geowissenschaftler stellen. Wenn sie mehrere interessante Kieselsteine, verschiedenfarbigen Sand oder verschiedene Fossilien sammeln, beginnen sie, die Dinge zu sortieren oder Erdmaterialien zu klassifizieren, wie es Geowissenschaftler tun. Wenn sie fragen, warum der Sand interessante Formen bildet, fangen sie an, Erdprozesse zu untersuchen, genau wie die Geowissenschaftler.



Abb. 0.1: Interessante Kieselsteine und Sandformen

Wenn man Geowissenschaften weiter studieren möchten, kann man dies möglicherweise in der Schule oder Hochschule oder mit einem Universitätsabschluss tun. Viele Menschen studieren Geologie, weil sie gerne Fragen stellen und beantworten, wie die Erde funktioniert, oder weil sie gerne interessante Dinge sammeln. Aber andere werden professionelle Geologen und verbringen ihr ganzes Leben damit, geowissenschaftliche Fragen zu stellen und zu beantworten. Sie erforschen die Erde, von den Tropen bis zu den Polen, von den höchsten Bergen bis zu den tiefsten Meeren, oder auf der Suche nach neuen Erdressourcen, besseren Möglichkeiten zur Abfallentsorgung oder den besten Orten, um neue Gebäude zu bauen und sicher zu leben.

Davon handelt dieses Buch. Es beginnt mit der Betrachtung des gesamten Erdsystems, der Erde im Sonnensystem und wie sich all dies im Laufe der Zeit verändert hat. Es vereint Studien zur Geosphäre, Hydrosphäre, Atmosphäre und Biosphäre der Erde und untersucht, wo die Ressourcen und Energiequellen zu finden sind, die wir brauchen. Es konzentriert sich auf Erdgefahren und Umweltprobleme und wie diese die Menschheitsgeschichte verändern, und es erklärt, was Geowissenschaftler tun und wie.

Also, wenn Sie das alles interessiert, lesen Sie weiter – Sie werden bereits anfangen, wie ein Geowissenschaftler zu denken.

1 Die Erde als sich veränderndes System

Ein System besteht aus einer Reihe verschiedener Teile, die zu einem Netzwerk verbunden sind, das das gesamte System am Laufen hält. Systeme können einfach sein, wie ein Waschbecken (Abb. 1.1); Wasser gelangt über die Wasserhähne in das Waschbecken (wird zugeführt) und fließt durch den Abfluss wieder ab (wird ausgegeben). Das Wasser kann heiß oder kalt sein, daher ist auch die Wärmeenergie des Wassers (seine Temperatur) einer der Inputs. Die Wärme des Warmwassers kann verloren gehen, wenn das Wasser in den Abfluss fließt, kann aber auch abgegeben werden, wenn das Wasser im Becken abkühlt. Das Waschbeckensystem hat eine Begrenzung, die aus den Seiten und dem Boden des Beckens besteht. Der Input kommt von außen herein und geht über die Grenze des Systems wieder in die Umgebung hinaus.

Das Waschbecken ist ein Beispiel für ein **offenes System** das mit der Außenumgebung an den Grenzen interagiert. Im Beispiel des Waschbeckens sind Wasser und Wärme Inputs und Outputs an die Umgebung. Ein Beispiel für ein **geschlossenes System** ist eine Vakuumflasche (Abb. 1.1): Wenn der Deckel des Kolbens geschlossen ist, kann weder Flüssigkeit in den Kolben eindringen noch ihn verlassen, und es auch Wärme kann in den Kolben weder eindringen noch ihn verlassen. Allerdings kann kein System vollständig geschlossen werden, denn selbst in der besten Isolierflasche verliert eine heiße Flüssigkeit im Inneren mit der Zeit ihre Wärme.



Abb. 1.1. Ein Waschbecken und eine Isolierflasche, Beispiele für offene und (fast) geschlossene Systeme

Das Erdsystem ist nicht nur extrem komplex, viel komplexer als diese einfachen Beispiele, es hat auch viele Subsysteme und hat sich im Laufe der Zeit verändert und verändert sich weiter.

1.1 Charakteristische Eigenschaften

Die Erde ist ein offenes Energiesystem (Abb. 1.2). Ein Großteil der Energie, welche die Subsysteme der Erde antreibt, wird als Strahlung von der Sonne empfangen. Diese Energie wird tagsüber der Erde zugeführt, ein Teil wird jedoch tagsüber und nachts als Ausgang wieder in den Weltraum abgestrahlt. Da Strahlungsein- und -austritt im Allgemeinen im Gleichgewicht sind, bleibt die Gesamttemperatur der Erde zumindest kurzfristig konstant.

Allerdings ist die Erde heute ein nahezu geschlossenes Materiesystem. Dies war nicht immer so, da die frühe Erde von Asteroiden bombardiert wurde. Heutzutage bleibt das, was auf der Erde ist, auf der Erde; Meteoriten und kosmischer Staub fügen im Vergleich zur Größe der Erde nur wenig Material hinzu, und das einzige dichte Material, das in den Weltraum gelangt, geht in Raumsonden verloren.

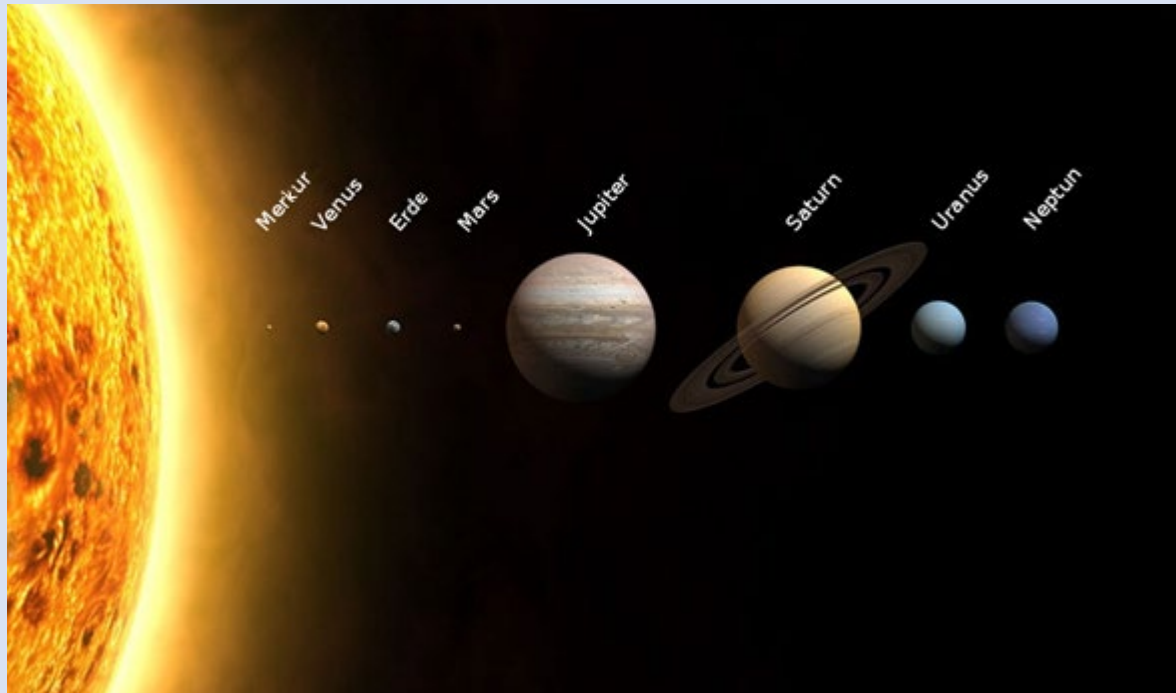


Abb. 1.2. Die Erde – ein sehr komplexes System

Das Erdsystem hat sich im Laufe der Zeit verändert, nicht nur weil das Ausmaß der Bombardierung abgenommen hat, sondern auch aufgrund einer Reihe anderer Veränderungen, wie etwa der Abkühlung der Erde, der Bildung von Ozeanen, der Entwicklung der Atmosphäre und des Lebens sowie der Auswirkungen der Plattentektonik.

Das Erdsystem ist Teil des Sonnensystems. Dies ist auch ein nahezu geschlossenes System, sowohl für Energie als auch für Materie – da vom Sternenlicht nur sehr wenig Energie und auch nur sehr wenig Materie aufgenommen wird.

Box 1.1. Die Materie des Sonnensystems, dargestellt im ungefähren Größenmaßstab (jedoch nicht im Entfernungsmaßstab)



Dieses „Porträt“ des Sonnensystems zeigt die Sonne und die Planeten. Die Größen sind in den richtigen Proportionen dargestellt – die Abstände jedoch nicht. Dieses Diagramm zeigt den größten Teil der Materie des Sonnensystems. Nicht enthalten sind Monde (da sie zu klein sind), Zwergplaneten, Asteroiden, Kometen und Staub.

Das Erdsystem kann in vier Hauptsubsysteme unterteilt werden: die feste Erde (die **Geosphäre**), die Luft um die Erde (die **Atmosphäre**), das Wasser auf dem Planeten (die **Hydrosphäre**) und das Leben auf der Erde (die **Biosphäre**).

Die **Lithosphäre**, welche die tektonischen Platten der Erde bildet, ist der äußere Teil der Geosphäre.

1.2 Wechselwirkungen

Geosphäre, Hydrosphäre, Atmosphäre und Biosphäre sind sehr offene Systeme, da sie alle miteinander interagieren und sowohl Energie als auch Materie austauschen. Die Wechselwirkungen zwischen diesen vier Subsystemen finden überall und ständig statt und wirken sich über sehr kurze bis extrem lange Zeitspannen aus. Es sind diese Wechselwirkungen, die unseren Planeten so dynamisch machen. Wohin wir auch gehen, was auch immer wir tun, diese Systeme werden überall um uns herum in unterschiedlichem Tempo interagieren, von sehr schnell bis extrem langsam.

Flusssufer sind gut geeignete Orte, um die Wechselwirkungen des Erdsystems zu beobachten. Flussströmungen sind Teil der Hydrosphäre, sie erodieren Ufer und transportieren Sedimente der

Geosphäre. An den Ufern leben Tiere und Pflanzen der Biosphäre, die Photosynthese betreiben und atmosphärische Gase atmen. Durch die Verdunstung von Flusswasser, die Transpiration von Pflanzen und die Atmung von Tieren gelangt Wasser in die Atmosphäre. Dieser Wasserdampf kann später als Regen fallen und so wieder atmosphärisches Wasser in die Geosphäre zurückbringen.

Box 1.2. Der lokale Wasserkreislauf, ein Beispiel für die Wechselwirkungen zwischen Geosphäre, Hydrosphäre, Atmosphäre und Biosphäre

Regentropfen enthalten bei ihrer Entstehung weder Säure noch Alkalien und sind daher neutral. Wenn sie jedoch durch die Atmosphäre fallen, löst sich Kohlendioxid im Wasser und sie werden dadurch leicht sauer. Wenn Regenwasser auf dem Boden landet, versinkt es. Viele Tiere leben im Boden und atmen, nehmen Sauerstoff auf und geben Kohlendioxid ab. Dieses zusätzliche Kohlendioxid löst sich im Bodenwasser, wodurch es noch saurer wird. Auch verrottendes Pflanzenmaterial führt dem Wasser Huminsäure zu. Das saure Wasser reagiert mit Gesteinsfragmenten im Boden, löst Kalksteinpartikel auf und zersetzt Partikel anderer Gesteine. Durch diese Reaktionen wird das Wasser wieder neutral, sodass das Wasser, wenn es in Quellen aus dem Boden kommt, in der Regel neutral ist.



Regen



Bodenfeuchtigkeit



Grundwasserquelle

Dieses Beispiel verdeutlicht, wie die verschiedenen Erdsysteme interagieren. Regentropfen in der Hydrosphäre lösen Kohlendioxid aus der Atmosphäre. Sie versinken im Boden der Geosphäre und lösen dort weiteres Kohlendioxid auf, das von den Tieren der Biosphäre produziert wird. Das saure Bodenwasser reagiert mit Gesteinsfragmenten der Geosphäre, wird neutral und rieselt aus Quellen, wo es wieder sichtbare Hydrosphäre ist.

In diesem Beispiel wird Materie ausgetauscht (Wasser, atmosphärisches Kohlendioxid, In- und Output der Atmung sowie die Reaktionen mit Gesteinsfragmenten) und auch Energie (der fallende Regen, die Atmungsenergie und die chemische Energie, die in Wasser/Gestein-Reaktionen steckt).

1.3 Feedback

Feedback oder Rückwirkung ist ein wesentlicher Bestandteil von Systemen. Ein einfaches Beispiel für ein Feedback ist ein Wasserkocher mit Thermostat (ein Thermometer mit Schalter). Wenn das Wasser abkühlt, gibt das Thermometer diese Information an den Schalter zurück und der Kessel wird eingeschaltet. Wenn das Wasser heiß genug ist, wird diese Information vom Thermometer an den Schalter zurückgemeldet und der Boiler wird wieder ausgeschaltet. Unser Körper verfügt über ähnliche Rückkopplungsmechanismen: Wenn es uns zu heiß wird, schwitzen wir, um uns abzukühlen, aber wenn uns zu kalt wird, frieren wir, wir zittern, um uns aufzuwärmen.

Feedbacksysteme können **positiv** oder **negativ** sein, aber diese Bezeichnungen können mitunter verwirrend sein. Negatives Feedback hält Systeme in einem stabilen Zustand und ist daher eine gute Sache, während positives Feedback ein System instabil machen und verheerende Folgen haben kann.

So wird z.B. die Salzmenge in den Ozeanen durch ein negatives Feedbacksystem beeinflusst. Flüsse auf der ganzen Welt lösen Salz (Natriumchlorid, NaCl, das Mineral Halit) aus den umliegenden Gesteinen und tragen es ins Meer, aber der Salzgehalt (Salinität) der Ozeane bleibt gleich (ca. 3,5 % Salz), obwohl man eigentlich erwarten würde, dass sie mit der Zeit immer salziger werden. Das negative Feedbacksystem, welches das Salz entfernt, entsteht, wenn Meerwasserbereiche in Küs-

tenbecken eingeschlossen werden. Wenn das Meerwasser verdunstet, scheidet sich Salz ab und kann als Sedimentgestein abgelagert werden, wodurch es aus den Ozeanen entfernt wird.



Abb. 1.3. Salzgewinnung aus einer Salzlagune an der Küste Tunesiens

Die negativen Feedbacksysteme halten in unserem eigenen Körper alles stabil. Diese in Lebewesen zusammenwirkenden Prozesse nennt man Homöostase.

Bei positivem Feedback kann das System instabil werden. Wenn Sonnenlicht auf Eisschichten trifft, wird der größte Teil davon reflektiert und hat daher kaum einen Erwärmungseffekt auf die Erde. Die Reflexion des Sonnenlichts durch helle Oberflächen wie Eis wird **Albedo** genannt. Diese Reflexion des Sonnenlichts ist einer der Faktoren, welche die Temperatur der Erde stabil halten. Positives Feedback kann jedoch in zwei verschiedene Richtungen wirken. Wenn die Erde kühler wird, wachsen die Eiskappen, wodurch der Albedoeffekt zunimmt und die Erde dadurch noch kühler wird; dies könnte eine Eiszeit auslösen. Wenn die Erde jedoch wärmer wird, schmelzen die Eiskappen, wodurch die Albedoreflexion verringert wird und die Erde dadurch noch wärmer wird. Schließlich könnte das Eis vollständig schmelzen und die Erde in einen viel wärmeren Zustand versetzen.

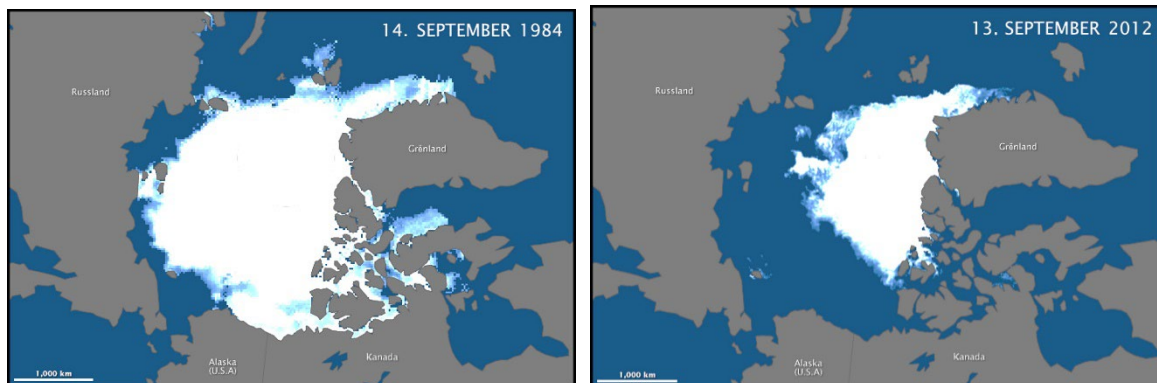


Abb. 1.4. Ausdehnung des arktischen Eises in den Jahren 1984 und 2012. In der Vergangenheit hatte die große Fläche schwimmenden Eises einen großen Albedoeffekt. Da die Erde wärmer geworden ist, ist die Eisfläche kleiner geworden; dies hat die Albedo verringert und durch positives Feedback zur Erwärmung der Erde beigetragen.

Wenn es in einem System ein positives Feedback gibt, kann dies so lange anhalten, bis ein „Kippunkt“ erreicht ist und das System in einen neuen stabilen Zustand übergeht. In der Vergangenheit herrschte auf der Erde ein kalter stationärer Zustand, in dem Teile der Erde mit Eis bedeckt waren („**Eishausbedingungen**“), und ein warmer stationärer Zustand, in dem es keine Eisschilde gab („**Treibhausbedingungen**“).

1.4 Prozesse und Produkte

1.4.1 Zyklen

Füllen wir eine Tasse mit kochendem Wasser und lassen Sie es etwa eine Minute lang stehen, damit sich die Tasse aufwärmt. Gießen wir dann das Wasser aus und geben etwa 1 cm hoch kochendes Wasser in den Becher. Dann drehen wir einen Glasbecher um, stülpen ihn auf die Tasse wie in Abb. 1.5 gezeigt und beobachten, was passiert.

Wir werden sehen, wie das Glas trüb wird, wenn Wasser an der Innenfläche kondensiert und dann in Tropfenform in den Becher zurückläuft.

Von der Oberfläche des heißen Wassers verdunstet Wasser, das in der Luft im Becher bzw. im umgestülpten Glas zu unsichtbarem Wasserdampf wird. Dann kondensiert der Wasserdampf als Tröpfchen an den Innenseiten des Bechers und des kühlen Glases. Das Glas wird trübe, bis die Tropfen groß genug werden, um nach unten zurück in den Becher zu fließen.

Was man hier sieht, ist eine Kombination aus Prozessen und Produkten. Beim Verdampfungsprozess entsteht ein Produkt aus Wasserdampf. Durch den Kondensationsprozess entsteht ein Produkt aus kleinen Tröpfchen flüssigen Wassers auf der Innenseite des Bechers und des Glases. Der Fließvorgang transportiert das Wasser dann zurück in den Becher – dieses neue Produkt wird dann dem flüssigen Wasser im Becher hinzugefügt.



Abb. 1.5. Eine einfache Demonstration des Wasserkreislaufs

Prozesse bewirken, dass etwas geschieht; **Produkte** sind die Ergebnisse.

Dies ist eine einfache Version eines Zyklus. In diesem Fall beginnt das Wasser im Becher als flüssiges Wasser, verdunstet zu Wasserdampf und kondensiert dann zu Wassertropfchen, die sich verbinden und wieder nach unten in den Becher fließen. Es ist gleichzeitig ein einfaches System, das für Wasser geschlossen ist (Wasser verlässt das System nicht und gelangt auch nicht in das System).

Alle Materialien der Erde unterliegen auf irgendeine Weise einem Kreislauf. Wichtige Beispiele sind der Wasser-, Kohlenstoff- und Gesteinskreislauf.

1.4.2 Der Wasserkreislauf

Der natürliche **Wasserkreislauf** ist komplexer als die Becher- und Becherdemonstration in Abb. 1.5. und Wasserkreislaufprozesse und -produkte sind ständig um uns herum.

Wenn es regnet, bildet das Wasser Pfützen auf dem Boden. Die Pfützen verdampfen später und werden zu unsichtbarem Wasserdampf in der Luft. Wenn die Luft abkühlt, kondensiert der Wasserdampf zu Wassertropfchen und bildet Wolken. Während die Wolken weiter abkühlen, verbinden sich die Wassertropfen zu Regentropfen, die, wenn sie groß genug sind, als Regen fallen. Selbst dieses einfache Outdoor-System wird durch viele weitere Faktoren erschwert. Durch die Kondensation von Wasserdampf entstehen nicht nur Wolken, sondern auch Dunst und Nebel. Wasser fällt aus Wolken als Regen, aber auch als Schnee und Hagel. Wasser, das auf den Boden gelangt, bildet nicht nur Pfützen, sondern fließt oft in Dachrinnen, Bächen, Flüssen und schließlich in Seen und ins Meer. Aus all diesen Wasserkreislaufprodukten verdunstet ständig Wasser, während Pflanzen das von ihren

Wurzeln aufgenommene Wasser als Wasserdampf über ihre Blätter an die Luft abgeben und so **transpirieren**. Der durch Verdunstung und Transpiration entstehende Wasserdampf wird durch Luftströmungen in verschiedene Bereiche transportiert.

Ein Teil des Regen- und Flusswassers versickert in den Boden und das darunter liegende Gestein und wird in den Porenräumen poröser Gesteine Teil des Grundwassers. Dieses Wasser fließt durch durchlässige Felsen unter der Erde bergab und strömt schließlich in Quellen heraus.

In kalten Regionen kann sich als Schnee fallendes Wasser im Eis von Gletschern und Eisschilden ansammeln, während Grundwasser im **Permafrost** (dauerhaft gefrorener Boden) gefroren werden kann. Eis kann auch fließen oder schmelzen, um wieder zu flüssigem Wasser zu werden.

Die wichtigsten Wasserkreislaufprozesse sind **Verdunstung**, **Kondensation**, seitliche Bewegung der Luft (Wind), Fallen (von Regen usw.) und Fließen über oder unter der Erde. In kalten Gebieten sind auch Gefrieren, Schmelzen und Eisfluss wichtig. Viele dieser Prozesse und Produkte sind in Abb. 1.6 dargestellt.

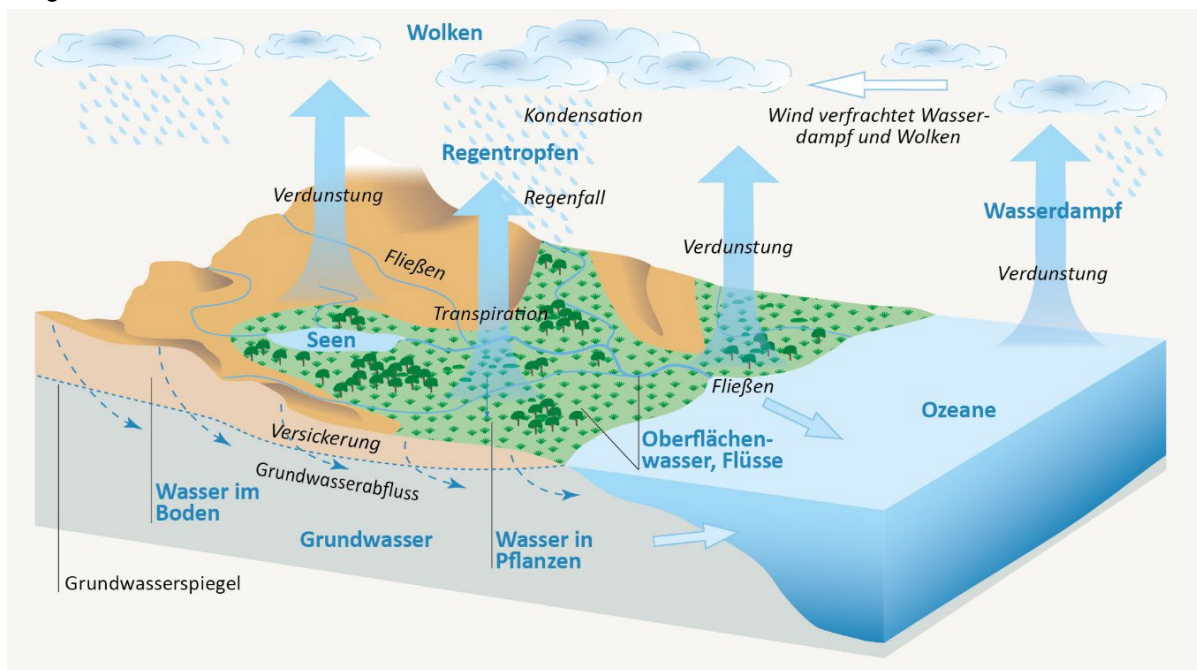
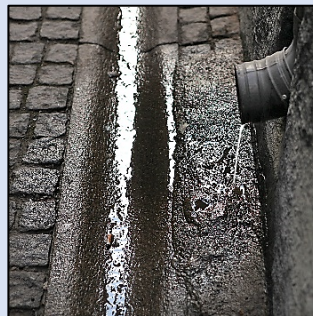


Abb. 1.6. Produkte des Wasserkreislaufs (*blau*) und Prozesse (*kursiv*).

Box 1.3. Prozesse des Wasserkreislaufs im eigenen Garten



Prozesse des Wasserkreislaufs können wir in unserem eigenen Garten in Aktion erleben. Regentropfen aus Regenwolken fallen in Pfützen; das Wasser fließt durch die Dachrinnen und gelangt schließlich in die Seen. Durch die Verdunstung von Seen und anderen Gewässern entsteht unsichtbarer Wasserdampf in der Luft. Wenn er abkühlt, kondensiert er in Wassertropfen und bildet Wolken, die Regen erzeugen.

1.4.3 Stoffflüsse, Speicher und Verweilzeiten

Prozesse und Produkte von Kreisläufen werden auch Stoffflüsse und Speicher genannt. **Stoffflüsse** sind Materialströme, die durch Prozesse hervorgerufen werden, gemessen werden sie in Flussraten. Die Stoffflüsse des Wasserkreislaufs reichen von sehr schnell (z. B. Wasserströme in überschwemmten Flüssen) bis sehr langsam (Fließbewegungen von Eisschilden) und von sehr groß (globale Verdunstungsraten) bis sehr klein (Schneefall auf Eisschilden). **Speicher** sind die Produkte; auch die Produkte des Wasserkreislaufs reichen von sehr groß (Ozeane) bis hin zu klein (das im eigenen Körper gespeicherte Wasser). Unter **Verweilzeiten** versteht man die Zeitspanne, die benötigt wird, bis ein Speicher ersetzt wird. Einige Verweilzeiten sind kurz, beispielsweise beträgt die Zeit, in der Wasserdampf in der Atmosphäre gespeichert wird, nur wenige Tage. Andere Verweilzeiten sind sehr lang, etwa die Zehntausende Jahre lange Lagerung von Eis in polaren Eisschilden.

1.4.4 Der Gesteinskreislauf

Der oberflächliche Teil des Gesteinskreislaufs ist eng mit dem Wasserkreislauf verbunden. Fließen-des Wasser entfernt und transportiert Sedimente. In stillem Wasser lagern sich Sedimente ab und können sich zu dicken Sedimentabfolgen ansammeln. Sedimente werden zu Sedimentgesteinen verfestigt, meist tief unter der Erde. Wenn diese Gesteine angehoben und die darüber liegenden Materialien entfernt werden, werden sie an der Erdoberfläche freigelegt und sind bereit für einen erneuten Beginn des Kreislaufs.

Box 1.4. Prozesse des Gesteinskreislaufs irgendwo ganz in der Nähe



Prozesse des Gesteinskreislaufs können wir in Aktion sehen, wann immer der Wind weht oder Wasser über das Land läuft. Der wehende Wind nimmt Staub, Blätter und Abfall auf, trägt ihn und lagert ihn ab; das Gleiche gilt für fließendes Wasser. Fließendes Wasser auf dieser Sandbank hat Sand aus den kleinen Kanälen oben auf dem Foto entfernt, ihn durch die größeren Kanäle hinunter getragen und ihn in kleinen Deltas unten abgelagert, alles in einem kleinen Strandbereich, nur etwa einen Meter breit.

Dieser sedimentäre Teil des Gesteinskreislaufs wird komplexer, wenn Gesteine an Phasen der Gebirgsbildung beteiligt sind. Die enormen Temperaturen und Drücke führen zu Faltungen und Brüchen (Verwerfungen) und können die Gesteine auch in metamorphe Gesteine verwandeln.

Die Veränderungen können noch weiter gehen, wenn der Temperaturanstieg dazu führt, dass Gesteine teilweise schmelzen und flüssiges Gestein oder Magma entsteht. Magma ist weniger dicht als das umgebende Gestein und steigt daher auf. Entweder kühlt es ab und verfestigt sich unter der Erde langsam, oder es bricht durch vulkanische Aktivität an der Oberfläche aus. Alle aus Magma

entstandenen Gesteine sind magmatische Gesteine. In große Tiefen in der Erdkruste versenkte Gesteine können durch Gebirgsbildungsprozesse angehoben und freigelegt werden, um wieder Teil des Gesteinskreislaufs zu werden.

Abb. 1.7. zeigt, wie die Produkte des Gesteinskreislaufs (in Boxen) und Prozesse (kursiv) miteinander verknüpft sind. Gesteine an der Erdoberfläche werden durch Verwitterung in brüchiges Gestein und Erde umgewandelt; durch Erosion und Transport wird es zu einem mobilen Sediment. Durch die Ablagerung mobiler Sedimente werden Sedimentabfolgen aufgebaut. Diese können durch Verdichtung oder Zementierung in Sedimentgesteine umgewandelt werden, die dann wieder angehoben und zu Gesteinen an der Erdoberfläche werden können. Sie können jedoch auch eine Metamorphose durchlaufen und zu metamorphen Gesteinen werden, die dann ebenfalls angehoben und zu Gesteinen an der Erdoberfläche werden können.

Metamorphe Gesteine können zu flüssigem Magma schmelzen, das durch Intrusion aufsteigt und intrusives magmatisches Gestein bildet (das dann angehoben werden kann, um zu Oberflächengestein zu werden), oder das Magma kann als vulkanisches magmatisches Gestein extrudiert (aus einem Vulkan ausgebrochen) werden. Magma kann diesem System auch von unten zugeführt werden, während magmatische Gesteine auch eine Metamorphose durchlaufen können.

Im System des Gesteinskreislaufs sind die Produkte oder Speicher die sedimentären, metamorphen und magmatischen Gesteine. Die Prozesse, welche die Ströme oder Stoffflüsse zwischen diesen Speichern verursachen, sind Metamorphose, Schmelzen, Erstarren und alle Prozesse, die mit der Entfernung, Bewegung, Ablagerung und **Lithifizierung** (Umwandlung von Sediment in Sedimentgestein) von Sedimenten verbunden sind. Die Verweilzeiten der Gesteine betragen meist Millionen von Jahren.

Diese einfache Sicht auf den Gesteinskreislauf ist im Detail komplexer, wie ab Abschnitt 4.1.2 erläutert wird.

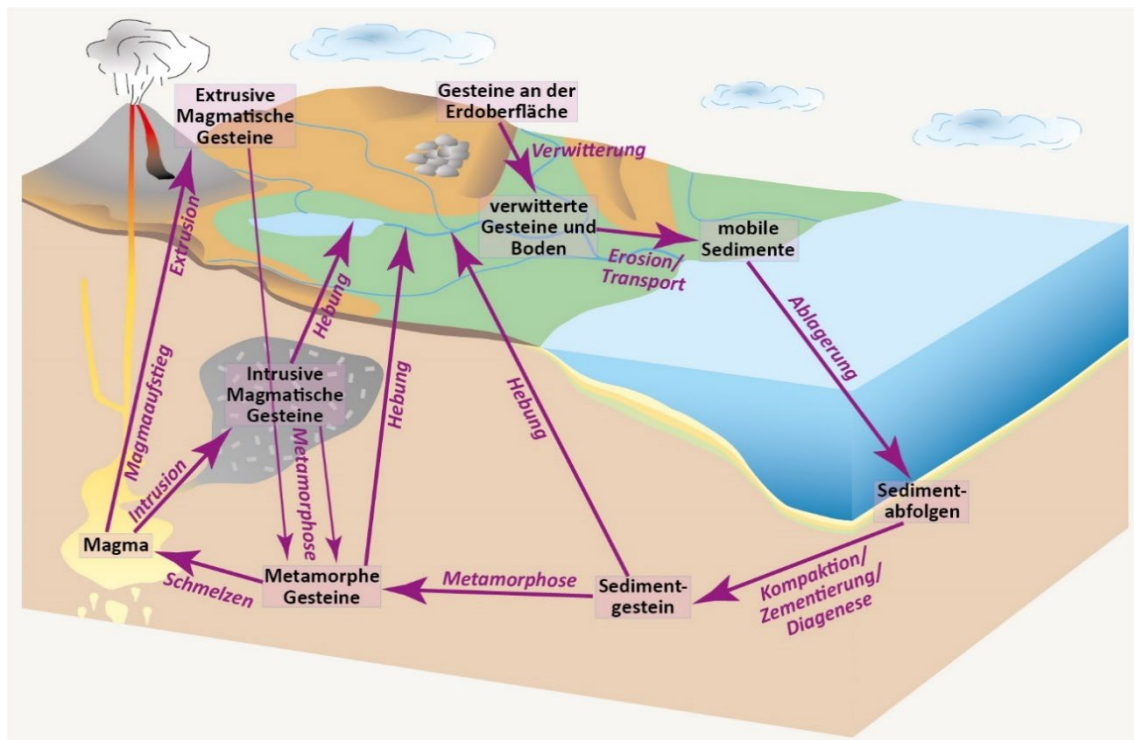


Abb. 1.7. Produkte des Gesteinskreislaufs (blau) und Prozesse (kursiv).

1.4.5 Der Kohlenstoffkreislauf

Wenn wir atmen, atmen wir mehr Kohlendioxid aus als wir einatmen. Dies liegt daran, dass einer der Körperprozesse die Atmung ist, bei der Sauerstoff mit Kohlenstoffverbindungen in den Zellen des Körpers reagiert, Energie freisetzt und Kohlendioxid produziert. Durch den Atmungsprozess wird ein Kohlendioxidstrom in die Atmosphäre freigesetzt, die ständig eine kleine Menge Kohlendioxid speichert (etwa 0,04 %). Alle Tiere geben durch die Atmung Kohlendioxid ab, aber auch durch Ausscheidungen und wenn sie sterben und verwesen, geben sie Kohlenstoffverbindungen an die Atmosphäre ab.

Die Verweilzeit von Kohlendioxid in der Atmosphäre ist kurz, da es schnell, hauptsächlich durch die Photosynthese von Pflanzen, entfernt wird. Bei der Photosynthese führt die Energie des Sonnenlichts dazu, dass Kohlendioxid mit Wasser reagiert und die Kohlenstoffverbindungen bildet, aus denen Pflanzen bestehen. Daher bilden die Pflanzen der Erde, insbesondere die Algen in den Ozeanen, einen großen Kohlenstoffspeicher. Dieser Kohlenstoff wird freigesetzt, wenn sie sterben (oder von Tieren gefressen werden) oder wenn Landpflanzen absichtlich oder durch Waldbrände verbrannt werden.

Box 1.5. Der Kohlenstoffkreislauf in Aktion.



Während dieser Wanderer in der Tundra Alaskas ruht, atmet er und bringt dadurch Kohlendioxid in die Atmosphäre ein. Währenddessen betreiben die grünen Pflanzen Photosynthese im Sonnenlicht, nehmen Kohlendioxid auf und bauen es in neue Pflanzenzellen ein. Würde der Wanderer die Beeren essen, wäre auch dies Teil des Kohlenstoffkreislaufs. Diese Ströme (Stoffflüsse) des Kohlenstoffkreislaufs finden überall auf der Erde statt, wo sich Tiere und Pflanzen befinden, auch direkt vor unseren Augen im Garten und der weiteren Umgebung.

Dies ist **der kurze Kohlenstoffkreislauf**, wie er von vielen Biologen untersucht wurde. Er beinhaltet Photosynthese und Atmung, Aufnahme und Zerfall. Dies scheint ein ausgeglichener Kreislauf zu sein, bei dem der Atmosphäre genauso viel Kohlenstoff zugeführt wie entzogen wird. Allerdings gibt es auch viel längere Abschnitte des Kohlenstoffkreislaufs; beispielsweise kann sich ein Teil des Kohlendioxids aus der Atmosphäre im Ozean lösen und dort Tausende von Jahren verweilen.

Einige Tiere und Pflanzen enthalten „harte Teile“ aus Kalziumkarbonat. Die chemische Formel für Kalziumkarbonat lautet CaCO_3 und das zweite „C“ in der Formel ist Kohlenstoff, der etwa 12 Masse-% von Kalziumkarbonat ausmacht. Unsere Knochen und die Knochen der meisten Tiere enthalten Kalziumkarbonat. Schalen bestehen aus Kalziumkarbonat und einige mikroskopisch kleine Pflanzen enthalten auch Kalziumkarbonat. Wenn diese Tiere und Pflanzen sterben, werden Teile davon als Sediment abgelagert und können durch Verfestigung zu Sedimentgesteinen werden, mit Verweilzeiten von Millionen von Jahren. Das kalziumkarbonatreiche Gestein, das hauptsächlich aus Überresten von Meerestieren besteht, wird Kalkstein genannt; eine Variante, die größtenteils aus mikroskopisch kleinen Kalziumkarbonat-Pflanzenresten besteht, wird auch als Kreide bezeichnet.

Wenn Pflanzen sterben, zerfallen sie normalerweise, wenn sie jedoch von Sedimenten überlagert und konserviert werden, bleibt auch der Kohlenstoff in ihnen erhalten. Wenn Landpflanzen konserviert werden, können sich daraus dicke Schichten Kohle bilden, die bei ihrer Reifung Erdgas freisetzen. Wenn mikroskopisch kleine Tiere und Pflanzen in den Ozeanen sterben, können sie auch im Sediment erhalten bleiben und später in Öl und Erdgas umgewandelt werden. Natürliche Prozesse geben diese Kohlenstoffspeicher über Millionen von Jahren wieder an die Atmosphäre ab. Öl und Gas können aufgrund ihrer geringen Dichte aufsteigen und an die Oberfläche gelangen und Kohle kann durch Hebung an die Oberfläche gebracht und durch Oberflächenprozesse entfernt werden.

Sedimentgesteine, die Kalkstein, Kreide, Kohle, Öl oder Erdgas enthalten, können an Gebirgsbildungsprozessen beteiligt sein und sich dabei verwandeln oder sogar teilweise schmelzen. Dann enthält das durch teilweises Schmelzen entstehende Magma gelösten Kohlenstoff, der bei Vulkanausbrüchen an die Oberfläche gebracht und freigesetzt werden kann. Bei vielen Eruptionen werden enorme Mengen Kohlendioxidgas in die Atmosphäre freigesetzt.

Auch diese längerfristigen Prozesse des Kohlenstoffkreislaufs scheinen im Gleichgewicht zu sein. Allerdings könnten menschliche Aktivitäten dieses Gleichgewicht verändern, indem sie Kohle, Öl und Erdgas entfernen und verbrennen. Dies wird in Abschnitt 4.3.3 erläutert.

Die Prozesse und Produkte der kurzen und längeren Kohlenstoffkreisläufe sind in Abb. 1.8 dargestellt.

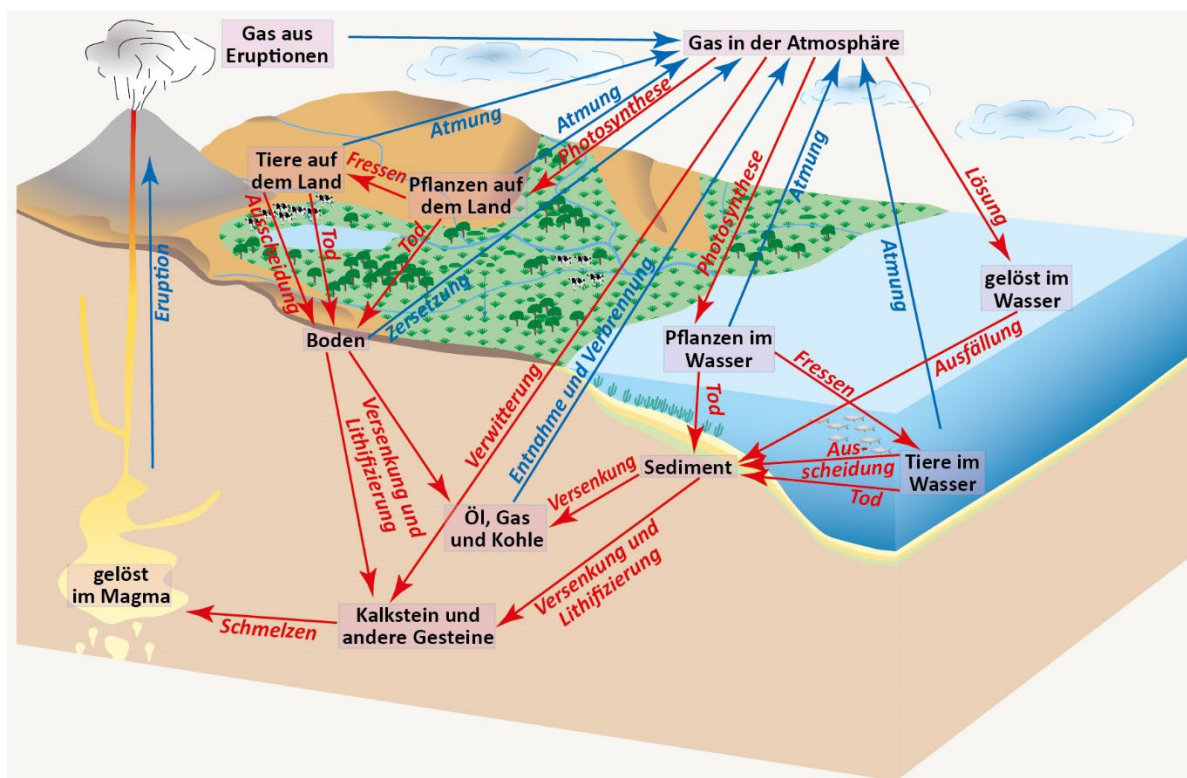


Abb. 1.8. Produkte des Kohlenstoffkreislaufs (Boxen) und Prozesse (*kursiv*) – Prozesse, die Kohlenstoff „fixieren“, werden **rot**, Prozesse, die Kohlenstoff freisetzen, **blau** dargestellt.

1.5 Energiequellen

Sonnenlicht liefert die Energie für die Photosynthese und ist die ursprüngliche Quelle des größten Teils der Energie, die den Wasserkreislauf und die Oberflächenprozesse des Gesteinskreislaufs antreibt.

Im Kohlenstoffkreislauf kann ein Teil der Energie, die in durch Photosynthese aufgebauten Pflanzenzellen gespeichert ist, freigesetzt werden, wenn Tiere die Pflanzen fressen. Dies liefert Energie für alle pflanzenfressenden Tiere auf der Erde. Raubtiere beziehen ihre Energie dann aus dem Verzehr anderer Tiere. Ein Teil dieser Energie kann in versenkten Pflanzen- und Tierresten gespeichert werden,

um später durch natürliche Prozesse oder menschliche Aktivitäten freigesetzt zu werden. Nur die Auftriebs-, Metamorphose- und Eruptivprozesse des Kohlenstoffkreislaufs werden von Energie angetrieben, die nicht von der Sonne stammt; Sie werden von der inneren Energie der Erde angetrieben.

Die Energie der Sonne führt als Teil des Wasserkreislaufs zur Verdunstung. Auch durch die Transpiration von Pflanzen wird Wasserdampf in die Atmosphäre freigesetzt, und Pflanzen könnten ohne Photosynthese nicht existieren. Energie von der Sonne verursacht auch Luftbewegung. Luft steigt über wärmeren Gebieten auf und sinkt in kühleren Gebieten ab, wodurch die horizontale Luftbewegung entsteht, die wir Wind nennen. Wasserdampf aus Gebieten mit starker Verdunstung oder Transpiration wird durch Windeinwirkung an andere Orte transportiert. Die Hauptteile des Wasserkreislaufs, die nicht von der Energie der Sonne abhängen, sind der Abwärtsstrom kühlender Luft unter der Schwerkraft der Erde und die kreisförmige Bewegung von Strömungen in der Atmosphäre und im Ozean, die aus der Drehung der Erde resultieren.

Im Gesteinskreislauf ist die Energie der Sonne wichtig für das Aufbrechen von Gestein und Boden an der Erdoberfläche. Zu den von der Sonne angetriebenen Teilen des Wasserkreislaufs, die Sedimente bewegen und ablagern, gehören Wasser- und Eisströme, während die von der Sonne angetriebene Luftbewegung auch Sedimente transportiert. Die Teile der Sedimentbewegung, die nicht von der Sonne angetrieben werden, sind die Abwärtsbewegung von Gestein, Wasser, Eis und Luftströmen unter der Schwerkraft der Erde und die Verdichtung von Sedimenten durch überlagernde Materialien, wiederum aufgrund von Gravitationseffekten.

Das Erdinnere trägt wesentlich weniger zur Energie bei, als die Erde von der Sonne erhält. Dennoch haben die inneren Energiequellen der Erde lebenswichtige Auswirkungen, insbesondere wenn sie über geologische Zeiträume hinweg wirken.

Etwas Energie ist im Kern geblieben, seit die Erde kurz nach ihrer Entstehung vollständig geschmolzen war. Diese Urenergie wird immer noch langsam freigesetzt. Eine weitere wichtige Energiequelle ist der radioaktive Zerfall in den festen Teilen der Erde tief unter der Oberfläche. Die innere Energie der Erde treibt die inneren Teile des Gesteinskreislaufs an, was zu Lithifizierung von Sedimenten, zu Verwerfungen (die Erdbeben verursachen), zu Faltung, zu Metamorphose, zu Hebung und zu teilweisem Schmelzen führt, das magmatische Aktivität verursacht.

Der größte Teil der Energie, die auf die Erde einwirkt, kommt also von der Sonne. Weitere Energiequellen sind die oben beschriebene Urenergie und Energie aus radioaktivem Zerfall. Darüber hinaus gibt es die potenzielle Gravitationsenergie und die kinetische Rotationsenergie. Die Anziehungskraft von Sonne, Erde und Mond sowie die Rotation der Erde, die Umlaufbahn des Mondes um die Erde und die gemeinsame Umlaufbahn von Erde und Mond um die Sonne werden in Wärmeenergie umgewandelt, die als „Gezeitenerwärmung“ bezeichnet wird.

2 Die Erde als System, innerhalb des Sonnensystems, innerhalb des Universums

2.1 Ursprünge

Obwohl die Lichtgeschwindigkeit mit fast 300.000 km/sek (= bewegt sich mit 300.000 Kilometer pro Sekunde fort) enorm ist, dauert es immer noch 8 Minuten, bis das Licht der Sonne uns erreicht, und mehrere Jahre, bis das Licht benachbarter Sterne unsere Augen erreicht. Der Blick in den Nachthimmel bedeutet also, dass wir in die Vergangenheit zurückblicken. Mit leistungsstarken Teleskopen können wir Galaxien oder kosmische „Inseln“ mit Milliarden bis Hunderten von Milliarden Sternen so sehen, wie sie in der fernen Vergangenheit aussahen. Unsere Studien haben gezeigt, dass das Universum vor etwa 14 Milliarden Jahren begann. Am Anfang gab es weder Sterne noch Galaxien, aber das gesamte Universum war mit hochenergetischer Strahlung gefüllt. Beim „**Urknall**“ begann sich das Universum auszudehnen und die Strahlung wurde in Materie umgewandelt.

Die häufigste Materieart ist Wasserstoff – das einfachste Atom. Allerdings besteht fast alles auf der Erde und darüber hinaus, einschließlich unseres eigenen Körpers, aus anderen Arten von Atomen, die ursprünglich in den Kernen von Sternen gebildet wurden. Als sich die Materie des Universums abkühlte, begannen sich Sterne zu bilden und sich zu Galaxien zusammenzuschließen. Die Energie, die Sterne, einschließlich unserer Sonne, antreibt, entsteht durch die Fusion (Verschmelzung) von Wasserstoffatomen zu größeren Atomen. So begannen sich in den Kernen von Sternen Atome zu bilden, die auf der Erde reichlich vorhanden sind, wie Silizium, Sauerstoff, Kohlenstoff, Stickstoff und Eisen. Im Laufe der Zeit schleuderten Sterne eine Menge Materie in den Weltraum, darunter auch diese neu gebildeten Atome. So begann sich vor etwa 4,6 Milliarden Jahren das Sonnensystem unserer Sonne aus dem ursprünglichen Wasserstoff und der „Asche“ früherer Sterne zu bilden. Unser Erdsystem ist ein Teil unseres Sonnensystems.



Abb. 2.1. Mit dem Hubble-Teleskop fotografierte Galaxien. Basierend auf den gesammelten Daten wurden Farben hinzugefügt, um die wichtigsten Merkmale der Bilder hervorzuheben.

Box 2.1. Das Universum im eigenen Garten.

Wir können die Sterne des Universums und einige der Planeten des Sonnensystems von unserem eigenen Garten aus sehen, aber wir werden noch viel mehr sehen können, wenn wir in einer mondlosen Nacht in ein nahegelegenes Landgebiet fahren, wo es keine Straßenlaternen oder andere Lichter gibt. Wenn unsere Augen sich an die Dunkelheit gewöhnt haben, erscheinen immer mehr Sterne. Sterne funkeln, aber wenn ein Planet im Blickfeld ist, leuchtet er gleichmäßiger. Wenn wir ein Licht sehen, das sich stetig über den Himmel bewegt, ist das ein Satellit, in dem sich die Sonne spiegelt. Wenn es wirklich dunkel ist, können wir möglicherweise ein Sternenband sehen, das sich über uns wölbt. Das ist die Milchstraße, die Sterne unserer eigenen Galaxie, die wir von der Kante aus sehen. Wenn wir eine Kamera mit einem Verschluss haben, der offen gelassen werden kann, und diese an einem stabilen Ort aufstellen, können wir diese Anblicke des Universums einfangen. Wenn wir den Verschluss eine Stunde oder länger geöffnet lassen, können wir auch zeigen, wie die Sterne scheinbar durch den Himmel fliegen, während sich die Erde dreht.



Kapelle in Frankreich unter der Milchstraße



Sternenbewegung, eingefangen durch einen offenen Kameraverschluss, Chile

Unser Sonnensystem enthält die in Tab. 2.1 gezeigten acht Planeten.

Tab 2.1. Planeten des Sonnensystems, in der Reihenfolge von der Sonne

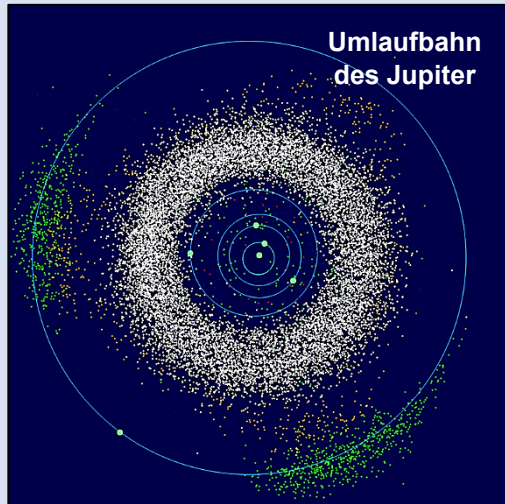
Name	Bild (nicht maßstäblich)	Entfernung von der Sonne, Millionen km	Durch- messer, km	Masse, 10^{24} kg	Durch- schnitt- liche Ober- flächen- temperatur, °C	Andere Eigenschaften
Merkur		57,9	4879	0,33	167	• Keine Monde • Oberfläche mit Kratern • Fester terrestrischer Planet
Venus		108,2	12.104	4,87	464	• Keine Monde • Von Wolken bedeckt • Oberfläche mit Kratern • Fester terrestrischer Planet
Erde		149,6	12.756	5,97	15	• Ein Mond • Ozeane • Einige Krater sind bekannt • Fester terrestrischer Planet • Platten-tektonik ist aktiv

Mars		227,9	6792	0,64	-65	• 2 Monde • Oberfläche mit Kratern • Großer Vulkan • Sedimentäre Prozesse in der Vergangenheit • Fester terrestrischer Planet
Jupiter		778,6	142.984	1898	-110	• 67 Monde • Ringsystem • Wolkengürtel • Große rote Sturmflecken • Gasriesenplanet
Saturn		1433,5	120.536	568	-140	• 62 Monde • Ringsystem • Wolkengürtel • Gasriesenplanet
Uranus		2782,5	51.118	86,8	-195	• 27 Monde • Ringsystem • Gasriesenplanet
Neptun		4495,1	49.528	102	-200	• 14 Monde • Ringsystem • Gasriesenplanet
Pluto wird nicht mehr als Planet geführt; er ist einer der Zwergplaneten						

Unser Sonnensystem enthält nicht nur Planeten und Zwergplaneten, sondern auch Gürtel aus **Asteroiden** und **Kometen**. Viele der Meteoriten, welche die Erde und andere Planeten trafen, stammten ursprünglich aus dem Asteroidengürtel oder von Kometen. Einschläge von Meteoriten und größeren Körpern gehören zu den katastrophalen Ereignissen, die sich im Laufe der Zeit auf die Erde und andere Planeten auswirkten; siehe Abschnitt 3.4.

Box 2.2. Der Asteroidengürtel.

Der Haupt-Asteroidengürtel liegt zwischen den Umlaufbahnen von Mars und Jupiter und enthält Milliarden und Abermilliarden von Gesteinsbrocken. Einige sind reich an Kohlenstoff, andere reich an Silizium und wieder andere an Nickel-Eisen. Der größte Asteroid hat einen Durchmesser von fast 1000 km, die meisten sind jedoch kieselgroß oder kleiner. Obwohl es viele Asteroiden gibt, sind sie so weit voneinander entfernt, dass viele Raumschiffe sie sicher und ohne Schaden durchquert haben. Während in anderen Teilen des Sonnensystems Meteoriten-Trümmer wie diese zusammenstießen und einen Planeten bildeten, scheint es, dass der nahegelegene große Planet Jupiter diesen Gürtel beeinflusst und die Planetenbildung verhindert hat.



Der Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter



Asteroid Gaspra, fotografiert von der Raumsonde Galileo

Box. 2.3. Kometen.

Kometen sind eisige Körper im Sonnensystem, die, wenn sie sich der Sonne nähern, Gase freisetzen, die oft einen weißen Schweif bilden. Der Schweif fließt in Richtung des Sonnenwinds und ist immer von der Sonne abgewandt. Viele Kometen haben riesige ovale Umlaufbahnen, die sie aus den Tiefen des Weltraums in das Herz des Sonnensystems und wieder hinaus führen.



Der Hale-Bop-Komet 1997 gesehen von Kroatien aus



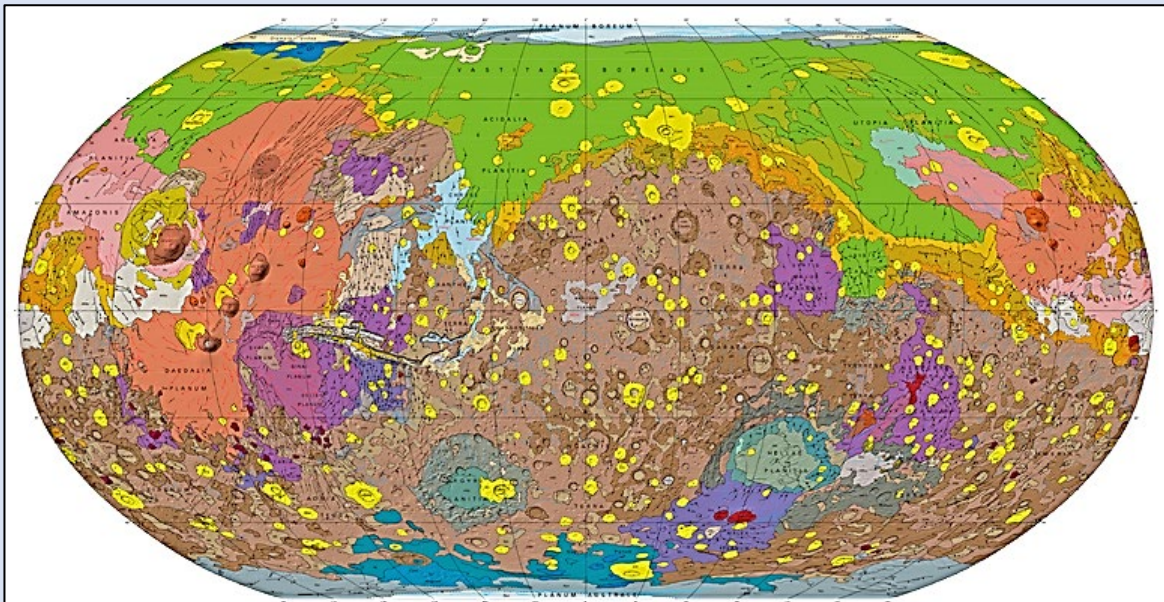
Komet Churyumov-Gerasimenko im September 2014, fotografiert von der Raumsonde Rosetta bevor der Lander Philae auf seiner Oberfläche landete

Die einzigen Körper im Sonnensystem, auf denen wir bisher Instrumente sicher landen konnten, sind der Erdmond, der Komet Churyumov-Gerasimenko, die Planeten Mars und Venus sowie der Saturnmond Titan.

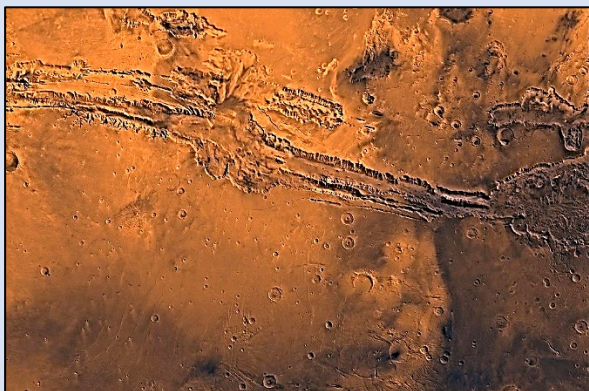
Box 2.4. Planetengeologie – Mars

Bevor wir Instrumente auf dem Mars landeten, hatten wir bereits eine sehr gute Vorstellung von der Geologie des Planeten, da die auf der Erde geltenden geologischen Prinzipien auch auf anderen Planeten gelten. Beobachtungen von Teleskopen und umlaufenden Satelliten hatten eine riesige Vulkanregion gezeigt, die 25 % der Oberfläche bedeckte, darunter drei riesige Vulkane, die größten Vulkane im Sonnensystem (rot und lila auf der Karte). Es gab auch sehr große Krater, die durch Einschläge entstanden waren, mit erhabenen Rändern und zentralen Vertiefungen, der größte hatte einen Durchmesser von 1800 km (gelb auf der Karte). In der Nähe des Äquators befand sich ein über 4000 km langes, tiefes Schluchtensystem, das in der fernen Vergangenheit durch Verwerfungen entstanden war. Einige Teile der Oberfläche wiesen vom Hochwasser durchschnitene Talsysteme auf. Mittlerweile wurden mehr als 4000 durch Wasser entstandene Täler mit Seebecken und Deltas kartiert.

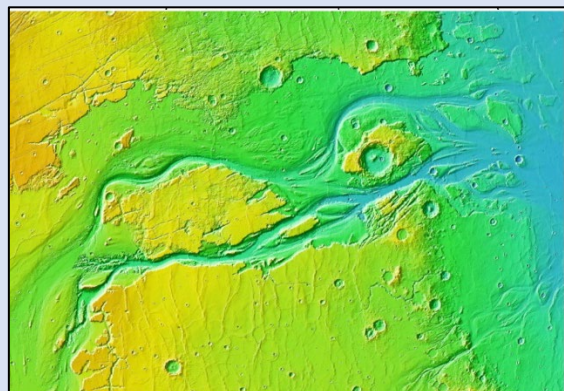
Die Lander haben noch mehr Beweise für den Wasserfluss geliefert, darunter Sedimentschichten und abgerundete Kieselsteine. Die Lander haben auch gezeigt, dass der größte Teil des Mars eine von Kratern übersäte Wüste ist, die von Felsbrocken und Staub bedeckt ist. Wo früher das Wasser über die Oberfläche floss, ist es heute nicht mehr da.



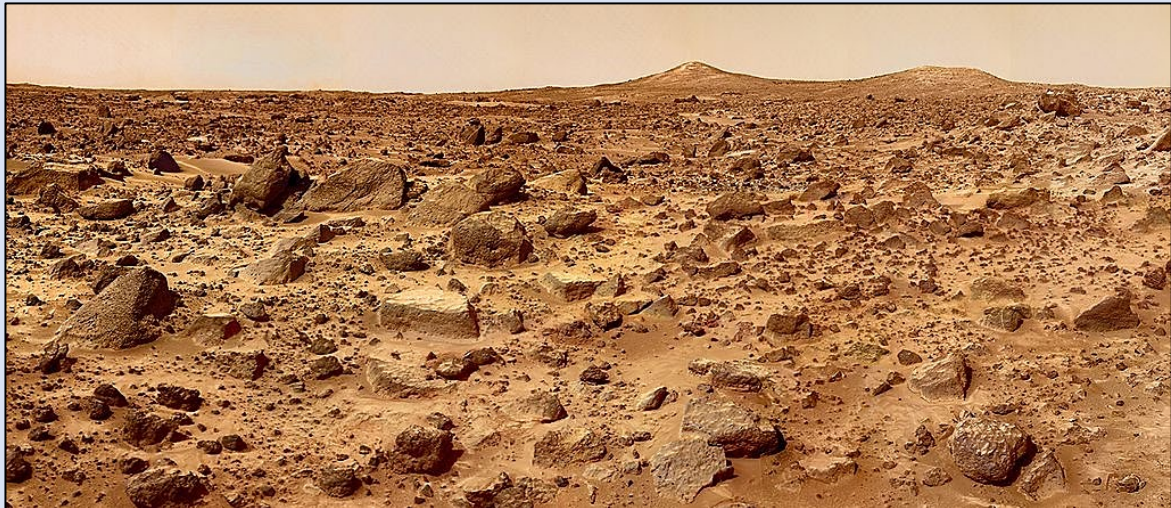
Geologische Karte des Mars. Grünflächen zeigen Tieflandgebiete; Rot- und Violettöne sind Vulkangestein. Blau sind polare Gebiete. Braune und orange Farben sind felsige Hochlandgebiete; Gelb sind Einschlagskrater



Von Störungen durchsetztes Canyonssystem in der Nähe des Äquators



Abflusskanal des Kasei Valle



Blick vom Pathfinder-Standort auf dem Mars – Felsbrocken und Staub im Vordergrund mit niedrigen Hügeln im Hintergrund

2.2 Die Sonne

Die Sonne ist unser Stern. Sie liefert Energie im gesamten Sonnensystem und darüber hinaus.

Energie von der Sonne durchdringt den Weltraum, meist in Form von sichtbarem Licht, Infrarot- und Ultraviolettstrahlung. Wenn diese Energie Land- und Meeresoberflächen erwärmt, wird ein Teil davon zurückgestrahlt und erwärmt die Atmosphäre. Tagsüber wird Energie von der Sonne empfangen und nachts wieder in den Weltraum abgestrahlt. Diese Energieströme gleichen sich aus, so dass die Temperatur auf der gesamten Erde täglich gleichbleibt. Die welt-raumgestützten Beobachtungen der Energieabgabe der Sonne seit den 1970er Jahren zeigen, dass sich diese Energieabgabe in mehreren Zyklen ändert, jedoch nur um etwa 0,1 %.

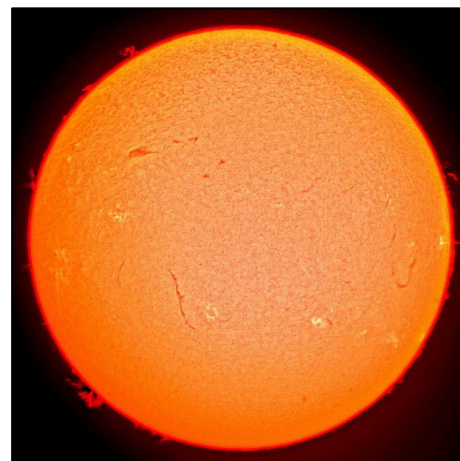


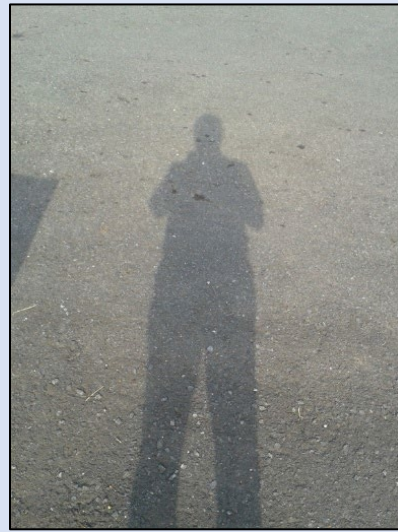
Abb. 2.2. Die Sonne – unsere Hauptenergiequelle

2.3 Sonne, Erde und Mond

2.3.1 Tag/Nacht

Die Erde empfängt Energie von der Sonne in Form von ultravioletter, sichtbarer und infraroter Strahlung, die die Erde erwärmt. Die Erwärmung ist am größten, wenn die Sonne am höchsten am Himmel steht, wie in Abb. 2.3 dargestellt. Wenn die Sonne direkt über uns erscheint, erwärmt ein 1 km breiter Strahlungsstrahl eine 1 km breite Zone der Erde. Wenn der Winkel der Sonne jedoch 30° beträgt, erwärmt ein ähnlicher 1 km breiter Strahl eine 2 km breite Zone der Erde. so dass an jedem Punkt die halbe Wärmemenge aufgenommen wird.

Box 2.5. Mit der Tageszeit wechselnde Schatten.



Wenn die Sonne mitten am Tag am höchsten am Himmel steht, sind die Schatten kurz. Wenn die Sonne untergeht, werden die Schatten länger. Der veränderte Stand der Sonne am Himmel ist das Ergebnis der Drehung der Erde. Hier wurde das linke Bild um 13.00 Uhr und das rechte um 16.00 Uhr in Ibadan in Nigeria aufgenommen.

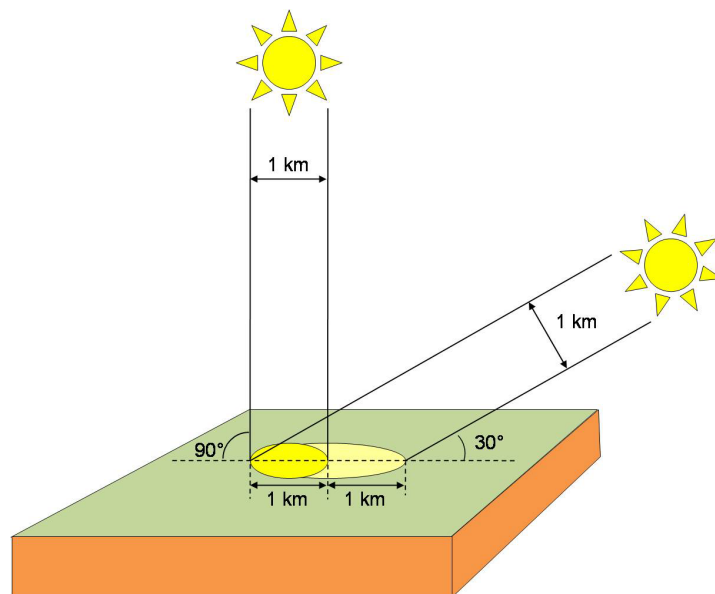


Abb. 2.3. Der Erwärmungseffekt des Winkels der Sonne am Himmel

Die Erwärmung der Erde braucht Zeit, sodass der wärmste Teil des Tages normalerweise später liegt als der Zeitpunkt, an dem die Sonne am höchsten am Himmel steht.

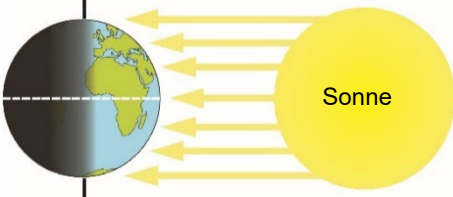
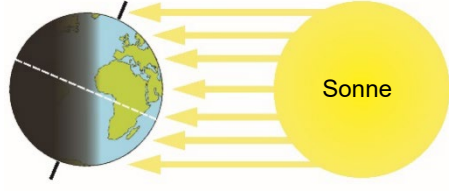
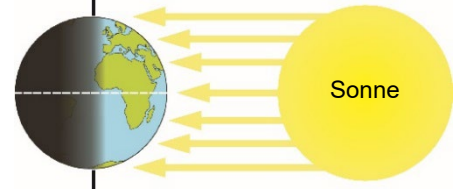
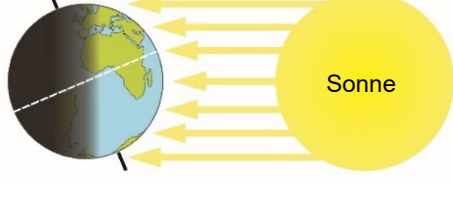
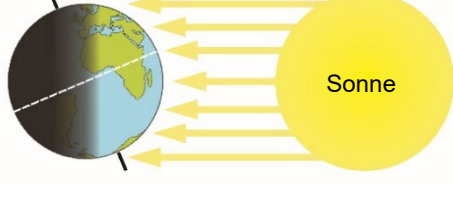
Die aufgenommene Wärmemenge hängt von der Beschaffenheit der Oberfläche ab. Dunkle Oberflächen absorbieren und strahlen mehr Wärme ab als helle Oberflächen, da die hellen Oberflächen mehr Strahlung reflektieren. Das ist der Albedo-Effekt. Land erwärmt sich schneller als Wasser, da das Wasser die aufgenommene Wärme in die Tiefe des Gewässers zirkuliert. Aber auch Land kühlt schneller ab als Wasser – denn das zirkulierende Wasser braucht Zeit, um seine Wärme abzugeben. Das heißt, wenn man in der Nähe eines großen Gewässergebietes wohnt, steigen die Temperaturen nicht so stark an, wie wenn man weit entfernt vom Wasser lebt, aber sie fallen auch nicht so tief. Daher weisen Küstengebiete normalerweise gemäßigte Temperaturhöhen und -tiefs auf als Binnengebiete.

Die Erde strahlt die Energie, die sie tagsüber aufgenommen hat, nachts als Infrarotstrahlung in den Weltraum zurück. Der kälteste Teil der Nacht ist normalerweise kurz nach der Morgendämmerung, wenn die ausgehende Strahlung wieder durch die einfallende Strahlung ausgeglichen wird.

2.3.2 Die Jahreszeiten

Der Erwärmungseffekt der scheinbaren Höhe der Sonne am Himmel in Abb. 2.3. wirkt sich auf die Jahreszeiten der Erde aus, wie in Tab. 2.2 dargestellt. Auch die Länge der Tage und Nächte hat einen wichtigen Einfluss.

Tab. 2.2. Die Neigung der Erdachse verursacht Jahreszeiten

Hemisphäre	Jahreszeit	Diagramm	Einstrahlungswinkel	Länge von Tag/Nacht
März			März	
Im Norden	Frühling		Gleicher Strahlungswinkel und gleiche Länge von Tag und Nacht überall auf der Erde	
Im Süden	Herbst		Juni	
Im Norden	Sommer		Im Norden warm weil:	
			Sonne steht hoch	Tage lang, viel Sonne
Im Süden	Winter		Im Süden kühl weil:	
			Sonne steht niedrig	Nächte lang, Wärmeverlust
September			September	
Im Norden	Herbst		Gleicher Strahlungswinkel und gleiche Länge von Tag und Nacht überall auf der Erde	
Im Süden	Frühling		Dezember	
Im Norden	Winter		Im Norden kühl weil:	
			Sonne steht niedrig	Nächte lang, Wärmeverlust
Im Süden	Sommer		Im Süden warm weil:	
			Sonne steht hoch	Tage lang, viel Sonne

In der Nähe des Äquators gibt es keine großen jahreszeitlichen Veränderungen, da die Sonne immer hoch am Himmel erscheint. Es bleibt daher das ganze Jahr über warm. Saisonale Schwankungen werden ebenso wie die Tagestemperaturen durch nahegelegene Gewässer gemildert. Daher bleibt es in Küstengebieten im Sommer normalerweise kühler als im Landesinneren, im Winter ist es jedoch wärmer.

2.3.3 Die Mondphasen

Wie die Erde wird auch die Hälfte des Mondes von der Sonne beleuchtet und die andere Hälfte liegt immer im Dunkeln. Der Mond braucht etwa 27 Tage, um die Erde zu umrunden. Wenn die von der Sonne beleuchtete Hälfte des Mondes der Erde zugewandt ist, können wir den gesamten Mond sehen – dies wird Vollmond genannt. Während der Mond seine Umlaufbahn fortsetzt, sehen wir immer weniger von der beleuchteten Seite und immer mehr von der dunklen Seite. Nach etwa 13 Tagen ist uns die

dunkle Seite des Mondes zugewandt, sodass wir sie überhaupt nicht mehr sehen können – dies ist die Neumondphase. Danach sehen wir immer mehr von der beleuchteten Seite des Mondes, während er sich wieder der Vollmondphase nähert, wie in Abb. 2.4. und 2.5.

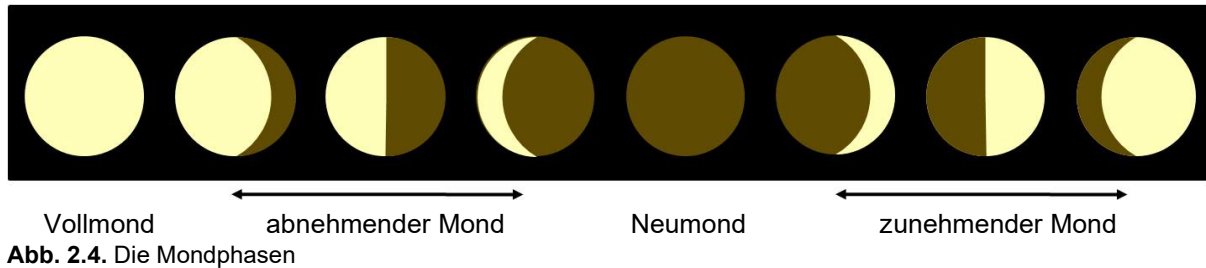


Abb. 2.4. Die Mondphasen



Abb. 2.5. Der Mond wird zum Vollmond – Collage aus drei Fotos

2.3.4 Finsternisse (Eklipsen)

Die Umlaufbahn des Mondes verläuft in einem Winkel zur Umlaufbahn der Erde, daher bewegt sich der Mond normalerweise nicht zwischen Erde und Sonne und die Erde bewegt sich nicht zwischen Mond und Sonne.

Manchmal bewegt sich der Mond jedoch genau zwischen der Erde und der Sonne. Dies wird als **Sonnenfinsternis** auf der Erde gesehen. Obwohl der Mond viel kleiner als die Sonne ist, ist er der Erde viel näher, so dass er, wenn er sich zwischen Erde und Sonne befindet, die Sonne vollständig bedecken kann. Während einer solchen Sonnenfinsternis ist zu beobachten, dass der Mond die Sonne nur in einigen Teilen der Erde bedeckt. In anderen Gebieten ist eine partielle Sonnenfinsternis zu beobachten, wie in Abb. 2.6.

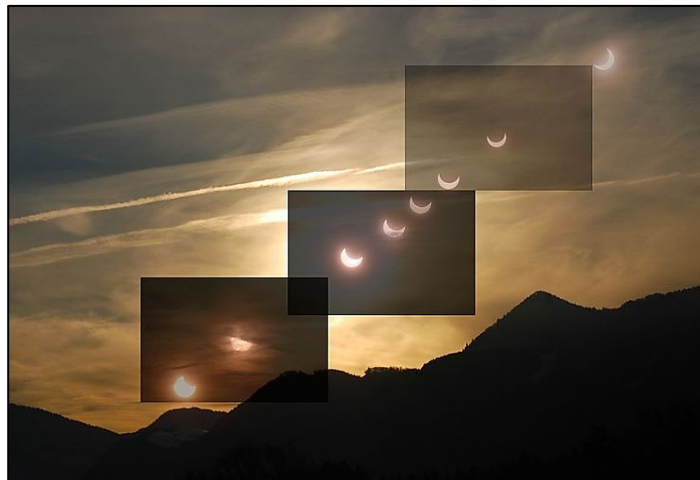


Abb. 2.6. Collage aus Fotografien einer partiellen Sonnenfinsternis, gesehen von Deutschland aus

Wenn wir eine Sonnenfinsternis beobachten möchten, müssen wir unsere Augen schützen, indem wir eine spezielle Sonnenfinsternisbrille tragen. Während wir zuschauen, werden wir die Umrisse des Mondes sehen, der die Sonne allmählich bedeckt, während es auf der Erde immer dunkler wird. Dann wandert der Mond weiter und es kehrt langsam wieder normales Tageslicht zurück.

Wenn sich der Mond hinter der Erde bewegt und Sonne, Erde und Mond in einer Linie stehen, bedeckt der Schatten der Erde den Mond bei einer **Mondfinsternis**. Der Schatten der Erde wandert weiter, bis er den gesamten Mond bedeckt und der Mond nicht mehr zu sehen ist. Dann wandert der Schatten weiter und der Mond erscheint wieder. Dabei kann die Lichtbrechung durch die Erdatmosphäre den Mond zeitweise rötlich-orange färben, Abb. 2.7.



Abb. 2.7. Collage aus Fotos einer Mondfinsternis, von Kalifornien, USA aus gesehen

3 Die Erde - ein sich im Laufe der Zeit veränderndes System

3.1 Geologische Zeitspanne

Die Erde ist laut **radiometrischer Datierung** fast genauso alt wie das Sonnensystem, nämlich 4,57 Milliarden Jahre (4570 Millionen Jahre alt).

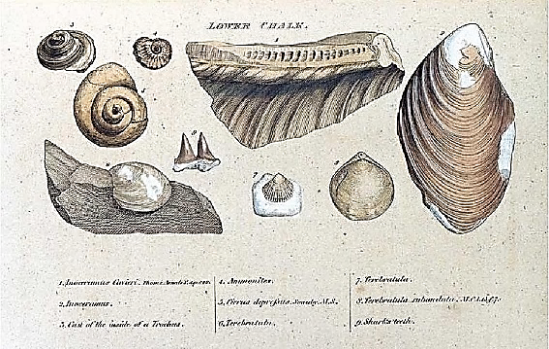
Bevor radiometrische Datierungen verfügbar wurden, hatten mehrere Geologen versucht, das Alter der Erde abzuschätzen. Sie waren zu dem Schluss gekommen, dass die Erde in der Tat sehr alt sei, und hatten geschrieben, dass das Studium der Erde wie ein Blick in einen „Abgrund der Zeit“ (John Playfair im Jahr 1805) sei, „ohne Spur eines Anfangs – ohne Aussicht auf ein Ende“ (James Hutton, 1795). Obwohl es zu dieser Zeit nicht möglich war, das Alter eines Ereignisses auf der Erde in Jahren (oder Millionen von Jahren) zu bestimmen, war es möglich, die geologischen Ereignisse in eine Ordnung zu bringen. Das Ordnen von Ereignissen wird als **relative Datierung** bezeichnet, auf diese Weise bestimmen können, welches Ereignis im Verhältnis zueinander älter und welches jünger war.

3.2 Relative Datierung

Bei der **relativen Datierung** werden verschiedene Methoden verwendet. Diese wurden vor langer Zeit entdeckt und werden seitdem von Geologen genutzt. Sie sind in Tab. 3.1 aufgeführt. Bei einigen Methoden handelt es sich um Gesetzmäßigkeiten, die meistens funktionieren, aber es könnte bestimmte geologische Umstände geben, unter denen sie nicht anwendbar sind; andere sind Naturgesetze, die immer funktionieren, solange die Beobachtungen sorgfältig gemacht werden.

Tab. 3.1. Relative Datierungsmethoden

Relative Datierungsmethode	Zuerst beschrieben von:	Details der Methode	Beispiel
Prinzip der Überlagerung von Schichten	Nicholas Steno, 1669	Bei der Ablagerung von Gesteinen sind die oben liegenden Gesteine die jüngsten (Ausnahmen gibt es beispielsweise, wenn eine Abfolge durch Verformung überkippt wird oder wenn durch Verwerfungen eine ältere Abfolge über eine jüngere geschoben wurde).	 Verkippte Grauwacken-Abfolge im Ruhrgebiet – die jüngsten Schichten liegen oben Gefaltete Lagen in Grönland – der Felsen an der Spitze der Insel ist überkippt, auf der Oberseite liegt älteres Gestein

Gesetz der Überschneidungsrelationen	Nicholas Steno, 1669	Alle Strukturen (z.B. Bruch, Erosionsoberfläche, Kluftfüllungen, etc.) die durch andere Strukturen schneiden, müssen jünger sein.	 Dikes in Granit, Korsika, Lumio. Ältestes: grauer Granit, durchlagen von hellem Aplitgang (horizontal). Jüngstes: dunkler Basaltgang (schräg).
Gesetz der eingeschlossenen Fragmente	Charles Lyell, 1830	Jedes in einem anderen Gestein enthaltene Fragment muss älter sein	 Herm, Kanalinseln, UK; Die Xenolithe (einschließlich der Fragmente) aus dunklem Gestein in hellerem Granit sind älter
Gesetz der Faunenabfolge	William Smith, 1816	Gruppen von Fossilien folgen in der Gesteinsfolge in einer bekannten Reihenfolge aufeinander, sodass wir die Gesteine zeitlich ordnen können	 Beispiel für eine von William Smiths Zeichnungen einer Gruppe von Fossilien, die zur Datierung eines Gesteins verwendet wurden
Deformierte/ metamorphisierte Gesteine müssen älter als undeformierte und nicht metamorphe Gesteine sein – ein Gesetz	unbekannt	Da Deformationen und regionale metamorphe Ereignisse alle Gesteine einer Region betreffen, müssen alle nicht deformierten oder nicht metamorphisierten Gesteine jünger sein	 Winkeldiskordanz in Bochum, Ruhrgebiet. Das undeformierte obere Gestein (Kreide) ist jünger als das darunter liegende deformierte und geneigte graue Gestein (Grauwacke, Karbon)

Einige dieser relativen Datierungsmethoden basieren auf zwei weiteren wichtigen Prinzipien, die erstmals von Nicholas Steno beschrieben wurden, wie in Tabelle 3.2 gezeigt.

Tab. 3.2. Prinzipien der Ablagerung von Sedimenten, Laven und Vulkanasche

Prinzip der Gesteinsbildung	Zuerst beschrieben von:	Details	Beispiel - dem Prinzip folgend	Beispiel - dem Prinzip widersprechend
Prinzip der ursprünglichen Horizontalität	Nicholas Steno, 1669	Sedimentschichten liegen ursprünglich horizontal (ebenso wie Lava und Vulkanasche) – manchmal aber auch schräg	 Horizontal abgelagerte kreidezeitliche Sedimente – Anröchte, Nordrhein-Westfalen	 Ursprünglich nicht horizontal abgelagerte Sedimente – kreuzgeschichtete (lagige) Sande abgelagert während der Vereisungsphase in Estland
Prinzip der lateralen Kontinuität	Nicholas Steno, 1669	Sedimentschichten, Lava- und Ascheablagerungen setzen sich seitlich über große Flächen fort – es gibt jedoch ungewöhnliche Situationen, in denen dies nicht der Fall ist	 Lateral durchgehende Sedimentgesteine des Grand Canyon, Arizona, USA	 Nicht kontinuierliche Sedimente, – verflochtene Flussablagerungen in Island – die an den Talseiten enden

Mithilfe dieser Prinzipien und Gesetze lässt sich die geologische Geschichte eines Gebietes ermitteln, ohne das tatsächliche Alter der Gesteine zu kennen.

Box 3.1. Verwendung relativer Datierungsmethoden zur Ermittlung der geologischen Geschichte der Gesteine; als Beispiel diese Gesteinsabfolge in der Negev-Wüste in Israel:



- Die horizontal liegenden Sedimentgesteine wurden der Reihe nach abgelagert, sodass nach dem „Prinzip der Überlagerung“ die ältesten Gesteine unten liegen
- Die Sedimente wurden ursprünglich horizontal und kontinuierlich über eine weite Fläche abgelagert, wie im „Prinzip der ursprünglichen Horizontalität“ und dem „Prinzip der lateralen Kontinuität“
- Die dickere Schicht nahe der Basis der Abfolge ist ein Konglomerat mit Geröllen. Nach dem „Gesetz der eingeschlossenen Fragmente“ müssen die Gerölle älter sein als die Schicht, in der sie sich befinden.
- Das Gestein wurde von einem vertikalen Gang aus magmatischem Gestein zerschnitten, das gemäß dem „Gesetz der Überschneidungsrelationen“ jünger sein muss als die

horizontal liegenden Sedimente, die es durchschneidet

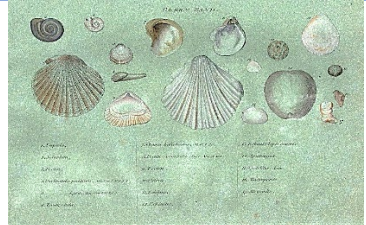
- Alle Strukturen wurden durch die Erosionsoberfläche, welche die heutige Felswand darstellt, zerschnitten, so dass dies das jüngste Ereignis gemäß dem „Gesetz der Überschneidungsrelationen“ ist.

Die Geschichte dieser Gesteinsabfolge ist:

- | | | |
|------------------|---|---|
| Letztes Ereignis | * | Die heutige Oberfläche (oben) und die Wand des Kliffs wurden erodiert. |
| | * | Die Gesteinsabfolge wurde entlang einer Spalte von flüssiger Lava zerschnitten, die sich zu einem Gang verfestigte. |
| | * | Die restlichen Schichten wurden nach oben hin immer jünger werdend abgelagert. |
| | * | Die unterste Schicht in der Felswand wurde abgelagert, gefolgt vom Konglomerat mit den Kieselsteinen |
| Erstes Ereignis | * | Ein Gestein entstand, das später zu Kieselsteinen erodiert wurde. |

William Smith verwendete Fossilien, um die relative Datierung von Gesteinen zu ermöglichen. Er beschrieb seine Methode als „Gesetz der Faunensukzession“. Er erkannte, dass viele Sedimentgesteinsschichten bestimmte Fossilengruppen enthielten, die über große Gebiete nachweisbar waren. Das bedeutete, dass er immer dann, wenn er ein Gestein mit einer bestimmten Gruppe von Fossilien fand, wusste, dass es sich um gleichaltrige Gesteine handelte. Diese Methode wird **Korrelation** genannt. Er erkannte auch, dass Schichten, die bestimmte Gruppen von Fossilien enthielten, immer in der gleichen Reihenfolge gefunden wurden. Außerdem erkannte er, dass sich über oder unter einem Gestein, in dem er eine Gruppe von bestimmten Fossilien fand, Gesteine mit anderen Gruppen von Fossilien befinden würden, wie in Tab. 3.3 gezeigt. Obwohl Smith seine Methode nutzte, um Gesteine miteinander in Beziehung zu setzen und sie in Sequenzen anzuordnen, wusste er nicht, warum die Fossilien immer in derselben Reihenfolge gefunden wurden. Erst später erkannte Charles Darwin, dass der Grund für diese Ordnung in der **Evolution** lag.

Tab. 3.3. William Smiths Methode, die das „Gesetz der Faunensukzession“ anwendet

William Smith's Reihenfolge		Altersbeziehung zu Perioden der geologischen Zeitskala, wie sie von Smith erkannt wurden	William Smith's Originalzeichnungen von Fossilengruppen
Jüngstes	Unterer Kalk	Obere Kreide	
	Grünsand	Untere Kreide	
	„Oak Tree Clay“; jetzt als Kimmeridge-Ton bezeichnet	Oberer Jura, Kimmeridgium	

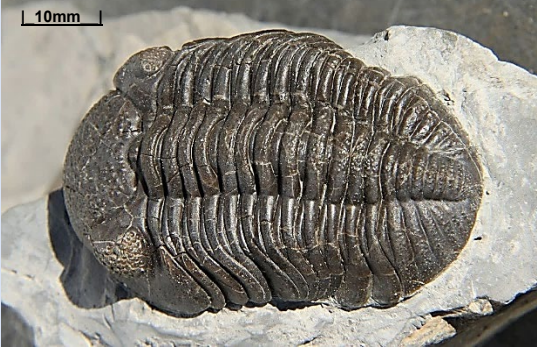
Ältestes	Kelloways Stein	Mittlerer Jura	
----------	-----------------	----------------	---

Wir können Smiths Methode nun umfassender anwenden, da wir wissen, dass bestimmte Fossilien nur innerhalb bestimmter geologischer Zeitabschnitte vorkommen. Durch die Identifizierung der Fossilien kennen wir also das geologische Alter der Gesteine, wie in Tab. 3.4.

Tab. 3.4. Typische Fossilien, die in Gesteinen unterschiedlichen Alters gefunden wurden

Geologisches Alter des Gesteins	Fossil, das nur Gesteinen dieses Alters gefunden wird	Bild des Fossils
Quartär	<i>Argopecten gibbous</i> , Jakobsmuschel – lebt auf dem Meeresboden, kann aber ihre Schalen zusammenklappen, um sich fortzubewegen und Raubtieren zu entkommen; gefunden in neogenen, quartären und rezenten Sedimenten; Dies ist ein rezent Exemplar.	
Neogen	<i>Crassostrea titan</i> , Austernschalen, die an felsigen Meeresküsten lebten. Dieses Exemplar stammt aus der Santa-Margarita-Formation, Kalifornien, USA	
Paläogen	Fossile Zähne des ausgestorbenen Sandtigerhais <i>Carcharias tingitana</i> . Zähne dieses Hais kommen nur im Paläogen vor; diese Exemplare stammen aus Khouribga, Marokko.	

Kreide	<i>Micraster leskei</i>, Stachelhäuter, ein Seeigel, der auf und im Sediment des Meeresbodens lebt; diese Art kommt nur in der Kreidezeit vor, obwohl andere <i>Micraster</i>-Formen im Paläogen vorkommen; Dieses Exemplar stammt aus der Kreide in der Nähe von Puy, Dieppe, Frankreich.	
Jura	<i>Calliphylloceras</i>, Ammonit, der wie ein Oktopus mit Schale lebte und im Meer schwamm. Die Wände zwischen den Kammern, die hier durch schwarze Farbe hervorgehoben werden, hatten sehr komplexe Formen. Diese Formen kommen nur in Ammoniten aus der Jura- und Kreidezeit vor	
Trias	<i>Ceratites ceratite</i>, Ammonoid; er lebte im Meer schwimmend wie ein Oktopus mit einer Schale; hatte Wände zwischen den Kammern, die zur Mündung der Schale hin sanft gekrümmt waren, in der anderen Richtung jedoch komplex. Dieses Exemplar stammt aus dem Oberen Muschelkalk. Hohenlohe bei Heilbronn.	
Perm	Goniatit-Ammonoid (auch in Gesteinen aus dem Karbon und dem späten Devon zu finden); wie ein kleiner Oktopus mit Schale; lebte im Meer schwimmend – hatte Wände zwischen den Kammern mit einfachen Zick-Zack-Formen	

Karbon	<i>Caninia</i> , solitäre rugose Korallen, die im Meeresboden verwurzelt lebten. Diese Exemplare stammen aus dem Lecompton-Kalkstein in Kansas, USA.	
Devon	<i>Phacops</i> , Trilobit – lebte auf dem Meeresboden, wahrscheinlich als aktives Raubtier. Dieses Exemplar stammt aus dem Silica Shale aus dem mittleren Devon, Ohio, USA.	
Silur	<i>Monograptus</i> , Graptolith mit einem einzigen Arm, der eine Kolonie von Graptolith-Tieren trägt; schwamm im Ozean.	
Ordovizium	<i>Tetragraptus</i> , Graptolith mit vier Armen*; Jeder der Arme trug eine Kolonie kleiner Graptolith-Tiere. die Kolonie schwamm im Ozean. Dieses Exemplar stammt aus der Bendigo-Serie des unteren Ordoviziums, Bendigo, Victoria, Australien *Auf dem Foto sind nur drei der vier Arme (Stiele) zu sehen	
Kambrium	<i>Paradoxides</i> , Trilobit; sie lebten auf dem Meeresboden und waren wahrscheinlich Raubtiere.	

Als Geologen Fossilien zur Korrelation und Sequenzierung von Gesteinen verwendeten, entdeckten sie, dass es an bestimmten Stellen im Fossilienbestand zu plötzlichen Veränderungen in Fossilengruppen kam. Wir wissen heute, dass dies daran lag, dass es zu dieser Zeit große Aussterbeereignisse gab, aber die frühen Geologen waren vor allem daran interessiert, wie diese Veränderungen zur Aufteilung von Gesteinen genutzt werden könnten. Die Fossilien wurden zur Identifizierung geologischer Perioden verwendet (die Namen sind in der ersten Spalte von Tabelle 3.4 aufgeführt).

Box 3.2. Ein Beispiel für eine geologische Periode – die Trias

Die Trias-Periode ist die erste Periode des Mesozoikums („mittleres Leben“) und wurde 1834 von Friedrich von Alberti aufgrund ihrer drei Hauptschichten (tri = drei) benannt, die in ganz Deutschland und in ganz Nordwesteuropa vorkommen. Dabei handelt es sich um rote Schichten an der Unterseite, gefolgt von einem Kalkstein und einer Reihe von Tonsteinen/Sandsteinen an der Oberseite. Aufgrund der großen Veränderungen in den Fossilien, die an der Basis und am oberen Ende der Sequenz gefunden wurden, war er in der Lage, die Trias-Gesteine von den darunter liegenden und darüber liegenden Gesteinen zu unterscheiden. Wir wissen jetzt, dass dies das Ergebnis eines groß angelegten Massenaussterbens war.

Heutzutage werden die Positionen wichtiger Grenzen in der geologischen Säule, wo immer möglich, durch einen „**Global Boundary Stratotype Section and Point**“ (GSSP) identifiziert. Irgendwo auf der Erde wird ein Ort gefunden, an dem es eine Reihe fossilführender Schichten mit dem richtigen Alter gibt, wo die genaue Position der Grenze gefunden werden kann. An dieser Stelle wird ein „goldener Dorn“ (Golden Spike) angebracht, um diesen wichtigen Bezugspunkt zu markieren.

Der „goldene Dorn“ für das untere Ende der Trias (und damit für das obere Ende der vorangegangenen Perm-Periode) befindet sich in Meishan in der chinesischen Provinz Zhejiang, wo in der geologischen Abfolge erstmals ein Conodonten-Mikrofossil namens *Hindeodus parvus* auftaucht.

Die Spitze der Trias (und damit die Basis der Jurazeit) hat ihren „goldenen Dorn“ am Kuhjoch in Tirol in Österreich, wo der Ammonit *Psiloceras spelae tiolicum* erstmals gefunden wurde.



Der „goldene Dorn“ – Markierung mit einem bronzenen Nagel – an einer der geologischen Grenze innerhalb der Trias-Zeit – mit einem Gipsabdruck des Ceratits, der dort erstmals in den geologischen Aufzeichnungen auftaucht und die Grenze markiert

Relative dating methods had been used to work out the relative ages of rocks and geological periods for many years, but we did not know how old the periods were, or the ages of the boundaries between the periods, until radiometric dating became available.

3.3 Absolute Datierung

Eine radiometrische Altersdatierung wurde möglich, als man entdeckte, dass die in manchen Gesteinen und Mineralen enthaltenen radioaktiven Elemente in andere Elemente zerfallen. Der zeitliche Ablauf des Zerfalls erfolgt auf vorhersehbare Weise, die in einer Grafik dargestellt werden kann; Dies wird oft als **radioaktive Zerfallskurve** bezeichnet (Abbildung 3.1).

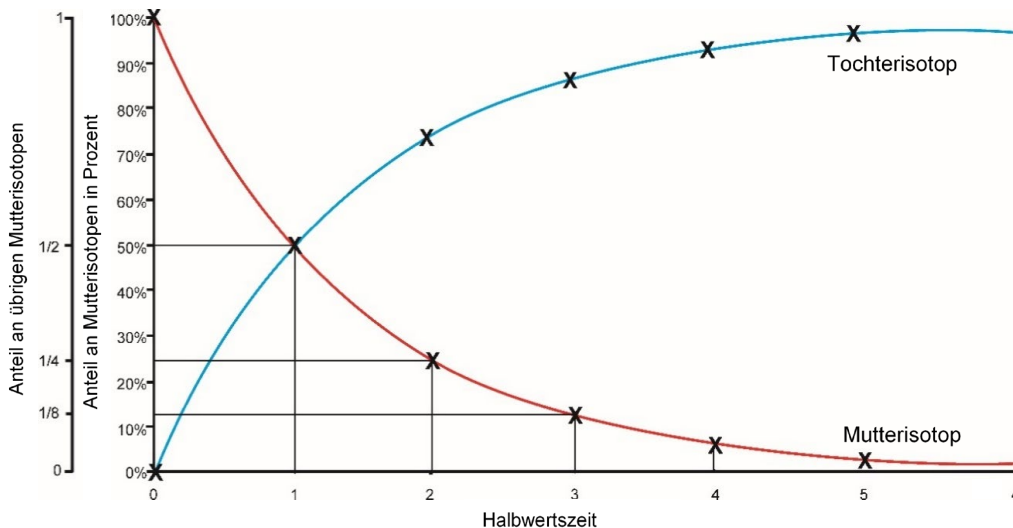


Abb. 3.1. Die radioaktive Zerfallskurve für den Abbau aller radioaktiven Stoffe

Das radioaktive Element, das zerfällt, wird als Mutterisotop bezeichnet; Das neue Element, das durch den Zerfall entsteht, ist das Tochterisotop. Die Grafik zeigt, dass nach einer gewissen Zeit die Hälfte des Elements abgebaut ist und das Tochterisotop entsteht; Diese Zeit wird als Halbwertszeit bezeichnet. Nach einer weiteren **Halbwertszeit** ist eine weitere Hälfte des Mutterisotops zerfallen, so dass nur noch ein Viertel davon übrig ist; Die Substanz enthält dann 25 % des Mutterisotops und 75 % des Tochterisotops. Nach Ablauf einer dritten Halbwertszeit ist ein weiteres Achtel (12,5 %) des Mutterisotops abgebaut, so dass die Substanz zu 12,5 % aus Mutterisotop und zu 87,5 % aus Tochterisotop besteht. Der Zerfall setzt sich fort, wobei der Anteil des Mutterisotops immer geringer wird, während die Zahl der Tochterisotope immer größer wird.

Obwohl alle radioaktiven Stoffe nach diesem Muster zerfallen, variiert die Länge ihrer Halbwertszeit enorm, von Milliarden Jahren bis hin zu Mikrosekunden und weniger. Wenn wir ein radioaktives Element mit bekannter Zerfallsrate wählen, können wir die Mengen der Mutter- und Tochterisotope messen und so das Alter ermitteln, in dem sich das Tochterisotop erstmals gebildet hat. Dies gibt dann das Alter des Minerals oder Gesteins an, in dem es vorkommt. Diese Methode wird als **absolute Datierung** bezeichnet, da sie ein Alter in Jahren, Tausenden, Millionen oder Milliarden Jahren angibt. Da die Messungen einen rechnerisch geringen Fehler aufweisen, werden radiometrische Datierungsmessungen immer mit dem angezeigten ⁶ en Fehler angegeben.

Box 3.3. Der Fehlerbereich bei absoluten radiometrischen Altersdaten.



Die Stadt Edinburgh in Schottland ist um einen alten Vulkan herum gebaut. Zur Datierung des Ausbruchs wurden Feldspatminerale aus dem Vulkangestein verwendet. Der radioaktive Zerfall des Argons im Feldspat ergab ein Alter von 349 ± 4 Millionen Jahren, was zeigt, dass der Vulkan vor 353 bis 345 Millionen Jahren im Karbon ausbrach

Die absolute Datierung kann nur für Gesteine oder Minerale verwendet werden, welche die richtige Art radioaktiver Elemente enthalten, und gibt das Alter an, an dem sich dieses Gestein erstmals gebildet hat. Dies funktioniert gut für die meisten magmatischen und einige metamorphe Gesteine. Für Sedimentgesteine ist es nicht so nützlich, da die Sedimentkörner früher gebildet wurden, bevor sie erodiert und abgelagert wurden. Dies macht es schwierig, radiometrische Daten mit fossilen Korrelationsdaten zu verknüpfen, da die Fossilien in Sedimentgesteinen gefunden werden. Dies ist einer der Gründe, warum es lange dauerte, den Grenzen zwischen den Perioden in der geologischen Spalte absolute Altersdaten zuzuordnen. Diese Alter wurden jedoch inzwischen fast alle bestätigt, sodass wir die in Tab. 3.5 gezeigte Spalte mit geologischen Altern erstellen können. In der letzten Spalte dieser Tabelle wurden wichtige Ereignisse der Erdgeschichte hinzugefügt.

Tab. 3.5. Die wichtigsten Unterteilungen der geologischen Zeit basieren auf der neuesten International Chronostratigraphic Chart, die von der International Commission on Stratigraphy veröffentlicht wurde *

Äon	Ära	Periode	Abkürzung	Alter	Wichtige Ereignisse
Phanerozoikum	Känozoikum	Quartär	Q	0	
				2,6	3.3 Älteste Steinwerkzeuge
		Neogen	N		
	Mesozoikum	Paläogen	Pg	23	50 Himalayagebirge
				66	66 K-Pg Massenaussterben
		Kreide	K		
	Mesozoikum	Jura	J	145	130 Erste Blütenpflanzen
				160	Erste Vögel
		Trias	T	201	190 Öffnung des Atlantischen Ozeans
	Paläozoikum			220	Erste Säugetiere
		Perm	P	252	252 'Großes Sterben' Massenaussterben
				299	299 Superkontinent Pangäa bildet sich
		Karbon	C		315 Erste Reptilien
		Devon	D	359	370 Erste Amphibien
				419	
		Silur	S	444	
		Ordovizium	O	485	400 Erste Insekten
Präkambrium	Proterozoikum			541	430 Erste Landpflanzen
	Archaikum				530 Erste Fische
					541 Erste Hartteile/Schalen
	Hadäikum				2.000 Erste vielzellige Organismen
					2.100 Erste Eukaryoten
				2.500	2.700 Freier Sauerstoff in der Atmosphäre
					3.500 Erste Bakterien und Algen
				4.000	4.000 Älteste bekannte Gesteine
				4.570	4.570 Geburt der Erde

* Da die Methoden zur Gesteinsdatierung verbessert wurden, haben sich einige der Daten in der Tabelle im Laufe der Zeit geändert. Tabelle 3.5 zeigt die neueste Version.

3.4 Geschwindigkeiten von Prozessen

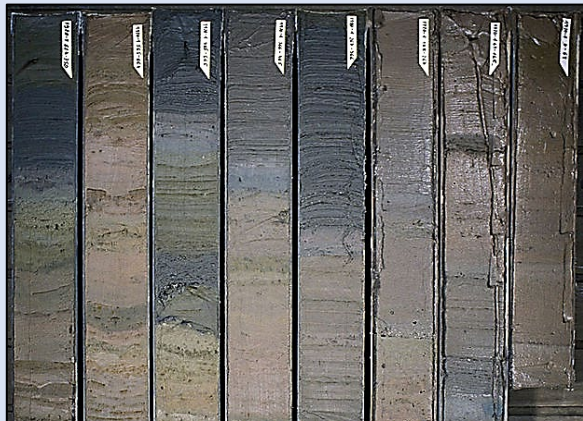
Früher glaubte man, dass die meisten geologischen Prozesse langsam und stetig abliefen. Wir wissen jetzt, dass einige zwar sehr langsam und stetig verlaufen, andere jedoch sehr schnell und katastrophal sein können. Beispielsweise dauert die Ablagerung einer Sedimentgesteinsfolge Millionen von Jahren, einzelne Schichten können jedoch in Sekundenschnelle abgelagert werden. Ebenso kann das Abkühlen von flüssigem Magma tief unter der Erde, bis es zu einem festen magmatischen Gestein wird, Millionen von Jahren dauern, während Vulkane in Sekundenschnelle ausbrechen können. Felsen können langsam angehoben werden, beispielsweise wenn das darüber liegende Eis geschmolzen ist und das Land ansteigen lässt, oder sie können bei Erdbeben plötzlich um viele Meter angehoben werden.

Mittlerweile scheint es, dass die Evolution, die ebenfalls als stetiger Prozess angesehen wurde, oft in plötzlichen Ausbrüchen stattfindet, während Massenaussterben ebenfalls oft als plötzliche Katastrophen erscheinen.

Es ist also klar geworden, dass die Milliarden Jahre dauernde geologische Aufzeichnung eine Aufzeichnung einer Kombination aus extrem langsamen Prozessen ist, die von heftigen, katastrophalen Prozessen durchsetzt sind, wobei in allen dazwischen liegenden Zeitspannen wiederum andere Prozesse ablaufen.

Box 3.4. Von sehr, sehr schnellen bis hin zu sehr, sehr langsamen Prozessen

In der Tiefsee setzen sich feine Schlämme sehr, sehr langsam aus der Suspension im Meerwasser ab, sodass der Aufbau einer Sedimentabfolge Millionen von Jahren dauern kann. An Land, in Küstengebieten und in den Tiefen des Ozeans können Sedimentschichten jedoch manchmal sehr viel schneller, innerhalb von Tagen oder sogar Stunden, durch Stürme, Erdbeben oder andere katastrophale Ereignisse abgelagert werden.



Kerne von Tiefseesedimenten aus der Tiefsee bei Grönland; die Sedimentschichten haben sich über lange Zeiträume hinweg aufgebaut



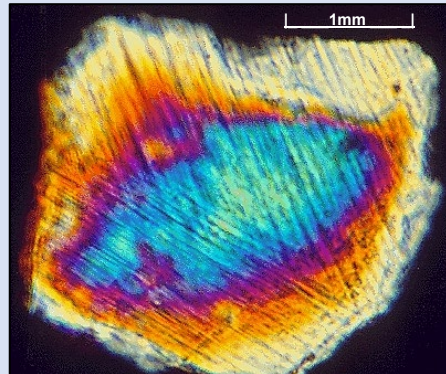
Graue Schicht einer 8.000 Jahre alten Tsunami-Lage in Schottland, die in wenigen Minuten abgelagert wurde, mit Schichten aus dunklem Torf darüber und darunter

Box 3.5. Katastrophale Einschlagereignisse (Impakt)

Objekte aus dem Weltraum kollidieren häufig mit der Erde und anderen Planeten, die meisten davon sind jedoch sehr klein und werden nicht entdeckt. Allerdings treffen **Asteroiden** mit einem Durchmesser von 1 km im Durchschnitt alle halbe Million Jahre auf die Erde, während Asteroiden mit einem Durchmesser von 5 km etwa alle 20 Millionen Jahre mit der Erde kollidieren. Viele kleine Asteroiden zerfallen in der Atmosphäre, aber größere treffen auf die Erde und hinterlassen Krater. Die Größe des Aufpralls hängt vom Durchmesser, der Dichte, der Geschwindigkeit und dem Winkel des kollidierenden Körpers ab. Obwohl Vulkankrater Einschlagskratern oft sehr ähnlich sehen können, weisen nur Einschlagskrater kleine glasartige Perlen auf, die Tektite genannt werden, oder „geschockten Quarz“, der durch die Verformung des Quarzes während des Einschlags entsteht. Bei einigen Einschlägen entstehen auch Iridiumschichten sowie Ruß- und Ascheschichten.



Häufige Tektitformen – Hantel und Tropfen



Geschockter Quarz mit Deformationsebenen, die unter dem Mikroskop in polarisiertem Licht sichtbar sind

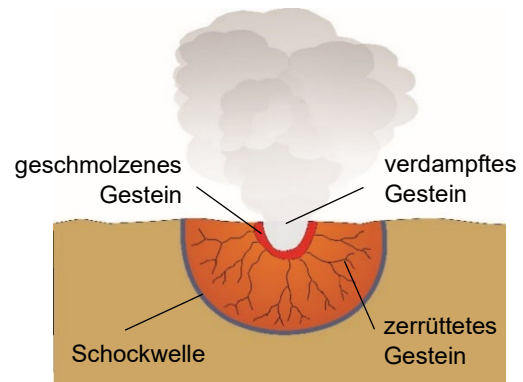
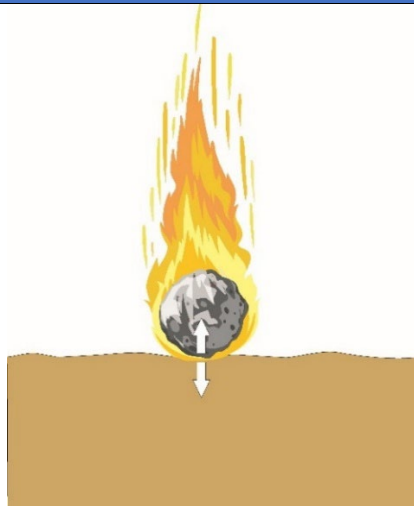


Lonar-Meteoritenkrater in Indien – entstanden durch einen Einschlag, der vermutlich vor etwa 52.000 Jahren stattgefunden hat.

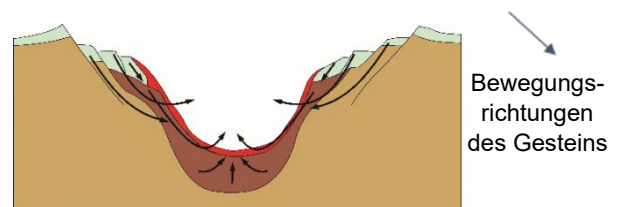
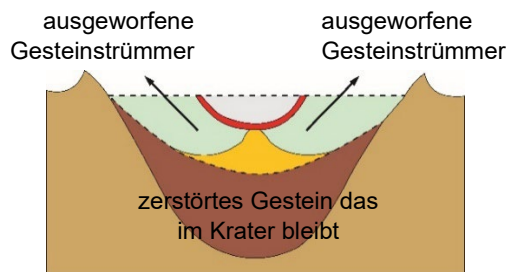


Der 100 km große Manicouagan-Krater in der Region Côte-Nord, Québec, Kanada, von der Internationalen Raumstation aus gesehen – entstanden durch einen Einschlag vor 215 Millionen Jahren

Die Geologie der Einschläge ist ungewöhnlich, da viele der Ereignisse in Sekundenschnelle stattfinden und nicht in den viel längeren Zeitspannen, die Geologen normalerweise untersuchen. Auswirkungen haben normalerweise die unten gezeigten Phasen. Das Ergebnis ist die bekannte Kraterform, die der Meteorkrater zeigt.



Stadium 1 – Kontakt und Kompressionsphase



Stadium 2 – Auswurfphase

Stadium 3 – Modifikationsphase

Stadien eines Impaktereignisses



Meteorkrater (Barringer) in der Nähe von Flagstaff in Arizona, USA, zeigt eine typische Einschlagsmulde mit erhöhtem Zentrum, umgeben von einem hohen Kraterrand – entstanden vor etwa 50.000 Jahren

4 Das Erdsystem besteht aus interagierenden Sphären

Das gesamte Erdsystem besteht aus sehr vielen Teilsystemen, die sich in 4 große Einheiten (Sphären) unterteilen lassen: **Geosphäre**, **Hydrosphäre**, **Atmosphäre** und **Biosphäre**. Unter diesen verschiedenen Teilsystemen gibt es viele Wechselwirkungen und Rückkopplungen, wie in Kapitel 1 gezeigt.

4.1 Geosphäre

Die Geosphäre ist die feste Erde. Sie umfasst die gesamte Erde mit Kern, Mantel, Kruste, Gesteinen, Mineralen, Fossilien und Böden. Dazu gehören auch alle Prozesse, die sich auf die feste Erde und ihre Materialien auswirken.

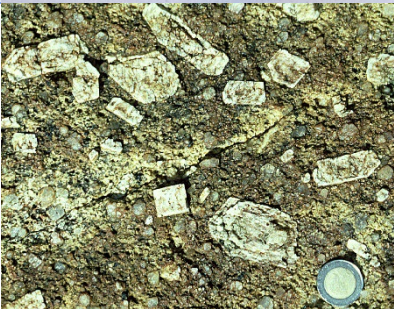
4.1.1 Erdmaterialien und Eigenschaften

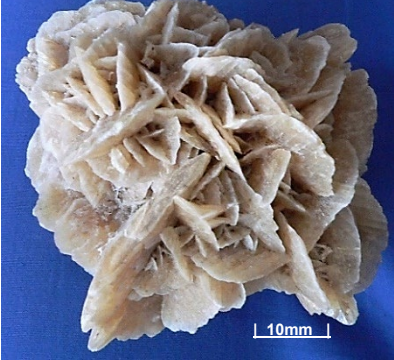
Der äußere Teil der Erde besteht aus Gesteinen und diese wiederum bestehen aus Mineralen oder Bruchstücken anderer Gesteine und werden oft von Erde (Bodenbildungen) überlagert.

4.1.1.1 Minerale

Minerale sind natürlich gebildete anorganische Substanzen mit festen Kristallstrukturen und spezifischen Eigenschaften. Sie können aus einzelnen Elementen bestehen, die meisten sind jedoch chemische Verbindungen aus zwei oder mehr Elementen. Da natürlich gebildete Substanzen normalerweise nicht so rein sind wie hergestellte Chemikalien, können sie geringfügige Unterschiede in der Chemie, Kristallstruktur und physikalischen Eigenschaften aufweisen. Verschiedene Minerale erkennt man an ihren Eigenschaften – Schlüsseleigenschaften sind Farbe, Kristallform, Härte und die Art und Weise, wie sie brechen. Einige Minerale weisen besondere Eigenschaften auf, die ihre Identifizierung erleichtern, beispielsweise die Reaktion von Kalzit mit verdünnter Salzsäure, der salzige Geschmack von Halit oder die hohe Dichte und der metallische Glanz von Erzmineralen wie Bleiglanz. Häufige Minerale sind in Tab. 4.1 aufgeführt.

Tab. 4.1. Häufig vorkommende Minerale, ihre Chemie, Form und physikalischen Eigenschaften

Name	Bild	Chemie	Form von gut gebildeten Kristallen	Physikalische Eigenschaften
Quarz Doppelender-Quarz: Suttrop, Sauerland, Rauchquarz: Namibia, Bergkristall: Oman		Siliziumdioxid, SiO_2	Nahezu sechseckige (sechsseitige) Formen	Normalerweise weiß, grau oder farblos, kann aber auch andere blassere Farben haben; hart; schwer zu brechen
Feldspat Kalifeldspat-Kristalle in Granit: Insel Elba, Italien, Capo St. André		Calcium/ Natrium/ Kaliumsilikat; wechselnd von $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ bis $(\text{K,Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$	Oft kastenförmig	Normalerweise weiß oder grau, manchmal rosa; hart; bricht entlang ebener Flächen

Glimmer Kristalle von einer unbekannten Lokalität		Komplexes Silikat aus Silizium und Sauerstoff mit Calcium, Natrium, Kalium, Aluminium, Magnesium und/oder Eisen	Nahezu hexagonale (6-seitige) Platten	Normalerweise farblos oder schwarz; geringe Härte; lässt sich leicht in flache, papierdünne Blätter zerbrechen
Kalzit eine Ansammlung gelblicher Kalzitkristalle mit Hundezahnmuster aus der Kristalle aus: Nkana Mine, Zambia		Kalziumkarbonat; CaCO_3	Häufig hundezahnförmige Kristalle	Weiß oder farblos; ziemlich geringe Härte; lässt sich leicht in schiefe Würfel-formen zerbrechen (spalten); reagiert mit verdünnter Salzsäure
Halit (Steinsalz) Kristalle aus: Wieliczka Salzwergwerk, Polen		Natriumchlorid; NaCl	Würfelförmig	Farblos, weiß oder rosa; geringe Härte; zerbricht (spaltet) sehr leicht in Würfelform; salziger Geschmack
Gips Kristalle von einer unbekannten Lokalität in Form einer 'Wüstenrose'		Kalziumsulfat; $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Dünne Kristalle bilden „Wüstenrosen“ wie auf dem Bild	Farblos, weiß oder rosa; geringe Härte; bricht (spaltet) leicht auf ebenen Flächen
Pyrit Kristalle von einer unbekannten Lokalität		Eisensulfid; FeS_2	Oft würfelförmig oder mit 5-eckigen Kristallflächen (Pentagon-dodekaeder)	Glänzendes, messingfarbenes Gelb; hart; schwer zu brechen; hohe Dichte

Bleiglanz (Galena) auf Kalzit Kristalle aus: Gibraltar Mine, Naica, Chihuahua, Mexico		Bleisulfid; PbS. Bleierz-Art	Oft würfelförmig	Glänzendes Grau; geringe Härte; zerbricht (spaltet) leicht in Würfelform; hohe Dichte
--	---	------------------------------------	---------------------	--

Box 4.1. Ein ungewöhnliches Mineral – Diamant



„Big Hole“ in Kimberley,
Südafrika



Diamant in Kimberlit



Geschliffene Diamanten

Diamanten entstehen unter großem Druck tief unter der Erdoberfläche aus dem Element Kohlenstoff. Sie werden in ungewöhnlichen Vulkangesteinen, sogenannten Kimberliten, an die Oberfläche gebracht. Das aufsteigende Magma bohrt mit großer Geschwindigkeit röhrenförmige Pipes durch die Kruste nach oben und führt die Diamanten mit sich. Diamanten werden aus Kimberlitpipes abgebaut, wie im „Big Hole“ in Kimberley, Südafrika, wie auf dem Foto zu sehen ist. Bei der Erosion von Kimberliten werden die Diamanten in Flusssedimenten transportiert und in alluvialen Ablagerungen abgelagert; Aus diesen Lagerstätten werden auch viele Diamanten abgebaut.

Diamanten sind so besonders, weil starke atomare Kohlenstoffbindungen sie zum härtesten Mineral der Erde machen. Außerdem haben sie eine sehr hell glänzende Oberfläche. Rohdiamanten, wie der auf dem mittleren Foto gezeigte, können geschliffen werden, damit sie das Licht noch stärker reflektieren, was sie zu den wertvollsten Edelsteinen macht, die in der Schmuckherstellung verwendet werden. Kleinere Diamanten werden aufgrund ihrer hohen Härte zum industriellen Schneiden und Polieren von sehr harten Materialien verwendet und werden häufig auch in Bohrern von Zahnärzten eingesetzt.

4.1.1.2 Gesteine

Gesteine sind natürlich entstandene Stoffe. Sie bestehen aus Mineralen, Fragmenten anderer Gesteine oder Fossilien und entstehen durch die in Abschnitt 1.4.4 beschriebenen Prozesse des Gesteinskreislaufs. Gesteine werden anhand ihrer chemischen Zusammensetzung und ihrer physikalischen Beschaffenheit identifiziert und beschrieben. Die chemische Zusammensetzung hängt mit den Mineralen zusammen, aus denen das Gestein besteht, während die Beschaffenheit des Gesteins von der Art und Größe der Partikel sowie deren Anordnung abhängt. Diese Merkmale hängen wiederum mit der Widerstandsfähigkeit der Gesteine gegen Abtragung sowie mit ihrer Porosität und Durchlässigkeit zusammen.

Porosität ist die Menge an Hohlraum oder Poren in einem Gestein, gemessen in Prozent. 15 % Porosität ist eine hohe Porosität für Gesteine; Die meisten Gesteine haben eine viel geringere Porosität. Die **Durchlässigkeit** (Permeabilität) von Gestein misst, wie schnell Flüssigkeiten durch Gestein fließen können. Gesteine mit hoher Porosität weisen eine hohe Durchlässigkeit auf, wenn die Poren groß genug für den

Durchfluss von Flüssigkeiten sind und die Poren miteinander verbunden sind. Gesteine mit sehr kleinen Porenräumen, wie z. B. Tone, lassen keine Flüssigkeiten durch und sind daher porös, aber undurchlässig. Auch die Gasblasenlöcher in manchen Laven sind nicht miteinander verbunden, sodass das Gestein zwar porös, aber undurchlässig ist (Abbildung 4.1). Gesteine, die aus ineinandergreifenden Kristallen bestehen oder die gut zementiert oder sehr feinkörnig sind, verhindern den Durchfluss von Flüssigkeiten und sind **undurchlässig**, es sei denn, sie weisen Risse und Brüche auf. Porosität und Permeabilität steuern die Mengen natürlicher Flüssigkeiten wie Wasser und Öl sowie Gas, die in Gesteinen gespeichert werden können und durch diese hindurchfließen.

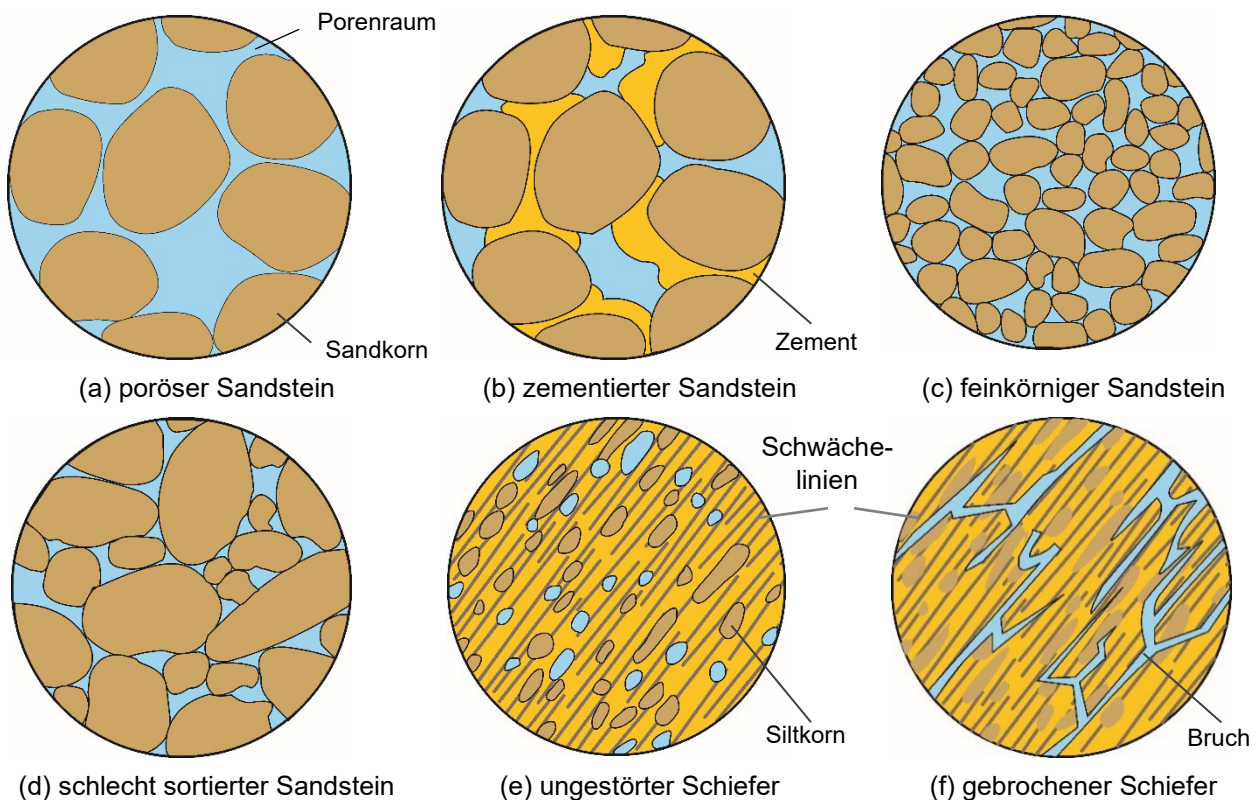


Abb. 4.1. Porosität und Durchlässigkeit in Gesteinen. Die Porosität und Durchlässigkeit in (a) wurde durch Zement in (b) verringert; in (c) ist sie recht gering, da die Porenräume klein sind; in (d) ist sie ebenfalls gering, da die Porenräume zwischen größeren Körnern durch kleinere gefüllt wurden; der ungestörte Schiefer in (e) ist undurchlässig, bis er in wie (f) gebrochen wird.

Gesteine, die aus zusammengepressten und/oder auf natürliche Weise zementierten Körnern bestehen, sind **Sedimentgesteine** – sie können eine Reihe unterschiedlicher Zusammensetzungen und Texturen aufweisen. Die häufigsten Sedimentgesteine sind reich an Quarz-, Feldspat- und Tonmineralen. Diese können eine Reihe von Korngrößen aufweisen, von grobkörnigen Konglomeraten (mit abgerundeten Komponenten) und Brekzien (eckige Komponenten) über mittelkörnige Sandsteine bis hin zu feinkörnigen Sedimentgesteinen wie Tonsteinen und Siltsteinen. Kalksteine sind ebenfalls häufige Sedimentgesteine und bestehen hauptsächlich aus Fragmenten von Kalziumkarbonatmineralen wie Kalzit, meist aus zerbrochenen Schalen. Kalksteine sind daran zu erkennen, dass Kalziumkarbonat mit verdünnter Säure reagiert – ein Tropfen Salzsäure auf Kalkstein löst eine zischende Reaktion aus. Auch Kalksteine reichen von grobkörnig bis feinkörnig und in der Farbe von grau über cremefarben bis hin zum Weiß feinkörniger Kreide.

Magmatische und metamorphe Gesteine bestehen aus ineinandergreifenden Kristallen, die sie normalerweise sehr widerstandsfähig gegen Verwitterung und außerdem undurchlässig machen, sofern es nicht zerbrochen wird. In gröbkörnigen Gesteinen sind die ineinandergreifenden Kristalle mit bloßem Auge oder mit einer Handlinse zu erkennen.

Magmatische Gesteine waren einst geschmolzenes Gestein, das **Magma** genannt wird. Sie bildeten sich als das Magma abkühlte und die Minerale auskristallisierten, wobei sie sich verzahnten und dadurch ein festes

Gestein bildeten. Minerale unterschiedlicher Zusammensetzung haben unterschiedliche Farben und kristallisieren bei unterschiedlichen Temperaturen. Daher handelt es sich bei magmatischen Gesteinen um Mischungen von Mineralen unterschiedlicher Farbe, Form und Größe. Die Kristalle haben normalerweise zufällige Orientierungen. Die einzige Ausnahme von der Bildung magmatischer Gesteine durch Abkühlung von Magma besteht, wenn Magma explosionsartig in Form von festen Blöcken oder Vulkanasche aus Vulkanen geschleudert wird.

Metamorphe Gesteine entstehen aus sedimentären, magmatischen oder älteren metamorphen Gesteinen durch **Metamorphose**, die durch Temperatur- und Druckerhöhungen oder beides verursacht wird. Sie entstehen im festen Zustand, es findet also kein Schmelzen statt (durch Schmelzen entstandene Gesteine sind magmatische Gesteine). Der Temperaturanstieg entsteht entweder durch das Aufheizen durch ein nahegelegenes Magma oder dadurch, dass es tief versenkt wird. Wenn Druck im Spiel ist, können sich metamorphe Gesteine nur bei Plattenkollisionen bilden und nicht einfach durch den Überlagerungsdruck dicker darüber liegender Gesteinssequenzen. Metamorphe Gesteine, die allein durch erhöhte Temperatur entstehen, weisen zufällig ausgerichtete ineinandergreifende Kristalle auf, wohingegen metamorphe Gesteine, die durch erhöhten plattentektonischen Druck entstanden sind, ineinandergreifende Kristalle aufweisen, die im rechten Winkel zum Druck ausgerichtet sind. Marmor ist ein metamorphes Gestein aus Kalziumkarbonatkristallen und reagiert mit verdünnter Salzsäure auf die gleiche Weise wie Kalkstein.

Diese Eigenschaften ermöglichen es, die drei großen Gesteinsgruppen voneinander zu unterscheiden: durch Untersuchung der Körner oder Kristalle, durch Prüfung der Durchlässigkeit (durch Tropfen von Wasser auf die Oberfläche oder durch Eintauchen von Proben ins Wasser und Beobachten aufsteigender Blasen) und durch Kratzen der Gesteine mit einem Fingernagel oder einem Stück Metall, zum Beispiel einem Nagel oder einem Messer. Die verschiedenen Möglichkeiten sind in Tab. 4.2 dargestellt. Auch Kalkstein und Marmor reagieren mit verdünnter Salzsäure.

Tab. 4.2. Ergebnisse einfacher Tests zur Unterscheidung der drei Hauptgesteinsgruppen

Beobachtung/Test Gesteinsgruppe	Untersuchung von Körnern/Kristallen	Durchlässigkeitstest	Kratztest
Sedimentär	Zusammengeklebte oder zusammengepresste Körner	Wasser dringt ein oder Blasenströme steigen aus der Probe auf, es sei denn, sie ist feinkörnig oder gut zementiert	Leicht zu kratzen, sofern es nicht gut zementiert ist
Magmatisch	Miteinander verwachsene Kristalle, zufällig ausgerichtet	Wasser dringt nicht in die Probe ein; es steigen keine Blasen aus der Probe auf	Schwer zu kratzen, wenn es nicht schon deutlich verwittert ist
Metamorph	Miteinander verwachsene Kristalle, zufällig ausgerichtet, wenn sie hauptsächlich durch Hitze entstanden; parallel oder subparallel, wenn sie durch Druck und Hitze zusammen gebildet werden		

4.1.1.3 Fossilien

Zu den **Fossilien** zählen alle erhaltenen Spuren von Leben, wobei sie in der Regel älter als 10.000 Jahre sein sollten. Ihre Größe reicht von den größten Dinosauriern bis zu den kleinsten Mikrofossilien (Abb. 4.2.).

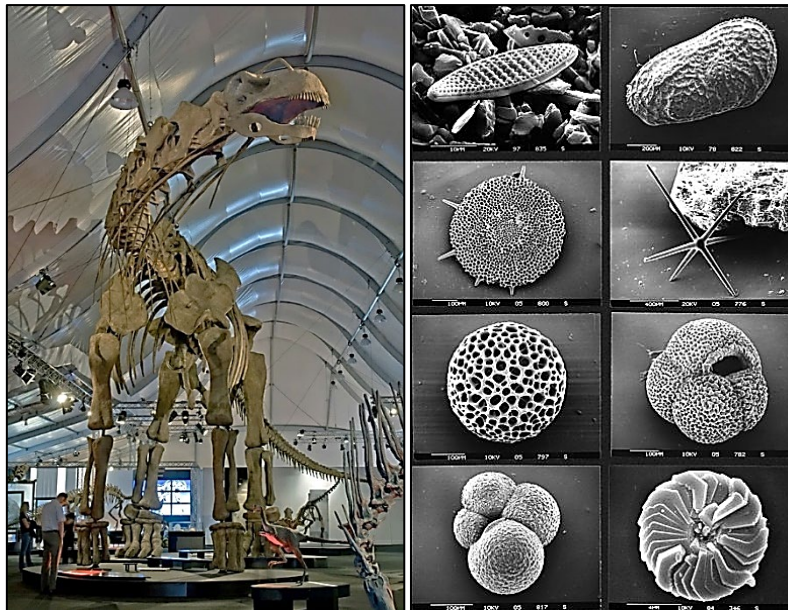


Abb. 4.2. *Argentinosaurus* aus Argentinien, die größte bisher bekannte Dinosaurierart, und Rasterelektronenmikroskopaufnahmen (REM) von winzigen Meeresmikrofossilien.

Fossilien kommen in Sedimentgesteinen und einigen schwach (nicht stark metamorphisierten) metamorphen Gesteinen vor. Dabei handelt es sich um die konservierten Überreste der harten Teile von Organismen wie Muscheln oder Knochen und in seltenen Fällen auch der weichen organischen Teile (einschließlich Haut, Fell, Federn usw.). In einigen Fällen wurden die ursprünglichen Materialien Atom für Atom durch andere Minerale ersetzt, die möglicherweise alle ursprünglichen Eigenschaften beibehalten oder auch nicht. Manchmal lösten sich Fossilien auf und hinterließen Löcher (Abdruckform) im umgebenden Gestein. Die Formen wurden möglicherweise später mit anderen Materialien gefüllt und bildeten Abgüsse der ursprünglichen Fossilien (Abb. 4.3).

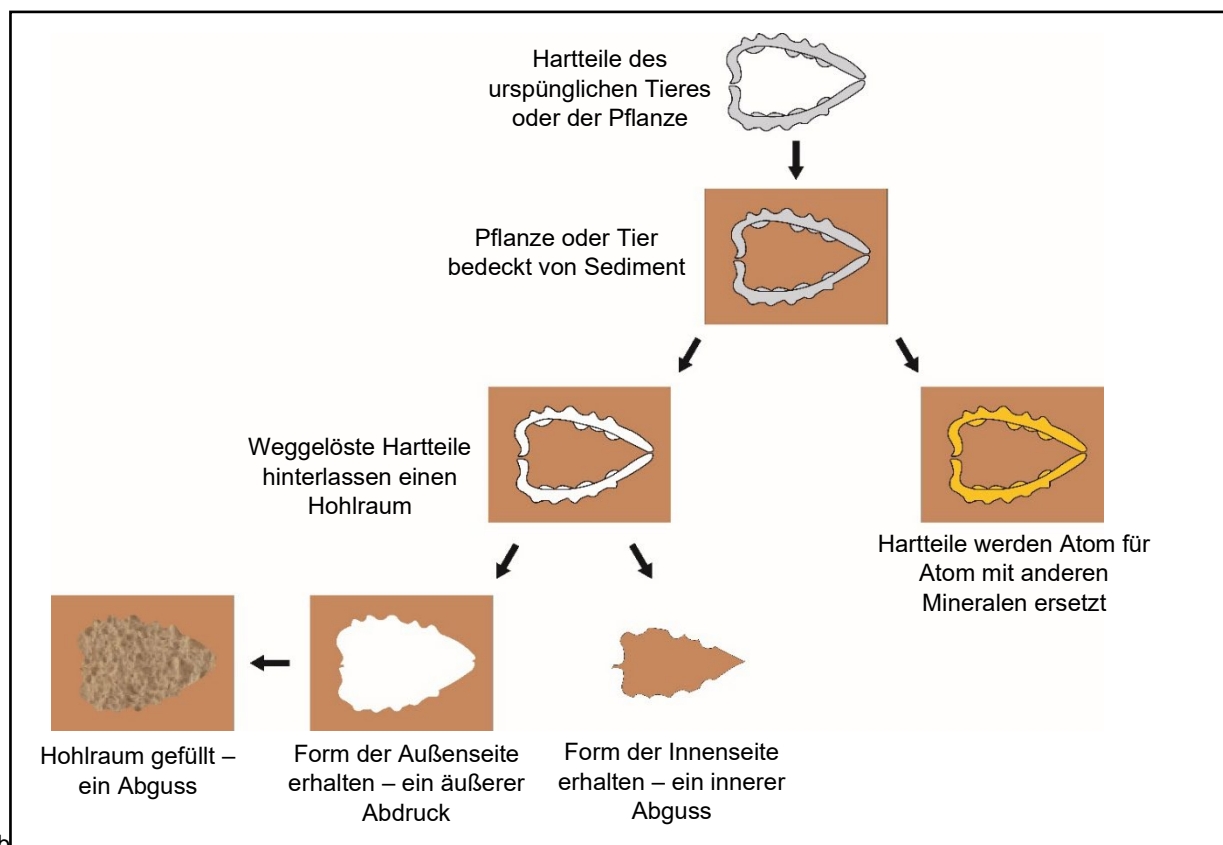


Abb. 4.3. Fossilisierung (Versteinerung)

Konservierte Zeugnisse der Körper von Fossilien werden als **Körperfossilien** bezeichnet, während **Spurenfossilien** die von Organismen im Sediment hinterlassenen Spuren sind, wie etwa Fußabdrücke, Höhlen, Bohrungen und Wurzelspuren. Wichtige Versteinerungsarten sind in Tab. 4.3 dargestellt.

Tab. 4.3. Wichtige Prozesse der Fossilisierung

Fossilisierungs- prozess	Bild	Fossilgruppe
Einbettung – Weich- und Hartteile erhalten		<i>Eurohippus</i> , kleines, etwa hunde großes Säugetierfossil, Vorfahr des Pferdes – mit Knochen und erhaltenem Fell Fossil aus der Grube Messel, UNESCO-Welterbe, Eozän. Senckenberg-Museum, Frankfurt am Main.
Einbettung - nur Hartteile erhalten		Trilobit der Gattung <i>Calymene</i> Fossil aus der Henryhouse Formation, in der Nähe von Ada Oklahoma, USA; Silur
Ersatz – ursprüngliches Mineral durch neues Mineral ersetzt		Ammonit, ursprünglich mit einem Gehäuse aus Kalziumkarbonat, ersetzt mit Pyrit Fossil aus Bully Calvados, Frankreich; Jura

Hohlraum- bildung		Die innere und äußere Form einer schneckenartigen Gastropode (das Fossil selbst wurde aufgelöst, sodass die Form der Innen- und Außenseite des Gehäuses zurückbleibt) Fossil aus der Galena-Formation, Iowa, USA; Ordovizium
Bildung eines Abdrucks		Abdruck eines Dinosaurier-Fußabdrucks. Der Dinosaurier hinterließ einen Fußabdruck im Schlamm, der hart wurde, bevor er mit Sand gefüllt wurde. Jetzt wurde der Schlamm entfernt und der Sandstein auf den Kopf gestellt, um den Sandsteinguss freizulegen Fossil aus der Ashdown-Formation, Fairlight, Sussex, England Kreide
Spurenfossilien – Spuren und Höhlenbauten		Wurmbauten und die Ruhestätte eines Trilobiten Fossilien aus der Gog-Formation, Lake Louise, Alberta, Kanada; Kambrium
Spurenfossilien - Wurzelspuren		Wurzelspuren einer fossilen <i>Lepidodendron</i>-Pflanze (Körperfossil) mit Wurzelspuren (Hohlformen – Spurenfossilien) Fossil aus Nordost-Ohio, USA; Karbon

4.1.1.4 Sedimentgesteine

Sedimentgesteine wurden als Sedimente abgelagert und anhand ihrer Mineralzusammensetzung und Korngröße identifiziert (Tabelle 4.4). Sedimentgesteine sind in der Regel durchlässig, sofern sie nicht gut zementiert oder feinkörnig sind, und die meisten lassen sich leicht zerkratzen. Die Körner sind in sandhaltigem Gestein leicht zu erkennen, in schlammhaltigem Gestein jedoch normalerweise selbst mit einer Handlinse nicht zu erkennen.

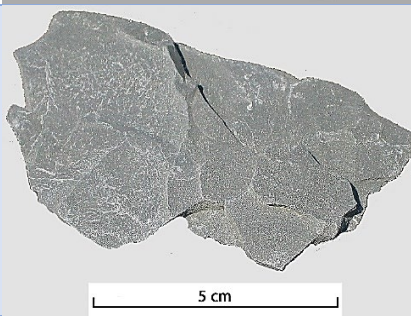
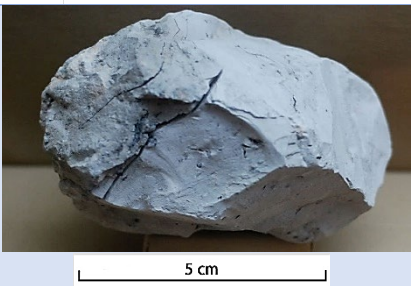
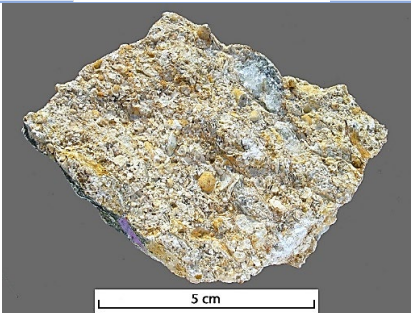
Tab. 4.4. Klassifikation von Sedimentgesteinen

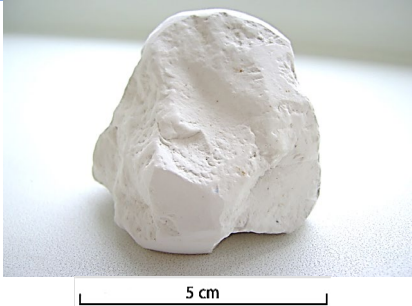
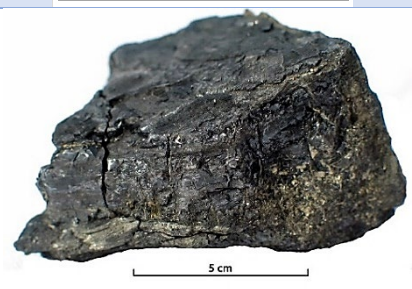
Chemische Zusammensetzung		Silizium-reich	Kalziumkarbonat-reich	Natriumchlorid-reich	Kohlenstoff-reich
Charakteristika		Die häufigsten Sedimentgesteine; bei guter Zementierung beständig, sonst leicht zu kratzen; üblicherweise dunkel- oder blassgrau, braun, cremefarben oder rot	Reagieren mit verdünnter Salzsäure; leicht zu kratzen; üblicherweise blassgrau, cremefarben oder weiß	Aufgebaut aus Halit mit salzigem Geschmack; kubische Kristalle; sehr leicht zu kratzen; rosa, weiß oder farblos	Sehr leicht zu kratzen; brechen oft in kubische Formen; schwarz; kann Pflanzenfossilien enthalten
Häufige Gesteinsarten – siehe Tab. 4.5					
Korngröße	Fein < 0,0625 mm	Tonstein; Ton; Siltstein, Silt	Kalkstein; Kreidekalk	Steinsalz	Kohle
	Mittel 0,0625 – 2 mm	Sandstein; Siltstein	Kalkstein		
	Grob > 2 mm	Konglomerat; Brekzie			

Die meisten sandigen Sedimente werden in dickeren Schichten abgelagert, während Schlämme (Silt und Ton) in dünneren Schichten, sogenannten Laminationen, abgelagert werden. Als das Sediment abgelagert wurde, wurden Schlämme zu kompakteren Tonsteinen oder Siltsteinen komprimiert; Kalkschlamm wurde zu Kalkstein oder Kreide verfestigt, indem Wasser herauspresst wurde. Währenddessen floss Wasser durch die Porenräume gröberer Sedimente wie Kieselsteine, Sande und Muschelsande, und aus dem Wasser kristallisierten Mineralen als natürlicher Zement aus, der die Körner zusammenklebte; diese Sedimente wurden zu grobkörnigen Konglomeraten und mittelnkörnigen Sandsteinen oder Kalksteinen versteinert, wie in Tab. 4.5 dargestellt. Bei Sedimentgesteinen sind also die beiden wichtigsten Gesteinsbildungsprozesse **Kompaktion** (Verdichtung) und **Zementierung**.

Tab. 4.5. Häufig vorkommende Sedimentgesteine

Sedimentgesteine	Handstück	Bild	Aufschluss	Herkunft des Aufschlussbildes
Konglomerat				Konglomerat-Aufschluss, Mt. Adarra nahe San Sebastian, Spanien; Kreide

Beiger Sandstein			Kreuzgeschichteter beige-farbener Sandstein, Isle of Bressay, Shetland Islands, UK Devon
Red sandstone			Roter Navajo Sandstein im Antelope Canyon, Arizona, USA. Die rote Farbe ist eine Folge des Zements aus hämatitischem Eisen; Trias/Jura
Tonstein/Siltstein			Permischer roter Tonstein mit helleren Siltstein-Lagen, Bassin de Lodève, Hérault, la Lieude, Mèrifons, Frankreich
Tonstein			Marineer Tonstein, Slate Hill Road, Marcellus, New York, USA; Devon
Ton			Ton, Estland Quartär
Fossilführender Kalkstein			Fossilführender Kalkstein des Green Bridge of Wales Bogens, Pembrokeshire, Wales Karbon

Oolithischer Kalkstein			Oolitischer Jura-Kalkstein im Steinbruch Rothenstein III, Jura-Region, Frankreich; Oberer Jura
Kreidekalk			Die hohen Kreidefelsen von Møn, Dänemark; Obere Kreide
Steinsalz			Steinsalz im Salzbergwerk Asse, Remlingen, Niedersachsen. Salz findet sich im humiden Klimagebiet nicht an der Oberfläche, da es sich in Wasser löst
Kohle			Abtauchendes Kohleflöz im Steinbruch Rauen, Mülheim an der Ruhr, Nordrhein-Westfalen; Oberkarbon

Box 4.2. Ein ungewöhnliches Sedimentgestein – Hornstein (oder Feuerstein)



Feuersteine in Kalkmergeln



Pfeilspitze aus Feuerstein



Feuersteinknolle in Kalkstein

Feuersteine (Hornstein, Chert) findet man als knotenartige, oft lagenartig auftretende feste Gesteine, sogenannte Konkretionen, in feinkörnigem Kalkstein (rechtes Foto). Wenn es in Kreidekalken gefunden wird,

nennt man es Feuerstein oder Flint (linkes Foto), der in prähistorischen Zeiten zur Herstellung von Pfeilspitzen und anderen scharfen Werkzeugen verwendet wurde.

Chert und Feuerstein entstehen, wenn sich feiner Kalkschlamm zusammen mit abgestorbenen Mikroorganismen aus Kieselsäure (Siliziumdioxid) in ruhiger Umgebung auf dem Meeresboden abgelagert. Während der Kalkschlamm zu Kalkstein oder Kreide verfestigt wird, löst sich die Kieselsäure im Wasser zwischen den Partikeln auf. Anschließend kristallisiert sie über einen längeren Zeitraum hinweg und sammelt sich in sehr feinkörnigen Kieselstein-/Feuersteinknollen oder Konkretionen. Die Konkretionen haben oft seltsam abgerundete Formen und Größen und kommen oft lagenparallel zur Sedimentschichtung vor. Strände unter Kreidefelsen bestehen meist überwiegend aus den sehr harten Feuersteinen, da die weichen Kreidekalke vom Meer sehr leicht abgetragen werden.

4.1.1.5 Magmatische Gesteine

Magmatische Gesteine bildeten sich aus geschmolzenem Magma, entweder als das Magma abkühlte und kristallisierte oder als es explosionsartig aus einem Vulkan ausbrach oder ausfloss. Die meisten magmatischen Gesteine sind aufgrund ihrer ineinandergreifenden Kristalle undurchlässig, hart und kratzfest. Sie werden anhand ihrer Kristallgröße und chemischen Zusammensetzung identifiziert. Die Kristalle in grobkörnigen Gesteinen sind leicht zu erkennen, die in mittelkörnigen Gesteinen benötigen eine Handlinse und die Kristalle in feinkörnigen Gesteinen sind ohne Mikroskop normalerweise nicht zu erkennen. Grobkörniges Gestein, das durch langsames Abkühlen von Magma tief unter der Oberfläche entsteht, wird **Tiefengestein** genannt; feinkörniges magmatisches Gestein ist als **Vulkangestein** ausgebrochen.

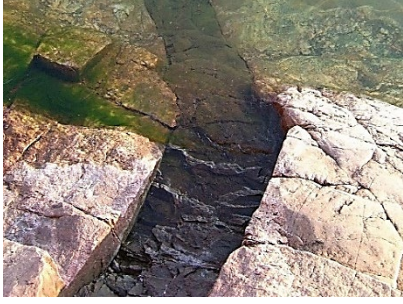
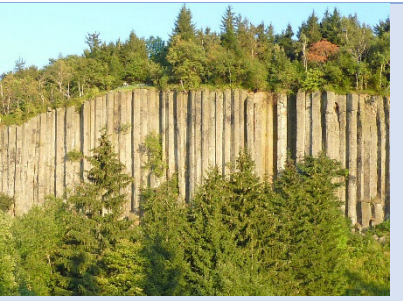
Die chemische Zusammensetzung des Gesteins hängt mit den vorhandenen Mineralen zusammen, die auch die Gesamtfarbe des Gesteins bestimmen. Gesteine, die reich an Eisen und Magnesium sind, enthalten dunkel gefärbte eisen-/magnesiumreiche Minerale, während siliziumreiche Gesteine hauptsächlich hell gefärbte Minerale wie Feldspat und Quarz enthalten. Daraus ergibt sich das Klassifizierungssystem in Tab. 4.6.

Tab. 4.6. Klassifikation magmatischer Gesteine

Chemische Zusammensetzung		Eisen/Magnesium-reich	intermediär	Silizium-reich
Charakteristika		Dunkle Minerale; dunkle Farbe; höhere Dichte (fühlt sich schwer an)	Intermediäre Eigenschaften	Helle Minerale; blasse Farbe; normale Gesteinsdichte
Häufige Gesteinsarten – siehe Tab. 4.7				
Kristallgröße	Fein (< 1mm)	Basalt	Andesit	Vulkanische Asche
	Mittel (1-3mm)	Dolerit	selten	selten
	Grob (> 3mm)	Gabbro	Diorit	Granit

Tab. 4.7. Häufig vorkommende magmatische Gesteine

Magma-tisches Gestein	Handstück	Bild	Herkunft des Aufschlussbildes
Granit			Granitfelsen mit Wollsackverwitterung, Ruine Flossenbürg, Bayern; Karbon

Gabbro			Gabbro aus dem Lizard-Ophiolith-Komplex in Carrick Luz, Südengland; Devon
Dolerit			Dolerit-Gang am Ufer eines Flusses, Agwa Rock, Lake Superior Provincial Park, Kanada
Basalt			Basaltsäulen (entstanden, als der Basalt abkühlte) am Scheibenberg, Sachsen; Oligozän
Andesite			Andesitischer Lavastrom, Stewart Peak Vulkan, San Luis Caldera Complex, Colorado, USA; Oligozän
Vulkanische Asche			Vulkanasche aus Tufflagen auf den Äolischen Inseln in der Nähe von Sizilien, Italien; Quartär

Box 4.3. Ein ungewöhnliches magmatisches Gestein – vulkanisches Glas



Lavastrom aus vulkanischem Glas



Obsidian



Obsidianmesser

Wie andere magmatische Gesteine entsteht auch vulkanisches Glas durch Abkühlung von Magma. Wenn Magma unter der Erde langsam abkühlt, bleibt Zeit für die Bildung großer Kristalle. Wenn es als Lava an der Oberfläche ausbricht, kühlt es viel schneller ab und bildet daher viel kleinere Kristalle wie in einer feinkörnigen basaltischen Lava. Wenn es noch schneller abkühlt, haben die Atome der Flüssigkeit keine Zeit, sich zu Kristallen zusammenzuschließen, und es entsteht Glas. Vulkanisches Glas wird auch als Obsidian bezeichnet. Das vulkanische Glas in diesem Lavastrom, das Handstück und das prähistorische Messer entstanden auf diese Weise. Fenster- und Flaschenglas werden auf die gleiche Weise durch Abkühlen von geschmolzenem Siliziumdioxid hergestellt.

4.1.1.6 Metamorphe Gesteine

Metamorphe Gesteine entstehen, wenn sedimentäre, magmatische oder ältere metamorphe Gesteine unter erhöhter Hitze und/oder erhöhtem Druck im festen Zustand rekristallisieren. Gesteine schmelzen während der Metamorphose nicht, sonst würden sie zu magmatischen Gesteinen werden.

Die meisten metamorphen Gesteine entstehen durch erhöhte Hitze und erhöhten Druck bei der Gebirgsbildung, die durch Plattenkollision verursacht wird. Das bezeichnet man als **Regionalmetamorphose**. Unter den erhöhten Druck- und Temperaturbedingungen wandeln sich einige Minerale in andere Minerale um, einige Minerale rekristallisieren und werden dünner und länger, während wieder andere Minerale rotieren, bis sie mit ihrer langen Achse im rechten Winkel zur Druckrichtung ausgerichtet sind.

Metamorphe Gesteine entstehen auch, wenn Gesteine von einem nahegelegenen heißen magmatischen Körper aufgeheizt werden. Da die Rekristallisation der Minerale hier hauptsächlich durch Hitze erfolgt und kein tektonischer Druck herrscht, sind die Kristalle in den neuen Gesteinen zufällig ausgerichtet.

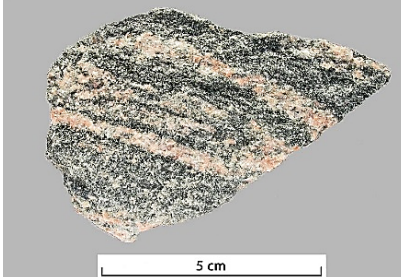
Die Art des metamorphen Gesteins, das entweder durch Hitze und Druck (Regionalmetamorphose) oder hauptsächlich durch Hitze (**Thermometamorphose** oder **Kontaktmetamorphose**) entsteht, hängt von der Beschaffenheit des Gesteins ab, aus dem es ursprünglich stammt, wie in Tab. 4.8 dargestellt.

Tab. 4.8. Klassifikation metamorpher Gesteine

Mineralzusammensetzung		Quarz und Tonminerale in Ton- oder Siltstein	Quarz in Sandstein	Kalzit in Kalkstein
Common regional metamorphic rock types – see Tab. 4.9				
Zunahme von Druck und Temperatur	niedriggradig	Tonschiefer	Metaquarzit (oder Quarzit)	Marmor
	mittelgradig	Glimmerschiefer		
	hochgradig	Gneis		
Common thermal metamorphic rock types				
Zunahme der Temperatur		Hornfels	Metaquarzit (oder Quarzit)	Marmor

Da metamorphe Gesteine aus miteinander verwachsenen Kristallen bestehen, sind sie normalerweise undurchlässiger und kratzfester als die meisten Sedimentgesteine. Regionalmetamorphe Gesteine können anhand ihrer ausgerichteten Minerale identifiziert werden. In feinkörnigem Schiefer bewirkt die Ausrichtung der Minerale die Ausbildung von Schieferungsflächen. An diesen Schwachstellen kann das Gestein in dünne Schieferplatten gebrochen werden. In größerem Schiefer kann man beobachten, wie die ausgerichteten Minerale das Licht blitzartig reflektieren, wenn eine Probe bewegt wird. Die Minerale bilden im Gneis Bänder, die oft zu komplexen Falten deformiert sind. In Metaquarzit oder Marmor ist es schwierig, eine Mineralausrichtung zu erkennen; deswegen lässt sich nur schwer unterscheiden, ob sie regionalmetamorph oder thermometamorph gebildet wurden. Metaquarzit ist wie ein undurchlässiger, sehr harter Sandstein mit einem zuckerkörnigen Gefüge. Marmor kann auch ein zuckerkörniges Gefüge ausbilden, reagiert aber mit verdünnter Salzsäure. Hornfels ist ebenfalls sehr hart und besteht als thermometamorph verändertes Gestein aus unregelmäßig orientierten Mineralen, die in diesem feinkörnigen Gestein jedoch normalerweise nicht zu erkennen sind.

Tab. 4.9. Häufig vorkommende metamorphe Gesteine

Metamorphes Gestein	Handstück	Bild	Herkunft des Aufschluss- bildes
Tonschiefer			Schiefer in einem durch Felsanker und Drahtgeflecht geschützten Straßeneinschnitt, Rothaargebirge, Nordrhein/ Westfalen; Devon
Glimmerschiefer			Glimmerschiefer, Le Brévent, Chamonix, Mont Blanc, Frankreich, Devon
Gneis			Gebänderter Gneis am Zuckerhut, Rio de Janeiro, Brasilien Präkambrium

Marmor			Marmorblock im Carrara-Steinbruch, Italien – wird häufig als Baustein und zur Bildhauerei von Statuen verwendet; Jura
Metaquarzit (Quarzit)			Aufschluss in Metaquarzit, El Castellar, Zaragoza, Spanien; Ordovizium

4.1.1.7 Boden

Boden entsteht durch die Wechselwirkung zwischen lebenden Organismen und den Oberflächenmaterialien der Erde – wo es also kein Leben gibt, gibt es auch keinen Boden. Boden entsteht durch Wechselwirkungen zwischen der festen Geosphäre, der Hydrosphäre, der Atmosphäre und der Biosphäre. Böden entstehen auf lockeren Oberflächenmaterialien wie Fluss- oder Gletscherablagerungen oder durch die biologische Verwitterung des anstehenden Festgesteins. Die vielen verschiedenen Böden, die sich bilden können, hängen von unterschiedlichen Faktoren ab, darunter Klima, Höhenlage, Hangsteilheit und die Art des Festgesteins oder anderen Oberflächenmaterials.

Böden haben fast immer eine Oberflächenschicht oder Oberboden, der meist eine dunkle Farbe hat. Der Oberboden ist die Hauptzone der Pflanzenwurzeln; dort leben viele Mikroorganismen und Tiere wie Würmer und Insekten und es findet sich das meiste verrottende organische Material bzw. Humus. Die Hauptbestandteile des Oberbodens sind daher: Tiere und Pflanzen, Humus, Sedimente oder Gesteinsfragmente, Wasser und Luft. Kleine Mengen Oberboden enthalten Milliarden mikroskopisch kleiner Pflanzen und Tiere, die Tausenden verschiedener Arten angehören.

Unter dem Oberboden befindet sich in den meisten Böden eine Unterbodenzone, in der sich feinkörniges Material ansammelt, nachdem es vom Bodenwasser nach unten gespült wurde; Die meisten chemischen Veränderungen finden hier statt. Die Basis eines Bodens ist das anstehende Festgestein oder anderes ursprüngliches Oberflächenmaterial.



Abb. 4.4. Bodenprofil in Altenberg, Sachsen

Der Boden ist ein wichtiger Teil des Ökosystems Erde. Alle großen Pflanzen wachsen im Boden. Er ist ein wichtiger Lebensraum für eine Vielzahl anderer Pflanzen und Tiere und die Grundlage der gesamten Landwirtschaft. Er recycelt Nährstoffe und organische Abfälle und beeinflusst die Qualität des durchströmenden Wassers. Der Boden interagiert auch mit den Gasen der Atmosphäre. Der beste Mutterboden für das Pflanzenwachstum besteht etwa zur Hälfte aus festem Material und zur Hälfte aus Hohlraum, der mit Wasser oder Luft gefüllt ist. Der Feststoff ist eine Mischung aus Sand, Schluff und organischem Humus; Verschiedene Mischungen aus Sand, Schluff, Ton und Humus ergeben eine Reihe unterschiedlicher Bodentypen.

Landwirte versuchen, Böden durch die Zugabe verschiedener Inhaltsstoffe produktiver zu machen. In Gebieten mit sauren Böden wird zur Neutralisierung Kalk (Kalziumoxid/-hydroxid – $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$) zugesetzt. In anderen Gebieten verbessert die Zugabe von Ton den Boden, während andernorts die Zugabe von Tiermist oder Kalium- und Stickstoffdünger die Bodenproduktivität steigert.

Box 4.4. Charles Darwin und der Boden



Charles Darwin war einer der ersten Menschen, der verstand, wie wichtig Regenwürmer für die Bodenbildung sind. Ihm war aufgefallen, dass eine Schicht weißen Kalziumkarbonatkalks, die vor vielen Jahren auf einem englischen Feld auf den Boden aufgetragen worden war, nun mehrere Zentimeter unter der Erde eine Schicht bildete. Er kam zu dem Schluss, dass dies auf die Wirkung von Regenwürmern zurückzuführen sein musste und baute einen eigenen Wurmkompost, um seine Idee zu untersuchen. Im Jahr 1881 veröffentlichte er seine Ideen zur Bedeutung von Regenwürmern für die Bodenbildung.

Fotos einer selbstgemachten Wurmkompostsäule in einer aufgeschnittenen Plastikflasche – vor dem Hinzufügen von Regenwürmern und danach, nach mehreren Tagen Regenwurmakktivität.

4.1.2 Prozesse im Erdsystem und deren beobachtete Eigenschaften

Erdprozesse sind durch den Gesteinskreislauf miteinander verbunden, wie in Abb. 1.7 dargestellt. Der Gesteinskreislauf umfasst die Oberflächenprozesse Verwitterung, Erosion, Transport und Ablagerung, die eng mit dem Oberflächenteil des Wasserkreislaufs verknüpft sind. Nachdem sich Sedimente abgelagert haben, können sie durch darüber liegende Sedimente versenkt werden, wenn sie durch Verdichtung und Kristallisation von natürlichem Zement in Sedimentgesteine umgewandelt werden.

Plattentektonische Prozesse treiben den inneren Teil des Gesteinskreislaufs voran, verformen Gesteine, verursachen Metamorphose, magmatische Aktivität und heben Gesteine an die Oberfläche, wo sie erneut von Oberflächenprozessen angegriffen werden.

4.1.2.1 Oberflächenprozesse

Atmosphäre, Hydrosphäre und Biosphäre interagieren mit der Geosphäre, prägen die Landschaft und bilden und lagern Sedimente ab. Oberflächengesteine werden durch Verwitterung und Erosion angegriffen. Unter **Verwitterung** versteht man die Auflösung (physikalische Zerkleinerung) und Zersetzung (chemische Zersetzung) von Material an der Erdoberfläche, ohne dass festes Material entfernt wird. Unter **Erosion** versteht man den Abtrag von festem Material, das dann weiter transportiert werden kann.

Obwohl Verwitterungsprozesse in der Regel zusammenwirken, können sie in getrennte physikalische, chemische und biologische Effekte unterteilt werden, wie in Tab. 4.10 dargestellt.

Tab. 4.10. Häufige Verwitterungsprozesse

	Prozess	Beschreibung	Bild	Beispiel
Physikalisch	Frieren / Auftauen	Wasser dringt in Risse ein, gefriert, dehnt sich aus, taut dann auf und sickert tiefer. Mit fortschreitenden Frost-Tau-Zyklen wird der Riss breiter. Wichtig dort, wo es häufig zu Frost-Tau-Zyklen kommt, z. B. auf Berggipfeln		Zerbrochener Felsbrocken, Südisland
	Aufheizen / Abkühlen	Tagsüber werden die Felsen sehr heiß und nachts sehr kalt. Da sich die Minerale unterschiedlich schnell ausdehnen und zusammenziehen, wird das Gestein geschwächt und reißt. Wichtig in heißen Regionen, die nachts sehr kalt werden		Granitplatten brechen aufgrund von Erwärmung/Abkühlung ab, Half Dome, Yosemite-Nationalpark, USA
Chemisch	Saures Wasser auf Kalkstein und Marmor	Regenwasser löst Kohlendioxid aus der Atmosphäre und nimmt beim Fließen durch den Boden mehr CO ₂ auf. Die schwache Kohlensäure löst Kalziumkarbonat. Wenn Kalkstein entlang von Fugen aufgelöst wird, werden diese breiter und es können Höhlen entstehen		Karbonkalksteinpflaster mit verbreiterten Fugen (Grykes), Doolin Quay, Irland
	Oxidation von Sandstein und Quarzit	Regenwasser fließt entlang der Fugen und oxidiert (rostet) Eisenminerale zu leuchtend gelben, braunen und roten Farben		Chemische Verwitterung und Oxidation von Eisenmineralen entlang von Fugen in Sandstein, Wealden-Formation, Südengland

Biologisch	Flechten und Moose	Flechten sind die ersten Organismen, die nacktes Gestein besiedeln. Ihre winzigen Wurzeln wachsen in die Poren zwischen den Gesteinskörnern und schwächen das Gestein, wenn die Flechten austrocknen und sich zusammenziehen. Sie haben auch biochemische Wirkungen. Auf Flechten folgen oft Moose und dann Erde.		Flechten aufgewachsen auf Quarzit, Südschweden
	Bodenbildung	Biologische Auswirkungen der Verwitterung auf das anstehende Felsgestein führen zur Entstehung von Böden		Bodenschichten im Rheintal bei Rastatt, Baden-Württemberg

Unter Erosion versteht man den Abtrag von festem Material. Landschaften werden geformt und Sedimente werden durch vier große Erosionsprozesse gebildet, wie in Tab. 4.11 hervorgehoben.

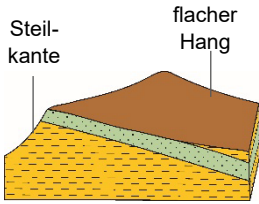
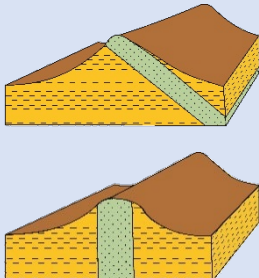
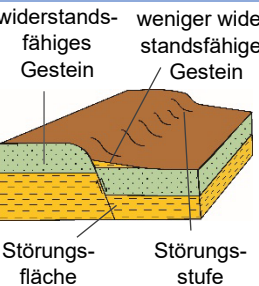
Tab. 4.11. Wichtige Erosionsprozesse

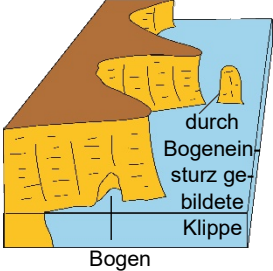
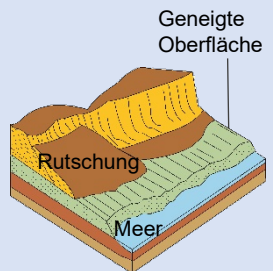
Prozess	Beschreibung	Bild	Beispiel
Fließendes Wasser (in Flüssen und im Ozean)	Fließendes Wasser nimmt Partikel auf, erodiert sie und transportiert auch Sedimente, die wiederum das Gestein am Boden des Gewässers erodieren. Die meiste Erosion tritt bei Überschwemmungen auf, wenn Flüsse katastrophal über die Ufer treten.		Ufereinsturz aufgrund von Unterhöhlung durch Erosion, Tista River, Sundarganj Thana, Bangladesch
	Wellen und das von ihnen mitgeführte Sediment erodieren den Fuß von Klippen entlang der Küste und verursachen oft Erdrutsche und Steinschläge. Das abgebrochene Material wird später durch die Wellen zerkleinert und abtransportiert.		Küstenerosion durch Kliffabbrüche, Halbinsel Jasmund, Rügen, Mecklenburg-Vorpommern

Schwerkraft	Gesteinsfragmente, die oft durch Witterungseinflüsse geschwächt sind, fallen aufgrund der Schwerkraft herunter. Durch großflächigen Steinschlag entstehen abfallende Geröllhalden, die unter Rinnen kegelförmig verlaufen. Zur Erosion durch Schwerkraft zählen Steinschlag und das Abrutschen von Gesteinen durch Erdbeben		Geröllkegel, Bow Lake in der Nähe von Crowfoot Mountain, Alberta, Kanada
Bewegung der Luft (Wind)	Der Wind erodiert Partikel in den Korngrößen Sand, Silt und Ton. Der Sand kann lokale Sanddünen bilden, aber Silt und Ton können als Staubwolken weit weggetragen werden		Eine Sandsturm- wolke weht über der Wüste in Marokko
	Winderosion eines exponierten Felsblocks. Bei starkem Wind treffen mehr Sandkörner auf die Basis des Felsblocks und erodieren hier die weichen Schichten stärker als den oberen Teil, weshalb die Basis so schmal ist. Man bezeichnet diese Strukturen als Tisch- oder Pilzfelsen.		Teufelstisch im Dahner Felsen- land, Pfälzer Wald, Rheinland- Pfalz
Eisbewegung	Obwohl Eis selbst den Felsuntergrund nicht erodieren kann, kann es das Sediment, das es trägt, tun. Wenn sich Eisschichten oder Gletscher bewegen, wird der Felsuntergrund in der Richtung der Eisbewegung erodiert, wodurch Kratzspuren oder Strömungen entstehen. Gleichzeitig werden die vom Eis mitgeführten Trümmer zermahlen.		Durch Eisbewe- gung glattgeschlif- fener felsiger Untergrund mit Gletscher- schrammen, Aletschgletscher, Schweiz

Verwitterung und Erosion prägen gemeinsam die Landschaft. Die Widerstandsfähigkeit von Gesteinen gegenüber Witterungseinflüssen und Erosion hängt davon ab, wie chemisch stabil die Minerale an der Erdoberfläche sind und wie die Körner des Gesteins miteinander verbunden sind. Gesteine, die aus miteinander verwachsenen Kristallen und gut zementierten Körnern bestehen, neigen dazu, der Erosion zu widerstehen und bilden höher gelegenes Land, Küstenklippen und Landzungen, während weniger widerstandsfähige Gesteine Täler und Buchten bilden. Der Neigungswinkel von widerstandsfähigem Gestein und anderen geologischen Merkmalen bestimmt häufig die Form der Landschaft und führt zu einer Vielzahl von Landformen und Küstenmerkmalen (Tabelle 4.12).

Tab. 4.12. Landschaftsformen, die aus widerstandsfähigen Gesteinsschichten bestehen

Landform	Beschreibung	Skizze	Bild	Beispiel
Plateau (Tafelberg)	Plateaus haben flache Oberseiten und steile Seiten. Sie entstehen, wenn widerstandsfähiges Gestein horizontal oder nahezu horizontal liegt (Plateaus können auch als Erosionsflächen über verschiedenen Gesteinen gebildet werden).			Tafelberg-plateau, Kapstadt, Südafrika
Cuesta	Cuestas haben einen steileren Hang in eine Richtung und einen flacheren Hang in die andere Richtung. Sie entstehen, wenn widerstandsfähiges Gestein eine flache Neigung aufweist			Cuesta von der Victoria Island-Fähre aus gesehen, Vancouver, Kanada
Berg-rücken, Grat	Berg-rücken haben steile Hänge in zwei Richtungen und entstehen, wenn widerstandsfähige Felsen steil abfallen oder senkrecht stehen			Berg-rücken Mount Rundle, in der Nähe von Banff, Alberta, Kanada
Störungsstufe (Fault scarp)	Wenn das Gestein auf einer Seite einer Verwerfung widerstandsfähiger ist als auf der anderen, bildet sich häufig ein Verwerfungs-steilhang			Abert Rim Fault Scarp, Oregon – einer der höchsten in den USA
Land-zunge und Bucht	Wenn einige Felsen entlang der Küste widerstandsfähiger sind als andere, bilden sich Landzungen und Buchten			Eine Bucht zwischen Land-zungen, Cabo de la Vela, Kolumbien

Küstenkliff	Wo widerstandsfähige Felsen horizontal liegen oder vom Meer weg abfallen (Neigung), bilden sich normalerweise steile Klippen, oft mit Merkmalen wie Bögen und Einzelklippen			Steile Klippen und ein Bogen, Island Archway, Great Ocean Road, Victoria, Australien
Küstenhang	Wo kein widerstandsfähiges Gestein vorhanden ist oder die Gesteinsschichten zum Meer hin abfallen, entstehen meist flache Küstenhänge			Abrutschende Küstenhänge, Shippards Chine, Isle of Wight, England

Bei hochenergetischen Ereignissen wie z.B. Stürmen ist die Erosion sehr aktiv. Nachdem Sedimente durch Schwerkraft, fließendes Wasser, Wind oder Eis erodiert sind, werden sie transportiert. Während des Transports werden sie oft mehrfach abgelagert und erodiert. Die meisten dauerhaften Ablagerungen erfolgen unter ruhigeren Bedingungen mit niedriger Energie. Einige Landschaftsmerkmale hängen mehr von Erosion und Ablagerung als von den Eigenschaften der darunter liegenden Gesteine ab, wie in Tab. 4.13 dargestellt.

Tab. 4.13. Landschaftsmerkmale, die hauptsächlich durch Erosion und Ablagerung entstanden sind

	Prozess	Beschreibung	Image Bild	Beispiel
Erosion	durch fließendes Wasser	Fließendes Wasser erodiert das anstehende Gestein an der Basis von Hochlandtälern und macht sie dadurch tiefer. Wenn Material an den Seiten herunterrutscht, werden sie oft V-förmig		V-förmiges Flusstal, Goriot, Pakistan
	durch Eisbewegung	Gletscher, die in Hochlandtäler fließen, erodieren sowohl die Seiten als auch den Talboden und bilden U-förmige Täler		U-förmiges Gletschertal, Prapic-Tal in der Nähe von Orcières, Hautes-Alpes, Frankreich

Ablagerung	durch Wasser auf Überschwemmungsebenen	Wenn Flüsse überschwemmt werden, fließt das Wasser über Überschwemmungsebenen auf beiden Seiten und lagert Ton- und Siltschichten ab. Die Schlammschichten bilden breite, flache Überschwemmungsebenen, durch die sich Flusskanäle schlängeln		Mäandrierende Flüsse in der Sambesi-Flussebene in Namibia, aus der Luft gesehen; Fluglandebahn unten rechts.
	durch Wasser in Seen und Meeren	Flüsse, die Sedimente in Seen und ruhige Meere transportieren, lagern die Sedimente in Deltas ab, die oft fächerförmig in den See oder das Meer hinausragen.		Silvaplana-Delta, mündet in den Silvaplansersee, Schweiz
	durch schmelzendes Eis	Schmelzendes Eis lagert Mischungen aus Gesteinsbrocken und Ton (Till) an den Enden und Seiten von Gletschern und dort ab, wo sich schmelzende Eisschilde befanden. Die hügeligen Ablagerungen werden Moräne genannt.		Der Isunnguata-Sermia-Gletscher im Hintergrund hat die Moräne im Vordergrund abgelagert, Kangerlussuaq, Grönland

Heutzutage bewegen Menschen durch Bergbau, Steinbrüche, Bauwesen und Landwirtschaft jedes Jahr möglicherweise mehr Sedimente als alle Flüsse der Welt zusammen. Trotzdem bleiben die meisten Landschaftsformationen natürlich und das wird auch immer so bleiben.

4.1.2.2 Sedimentäre Prozesse

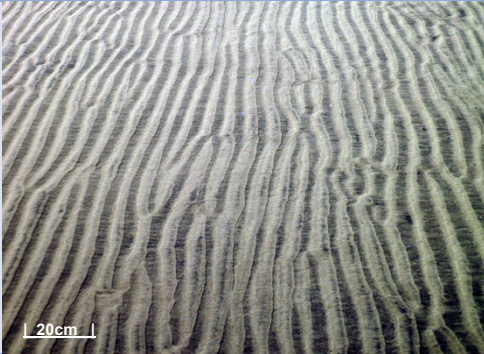
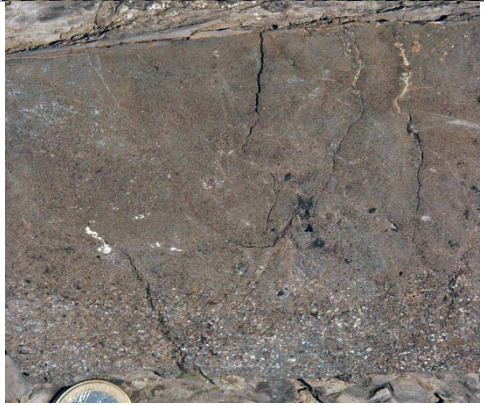
Durch Verwitterung und Erosion entstehen Sedimente, die beim Transport zerkleinert werden. Gesteinsfragmente werden rund. Weniger stabile Minerale zerfallen normalerweise zu Tonmineralen, während stabilere Minerale wie Quarz zermahlen werden. Unter ruhigeren Bedingungen lagern sich Gesteinsfragmente, Quarz, Ton und andere Minerale ab und es bilden sich Sedimente. Kalksande und -schlämme, die aus Kalziumkarbonatminerale bestehen, lagern sich normalerweise in warmen Flachmeeren tropischer und subtropischer Gebiete ab und können später zu Kalkstein verfestigt werden.

Sedimente bilden bei ihrer Ablagerung eine Reihe von Sedimentstrukturen, die Hinweise auf ihre Ablagerung geben, wie in Tab. 4.14 dargestellt.

Tab. 4.14. Wichtige Sedimentstrukturen

Sedimentstruktur	Beschreibung	Bild	Beispiel
------------------	--------------	------	----------

Schichtung	Sedimente werden normalerweise nicht gleichmäßig abgelagert, sondern die Ablagerung der einzelnen Schichten erfolgt oft plötzlich, mit ruhigeren Zeiten oder sogar Erosion dazwischen. Die Lagen der fein- bis grobkörnigen Sedimente werden Schichten genannt; die Gesteine sind geschichtet.		Geschichtete Konglomerate und Sandsteine aus dem Rotliegend, Perm, Hettstedt, Tal der Heiligen Reiser, Sachsen-Anhalt
Lamination	Feinkörnige Sedimente (Ton, Silt) werden oft in sehr dünnen Schichten abgelagert, allerdings handelt es sich dabei um deutlich dünnere Schichten, die als Laminationen bezeichnet werden		Laminierter Tonstein, Ohmden, Baden-Württemberg; Unterer Jura
Schrägschichtung	Schrägschichtungen entstehen, wenn Sand in Dünen abgelagert wird. Der Sand wird auf der flachen Seite der Düne (Luv) nach oben getragen und wird an der steilen Seite (Lee) in einer Reihe von schrägliegenden Schichten abgelagert. Durch Wasser gebildete Dünen erzeugen Schrägschichtungen mit flacheren Winkeln und dünneren Schichtpaketen, die normalerweise weniger als 1 m dick sind, während durch Wind erzeugte Dünen steilere Schichten und mehrere Meter dicke Pakete erzeugen können.		Schrägschichtung in Buntsandstein-Ablagerungen am Teufels-tisch, Pfälzer Wald, Rheinland-Pfalz. Der Wind wehte von rechts nach links.
Asymmetrische Rippelmarken	Wasserströmungen über Sand, die langsamer sind als diejenigen, die schrägschichtete Sande ablagern, bilden stattdessen asymmetrische Wellenrippeln. Wasser fließt auf der flachen Seite nach oben und lagert Sand auf der steileren Seite der Wellen ab. Durch Wasser gebildete Wellenspuren können in Form von Lappen oder in geraden Linien vorliegen, aber durch Wind gebildete asymmetrische Wellenrippeln sind in der Regel gerade.		Asymmetrische Wellenrippeln in kambrischem Sandstein, Wiśniówka Duża, Polen. Das Wasser floss im Bild von oben nach unten.

Symmetrische Rippelmarken	Im flachen Wasser werden durch Wellen symmetrische Rippelmarken gebildet. Die Rippelmarken haben auf beiden Seiten die gleiche Steigung und bilden normalerweise gerade parallele Linien. Die Wellenkämme, welche die Rippelmarken bilden, verlaufen parallel zu ihnen und oft auch parallel zur Küste.		Symmetrische Rippelmarken in feinkörnigem Sand, Gironde-Ästuar, Frankreich. Die Wellen bewegten sich von links nach rechts.
Gradierte Schichtung	Wenn eine Strömung, die Sedimente unterschiedlicher Größe transportiert, langsamer wird, werden die größten Partikel zuerst abgelagert gefolgt von immer feineren Körnern nach oben hin. Dadurch entsteht eine Sedimentlage, die von grob an der Basis bis fein an der Oberseite reicht. Mithilfe einer gradierten Schichtung kann gezeigt werden, dass eine Sedimentsequenz nicht durch Faltung auf den Kopf gestellt wurde.		Gradierte Schichtung in einer Turbidit-lage (unten grob, nach oben hin feiner werdend), Broto, Südpirenen, Spanien.
Trockenrisse (Schlammrisse)	Wenn Schlamm austrocknet, bilden sich vieleckige Trockenrisse. Wenn die Risse später mit Sand gefüllt werden, bleiben sie oft erhalten. Diese Trockenrisse zeigen, dass der Schlamm an der Luft ausgetrocknet ist, es kann sich also nicht um ein Tiefseesediment handeln.		Trockenrisse rund um einen Dinosaurier-Fußabdruck in Tonstein, Loulle, Franche-Compte, Frankreich.

Wenn Sedimente in langsam absinkenden Gebieten abgelagert werden, können sie zu mächtigen Sedimentabfolgen werden. Nach der Versenkung werden feinkörnige Sedimente verdichtet und gröbere Sedimente komprimiert und zu Sedimentgesteinen zementiert.

Viel später können die Sedimentgesteinsabfolgen durch plattentektonische Bewegung angehoben werden. Durch die Erosion des angehobenen Sedimentgesteins wird das Sediment wieder Teil des Sedimentkreislaufs. Der Sedimentkreislauf ist ein Teil des Gesteinskreislaufs.

4.1.2.3 Magmatische Prozesse

Wenn Gesteine sehr stark aufgeheizt werden, schmelzen sie. Da es sich bei Gesteinen in der Regel um eine Mischung von Mineralen handelt, schmelzen sie häufig nicht vollständig, sondern nur teilweise, wobei die Minerale mit dem niedrigsten Schmelzpunkt zuerst schmelzen. Wenn das durch **Teilaufschmelzung** entstandene Magma abfließt, hat es eine andere chemische Zusammensetzung als das ursprüngliche Gestein, weil die höher schmelzenden Minerale zurückbleiben. Durch partielle Schmelzprozesse entsteht eine Reihe unterschiedlicher Magmen unterschiedlicher Zusammensetzung.

Aus den Mineralen mit dem höchsten Schmelzpunkt bilden sich eisen- und magnesiumreiche Schmelzen, die bei hohen Temperaturen, meist weit über 1000 °C, kristallisieren. Siliziumreiche Schmelzen haben vorwiegend Minerale mit niedrigerem Schmelzpunkt und kristallisieren daher bei niedrigeren Temperaturen, normalerweise

unter 1000 °C. Dies beeinflusst die Fließfähigkeit der Schmelzen (ihre Viskosität) und die auftretenden magmatischen Prozesse. Geschmolzenes Magma bildet sich tief unter der Erde und steigt auf, da es heißer und weniger dicht als das umgebende Gestein ist.

Die Temperatur, bei der Gesteine schmelzen, hängt nicht nur von den Schmelzpunkten der Minerale ab, sondern auch von der vorhandenen Wassermenge und dem Druck der darüber liegenden Gesteine. Gesteine schmelzen bei niedrigeren Temperaturen, wenn sie „nass“ sind (d.h. Wasser in gelöster Form enthalten) und der Druck sinkt. Magmatische Prozesse sind sowohl in ozeanischen als auch kontinentalen Gebieten aktiv, aber Magma, Druck, Wassergehalt und andere Faktoren unterscheiden sich, und daher unterscheiden sich auch die erzeugten magmatischen Gesteine.

Aufsteigende Magmen können tief unter der Erde zum Stillstand kommen, abkühlen und in **Magmaammern** kristallisieren. Das Magma hat genügend Zeit zum Abkühlen, sodass Kristalle in der abkühlenden Schmelze wachsen können. Das Ergebnis ist ein grobkörniges magmatisches Gestein. Steigt das Magma höher, wird es kühler und kristallisiert schneller zu mittelkörnigem Gestein. Steigt es direkt an die Oberfläche, wird es durch vulkanische Aktivität ausgeworfen oder es fließt aus. Auf diese Weise gebildete Lava kühlt sehr schnell zu feinkörnigen magmatischen Gesteinen oder Glas ab (Abbildung 4.5).

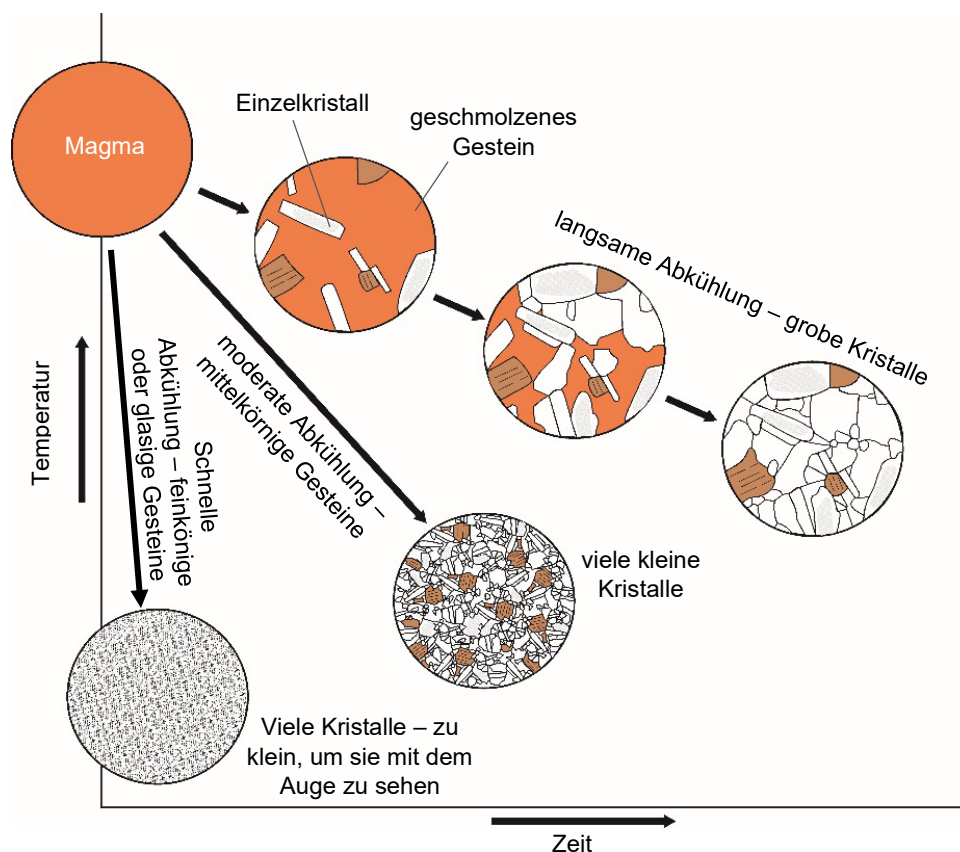


Abb. 4.5. Abkühlung und Kristallisation magmatischer Gesteine

Unter Spreizungszonen, an denen sich tektonische Platten auseinanderbewegen und neue ozeanische Kruste gebildet wird, ist der darunter liegende Mantel der Asthenosphäre sehr heiß und fließt daher langsam nach oben. Beim Aufwärtsströmen verringert sich der Druck und so schmilzt der sehr eisen-/magnesiumreiche Erdmantel teilweise zu Magmen mit einem etwas geringeren Gehalt an Eisen und Magnesium. Diese aus dem Erdmantel extrahierten Magmen steigen auf und kühlen langsam in Magmaammern ab, wo sich grobkörnige Gabbro-Plutone an der Basis der neu entstehenden ozeanischen Kruste bilden. Diese eisen-/magnesiumreichen Magmen sind sehr flüssig (niedrige Viskosität), so dass ein Teil des Magmas an Brüchen weiter aufsteigen kann. Die Schmelzen kühlen etwas schneller zu mittelkörnigen Doleriten an in vielen parallel angeordneten Gängen ab. Andere Magmen steigen zum Meeresboden auf und fließen als Laven aus, wo sie die charakteristischen Kissenformen (Kissenlava) ausbilden. Auf diese Weise entsteht neue ozeanische Kruste

aus eisen-/magnesiumreichen magmatischen Gesteinen mit grobem Gabbro an der Basis, vertikalen Gängen (die sogenannten „geschichteten Gangkomplexe“, engl. sheeted dike complex, wobei es sich hier nicht um eine Schichtung wie bei den Sedimenten handelt) aus mittelkörnigem Dolerit darüber und Schichten aus feinkörnigem Kissenbasalt an der Oberfläche (Abbildung 4.6).

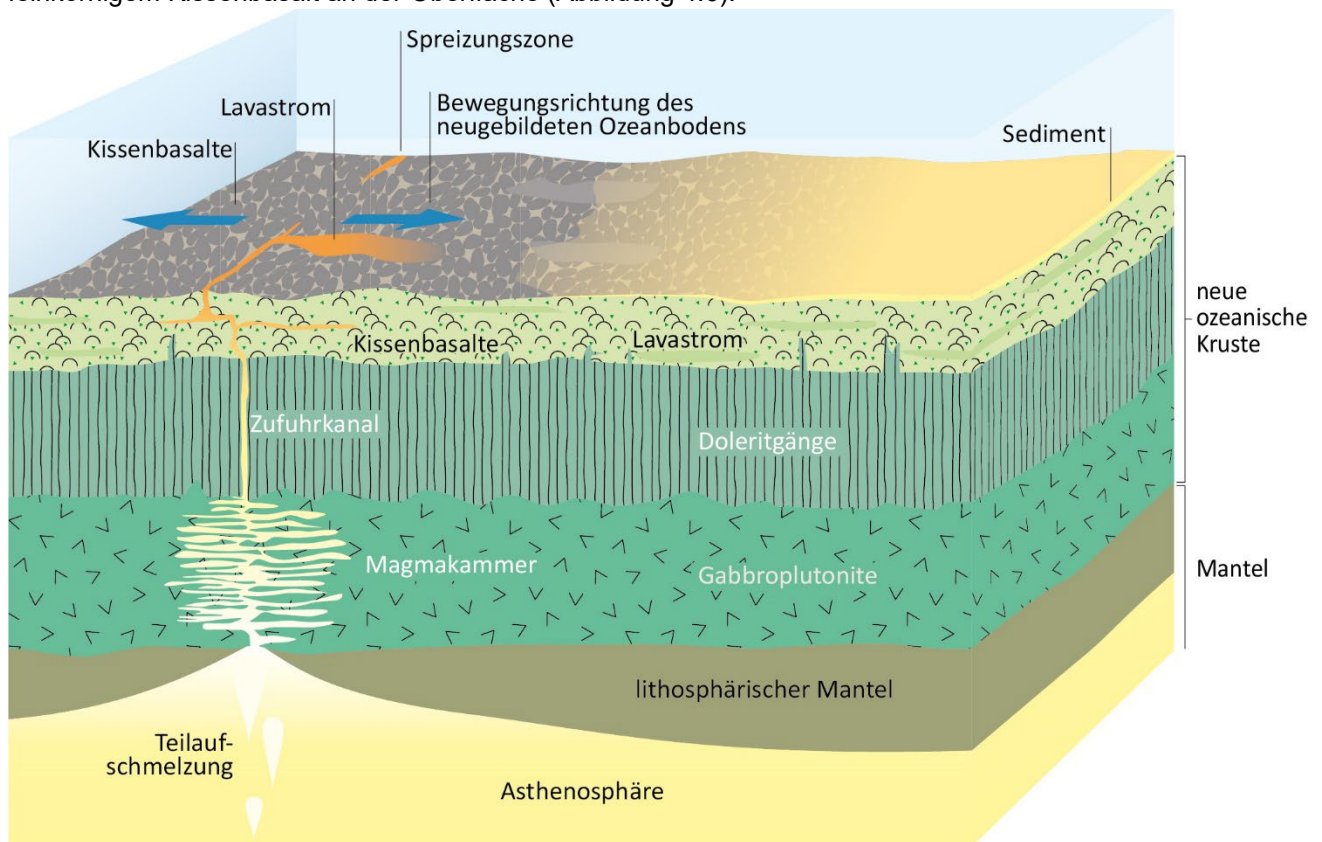


Abb. 4.6. Magmatische Gesteine der ozeanischen Kruste

Unter Kontinenten, in Bereichen, in denen tektonische Platten miteinander kollidieren, erhitzen sich Gesteine. Wasser in den Gesteinen senkt den Schmelzpunkt und führt dazu, dass sie teilweise schmelzen. Die sich bildenden Magmen hängen davon ab, welche Gesteine schmelzen, sodass eine Reihe unterschiedlicher chemischer Zusammensetzungen der Magmen möglich ist. Einige Schmelzen sind reich an Eisen und Magnesium, andere liegen zwischen Eisen/Magnesium und siliziumreichen Typen. Die häufigsten Magmen sind siliziumreich.

Siliziumreiche Magmen sind sehr zähflüssig (nicht sehr flüssig, hohe Viskosität) und gelangen daher meist nicht an die Oberfläche, sondern kristallisieren langsam in Magmakammern unter der Erde als grobkörnige Granite. Wenn sie trotz ihrer hohen Viskosität die Oberfläche erreichen, brechen sie meist explosionsartig aus und produzieren weit verbreitete Vulkanasche. Auch mittelschwere Magmen brechen explosionsartig aus, fließen aber auch als Laven aus Vulkanen, um sich als feinkörnige Andesite abzukühlen. Eisen- und magnesiumreiche Magmen brechen normalerweise als Basalte aus. Die Röhren, die Vulkane mit ihren Magmakammern verbinden, werden **Vulkanschlote** genannt, die manchmal nach der Erosion als **Vulkanstopfen** an der Oberfläche freigelegt werden.

Zwischen tiefen Magmakammern und Oberflächenvulkanen können Magmen in das umliegende Gestein intrudieren. Wenn sie die Gesteinsschichten durchschneiden, handelt es sich um **Dikes** (durchlagende Gänge), folgen sie den Schichten, handelt es sich um **Sills** (Lagergänge). Kristallisierte unterirdische Magmakammern sind normalerweise als große blasenförmige Körper ausgebildet und werden **Plutone** genannt, wenn sie klein sind, und **Batholithe**, wenn sie groß sind (Abbildung 4.7). Batholithe, Plutone, Dikes und Sills werden als **intrusive magmatische Gesteine** zusammengefasst, da das Magma in das umgebende Grundgestein eingedrungen ist. Bei denen an der Oberfläche ausgetretenen Gesteine handelt es sich um **extrusives magmatisches Gestein**, da es an die Oberfläche extrudiert wurde. Die verschiedenen durch diese Prozesse erzeugten Merkmale sind in Tabelle 4.15 dargestellt.

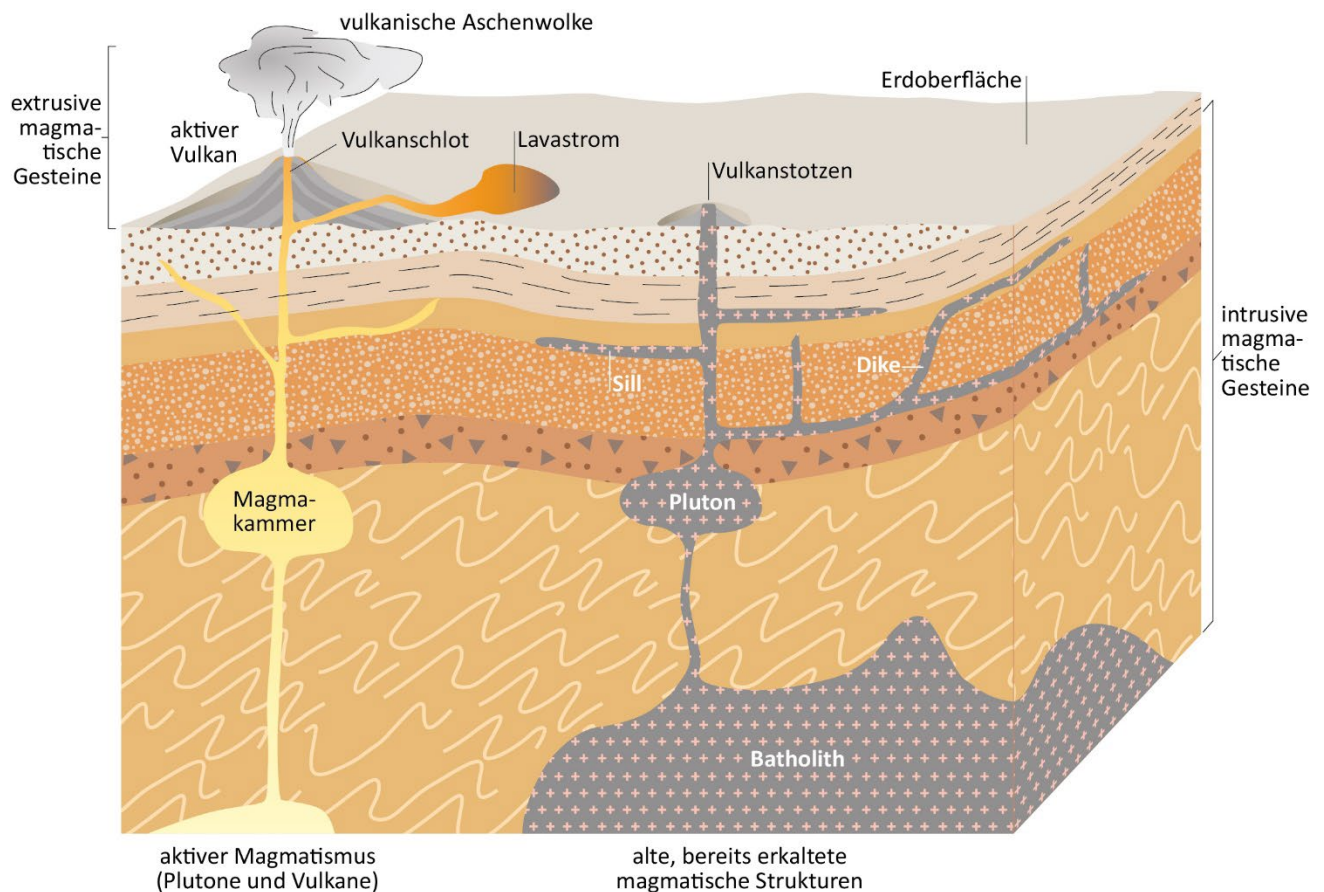
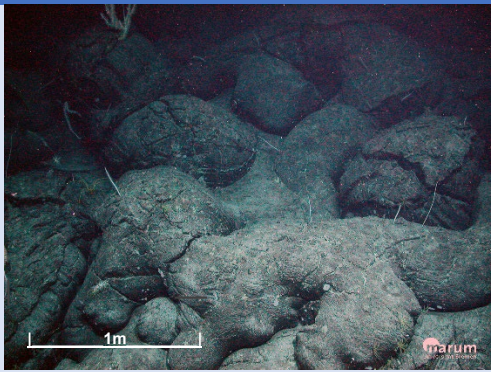
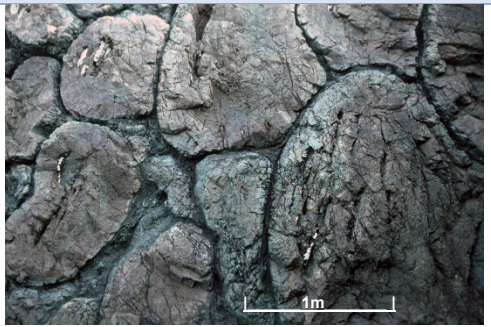


Abb. 4.7. Magmatische Gesteine in und auf kontinentaler Kruste

Tab. 4.15. Wichtige magmatische Strukturen

Magmatische Struktur	Beschreibung	Bild	Beispiel
Moderne Kissenlava (Pillowlava)	Wenn flüssige Lava ins Wasser austritt (extrudiert wird), wie z.B. auf dem Meeresboden, fließen kleine Magmazungen heraus, die an der Außenseite schnell fest werden, sie bilden einen abgeschreckten Rand. Die anfänglich noch weiche, formbare Glashaut wirkt wie ein Beutel, der sich in kissenähnlichen Formen mit Lava füllt.		Moderne Kissenlava auf dem Meeresboden, fotografiert während einer Expedition mit dem Forschungsschiff Polarstern im Südatlantik, East Scotia Rift, 2019
Fossile Kissenlava	Wenn alte Kissenlaven in zwei Hälften brechen, ist oft der feinkörnige bis glasige Basalt an den Rändern zu sehen. Da spätere Kissen bei ihrer Bildung zwischen früheren Kissen nach unten sinken, kann anhand ihrer Form festgestellt werden, ob eine Sequenz auf den Kopf gestellt (invertiert) wurde		Kissenbasalte aus dem Jura, steilgestellt, die Oberseite zeigt nach links. Insel Elba, Italien.

Sill	Parallel zur sedimentären oder vulkanischen Schichtung eindringen des Magma kühlt ab und kristallisiert; es bildet Lagergänge	Die meisten Sills und Dikes sind mittelkörnig und sie zeigen teilweise abgeschreckte (feinerkörnige bis glasige) Ränder. Mitunter werden die Gesteine in die sie eindringen, metamorphisiert, wodurch verkrustete Ränder entstehen.		Kilt Rock Sill, Skye, Großbritannien. Die über dem Sill liegenden Schichten wurden erodiert.
Dike	Gänge entstehen, wenn Magmen Risse in Gesteinen füllen, dann abkühlen und kristallisieren			Dunkle Dolerit-Gänge aus dem Präkambrium (1100 Mill. J.), die durch helleres Gestein (1800 Mill. J.) schneiden, Koster-Inseln, Schweden
Pluton/ Batholith	Batholithe sind sehr große Magmakammern, Plutone sind etwas kleiner. Durch langsames Abkühlen des Magmas bildeten sich grobkörnige magmatische Gesteine wie Granit oder Gabbro. Normalerweise metamorphisierten sie das umgebende Gestein und bildeten eine metamorphe Aureole.			Satellitenbild der 30 km großen Granitintrusion des Brandberg-Massivs in Namibia, die das umliegende Gestein zu einer dunklen metamorphen Aureole verkrustete.

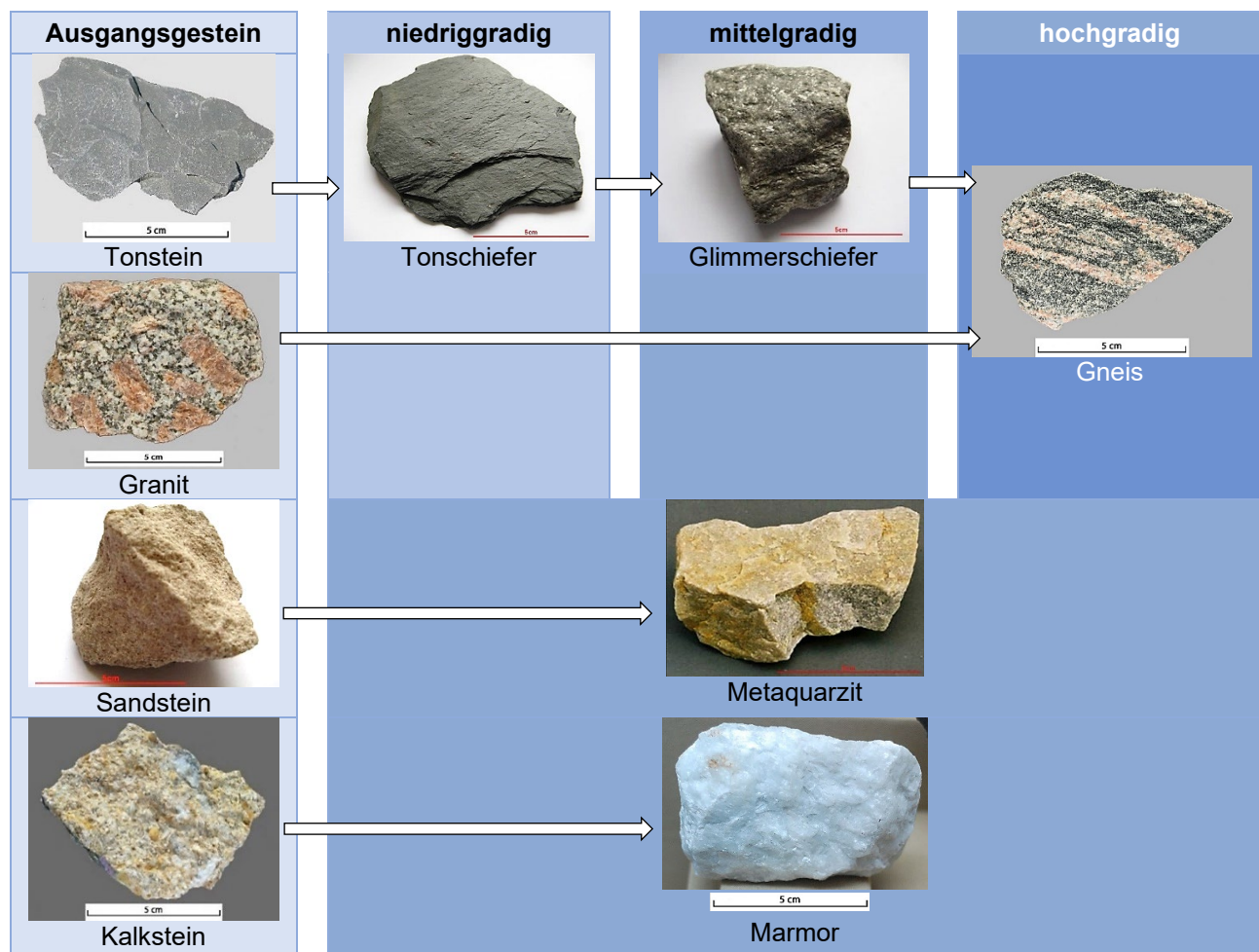
Magmatische Prozesse sind Teil des inneren Gesteinskreislaufs, also des Teils des Gesteinskreislaufs, der durch die Energie der Erde angetrieben wird (Temperatur und Druck). Wir wissen seit vielen Jahren, wie die Prozesse des magmatischen Gesteinszyklus ablaufen, aber ihre zugrunde liegenden Ursachen wurden erst in jüngerer Zeit durch die Theorie der Plattentektonik verstanden, wie in Tabelle 4.21.

4.1.2.4 Metamorphe Prozesse

Wenn tektonische Platten in Phasen der Gebirgsbildung miteinander kollidieren, werden Gesteine aufgrund starker Temperatur- und Druckerhöhungen im Untergrund verändert. Dieser Vorgang wird als **Regionalmetamorphose** bezeichnet. Gesteine können auch als Folge des Aufheizens durch eindringende Magmen bei der **Thermometamorphose** (oder **Kontaktmetamorphose**) umgewandelt werden. In beiden Fällen rekristallisieren die ursprünglichen Sedimentgesteine, magmatischen Gesteine oder andere metamorphe Gesteine im festen Zustand zu metamorphen Gesteinen. Wenn die Gesteine jedoch so stark erhitzt werden, dass sie vollständig schmelzen, geht die Veränderung über die Metamorphose hinaus und wird zu einem magmatischen Prozess.

Regionalmetamorphose, verursacht durch Plattenkollision, erzeugt Gesteine, die von schwachmetamorphem Schiefer bis zu hochmetamorphem Gneis reichen, zusammen mit Marmor und Metaquarzit, wie in Tab. 4.16 dargestellt. Diese widerstandsfähigen Gesteine sind normalerweise undurchlässig und neigen dazu, höher gelegenes Land und ziemlich zerklüftete Landschaften zu bilden.

Tab. 4.16. Durch Regionalmetamorphose gebildete metamorphe Gesteine



Das Ausmaß der durch eindringende Magmen verursachten Kontaktmetamorphose hängt von der Größe des Magmakörpers ab. Kleinere Körper heizen das umgebende Gestein auf, wodurch schmale **Kontaktzonen** am Rand entstehen. Größere Körper enthalten viel mehr Wärmeenergie und erzeugen breite Kontaktzonen, sogenannte **metamorphe Aureolen**. Dort, wo sich feinkörniges Gestein in Hornfels umwandelt, werden Sandsteine zu Metaquarziten und Kalksteine zu Marmoren (Abb. 4.8 und Tab. 4.16).

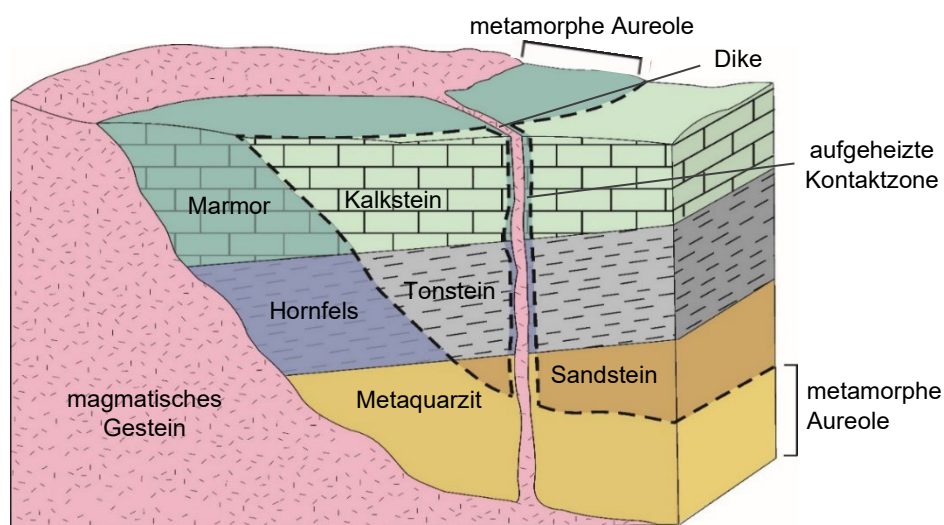


Abb. 4.8. Auswirkungen der Kontaktmetamorphose

Die Ursachen der Metamorphose im Zusammenhang mit dem Gesteinskreislauf wurden mittlerweile durch die Theorie der Plattentektonik erklärt (Tab. 4.21).

4.1.2.5 Deformationsprozesse

Wenn Platten in Gebirgsbildungsphasen miteinander kollidieren, können Gesteine nicht nur umgewandelt, sondern auch auf unterschiedliche Weise deformiert werden. In Tiefen von weniger als etwa 10 km sind die Drücke und Temperaturen so hoch, dass sich die meisten Gesteine verbiegen und **Falten** bilden. In höheren Lagen, wo immer noch enorme seitliche Drücke herrschen, neigen Gesteine eher dazu, zu brechen als sich zu verbiegen. So verhält sich Gestein in der Nähe der Oberfläche spröde und bricht, während es sich in größerer Tiefe plastisch verhält, sich faltet und fließt.

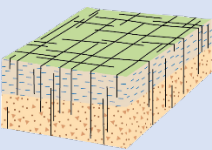
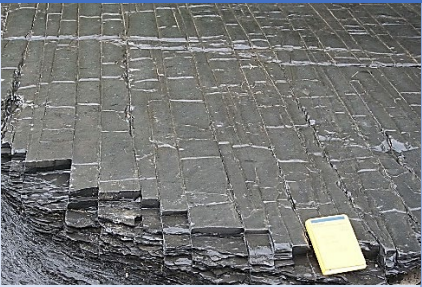
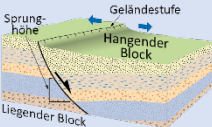
Gesteine verformen sich auch, wenn sich Platten auseinander bewegen oder aneinander vorbeibewegen. Da die Temperaturen jedoch relativ niedrig sind, brechen sie in der Regel eher, als dass sie sich plastisch verhalten.

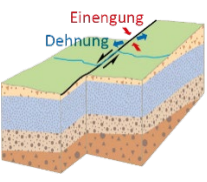
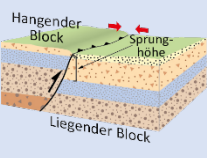
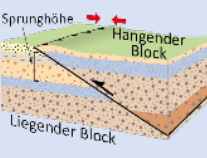
Wenn Gesteine brechen und sich die Gesteine auf beiden Seiten nicht bewegen, entsteht eine Fuge oder **Kluft**. Aber wenn die Gesteine auf beiden Seiten der Kluft gegeneinander bewegt werden, entstehen **Störungen**. Viele Klüfte entstehen dadurch, dass Gesteine unter Spannung auseinandergezogen werden. Die Spannung, die beim Auseinanderziehen von Gestein entsteht, führt zu **Abschiebungen** (engl. normal fault), wenn eine Seite relativ zur anderen nach unten rutscht.

Wenn Gesteine aneinander vorbeigleiten, bilden sich **Blattverschiebungsstörungen** (Seitenverschiebungsstörungen; engl. strike-slip fault), meist mit nahezu vertikalen Flächen.

Wenn Gesteine komprimiert werden, kann eine Seite nach oben und über die andere geschoben werden, was zu einer **Aufschiebung** führt, wobei die **Störungsfläche** normalerweise etwa 40-50° geneigt ist. Bei sehr starker Kompression weisen die Störungsflächen geringere Winkel von etwa 10-20° auf und werden als **Überschiebungen** bezeichnet (Tabelle 4.17).

Tab. 4.17. Brüche im Gestein, erzeugt durch Gesteinsversagen – Klüfte und Störungen

Struktur	Spannung	Beschreibung	Zeichnung	Bild	Beispiel
Kluft-scharen	Horizontale Dehnung	Scharen parallel verlaufender Klüfte, die ohne relative Bewegung durch das Gestein verlaufen, oft vertikal, manchmal horizontal oder in anderen Winkeln			Geklüftete Tonsteinschicht in ordovizischem Schiefer, Fort Plain, New York, USA
Abschiebung		Bei Dehnung kann ein Block relativ zum anderen die Störungsfläche hinunterrutschen, normalerweise steil, 60° oder mehr			Abschiebungen in den Wänden des Kanals von Korinth, Griechenland

Blattver-schiebung	Seitliches Aneinanderdervorbeigleiten	Blöcke gleiten aneinander vorbei – normalerweise entlang einer nahezu vertikalen Störungsfläche			Satellitenaufnahme der Piquiang-Störung, Tian Shan-Gebirge, China
Auf-schiebung	Horizontale Einengung	Durch horizontale Einengung wurde ein Block über einen anderen nach oben gedrückt – auf Störungsflächen von mehr als 45°			Aufschiebung in Sandstein, Oregon, USA
Über-schiebung		Unter großem seitlichem Druck wurde ein Block über den anderen geschoben – Überschiebung, Neigung der Fläche <45°, meist um 10-20°			Lengericher Überschiebung, oberer Block Mergel des Cenomaniums über Tonsteinen und Mergeln des Turoniums

Lagige Gesteine, die sich beim Zusammendrücken plastisch verhalten, bilden Falten. Falten können unterschiedliche Größen haben, vom Berg- bis zum Millimetermaßstab. Falten treten in Reihe auf, wie man sehen kann, wenn man die Hände auf ein Tuch auf einer glatten Oberfläche legt und dieses zusammenschiebt. Man kann eine Reihe von Falten erkennen: aufrechte, sattelartig nach oben zeigende Falten werden **Antiklinalen**, nach unten zeigende **Synklinalen** genannt. Die Faltenformen hängen von der Gesteinsart und dem Ausmaß der Einengung ab. Die Faltungsintensität reicht von sanften **offenen Falten** über **enge Falten** bis hin zu **Isoklinalfalten** mit parallelen Seiten. Falten können eckig oder abgerundet sein. Der Biegebereich von Falten ist das **Scharnier**, während die Seiten als **Faltenschenkel** bezeichnet werden (Tab. 4.18).

Tab. 4.18. Faltentypen

Faltentyp	Beschreibung	Bild	Beispiel
Antiklinale, Sattel	Nach oben gefaltete Antiklinale oder Sattel – eine offene Falte mit einem abgerundeten Scharnier und einer Vergenz nach NW (NW ist auf der rechten Seite)		Antiklinale in devonischen Ton-, Silt- und Sandsteinen. Teufelsley bei Vossenack, Eifel, Rheinland-Pfalz

Synklinale, Mulde	Nach unten gefaltete Synklinale oder Mulde – eine offene Falte mit einem ziemlich eckigen Scharnier			Eine Synklinale in Sandsteinen der neogenen Barstow-Formation, San Bernardino County, Kalifornien, USA
Offene Falte	Offene Falten, mit einem Winkel zwischen den Faltenschenkeln von mehr als 45°, die Scharniere sind abgerundet.			Gefalteter Kalkstein in der Glasebachklamm, Österreich; Unterer Jura
Enge Falte	Enge Falten haben Öffnungswinkel von weniger als 45°	Enge Falten mit eckigen Scharnieren		Enge Falten bei Ágios Pávlos im Süden der Insel Kreta, Griechenland
		Enge Falte mit abgerundetem Scharnier		Gefaltete, 2,6 Milliarden Jahre alte präkambrisches gebändertes Eisenerz in der Nähe von Sudan, Minnesota, USA

Isoklinal-falte	Falten mit parallelen Faltenschenkeln		Kleine isoklinale Falte in den Monts d'Arrée bei Commana, Frankreich
------------------------	---------------------------------------	--	--

Mithilfe der Theorie der Plattentektonik lassen sich mittlerweile viele der zugrunde liegenden Ursachen der Erdverformung erklären, wie in Tab. 4.21 erläutert.

4.1.3 Die Struktur der Erde und die Art der Nachweise

Wir wissen, wie die Gesteine des äußeren Teils der Erde auf den Kontinenten beschaffen sind, weil wir natürliche Aufschlüsse in Meeresklippen und Berggebieten sehen können und auch Gesteine in Straßen- und Eisenbahnanschnitten und Steinbrüchen sehen können. Durch Bergwerke finden wir heraus, wie das Gestein tiefer in der Erde beschaffen ist, und wir bohren auch meter- bis kilometertiefe Bohrlöcher. Dank des Tiefseeb Bohrprogramms (International Ocean Discovery Program, IOPD) wissen wir auch, wie das Gestein am Meeresboden beschaffen ist. Aber wir müssen andere Arten von Nachweisen nutzen, um herauszufinden, wie die Erde unterhalb der Tiefe von Bohrlöchern aussieht.

Box 4.5. Das tiefste Bohrloch der Erde, das "Kola Superdeep Borehole"



Das tiefste Bohrloch, das bisher auf der Erde gebohrt wurde, ist das 12,3 km tiefe Kola Superdeep Borehole. Diese Bohrung wurde im äußersten Nordwesten Russlands auf der Halbinsel Kola durchgeführt, dauerte mehr als 20 Jahre und endete 1992. Das Bohrloch bohrte etwa ein Drittel des Weges durch die kontinentale Kruste, hauptsächlich durch präkambrischen Granit und Gneis. Eine der Überraschungen war, dass das Gestein tief im Bohrloch immer noch mit Wasser gesättigt war.

4.1.3.1 Nachweise

Den besten Nachweis, den wir dafür haben, wie die Erde unter unseren Füßen, unterhalb der Bohrlochtiefe, aussieht, sind die seismischen Daten von Erdbeben. Jedes Mal, wenn es ein großes Erdbeben gibt, breiten sich Stoßwellen quer durch die Erde aus, während die ganze Erde vibriert. Sie strahlen durch die Erde wie

Wellen über einen See, nachdem man einen Stein hineingeworfen hat. Die Geschwindigkeit der Wellen hängt von dem Material ab, durch das sie gehen, und das hilft uns herauszufinden, wo die Grenzen zwischen den verschiedenen Gesteinsarten sind und um welche Gesteine es sich handelt.

Wir haben auch andere Hinweise für den Aufbau der Erdschichten, wie in den folgenden Abschnitten beschrieben, aber es sind die Hinweise aus seismischen Wellen, die uns die meisten Informationen geliefert haben, wie in Abb. 4.9 dargestellt

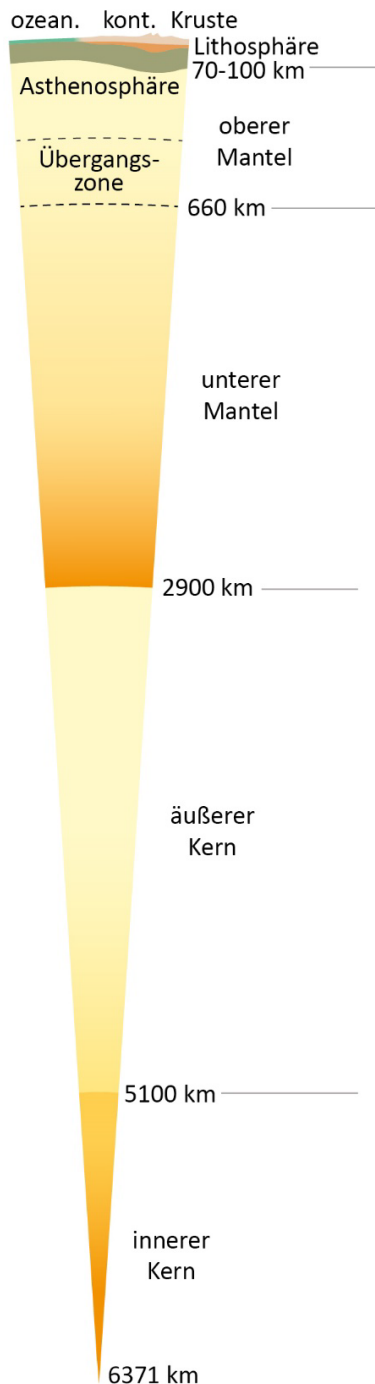
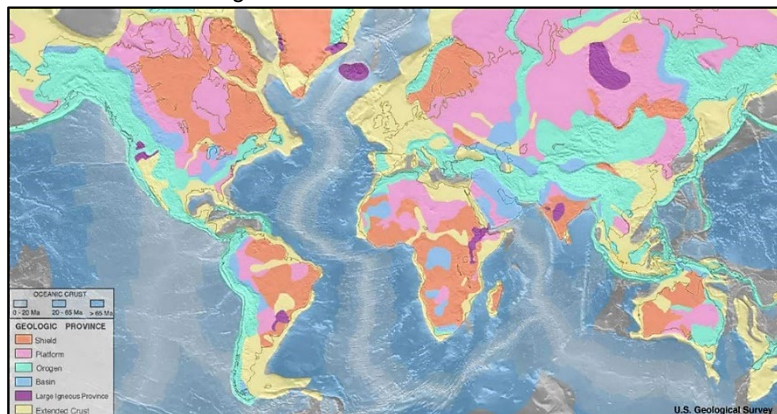


Abb. 4.9 zeigt, dass die Kruste im Vergleich zur Entfernung zum Erdmittelpunkt sehr dünn ist. Ein gutes Modell für die Dicke der Kruste ist eine auf einen Fußball geklebte Briefmarke. Es gibt zwei Arten von Kruste: die kontinentale Kruste, die sich unter Kontinenten und Festlandssockeln befindet, und die ozeanische Kruste unter den Ozeanen.

Die geologische Karte in Abb. 4.10 zeigt, dass die Kruste der Kontinente viel komplexer ist als die Kruste der Ozeane. Dies liegt daran, dass die kontinentale Kruste im Allgemeinen viel älter ist als die ozeanische Kruste und einige Gebiete an mehreren Zyklen des Gesteinszyklus beteiligt waren. Die ältesten bisher auf der Erde gefundenen Gesteine sind mehr als 4000 Millionen Jahre alt und bilden einen Teil der Kontinentalkruste in Australien. Die ältesten Teile der ozeanischen Kruste sind hingegen nicht älter als 200 Millionen Jahre und haben eine viel einfachere Geschichte

Abb. 4.10. Die Geologie der Erdkruste



Die kontinentale Kruste, auf der wir leben, ist etwa 25 bis 70 km dick. Obwohl Sedimentgesteine nur etwa 5 % des Volumens der gesamten Kruste ausmachen, bedecken sie 75 % der kontinentalen Krustenoberfläche, etwa drei Viertel der hell gefärbten Fläche in Abb. 4.10. Schätzungen zufolge bestehen die Sedimentgesteine zu etwa 79 % aus Tonstein, zu 13 % aus Sandstein und zu 8 % aus Kalkstein. Der größte Teil der kontinentalen Kruste besteht aus magmatischem Gestein wie Granit und metamorphem Gestein wie Gneis (Abb. 4.11). Alle Gesteine sind durch normale Gesteinskreislaufprozesse entstanden, auch wenn einige der darin enthaltenen Materialien den Gesteinskreislauf mehrmals durchlaufen haben.

Abb. 4.9. Schnitt durch die Erde

Zu den Nachweisen für die Struktur und das Gestein der ozeanischen Kruste gehören seismische Daten, Daten aus Tiefseebohrungen und Informationen von Orten wie Zypern oder Oman, wo eine Plattenkollision alte ozeanische Kruste auf den Kontinent gedrückt hat. Diese Nachweise zeigen, dass die ozeanische Kruste aus

vier Hauptlagen besteht. Darüber liegt eine Schicht aus Tiefseesedimenten, die direkt an den mittelozeanischen Rücken nicht zu finden sind, sondern erst mit zunehmender Entfernung von den Rücken immer dicker werden. Unter den Sedimenten befindet sich eine Lage aus feinkörnigem Basalt, oft in Form von Kissenlava. Der Basalt liegt über einer Lage, die aus vielen vertikalen Gängen aus mittelkörnigem Dolerit besteht. Darunter befindet sich eine dicke Lage aus grobkörnigem Gabbro, bevor die Basis der ozeanischen Kruste und die Oberseite des Erdmantels erreicht werden (Tab. 4.19).

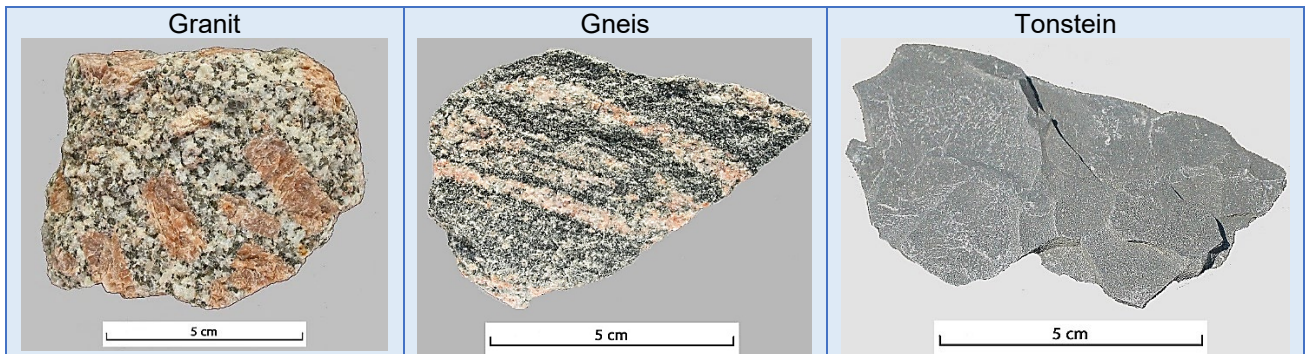
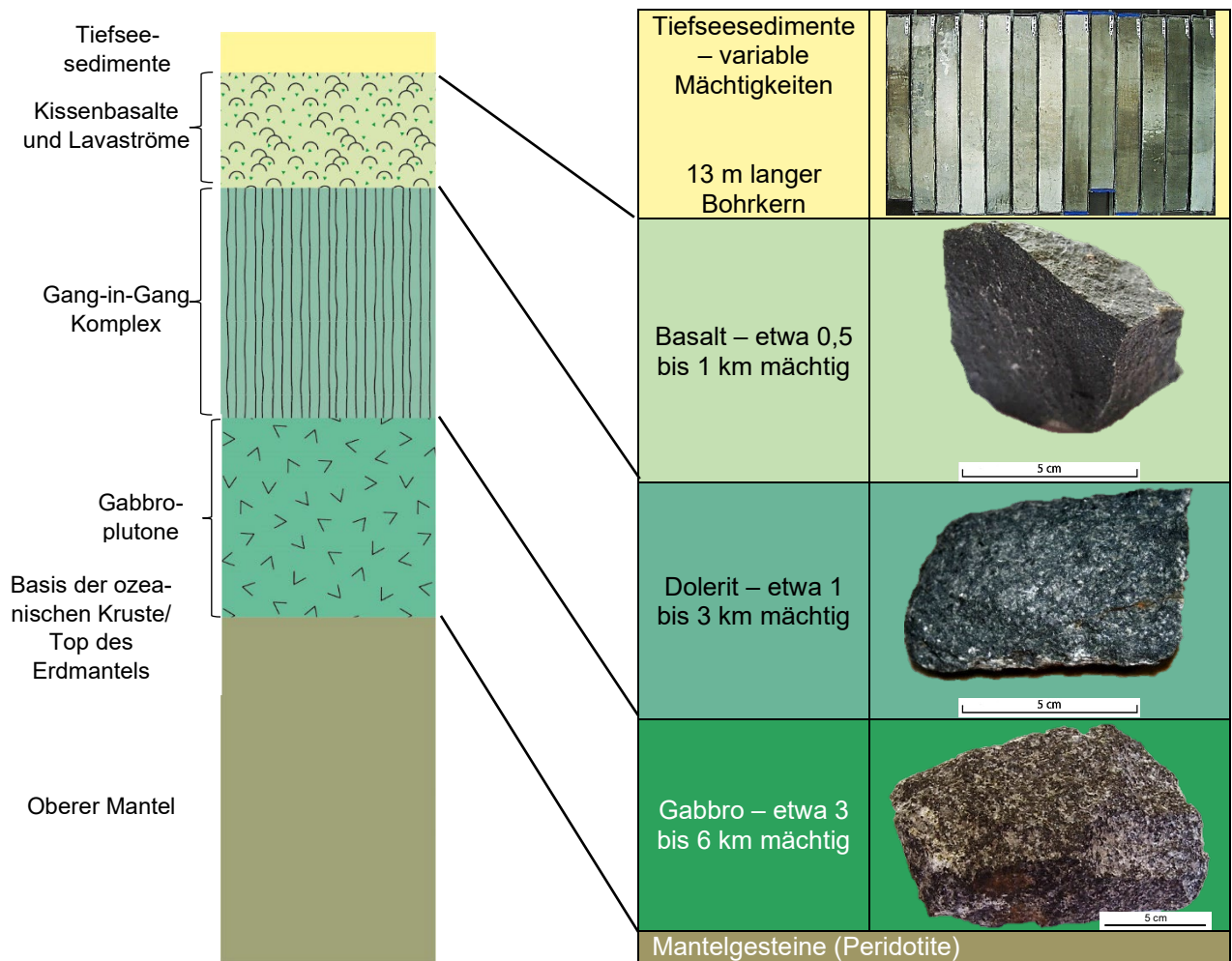


Abb. 4.11. Die häufigsten Gesteine der kontinentalen Kruste

Tab. 4.19. Gesteine der ozeanischen Kruste



Es lässt sich nachweisen, wie sich an divergierenden Plattenrändern neue ozeanische Kruste bildet. Magma aus dem teilaufgeschmolzenen obersten Bereich des Erdmantels, der Asthenosphäre, steigt unter einem mittelozeanischen Rücken auf. Dort sammelt und verfestigt es sich und bildet im unteren Teil grobkörnigen Gabbro. Steigt es durch vertikale Brüche an die Oberfläche auf, bricht es als Lava auf dem Meeresboden aus,

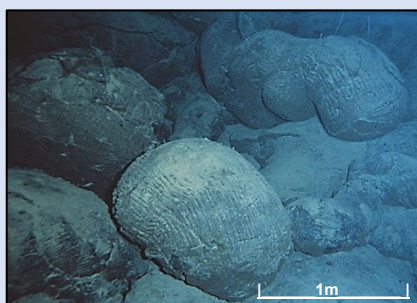
wo sich die oft charakteristischen Kissenlaven bilden. Es erstarrt schnell zu feinkörnigem und glasigem Basalt. Währenddessen erstarrt das Magma in den vertikalen Brüchen etwas langsamer zu mittelkörnigem Dolerit. Jedes Mal, wenn sich ein Bruch öffnet, bildet sich ein neuer Gang innerhalb der vorhandenen Gänge, wodurch die Gang-in-Gang-Struktur aus immer mehr Doleritgängen entsteht.

Box 4.6. Bildung von Kissenlava unter Wasser

Wenn Basaltlava unter Wasser ausbricht, bildet sie „Kissenformen“. Es entstehen Zungen aus orangefarbener oder rotglühender Lava, deren äußere Oberfläche durch das Wasser schnell zu einer festen, aber zu Beginn noch flexiblen Außenschicht abgekühlt wird. Wenn mehr Lava ausbricht, wird das neu entstehende Gestein kissenförmig. Spätere Kissen, die oben oder an den Seiten herausgedrückt wurden, sacken in die Form früher geformter Kissen unten ab. Da dieser Prozess nur im Wasser abläuft, zeigen fossile, in Gesteinssequenzen erhaltene Kissen, dass sie sich unter Wasser gebildet haben müssen. Das Filmchen der Bildung von Kissenlava kann sehr gefährlich sein, da das umgebende Meer unsichtbare Taschen mit kochend heißem Wasser aufweist.



Eine Lavazunge unter Wasser



Kissenbasalt auf dem Meeresboden in der Nähe von Hawaii



Fossile Kissenlaven aus der Kreide, Oman, Wadi al Jizzi

Die neu gebildete, aus drei Lagen bestehende ozeanische Kruste wird durch Plattenbewegung langsam vom divergenten Plattenrand wegbewegt. Feinkörniger Schlamm (häufig die kalkreichen Schalen mikroskopisch kleinen Planktons) regnet aus dem darüber liegenden Ozean herab und setzt sich auf den Kissen ab. Je weiter sich die Platte bewegt, desto dicker wird diese Sedimentdecke, bis sie in der Nähe der Ozeanränder eine Dicke von 1 km oder mehr erreichen kann (Abb. 4.6).

An aktiven Plattenrändern wird ozeanische Kruste durch Subduktion wieder in den Erdmantel zurückgeführt. Dies erklärt, warum ozeanische Kruste normalerweise nicht älter als 200 Millionen Jahre alt ist und warum die ozeanische Kruste umso älter wird, je weiter sie vom divergenten Plattenrand entfernt ist, wie in Abb. 4.10 dargestellt.

Die mittlere Dichte der ozeanischen Kruste ($3,0 \text{ g/cm}^3$), wie aus der Geschwindigkeit von Erdbebenwellen und Messungen von Gesteinsproben hervorgeht, ist größer als die mittlere Dichte der kontinentalen Kruste ($2,7 \text{ g/cm}^3$). Der Mantel liegt unter der gesamten Kruste und ist unter der kontinentalen Kruste bis in eine Tiefe von etwa 100 km völlig fest. Dieser Teil des Mantels wird als lithosphärischer Mantel bezeichnet, der zusammen mit der aufliegenden Kruste die feste äußere Schale, die **Lithosphäre** bildet. Viele Beobachtungen haben gezeigt, dass die **Asthenosphäre**, das ist der Mantel direkt unter der Lithosphäre, geringfügig teilaufgeschmolzen ist (1 – 3%) und deswegen unter den intensiven Drücken und Temperaturen in der Tiefe und in der großen zur Verfügung stehenden Zeit sehr langsam fließen kann (Bewegungsgeschwindigkeit liegt bei etwa 1 bis 5 cm pro Jahr). Sowohl die ozeanische als auch die kontinentale Kruste bzw. Lithosphäre werden also von der darunter liegenden fließenden Asthenosphäre getragen. Da die ozeanische Kruste dichter ist als die kontinentale Kruste, sinkt sie auf ein tieferes Niveau. Das bedeutet, dass fast die gesamte ozeanische Kruste deutlich unter dem Meeresspiegel liegt, während der größte Teil der kontinentalen Krustenoberfläche über dem Meeresspiegel liegt. Auch ist die ozeanische Kruste dünner und beträgt durchschnittlich nur etwa 7 – 8 km Dicke (Tab. 4.20).

Tab. 4.20. Eigenschaften der Erdsphären

Sphäre		durchschnittliche Tiefe, km		durchschnittliche Dicke, km		Zustand		Durchschnittliche Dichte, g/cm ³	
kontinentale Kruste	ozeanische Kruste	35	8	35	8	fest	fest	2,7	2,9
Mantle		2900		2875		meistens fest		3,3 – 5,7	
Outer core		5150		2250		flüssig		9,9 – 12,2	
Inner core		6371 Earth centre		1221		fest		12,6 – 13,0	

4.1.3.2 Erdmantel

Die Grenze zwischen der Kruste und dem darunter liegenden Mantel wurde 1909 durch Erdbebenwellenmessungen entdeckt. Moderne seismische Daten belegen, dass ein Großteil des festen Mantels im Laufe der geologischen Zeit fließen kann, was nicht nur für das „Schwimmen“ der Lithosphäre, sondern auch für die Bewegung der tektonischen Platten der Erde verantwortlich ist.

Box 4.7. Woraus besteht der Erdmantel?

Ein Versuch, in den 1960er-Jahren durch die Meereskruste bis zum Erdmantel zu bohren, scheiterte. Der einzige Beweis, den wir für die Beschaffenheit der Mantelgesteine haben, sind Beweise aus zweiter Hand.



Xenolithe aus Peridotit (Lherzolith) in basaltischem Vulkangestein. Bei einigen Vulkanausbrüchen werden Fragmente (Xenolithe) anderer Gesteine nach oben befördert, von denen man annimmt, dass sie aus dem darunter liegenden Erdmantel mitgerissen wurden.



Chromitischer Serpentin aus dem Krauth-Komplex (Speik-Komplex) in den Ostalpen Österreichs. In einigen Kollisionszonen sind bei der Gebirgsbildung Mantelgesteine auf den Kontinent geschoben (obduziert) worden, so dass sich nun fossile Gesteine der ozeanischen Lithosphäre auf der kontinentalen Kruste befinden.



Steinmeteorit aus dem NWA 869-Meteorit. Es wird angenommen, dass Steinmeteoriten aus Mantelgestein kleiner Planeten stammen, die in der Vergangenheit zerfielen.

Aufgrund dieser und anderer Nachweise wird angenommen, dass der Erdmantel aus Peridotit und ähnlichen Gesteinen besteht. Peridotit ist ein sehr dichtes Gestein, das hauptsächlich aus den Mineralen grüner Olivin und dunkel gefärbter Pyroxen besteht.

4.1.3.3 Erdkern

Die Dichte der gesamten Erde beträgt etwa 5,5 g/cm³, aber die Dichte der äußeren Teile der Erde ist viel geringer. Daher muss die Erde einen viel dichteren Kern haben. Die Grenze des Kerns wurde 1914 durch seismische Untersuchungen entdeckt. Weitere seismische Daten zeigten, dass der äußere Teil des Kerns flüssig ist (das wurde erkannt, weil seismische Scherwellen nicht durch flüssige Medien laufen können), während der innere Teil des Kerns fest ist. Es wird angenommen, dass Ströme im flüssigen äußeren Kern das Magnetfeld der Erde erzeugen.

Box 4.8. Woraus besteht der Erdkern?

Die Grenze des Erdkerns liegt fast 3000 km unter der Erdoberfläche, sodass wir niemals in der Lage sein werden, Kerngesteine zu beproben. Wir benötigen daher Nachweise aus zweiter Hand, um herauszufinden, woraus der Kern wahrscheinlich bestehen wird. Eisen hat die richtige Dichte für ein Kerngestein und ist ein im Weltraum häufig vorkommendes Material. Bei vielen Meteoriten handelt es sich um Eisenmeteoriten, die aus einer Mischung von Eisen und etwas Nickel bestehen; Es wird angenommen, dass diese von kleinen Planeten stammen, die vor langer Zeit auseinandergebrochen sind. Diese Mischung aus Eisen und Nickel weist eine ähnliche Dichte und seismische Eigenschaften wie der Kern auf. Daher wird angenommen, dass der Kern aus einer Eisen-Nickel-Legierung besteht. Im äußeren Kern ist es flüssig und im Zentrum fest. Aktuelle Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass der Kern möglicherweise auch etwas Silizium enthält.



Ein 1,7 kg schwerer einzelner Meteorit aus dem Sikhote Alin-Meteoritenschauer. Eisenmeteorit mit 30 cm Durchmesser aus Sibirien – der äußere Teil schmolz, als er durch die Atmosphäre fiel.

4.1.3.4 Lithosphäre

Die Grenzen zwischen Kruste und Mantel sowie zwischen Mantel und Kern sind durch Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung gekennzeichnet. Die Kruste ist reich an Silizium mit etwas Eisen, der Mantel enthält viel mehr Eisen und der Kern besteht fast ausschließlich aus Eisen. Wir wissen jetzt, dass es eine weitere wichtige Grenze auf der Erde gibt, die nicht durch chemische Veränderungen, sondern durch mechanische Veränderungen, Veränderungen im Verhalten der Gesteine, gekennzeichnet ist.

Die Grenze ist die Basis der Lithosphäre, markiert durch die Zone, in der die Temperatur des Gesteins etwa 1300 °C erreicht. Die Gesteine oberhalb dieser Temperaturzone sind fest und starr, während sie unterhalb dieser Zone zwar überwiegend fest mit einem geringen Grad an Teilaufschmelzung (ca. 1 – 3 %) sind und sich deshalb sehr langsam verformen und fließen können. Die feste und starre Lithosphäre besteht aus der Kruste und dem äußersten oberen Erdmantel, dem lithosphärischen Mantel, und bildet die Erdplatten. Diese werden durch plattentektonische Prozesse bewegt, wobei der schwächere Mantel darunter, die Asthenosphäre, diese Bewegung ermöglicht. Abb. 4.12 zeigt den Aufbau der äußeren Erde mit Kruste, Lithosphäre und dem obersten Mantel.

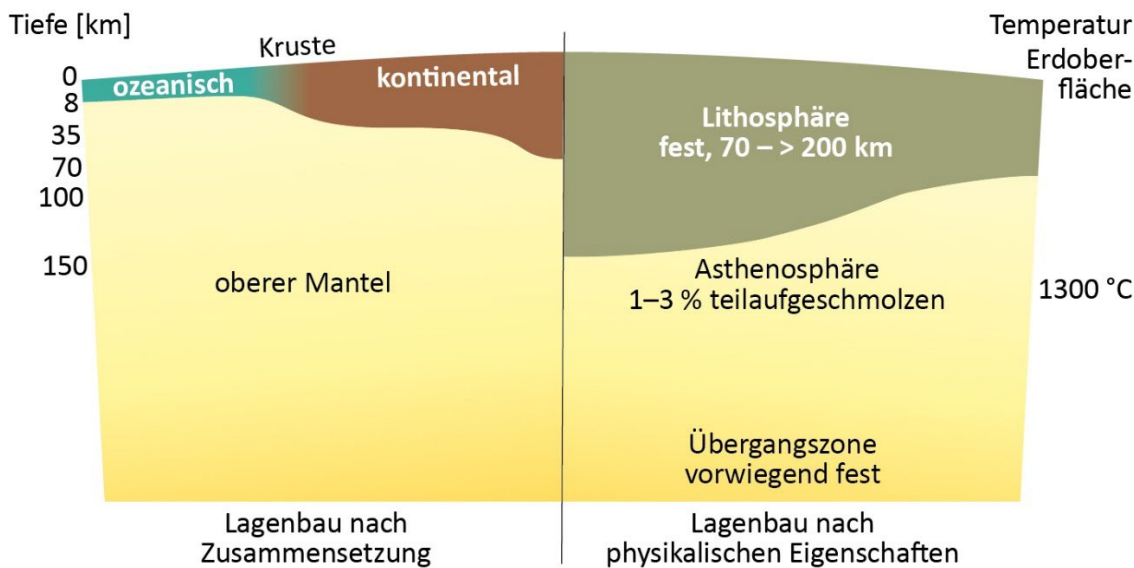


Abb. 4.12. Der äußere Teil der Erde

Die Erdplatten bestehen also aus Lithosphäre und können sich auf der Asthenosphäre bewegen. Obwohl der Mantel überwiegend fest ist, kann er langsam fließen. Platteneigenschaften und -bewegungen werden durch die Theorie der **Plattentektonik** beschrieben.

4.1.4 Plattentektonik und die Art der Nachweise

4.1.4.1 Eine vereinende Theorie

Sobald einigermaßen genaue Weltkarten verfügbar waren, wurde festgestellt, dass die Küstenlinien Afrikas und Südamerikas eine enge Übereinstimmung miteinander aufwiesen. Aber erst 1915 veröffentlichte Alfred Wegener ein Buch mit Argumenten dafür, dass sie einst zusammen gewesen waren: seine **Kontinentalverschiebungstheorie**. Das Buch, das 1922 auch auf Englisch veröffentlicht wurde, enthielt Hinweise nicht nur für die Zusammengehörigkeit der Kontinente als Puzzle, sondern auch für die übereinstimmende Geologie und die Fossilien auf beiden Seiten. Wegener zeigte auch, wie die Kontinentaldrift die sich verändernden Umgebungen in kontinentalen Gesteinen erklären könnte, wo auf Eisablagerungen oft Wüstensandsteine und später äquatoriale Gesteine folgten. Seine Arbeit wurde jedoch zunächst weitgehend ignoriert, vor allem, weil er keinen überzeugenden Mechanismus zur Verschiebung der Kontinente vorschlagen konnte. Die meisten Geologen gingen damals davon aus, dass sich die Erdkruste auf und ab bewegen könne, jedoch nicht seitwärts. Man ging auch davon aus, dass die Erdkruste zu dünn sei, um driftende Kontinente zu bilden. Wir wissen jetzt, dass die Erdkruste tatsächlich zu dünn ist, um Platten zu bilden; Platten werden aus der viel dickeren Lithosphäre gebildet (Abb. 4.12).

Während des Zweiten Weltkriegs in den 1940er Jahren entwickelten Wissenschaftler zwei Methoden zur Erkennung von U-Booten unter Wasser, die später für die Geschichte der Plattentektonik von entscheidender Bedeutung waren. Die Sonarmethode sendet Schallwellen durch das Wasser und empfängt alle zurückgeworfenen Wellen. Damit können U-Boote, aber auch der Meeresboden und seine Tiefe erfasst werden. Magnetometer wurden ebenfalls entwickelt, um U-Boote über ihre magnetischen Eigenschaften zu erkennen. Später dienten sie aber auch zur Erfassung magnetischer Veränderungen im Meeresboden.

In den 1950er und 1960er Jahren wurde das Sonar zur Kartierung des Meeresbodens eingesetzt. Die Kartierung zeigte, dass die Ozeane flachere Rücken in der Nähe der Ozeanzentren und tiefere Bereiche, damals als Gräben bezeichnet, in der Nähe der Ozeanränder haben (heute werden diese tiefen Strukturen als Tiefseerinnen bezeichnet). Die Höhenzüge sind zum Teil mehr als 1,5 km hoch und die Tiefseerinnen reichen bis in eine Tiefe von mehr als 11 km (Abb. 4.13). Dies veranlasste Harry Hess 1962 dazu, seine Hypothese der **Ozeanbodenspreizung** (Sea Floor Spreading) aufzustellen. Hess schlug vor, dass sich neue ozeanische Kuste an den Rücken in der Nähe der Zentren der Ozeane bildete und seitwärts bewegt wurde, bis sie die Tiefseerinnen erreichte, wo sie zurück in den Mantel transportiert wurde. Die Temperatur spielte in seiner

Theorie eine Schlüsselrolle. Wo sich neues Material bildete, war es sehr heiß und hatte daher eine geringere Dichte, wodurch die mittelozeanischen Rücken entstanden. Als das Material wegbewegt wurde, kühlte es ab und sank, bis es an den Tiefseerinnen so kalt und dicht wurde, dass es wieder in den Mantel sinken konnte.

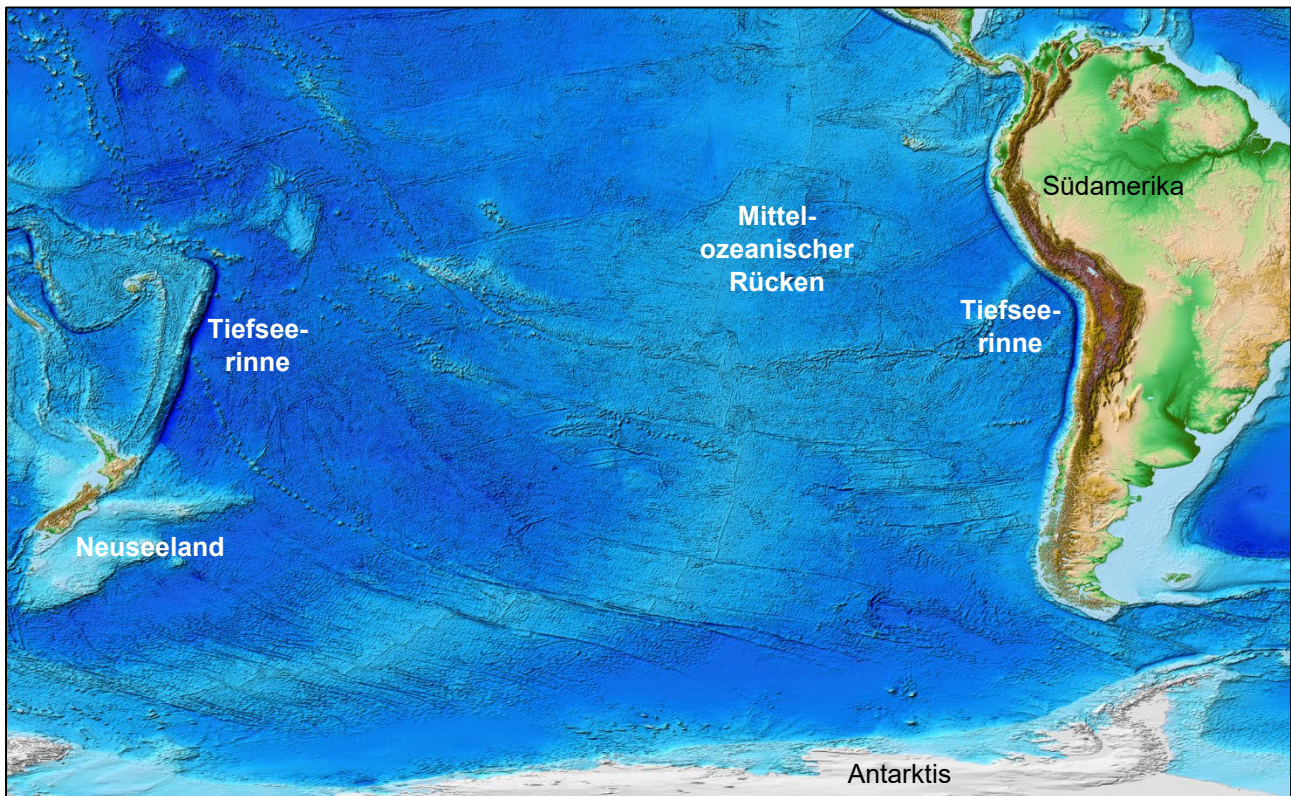


Abb. 4.13. Meeresbodentopographie des südlichen Pazifischen Ozeans mit einem mittelozeanischen Rücken in der Nähe des Zentrums und Tiefseerinnen im Osten und Westen

Während Wissenschaftler den Meeresboden mit dem Sonar kartierten, verwendeten sie auch Magnetometer, um den Magnetismus des Meeresbodens zu messen. Sie fanden heraus, dass der Meeresboden magnetisch war. An einigen Stellen stimmte die Richtung des magnetischen Feldes mit dem normalen Erdmagnetismus überein, sodass ein stärkeres magnetisches Signal erzeugt wurde. An anderen Orten war der Magnetismus des Meeresbodens in die entgegengesetzte Richtung und hob einen Teil des normalen Erdmagnetismus auf, was zu einem schwächeren Signal führte.

Als all dies in eine Karte eingetragen wurde, konnte man auf beiden Seiten der ozeanischen Rücken ein Muster erkennen, wie es in Abb. 4.14 dargestellt ist. Dies wurde 1963 von Vine und Matthews in Großbritannien und von Morley in Kanada erklärt. Sie wussten bereits, dass Gesteine, die magnetische Minerale enthalten, beim Abkühlen in die gleiche Richtung magnetisiert werden wie das Magnetfeld, in dem sie abkühlen. So werden heute abkühlende Basaltlaven in Richtung des heutigen Magnetfeldes magnetisiert, mit einer Süd-Nord-Magnetisierung. Sie wussten auch von der Theorie, dass, obwohl sich der magnetische Nordpol derzeit in der Nähe des geografischen Südpols befindet (und der magnetische Südpol in der Nähe des Nordpols), dieser Magnetismus in der geologischen Vergangenheit viele Male umgedreht ist. Es gab daher auch Zeiten, in denen der magnetische Nordpol in der Nähe des geografischen Nordpols und der magnetische Südpol in der Nähe des Südpols lag.

Dies half ihnen zu erklären, dass das magnetische Muster auf dem Meeresboden durch Basalte gebildet wurde, die beim Abkühlen magnetisiert wurden. Wenn sie abkühlten, als der Erdmagnetismus in die gleiche Richtung wie heute ging, nahmen sie einen Süd-Nord-Magnetismus an, wenn sie jedoch abkühlten, als der Magnetismus in die entgegengesetzte Richtung ging, nahmen sie einen Nord-Süd-Magnetismus an. Gesteine mit Süd-Nord-Magnetismus verstärken den heutigen Süd-Nord-Magnetismus und ergeben eine positive Anomalie, die als **normale magnetische Polarität** bezeichnet wird. Basalte mit Nord-Süd-Magnetismus reduzieren das

Gesamt magnetfeld, was zu einer negativen Anomalie führt, die als **inverse magnetische Polarität** bezeichnet wird, wie in Abbildung 4.15.

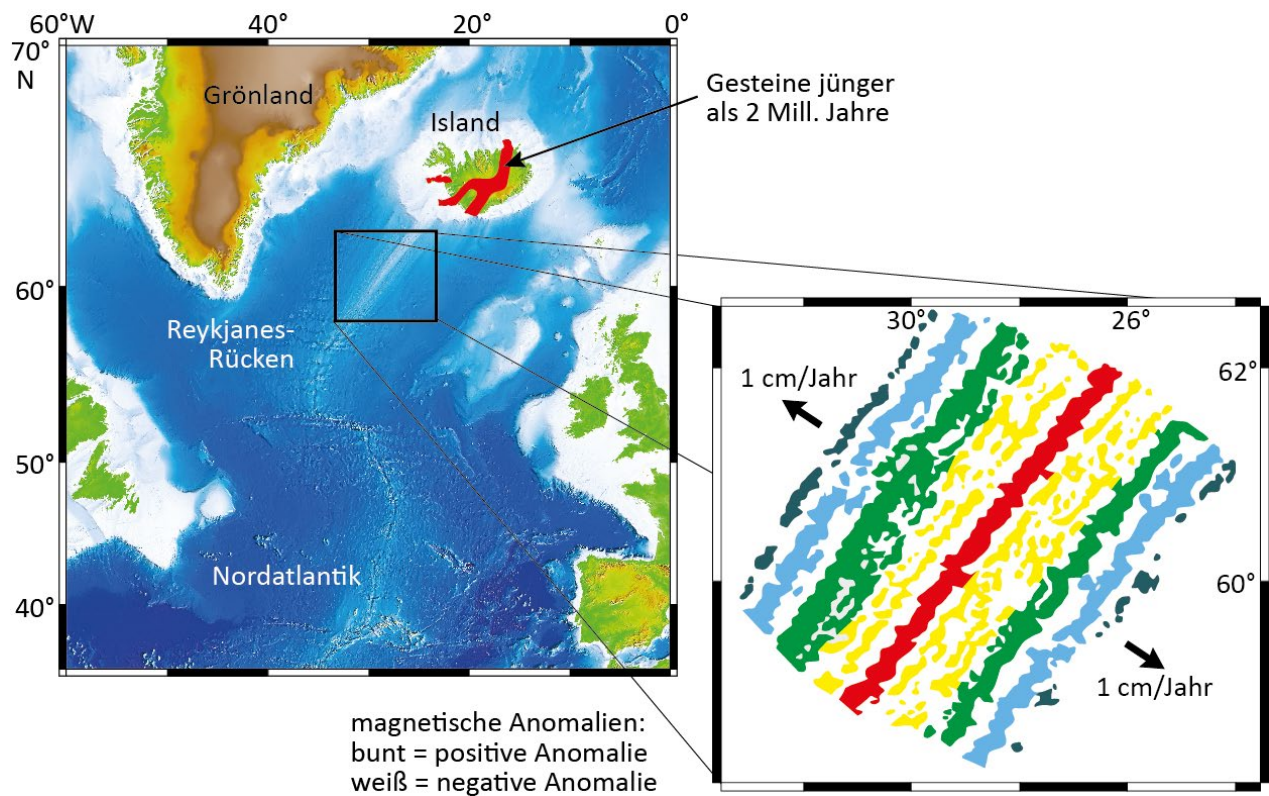


Abb. 4.14. Magnetische Anomalien am Reykjanes-Rücken südwestlich von Island

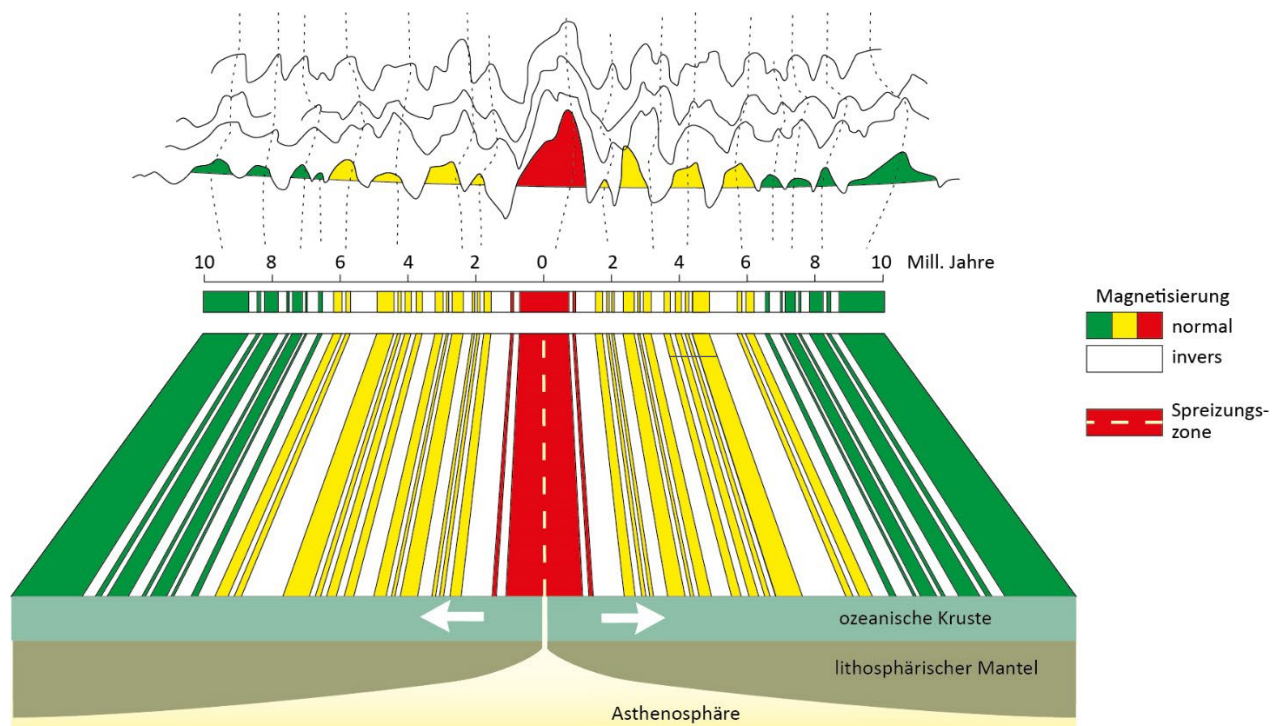


Abb. 4.15. Die Bildung magnetischer Streifenmuster durch Basalte am Meeresboden

Umkehrungen der magnetischen Pole der Erde sind nicht regelmäßig: Manchmal kann es eine lange Zeitspanne zwischen Umkehrungen geben, manchmal geschehen sie schnell. Aus diesem Grund sind die Magnetstreifen am Meeresboden unterschiedlich breit und das Muster auf einer Seite eines Meeresrückens ist das Spiegelbild des Musters auf der anderen Seite. Die streifenförmige Anordnung der magnetischen Anomalien lieferten eine hervorragende Unterstützung für Hess' Hypothese der Ozeanbodenspreizung.

Eines der Probleme bei der Idee der Ozeanbodenspreizung bestand darin, dass sich die vulkanische Aktivität in den Ozeanen nicht nur auf ozeanische Rücken konzentriert, sondern auch auf einigen Vulkaninseln weit entfernt von Rückenrücken beobachtet wurde. John Tuzo Wilson erklärte dies 1963 mit seiner Hotspot-Theorie. Eine heiße Blase von Gestein steigt im Erdmantel pilzartig auf und schmilzt an der Oberseite teilweise zu Basaltmagma. Dieses Magma steigt durch die Lithosphäre auf und bricht durch einen Vulkan aus. Wenn die Lithosphäre über diesen Hotspot hinweg bewegt wird, entsteht eine Kette von Vulkanen, wie in Abb. 4.16 dargestellt. Je weiter die Vulkaninseln vom Hotspot entfernt wurden, desto älter sind sie.

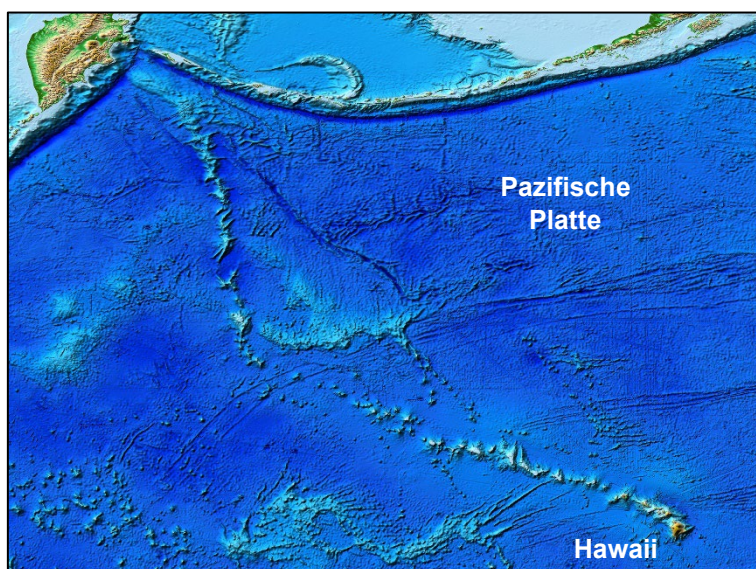


Abb. 4.16. Die Kette vulkanischer Inseln und unterseeischer vulkanischer Seeberge, die mit dem Hawaii-Hotspot im Pazifischen Ozean verbunden sind. Der Knick in der Kette ist mit einer Änderung der Bewegungsrichtung der Pazifischen Platte verbunden.

Im Jahr 1964 erkannte John Tuzo Wilson einen weiteren Befund, der die Idee der Ozeanbodenspreizung stützte. Er erkannte nicht nur, dass sich an ozeanischen Rücken neuer Meeresboden bildete, der an ozeanischen Tiefseerinnen wieder in den Erdmantel zurücktransportiert wird, sondern auch, dass die ozeanischen Rücken an vielen Stellen durch große Verwerfungen versetzt waren, die er **Transformstörungen** nannte (Abb. 4.17).

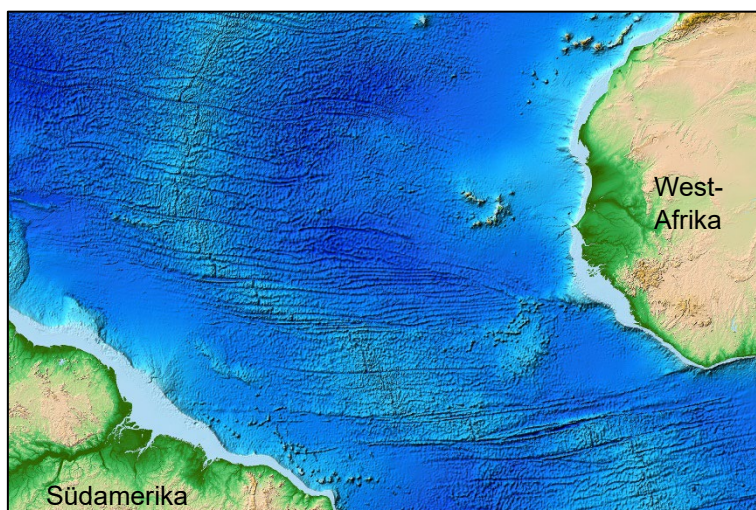


Abb. 4.17. Transformstörungen als ausgleichendes geometrisches Element am mittelozeanischen Rücken des Atlantischen Ozeans

Aus all diesen Befunden zusammen leitete sich die neue einheitliche Theorie der Plattentektonik ab, die Mitte der 1960er Jahre weithin akzeptiert wurde. Die neue Theorie vereinte Wegeners Kontinentalverschiebungstheorie mit Hess' Theorie der Ozeanbodenspreizung und allen anderen Hinweisen darauf, dass die gesamte äußere Erde in einzelne Bruchstücke, später Platten genannt, zerbrochen war, die sich über die Erdoberfläche bewegten. Diese Platten haben drei Arten von Rändern: die von Hess erkannten mittelozeanischen Rücken und Tiefseerinnen und die von Wilson erkannten Transformstörungen. Die tektonischen Platten tragen die Kontinente mit sich, sodass die Kontinente nicht, wie von Wegner vorgeschlagen, durch die Kruste driften, sondern sich zusammen mit den Platten bewegen.

Wilson erkannte dann, dass Plattenbewegungen für die Entstehung von Superkontinenten in der geologischen Vergangenheit verantwortlich sein könnten und dass durch die Zusammenführung und spätere Trennung von Kontinenten neue Ozeane entstanden. Dieser Zyklus der Entstehung und Auflösung von Superkontinenten wird heute **Wilson-Zyklus** oder **Superkontinent-Zyklus** genannt.

Die neue vereinende Theorie erklärte nicht nur geologische Merkmale im globalen Maßstab, sondern berücksichtigte auch die Gebirgsbildungsphasen und die Heraushebung der Gebirge, die eine Schlüsselrolle im Kreislauf der Gesteine spielen. Damit konnte man erklären, dass es in Gebirgen Gesteinsabfolgen mit unterschiedlichen Sedimentgesteinen geben kann, die in sehr unterschiedlichen Umgebungen abgelagert wurden. Das kann vom Gletscher bis zur tropischen Umgebung am Äquator und von der Tiefsee bis zum Gebirge reichen. Später wurde die Plattenbewegung auch als eine der treibenden Kräfte der Evolution angesehen, die viele Bereiche der Geologie vereinte. Seitdem wurden immer mehr Hinweise gefunden, welche die Theorie der Plattentektonik stützen. Sie erklärt die meisten, aber nicht alle geologischen Merkmale und genau diese Merkmale, die nicht durch die „normale“ Theorie der Plattentektonik erklärt werden können, stehen heute im Mittelpunkt vieler wissenschaftlicher Forschungen.

4.1.4.2 Neubildung von Platten und Subduktion

Die Lithosphäre der Erde ist in eine Reihe großer und kleiner Teile, sogenannte tektonische Platten, zerlegt. Wenn sich diese Platten bewegen, tragen sie die Kontinente mit sich. An mittelozeanischen Rücken bildet sich neues Plattenmaterial und wird vom Rücken wegbewegt, daher spricht man von **divergenten Plattenrändern**. Mittelozeanische Rücken werden durch Transformstörungen ausgeglichen, bei denen kein Plattenmaterial aufgebaut wird oder verloren geht. Daher werden diese Transformstörungen auch als **konservative Plattenränder** bezeichnet, bei denen die Platte erhalten bleibt.

Das neugebildete, warme und leichte Plattenmaterial der mittelozeanischen Rücken kühlt langsam ab und sinkt, während es sich von den Rücken entfernt, ab. Schließlich wird es so kalt und dicht, dass es wieder in den Erdmantel einzutauchen beginnt; Dieses Abtauchen nennt man **Subduktion**. Durch die Subduktion bewegen sich zwei Platten aufeinander zu, weshalb man sie auch als **konvergente Plattenränder** bezeichnet. Die subduzierte Lithosphäre wird wieder in den Erdmantel integriert, so dass die Gesteine der ozeanischen Lithosphäre durch den globalen plattentektonischen Zyklus recycelt werden.

4.1.4.3 Eigenschaften der Plattenränder

Divergente Plattenränder. An diesen Rändern bildet sich neues Plattenmaterial an mittelozeanischen Rücken, den sogenannten Spreizungszonen. Wenn die Platten auseinandergezogen werden kann Magma, das durch das teilweise Schmelzen des darunter liegenden Mantels entsteht, aufsteigen. Dieses verfestigt sich in Magmakammern zu Gabbros, in Gängen zu Dolerit oder auf dem Meeresboden als basaltische Laven wie in Tab. 4.19 erläutert. Diese neue ozeanische Kruste wird zusammen mit einem Teil des darunter liegenden Mantels zur neuen Lithosphäre, wenn eine neue ozeanische Platte entsteht (Abb. 4.18).

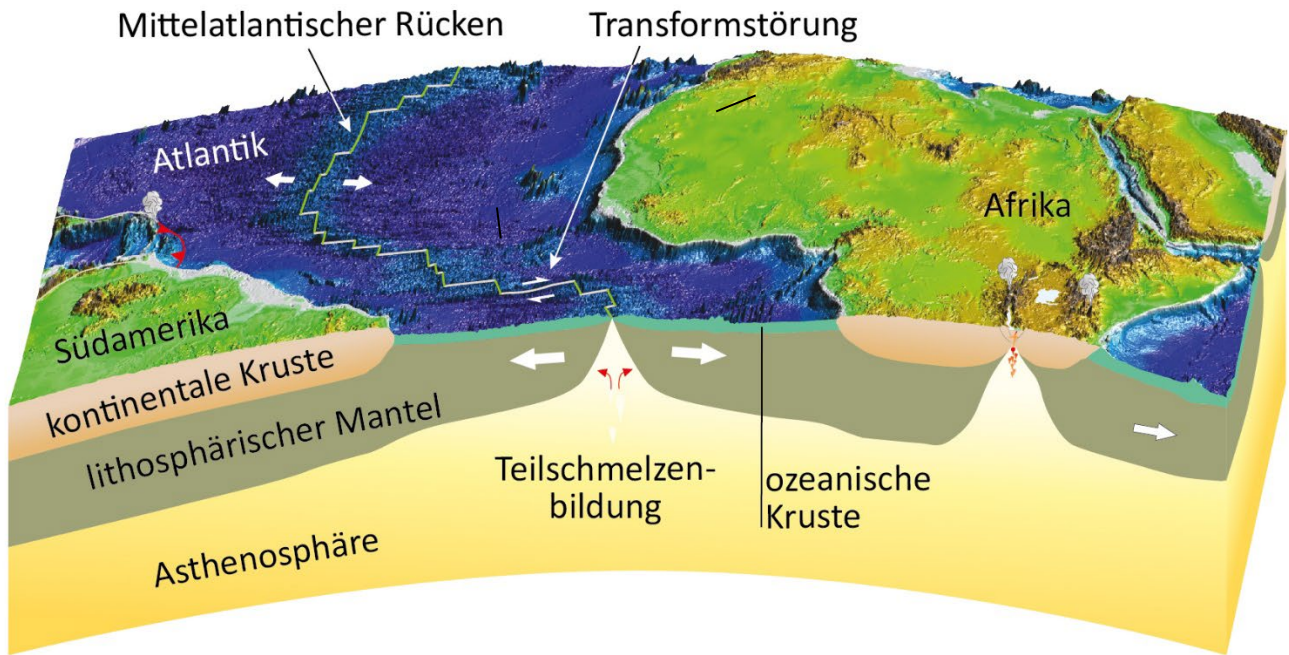
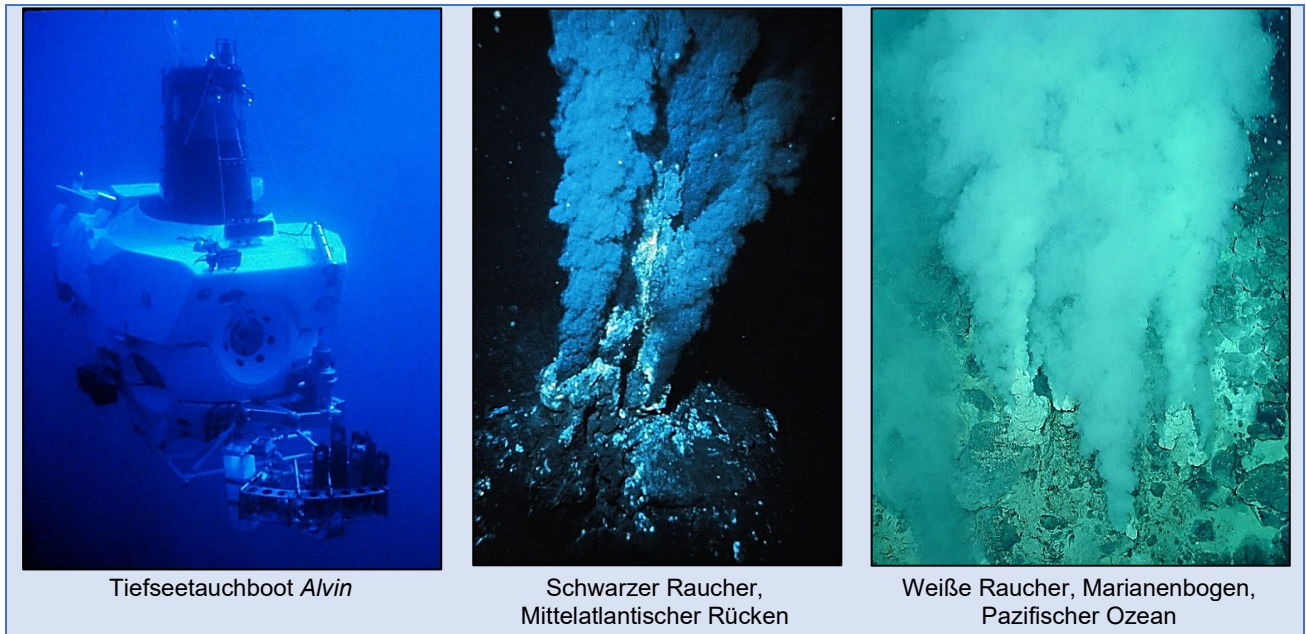


Abb. 4.18. Am mittelozeanischen Rücken im Mittelatlantischen Ozean entsteht neue ozeanische Lithosphäre

Box 4.9. Die Entdeckung schwarzer Raucher an ozeanischen Rücken

Im Jahr 1977 untersuchte das Tiefseetauchboot *Alvin* ein 2 km tiefes ozeanisches Rückengebiet, als seine beiden Piloten zum ersten Mal schwarze Raucher sahen. Sie entdeckten, dass das austretende schwarze, rauchartig schwarz gefärbte Wasser auf über 400 °C überhitzt und stark sauer war. Sie fanden seltsame Lebensformen, die von der Energie und den Nährstoffen lebten, die die Raucher produzierten. Weitere Untersuchungen ergaben, dass kaltes Meerwasser in den nahegelegenen rissigen Meeresboden gesaugt wurde, wo es durch das aufgeheizte Gestein darunter erhitzt wurde. Das überhitzte Wasser löste beim Zurücksteigen auf den Meeresboden Minerale aus den umliegenden Gesteinen. Beim Heraussprudeln reagierte das Wasser mit dem Meerwasser und es kristallisierten schwarze Minerale als „schwarzer Rauch“ aus. Diese werden heute **hydrothermale Quellen** genannt.

Diese erstaunliche Entdeckung eines neuen, bis dahin unvorstellbaren Prozesses tief im Meeresboden veränderte unser Verständnis nicht nur über chemische Prozesse im Ozean, sondern auch darüberhinaus, wie sich biologische Gemeinschaften ohne Licht entwickeln könnten. Es lieferte auch neue Einblicke in die Geophysik mittelozeanischer Rücken. Es ist ungewöhnlich, dass eine einzelne Entdeckung einen solchen Einfluss auf unser Verständnis von Biologie, Chemie und Physik hat. *Alvin* und andere Tiefseetauchboote verfolgen diese Entdeckung noch heute. Auf Meeresböden abseits der mittelozeanischen Rücken wurden nun weiße Raucher entdeckt, bei denen alkalischer weißer „Rauch“ aus blassen Mineralen in flüssigem Kohlendioxid sprudelt.



Wenn neu gebildete Platten auseinandergezogen werden, führt dies zu Spannungen und Rissen, da die feste Platte durch eine Reihe normaler Verwerfungen gebrochen wird. Der mittlere Teil gleitet in ein Grabenbruchtal hinab. Solche Rift-Täler finden sich in der Mitte ozeanischer Rücken auf der ganzen Welt (Abbildung 4.19). Island ist einer der wenigen Orte, an denen sich an Land ein ozeanischer Rücken befindet; Abbildung 4.20 zeigt ein kleines isländisches Grabenbruchtal, das Teil des größeren ozeanischen Rückengraben-Systems ist.

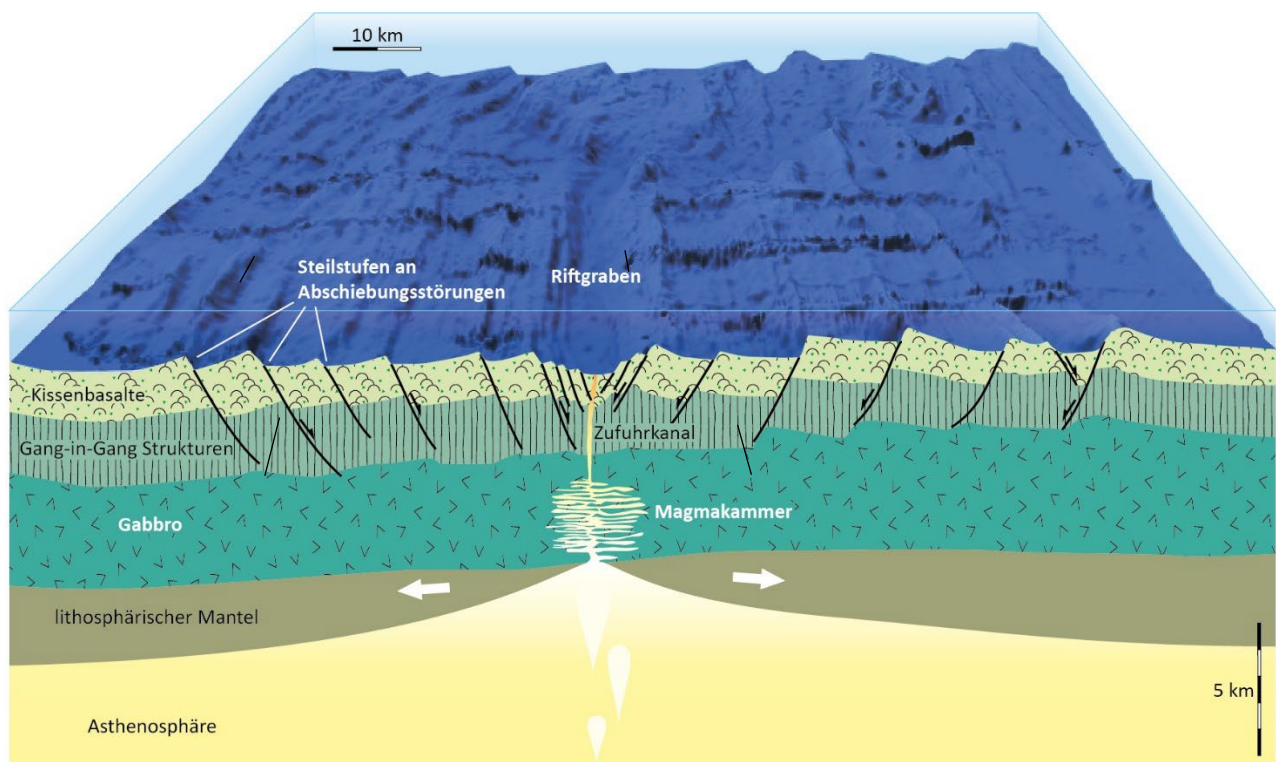


Abb. 4.19. Riftgraben im Zentrum eines mittelozeanischen Rückens



Abb. 4.20. Ein kleines Grabenbruchtal in Island, das mit einem mittelozeanischen Rückensystem in Verbindung steht.

Konservative Plattenränder. Ozeanische Rücken werden an diesen Rändern durch Transformstörungen (Abb. 4.17) ausgeglichen. Transformstörungen unterscheiden sich von allen anderen Störungen. Obwohl sie sich in wie an einer gewöhnlichen Blattverschiebung aneinander vorbeibewegen, sind sie in ihrer Länge klar begrenzt. Sie reichen von Transformationspunkt zu Transformationspunkt (daher der Name Transformstörung), an denen die Plattenbewegung von einer divergierenden oder konvergierenden Bewegung in eine Lateralbewegung transformiert wird. Die jenseits des mittelozeanischen Rückens fortlaufenden Bruchzonen zeigen keine Lateralbewegung, da sich die Gesteine auf beiden Seiten der Störung in die gleiche Richtung bewegen. Lediglich das Absinken des ozeanischen Krustenabschnitts ist unterschiedlich, weswegen es zu vertikalen Ausgleichsbewegungen kommt. Diese Bruchzone gehört deshalb nicht zur Transformstörung, die auf die Zone zwischen den Transformationspunkten beschränkt ist (Abb. 4.21).

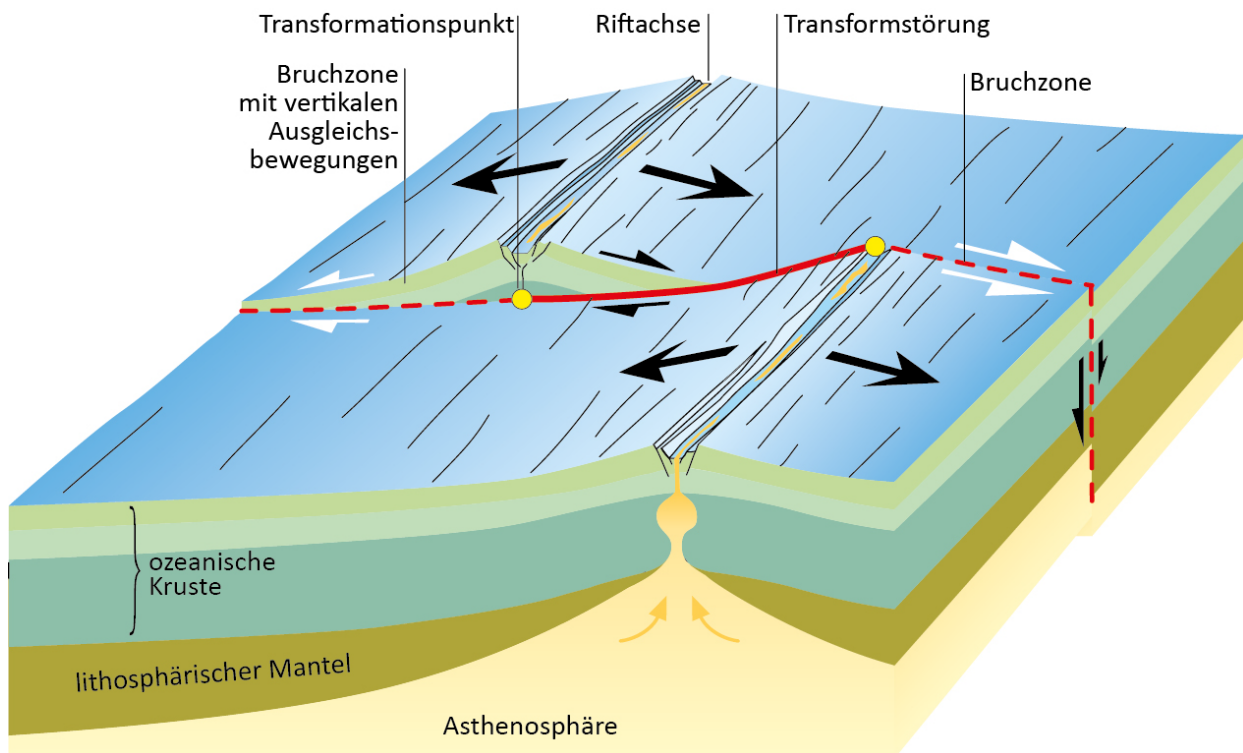


Abb. 4.21. Transformstörung, die einen mittelozeanischen Rücken versetzt.

Transformstörungen versetzen nicht nur ozeanische Rücken, sondern verbinden auch ozeanische Rücken mit Subduktionszonen. Sie wirken sich auch auf Kontinente aus. Berühmte Beispiele, die Kontinente durchtrennen, sind die Nordanatolische Störung in der Türkei und die San-Andreas-Störung in den USA (Abb. 4.22). Da es sich bei Transformstörungen um konservative Plattenränder handelt, gibt es an ihnen keine vulkanische Aktivität, auch wenn dies in manchen populären Filmen so dargestellt wird.



Abb. 4.22. Die San-Andreas-Störung in Kalifornien, USA. Der Block im Vordergrund ist um 130 Meter nach links verschoben worden, seit der Bach sein Tal zum ersten Mal eingeschnitten hat. Das Tal wurde um diese Strecke versetzt.

Erdbeben treten an allen aktiven Plattenrändern auf, aber im Vergleich zu denen in Subduktionszonen haben die Erdbeben an divergenten Rändern und Transformstörungen ihr Hypozentrum allesamt in nur geringer Tiefe. Sie kommen nur bis in die Tiefe der Lithosphäre vor, die weniger als 100 km dick ist. Bei der Subduktion von Platten wird jedoch kalte Lithosphäre in den Erdmantel hinabgezogen und kann bis zu einer Tiefe von etwa 750 km zu Erdbeben führen. Die Subduktion verursacht eine in den Erdmantel abfallende Erdbebenzone, s. Abb. 4.23.

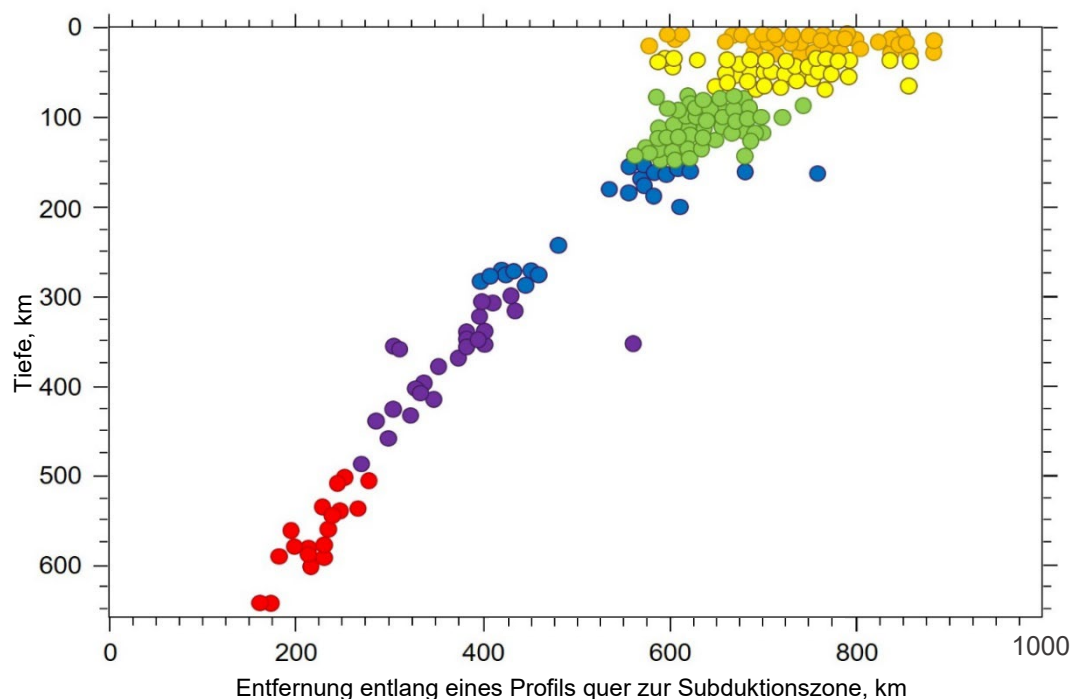


Abb. 4.23. Erdbeben wurden in der gesamten Subduktionszone der Kurilen im Nordwestpazifik registriert. Die Erdbeben sind hinsichtlich ihrer Tiefe farblich gekennzeichnet, was zeigt, dass die Platte nach links subduziert wird

Wenn kalte ozeanische Lithosphäre in den Erdmantel abtaucht, nimmt sie im Gestein eingeschlossenes Wasser mit in die Tiefe. Dieses Wasser bewirkt eine Erniedrigung der Schmelztemperatur der Gesteine und führt zusammen mit dem Temperaturanstieg beim Absinken der Lithosphäre dazu, dass die Gesteine über der subduzierenden Lithosphäre teilweise aufgeschmolzen werden und Magma entsteht. Das neugebildete heiße Magma hat eine geringere Dichte als das darüber liegende Gestein. Deswegen steigt es in die obere Platte auf und führt dort zu magmatischer Aktivität.

Die Auswirkungen der Subduktion sind unterschiedlich, je nachdem, wo die Subduktion stattfindet. Wo eine ozeanische Platte unter eine andere abtaucht, entsteht eine Reihe vulkanischer Inseln. Wenn eine ozeanische Platte unter eine Platte mit einem Kontinent abtaucht, entsteht eine Bergkette mit damit verbundener vulkanischer Aktivität. Wo zwei Kontinente tragende Platten durch Subduktion der dazwischen liegenden ozeanischen Lithosphäre zusammengebracht werden, entsteht durch die Kollision ein größeres Gebirge.

Konvergente Plattenränder, Ozean-Ozean-Kollision. Wenn zwei ozeanische Platten aufeinander zu bewegt werden, wird die kühlere und dichtere Platte subduziert. Durch Subduktion entsteht dort, wo die beiden Platten aufeinandertreffen, eine Tiefseerinne und eine abfallende Erdbebenzone, wie in Abb. 4.23. Durch teilweises Schmelzen eines Teils der abtauchenden Platte entsteht ein Magma mit einer intermediären Zusammensetzung (weder Eisen- noch Silizium-reich), das in explosiven Vulkanausbrüchen an die Erdoberfläche gelangt und eine Vulkankette erzeugt. Die Tiefseerinne und die Vulkane sind girlandenförmig auf der Erdoberfläche angeordnet, weswegen diese Art von Plattenrand als **Inselbogen** bezeichnet wird (Abb. 4.24).

Ozean-Ozean-Kollision : Marianen-Inselbogen

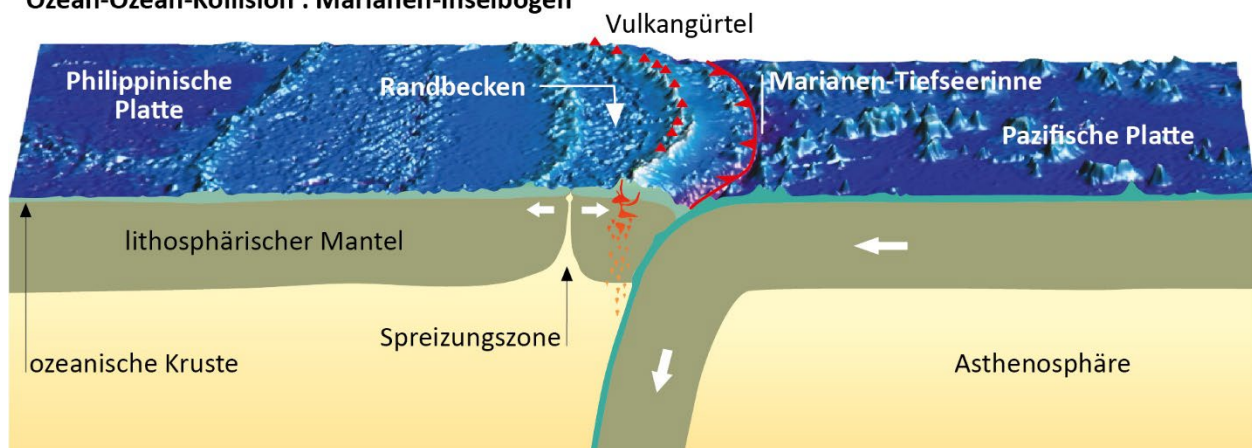


Abb. 4.24. Subduktion bei der Kollision zweier ozeanischer Platten

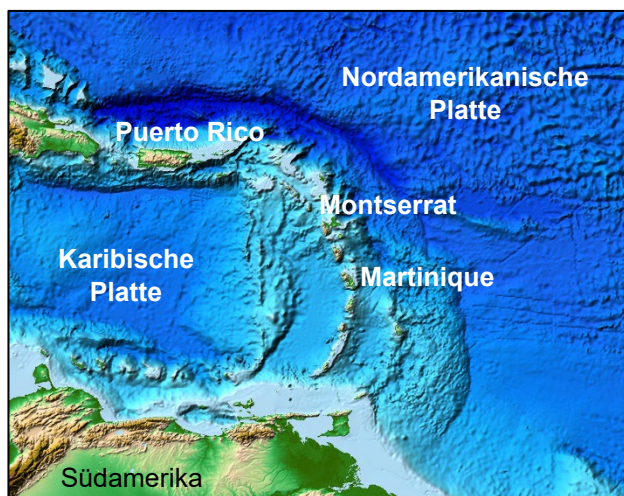


Abb. 4.25. Der karibische Inselbogen in der Kollisionszone der nordamerikanischen mit der karibischen Platte. Zu sehen ist die kreisförmige Anordnung der Tiefseerinne und der dahinter liegende vulkanische Inselbogen.



Abb. 4.26. Eruption des Vulkans Soufrière Hills auf der Insel Montserrat im karibischen Inselbogen.

Konvergente Plattenränder, Ozean-Kontinent-Kollision. Wenn eine ozeanische Platte mit einer kontinentalen Platte kollidiert, bilden die kontinentalen Gesteine immer die Oberplatte, weil sie weniger dicht als die ozeanische Lithosphäre sind. Die ozeanische Platte wird subduziert. Wie bei Inselbögen gibt es entlang der Subduktionszone eine in den Mantel abtauchende Zone mit Erdbebenherden. Über der Subduktionszone kommt es zu explosiven Vulkanausbrüchen.

An konvergenten Plattenrändern kann es noch weitere typische Effekte geben. Beim Eintauchen der ozeanischen Lithosphäre in die Subduktionszone können Teile der obersten Kruste wie bei einem Hobel abgeschabt werden, die sich in einem mächtigen Keil aus Sedimenten auf der Oberplatte stapeln, wie in Abb. 4.27 dargestellt. Mitunter können hier auch Teile der basaltischen Kruste mit eingeschuppt werden. Solch eine Struktur, die unter bestimmten Umständen bei hohem Sedimenteintrag und mäßiger Subduktionsgeschwindigkeit entstehen kann, wird als **Akkretionskeil** bezeichnet. Bei etwa der Hälfte aller Subduktionszonen weltweit kommt es zur Ausbildung eines Akkretionskeils, bei der anderen Hälfte wird das mitgeführte Sedimentmaterial zunächst komplett in die Tiefe mitgezogen, wo es dann aber aufgeschmolzen wird, um als Magma im Inselbogen oder in der Vulkankette wieder aufzusteigen. Es kann sogar dazu kommen, dass die abtauchende Platte die Oberplatte von unten wie eine Raspel abradiert und das abgeschabte Material mit in die Tiefe zieht. Dieser Prozess wird als **Subduktionserosion** bezeichnet.

Durch Akkretion wird dem Kontinent neues Material zugeführt, so dass er nach außen wächst. Er wächst auch nach oben und unten, denn wenn neues Material hinzugefügt wird, bilden sich Berge und er wird dicker. Je höher die Berge werden, desto tiefer sinken sie in die darunter liegende fließfähige Asthenosphäre. Wenn also die Berge der kontinentalen Kruste höher werden, wird die Basis der Kruste und Lithosphäre in tiefere Tiefen gedrückt. Die Massen der kontinentalen Kruste, die beim Aufbau von Gebirgsketten nach unten gedrückt werden, werden **Wurzelzonen** genannt.

Temperatur und Druck sind in der Wurzelzone aufgrund der großen Tiefe sehr hoch, daneben gibt es aber auch noch zusätzlichen kompressiven Druck, der durch die Kraft der sich aufeinanderzubewegenden Platten verursacht werden kann. Dieser seitliche Druck kann zur Verformung und Metamorphose der Gesteine führen. Magma entsteht durch das teilweise Schmelzen in Verbindung mit der subduzierenden Platte. Es entstehen nicht nur intermediäre Magmen, sondern durch teilweises Schmelzen der unteren Kruste entstehen auch siliziumreiche Schmelzen. Diese sind meist so zähflüssig, dass sie in großen Magmakammern erstarren, bevor sie an die Oberfläche gelangen, und so Pluton und Batholithe bilden (Abb. 4.7). Durch die langsame Abkühlung dieses siliziumreichen Gesteins entsteht Granit. Wenn siliziumreiches Magma die Oberfläche erreicht, kommt es zu äußerst gefährlichen explosiven Eruptionen mit der Bildung großer Mengen von Vulkanasche.

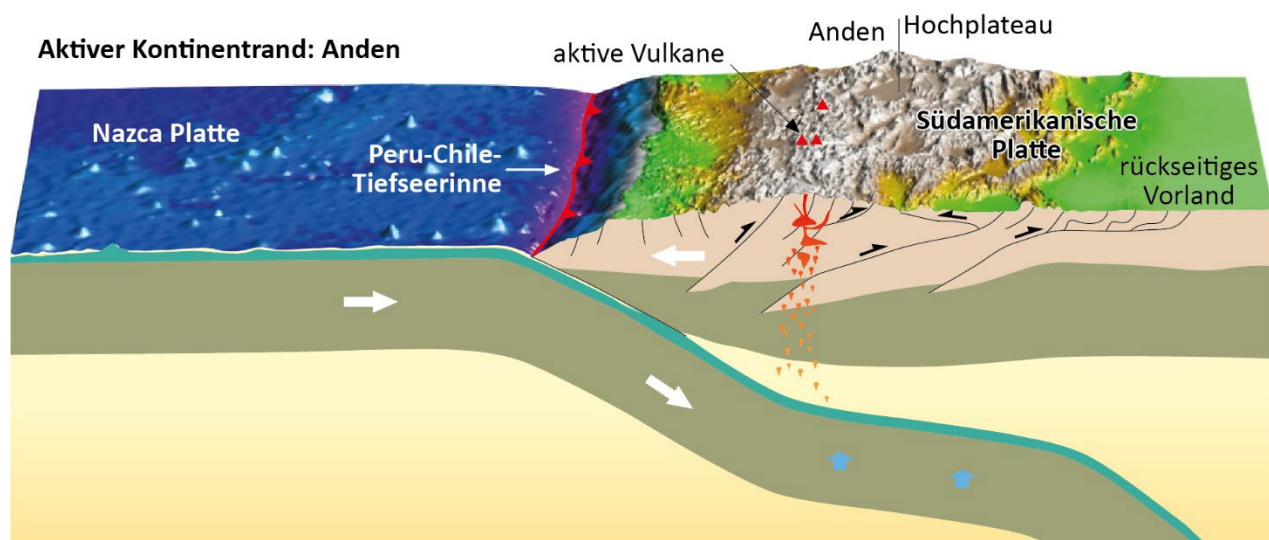


Abb. 4.27. Subduktion einer ozeanischen unter eine kontinentale Platte

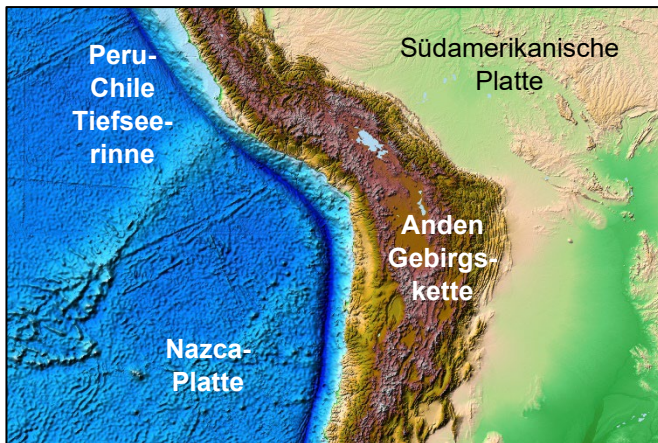


Abb. 4.28. Kollisionszone, die durch die Subduktion der Nazca-Platte unter die südamerikanische Platte entsteht.



Abb. 4.29. Das Anden-Gebirge zwischen Chile und Argentinien.

Konvergente Plattenränder, Kontinent-Kontinent Kollision. Wenn sich zwei kontinentale Platten aufeinander zu bewegen, wird eine zwischen ihnen liegende ozeanische Platte vollständig subduziert. Wenn die Kontinente kollidieren, entstehen hohe Gebirgsketten mit tiefen Wurzelzonen, darunter die höchsten Gebirgsketten der Erde. Die Kollision verursacht starke Verformungen mit großräumigen Überschiebungen und Faltungen sowie Metamorphosen bis hin zu den höchsten Graden. Obwohl die Kollisionszone über Millionen von Jahren hinweg aktiv ist, kann hier keine Subduktion mehr stattfinden, sodass es auch zu keiner vulkanischen Aktivität mehr kommt. Dennoch ist die Region sehr anfällig für Erdbeben, oft von großer Stärke und katastrophaler Natur (Abb. 4.30, 4.31 und 4.32).

Kontinent-Kontinent-Kollision: Himalaya

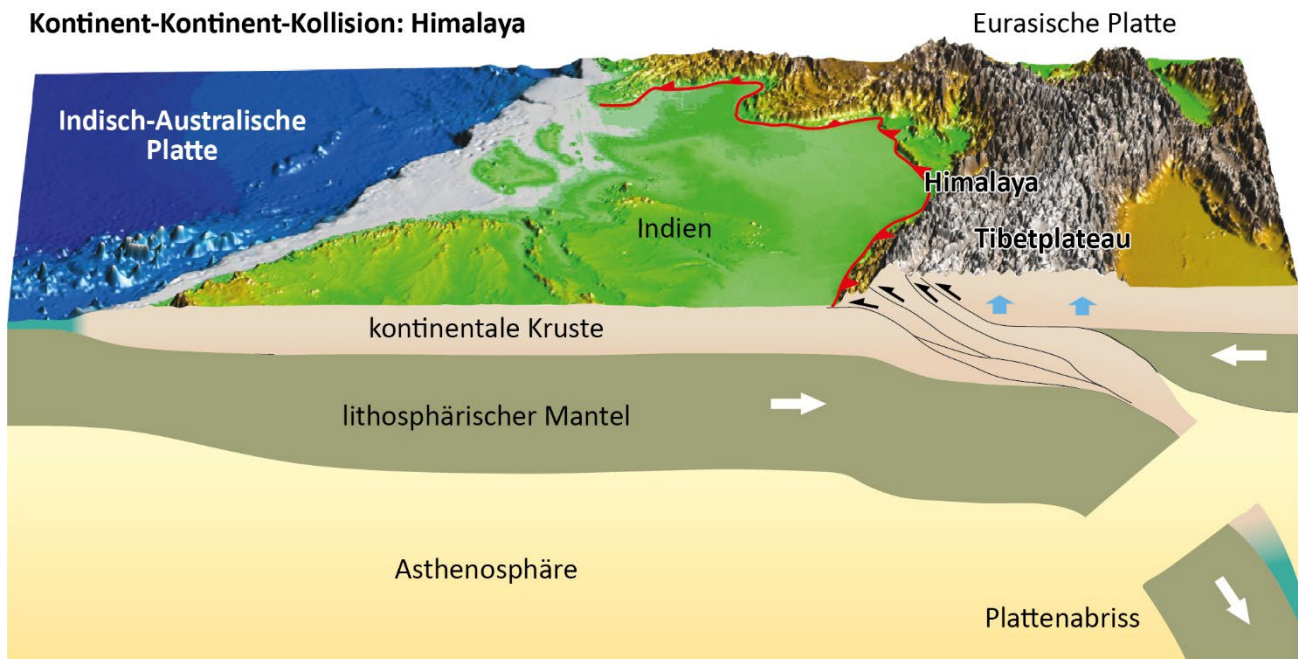


Abb. 4.30. Kollision zweier kontinentaler Platten

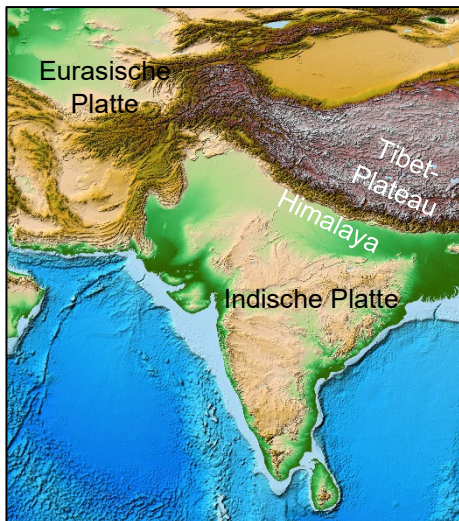


Abb. 4.31. Kollision der Indischen Platte mit der Eurasischen Platte mit der Bildung des Himalayagebirges

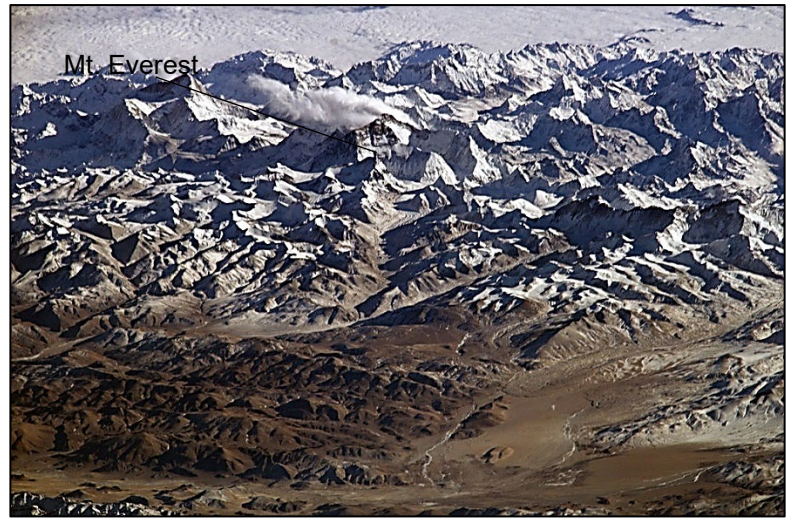


Abb.4.32. Blick auf das Himalayagebirge von der Internationalen Raumstation, mit dem Mount Everest im Zentrum des Bildes

Box 4.10. Durch Plattenkollisionen verursachte Deckenüberschiebungen

Wenn zwei Kontinentalplatten miteinander kollidieren, können mächtige Gesteinspakete überschoben und viele Kilometer entlang von Überschiebungsbahnen mit geringem Neigungswinkel verschoben werden. Manchmal können die Felsen an der Vorderseite von Überschiebungen in riesige Falten gelegt werden, wobei die Gesteinsabfolge an der Basis der Falten dann auf dem Kopf steht, sie sind überkippt.



Die Glarner Überschiebung in den der Schweiz Alpen, Martinsloch, Tschingelhörner. Das dunkle Gestein nahe der Spitze des Berges wurde mehr als 100 km über die unteren Felsen nach Norden geschoben, als die alpine Gebirgskette durch die Kollision zwischen der afrikanischen und der europäischen Platte angehoben wurde.



Faltenstruktur der Morcles-Decke in den Schweizer Alpen, nahe Wallis. Die helleren Felsen an der Spitze des Berges sind genauso alt wie die unter der Falte, wo die untere Gesteinsgruppe durch die Kollision der afrikanischen und europäischen Platte überkippt wurde.

Da wir nun wissen, wie Plattenränder funktionieren, können wir auch die Teile des Gesteinskreislaufs erklären, die vor der Theorie der Plattentektonik schwer zu verstehen waren, wie in Tab. 4.21 dargestellt.

Tab. 4.21. Processes of the internal rock cycle now explained by plate tectonic theory

Prozesse des Gesteinskreislaufs	plattentektonische Erklärung
Metamorphose	Regionalmetamorphose: Wenn Gebirgsketten an den Plattenrändern Ozean-Kontinent und Kontinent-Kontinent entstehen, werden Gesteine in Tiefen transportiert, wo die Temperaturen und der Druck der darüber liegenden Gesteine

	sehr hoch sind. Zusätzliche seitliche Druckspannung der kollidierenden Platten führt dazu, dass das Gestein rekristallisiert.
	Thermische Metamorphose/Kontaktmetamorphose: Intrudierte Magmen, die wie unten beschrieben gebildet werden, heizen das umliegende Gestein in einer metamorphen Aureole auf.
Aufschmelzung (Teilaufschmelzung)	In Subduktionszonen: Die subduzierende Platte trägt Wasser mit sich. Das Wasser und die erhöhten Temperaturen führen dazu, dass das Gestein über der Platte teilweise schmilzt und das durch diesen Prozess gebildete Magma geringerer Dichte aufsteigt. An divergenten Plattenrändern: Unter ozeanischen Rücken wird der Mantel heiß genug, um teilweise zu schmelzen, wodurch eisen-/magnesiumreiche Magmen entstehen, die neues ozeanisches Plattenmaterial bilden.
Magmatische Intrusion	Wenn Magma an den Plattenrändern in die kühlere Kruste darüber aufsteigt, kühlt es ab und kristallisiert in großen Magmakammern als Pluton oder Batholith.
Vulkanische Aktivität	Wenn Magma an Plattenrändern und über Hot Spots die Oberfläche erreicht, bricht es aus. Die Ausbrüche reichen von relativ sicher bis katastrophal gefährlich.
Hebung	Wenn Gebirgsketten an den Plattenrändern Ozean-Kontinent oder Kontinent-Kontinent entstehen, werden oberliegende Gesteine angehoben, während gleichzeitig andere Bereiche in die Wurzelzonen der Berge gedrückt werden. Da die Gebirgskette im festen Mantel „schwebt“, heben sich die darunter liegenden Gesteine und heben sich an, wenn das darüber liegende Gestein durch Erosion abgetragen wird.
Deformation	An divergierenden Rändern: Wenn die Platten auseinander bewegt werden, brechen die spröden Gesteine entlang von Abschiebungen, wobei eine Seite gegenüber der anderen nach unten rutscht. An konservativen Rändern: An einer Transformstörung gleitet eine Platte an einer anderen vorbei und das spröde Gestein zerbricht entlang von Blattverschiebungen. An konvergenten Plattenrändern zwischen Ozean und Kontinent oder Kontinent und Kontinent führen die enormen Druckkräfte dazu, dass die Gesteine in der Nähe der Oberfläche Auf- und Überschiebungen ausbilden. In größeren Tiefen verformen sich Gesteine durch Faltung.

4.1.4.4 Bewegungsmechanismen und -raten

Heutzutage kann die Bewegung von Platten mithilfe des Global Positioning System (GPS) von Satelliten verfolgt werden. Dies zeigt Geschwindigkeiten der Plattenbewegung zwischen etwa 1 und 10 cm pro Jahr, etwa so schnell, wie unsere Fingernägel wachsen (Abb. 4.33).

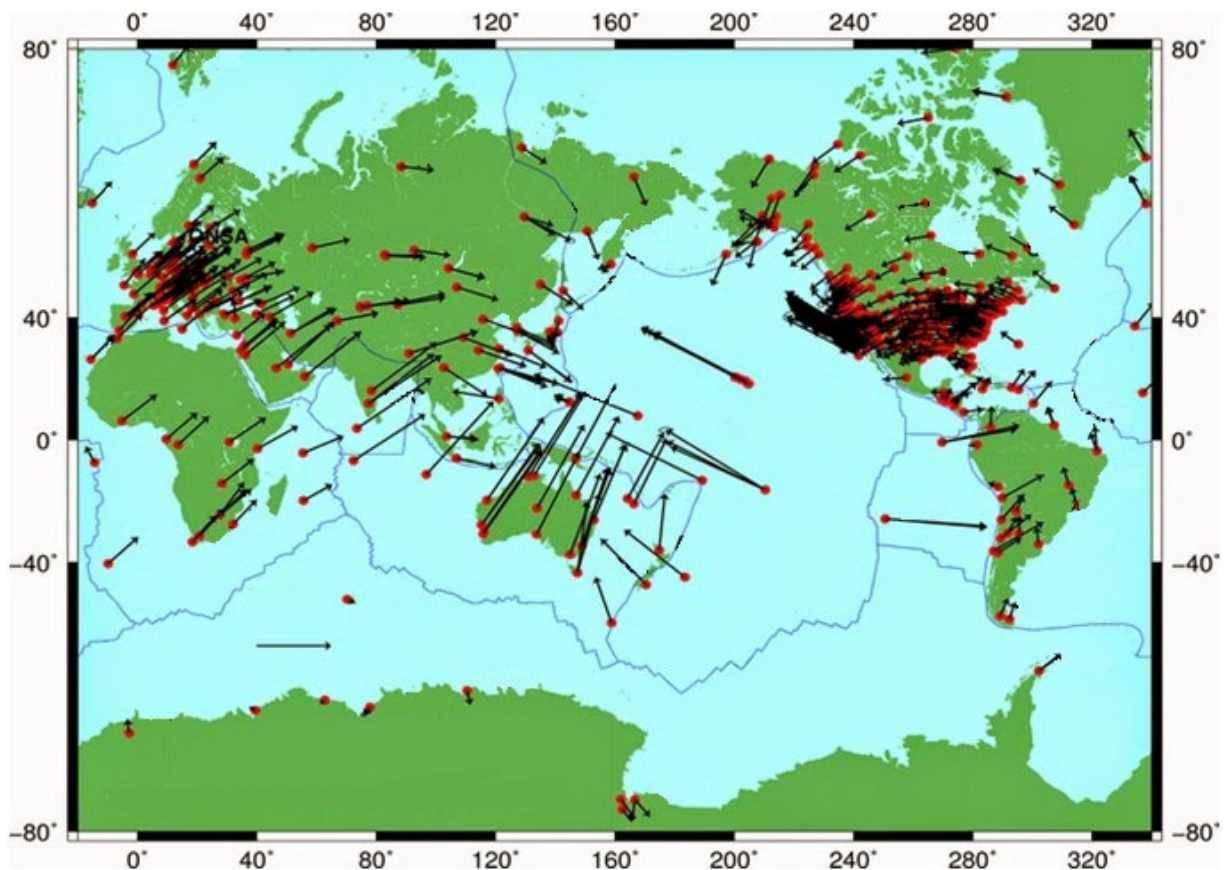


Abb. 4.33. Plattenbewegungsgeschwindigkeiten. Die Längen der Pfeile zeigen die mithilfe von GPS-Messungen ermittelte Geschwindigkeit der Platte.

Viele Jahre lang glaubte man, dass Strömungen im festen, unter der Lithosphäre liegenden Erdmantel die Platten mit sich fortbewegten. Wärmegetriebene Ströme wie diese werden **Konvektionsströme** genannt. Heutzutage können wir seismische Informationen verwenden, um die Erde zu scannen, so wie medizinische Scanner zum Scannen Ihres Körpers verwendet werden können. Diese sogenannte Seismotomografie hat die Vorstellung großräumiger Konvektionsströme im Erdmantel in Frage gestellt und der **Mantelkonvektionsmechanismus** wird mittlerweile nicht mehr als die Hauptantriebskraft der Bewegung großer Platten angesehen.

Platten tauchen in Subduktionszonen in den Erdmantel ein, weil sie dichter sind als das umgebende Gestein. Hinzu kommt, dass die basaltischen Gesteine der ozeanischen Kruste (Basalt, Dolerit, Gabbro) in einer Tiefe ab etwa 50 km in Eklogit umgewandelt werden. Eklogit ist ein hochdruckmetamorphes Gestein, das erheblich dichter als die basaltischen Gesteine ist und damit dazu beiträgt, die ozeanische Lithosphäre in die Tiefe zu ziehen. Es scheint, dass die meisten Plattenbewegungen dadurch erklärt werden können, dass die abtauchende Platte aus kalter, dichter Lithosphäre die Platte, an der sie befestigt ist, über die Oberfläche zieht; Dies wird als **Plattenzug-Mechanismus** (Slab-Pull) bezeichnet. Er wirkt wie ein Tuch, dessen eine Kante über einen glatten Tisch hängt – wenn die Kante auf den Boden fällt, zieht sie den Rest des Tuchs über die Oberfläche.

Wo der Plattenzug keine große Wirkung hat, scheint es einen Schub von ozeanischen Rücken zu geben. Da ozeanische Rücken höher sind als der umgebende Meeresboden, rutscht die neu gebildete Lithosphäre allein durch die Schwerkraft angetrieben von den Rücken weg und schiebt die Platte nach vorne. Dies wird als **Rückendruck-Mechanismus** (Ridge-Push) beschrieben.

Plattenzug und Rückendruck scheinen die Hauptantriebskräfte großer Platten zu sein, allerdings wird dies noch untersucht. Es könnten sich auch noch andere Kräfte auswirken (Abb. 4.34).

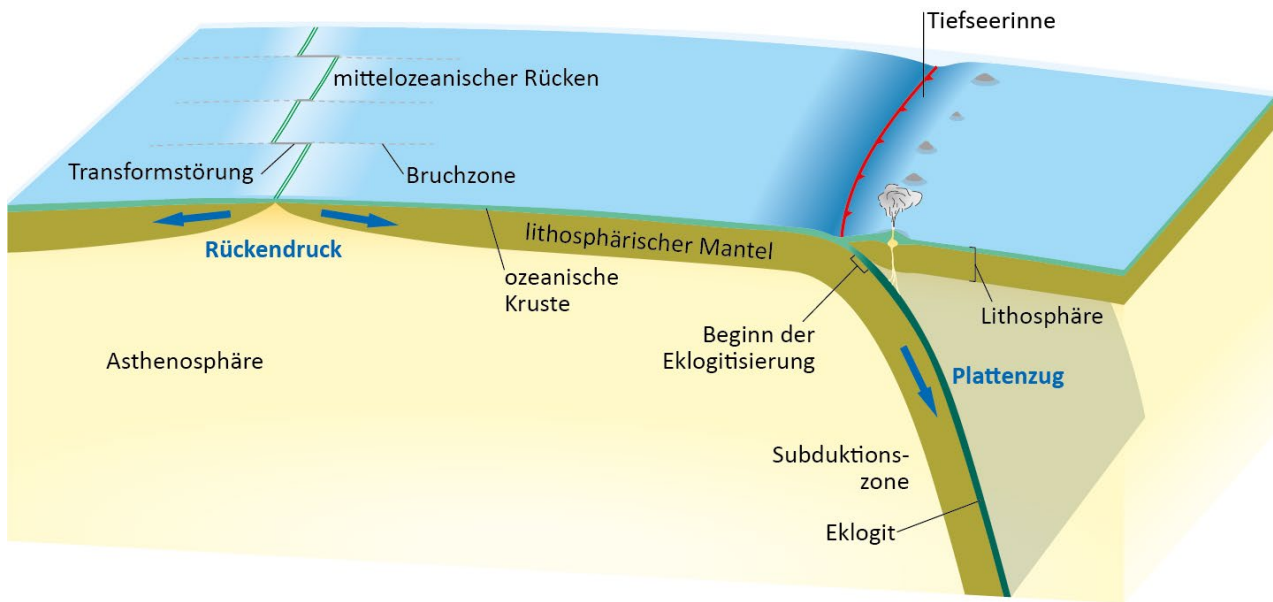


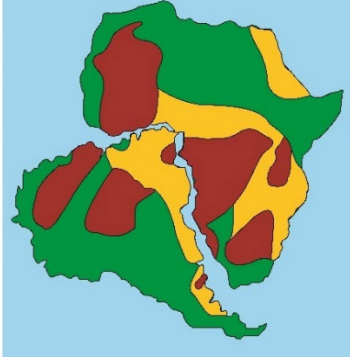
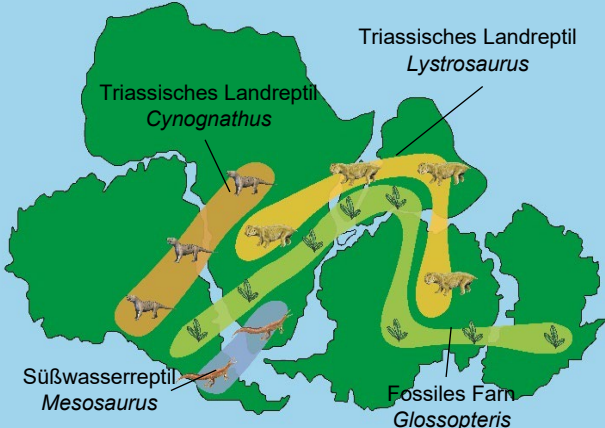
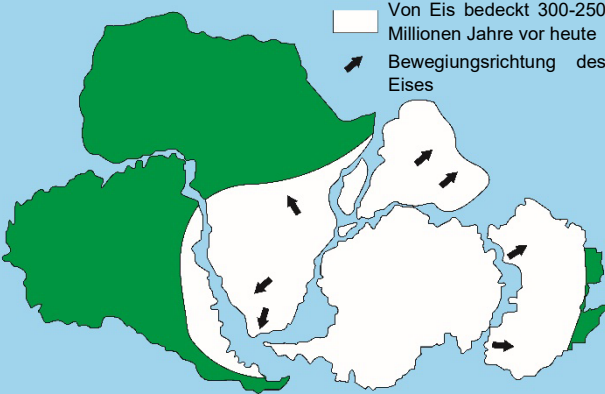
Abb. 4.34. Plattenbewegungsmechanismen

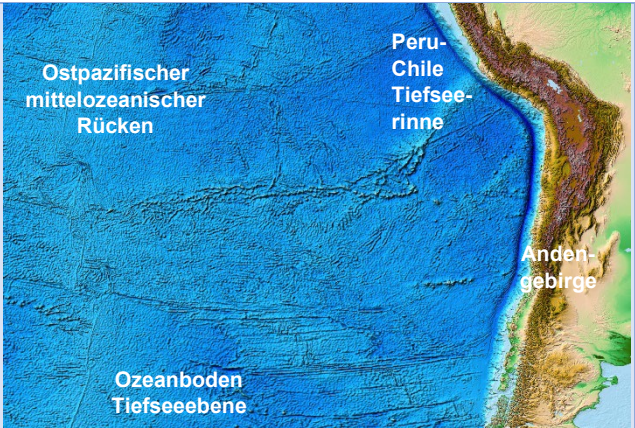
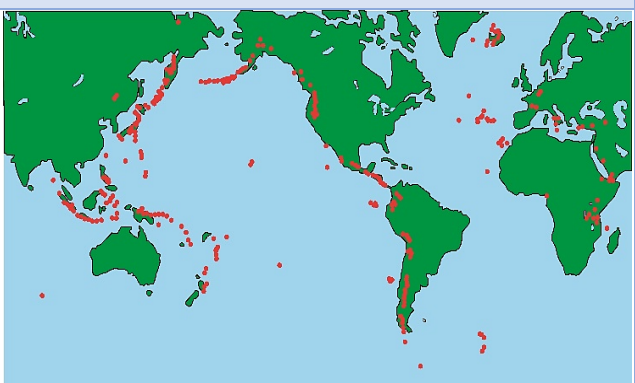
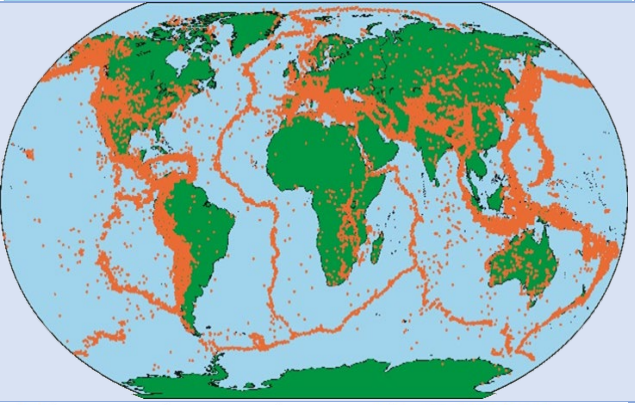
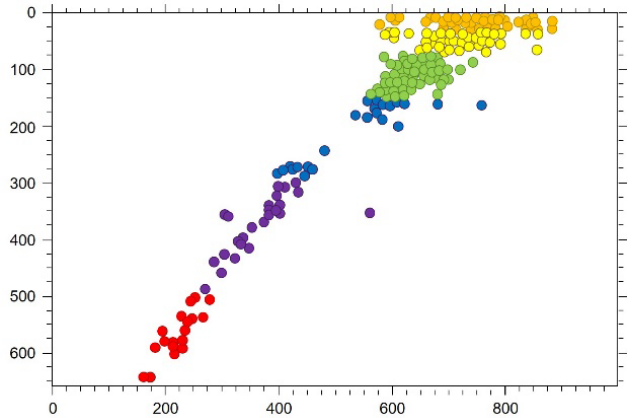
4.1.4.5 Nachweise für die Theorie

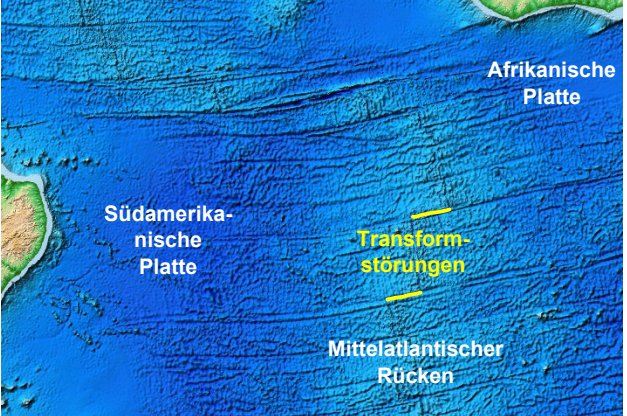
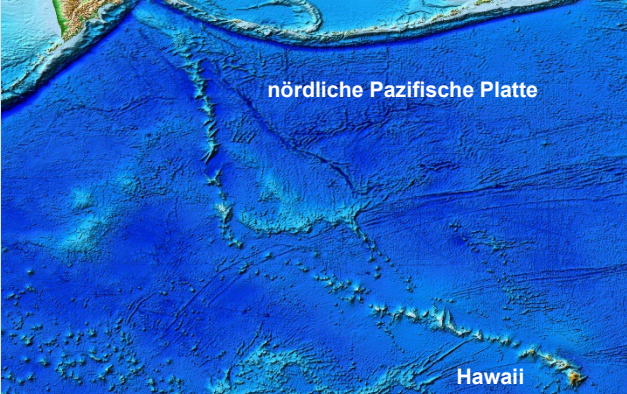
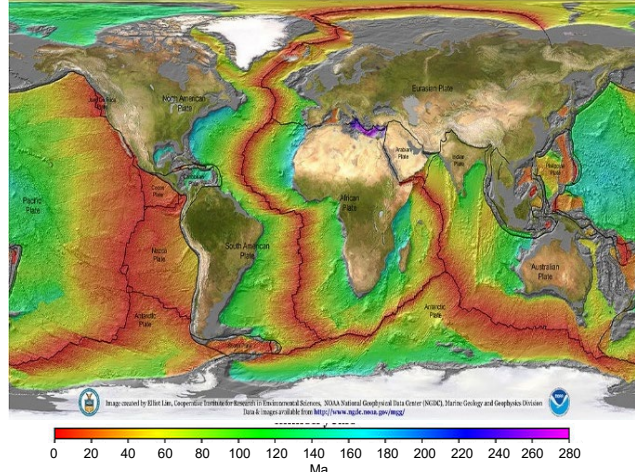
Die Theorie der Plattentektonik wird mittlerweile von so vielen Befunde gestützt, dass wir sie fast eher als „Tatsache“ denn als Theorie betrachten können. Wie bei allen gut funktionierenden Theorien konnten viele Ideen und Vorhersagen getestet und schließlich für richtig befunden werden. Es lassen sich allerdings nicht alle Prozesse, vor allem außerhalb der Erde, mit der Plattentektonik erklären und einige ihrer Vorhersagen werden auch weiterhin noch zu untersuchen sein.

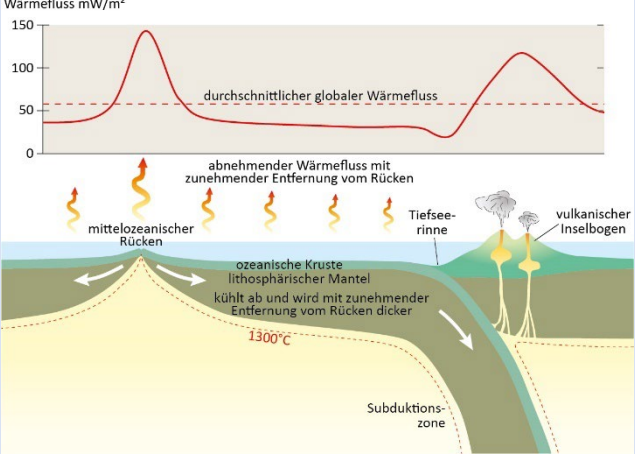
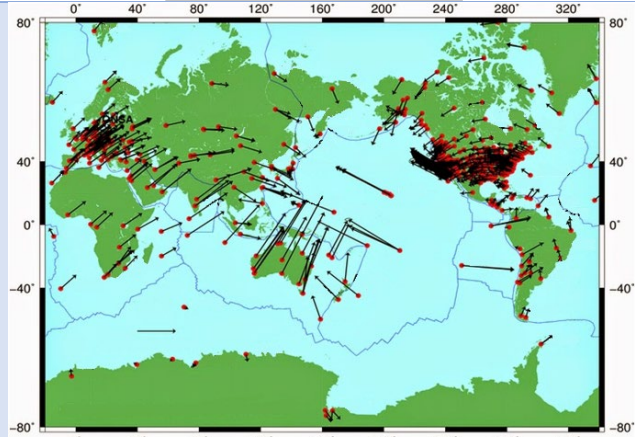
Die wichtigsten Befunde, die sich mit der heutigen Theorie der Plattentektonik problemlos erklären lassen, sind in Tab. 4.22 zusammengefasst.

Tab. 4.22. Die wichtigsten Befunde zur Theorie der Plattentektonik

Befund	Vorgeschlagene(n) von	Erklärung	Bild
Form der Puzzleteile – das Kontinentalpuzzle, Kontinentalschelf	Alfred Wegener (1880-1930), Alexander Du Toit (1878-1948)	Die Kontinente hingen einst zusammen, haben sich aber getrennt, weshalb die Formen ihrer Küstenlinien übereinstimmen. Spätere Rekonstruktionen anhand der Ränder der Kontinentalschelfs und mithilfe von Computermodellen zeigten eine sehr gute Übereinstimmung	
Geologische Befunde zum „Puzzle“ – Verteilung alter Gesteine in Südamerika und Afrika	Alfred Wegener (1880-1930), Alexander Du Toit (1878-1948)	Die Muster der Gesteine auf den Kontinenten stimmen überein, wenn die Kontinente wieder zusammengesetzt werden. Hier sind die braunen Gesteine mehr als 2000 Millionen Jahre alt und die gelben sind 2000 – 600 Millionen Jahre alt	
Fossile Befunde zum „Puzzle“ – Verbreitung von Land-/Süßwassertieren und -pflanzen auf den zu „Gondwanaland“ gehörenden Kontinenten	Alfred Wegener (1880-1930)	Die Orte, an denen Landfossilien gefunden werden, passen, wenn man die Kontinente zusammensetzt. Diese Karte zeigt, wo diese Fossilien gefunden werden: <i>Cynognathus</i> (braun), <i>Lystrosaurus</i> (orange), <i>Glossopteris</i> (grün) und <i>Mesosaurus</i> (blau).	
Paläoklimatische Befunde – das kontinentale Puzzle mit der ehemaligen Eisverteilung auf den Gondwana-Kontinenten	Alfred Wegener (1880-1930)	Die Gebiete der Kontinente, die ursprünglich mit Eis bedeckt waren, stimmen überein, wenn die Kontinente wieder zusammengesetzt werden; Die Karte zeigt das zuvor vergletscherte Gebiet (weiß)	

Relief der Erde	Harry H. Hess (1906-1969)	Hess erkannte, dass Merkmale des Meeresbodens, wie Tiefseerinnen und mittelozeanische Rücken, in seiner Hypothese der Ozeanbodenspreizung miteinander verbunden sein könnten. Dies wurde später auf kontinentale Bereiche erweitert, um auch die dortigen Merkmale mithilfe der Plattentektonik zu erklären	 Ostpazifischer mittelozeanischer Rücken Peru-Chile Tiefseerinne Ozeanboden Tiefseeebene Andengebirge
Vorkommen von Vulkanen auf der Erde		Die Karte der Verteilung von Vulkanen auf der Erde, dargestellt als rote Punkte, zeigt, dass sie alle mit Plattengrenzen oder Hot Spots zusammenhängen.	
Vorkommen von Erdbeben auf der Erde		Die Verteilung schwerer Erdbeben, hier als kleine orangefarbene Punkte dargestellt, zeigt, dass es zwar vielerorts Erdbeben gibt, die meisten jedoch an Plattenrändern auftreten, insbesondere in Subduktionszonen	
Tiefen der Erdbebenherde – aufgezeichnete Erdbeben auf den Kurilen, Russland, in der Subduktionszone	Hugo Benioff (1899-1968), Kiyoo Wadati (1902-1995)	Die zunehmende Tiefe von Erdbeben entlang von Subduktionszonen zeigt den Abtauchwinkel der subduzierenden Platte, wie oben erläutert	

Magnetisches Streifenmuster	Frederick Vine (*1939) and Drummond Matthews (1931-1997), Lawrence Morley (1920-2013)	Das symmetrische Muster „magnetischer Streifen“ in Meeresbodenbasalten auf beiden Seiten der mittelozeanischen Rücken zeigt, wie sich die neue ozeanische Lithosphäre auf beiden Seiten ausbreitet, wie oben erläutert	
Transformstörungen im Südatlantik	J. Tuzo Wilson (1908-1993)	Wo ozeanische Rücken versetzt sind, gibt es ungewöhnliche Störungen, die zwei Rückensegmente miteinander verbinden. Diese Transformstörungen verbinden auch verschiedene Arten von Plattenrändern, wie beispielsweise an der San-Andreas-Störung	
Hotspots. Hawaii-Emperor-Seamount-Kette	J. Tuzo Wilson (1908-1993)	Wenn sich Platten über Hotspots im Erdmantel bewegen, bilden sich über ihnen Vulkane. Die erloschenen Vulkane werden abseits des Hotspots älter und zeigen so die Richtung der Plattenbewegung an, wie oben erläutert.	
Alter des Ozeanbodens		Durch Tiefseebohrungen wurden Gesteine geborgen, die radiometrisch datiert werden können. Diese Karte zeigt das Alter der ozeanischen Kruste in verschiedenen Teilen der Ozeane. Sie ist in der Nähe der mittelozeanischen Rücken am jüngsten und wird nach außen hin älter.	

Wärmefluss		Messungen der von der Erde ausströmenden Wärme zeigen Hochpunkte an mittelozeanischen Rücken und kontinentalen Vulkangebieten, Tiefpunkte an den Tiefseerinnen und die langsame, stetige Abkühlung der Platte, wenn sie sich von den Rücken entfernt.	
Magma-zusammensetzung. Links: Stromboli, Italien, Lavaeruption. Rechts: Mount St. Helens, Washington, USA, Eruption 1980.		Eruptionen an mittelozeanischen Rücken und Hot-spots vorwiegend bestehen aus Basalt. Ausbrüche in der Subduktionszone bestehen hauptsächlich aus Andesit und Vulkanasche. Die verschiedenen Arten von Magma lassen sich durch die dort ablaufenden unterschiedlichen Plattenprozesse erklären.	
Messungen der Plattenbewegungen		Heutige Plattenbewegungen werden durch GPS-Messungen ermittelt. Je länger der Pfeil in dieser Karte ist, desto schneller ist die Bewegung.	

Die zahlreichen wissenschaftlichen Untersuchungen zur Plattentektonik haben die Daten geliefert, die für die Erstellung einer detaillierten Karte der Hauptplatten und Plattenränder auf der Erde erforderlich sind, wie in Abb. 4.35. Eine Weltkarte kann nur die großen Hauptplatten zeigen, es gibt aber auch zahlreiche kleinere Nebenplatten.

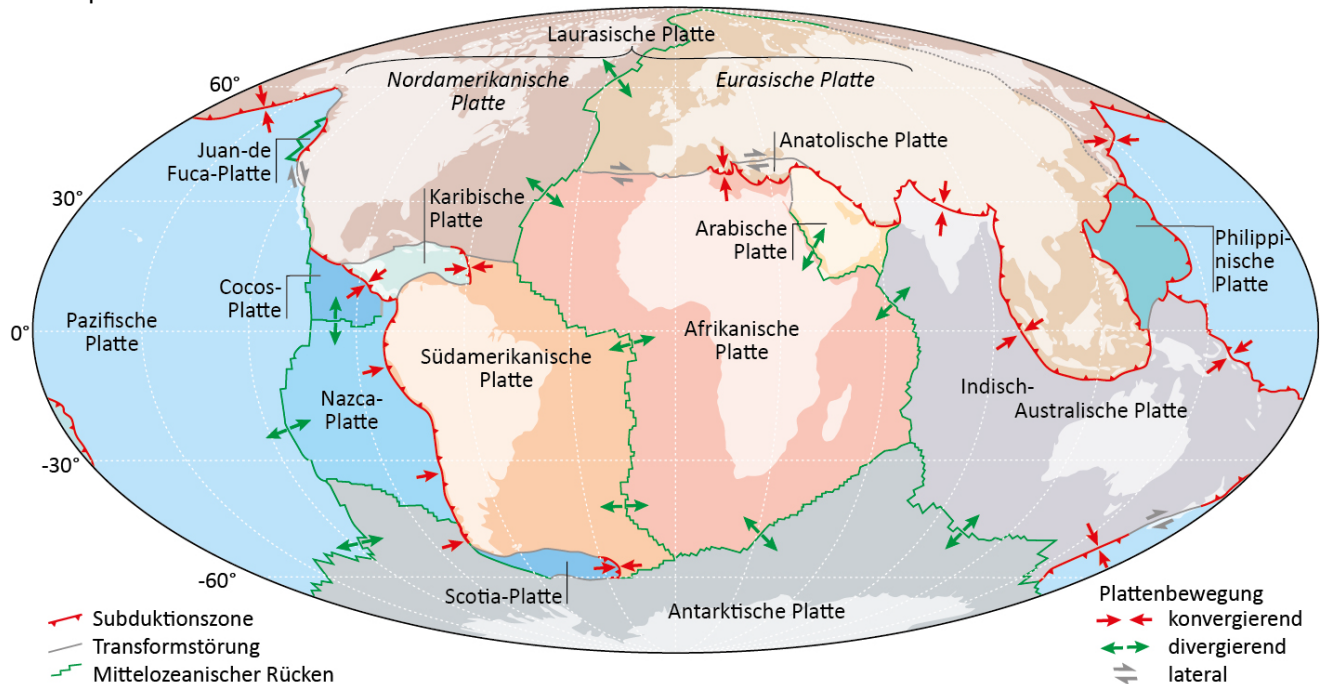


Abb. 4.35. Die wichtigsten tektonischen Platten der Erde; Die Pfeile zeigen die Richtungen der Plattenbewegung an den Plattenrändern

4.2 Hydrosphäre

Hydrosphäre ist die Bezeichnung für das gesamte Wasser auf unserem Planeten – von den weiten Ozeanen bis zum Kondenswasser, das man auf der Außenseite einer kalten Getränkedose sehen kann, und von hoch in der Atmosphäre bis zum Boden des tiefsten Bohrlochs.

4.2.1 Kontinentales Wasser

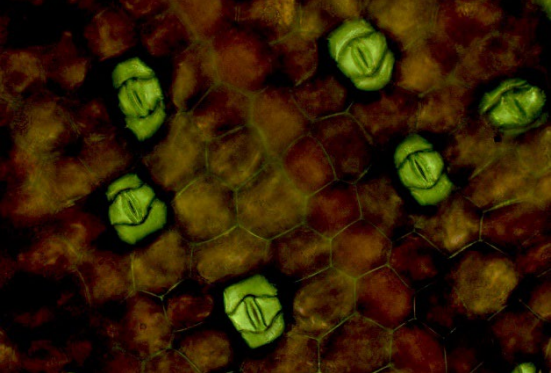
4.2.1.1 Kontinentale Wasserquellen

Das wichtigste Wasserreservoir auf der Erde sind die Ozeane, aber Wasser wird durch die in Kap. 1 beschriebenen Wasserkreislaufprozesse auf die Kontinente gebracht. Allerdings befinden sich nur etwa 2,5 % des Wassers der Erde auf den Kontinenten (der Rest befindet sich in den Ozeanen). Das Süßwasser auf den Kontinenten hat nicht nur vielfältige geologische Auswirkungen, sondern ist auch lebenswichtig für das Leben auf der Erde. Die verschiedenen kontinentalen Wasserquellen sind in Tab. 4.23 dargestellt.

Tab. 4.23. Kontinentales Wasser der Erde

Wasserquelle	Anteil an kontinentalem Wasser in %	Bild	Beispiel
Eiskappen, Gletscher und Dauerschnee	68,7		Eiskappe, die Saunders Island in der Baffin Bay in der Nähe von Grönland bedeckt
Grundwasser	30,1		Aus dem Boden austretendes Grundwasser – eine Wasserquelle mit gelösten Mineralen im Kaukasus in Westasien
Bodeneis und Permafrost (gefrorener Boden und Grundwasser)	0,86		Frostmusterboden (Polygonboden), der durch Permafrost in der gefrorenen Tundra der Western Arctic National Parklands, Alaska, USA, entsteht
Seen	0,26		Satpara-See, einer der höchstgelegenen Seen Pakistans

Bodenfeuchtigkeit	0,05		Feuchter Boden aus der Lüningsburg bei Neustadt am Rübenberge, Niedersachsen
Atmosphäre	0,04		Wolken am Himmel bei Muelle de El Quisco, Valparaiso, Chile, 1997
Sumpfwasser	0,03		Der Ratargul-Süßwassersumpfwald von Sylhet, Bangladesch
Flüsse	0,006		Der mäandrierende Yukon River, nördliches Kanada

Biologisches Wasser	0,003		Ein unter dem Mikroskop betrachtetes Blatt von <i>Tradescantia zebrina</i> zeigt die grünen Spaltöffnungen, die durch Transpiration Wasser an die Atmosphäre abgeben.
----------------------------	-------	--	---

Mehr als zwei Drittel des kontinentalen Wassers befinden sich in Eiskappen in den Polarregionen sowie in eis- und schneebedeckten Berggebieten. Dieses Wasser sammelt sich als Schnee an, der Eiskappen und Gletscher bildet. Beim Schmelzen wird es recycelt.

Der größte Teil des verbleibenden kontinentalen Wassers befindet sich im Untergrund in Gesteinsporenräumen als Grundwasser oder, wo der Boden gefroren ist, als Permafrost. Weniger als 1 % des Wassers der Erde bilden alle Seen, Stauseen und Flusssysteme zusammengenommen. Ein winziger Prozentsatz des Wassers der Erde befindet sich in der Atmosphäre als unsichtbarer Wasserdampf und als sichtbare Wassertröpfchen von Wolken. Das atmosphärische Wasser wird schnell recycelt und bringt durch Regen und andere Niederschlagsarten wie Schnee und Hagel Wasser auf die Kontinente.

Wenn es regnet, fließt ein Teil des Regens über den Boden in Rinnen und kleine Bäche und dann weiter in größere Bäche und Flüsse. Allerdings versickert ein Teil davon in den Boden, ein Vorgang, der als **Infiltration** bezeichnet wird. Die Tiere und Pflanzen im Boden verbrauchen einen Großteil dieses Bodenwassers und ein Teil davon wird von Pflanzen wieder in die Atmosphäre zurückgeführt. Pflanzen nehmen Wasser über ihre Wurzeln auf, transportieren es über ihre Stängel und Stämme hinauf und geben es über ihre Blätter als Wasserdampf an die Luft ab. Dieser Prozess wird als **Transpiration** bezeichnet.

Etwas Wasser sickert nach unten bis ins anstehende Gestein. Es fließt durch das Gestein weiter nach unten, bis es ein Niveau erreicht, bei dem alle winzigen Porenräume mit Wasser gefüllt sind. Dies wird als **gesättigte Zone** bezeichnet, da sie mit so viel Wasser gesättigt ist, wie sie aufnehmen kann. Die Oberseite der gesättigten Zone ist der **Grundwasserspiegel**. Wenn man in einen Brunnen blickt, kann man möglicherweise die Wasseroberfläche in der Tiefe sehen – das ist der Grundwasserspiegel. Das Wasser in der gesättigten Zone wird **Grundwasser** genannt und fließt unter der Erde bergab, bis es an einer **Quelle**, einem Sumpf oder einem Moor wieder aus dem Gestein austritt oder in einen Fluss, See oder das Meer mündet. Grundwasser fließt nur langsam unter der Erde und kann manchmal Tausende von Jahren im Gestein verbleiben.

Gesteine, die Wasser enthalten, das zur Nutzung entnommen werden kann, werden **Grundwasserleiter (Aquifer)** genannt. Die meisten Grundwasserleiter sind zur Luft hin offen, aber manchmal taucht das Grundwasser enthaltende Gestein unter eine undurchlässige Schicht, so dass der Grundwasserleiter dann zu einem **gespannten Grundwasserleiter** wird und das darin enthaltene Wasser **artesisches Wasser** ist. Wenn Bohrlöcher in gespannte Grundwasserleiter gebohrt werden, steigt das Wasser zu dem Pegel an, den es hatte, als es zum ersten Mal begrenzt war (Abbildung 4.36). Befindet sich der Bereich, in dem es zuerst eingegrenzt wurde, oberhalb der Erdoberfläche, wo das Bohrloch gebohrt wird, fließt das Wasser in einem **Fließbrunnen** aus dem Boden.

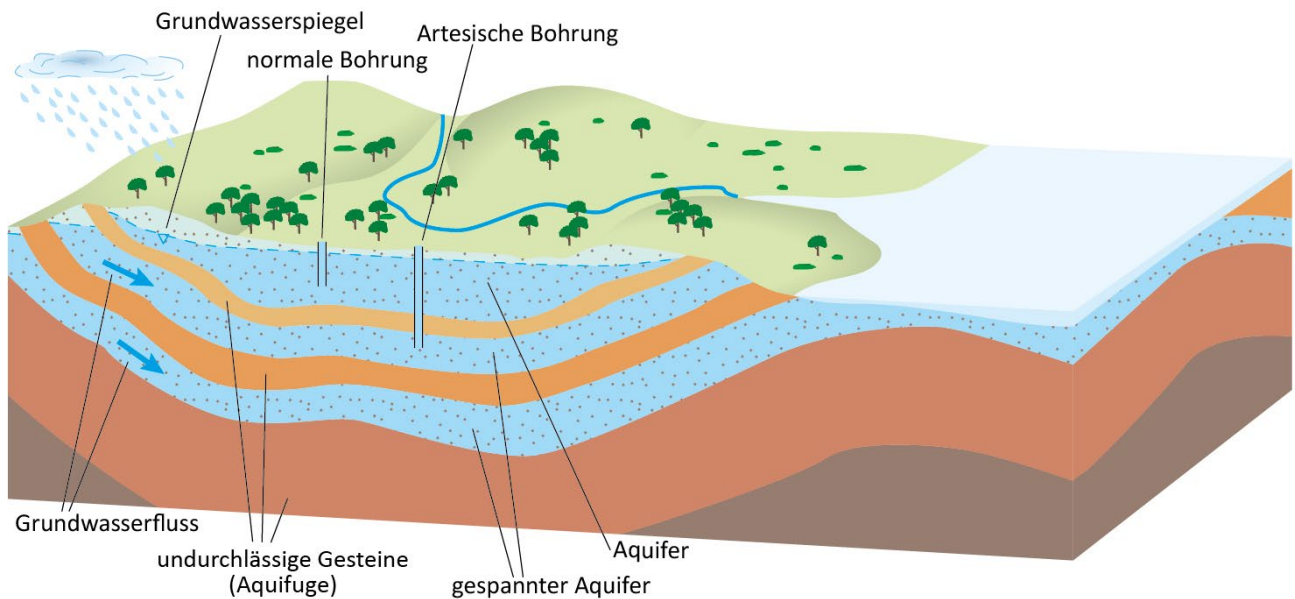


Abb. 4.36. Aquifere

4.2.1.2 Wasserversorgung

Wasser ist wohl unsere wichtigste Ressource überhaupt. Ohne Wasser ist kein Leben möglich und der Mensch kann nicht überleben. Wasser ist für die Landwirtschaft und viele industrielle Zwecke sowie für den täglichen Bedarf unseres Haushalts von entscheidender Bedeutung. Weltweit wird das meiste Wasser für die Landwirtschaft verwendet. Etwa ein Viertel des weltweiten Wasserverbrauchs entfällt auf die Industrie und nur etwa 8 % auf Haushalte auf der ganzen Welt. Dennoch haben nur etwa 85 % der Weltbevölkerung Zugang zu sauberem Leitungswasser. Die restlichen 15 % der Menschen müssen ihr Wasser aus Flüssen, Seen oder Brunnen holen, obwohl der Zugang zu sauberem Wasser bekanntermaßen der wichtigste Faktor für die menschliche Gesundheit ist.

Leitungswasser, das entweder aus Oberflächenwasser von Flüssen und Stauseen oder aus Grundwasser stammt, muss aufbereitet werden, um es nutzbar zu machen. Die Behandlung umfasst das Absetzen und Filtrieren, um Schwebstoffe wie schlammige Sedimente zu entfernen, sowie chemische und biologische Methoden, um organisches Material wie Bakterien, Algen und Viren zu entfernen.

Das meiste Wasser auf der Erde stammt aus Oberflächenquellen, aber etwa 40 % ist Grundwasser, das aus Grundwasserleitern gepumpt wird. Grundwasser wird auf natürliche Weise durch Sande, Kiese und Festgestein gefiltert und ist daher im Allgemeinen viel sauberer als Oberflächenwasser. Kommerzielle Grundwasserversorgungen werden jedoch immer noch einer Wasseraufbereitung unterzogen, auch wenn das meiste Wasser, das direkt aus Quellen entnommen wird, bedenkenlos getrunken werden kann. Tatsächlich wird viel Quellwasser kommerziell in Flaschen abgefüllt und ohne Behandlung verkauft.

Box 4.11. Im Handel erhältliches Quellwasser

Es gibt ein sehr großes Angebot an abgefülltem Quellwasser.



Hydrogeologen erforschen Wasser, indem sie die Lage des Landes und die Geologie eines Gebietes untersuchen und dann ein Testbohrloch, einen sogenannten **Brunnen**, bohren. Auf beiden Seiten des Testbrunnens wird eine Reihe von Beobachtungsbrunnen gebohrt und Wasser aus dem Testbrunnen gepumpt, wodurch der Grundwasserspiegel gesenkt wird. Erfolgt die Absenkung über einen großen Bereich, fließt das Wasser problemlos in die Testbohrung und es ist wahrscheinlich, dass sie nutzbar ist. Wenn die Entnahmefläche jedoch klein ist, ist das Gestein nicht sehr durchlässig und der Brunnen ist als Wasserversorgung wahrscheinlich unzuverlässig (Abb. 4.37).

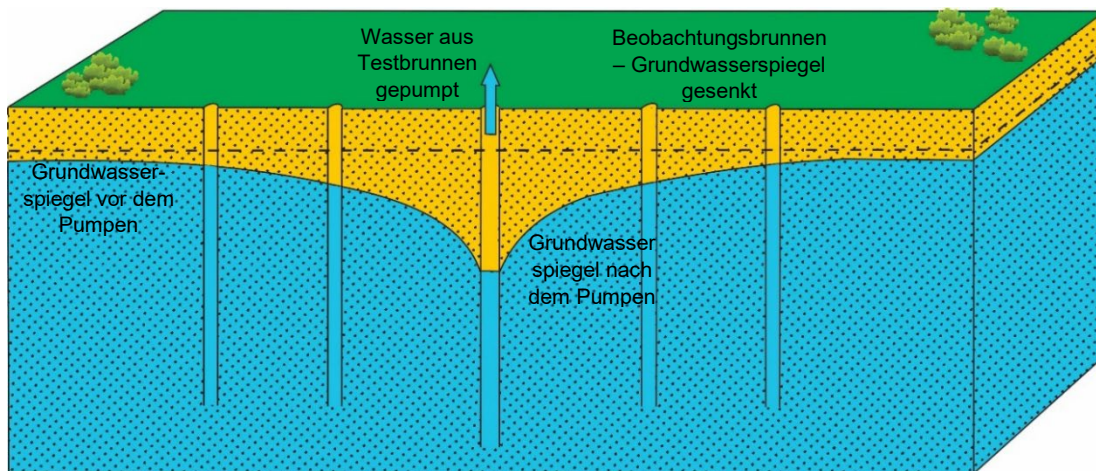


Abb. 4.37. Brunnen-Test

Wenn ein nutzbarer Brunnen gefunden wurde, muss das Wasser aus dem Brunnen gepumpt werden (es sei denn, es handelt sich um einen artesischen Brunnen). Früher wurde mit der Hand oder mit riesigen Dampfmaschinen gepumpt. Heutzutage werden in ländlichen Gebieten noch Handpumpen zusammen mit Windpumpen eingesetzt, anderswo wird das Grundwasser jedoch mit Diesel- oder Elektropumpen gefördert.

Box 4.12. Grundwasserpumpmethoden



Viktorianische Pumpstation in London, England, die einst eine riesige Dampfpumpmaschine enthielt



Windpumpen, Namaqualand, Südafrika



Heute im Einsatz befindliche Diesel-Grundwasserpumpe, England



Eine moderne Handpumpe, Bahnhof Pindial, Indien

4.2.1.3 Wasserverschmutzung

Oberflächen- und Grundwasser können durch natürliche Quellen verunreinigt werden, die meisten Wasserverunreinigungen sind jedoch auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen. Eine Kontamination kann durch leichte Flüssigkeiten (niedrige Dichte) wie Kraftstoffe erfolgen, die auf Oberflächengewässern oder auf dem Grundwasserspiegel schwimmen. durch schwere Flüssigkeiten (hohe Dichte), die auf den Boden von Stauseen oder Grundwasserleitern sinken, oder durch eine Vielzahl von im Wasser schwebenden oder gelösten Materialien.

Die Hauptverunreinigungen des Oberflächenwassers sind auf städtische Aktivitäten zurückzuführen. Dazu gehören Salz und Öl von Straßen, industrielle Verunreinigungen durch undichte Chemikalien- und Treibstofftanks und Abraumhalden im Bergbau sowie Einzelpersonen, die Reinigungsmittel, Desinfizierungsmittel, Öl, Farben und Gartenprodukte in den Abfluss schütten. Auch in der Landwirtschaft entstehen Abfälle, darunter tierische Abfälle, Düngemittel und Pestizide.

Auch im Untergrund kommt es zu einer Grundwasserverschmutzung. Dies kann aus städtischen Mülldeponien, aus undichten Abwasserkanälen und Klärgruben, aus Industriepipelines und aus schlecht gebauten Brunnen in städtischen und ländlichen Gebieten stammen (Abb. 4.38).

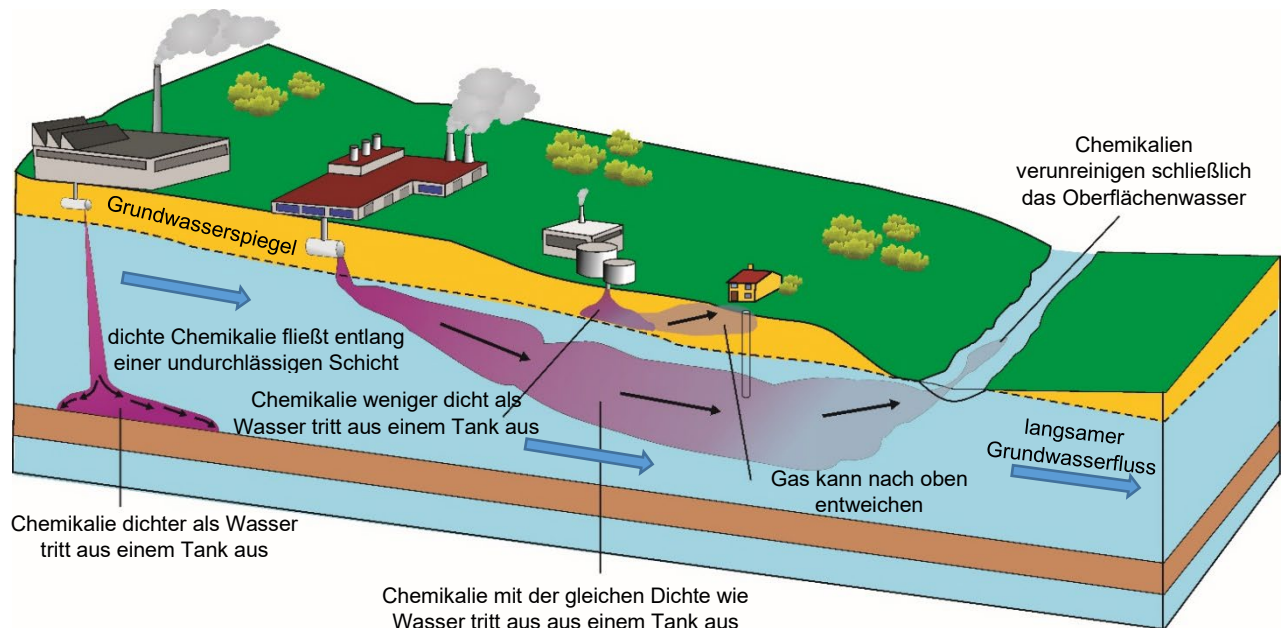


Abb. 4.38. Ausbreitung der Grundwasserverschmutzung

Umweltgeologen arbeiten daran, die Verschmutzung von Oberflächen- und Grundwasserreservoirs zu verhindern. Sie suchen nach Gebieten mit undurchlässigem Gestein für die Abfallentsorgung, damit Flüssigkeiten aus den Abfällen nicht in die Wasserversorgung gelangen und diese verunreinigen. Sie überwachen auch Industrie- und Mülldeponien auf Leckagen. Der Schutz der Umwelt kann das Sammeln regelmäßiger Oberflächenwasserproben und deren Prüfung auf Kontamination sowie die Überwachung von Testbrunnen in der Nähe potenzieller Kontaminationsstellen umfassen. Wenn es zu einer Grundwasserverunreinigung kommt, kann es zwar gereinigt werden, die Sanierungsmethoden sind jedoch sehr kostspielig.

4.2.2 Ozeanwasser

Ozeane und Meerwasser bedecken heute mehr als zwei Drittel der Erdoberfläche, obwohl es in der geologischen Vergangenheit Zeiten gab, in denen Ozeane viel größere oder viel kleinere Gebiete bedeckten. Zu den großen Tiefseemeeren der Erde gehören der Pazifik, der Atlantik, der Indische Ozean, der Arktische Ozean und der Südliche Ozean, und auf den Festlandsockeln gibt es viele kleinere Meere, die sogenannten Epikontinentalmeere.

4.2.2.1 Wasserzusammensetzung

Meerwasser enthält etwa 3,5 % gelöstes Salz, sodass der Salzgehalt von normalem Meerwasser 3,5 % beträgt. Das Salz besteht hauptsächlich aus Natrium- und Chlorionen, enthält aber auch Magnesium, Kalzium, Kalium, Hydrogencarbonat, Sulfat und andere weniger häufige Ionen. Die Ionen wurden in der fernen geologischen Vergangenheit von Flüssen ins Meer gebracht und haben sich dort konzentriert.

Wenn sich Süßwasser aus Flüssen mit Meerwasser vermischt, nimmt der Salzgehalt ab und das Wasser wird brackig. Anderswo, in stark verdunstenden Flachmeeren, führt die Entnahme des Wassers zu einem Anstieg des Salzgehalts, bis das Wasser schließlich so stark mit Salz übersättigt ist, dass sich Kristalle bilden und sich am Meeresboden absetzen. Meerwasser schmeckt unangenehm, aber übersättigtes Meerwasser schmeckt wirklich schrecklich und kann in den Augen brennen.

Süßwasser hat eine geringere Dichte als Salzwasser, so dass Flusswasser, wenn es ins Meer fließt, lange Zeit an der Oberfläche schwimmt, ohne sich zu vermischen. Normalerweise gibt es eine klare Grenze zwischen dem Süßwasser oben und dem salzhaltigeren Meerwasser unten.

4.2.2.2 Gezeiten

Küstengebiete sind von Gezeiten betroffen, die durch die Anziehungskraft von Mond und Sonne in Verbindung mit der Erdrotation verursacht werden.



Abb. 4.39. Ebbe und Flut an der Humber Bridge, England

In den meisten Küstengebieten kommt es täglich zu zwei Fluten, getrennt durch zwei Ebben. Die Flut steigt als auflaufendes Wasser über mehrere Stunden an, bis sie ihren höchsten Stand, die Flut, erreicht. Dann lässt die Flut mit ablaufendem Wasser langsam nach, bis sie ihren tiefsten Punkt, die Ebbe, erreicht, bevor der Zyklus von neuem beginnt. Steigende und fallende Gezeiten bewegen die Wellenzone an Stränden und felsigen Küstengebieten auf und ab. In der Zwischenzeit werden Wattflächen von relativ stillem Wasser überflutet, bevor es abfließt und sie wieder freiliegt.

Die Hauptursache für Gezeiten ist die Anziehungskraft des Mondes. Die Anziehungskraft des Mondes verursacht eine Flut auf der Seite der Erde, auf der sich der Mond befindet, und auch auf der gegenüberliegenden Seite, mit dazwischen liegender Ebbe, wie in Abb. 4.40 dargestellt. Da sich die Erde einmal am Tag unter dem Mond dreht, kommt es in den meisten Gebieten zu zwei Fluten und zwei Ebben pro Tag. Da die Zeit dafür etwa 25 Stunden beträgt, verschiebt sich das Gezeitenmuster jeden Tag um etwa eine Stunde.

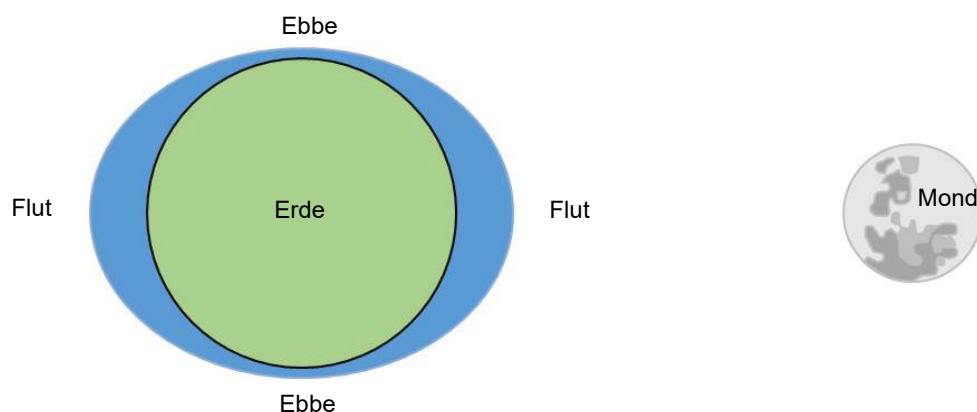


Abb. 4.40. Der Mond verursacht Gezeitenausbuchtungen

Obwohl die Sonne sehr viel weiter entfernt ist, ist sie viel größer als der Mond und hat daher auch eine Auswirkung auf das Meeresspiegel. Das bedeutet, dass bei einer Ausrichtung von Mond und Sonne in einer Linie eine größere Anziehungskraft herrscht, mit höherem Hochwasser und niedrigerem Niedrigwasser – das sind die **Springfluten**. (Springfluten haben nichts mit der Jahreszeit des Frühlings zu tun, obwohl die höchsten Springfluten verwirrenderweise normalerweise im Frühling und Herbst auftreten.) Wenn die Anziehungskraft von Mond und Sonne jedoch im rechten Winkel zueinandersteht, verringert sich ihre gesamte Anziehungskraft, und es kommt zu geringerem Hochwasser und höherem Niedrigwasser – den **Nipptiden**.

Das Ergebnis für die meisten Küstengebiete ist eine Gezeitenkarte wie in Ab. 4.41 dargestellt. Die Grafik zeigt, dass es an jedem Tag zwei Ebbe- und zwei Flutzeiten gibt, die Flut ist jedoch etwa am 8. und 25. Tag am höchsten und die Ebbe am niedrigsten – das sind die Tage der Springflut. Nipptiden treten etwa am 3. und 16. Tag auf. Wenn man die ausgedehntesten Strände und Wattlandschaften sehen möchte, besucht man die Küste bei Nipptide. Wenn man jedoch die größte Küstenerosion an Steilküsten sehen möchte, besucht man die Stätte zur höchsten Springflut, wenn die Gezeiten die Wellen am höchsten an den Strand und an die Klippen bringen. Gleichzeitig werden Wattflächen vollständig überschwemmt.

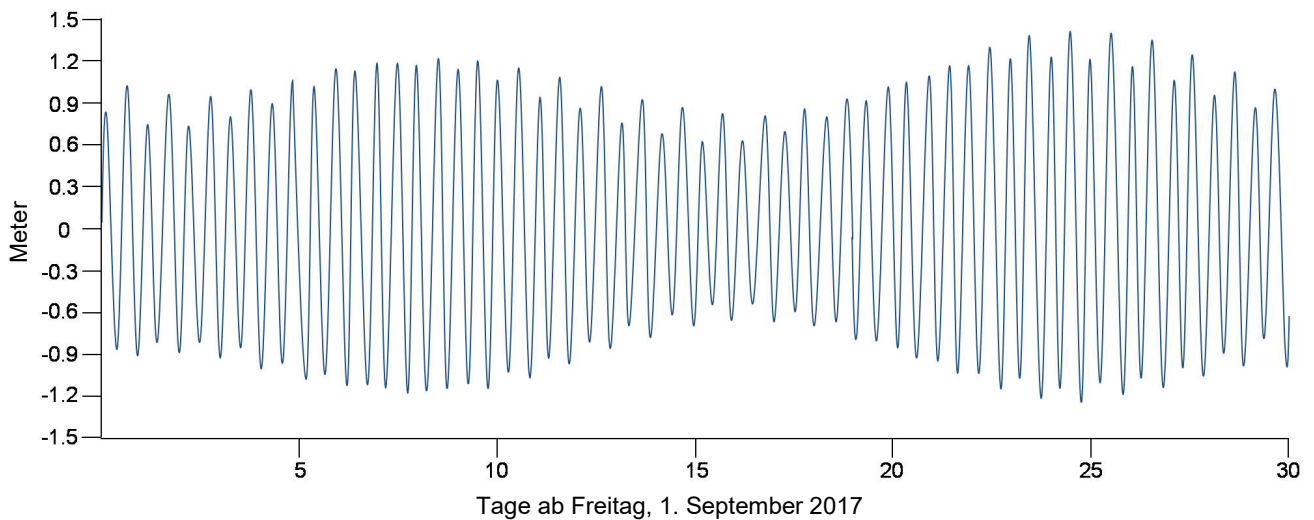


Abb. 4.41. Gezeitenwechsel – ein Beispiel aus Bridgeport, Connecticut, USA

4.2.2.3 Wellen

Wenn man die Wellen am Meeresufer beobachtet, kommt es einem vor, als würden sie riesige Wassermengen bewegen. Wenn man jedoch beobachtet, wie etwas außerhalb der Brandungslinie schwimmt, wird man feststellen, dass es nur auf und ab schaukelt und sich seitwärts kaum bewegt. Dies liegt daran, dass das Wasser beim Passieren eines Wellenbergs steigt und sich ein wenig vorwärtsbewegt, während es beim Passieren eines Wellentals absinkt und sich ein wenig zurückbewegt, sodass sich das Oberflächenwasser lediglich in einem vertikalen Kreis bewegt. Tiefer unter jeder Welle bewegt sich das Wasser in kleineren Kreisen, bis die Welle in der Tiefe abklingt. Obwohl Wellen in stürmischen offenen Ozeanen mehrere Meter hoch sein können, verursachen sie keine allgemeine horizontale Bewegung des Wassers.

Wenn Wellen die Küste erreichen, erhöht sich die Reibung am Meeresboden, sodass der Wellenboden langsamer wird und die Welle höher wächst. Schließlich wird sie hoch genug, um nach vorne umzukippen und zu brechen. Wenn die Brandung hoch ist, eignen sie sich gut zum Surfen. Wenn die Brandung auf den Strand stürzt, strömt ein Wasserschwall den Strand hinauf, fließt dann aber aufgrund der Schwerkraft zurück – bis die nächste Welle kommt.



Abb. 4.42. Wellen – groß und klein

Wellen entstehen durch Winde, die im offenen Ozean über die Meeresoberfläche wehen. Durch die Reibung zwischen Wind und Wasser entstehen kleine Wellen, die vom Wind vorangetrieben werden. Je länger also die Zeit und je größer die Entfernung des Ozeans ist, über die der Wind weht, desto größer werden die Wellen. Stärkere Winde erzeugen auch größere Wellen. Die besten Surfstrände mit den größten Wellen liegen daher gegenüber dem offenen Meer.

Das Zusammenwirken von Wellen und Gezeiten erzeugt eine Reihe von Küstenmerkmalen.

Tab. 4.24. Küstenmerkmale, die durch Wellen und Gezeiten entstehen

Prozess	Beschreibung	Bild	Beispiel
Sturmstrandbildung	Wenn ein Sturm mit einer hohen Springflut zusammenfällt, treibt eine Sturmflut die Sturmwellen noch weiter den Strand hinauf als normal und bildet im hinteren Teil des Strandes eine Block- und Kiesbank		Sturmstrand hinter dem Veluga-Strand in Batanes auf den Philippinen
Wattbildung	Bei Flut und insbesondere bei Springfluten werden Wattflächen von Wasser bedeckt. Bei jeder Überschwemmung des Watts setzt sich Schlamm aus dem ruhigen Wasser ab und bildet eine Schicht. Die Schichten bauen sich mit der Zeit zu großen Wattflächen auf		Wattenmeer in der Nähe von Palau Melaka, Malakka, Malaysia
Strandhakenbildung	Wenn Wellen schräg auf einen Strand treffen, schiebt die auflaufende zusammenbrechende Welle den Sand diagonal den Strand hinauf, aber die Welle fließt direkt senkrecht zum Strand zurück und trägt den Sand mit sich. So wird Sand in einer Bewegung, die den Zähnen einer Säge ähnelt, stetig am Strand entlang bewegt. Am Ende des Strandes wird der Sand ins Meer getragen und bildet dort eine langgezogene Landzunge, einen Strandhaken.		Satellitenaufnahme von Farewell Spit an der Nordspitze der Südinsel, Neuseeland

4.2.2.4 Großmaßstäbliche Strömungen von Fluiden auf der Erde

Sowohl die Ozeane als auch die Atmosphäre sind Fluide (flüssige oder gasförmige Substanz) und auf diese Fluide wirken ähnliche Kräfte, die ähnliche Auswirkungen haben.

Wenn beide Arten von Fluiden (Wasser und Luft) erwärmt werden, werden sie weniger dicht als das umgebende Fluid und steigen daher auf; Wenn sie höhere, kühlere Bedingungen erreichen, strömen sie nach außen. In den Ozeanen bedeutet dies, dass in tropischen Regionen erwärmtes Wasser als Strömung über die Meeresoberfläche fließt. Während das warme Wasser abfließt, steigt kühleres Wasser von unten auf; Dieses Wasser ist oft reich an Nährstoffen und daher gibt es in diesen Gebieten ein reichhaltiges Meeresleben. Währenddessen übt in der Atmosphäre aufsteigende warme Luft weniger Druck auf die Erdoberfläche aus, was zu einem

Tiefdruckgebiet führt. Die warme Luft steigt auf und strömt in der oberen Atmosphäre nach außen. Diese Fluidströme sind Teil der Konvektion.

Wenn die Fluide abkühlen, werden sie dichter und sinken ab. In den Ozeanen befindet sich das kälteste Wasser in den Polarregionen. Dieses kalte Wasser sinkt und fließt über den tiefen Meeresboden. In der Atmosphäre sinkt kalte Luft ab und es entsteht ein **Hochdruckgebiet**. Wenn es die Erdoberfläche erreicht, fließt es über die Oberfläche in Richtung Tiefdruckgebiete ab. Der dabei entstehende Oberflächenluftstrom ist Wind. Diese Strömungen schließen den Konvektionszyklus ab.

Ströme warmer und kalter Fluide finden auch in viel kleineren Maßstäben statt. Oft sieht man das Schimmern warmer Luft, die über einer Heizung oder einem Feuer aufsteigt. Das Gegenteil passiert, wenn man barfuß einen Gefrierschrank öffnet, man spürt, wie die kalte Luft über die Haut nach unten strömt. Wenn man ein Bad nimmt und mehr heißes Wasser hinzufügt, spürt man, wie das heiße Wasser über die Oberfläche fließt. Wenn man hingegen kaltes Wasser hinzufügt, fließt es über den Boden der Badewanne und ist nicht so angenehm (Abb. 4.4).

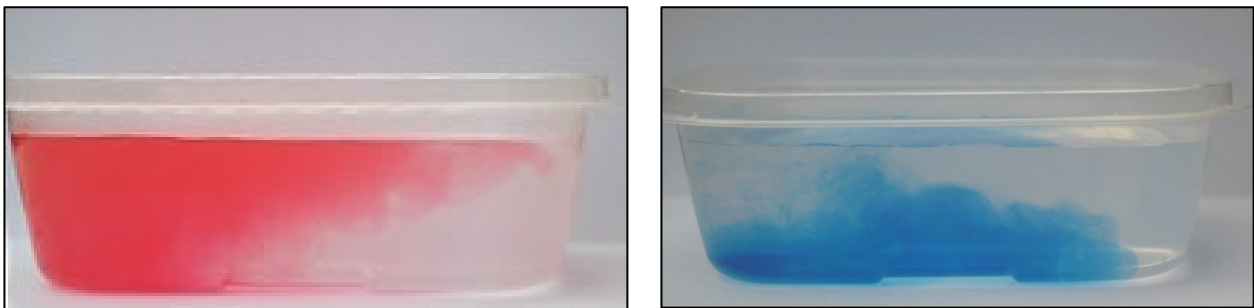


Abb. 4.43. Warmer, rot gefärbter Strom, der über die Oberfläche fließt; Kalter blauer Strom, der über den Boden fließt – ein Versuch durchgeführt in einer Plastikdose.

Äquatorialgebiete sind sehr warm, es herrscht Luftaufstieg und dadurch ein niedriger Druck. Die durch die obere Atmosphäre strömende warme Luft wird kühler und sinkt über subtropischen Wüstengebieten ab, wie in Abb. 4.44 dargestellt. Wenn diese sinkende Luft den Boden erreicht, strömt ein Teil davon zurück in Richtung Äquator. Sie bildet die tropische/subtropische Zirkulationszelle namens Hadleyzelle. Aber ein Teil der sinkenden Luft strömt in Richtung der Pole. Während sie die warmen Meere überquert, wird sie wärmer und steigt schließlich an. In der oberen Atmosphäre strömt ein Teil der Luft zurück in Richtung Äquator. Diese Zirkulationszelle wird als Ferrelzelle bezeichnet. Ein Teil der Luft strömt auch in Richtung der Pole, wobei sie dabei kühler wird. Sie sinkt schließlich über den Polen ab und fließt äquatorwärts zur Erdoberfläche, wodurch die polare Zirkulationszelle entsteht.

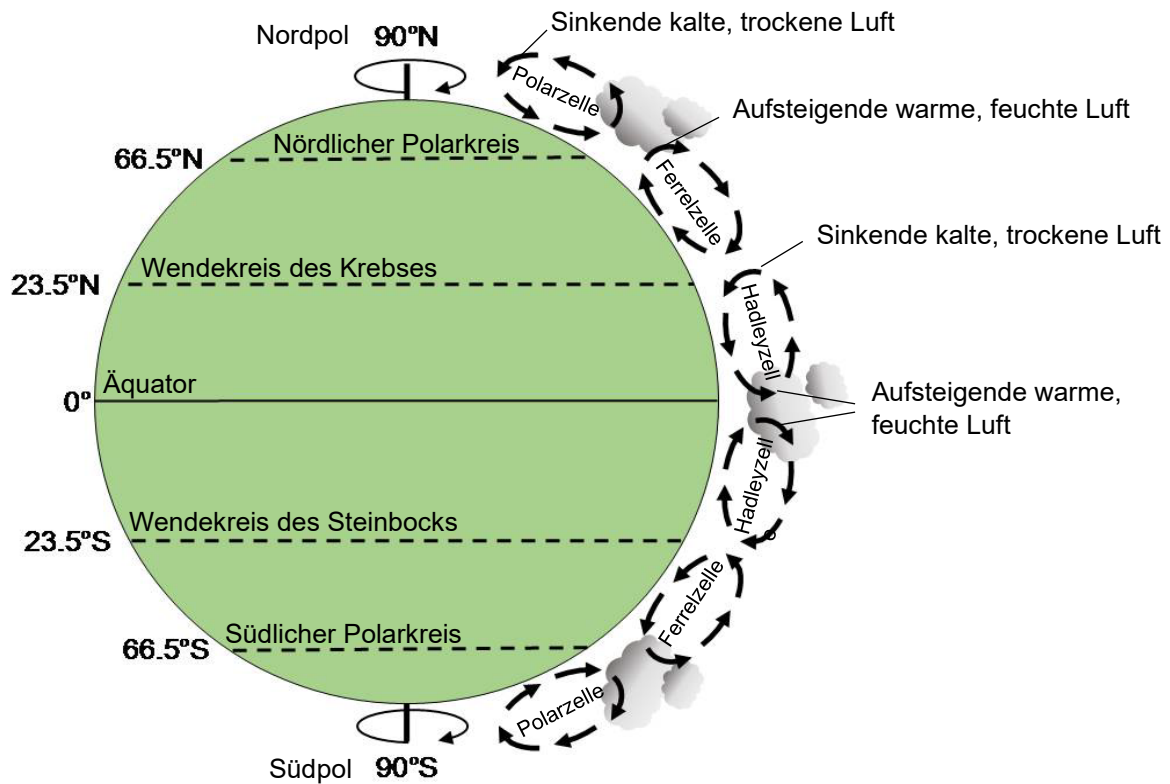


Abb. 4.44. Luftmassenzirkulation auf der Erde

Dieses einfache atmosphärische Zirkulationsmuster wird durch die Rotation der Erde beeinflusst. Luftströme auf der Nordhalbkugel werden im Uhrzeigersinn abgelenkt, während sie auf der Südhalbkugel gegen den Uhrzeigersinn abgelenkt werden. Dies ergibt ein verallgemeinertes Oberflächenwindzirkulationsmuster wie in Abb. 4.45 dargestellt.

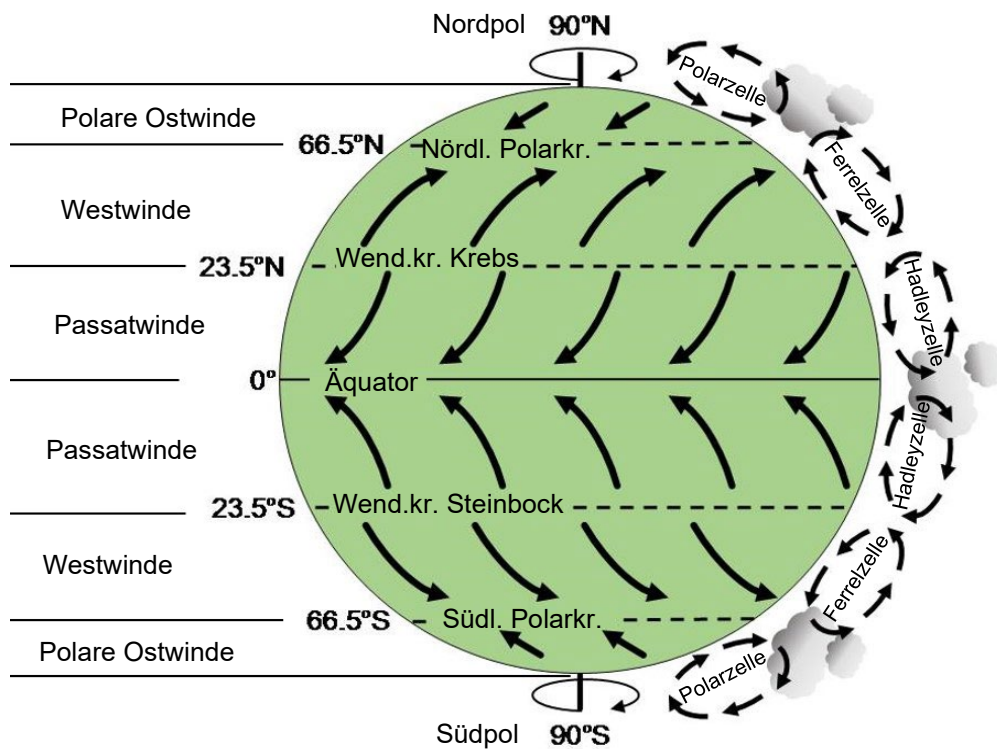


Abb. 4.45. Vereinfachte Darstellung des Oberflächenwindmusters auf der Erde

Die allgemeinen Oberflächenwinde an der Basis der Hadleyzelle sind die östlichen Passatwinde. Die Winde am unteren Rand der Ferrelzelle sind die Westwinde (Winde, die aus dem Westen wehen) und die Oberflächenwinde der Polarzelle sind die polaren Ostwinde.

Die globalen Winde ziehen an der Meeresoberfläche und bewirken, dass sie sich in die Richtung bewegt, in die der Wind weht. Sie verstärken dadurch die natürliche Strömungsrichtung – im Uhrzeigersinn auf der Nordhalbkugel und gegen den Uhrzeigersinn auf der Südhalbkugel. Die Hauptströmungen der Meeresoberfläche drehen sich also auf der Nordhalbkugel im Uhrzeigersinn und auf der Südhalbkugel gegen den Uhrzeigersinn, angetrieben durch die Rotation der Erde (Abb. 4.46).

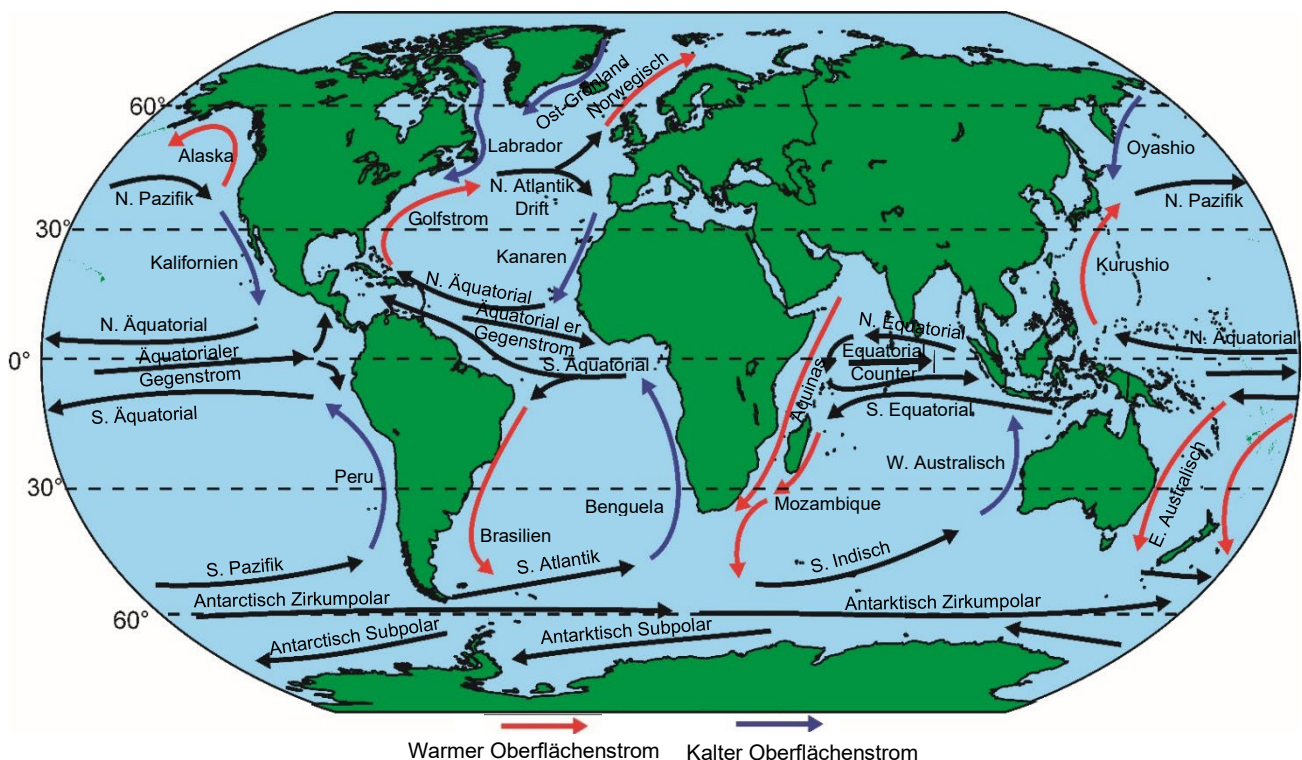


Abb. 4.46. Oberflächenzirkulationen im Ozean

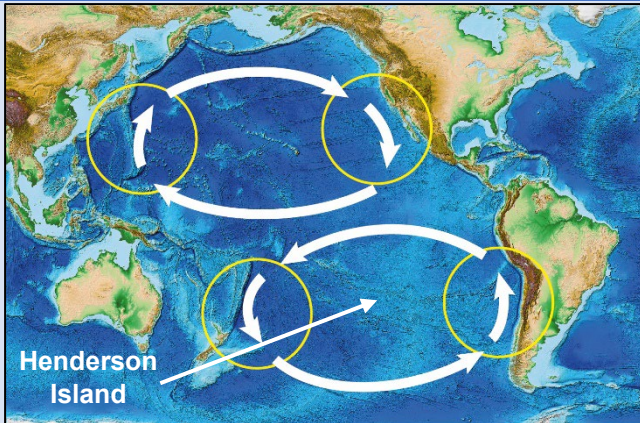
Box. 4.13. Meeresströmungen und die am stärksten verschmutzte Insel der Erde

Henderson Island im Südpazifik ist unbewohnt und eine der Inseln, die am weitesten von allen Kontinenten entfernt ist. Die Wissenschaftlerin Jennifer Lavers, die 2015 eine Expedition auf die Insel leitete, war erstaunt über die Menge an Plastikmüll, der sich dort angesammelt hatte. Sie sagte: „Ich habe auf meinen Reisen – an einige der entlegensten Orte – viel Plastikmüll gesehen, aber auf Henderson Island war es am stärksten mit Plastikmüll verschmutzt. Die Menge an Plastikmüll ist wirklich besorgniserregend und raubt einem den Atem.“ Die Expedition fand auf jedem Quadratmeter Strand bis zu 671 Plastikstücke und schätzte, dass die Strände der gesamten Insel mehr als 37 Millionen Trümmerstücke enthielten – die weltweit schlimmste jemals gemessene Verschmutzung mit Plastikmüll. Die Tierwelt wurde schwer geschädigt: Eine Schildkröte wurde an einer Plastikschnur erdrosselt aufgefunden und Einsiedlerkrebse suchten ihr Zuhause in Kosmetiktöpfen aus Plastik.

Die Verschmutzung sammelt sich in der Nähe des Zentrums des Südpazifikwirbels. Diese Meeresoberflächenströmung zirkuliert im Südpazifik gegen den Uhrzeigersinn und trägt schwimmenden Plastikmüll zur Mitte hin.

Jennifer Lavers fügte hinzu: „Sobald Plastik im Meer ist, ist es mit der aktuellen Technologie praktisch unmöglich, es wieder herauszubekommen. Der Fokus muss darauf liegen, zu verhindern, dass es überhaupt dorthin gelangt.“ Sie sah viele angeschwemmte Plastikzahnbürsten und sagte, dass Zahnbürsten aus Bambus und Holzfasern genauso viel kosteten wie Plastikzahnbürsten, aber die Erde

jahrhundertlang nicht verschmutzen würden. Jeder sollte aufhören, Strände zu vermüllen und weniger Plastik verwenden, indem er auf weniger schädliche Materialien umsteigt.



Zirkulierende Oberflächenströmungen im Nord- und Südpazifik



Der verschmutzte Strand der unbewohnten Insel Henderson im abgelegenen Südpazifik

Meeresoberflächenströmungen sind mit Tiefseeströmungen verknüpft. Wo warme Meeresströmungen in Richtung der Pole strömen, werden sie durch Verdunstung kühler und salzhaltiger. Dadurch erhöht sich ihre Dichte, so dass sie als kalte, dichte Salzwasserströme in Polnähe absinken. Dadurch entsteht das in Abb. 4.47 dargestellte Zirkulationsmuster von flach nach tief.

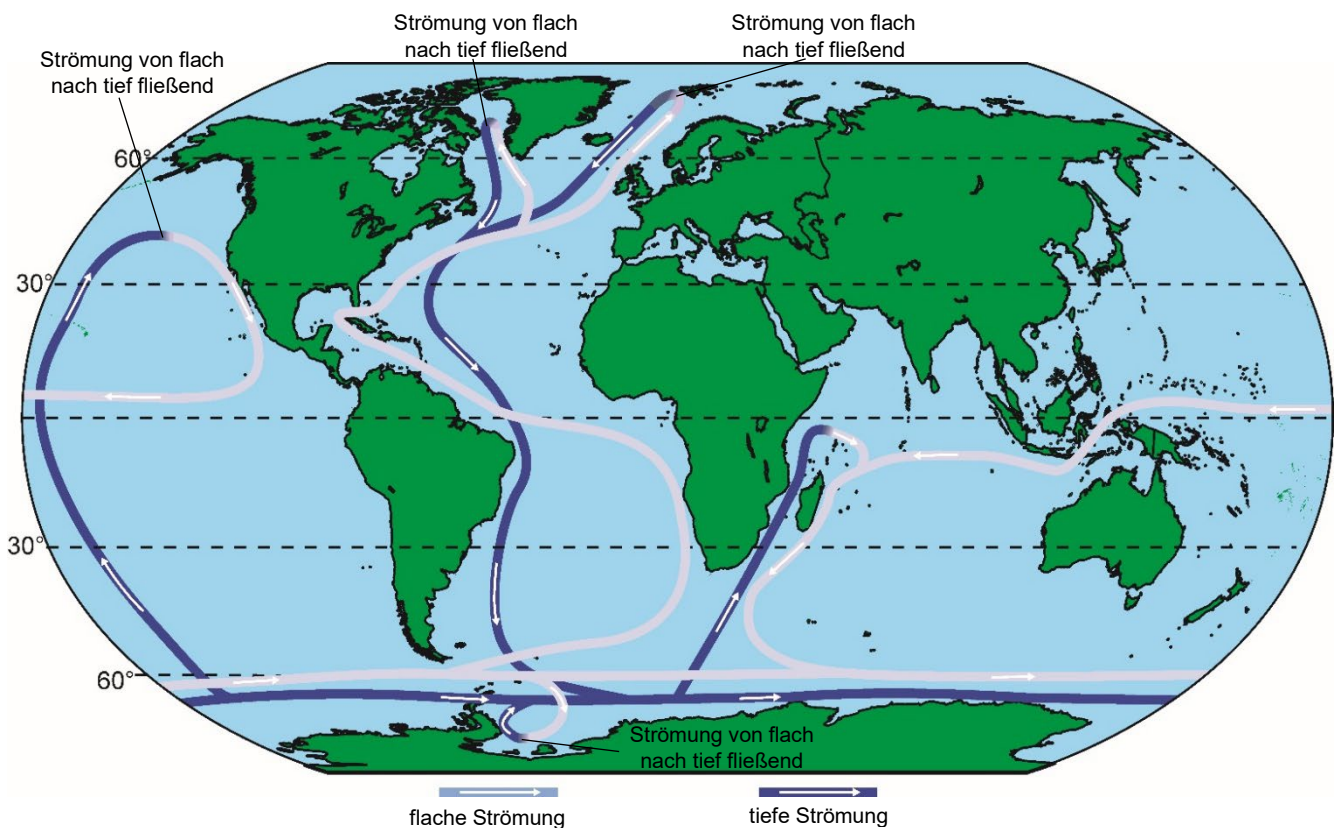


Abb. 4.47. Das von flach nach tief fließende Zirkulationsmuster der Ozeane der Erde

Der Aufstieg von kaltem, nährstoffreichem Tiefenwasser, verursacht durch Winde, die das wärmere Oberflächenwasser wegblasen, führt zu Planktonblüten. Diese liefern die Nahrung in den besten Fischgründen der Erde, wie in Abb. 4.48 dargestellt.

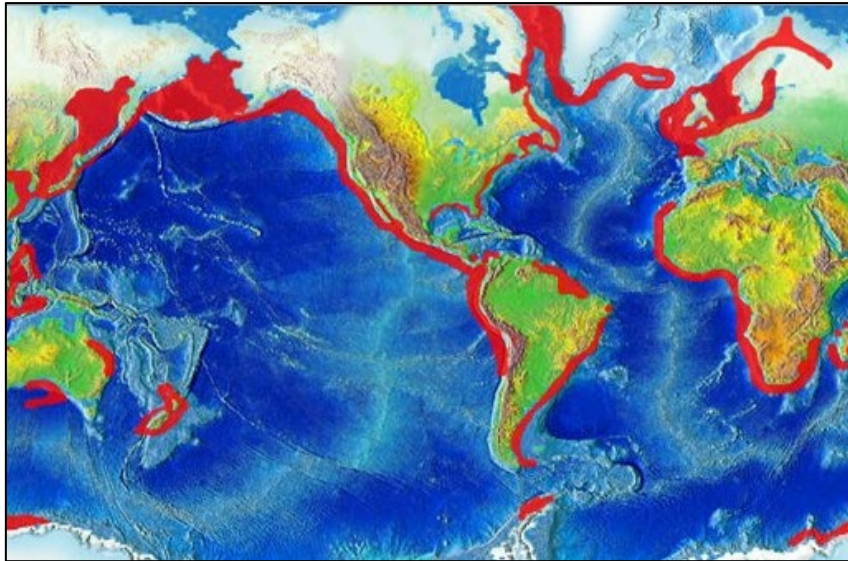


Abb. 4.48. Die besten Fischgründe, rot dargestellt, entstanden durch den Auftrieb von kaltem Tiefenwasser

Die Wechselwirkungen zeigen, wie eng die Systeme der Erde miteinander verknüpft sind. Der atmosphärische Luftstrom oder Wind treibt die Oberflächenströmungen des Ozeans an, während der Ozean die Luft erwärmt und so zur atmosphärischen Zirkulation beiträgt. Dann führt der Aufstieg von nährstoffreichem Wasser im Ozean zu einer Fülle von Meereslebewesen. Offensichtlich sind Atmosphäre, Hydrosphäre und Biosphäre durch diese Prozesse eng miteinander verbunden.

4.3 Atmosphäre

Die Erdatmosphäre ist wie die anderen Sphären von entscheidender Bedeutung für das Leben auf der Erde. Die Atmosphäre besteht aus mehreren Schichten, aber die wichtigste Schicht für das Leben ist die unterste, die Troposphäre. Sie ist am stärksten mit Sauerstoff angereichert und hat die für das Leben notwendige richtige Temperatur. Die Troposphäre ist am Äquator etwa 16 km dick und wird zu den Polen hin dünner. Wenn die Erdkruste so dick ist wie eine auf einen Fußball geklebte Briefmarke, dann ist die Troposphäre wie eine darauf geklebte Briefmarke halber Dicke. Die Schicht über der Troposphäre ist auch deshalb wichtig, weil sie Ozon enthält, das uns vor der schädlichen ultravioletten Strahlung der Sonne schützt (Abb. 4.49 und 4.50).



Abb. 4.49. Die „blaue Murmel“-Erde („blue marble“) zeigt in blasser violetter Farbe die sehr dünne äußere Atmosphäre.

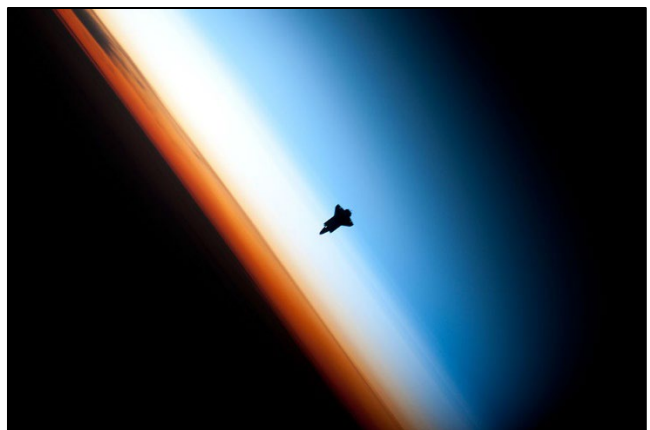


Abb.4.50. Die Raumfähre Endeavour kreist in der äußeren Atmosphäre, die Troposphärenschicht ist orangefarben und die weiße Schicht darüber enthält Ozon.

4.3.1 Zusammensetzung der Atmosphäre

Als sich die frühe Erde vor mehr als 4.000 Millionen Jahren abkühlte, wurde jegliche frühe Atmosphäre sofort nach ihrer Bildung vom Sonnenwind wieder weggetragen und die Erde wurde von Meteoriten bombardiert. Doch als die Bombardierung nachließ, fügte die intensive vulkanische Aktivität Wasser, Kohlendioxid und andere Gase wie Stickstoff, Methan und Schwefel zu einer neuen Atmosphäre hinzu. Ein Großteil des Wassers fiel als Regen aus der Atmosphäre und bildete die ersten Ozeane.

Diese frühe Atmosphäre enthielt keinen Sauerstoff. Vor etwa 2500 Ma entwickelten sich in den Ozeanen die ersten Bakterien, die Photosynthese betrieben. Die Bakterien absorbierten Kohlendioxid aus der Atmosphäre und setzten durch Photosynthese Sauerstoff frei (Abb. 4.51). Der zuerst gebildete Sauerstoff reagierte mit anderen Materialien wie Eisen, und so begann sich erst etwa 200 Millionen Jahre später freier Sauerstoff in der Atmosphäre anzusammeln.



Abb. 4.51. Mikroskopisch kleine Bakterien im Ozean, die Photosynthese betreiben, Kohlendioxid absorbieren und Sauerstoff freisetzen

Der freie Sauerstoff in der Atmosphäre machte die Erdoberfläche zum ersten Mal zu einer oxidierenden Umgebung, aber erst am Ende des Präkambriums, dem Beginn des Kambriums vor 541 Millionen Jahren, entstanden auf der Erde in großer Zahl sauerstoffverbrauchende Tiere. Seitdem haben sich die Prozentsätze der verschiedenen Gase, aus denen die Atmosphäre besteht, ständig verändert. Die Atmosphäre besteht heute aus 78,09 % Stickstoff, 20,95 % Sauerstoff, 0,93 % Argon und 0,04 % Kohlendioxid sowie geringen Mengen anderer Gase. Es enthält auch eine schwankende Menge an Wasserdampf, die bis zu mehr als 4 % betragen kann, diese wird jedoch nicht in die prozentualen Berechnungen der atmosphärischen Gase einbezogen, da sie so stark schwankt.

Das Maß für die Menge an Wasserdampf in der Luft ist ihre Luftfeuchtigkeit. Wenn die Luft eine Luftfeuchtigkeit von 100 % erreicht, kann sie keinen Wasserdampf mehr aufnehmen. Dann beginnt das unsichtbare Gas seinen Zustand in winzige flüssige Wassertröpfchen zu ändern (durch Kondensation, Dunst, Nebel, Tau oder Wolke). Die Tröpfchen können sich dann zu Wassertröpfchen oder Eiskristallen zusammenballen, die als Regen oder andere Niederschlagsarten fallen. Sehr feuchte Luft fühlt sich unangenehm an, wenn sie heiß (oft als „sengend heiß“ bezeichnet) oder kalt (oft als „rau“ beschrieben) ist, sodass Menschen im Allgemeinen trockene Luftbedingungen bevorzugen.

4.3.2 Atmosphärische Strömung

Der globale Luftstrom wird durch die unterschiedliche Erwärmung der Luft, die zu Dichteunterschieden führt, und zusammen mit der Drehung der Erde angetrieben, wie in Abschnitt 4.2.2.4 oben gezeigt.

Auch für mehr lokale Luftströmungen sind dies die Schlüsselfaktoren. Heiße Luftmassen steigen über Regionen der Erde auf, dabei sorgt die rotierende Erde dafür, dass sie sich drehen, auf der Nordhalbkugel gegen den Uhrzeigersinn und auf der Südhalbkugel im Uhrzeigersinn. Diese aufsteigenden Luftmassen, die einen

Unterdruck auf der Erdoberfläche verursachen, werden Zyklone genannt. An der Basis von Wirbelstürmen strömt die Luft an der Erdoberfläche in spiralförmigen Winden nach innen, die in den Wolkenformationen in Abb. 4.52 erkennbar sind.

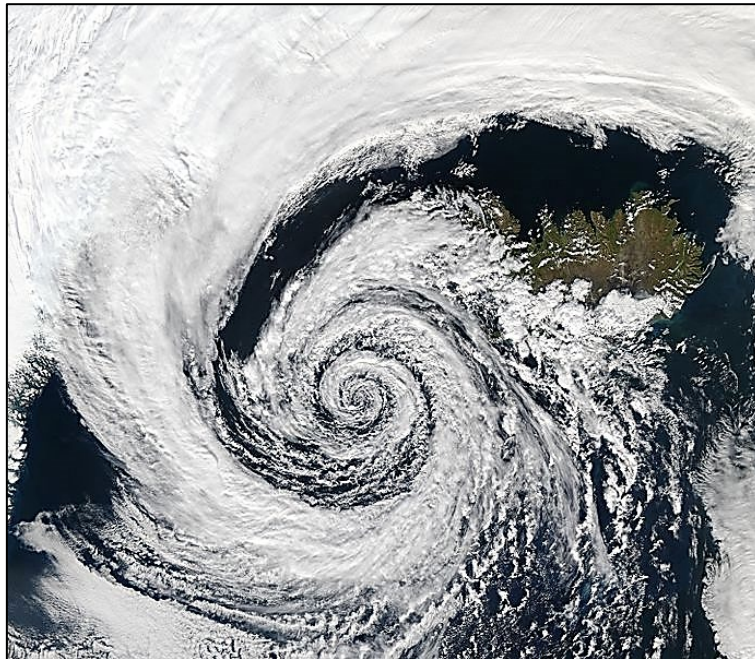


Abb. 4.52. Spiralförmige Wolken eines Zyklons in der Nähe von Island am 4. September 2003

Wolken entstehen, weil aufsteigende Luft abkühlt und kühlere Luft weniger Wasser aufnehmen kann als wärmere Luft. Das Wasser bildet Wolkentröpfchen, die dann Regen oder Schnee erzeugen. Daher verursachen Zyklone normalerweise windige und nasse Bedingungen.

Wenn sich in tropischen Gebieten über dem Meer Wirbelstürme entwickeln, können sie durch die im warmen Meer enthaltene Wärmeenergie in viel größere Hurrikane (im Atlantik und nordöstlichen Pazifik), Zyklone (im Indischen Ozean und südlichen Pazifik) oder Taifune (im nordwestlichen Pazifik) verwandelt werden (Abb. 4.53). Wenn Hurrikane, Zyklone oder Taifune Land treffen, bringen sie orkanartige Winde und sehr starken Regen mit sich. Durch die starken Winde kann es zu Sturmfluten kommen, die Meerwasser an die Küste treiben und mit der Flut große Schäden anrichten können.



Abb. 4.53. Hurrikan Isabel im Nordatlantik im Jahr 2003, mit dem charakteristischen Auge in der Mitte. Es wurden äußerst zerstörerische Winde mit einer Geschwindigkeit von 265 km/h und vielen Millimetern Regen registriert.

Auch anderswo rotieren kalte, sinkende Luftmassen, auf der Nordhalbkugel im Uhrzeigersinn und auf der Südhalbkugel in die entgegengesetzte Richtung. Bei diesen Antizyklonen handelt es sich um Hochdruckgebiete (Abb. 4.54). Die sanft sinkende Luft in Hochdruckgebieten verursacht schwächere Winde als Wirbelstürme und in den Zentren überhaupt keinen Wind. Wenn die Luft sinkt, erwärmt sie sich und kann immer mehr Wasserdampf aufnehmen, so dass es in Hochdruckgebieten kaum Wolken oder Regen gibt.

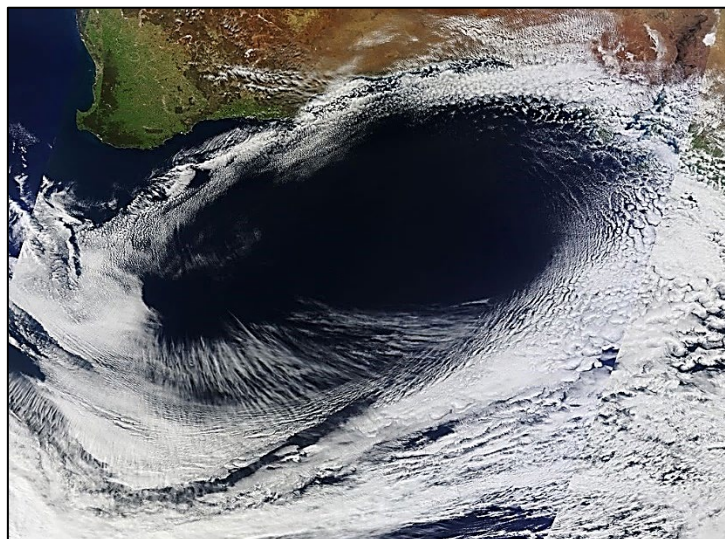


Abb. 4.54. Ein Hochdruckgebiet (Antizyklon) in der Nähe von Südastralien im Jahr 2012. Winde und Wolkenstreifen drehen sich gegen den Uhrzeigersinn (auf der Nordhalbkugel würden sie sich im Uhrzeigersinn drehen), aber die sinkende, sich erwärmende Luft erzeugt im Zentrum keine Wolke.

In noch kleineren Maßstäben kann absinkende kalte Luft Schadstoffe, Rauch und Wolken einschließen, was in manchen Städten sehr unangenehm sein kann (Abb. 4.55). In anderen Gebieten kann eine starke Erwärmung des Landes zu Wirbeln aufsteigender warmer Luft, sogenannten Thermiken, führen, in denen Vögel und Segelflugzeuge stundenlang schweben können (Abb. 4.56).



Abb. 4.55. Verschmutzungsmog in Shanghai, China, eingeschlossen unter absinkender kühler Luft



Abb.4.56. Ein Gleitschirmflieger in der Nähe von Reichenburg, Schweiz, der Thermik zum Auftrieb nutzt

In noch kleinerem Maßstab steigt Rauch auf, weil er durch aufsteigende warme Luftströme über Bränden nach oben getragen wird. Wenn man hingegen an einem ruhigen Tag am Fuße eines Gletschers steht, spürt man, wie Wirbel kalter, vom Gletscher herabsinkender Luft um einen herum herabströmen.

4.3.3 Veränderungen der Atmosphäre

Nachweise aus verschiedenen Quellen zeigen, dass sich die mittlere Temperatur der Erdoberfläche in der Vergangenheit stark verändert hat. Abb. 4.57 enthält nebeneinander fünf Diagramme, die zeigen, wie sich die Temperatur vermutlich über und unter dem Nullpunkt im Diagramm verändert hat, was der heutigen mittleren Oberflächentemperatur von 14 °C entspricht. Die erste Grafik zeigt die Temperaturänderungen von vor 540 Ma auf 65 Ma, die zweite von 65 Ma auf 6 Ma, die dritte von 6 Ma auf 1 Ma, die vierte von 1 Ma auf 20.000 Jahre und die letzte Grafik für die letzten 20.000 Jahre.

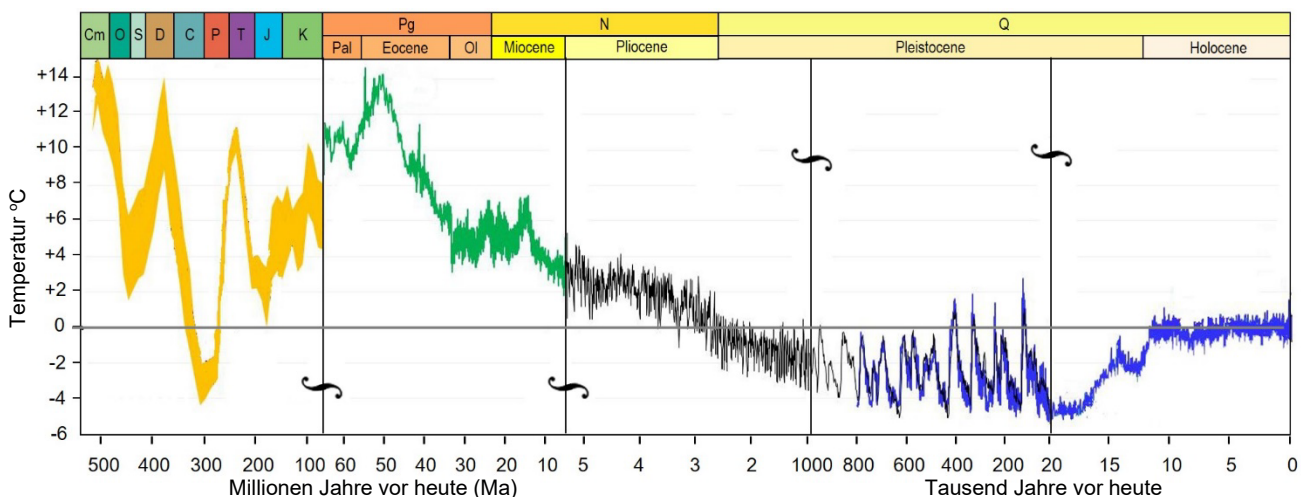


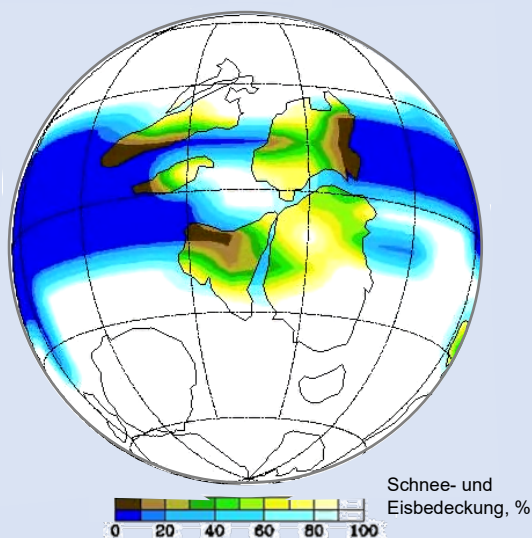
Abb. 4.57. Die mittlere Temperatur der Erdoberfläche (°C) seit dem Beginn des Paläozoikums vor 540 Ma ermittelt anhand unterschiedlicher Nachweise. Die fünf Diagramme zeigen die Temperaturveränderungen über immer kürzere Zeiträume bis zum heutigen Tag. Die Nulllinie (0 °C) in den Diagrammen entspricht der heutigen mittleren Erdoberflächentemperatur von 14 °C.

Die Grafiken zeigen, dass die mittleren Höchsttemperaturen in der geologischen Vergangenheit mehr als 10 °C über der heutigen Temperatur lagen (manchmal sogar mehr als 14 °C). Die niedrigsten Temperaturen lagen bis zu 5 °C unter dem heutigen Wert. Bei den heutigen Temperaturen sind die Pole vergletschert, was darauf hindeutet, dass die Vergletscherung in der Vergangenheit viel weiter verbreitet gewesen sein muss, als die Temperaturen niedriger waren. Die Grafiken zeigen weit verbreitete Vergletscherungen oder **Eishausbedingungen** im Pleistozän und im Karbon/Perm. Es gibt auch Hinweise auf Eishausbedingungen im Ordovizium/Silur und auf zwei Vereisungen im Präkambrium, bevor die Diagramme in Abb. 4.57 beginnen. Die spätere

präkambrische Eiszeit war die größte, die die Erde je erlebt hat; Möglicherweise war die gesamte Erde mit Eis bedeckt (sogenannte „**Schneeball-Erde**“) oder eine Zone des offenen Meeres blieb in der Nähe des Äquators zurück („**Matschball-Erde**“).

Box 4.14. Schneeball-Erde oder Matschball-Erde?

Die Schneeball-Erde-Theorie basiert auf Hinweisen aus 650 bis 635 Millionen Jahre alten Sedimentgesteinen, die von Eisschilden abgelagert wurden, die Kontinente bedeckten, von denen paläomagnetische Messungen zeigen, dass sie sich in der Nähe des Äquators befanden. Die Vorstellung einer fast vollständig vereisten Erde würde gestärkt, wenn gezeigt werden könnte, dass alle Sedimentablagerungen, die sich zu dieser Zeit bildeten, glazial gebildet wurden. Das ist jedoch sehr schwer zu beweisen, da bislang keine Fossilien der damals abgelagerten Sedimentgesteine vorliegen (da sich Leben mit harten Teilen noch nicht entwickelt hatte und normalerweise in Gletscherablagerungen sowieso nicht zu finden wäre). Es gibt auch Sedimentnachweise dafür, dass es zu dieser Zeit zumindest einige Bereiche mit offenem Wasser gab. Deswegen bevorzugen viele Geowissenschaftler das Modell einer Schneeball-Erde mit offenem Wasser in Meeren in der Nähe des Äquators, gegenüber einer komplett vereisten Schneeball-Erde. Dennoch gibt es gute Hinweise darauf, dass die Erde vor etwa 640 Millionen Jahren eine sehr starke Vereisung erlebte.



Computer-simulierte Eisbedeckung während der Schneeball-Erde Zeit

Einer der Prozesse, von denen angenommen wird, dass sie weltweite Vergletscherungen ausgelöst haben, ist die positive Rückkopplung durch den Albedoeffekt, der in Abschnitt 1.3 dieses Buches beschrieben wird. Als die Eisschilde wuchsen, reflektierten sie immer mehr Sonnenstrahlung, kühlten die Erde ab und verursachten ein stärkeres Wachstum der Eisschilde, bis ein Großteil des Planeten von Eis bedeckt war.

Das Ende dieser starken Eiszeit könnte dadurch ausgelöst worden sein, dass Vulkane große Mengen Kohlendioxid in die Atmosphäre freisetzten, was schließlich durch den Treibhauseffekt zu einer großflächigen Erwärmung führten.

Zwischen den sehr kalten Perioden gab es Zeiten, in denen die Erde viel wärmer war als heute, insbesondere im Paläozän/Eozän, dem Perm und der Trias, dem Devon und dem Kambrium. Diese Zeiten, in denen es keine globalen Eisschilde gab, werden oft als „Treibhausbedingungen“ bezeichnet.



Abb.4.58. Entnahme eines Eiskerns aus einem Kernrohr einer Eisbohrung

Im Laufe der geologischen Zeit hat die Gesamtenergie, die von der Sonne auf die Erde gelangt, zugenommen, sodass wir davon ausgehen können, dass auch die globalen Temperaturen stetig ansteigen. Da es keinen stetigen Anstieg der Durchschnittstemperatur auf der Erde gegeben hat, müssen andere Faktoren einen Einfluss haben.

Eisbohrkerne geben Hinweise auf die Hauptfaktoren, welche die Temperatur der Erde beeinflussen. Bohrlöcher werden in die dickeren Teile polarer Eisschilde gebohrt, um Eiskerne zu entnehmen (Abb. 4.58). Daten aus den Eiskernen können verwendet werden, um die Temperatur sowie den Gehalt verschiedener Gase in der Atmosphäre zum Zeitpunkt der Bildung dieser Eisschicht anzuzeigen.

Abb. 4.59 zeigt Diagramme der Temperatur und des Kohlendioxidgehalts der Atmosphäre über die letzten 400.000 Jahre. Die Grafiken zeigen einen sehr engen Zusammenhang zwischen der Menge an Kohlendioxid in der Atmosphäre und der Temperatur der Erde. Während einige Geowissenschaftler argumentieren, dass die Temperatur der Erde die Änderung des Kohlendioxidgehalts verursacht, denken die meisten Geowissenschaftler das Gegenteil. Sie glauben, dass Änderungen des Kohlendioxidgehalts die Änderungen der Erdtemperatur verursachen. Es ist mittlerweile allgemein anerkannt, dass ein hoher Kohlendioxidgehalt zu hohen Temperaturen auf der Erde führt.

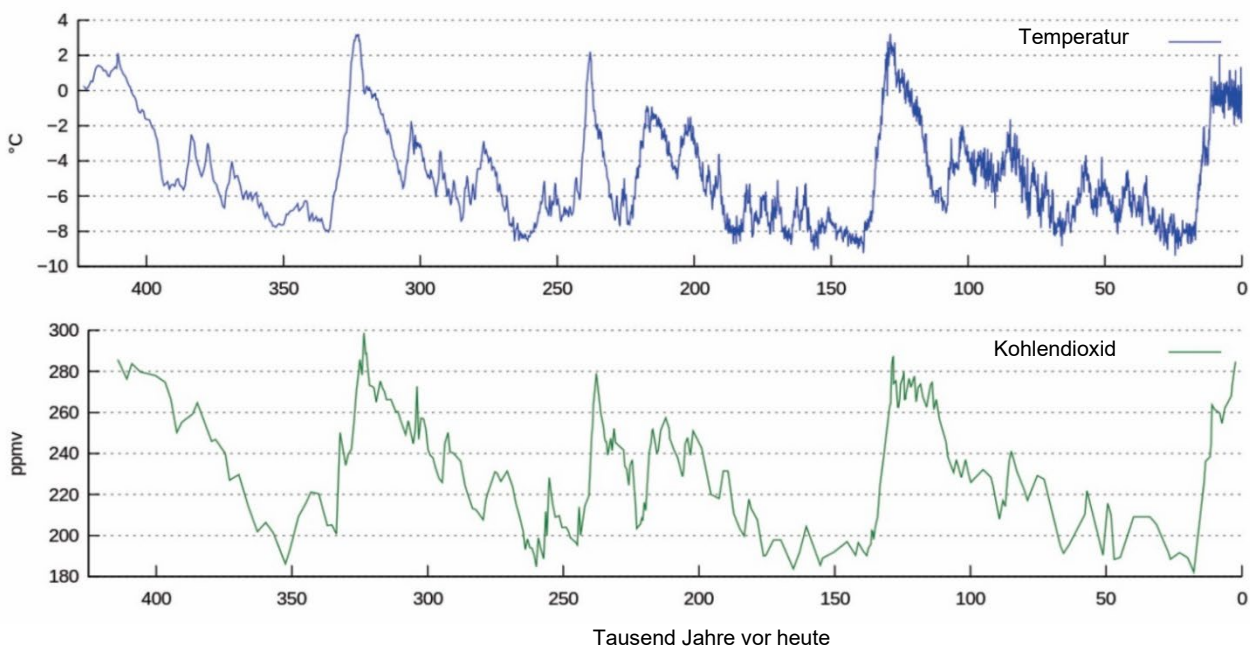


Abb. 4.59. Temperaturänderungen und Variation des CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre während der letzten 400.000 Jahre, aufgezeichnet im Wostok-Eiskern aus der Antarktis (ppmv = Teile pro Million CO₂ in der Atmosphäre nach Volumen)

Der Zusammenhang zwischen der Erdtemperatur und der Menge an Kohlendioxid (und anderen Schlüsselgasen) in der Atmosphäre wird **Treibhauseffekt** genannt, wie in Abb. 4.60 dargestellt.

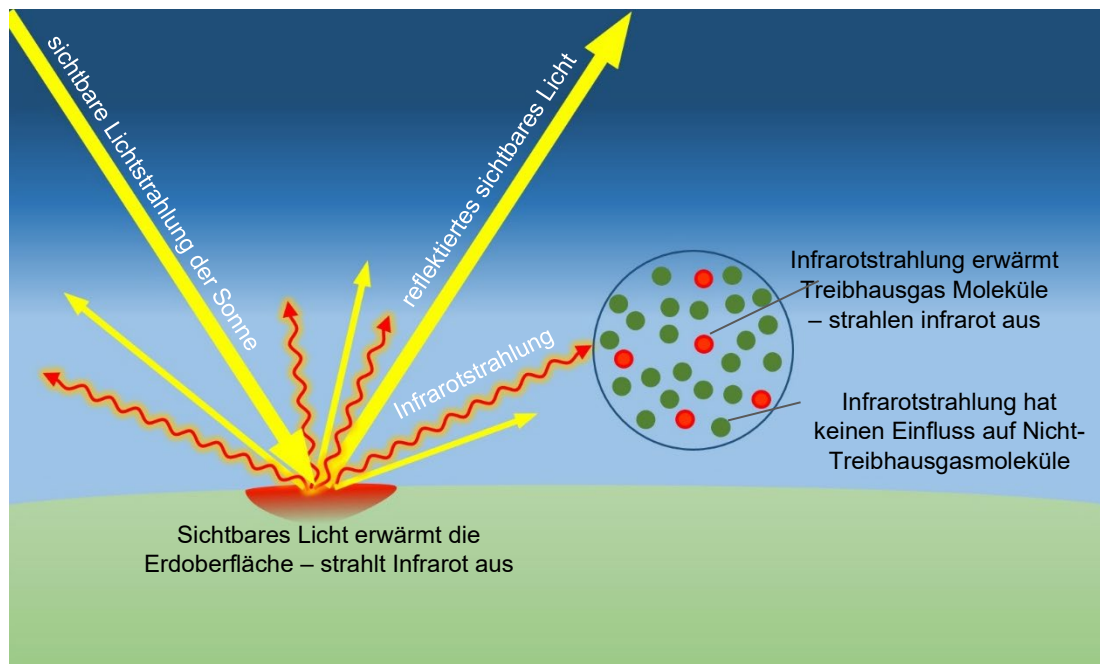


Abb. 4.60. Der Treibhauseffekt (Infrarotstrahlung ist Wärme)

Die Strahlung der Sonne erreicht die Erde als sichtbares Licht. Ein Teil davon wird zurück in den Weltraum reflektiert, ein anderer Teil wird jedoch von der Erdoberfläche absorbiert und als Wärme oder Infrarotstrahlung wieder abgestrahlt. Ein Teil der zurückgestrahlten Wärme gelangt durch die Atmosphäre in den Weltraum, ein Teil wird jedoch von Treibhausgasen absorbiert, wodurch die Atmosphäre wärmer wird. Je mehr Treibhausgase sich in der Atmosphäre befinden, desto wärmer wird es und damit auch die Erde. Das am häufigsten vorkommende Treibhausgas in der Erdatmosphäre ist Wasserdampf, gefolgt von Kohlendioxid, Methan und Lachgas. Die Menge an Wasserdampf in der Atmosphäre schwankt ständig und die Mengen an Methan und Lachgas sind gering, so dass das Hauptgas, das die Erde langfristig beeinflusst, offenbar Kohlendioxid ist.

Gäbe es keine Treibhausgase in der Atmosphäre, würde die gesamte Strahlung der Sonne wieder abgestrahlt und die Erde wäre so kalt, dass sie dauerhaft gefroren wäre. Wir brauchen also den Treibhauseffekt, damit die Erde warm genug für Leben ist. Das Problem entsteht, wenn zusätzliche Treibhausgase in die Atmosphäre gelangen und so den **verstärkten Treibhauseffekt** hervorrufen. Es scheint, dass die sehr warmen Perioden der Erdgeschichte (Treibhausbedingungen) mit einem hohen Anteil an Treibhausgasen in der Atmosphäre verbunden sind. Diese könnten mit aktiven Perioden der Plattentektonik zusammenhängen, die eine erhöhte vulkanische Aktivität verursachen und Treibhausgase freisetzen.

Der Klimawandel scheint daher eng mit der Menge an Treibhausgasen in der Atmosphäre verknüpft zu sein. Aus diesem Grund befürchten Wissenschaftler, dass die Menge an Kohlendioxid in der Atmosphäre zunimmt. Die Menge an Kohlendioxid in der Atmosphäre wird seit 1958 vom Observatorium auf dem ruhenden Vulkan Mauna Loa auf Hawaii überwacht. Diese Messungen zeigen den stetigen Anstieg, der in Abbildung 4.61 zu sehen ist.

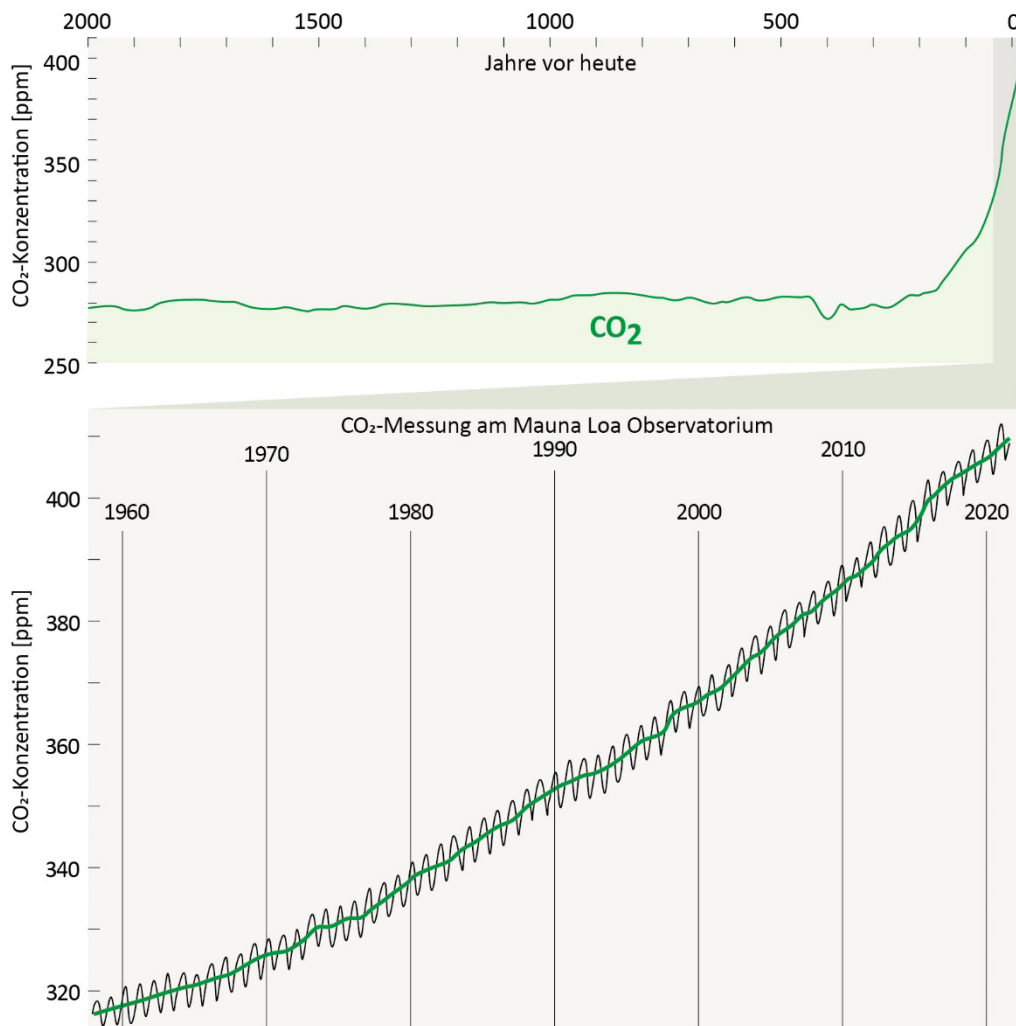


Abb. 4.61. Veränderung des Kohlendioxidgehalts in der Atmosphäre während der letzten 2000 Jahre (oben) und seit Beginn der Messungen im Jahr 1958, gemessen am Mauna Loa-Observatorium auf Hawaii. (Der Gipfel des Mauna Loa wurde als Standort für diese Beobachtungen ausgewählt, da er hoch in der Atmosphäre und weit entfernt von kontinentalen Landmassen liegt. Die Messungen stehen in keinem Zusammenhang mit vulkanischer Aktivität.)

Die meisten Wissenschaftler glauben, dass dieser stetige Anstieg des Kohlendioxidgehalts in der Atmosphäre hauptsächlich auf die Verbrennung fossiler Brennstoffe wie Kohle, Öl und Erdgas durch den Menschen sowie auf die großflächige Abholzung tropischer Regenwaldgebiete zurückzuführen ist. Durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe wird zusätzliches Kohlendioxid in die Atmosphäre freigesetzt, und durch die Zerstörung der Vegetation stehen weniger Pflanzen zur Verfügung, um Kohlendioxid durch Photosynthese aus der Atmosphäre zu entfernen und zu speichern. Während wir wissen, dass die Ozeane einen Teil des zusätzlichen Kohlendioxids aus der Atmosphäre absorbieren können, erforschen Wissenschaftler weiterhin, wie viel absorbiert werden kann und wie sich dies auf die Ozeane auswirken könnte.

Der stetige Anstieg des Kohlendioxidgehalts der Atmosphäre scheint mit dem ziemlich stetigen Anstieg der Erdtemperatur zusammenzuhängen, der seit den 1960er Jahren gemessen wurde, wie aus der Datengrafik der National Aeronautics and Space Administration (NASA) in den USA hervorgeht (Abb. 4.62).

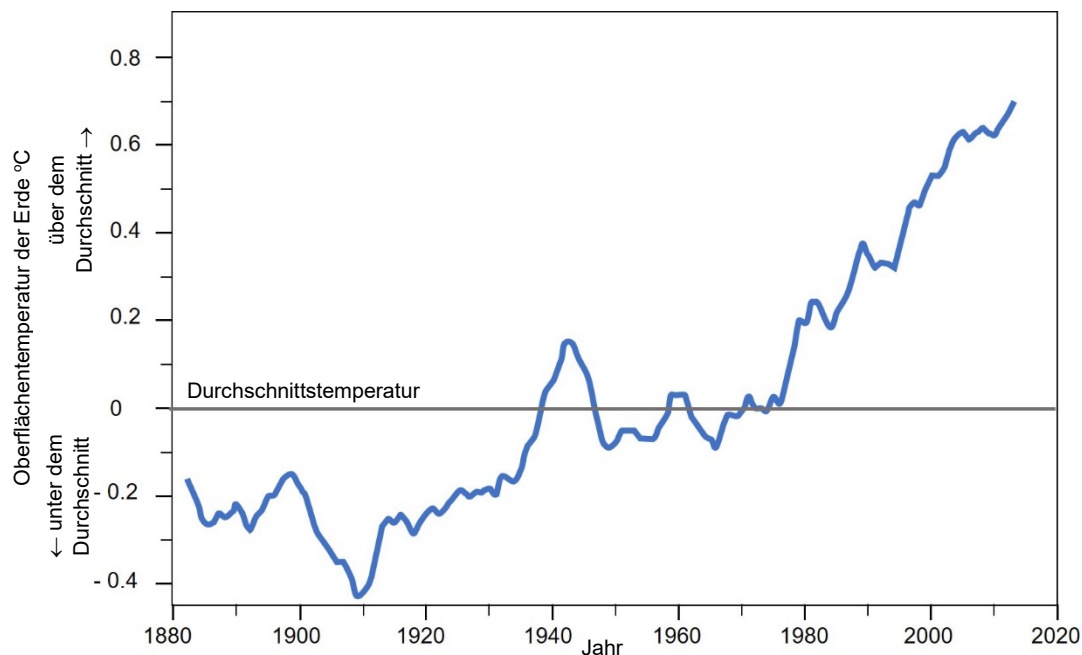


Abb. 4.62. Änderung der Oberflächentemperatur der Erde, basierend auf von der NASA zusammengestellten Daten

Wenn also der Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre zunimmt, was höchstwahrscheinlich auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen ist, wird die Erde wärmer. Eine wärmere Erde mag den Menschen, die in kälteren Ländern leben, wie eine gute Idee erscheinen, aber eine stetige Erwärmung der Erde könnte große Probleme verursachen, wie in Tab. 4.25 dargestellt.

Tab. 4.25. Probleme, die wahrscheinlich durch eine Erwärmung der Erde verursacht werden

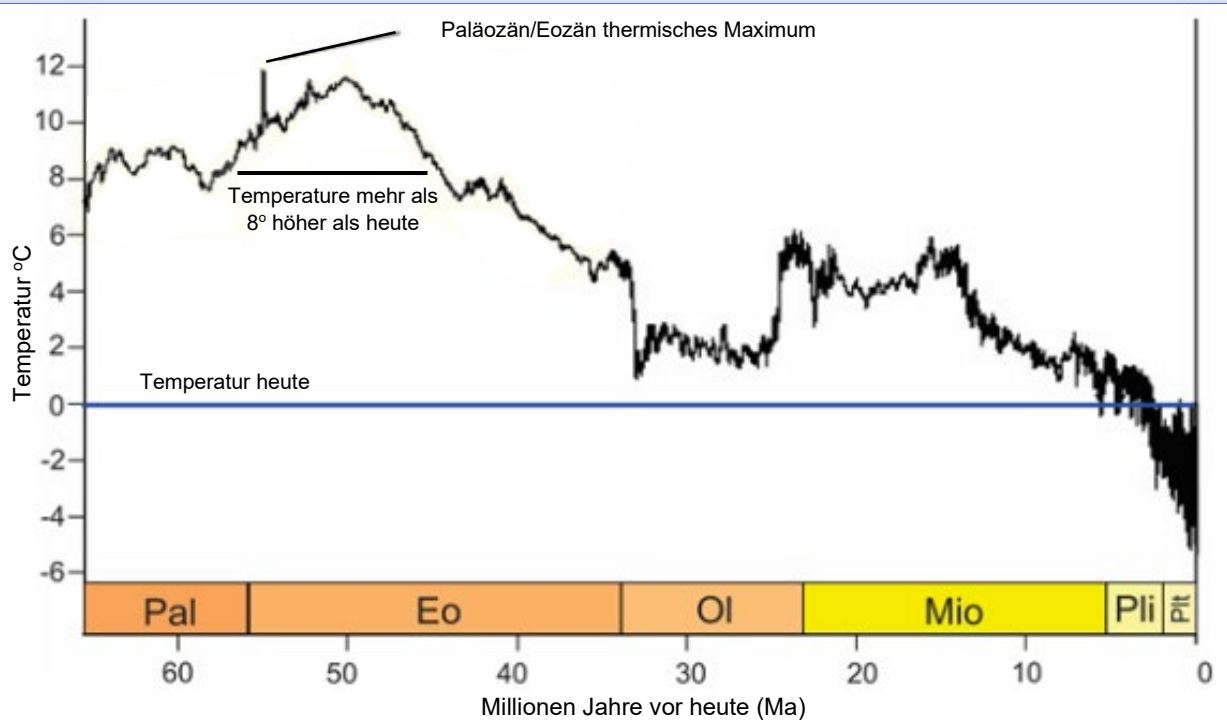
Mögliches Problem	Möglicher Effekt
Möglicherweise wird ein „Kipppunkt“ erreicht (wie in Abschnitt 1.3 beschrieben), an dem positive Rückkopplungsschleifen dazu führen, dass die Erde sehr viel wärmer wird	Alle Probleme in der folgenden Tabelle wären viel größer
Wärmere Ozeane geben mehr Wärme an die Atmosphäre ab	Wärmeenergie aus den Ozeanen treibt Stürme an, sodass es auf der Erde noch viel stürmischer werden könnte
Wärmere Bedingungen erhöhen die Verdunstungs- und Kondensationsrate	Veränderungen im Wasserkreislauf führen dazu, dass einige Gebiete des Planeten feuchter und andere trockener werden
Landeiskappen schmelzen ab und führen zu mehr Wasser in den Ozeanen	Der Anstieg des Meeresspiegels führt zu zusätzlichen Überschwemmungen tief gelegener Gebiete, insbesondere bei Stürmen
Das Meerwasser dehnt sich bei Erwärmung aus	Die Ausdehnung des Meerwassers trägt zum Anstieg des Meeresspiegels bei
Der steigende Meeresspiegel verringert die für Landwirtschaft und Industrie verfügbare Fläche	Es kann zu einer Massenmigration der menschlichen Bevölkerung auf der Suche nach günstigerem Land in bereits überfüllten Gebieten der Welt kommen
Die Erwärmung der Ozeane beeinflusst das Volumen und die Geschwindigkeit der Meeresströmungen mit Auswirkungen auf die Ozeane und die Atmosphäre	Meeresströmungen verteilen die Wärme auf der Erde. Eine Änderung dieser Strömungen kann dazu führen, dass einige Regionen wärmer und andere kälter werden
Klimazonen verschieben sich in Richtung der Pole	Die Verschiebung der Klimazonen führt dazu, dass einige Arten in neuen Gebieten gedeihen, andere jedoch aussterben
Meerwasser wird saurer, da es Kohlendioxid löst	Arten wie Korallen, die sich nicht an saurere Gewässer anpassen können, sterben zusammen mit ihren Korallenriffgemeinschaften aus

Eine sich erwärmende Erde kann einige Vorteile mit sich bringen, wie zum Beispiel die Möglichkeit des Anbaus neuer Nutzpflanzen in Gebieten näher an den Polen, ein verstärktes Waldwachstum, das durch das zusätzliche Kohlendioxid gefördert wird, und die Tatsache, dass die nordwestliche Seepassage nördlich von Nordkanada im Sommer für die Schifffahrt nutzbar wird. Die meisten Menschen würden jedoch argumentieren, dass die Nachteile die möglichen Vorteile bei weitem überwiegen.

Die Erde war in der Vergangenheit, etwa im Paläozän/Eozän, einer starken globalen Erwärmung ausgesetzt und hat diese überlebt. Allerdings ist das Überleben des Menschen und einer Vielzahl anderer Arten unter diesen Bedingungen sehr zweifelhaft.

Box 4.15. Die Erde während des thermischen Maximums im Paläozän/Eozän

Während der Treibhausbedingungen an der Grenze zwischen dem Paläozän und dem frühen Eozän vor etwa 56 Millionen Jahren gibt es Hinweise darauf, dass die Erde bis zu 12 °C wärmer war als heute und fast 10 Millionen Jahre lang mehr als 8 °C wärmer blieb. Dies hing vermutlich damit zusammen, dass zu dieser Zeit große Mengen Kohlendioxid in die Atmosphäre gelangten. Geowissenschaftler erforschen diese Hochtemperaturperiode sehr aktiv, da sie möglicherweise Aufschluss über aktuelle Studien zum Klimawandel geben könnte.



Temperatur der Erde (°C) verglichen mit der heutigen Temperatur über die letzten 65 Ma

Zu dieser Zeit gab es auf der Erde keine Eisschilde und die Ausdehnung des warmen Ozeans trug zum Anstieg des Meeresspiegels bei, der viele tief liegende kontinentale Gebiete überschwemmte. Fossile Überlieferungen zeigen, dass Wälder die gesamte Erde bedeckten, vom Äquator bis zu den Polen, abgesehen von einigen trockeneren Gebieten. In Nordamerika und Europa wuchsen tropische Regenwälder und in der Arktis wuchsen Palmen. Es entwickelten sich neue Säugetierarten, aber meist handelte es sich dabei um sehr kleine Zwergarten, wahrscheinlich weil kleinere Säugetiere besser an heiße Bedingungen angepasst sind als größere Tiere. Reptilien gab es reichlich, insbesondere Pythons und Schildkröten. Insekten waren häufig. Es gab große Veränderungen in den Ozeanen. Während viele am Boden lebende mikroskopisch kleine Arten ausstarben, blühten planktonische Organismen in der Nähe der Meeresoberfläche auf. In den warmen Ozeanen wimmelte es von Fischen und anderen Meereslebewesen. Dies war eine ganz andere Welt als die heutige Erde.

Diagramme der Erdtemperatur, insbesondere der letzten Millionen Jahre, wie in den Abb. 4.57 und 4.59 dargestellt, zeigen regelmäßige Zyklen von Temperaturänderungen. Es wird angenommen, dass diese mit der

Menge der von der Erde empfangenen Sonnenstrahlung zusammenhängen, was hauptsächlich auf regelmäßige Änderungen in der Art und Weise zurückzuführen ist, wie sich die Erde dreht und die Sonne umkreist. Moderne Treibhauseffekte können jedoch noch größere Auswirkungen haben als die damaligen regelmäßigen Veränderungen.

4.4 Biosphäre

Je intensiver wir das Leben auf der Erde studieren, desto mehr entdecken wir, wie eng die Prozesse in der Biosphäre mit denen der anderen Sphären, der Geosphäre, der Hydrosphäre und der Atmosphäre, verknüpft sind. Wir haben auch herausgefunden, wie kleine Änderungen in einem Teil eines dieser Systeme große Änderungen an anderer Stelle hervorrufen können.

4.4.1 Evolution

William Smith (1769-1839) hatte gezeigt, dass Fossilien in Gesteinen immer in der gleichen Reihenfolge gefunden wurden (siehe Abschnitt 3.2), aber die Wissenschaftler wussten nicht, warum dies geschah. Im Jahr 1858 stellten Charles Darwin (1809-1882) und Alfred Russel Wallace (1823-1913) eine Theorie vor, die erklärt, warum sich Fossiliensequenzen auf diese Weise veränderten. Das ist die Evolutionstheorie.

Die Evolutionstheorie basiert auf drei wissenschaftlichen Beobachtungen über die Biosphäre:

- 1) einzelne Organismen (wie Tiere, Pflanzen, Fossilien) unterscheiden sich voneinander;
- 2) Einige Individuen sind besser zum Überleben und zur Fortpflanzung geeignet als andere. Und
- 3) Viele Merkmale eines Individuums werden von einer Generation an die nächste weitergegeben.

Zusammen ergibt dies einen Prozess, der dazu führt, dass sich Gruppen von Tieren und Pflanzen im Laufe der Zeit verändern oder weiterentwickeln, was Darwin als **natürliche Selektion** bezeichnete. Dies wurde später als „Überleben des Stärksten“ bezeichnet, bei dem die zum Überleben am besten geeigneten Organismen Nachkommen hervorbringen, während die weniger gut geeigneten Organismen aussterben. Die Evolutionstheorie war erstmals in der Lage, die meisten der zahlreichen Beobachtungen zu erklären, die über das Leben auf der Erde gemacht wurden.

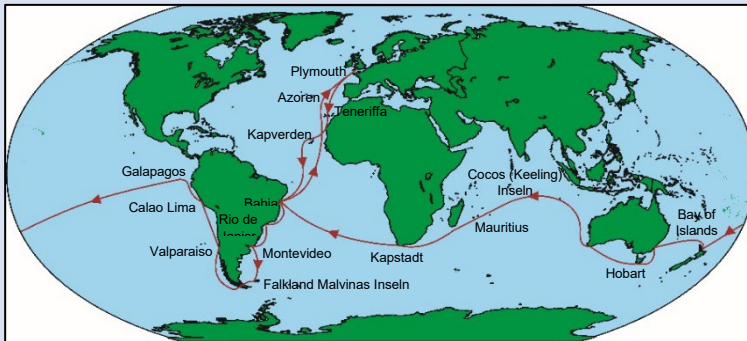
Wir wissen jetzt, wie die drei wissenschaftlichen Beobachtungen der Evolution erklärt werden können:

- 1) Individuen unterscheiden sich voneinander, weil die sexuelle Fortpflanzung dazu führt, dass jedes Individuum über einen einzigartigen Satz von Genen verfügt.
- 2) Einige Kombinationen der Gene eines Individuums geben ihm eine bessere Überlebenschance als andere. Beispielsweise können einige Genkombinationen einem Tier längere Beine verleihen, sodass es schneller laufen kann. Andere Genkombinationen können dazu führen, dass ein Baum einen dickeren Stamm hat und dadurch höher wächst.
- 3) Bei der sexuellen Fortpflanzung bei Pflanzen und Tieren stammt die Hälfte der Gene von einem Elternteil und die andere Hälfte vom anderen. Die Hälfte der von einem Elternteil erhaltenen Gene überträgt einige Merkmale des Elternteils auf die nächste Generation.

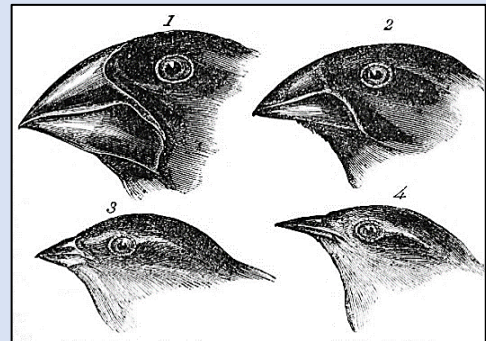
Befunde aus dem Fossilienbestand zeigen, dass sich einige Lebensarten scheinbar stetig weiterentwickeln, während andere zeigen, dass sich eine Gruppe plötzlich zu einer anderen Gruppe entwickelt. Plötzliche Evolutionssprünge scheinen dort aufzutreten, wo eine Gruppe von Tieren oder Pflanzen vom Rest ihrer Gruppe getrennt wird, beispielsweise auf einer Insel oder auf einer Bergkette. Wenn unter diesen Bedingungen eine Pflanze oder ein Tier ein neues Merkmal entwickelt, geht dieses nicht durch Kreuzung mit anderen Individuen in der großen Masse verloren, sondern kann über Generationen hinweg erhalten und weiterentwickelt werden.

Box 4.16. Charles Darwin und die Evolution

Im Jahr 1831 nahm Charles Darwin als Naturforscher an der Forschungsreise des Segelschiffs *HMS Beagle* teil und studierte sowohl Geologie als auch Biologie. Während der fast fünfjährigen Weltreise zeichnete Darwin eine enorme Anzahl von Beobachtungen der Geologie, Fossilien und Tierwelt der von ihm besuchten Länder auf und sammelte zahlreiche Exemplare. Einige der Vögel, die er auf den Galapagos-Inseln im Ostpazifik sammelte, erwiesen sich später als Finkenarten. Diese Vögel hatten sich an unterschiedliche Lebensstile auf verschiedenen Inseln angepasst und ihre Schnäbel speziell angepasst, um Nüsse, Früchte oder Würmer fressen zu können. Darwin kam zu dem Schluss, dass wahrscheinlich eine Finkenart ursprünglich vom südamerikanischen Festland auf die Inseln gelangt war, dass sie sich aber bei ihrem Umzug auf andere Inseln isolierten und sich so unterschiedlich zu verschiedenen Arten entwickelten. Diese und ähnliche Beobachtungen waren ein wichtiger Auslöser für sein Denken über die Evolution.



Die Reiseroute der Beagle



Darwinfinken von der Galapagos-Insel

Nach der Reise im Jahr 1839 veröffentlichte Darwin sein Beobachtungsbuch, das seine Studien über Vulkangesteine und seine Erfahrungen mit einem Erdbeben der Stärke 8,5 in Chile enthielt. Erst 20 Jahre später, im Jahr 1859, veröffentlichte er sein Buch über die Evolutionstheorie mit dem Titel „*Über die Entstehung der Arten*“.

Die unterschiedliche Verteilung der Kontinente aufgrund der Plattenbewegung hatte wichtige Auswirkungen auf die Entwicklung des Lebens auf der Erde. Als alle Kontinente einen Superkontinent bildeten, gab es nur wenige isolierte Landgebiete und somit kaum Möglichkeiten für einen Evolutionssprung. Mittlerweile wurden rund um die Küsten des Superkontinents die Flachwassergebiete wieder miteinander verbunden, was ebenfalls die Möglichkeiten für eine Evolution verringerte.

Zu anderen Zeiten, als Kontinente getrennt wurden, kam es zu Evolutionssprüngen auf den getrennten Landmassen und in den getrennten Flachmeeren. Ein Beispiel sind die evolutionären Veränderungen, die Neuseeland eine so einzigartige Mischung an Wildtieren beschert haben.

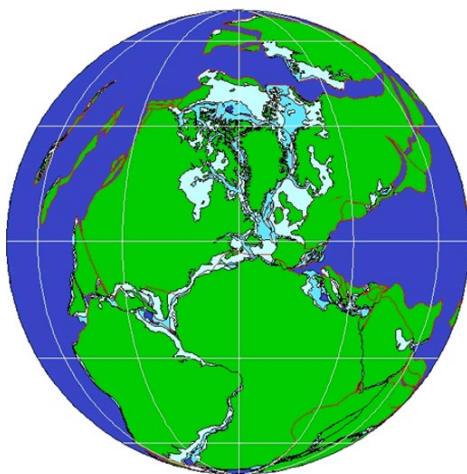


Abb. 4.63. Karte der Kontinente vor 280 Millionen Jahren während der Zeit des Perm, mit einem Superkontinent (Pangäa), der Landgebiete und miteinander verbundene flache Meere verbindet (langsamere Entwicklung)

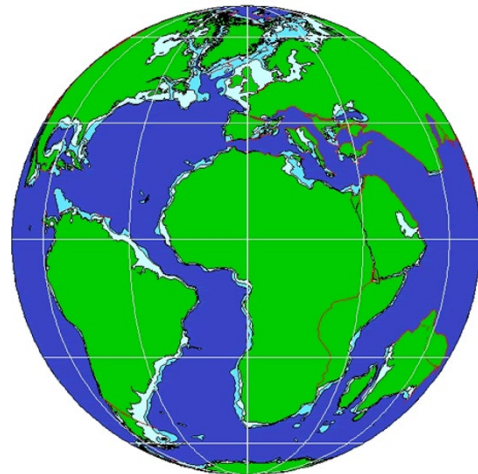
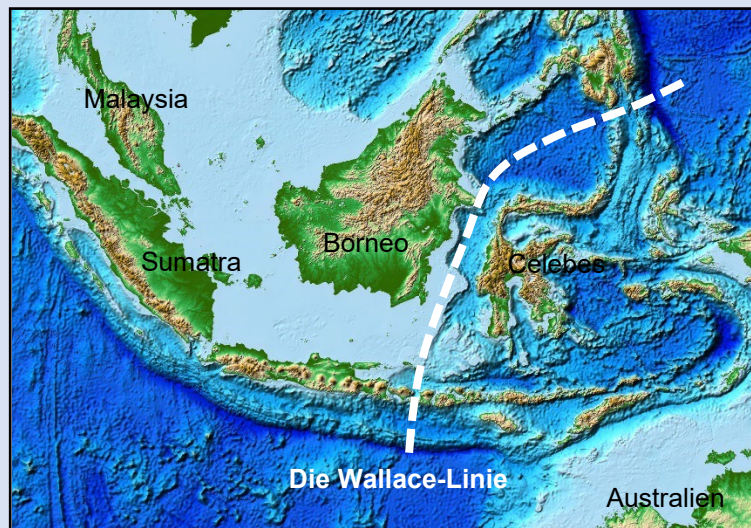


Abb. 4.64. Karte der Kontinente vor 85 Ma, während der Kreidezeit, mit getrennten Kontinenten und flachen Meeren (schnellere Entwicklung)

Box 4.17. Die Wallace-Linie

Alfred Russell Wallace, der zusammen mit Charles Darwin die Evolutionstheorie hervorbrachte, entwickelte seine Ideen auf seinen ausgedehnten Reisen, zunächst im Amazonasgebiet Südamerikas und später in Südostasien. Er identifizierte die Linie, die heute Wallace-Linie genannt wird, in Südostasien. Sie trennt überwiegend asiatische Tiere im Westen von einer Mischung aus asiatischen und australasiatischen Tieren im Osten. Das veranlasste ihn, darüber nachzudenken, wie sich diese verschiedenen Tiergruppen überhaupt gebildet haben könnten, und entwickelte so die Evolutionstheorie. Als Australasien in der geologischen Vergangenheit von Asien getrennt wurde, entwickelten sich in den verschiedenen Regionen unterschiedliche Tiergruppen.



Die globale Gesteinsabfolge zeichnet mehrere Episoden des **Massensterbens** auf, bei denen viele verschiedene Gruppen gleichzeitig ausstarben. Tatsächlich wurden die Grenzen der wichtigsten geologischen Perioden seit dem Kambrium dorthin gelegt, wo ein Massenaussterben große Veränderungen im Fossilienbestand verursachte. Normalerweise schien das Leben vor einem Massenaussterben normal zu verlaufen. Dann starben bei dem Ereignis plötzlich verschiedenste Gruppen aus. Nach dem Ereignis entwickelten sich die überlebenden Gruppen zu einer Reihe neuer Gruppen, wahrscheinlich weil es keine Konkurrenz mehr durch die nunmehr ausgestorbenen Gruppen gab. Massenaussterben führten also nicht nur zum Aussterben vieler Gruppen, sondern lösten auch die spätere Entstehung vieler neuer Gruppen aus.

In den letzten 450 Millionen Jahren kam es zu fünf großen Massenaussterbeereignissen, bei denen mehr als 60 % aller Arten ausstarben. Das größte Aussterben ereignete sich am Ende des Perm, als mehr als 90 % aller Arten ausstarben.

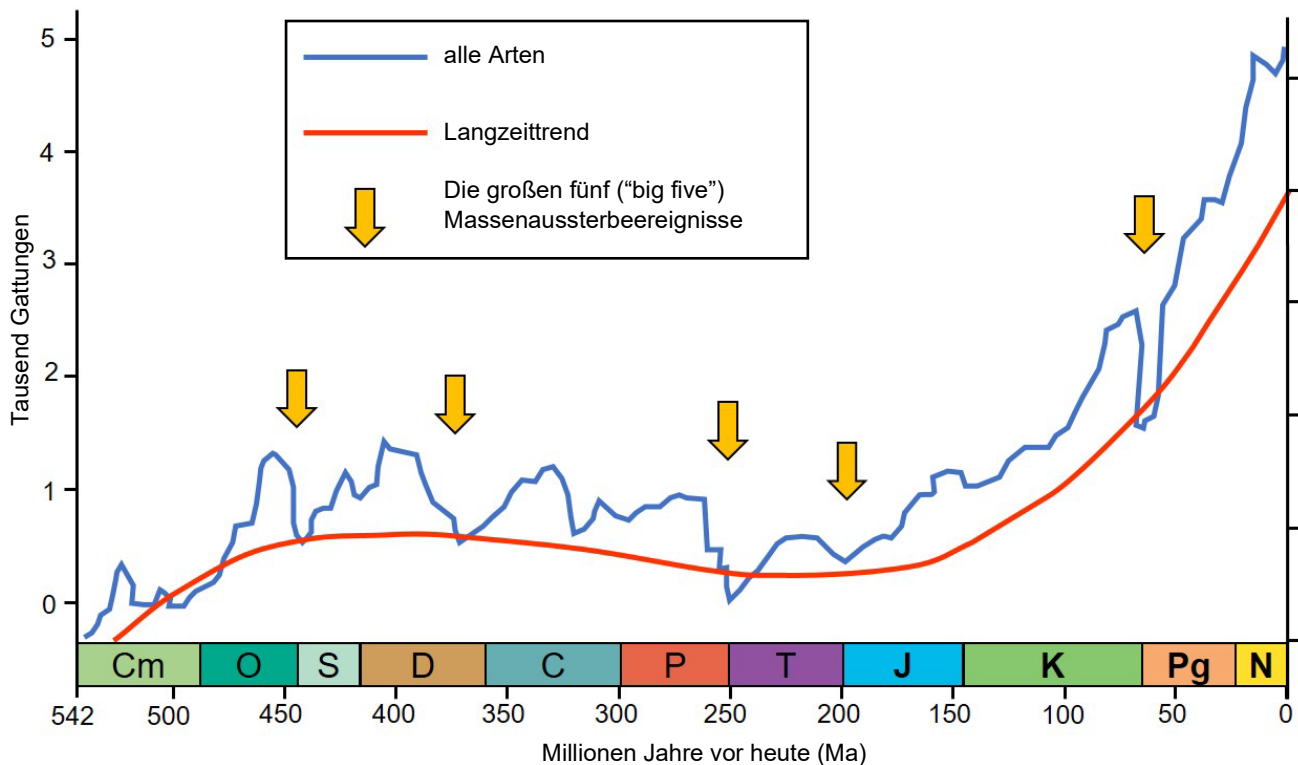


Abb. 4.65. Der langfristige Trend des Lebens auf der Erde und die großen Artensterben, dargestellt durch die Anzahl der Gattungen (biologische Gruppierungen mit Artenzahlen)

Zur Erklärung des Massenaussterbens wurden viele verschiedene Theorien aufgestellt. Dazu gehören gewaltige Vulkanausbrüche, globale Meeresspiegelschwankungen, Einschläge von Asteroiden und große Klimaveränderungen (Abkühlung und Erwärmung). Manchmal scheinen mehrere dieser Ereignisse zusammen mit anderen großen Veränderungen gleichzeitig stattgefunden zu haben.

Box 4.18. Das Massenaussterbeereignis „das große Sterben“

Am Ende des Perms (und zu Beginn der Trias) vor 252 Millionen Jahren starben mehr als 90 % aller Arten auf der Erde aus. Bis zu 96 % aller Meeresarten starben aus, wobei auch Landtiere und Insekten stark vom Aussterben bedroht waren. Die verheerenden Bedingungen während dieses Massensterbens sind kaum vorstellbar – nicht nur an Land starben so viele Tiere und Pflanzen aus, sondern auch in den Ozeanen, als „fast alles Leben starb“.

Es wurden viele Theorien entwickelt, um dieses „große Sterben“ zu erklären, so auch die Extrusion riesiger Mengen Basaltlava, die zum Zeitpunkt des Aussterbens stattfand und enorme Mengen an Asche und vulkanischem Gas in die Atmosphäre freigesetzt hätte. Die Asche hätte das Sonnenlicht blockiert und die Photosynthese gestoppt, während die Freisetzung von vulkanischem Kohlendioxid zu einer globalen Erwärmung und Versauerung der Ozeane geführt hätte.

Das Massenaussterben könnte durch den Einschlag eines Asteroiden auf die Erde ausgelöst worden sein, aber wenn dies der Fall wäre und der Einschlagsort in den Ozeanen gelegen hat, wäre der Ort wahrscheinlich inzwischen verschwunden, da der Meeresboden durch Plattentektonik recycelt wird. Allerdings scheinen aus dieser Zeit auch keine weiteren Hinweise auf einen größeren Einschlag erhalten geblieben zu sein, so dass eine Erklärung der Asteroidenkollision für dieses Ereignis unwahrscheinlich erscheint.



Glossopteris Baumblätter und Samenkapseln, Houston Museum of Natural Science, Houston, Texas, USA – gefunden vor dem „großen Sterben“, aber nicht danach

Box 4.19. Das K-Pg-Massensterben

Vor 66 Millionen Jahren, am Ende der Kreidezeit (K) und zu Beginn des Paläogens (Pg), starben drei Viertel des Lebens auf der Erde aus. Es überlebten keine großen Amphibien, großen Reptilien (einschließlich der Dinosaurier, aber ohne Krokodile) oder große Säugetiere. Auch im Meer lebende Organismengruppen wurden ausgelöscht. Die Ammoniten starben zusammen mit vielen Fisch-, Hai- und Planktongruppen aus.

Die damaligen Bedingungen müssen verheerend gewesen sein, denn innerhalb kürzester Zeit starben sehr viele Pflanzen und Tiere an Land und im Meer aus.

Als Erklärung für solch ein plötzliches dramatisches Ereignis wurden eine Reihe wissenschaftlicher Ideen vorgeschlagen, darunter enorme Vulkanausbrüche der Dekkan-Trapp-Basalte (im heutigen Indien), Anstieg des Meeresspiegels, Klimawandel oder eine Kombination davon.

Als in den 1980er Jahren entdeckt wurde, dass die K-Pg-Grenze in vielen Gesteinssequenzen durch eine Schicht schlammigen Sediments markiert ist, das reich an dem Element Iridium ist, wurde die Hypothese aufgestellt, dass ein Asteroid die Erde getroffen hat. Asteroiden sind reich an Iridium, die Erde jedoch nicht. Bald darauf wurde der Chicxulub-Krater im Golf von Mexiko in Mittelamerika entdeckt. Es wird angenommen, dass dieser 180 km breite und 20 km tiefe Krater die Einschlagstelle eines Asteroiden mit einem Durchmesser von mindestens 10 km ist. Zusätzliche Beweise für den Aufprall liefern „geschockte Quarze“ (Quarkristalle, die durch plötzlichen Druck deformiert werden) und Glasperlen (Tektite) von Gesteinen, die durch die Kollision geschmolzen und herausgeschleudert wurden. Wissenschaftler sind sich ziemlich sicher, dass der Krater durch eine Asteroidenkollision verursacht wurde. Ob diese Kollision jedoch das K-Pg-Massenaussterben verursachte, dazu beitrug oder nur geringe Auswirkungen auf das damalige Leben auf der Erde hatte, wird immer noch heftig diskutiert.

Das K-Pg-Massenaussterben ließ viele Lebensräume fast leer zurück, was Möglichkeiten für einen plötzlichen Evolutionsschub nach dem Aussterben bot. Vor allem Vögel, Fische und Säugetiere entwickelten sich zu vielen neuen Gruppen; Säugetiere entwickelten sich z.B. zu Pferden, Fledermäusen, Walen und Primaten.



Tyrannosaurus rex – eine der letzten Dinosauriergruppen, die vor dem Massenaussterben der K-Pg gefunden wurden



Geologen sammeln Sedimente an der K-Pg-Grenze, Wyoming, USA

Das Kreide-/Paläogen-Massensterben wird oft als K-Pg-Massensterben bezeichnet, da die Kreidezeit in der geologischen Spalte mit „K“ abgekürzt werden kann (der Buchstabe „C“ wurde weiter unten in der Spalte für „Karbon“ verwendet), und das Paläogen wird mit „Pg“ abgekürzt (da „P“ zuvor für die „Perm“-Periode verwendet wurde) (Abbildung 4.65). Verwirrenderweise wurde das K-Pg-Massenaussterben als K-T-Massenaussterben bezeichnet, bevor das T („Tertiär“) unterteilt wurde. Eine der Unterabteilungen wurde „Paläogen“ genannt und der Begriff „Tertiär“ wird offiziell nicht mehr verwendet.

Die Massensterben hatten nicht nur schlechte, sondern auch gute Auswirkungen, da jedes Massensterben neue Lebensräume für neue Evolutionsschübe freigab. Ohne das Aussterben im Allgemeinen und das Massensterben im Besonderen hätte die Evolution also möglicherweise nicht die enorme Vielfalt des Lebens auf der heutigen Erde hervorgebracht.

4.4.2 Auswirkungen auf andere Systeme

Es scheint, je mehr wir die Systeme der Erde studieren, desto mehr entdecken wir die lebenswichtigen Auswirkungen, die das Leben auf diese Systeme hat. Die Biosphäre hatte große Auswirkungen auf die Entwicklung des gesamten Planeten.

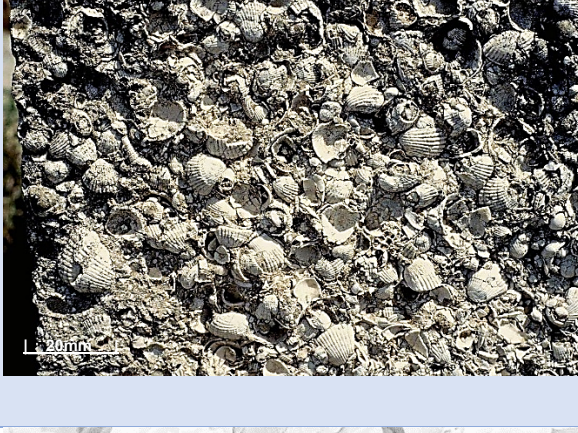
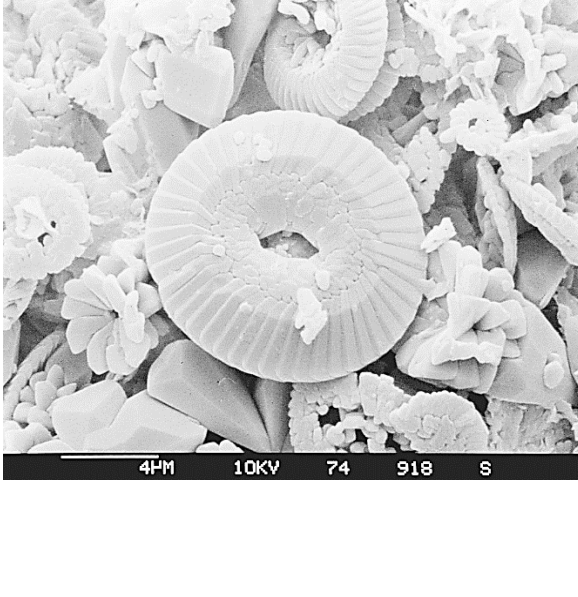
Beispielsweise umfasst die Verwitterung von Gesteinen eine Reihe von Prozessen. Gefrier-Tau-Wechsel sowie Erhitzen und Abkühlen haben physikalische Auswirkungen darauf, dass Gestein in kleinere Stücke zerbricht. Pflanzen haben auch viele physikalische Auswirkungen, von den Wurzeln von Flechten, die Gesteinskörner auseinanderdrücken, bis hin zur Bewegung der Wurzeln von Bäumen bei Stürmen, wodurch Felsbrocken von Felswänden weggedrückt werden können. In ähnlicher Weise werden die chemischen Auswirkungen von saurem Regen und Oxidation beim chemischen Abbau von Gesteinen dadurch verstärkt, dass das Leben im Boden dem Regen zusätzliches Kohlendioxid hinzufügt, wodurch das Bodenwasser noch saurer wird und Gestein angreifen kann. Durch die Verrottung organischer Stoffe entsteht außerdem Säure, die den Säuregehalt des Wassers erhöht und eine Reihe anderer biochemischer Abbaueffekte mit sich bringt. Boden entsteht nur dort, wo es Leben gibt, das Pflanzenmaterial und Bodentiere hinzufügt. Wo es also wenig Leben gibt, etwa in Polargebieten oder trockenen Wüsten, gibt es keinen Boden.

Auch beim Gesteinsaufbau und bei der Gesteinsverwitterung spielt Leben eine Schlüsselrolle, wie Tab. 4.26 zeigt. Etwa 10 % aller auf der Erdoberfläche gefundenen Gesteine sind Kalksteine, und die meisten davon sind das Ergebnis biologischer Prozesse. Leben ist daher für die Gesteinsbildung sehr wichtig.

Das Leben hat auch alle unsere Vorräte an fossilen Brennstoffen produziert. Kohle entsteht wie in Tab. 4.26 beschrieben und setzt bei ihrer Entstehung Erdgas bzw. Methan frei. Öl entsteht hauptsächlich durch den Abbau winziger planktonischer Pflanzen und Tiere, die im Schlamm des Meeresbodens abgelagert und später vergraben werden.

Tab. 4.26. Beitrag der Lebenwesen zur Gesteinsbildung

Prozess	Beschreibung	Bild	Beispiel
Kohle-bildung	Wenn reichlich pflanzliches Leben vorhanden ist und die Pflanzen absterben, verrotten sie nicht vollständig, wenn sie in eine Umgebung ohne Sauerstoff gelangen. Zuerst bilden sie Torf, der später durch Versenkung in Kohle verwandelt wird.		Blattfossilien in Kohle aus dem Karbon

Riffbildung im Kalkstein	Korallen und andere Tiere bauen heute Riffe und waren auch in der geologischen Vergangenheit wichtige Erbauer von Riffen. Sie tragen wesentlich zur Kalksteinbildung bei		Fossile Koralle aus dem Pleistozän im Windley Key Fossil Reef Geological State Park, Florida, USA
Aus fossilen Trümmern gebildete Kalksteine	Die meisten Kalksteine bestehen aus fossilen Trümmern. Die Fossilien sind manchmal leicht zu erkennen, wie in diesem Exemplar, können aber auch in winzige Fragmente zerbrochen sein, die mit bloßem Auge nicht zu erkennen sind		Verwitterter Baustein: Kalkstein aus zerbrochenen Muscheln und Schnecken aus dem Känozoikum am Zeustempel in Olympia, Griechenland
Kreide – sehr feinkörniger Kalkstein aus Coccolithen	Bevor Rasterelektronenmikroskope (REMs) verfügbar waren, hatten Geologen kaum eine Vorstellung davon, wie Kreide entstand. Jetzt haben REMs gezeigt, dass Kreide hauptsächlich aus Coccolithen, den winzigen Kalziumkarbonatplättchen planktonischer Algen, zusammen mit anderen Mikrofossilien besteht		Eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Coccolithen. Die kleinen Plättchen bilden den sehr feinen Karbonatschlamm, der schließlich zu Kreide werden kann

Durch grabende Organismen (Bioturbation) veränderte Sedimente	Wohnbauten grabender Organismen in vielen Sand- und Tonsteinen haben die ursprünglichen Sedimentstrukturen zerstört.		Wohnbauten krabbenähnlicher Tiere in Jura-Tonstein, Makhtesh Katan, Südisrael
---	---	--	--

Das Gleichgewicht zwischen der Speicherung von Kohlenstoff in Kalksteinen und seiner Freisetzung durch Verwitterung spielte in der geologischen Vergangenheit wahrscheinlich eine Schlüsselrolle, und zwar aufgrund der Menge an Kohlendioxid in der Atmosphäre und dem daraus resultierenden Treibhauseffekt. Die Subduktion von Kalksteinen an konvergenten Plattenrändern könnte auch im Klima der geologischen Vergangenheit eine wichtige Rolle gespielt haben, und zwar durch die Zersetzung von Kalkstein zu Kohlendioxid, das später als vulkanisches Gas wieder freigesetzt wurde.

Box 4.20. Die Gaia-Hypothese von James Lovelock

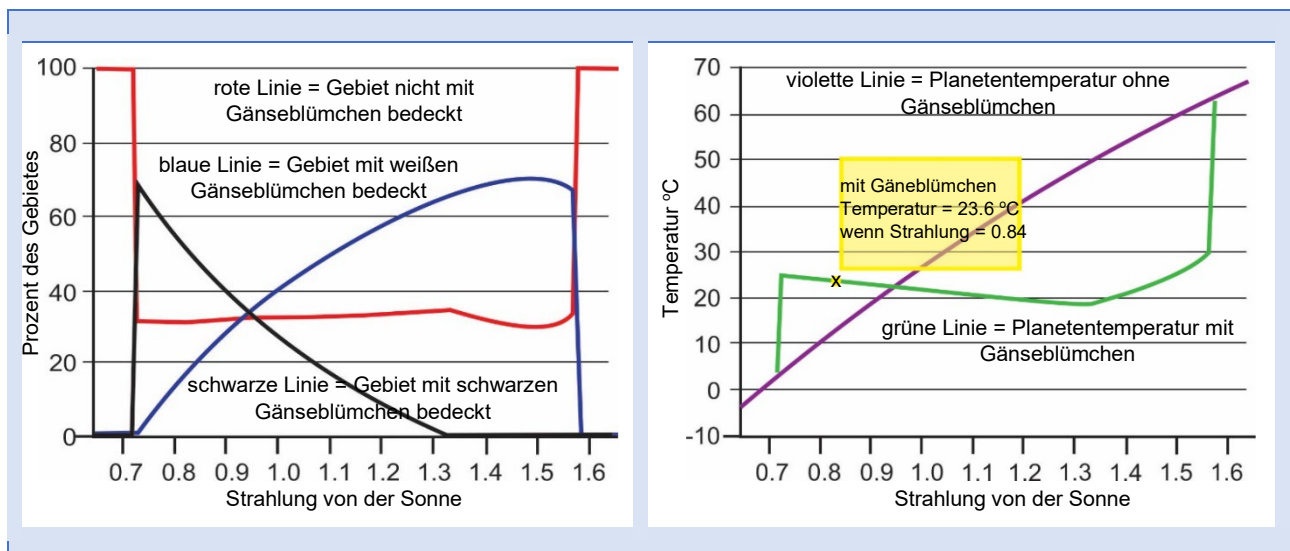
James Lovelock (1919-2022) hat nicht nur vorgeschlagen, dass Leben eine wichtige Rolle in Erdsystemen spielt, sondern auch, dass es Erdsysteme kontrolliert. Er hat seine Idee die Gaia-Hypothese genannt (nach der griechischen Mutter-Erde-Göttin Gaia) und argumentiert, dass der Körper genauso viele verschiedene Systeme zur Regulierung hat wie die Erde. Wenn Ihnen beispielsweise zu heiß wird, schwitzen Sie, um sich abzukühlen, wird Ihnen jedoch zu kalt, wärmt Sie das Frösteln. Als sich die Wissenschaftler nicht einig waren, ob die Erde über Systeme zur Regulierung ihrer Temperatur und anderer Aspekte ihrer Systeme verfügen könnte, entwickelte Lovelock ein Computerprogramm, das er „Daisyworld“ nannte, um zu zeigen, wie dies funktionieren könnte.

In der in den Diagrammen gezeigten Simulation zeigt die violette Linie im rechten Diagramm, wie die Temperatur seines simulierten Planeten, wenn er kein Leben hätte, mit zunehmender Sonneneinstrahlung ansteigen würde. Lovelocks simulierter Planet ähnelt der Erde, wo die von unserer Sonne empfangene Strahlung im Laufe der geologischen Zeit stetig zugenommen hat.

Wenn in den frühen Tagen des simulierten Planeten ein großes Gebiet mit schwarzen Gänseblümchen bedeckt wäre (schwarze Linie im linken Diagramm), hätte die schwarze Farbe mehr Strahlung absorbiert und die Temperatur des Planeten auf über 20 °C erhöht – die grüne Linie im rechten Diagramm. Dann, als die Sonneneinstrahlung zunahm, wurde es für die schwarzen Gänseblümchen zu heiß und sie begannen abzusterben und wurden nach und nach durch weiße Gänseblümchen ersetzt (blaue Linie im linken Diagramm). Je mehr Strahlung von der Sonne empfangen wurde, desto mehr wurde von den weißen Gänseblümchen reflektiert, wodurch die Temperatur bei etwa 20 °C blieb. Am Ende kamen die Gänseblümchen nicht mehr zurecht und starben aus. Dann stieg die Temperatur des Planeten dramatisch an und erreichte den Wert, den es gehabt hätte, wenn es überhaupt keine Gänseblümchen gegeben hätte. Die Wirkung der Gänseblümchen bestand also darin, den simulierten Planeten auf einer ziemlich konstanten Temperatur zu halten, da sich die Sonnenleuchtkraft (Strahlung der Sonne) mehr als verdoppelte.

Durch diese Simulation demonstrierte Lovelock, wie sich entwickelndes Leben die Temperatur eines Planeten regulieren kann. Er argumentierte, dass das Leben auf unterschiedliche Weise die Systeme eines ganzen Planeten wie der Erde regulieren und so seine Lebenskapazität aufrechterhalten könnte, von der Zeit, als sich reichlich Leben entwickelte, bis heute.

Einige von Lovelocks Überlegungen untermauern nun die Art und Weise, wie Wissenschaftler Erdsysteme untersuchen, obwohl viele nicht der Meinung sind, dass Leben das gesamte Erdsystem in der von Lovelock beschriebenen Weise reguliert.



5 Das Erdsystem produziert Ressourcen

Natürliche Ressourcen sind alle vom Menschen nutzbaren Stoffe der Geosphäre, Hydrosphäre, Atmosphäre und Biosphäre. Sie umfassen das in Tab. 5.1 dargestellte breite Spektrum.

Tab. 5.1. Natürliche Ressourcen der Erde

Ursprung	Einige der natürlichen Ressourcen werden zur Nutzung entnommen	Bild	Beispiel
Geosphere	• Boden • Massengesteine für Bau und Industrie • Alte Evaporitminerale • Metallerze • Fossile Brennstoffe • Geothermische Energie • Uran		Die Butchart Gardens, Victoria, British Columbia, Kanada, liegen in einem aufbereiteten, ehemaligen Kalksteinbruch
Hydrosphäre	• Trinkwasser • Wasser für Landwirtschaft und Industrie • Evaporitminerale • Wasserkraft, Wellen- und Gezeitenenergie		Salzverdunstungsteiche, La Palma, Kanarische Inseln

Atmosphäre	• Gas der Atmosphäre • Luft für die Industrie • Windenergie		Membransauerstoffanlage zur Gewinnung von Sauerstoff aus der Luft
Biosphäre	• Fische und andere marine Lebewesen • Bäume • Landwirtschaftliche Produkte, Meeresfarmen		Algenanbau in Indonesien

5.1 Rohstoffe und fossile Brennstoffe

Alle Rohstoffe und fossilen Brennstoffe, die aus dem Boden gewonnen werden, wurden zunächst auf natürliche Weise konzentriert. Diese natürliche Konzentration geschieht auf zwei Arten: Entweder haben natürliche Prozesse das Material selbst konzentriert, oder natürliche Prozesse haben die anderen nichtwirtschaftlichen Materialien entfernt und die nützlichen Materialien zurückgelassen.

Materialien werden nur dann zur Nutzung entnommen, wenn sie wirtschaftlich sinnvoll sind. Das bedeutet, dass ein Material nur dann gefördert wird, wenn das Gleichgewicht zwischen dem lokalen oder globalen Bedarf an dem Material (der Nachfrage) und seiner lokalen oder globalen Verfügbarkeit (dem Angebot) den Preis hoch genug macht. Wenn der Preis hoch genug ist, um die Kosten für Prospektion, Gewinnung und Sanierung, Verarbeitung und Transport zu decken, lohnt es sich, das Material abzubauen.

Jede Entwicklung zur Befriedigung menschlicher Bedürfnisse sollte nachhaltig sein. **Nachhaltige Entwicklung** wird beschrieben als „Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne die Fähigkeit künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen.“ Dies bedeutet, dass die Bedürfnisse der Wirtschaft und der Bevölkerung befriedigt werden sollten, ohne die Umwelt so stark zu schädigen, dass künftige Bedürfnisse nicht mehr gedeckt werden können. Bei der Gewinnung natürlicher Materialien sollten alle Aspekte des Betriebs nachhaltig sein.

Bei der **Sanierung** geht es darum, das Material mit möglichst geringem Schaden für die umliegende Gemeinde und Umwelt zu extrahieren und das Gebiet anschließend wieder in nahezu seine ursprüngliche Qualität zu versetzen, wobei eine Überwachung erfolgt, damit spätere Probleme nicht auftreten. Einige Länder verfügen über ein hohes Maß an Umweltkontrolle, um eine ordnungsgemäße Sanierung sicherzustellen, während andere Länder nur über ein geringeres Maß an Kontrolle verfügen.

5.1.1 Massenrohstoffe für den Bau

Für Großbauten werden große Mengen an Material benötigt, deren Transport sehr kostspielig sein kann. Aus diesem Grund liegen viele Riesensteinbrüche an der Küste und andere große Steinbrüche verfügen über eigene Bahnlinien. Die meisten Städte verfügen über nahegelegene Steinbrüche, die ihren Baubedarf decken und gut über Straßen angebunden sind. Das zerkleinerte Gestein sowie Sand und Kies aus einigen Steinbrüchen wird als **Bauzuschlagstoff** verwendet.

Tab.5.2. Beispiele für im Bauwesen verwendete Massenrohstoffe

Massenrohstoff	Details	Bild	Beispiel
Magmatische Gesteine	Magmatisches Gestein wie Granit, Gabbro oder Dolerit ist sehr zäh und wird als Zuschlagstoff für Beton, im Straßenbau, für Steinplatten und als Schotter für Eisenbahndämme verwendet		Larvikit-Steinbruch (Syenit) bei Larvik, Norwegen, Blöcke für Steinplatten werden aus dem Gestein herausgesägt.
Kalkstein	Kalkstein wird als Zuschlagstoff und zur Zementherstellung verwendet		Kalksteinbruch in Lengerich, Nordrhein-Westfalen, Oberkreide
Sand und Kies	Sand und Kies werden als Zuschlagstoffe für Beton gewonnen		Sand- und Kiesgrube in der Nähe von Lissabon, Portugal

5.1.2 Massenrohstoffe für die Industrie

Die Industrie benötigt Massenrohstoffe für eine Reihe von Verwendungszwecken, darunter: Herstellung von Baumaterialien, Belieferung der Keramikindustrie und als Rohstoff für die chemische und landwirtschaftliche Düngemittelindustrie (Tabelle 5.3). Da die Transportkosten für Schüttgüter hoch sind, werden die Aufbereitungsanlagen entweder möglichst nah an den Steinbrüchen angesiedelt oder es ist eine gute Verkehrsanbindung erforderlich. Sie werden Massenrohstoffe genannt, weil ihre Kosten im Verhältnis zu ihrer großen Masse und ihrem großen Volumen niedrig sind und sie daher, um rentabel zu sein, in großen Mengen abgebaut werden müssen.

Tab. 5.3. Beispiele für Massenrohstoffe, die in der Baustoff-, Keramik- und Chemieindustrie verwendet werden

Massenrohstoff	Details	Bild	Beispiel
Kalkstein	Zement für Beton; Zementblöcke und Mörtel werden hergestellt, indem Kalkstein und Ton gemeinsam in einem Ofen erhitzt und das Ergebnis mit Gips zermahlen werden		Zementwerke, Holcim, Eclépens, Schweiz
	Kalkstein wird erhitzt, um Branntkalk zu bilden, der in der Landwirtschaft und in der chemischen Industrie zur Herstellung von Stahl, Beschichtungen für Papier, Bleichmitteln, bei der Zuckerraffinierung und zur Wasseraufbereitung verwendet wird		Ein moderner Drehkalkofen, Wyoming, USA
Salz	Natriumchlorid wird nicht nur durch Verdunstung in Salzteichen gewonnen, sondern auch unter Tage aus alten Halitvorkommen abgebaut; Es wird zum Einsalzen von Lebensmitteln, zum Enteisen von Straßen und in der chemischen Industrie zur Kunststoff- und Papierherstellung verwendet		Kubische Kristalle des Minerals Halit, Salzbergwerk Merkers, Deutschland
Kalisatz	Kali ist Kaliumchlorid und wird durch Bergbau und Solepumpen gewonnen. Es ist die Hauptquelle für Kalium in landwirtschaftlichen Düngemitteln und wird zur Herstellung zahlreicher Industriechemikalien verwendet		In lösliches Kalierz gepumptes Wasser wird als Sole in Verdunstungs- teiche gepumpt, um das Kali zu gewinnen, Utah, USA

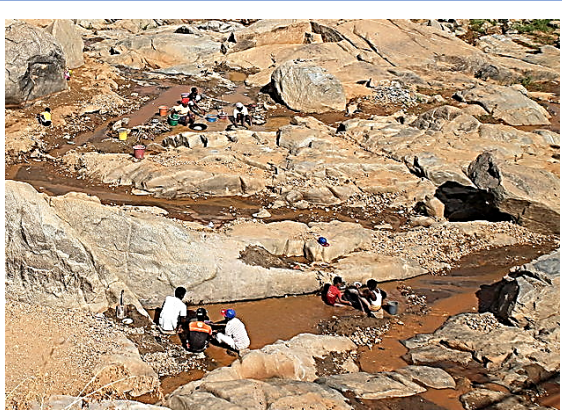
Gips	Gips, das Kalziumsulfatmineral, wird abgebaut und erhitzt, um Gips herzustellen, der für die Herstellung von Gips- und Gipskartonwandverkleidungen verwendet wird, die in den meisten modernen Gebäuden verwendet werden		Gipssteinbruch in Trias-Gesteinen in der Nähe von Nottingham, England
Ziegelton	Ziegelton wird zu Ziegeln geformt und dann in Öfen gebrannt, um Haushaltsziegel für den Bau herzustellen		Abbau von Ziegelton, Baduria, Westbengalen, Indien
Kaolin-grube	Kaolin (Porzellanerde) wird zur Herstellung von feinem Porzellan sowie in der Papierherstellung und Kosmetik verwendet		Kaolinabbau in der Nähe von Kaznějov in der Tschechischen Republik
Quarzsand	Quarzsand wird mit Soda (Natriumcarbonat), Kalk (Kalziumoxid) und anderen Chemikalien gemischt und geschmolzen; auf eine dünne Schicht geschmolzenes Metall aufgebracht bekommt es seine flache Form, das in heutigen Fenstern verwendet wird.		Luftaufnahme der riesigen Quarzsandgrube bei Frechen im Westen Deutschlands, Nordrhein-Westfalen

5.1.3 Metallerze

Metallerze sind natürliche Metallkonzentrationen, die wirtschaftlich wertvoll sind. Sie benötigen noch mehr Konzentration als Massenrohstoffe, um den Abbau wirtschaftlich zu machen. Eine Reihe sedimentärer,

magmatischer und metamorpher Prozesse konzentrieren Erze auf natürliche Weise. Einige Beispiele sind in Tab. 5.4 aufgeführt.

Tab. 5.4. Beispiele für die Metallerzgewinnung

Metallerz	Natürliche Konzentration	Bild	Beispiel
Eisen, Hämatit, Fe_2O_3	Die riesigen gebänderten Eisenerzabfolgen in Australien und anderen Kontinentalgebieten entstanden im Präkambrium durch Sedimentationsprozesse, die Wissenschaftler immer noch zu erklären versuchen		Tom-Price-Eisenerz Abbau, Westaustralien – alles im Blickfeld ist durch Hämatitstaub rot gefärbt
Kupfer, Chalkopyrit (Kupferkies), CuFeS_2	Chalkopyrit und andere Kupferminerale wurden durch heiße hydrothermale wässrige Flüssigkeiten konzentriert, die durch metamorphe und hydrothermale Prozesse tief unter der Oberfläche entstanden		Kupfermine Bingham Canyon, Utah, USA – die größte Mine der Welt, mit einer Tiefe von mehr als einem Kilometer und einer Breite von vier Kilometern
Blei, Bleiglanz, PbS	Bleierz kommt häufig zusammen mit Zink-, Kupfer- und Silbererzen vor. Die Erze werden häufig durch hydrothermale Flüssigkeiten konzentriert, die entstehen, wenn Magmen in das umliegende Gestein eindringen		Mt. Isa-Mine, Queensland, Australien; der hohe Schornstein ist für die Bleischmelze bestimmt. Der Schornstein der Kupferschmelze ist rot-weiß
Gold, gediegen Gold, Au	Gold kann in gediegener Form und ungebunden mit anderen Elementen gefunden werden. Da es sich um ein dichtes Mineral handelt, kann es, nachdem es durch Erosion aus dem Gestein freigesetzt wurde, als Seifengold in Flussbetten abgelagert werden		Kommerzielles Goldwaschen durch das Volk der Sakalava in Madagaskar

5.1.4 Industriemineralie

Hierbei handelt es sich um Minerale, die aufgrund ihres Werts abgebaut werden und bei denen es sich nicht um Brennstoffe, Metallerze oder Massenrohstoffe handelt. Sie umfassen ein sehr breites Spektrum an Materialien. Zwei Beispiele sind in Tab. 5.5 aufgeführt.

Tab. 5.5. Beispiele für die Gewinnung von Industriemineralen

Industrie-mineral	Detail	Bild	Beispiel
Seltene-Erden-Mineralie	Diese Ablagerungen enthalten Seltene-Erden-Elemente, die in modernen Geräten wie Computerspeichern, Mobiltelefonen, DVDs, Magneten, Leuchtstofflampen und wiederaufladbaren Batterien verwendet werden		Satellitenaufnahme einer Seltene-Erden-Mine in Bayan Obo, China
Diamanten	Diamanten aus der Tiefe des Erdmantels werden durch Vulkanausbrüche an die Oberfläche gebracht. Die Vulkane bohren sich mit ihren Schloten bis zur Oberfläche durch. Diamanten werden als Edelsteine und zum industriellen Schneiden und Schleifen verwendet		Die Mir-Mine, Mirny, Russland

5.1.5 Fossile Brennstoffe

Fossile Brennstoffe sind im Boden konservierte Überreste von Pflanzen sowie mikroskopisch kleinen Pflanzen und Tieren. Pflanzen absorbieren durch Photosynthese Energie von der Sonne, Tiere nutzen dieses Material zum Aufbau eigener Substanzen. Wenn die Organismen absterben, lagern sich ihre Überreste ab, oft in Wasser mit wenig oder gar keinem Sauerstoff. Da für den vollständigen Abbau von organischem Material Sauerstoff erforderlich ist, zersetzen sich die Überreste nur teilweise und es bilden sich Sedimentablagerungen, die reich an organischem Material sind. Beim Versenken und Komprimieren wurde ein Großteil des Wassers und der Zersetzungsgase herausgepresst, wodurch der organische Inhalt noch mehr angereichert wurde. Alle organischen Materialien enthalten das Element Kohlenstoff. Durch die Verbrennung des Kohlenstoffs in fossilen Brennstoffen wird Energie freigesetzt.

5.1.5.1 Torf und Kohle

Durch die Ansammlung von teilweise zersetztem Pflanzenmaterial in sauerstoffarmen Gewässern wie Moore, Sümpfe oder Marschland, bildet sich Torf. Der Torf baut sich über Jahrtausende auf, oft bis zu einer Mächtigkeit von mehr als 2 m. Moore sind nicht nur reich an Kohlenstoff, sondern binden auch das bei der Zersetzung freigesetzte Kohlendioxid und sind somit einer der wichtigen Speicher für Kohlenstoff, der aus der Atmosphäre entfernt wird. Wenn Torf versenkt und komprimiert wird, erhöht sich die Kohlenstoffkonzentration deutlich.

Torf wird zum Verbrennen und zur Herstellung von organischem Kompost für Gärten gewonnen. Da Wissenschaftler jedoch mittlerweile besser verstanden haben, welche Rolle Moore bei der Entfernung von Kohlenstoff aus der Atmosphäre spielen, ist der Torfabbau weltweit zurückgegangen.



Abb. 5.1. Kommerzieller Torfabbau, Ljungby, Schweden

Durch Versenkung wird Torf infolge der Kompression durch die darüber liegenden Sedimente in Kohle umgewandelt. Der Großteil der Kohle wird allerdings unter Regenwaldbedingungen in tropischen Sumpfbereichen gebildet. Pflanzen und Bäume wachsen in den warmen, feuchten Bedingungen schnell und verrotten nur teilweise, wenn sie sterben und in die sauerstoffarmen Sümpfe fallen. Wenn die Fläche absinkt, können sich viele Meter organisches Material ansammeln, wobei manchmal Blätter, Wurzeln oder ganze Baumstämme erhalten bleiben. Wenn die organische Schicht durch darüber liegende Sedimente immer tiefer versenkt wird, steigt die Temperatur auf natürliche Weise an, während Wasser und Zersetzungsgase herausgepresst werden, wodurch Kohleflöze entstehen. Je stärker Druck und Temperatur ansteigen, desto mehr Gas wird freigesetzt und desto hochwertiger wird die Kohle. Aus Torf wird zunächst Braunkohle, die bei weiterer Versenkung und Temperaturerhöhung in Steinkohle und schließlich Anthrazit umgewandelt wird. Die hochwertigste Kohle, Anthrazit, enthält den größten Kohlenstoffanteil.

Oberflächenvorkommen von Kohle wurden schon vor langer Zeit zunächst an der Oberfläche abgebaut. Anschließend folgte man ihnen unter die Erde mit horizontalen oder geneigten Tunneln, sogenannten Stollen, oder durch vertikale Schächte. Der Untertageabbau von Kohle wird als Tiefbau bezeichnet, und einige Kohlebergwerke reichen bis in eine Tiefe von mehr als 1 km. In vielen Teilen der Welt wird weiterhin Kohle unter Tage abgebaut, eine kostengünstigere Alternative ist jedoch der Abbau von Kohle im Tagebau.

In modernen Tagebauen wird der Mutterboden abgetragen und gelagert. Dann werden die über den Kohleflözen liegenden Sedimentgesteine entfernt und an anderer Stelle gelagert. Sobald das Kohleflöz erreicht ist, wird die Kohle sorgfältig gereinigt und dann mit großen Maschinen abgebaut und aus der Grube transportiert. Manchmal werden bei Tagebauarbeiten alte tiefliegende Kohlebergbaustollen freigelegt, wie in Abb. 5.2. Mit dem Abbau tieferer Flöze werden immer tiefere Tagebausohlen ausgehoben, teilweise bis zu einer Tiefe von 60 m. Dann wird der nächste Tagebau ausgehoben, dessen Abfallgestein die vorherige Grube verfüllt. Die Tagebauarbeiter arbeiten sich Grube für Grube über das Gelände, bis die gesamte Kohle entnommen und die letzte Grube gefüllt ist. Anschließend wird der Mutterboden ersetzt und die Fläche möglichst originalgetreu gestaltet.



Abb. 5.2. Ein Tagebau-Kohlebergwerk in einem dicken, abfallenden Kohleflöz, das einen alten tiefen Bergbaustollen freilegt. Foord-Naht in der Stellarton-Formation aus dem Karbon, Stellarton, Nova Scotia, Kanada

5.1.5.2 Erdöl und natürliches Gas

Ein Großteil des aus der Erde gewonnenen Erdgases wurde durch die natürliche Entgasung von Kohle bei der Versenkung und Erhitzung erzeugt. Rohöl und Erdgas bilden sich in Tonsteinen und Schiefergesteinen mit hohem organischem Gehalt, die ebenfalls durch Versenkung komprimiert und erhitzt werden. Das organische Material, aus dem das Erdöl gebildet wird, waren ursprünglich mikroskopisch kleine Pflanzen und Tiere des Meeresplanktons. Sie sinken nach ihrem Tod auf dem Meeresboden ab und werden im Schlamm begraben, der schließlich zu Tonstein und Schiefer verwandelt wird. Kohle und organisch reicher Tonstein und Schiefer sind somit die ursprünglichen Ausgangsgesteine von Erdöl und Erdgas. Alle organischen Materialien in Quellgesteinen erhielten ihre Energie ursprünglich durch Photosynthese von der Sonne und enthalten daher „fossile Sonnenenergie“.

Damit sich unter der Erde Öl- und Gasvorkommen bilden können, müssen die fünf in Tab. 5.6 aufgeführten Grundvoraussetzungen in der Reihenfolge von unten nach oben in der Tabelle erfüllt sein.

Tab. 5.6. Die fünf Grundvoraussetzungen zur Bildung eines Erdöl- und/oder Erdgasfeldes

Öl/Gas-Feld Voraus- setzung	Detail	Bild	Beispiel
Erdöl-/Erd- gasfalle	Die Struktur des Deckge- birges über dem Reservoir- gestein sollte einen blasen- förmigen Öl- oder Gaskörper darunter einschließen. Eine übliche Fallenform ist eine Antiklinale, es gibt jedoch noch mehrere andere Fallentypen		Antiklinale am Pang La Pass in Tibet

Undurchlässiges Deckgestein (Cap Rock)	Deckgesteine sind feinkörnige Gesteine, die undurchlässig sind (Flüssigkeiten können nicht durch sie hindurchfließen) und darunter Öl und/oder Gas in Blasenform einschließen		Tonstein in der Deakin-Antiklinale der silurischen Yarralumla-Formation, Canberra, Australien
Speichergestein	Ein Speichergestein ist ein Gestein mit genügend miteinander verbundenen Porenräumen, um eine Flüssigkeit wie Wasser, Öl oder Gas aufzunehmen; Es handelt sich um ein durchlässiges Gestein, das sowohl porös (mit Porenräumen) als auch durchlässig (damit die Flüssigkeit hindurchfließen kann) sein muss. Sandsteine sind die häufigsten Erdöllagerstättengesteine		Von Natur aus ölhaltiger Sandstein aus dem Hutton-Ölfeld in der Nordsee
Temperatur- und Druckanstieg durch Versenkung	Wenn Gesteine versenkt werden, steigt ihre Temperatur auf natürliche Weise an. In etwa 2 km Tiefe erreicht die Temperatur 60 °C und organische Bestandteile im Gestein beginnen, Öl freizusetzen. In einer Tiefe von 4 km beträgt die Temperatur bereits 120 °C und ein Großteil des Öls wurde freigesetzt. Bei dieser Temperatur beginnt auch die Freisetzung von Erdgas. In 9 km Tiefe, bei einer Temperatur von über 200 °C, wird der restliche Kohlenstoff zu Graphit und kann nicht mehr freigesetzt werden		
Muttergestein	Das Muttergestein ist das an organischen Bestandteilen reiche Gestein, aus dem das Öl und Gas ursprünglich stammten. Bei Erdgas kann es sich beim Ausgangsgestein auch um Kohle handeln. Das meiste Öl und ein Teil des Erdgases stammen aus schwarzem organischem Ölschiefer oder dem organischen Anteil großer Mengen hellerer Tonsteine		Ölschiefer aus der eozänen Lagerstätte in der Grube Messel bei Frankfurt, Hessen

Alle porösen Gesteine enthalten in ihren Porenräumen Flüssigkeiten, meist Wasser. Mit steigendem Versenkungsdruck und steigenden Temperaturen geben Muttergesteine ihr Öl und Gas frei. Öl und Gas steigen auf, weil sie eine geringere Dichte haben als das Wasser in den Porenräumen. Sie steigen weiter durch durchlässiges Gestein oder entlang von Brüchen auf, bis sie entweder die Erdoberfläche erreichen und verloren gehen oder eine undurchlässige Deckgesteinsschicht erreichen. Ein unterirdisches Öl-/Gasreservoir entsteht, wenn das Deckgestein die richtige Form hat, um Öl/Gas darunter einzuschließen, groß genug ist und sich darunter ein Gestein mit genügend Porenraum befindet, um eine gute Menge Öl/Gas aufzunehmen (z. B. ein poröser Sandstein wie in Abb. 5.3). Das Gas in den Porenräumen schwimmt auf dem Öl, das wiederum auf dem Wasser schwimmt, wie in Abb. 5.4 dargestellt.

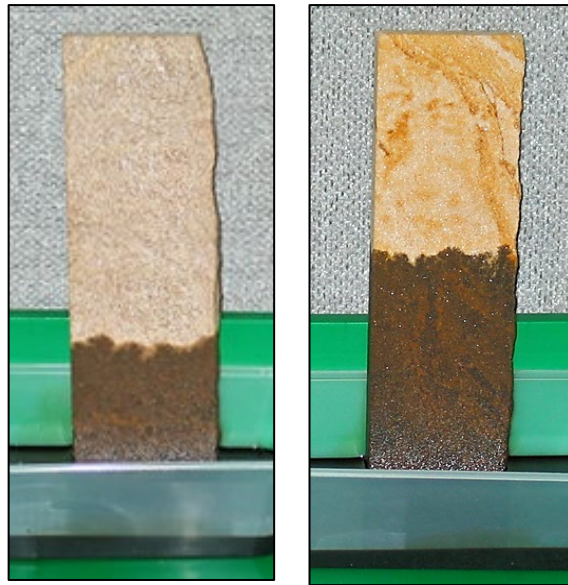


Abb. 5.3. Zwei in Motoröl stehende Sandsteinplatten – es zeigt sich, wie verschiedene Sandsteine in ihren Porenräumen unterschiedlich viel Öl aufnehmen können

Wenn ein Bohrloch in eine Falle gebohrt wird, die Öl und/oder Gas enthält, steigt das Öl/Gas aufgrund der geringeren Dichte als Wasser und aufgrund des Drucks des darüber liegenden Gesteins im Loch auf. Es kann gefährlich an die Oberfläche spritzen, es sei denn, es wird sorgfältig durch eine Reihe von Ventilen kontrolliert, die an der Oberseite aller Öl-/Gasexplorationsbohrlöcher angeschlossen sind

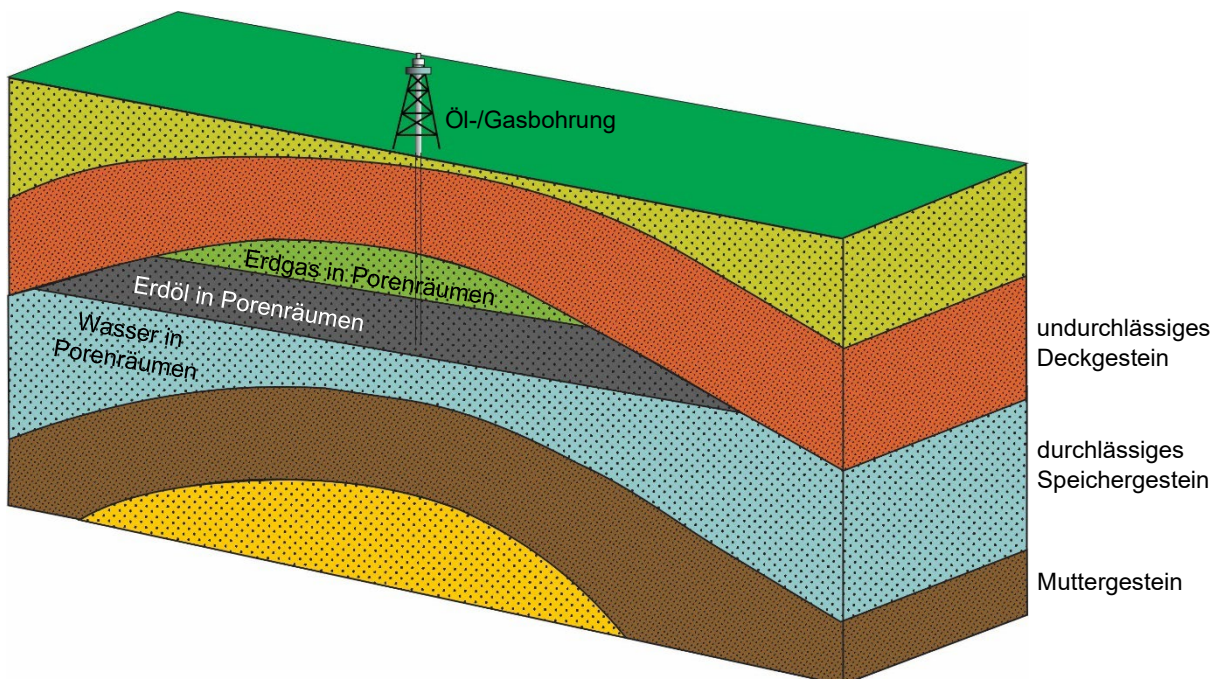
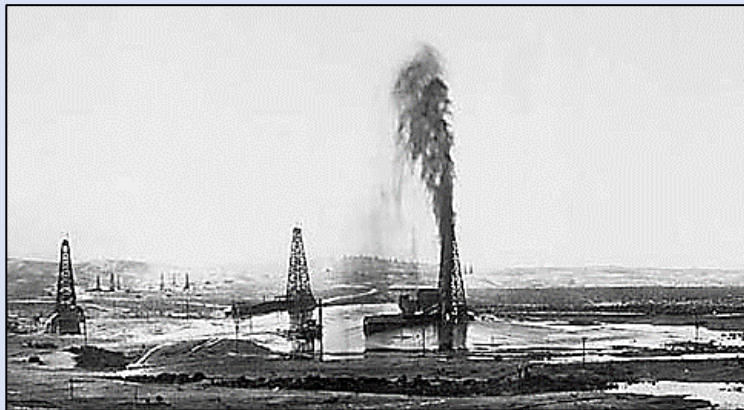


Abb. 5.4. Eine aus aufrecht gefaltetem Gestein gebildete Falle (Antiklinale) – diese kann Erdöl, Erdgas oder beides zusammen enthalten

Box 5.1. Ölbohrlochventile

Öl- und Gasbohrlöcher haben einen „Weihnachtsbaum“ aus Ventilen an der Oberfläche, um zu verhindern, dass das unter natürlichem Druck stehende Öl/Gas gefährlich aus dem Bohrloch spritzt (das Bild rechts stammt von einem Bohrloch in North Dakota, USA). In früheren Zeiten, vor der Verwendung dieser Ventile, spritzte manchmal Öl durch gefährliche „Eruptionen“ (gushers) an die Oberfläche, wie im Bild unten aus den USA um 1911.



Sprudelnde Erdölquelle – Lakeview-Erdöleruption in den USA, um 1911



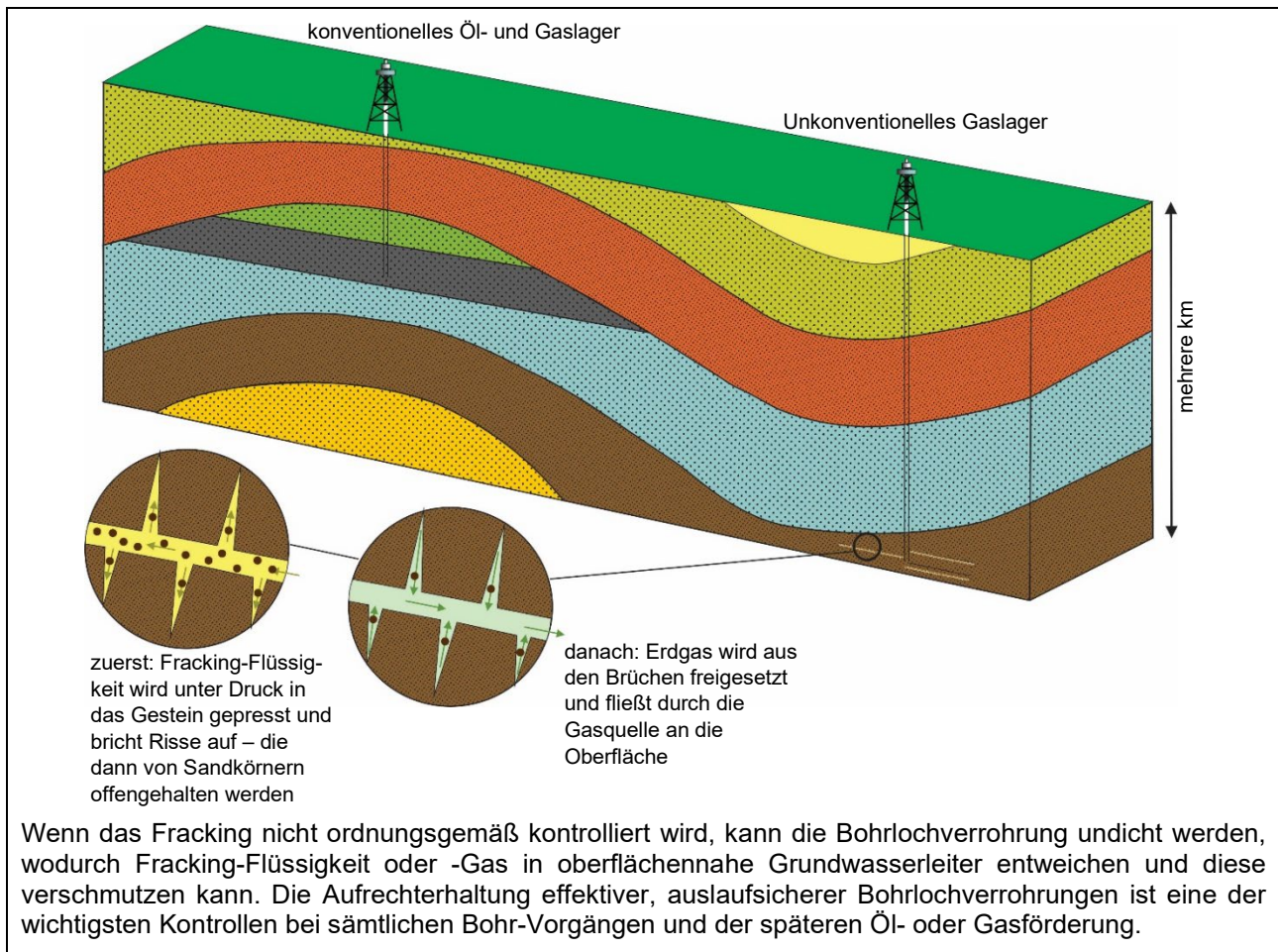
'Weihnachtsbaum' aus Ventilen

Das Speichergestein vieler moderner Öl- und Gasfelder wird hydraulisch aufgebrochen (Fracking), um die Öl-/Gasmengen zu erhöhen, die vom Gestein freigesetzt werden können. Beim Fracking wird Flüssigkeit unter großem Druck in das Gestein gepumpt wodurch die Porenräume aufgebrochen und erweitert werden. Die Flüssigkeit enthält Sand, der in den neuen Brüchen stecken bleibt und sie offenhält. Die größeren Poren und Risse geben Öl und Gas dann leichter frei.

Box 5.2. Fracking von Schiefer und „dichtem“ Sandstein

Durch Fracking kann Erdgas aus Schiefergesteinen freigesetzt werden, die nur wenige Porenräume aufweisen oder so tief versenkt sind, dass die Porenräume nur sehr klein sind. Da aus diesen Gesteinen ohne Fracking keine wirtschaftlichen Mengen an Öl/Gas freigesetzt werden können, werden sie im Gegensatz zu den im Diagramm dargestellten konventionellen Lagerstätten oft als „nichtkonventionelle Lagerstätten“ bezeichnet. Konventionelle Lagerstätten werden seit vielen Jahren gefrackt.

Fracking-Bohrlöcher werden vertikal von der Oberfläche und dann horizontal entlang der zu frackenden Schichten gebohrt. Von jedem vertikalen Bohrloch aus wird eine Reihe horizontaler Bohrlöcher gebohrt. Anschließend wird Fracking-Flüssigkeit mit extrem hohem Druck eingepumpt, um der Masse des darüber liegenden Gesteins entgegenzuwirken. Die Fracking-Flüssigkeit ist eine Mischung aus Reinigungsmittel (wie Spülmittel), Essigsäure, Gummi (wie in manchen Süßigkeiten enthalten), Wasser und Sand. Das Reinigungsmittel hilft der Flüssigkeit, das Loch hinunterzurutschen, die Säure hilft beim chemischen Abbau des Gesteins und der Gummi verdickt die Flüssigkeit. Die Sandpartikel öffnen die neuen Brüche. Der Effekt besteht darin, zuvor nahezu undurchlässige Gesteine durchlässig genug zu machen, um ihr Gas freizusetzen.



5.1.6 Prospektion

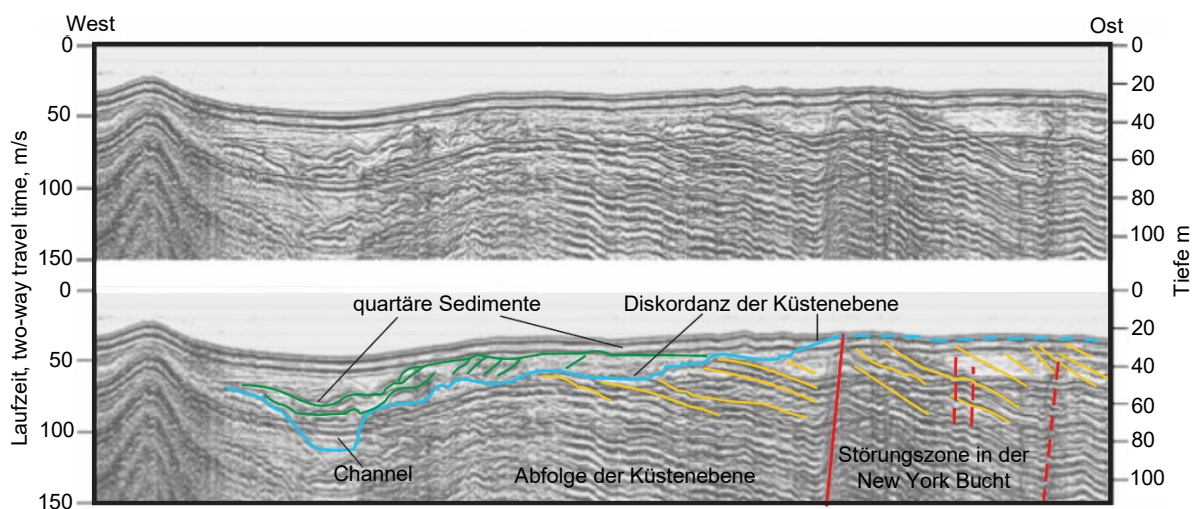
Früher suchten Prospektoren (Erzsucher) nach natürlichen Mineralvorkommen oder Ölquellen an der Erdoberfläche, aber diese Oberflächenaufschlüsse und Indikatoren wurden mittlerweile fast alle gefunden, sodass heutzutage aufwändigere technische Methoden erforderlich sind.

Heutige Prospektoren wissen aus oberflächengeologischen Kartierungen an Land, wo Muttergesteine, Speichergesteine und Deckgesteine wahrscheinlich in der richtigen Reihenfolge zu finden sind. Sie suchen daher hauptsächlich nach unterirdischen Fallenstrukturen. Sie können z.B. damit beginnen, fernerkundliche Methoden einzusetzen und Gravitationsmessungen und Magnetuntersuchungen durchzuführen. Damit können sie Hinweise darauf bekommen, wo dichteres oder magnetisches Gestein in die Nähe der Oberfläche gelangt ist und wo im Untergrund Antiklinalen oder ähnliche Strukturen vorkommen. Anschließend gibt es die Möglichkeit seismische Untersuchungen durchführen, um die Struktur der Gesteine unter der Erde genauer darzustellen. Wenn eine mögliche Zielstruktur gefunden wurde, wird ein Erkundungsbohrloch auf der Suche nach Öl/Gas gebohrt. Das Bohren eines Bohrlochs ist sehr kostspielig, insbesondere im Offshore-Bereich. Daher muss der suchende Geologe beim Sammeln von Informationen und beim Vorhersagen möglicher Ziele große Sorgfalt walten lassen.

Box 5.3. Seismische Prospektion

Bei einer seismischen Erkundung werden Stoßwellen in den Untergrund ausgesendet, die von verschiedenen Schichten der Gesteinsfolge zurückreflektiert und aufgezeichnet werden. Das Erkundungsteam erzeugt Stoßwellen an Land durch eine Explosion oder mithilfe eines „Vibrationswagens“ oder auf See durch einen großen Luftpulser, bei dem komprimierte Luft explosionsartig gelöst wird. Die Stoßwellen dringen in die Gesteinsabfolge ein und werden von den verschiedenen Schichten reflektiert. Die reflektierten Stoßwellen werden von einer Reihe von Mikrofonen erfasst, die an Land Geophone und im Meer Hydrophone genannt werden.

Die Ergebnisse werden per Computer analysiert, um daraus ein seismisches Profil zu erstellen, wie unten gezeigt. Die vertikale Skala auf der linken Seite zeigt die Laufzeit in beide Richtungen an, also die Zeit, die die Stoßwelle benötigt, um die reflektierende Lage zu erreichen und zum Empfänger zurückzulaufen. Daraus lässt sich die Tiefe des Reflektors errechnen, wie rechts dargestellt. Das untere Diagramm zeigt eine Interpretation der seismischen Spur des oberen Diagramms, um ein Bild der Geologie zu erstellen, ähnlich einem geologischen Querschnitt.



Seismisches Profil durch die New York Bucht, vor New York City, USA

Wenn ein seismisches Profil wie dieses während der Öl-/Gas-Prospektion aufgenommen worden wäre, hätte man hier vielversprechende Ziele für Öl/Gas in der am westlichen Ende des Profils angezeigten Antiklinale oder in den Gesteinen unter der Diskordanz annehmen können – unter der Voraussetzung, dass die Gesteine über der Diskordanz undurchlässig sind.

Auch für die Suche nach anderen natürlichen Rohstoffen werden Gravitationsmessungen und Magnetuntersuchungen durchgeführt, um Anomalien mit hoher Schwerkraft (hoher Dichte) und Magnetisierungsanomalien als Indikatoren für mögliche Metallerzziele aufzuspüren.

Eine bei der Suche nach Metallerzen häufig verwendete Prospektionsmethode ist die geochemische Untersuchung von Sedimenten aus Flüssen und Bächen sowie von Bodenproben. Am häufigsten wird eine Serie von Sedimentproben aus einem Bachbett entnommen, getrocknet und gesiebt, um feinkörniges Sediment zu erhalten. Diese werden dann zur Analyse an ein Labor geschickt und in der Regel mittels Röntgenfluoreszenzspektrometrie (XRF) auf mehr als 50 Elemente analysiert. Wenn bei der Prospektion hohe Konzentrationen der Zielelemente gefunden werden, steigen die Konzentrationen normalerweise flussaufwärts bis in die Nähe ihrer Quelle an. Dies wird dann durch detaillierteres Sampling im Bachbett überprüft. Wenn das Quellgebiet lokalisiert ist, werden Bodenproben in einem Rastermuster durchgeführt, bis die höchsten Werte gefunden werden. Schließlich werden Gruben ausgehoben, bis das Quellgestein identifiziert und auf seinen Wert als zukünftiger Abbaustandort hin beurteilt wird.

Box 5.4. So findet man eine Diamantlagerstätte

- Man begibt sich auf einen Kontinent, auf dem zuvor schon Diamanten gefunden wurden (Diamanten entstehen nur in Gebieten micker, alter kontinentaler Kruste).
- Im nächsten Schritt werden Flussprobenahmen durchgeführt und aus jeder Probe werden die schweren (dichten) Minerale konzentriert. Obwohl Diamanten selten in Bächen zu finden sind, stammen sie aus ungewöhnlichen Vulkangesteinen, den sogenannten Kimberliten, und diese enthalten andere schwere Kimberlitminerale wie z.B. tiefrot gefärbte Granate.
- Die Schwermineralkonzentrate werden zur Analyse ins Labor geschickt.
- In den untersuchten Bächen müssen Bereiche mit hohem Gehalt an Kimberlitmineralen identifiziert und bis zu ihrem Quellgebiet verfolgt werden.
- Im Quellgebiet werden Bodenproben nach einem Gittermuster entnommen. Die Schwerminerale in den Proben werden konzentriert und zur Analyse an das Labor geschickt.
- Anhand der Analysen wird der Ort mit der höchsten Kimberlit-Mineral-Anomalie ermittelt, wo dann in der Erwartung, vulkanischen Kimberlit zu finden, mit einer Grabung begonnen wird.
- Wenn man sehr viel Glück hat, ist der aufgefundene Kimberlit möglicherweise einer der ganz wenigen Kimberlite, der genügend Diamanten enthält, um einen lohnenden Abbau zu starten.



Entnahme einer Schwermineralprobe in einem ausgetrockneten Flussbett



Schwermineralkonzentrat im Feld



Schwermineralkonzentrat auf einem Kimberlit



Premier-Diamantenmine, Cullinan, Südafrika

Hinweis: Manchmal, wenn ein Kimberlit in der geologischen Vergangenheit erodiert wurde, können in Fluss- oder Strandsedimenten genügend Diamanten konzentriert sein, sodass es sich lohnt, sie abzubauen.

5.1.7 Umweltschutz und Sanierung

Moderne Rohstoffabbau-Standorte verfügen in der Regel über Umweltschutz- und Sanierungsrichtlinien. Durch die Umweltschutzpolitik wird das örtliche Gebiet vor den Auswirkungen des Abbaus geschützt. Die Sanierungsrichtlinien stellen sicher, dass der Standort nach Abschluss der Extraktion wieder in einen guten Zustand versetzt wird und dass die laufende Überwachung des Standortes fortgesetzt wird. Es werden verschiedene Umweltschutzmethoden eingesetzt, wie in Tab. 5.7 dargestellt.

Tab. 5.7. Methoden des Umweltschutzes bei der Ausbeutung natürlicher Ressourcen

Umweltschutz methode	Detail	Bild	Beispiel
Dämme	Um die Abbauf Flächen herum werden Dämme (Böschungen) errichtet, damit sie von außen nicht leicht einsehbar sind und um Staub und Lärm zu reduzieren		Damm um einen Basaltsteinbruch in der Nähe von Hohenfels-Essingen, Eifel, Rheinland-Pfalz
Baumpflanzungen	Rund um Abbaustellen werden Bäume gepflanzt, damit die Stelle nicht leicht einsehbar ist und um Lärm und Staub von der Stelle zu reduzieren		Sichtschutz durch Baumpflanzung rund um einen aktiven Basaltsteinbruch, Hühnerberg, Bayern
Absetzbecken	Das aus Minen und Steinbrüchen gepumpte Wasser wird zusammen mit dem bei Regenfällen abfließenden Wasser in Absetzbecken geleitet. Der Schlamm setzt sich ab, bevor das Wasser für Waschvorgänge verwendet wird oder in lokale Bäche fließt.		Absetzbecken der Eisenmine der Cagdianao Mining Corporation auf den Philippinen
Behandlung von kontaminiertem Wasser	Abwasser wird aufbereitet, um Verschmutzungen zu entfernen, bevor es in Flusssysteme eingeleitet wird		Aufbereitung von Minenabwasser zur Entfernung von Metallverschmutzungen in Australien
Fahrzeugwäsche	Schlamm und Staub werden von den Fahrzeugen abgewaschen, sodass sie nicht auf umliegende Straßen gelangen		Eine LKW-Radwaschanlage in Deutschland

Bepflanzung von Abfalldeponien	Vegetation wird auf Abfallhalden gepflanzt, sodass die Wurzeln den Boden binden und den Wasserabfluss über die Oberfläche verringern, wodurch die Erosion verringert wird		Mit Gras bepflanzte Terrassen auf Abfalldeponien eines Kaolin-Abbaus, Higher Coldvreath, Cornwall, England
Grundwasserüberwachung	Rund um die Abbaustelle werden eine Reihe von Bohrlöchern gebohrt und das Grundwasser auf Verschmutzung überwacht		Grundwasserüberwachung, Coronado National Memorial, Arizona, USA

Wenn ein Abbaustandort geschlossen wird, muss der Standort saniert oder so weit wie möglich gereinigt werden, um ihn für zukünftige Nutzungen vorzubereiten. Manchmal ist es möglich, das Gelände wieder seiner ursprünglichen Nutzung zuzuführen, in anderen Fällen wird es jedoch einer neuen Nutzung übergeben, beispielsweise einem Landschaftspark oder einem Bootshafen. Die Sanierungsprozesse umfassen die Landschaftsgestaltung des Geländes, die Rückführung des entfernten Mutterbodens und die Anpflanzung sorgfältig ausgewählter Pflanzen, die unter den neuen Bedingungen überleben und möglicherweise bei der Sanierung des Bodens helfen.

In Bergbau- und Steinbruchgebieten können einige der alten Maschinen und andere historische Gegenstände in Heimatmuseen ausgestellt werden. Einige der Felswände können aufgrund ihres wissenschaftlichen, pädagogischen oder historischen Werts oder als Standorte für Wildtiere, beispielsweise für nistende Vögel oder wasserliebende Tiere, erhalten bleiben. Auch nach der Sanierung müssen Standorte möglicherweise noch regelmäßig auf Grundwasserqualität und Ökologie überwacht werden.

Tab. 5.8. Beispiele für Sanierungen

Sanierungsmaßnahme	Detail	Bild	Beispiel
Landschaftsbau	Steinbrüche, Gruben, Minen und Abfalldeponien werden landschaftlich gestaltet, um Gefälle von Hangböschungen zu reduzieren, und mit Vegetation bepflanzt, um Erosion zu minimieren		Die ehemalige Uranmine Jackpile-Paguate an der Laguna Pueblo, westlich von Albuquerque, USA

Rückgewinnung	Tagebaue können für die landwirtschaftliche Nutzung rekultiviert werden		Tagebau-Kohlebergwerk und neu gewonnenes Land am Kohlebergwerk North Antelope Rochelle, Wyoming, USA
Erhaltung	Teile der alten Abbaustätte können aufgrund ihres historischen Wertes erhalten bleiben		Erhaltenes Ofengebäude auf einer alten Zink-, Blei- und Schwefelmine, Co. Tipperary, Irland
Neue Nutzung	Die Kuppeln des Eden-Projekts, in denen Pflanzen aus der ganzen Welt gezüchtet werden – gelegen in einer alten Kaolin-Grube		Das Eden-Projekt in Cornwall, England
Geländearbeit	Felswände an alten Steinbruchstandorten werden vielfältig für wissenschaftliche und pädagogische Zwecke genutzt		Studentische Feldforschung am Apes Tor, einem alten Kalksteinbruch, Staffordshire, England

5.2 Energieverbrauch

Abb. 5.5 zeigt, wie sich der weltweite Stromverbrauch aus verschiedenen Quellen seit den 1960er Jahren verändert hat, wobei der Strom aus Öl, Gas und erneuerbaren Quellen zugenommen hat. Zuletzt war bei der Kernkraft ein leichter Rückgang zu verzeichnen, bei der Kohle ein stärkerer Rückgang.

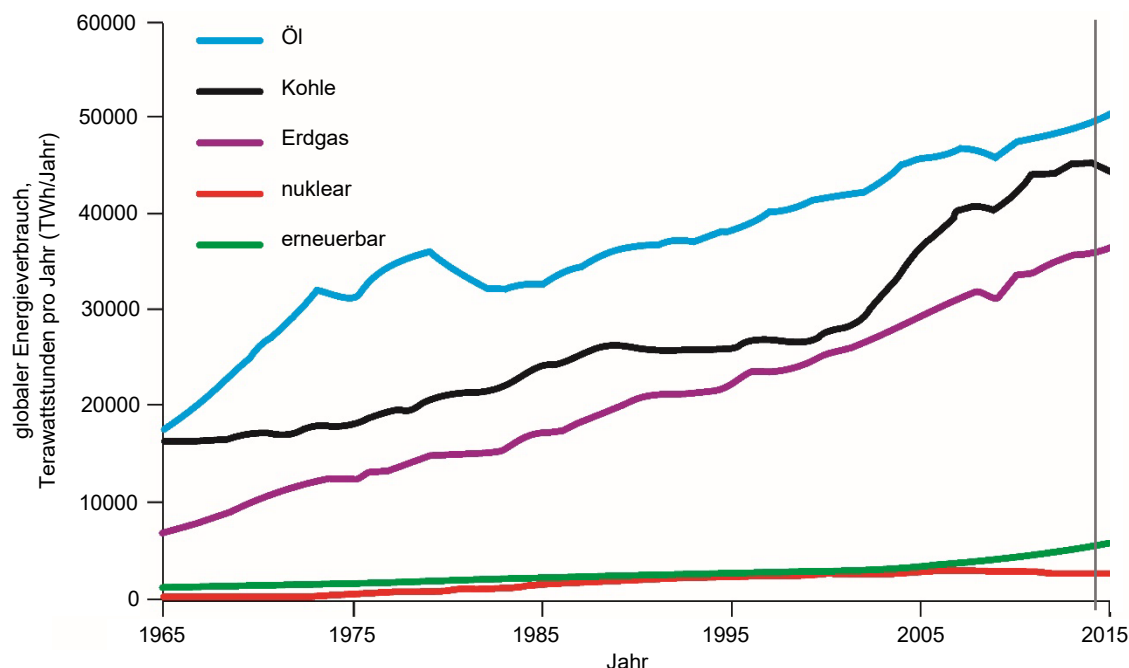


Abb. 5.5. Globaler Energieverbrauch; Daten aus dem BP-Statistical Review of World Energy

Abbildung 5.6 ist ein Tortendiagramm aktueller Zahlen, das zeigt, dass mehr als 85 % des aktuellen weltweiten Stromverbrauchs aus fossilen Brennstoffen, 10 % aus erneuerbaren Quellen und nur 4 % aus Kernkraft stammen.

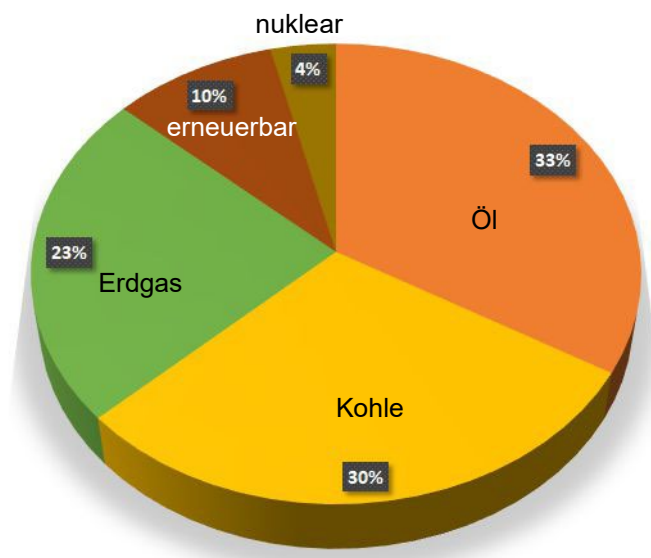


Abb. 5.6. Globaler Energieverbrauch; Daten aus dem BP-Statistical Review of World Energy

Trotz weltweiter Versuche, den Verbrauch fossiler Brennstoffe zu reduzieren und auf erneuerbare Energiequellen umzusteigen, zeigen aktuelle Daten immer noch die Bedeutung und zunehmende Nutzung fossiler Brennstoffe. Unter den gegenwärtigen Bedingungen wird es sicherlich lange dauern, diese Trends umzukehren.

5.2.1 Energie aus fossilen Brennstoffen

Die meisten Kraftwerke zur Stromerzeugung verbrennen fossile Brennstoffe wie Kohle, Öl oder Erdgas. Alle drei werden auch zur Herstellung von Chemikalien und anderen Industrieprodukten, einschließlich Kunststoffen, verwendet.

Nach der Raffinierung ist Öl die wichtigste Energiequelle für Straßen- und Schienenfahrzeuge und der einzige Kraftstoff, der im kommerziellen Luft- und Seeverkehr verwendet wird.

Aufgrund des Einflusses der Verbrennung fossiler Brennstoffe auf den Klimawandel besteht weltweiter Druck, den Einsatz fossiler Brennstoffe zu reduzieren und sie durch erneuerbare Energien zu ersetzen. Die Zusammenhänge zwischen Kohlendioxid, Treibhauseffekt und Klimawandel wurden in Abschnitt 4.3.3 erläutert.

Die Grafik in Abb. 5.7 zeigt, dass Kohle der Brennstoff ist, der bei der Verbrennung das meiste Kohlendioxid produziert. Bei der Verbrennung von Kohle werden außerdem mehr Schadstoffe freigesetzt als bei anderen fossilen Brennstoffen. Dazu gehören Schwefeldioxid- und Stickoxidgase sowie Rauchpartikel und Asche. Weltweit gibt es Bestrebungen, Kohlekraftwerke zu schließen und durch erdgasbefeuerte Kraftwerke zu ersetzen, da bei der Verbrennung von Erdgas nur etwas mehr als die Hälfte der Menge an Kohlendioxid freigesetzt wird wie bei Kohle und auch deutlich weniger andere Schadstoffe.

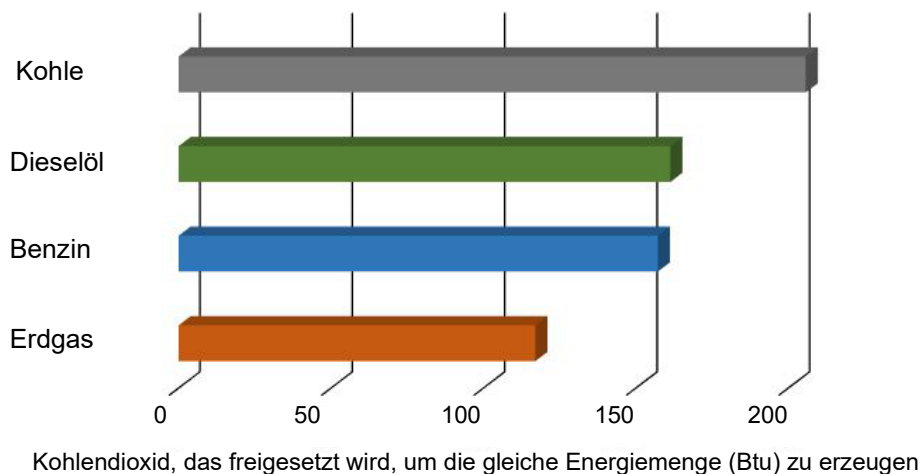


Abb. 5.7. Mengen an Kohlendioxid, die bei der Verbrennung verschiedener fossiler Brennstoffe zur Erzeugung der gleichen Energiemenge freigesetzt werden

Fossile Brennstoffe sind nicht erneuerbar. Dies bedeutet, dass zwar heute die Voraussetzungen für den Aufbau von organischem Material und die Umwandlung in fossile Brennstoffe im Laufe der Zeit gegeben sind, dies jedoch sehr viel langsamer geschieht als die Gewinnung fossiler Brennstoffe. Daher wird es eine Zeit geben, in der die meisten fossilen Brennstoffe auf der Erde abgebaut sind – was bedeutet, dass die weitere Gewinnung deutlich schwieriger und teurer wird.

Da fossile Brennstoffe nicht erneuerbar sind und auch die Umwelt verschmutzen, gibt es weltweit einen Trend hin zu erneuerbaren Energiequellen.

5.2.2 Erneuerbare Energie

Erneuerbare Energiequellen werden mindestens so schnell ersetzt, wie sie verbraucht werden. Sie stehen daher auch in Zukunft zur Verfügung. Sie setzen bei der Nutzung auch keine Schadstoffe frei, können jedoch andere Auswirkungen auf die Umwelt haben. Aus diesen Gründen gibt es weltweit ein Wachstum bei der Entwicklung und dem Ausbau erneuerbarer Energiequellen. Abb. 5.8 zeigt, dass Wasserkraft heute die am weitesten verbreitete erneuerbare Energiequelle ist, gefolgt von Solarenergie, Biokraft und Windkraft (Tab. 5.9). Geothermie- und Gezeitenquellen erzeugen weltweit nur geringe Mengen Strom, während sich Wellenenergie noch im experimentellen Stadium befindet.

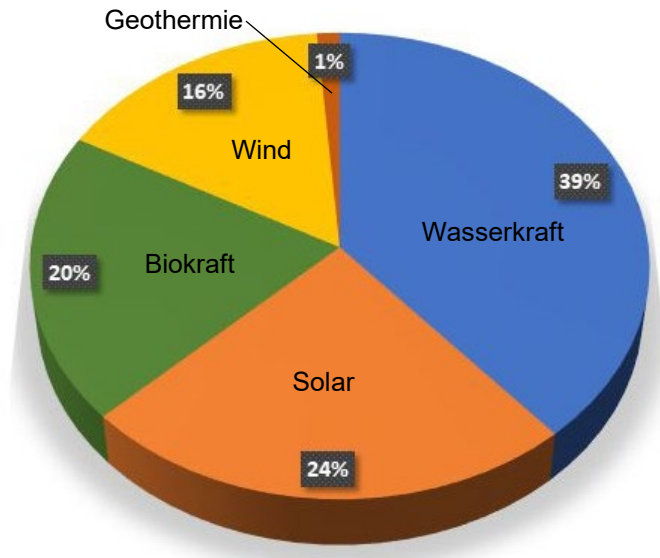


Abb. 5.8. Aktuelle Energieproduktion aus verschiedenen erneuerbaren Quellen; Daten aus dem globalen Statusbericht REN21, Tabelle R1

Tab. 5.9. Erneuerbare Energiequellen, ganz oben in der Tabelle die Quelle, die weltweit am meisten Energie produziert, am Ende der Tabelle die Quelle, die am wenigsten produziert

Erneuerbare Energiequelle	Detail	Bild	Beispiel
Wasserkraft	Wasserkraft wird erzeugt, indem Staudämme gebaut werden, um Stauseen zu schaffen, und das Wasser in Turbinen geleitet wird, um Strom zu erzeugen, wenn es aus dem Stausee fließt		Wasserkanal, der vom Stausee Lake Pukaki in Neuseeland zu den Turbinen eines Kraftwerks verläuft
Solar	Anordnungen von Solarmodulen sind so ausgerichtet, dass sie die größtmögliche Sonnenenergie einfangen		Die Solarkraftwerke PS20 und PS10 in Andalusien, Spanien
Biokraft	Der größte Teil der Bioenergie wird für die Stromerzeugung verwendet, indem Biomasse (speziell angebaute Pflanzen oder Abfallstoffe) verbrannt wird, einige Pflanzen werden jedoch auch zur Herstellung von Biokraftstoffen für		Biomasse-Fernheizwerk bei Steinfelde, Ternitz, Niederösterreich – Holzbrennstoffversorgung im Hintergrund

	den Transport verwendet		
Wind	Windparks bestehen aus Gruppen von Windkraftanlagen, entweder an Land oder auf See		Offshore-Windpark, Bac Lieu, Vietnam
Geothermie	Geothermie wird in vulkanischen Regionen erzeugt und wird dort üblicherweise als hydrothermale Energie bezeichnet. Es wird auch in anderen Gebieten aus warmen Gesteinen gewonnen		Das hydrothermale Kraftwerk Nesjavellir in Thingvellir, Island
Gezeiten	In mehreren Ländern wird Gezeitenkraft in kleinem Maßstab erzeugt, aber bisher gibt es keine großen kommerziellen Gezeitenkraftwerke		Modell des Gezeitenkraftwerks Kislogubskaya auf der Kola-Halbinsel im Norden Russlands
Wellen	Wellenenergie wird noch nicht im großen Maßstab kommerziell genutzt, kleine Generatoren werden jedoch getestet		Eine der drei Pelamis-Maschinen bricht durch eine Welle im Aguçadoura Wave Park, Portugal

Zwei der Probleme einiger erneuerbarer Energiequellen bestehen darin, dass ihre Leistung schwankt und wir derzeit keine Methode haben, ihren Strom in großem Maßstab zu speichern. An Tagen, an denen es wenig Sonnenschein gibt (Solarenergie), der Wind schwach oder zu stark ist (Windkraft), die Gezeitenströmungen reduziert sind (bei Nipptide) oder die Wellen gering sind (Wellenkraft), ist eine andere Energiequelle erforderlich, die dafür sorgt, dass eine regelmäßige „Grundlast“-Versorgung sichergestellt ist. Die großflächige Grundlastversorgung erfolgt traditionell über fossile Brennstoffe und nukleare Quellen, die je nach Bedarf relativ einfach zu- und abgeschaltet werden können.

Während erneuerbare Energiequellen erneuerbar sind und bei der Nutzung keine Umweltverschmutzung verursachen, haben sie alle Auswirkungen auf die Umwelt, da sie beim Bau Rohstoffe und Energie verbrauchen. Manche stehen auch aus anderen Gründen in der Kritik: Die Erzeugung von Wasserkraft erfordert den Bau großer Staudämme und die Überflutung von Tälern durch Stauseen; Solarmodule verwenden bei ihrer Konstruktion teure Seltene-Erden-Elemente; Biokulturen können auf Flächen angebaut werden, die für andere

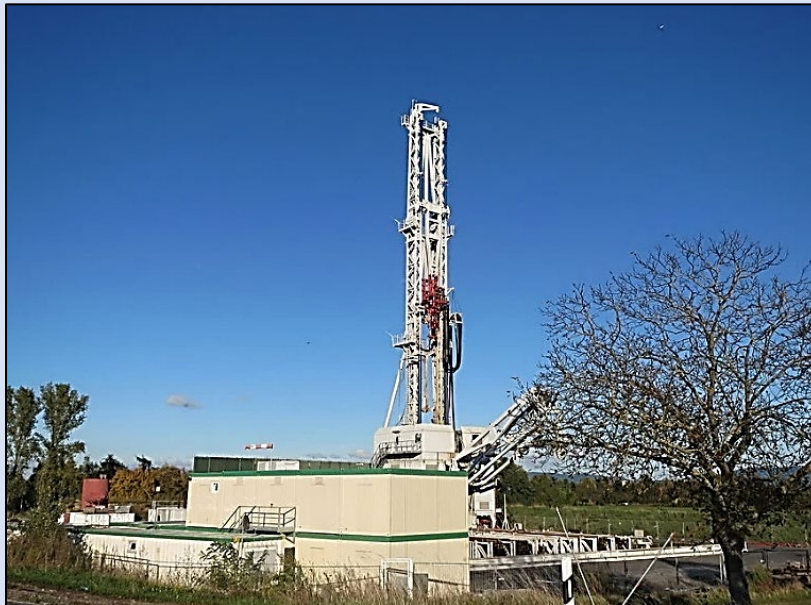
Arten der Landwirtschaft nützlich sind; und der Bau von Windkraftanlagen ist teuer. Einige Leute denken, dass der Blick auf Windkraftanlagen die Umwelt verbessert, andere sind vom Gegenteil überzeugt.

Box 5.5. Geothermie – ist sie erneuerbar?

Geothermie kann aus drei verschiedenen geologischen Situationen gewonnen werden:

- Wo magmatisches Gestein in großen Plutonen durch den Zerfall der darin enthaltenen radioaktiven Minerale warm geworden ist: Es werden zwei Bohrlöcher gebohrt und das Gestein dazwischen aufgebrochen. Wasser wird in ein Bohrloch gepumpt, erwärmt sich, während es durch die Risse fließt, und wird aus dem zweiten Bohrloch entnommen. Dem warmen Wasser wird Wärme entzogen und durch erneutes Abpumpen recycelt. Dabei handelt es sich um geothermische Energie aus heißem, trockenem Gestein.
- Wo es tiefliegende Grundwasserleiter gibt: Wärme aus der Tiefe der Erde hat das Wasser erwärmt und es ist aufgrund der dicken isolierenden Sedimentschichten darüber warm geblieben. Dieses warme Wasser wird wie oben beschrieben abgepumpt und recycelt. Dabei handelt es sich um geothermische Energie aus heißem, nassem Gestein
- In Gebieten mit vulkanischer Aktivität: Wasser, das durch darunter liegende Magmakammern erhitzt wird, wird heiß und kann in heißen Becken und Geysiren von unten aufsteigen; Dieses heiße Wasser kann durch Bohrungen gefördert und zum Antrieb von Turbinen in hydrothermischen Kraftwerken genutzt werden. Das ist hydrothermale Energie.

Sowohl in heißen, trockenen als auch in heißen, nassen Gesteinen hat sich die Wärme über viele tausend Jahre im Gestein angesammelt und wird viel schneller entzogen, als sie ersetzt werden kann, sodass diese Arten der Geothermie nicht erneuerbar sind. Bei hydrothermischen Kraftwerken wird die Wärme in der Regel schneller entnommen als erneuert. Solche Kraftwerke müssen irgendwann geschlossen und an anderer Stelle im hydrothermischen Bereich neu eröffnet werden; Daher wird diese Energie in der Regel auch nicht erneuerbar gewonnen.



Hydrothermales Kraftwerk und Bohrloch, Brühl, Nordrhein-Westfalen

Hinweis: Durch lokale Erdwärmepumpen aus dem Boden gewonnene Energie wird manchmal auch als Geothermie bezeichnet. Allerdings stammt der Großteil der auf diese Weise gewonnenen Energie aus der Erwärmung der Landoberfläche durch die Sonne und nicht aus unterirdischen Wärmequellen. Dabei handelt es sich um eine erneuerbare Ressource, auch wenn für den Betrieb des Systems etwas Strom benötigt wird.

6 Interaktionen zwischen Mensch und Erdsystem

Ohne die Wechselwirkungen des Erdsystems könnte das Leben auf der Erde im Allgemeinen und das menschliche Leben im Besonderen nicht existieren. Auch wenn viele der unten aufgeführten Wechselwirkungen negative oder sogar verheerende Auswirkungen haben, dürfen wir nicht vergessen, dass es ohne die Kombination aus Atmosphäre und Ozean, Gestein und Boden, Hochland und Tiefland und den anderen Merkmalen des Erdsystems Leben, wie wir es kennen, nicht geben würde.

6.1 Naturgefahren

Natürliche Prozesse werden nur dann zu **Gefahren**, wenn Menschenleben und Eigentum gefährdet sind. Wenn es in einer abgelegenen Region zu einem Erdbeben kommt, handelt es sich lediglich um ein Erdbeben und nicht um eine Gefahr. Der beste Weg, mit einer Naturgefahr umzugehen, besteht darin, dass die Planungsbehörden sicherstellen, dass Menschen nicht in Gefahrengebieten leben. Wo dies nicht möglich ist, werden andere Maßnahmen ergriffen, um das Risiko zu verringern oder zu **mindern**.

6.1.1 Vulkanausbruch

Wenn aufsteigendes Magma die Erdoberfläche erreicht, bricht es aus. Einige Ausbrüche sind ziemlich sicher und spektakulär, andere sind jedoch katastrophal gefährlich. Das Ausmaß der verschiedenen Arten vulkanischer Aktivität hängt hauptsächlich von der Fließfähigkeit (Viskosität) des Magmas ab. Wenn Magma die Oberfläche erreicht und ausbricht, wird es nicht mehr Magma genannt: Es fließt entweder als Lava aus Vulkanen oder wird als feine Asche, größere feste Blöcke oder flüssige „Lavabomben“ herausgeschleudert (Abb. 6.1.).



Abb. 6.1. Nächtliche Aufnahme vom Vulkan Stromboli in der Nähe von Sizilien, Italien, 2013, mit einer Eruption bei der „Bomben“ flüssiger Lava ausgeworfen werden.

Die Viskosität von Magma hängt von seiner chemischen Zusammensetzung, seiner Temperatur und dem Gehalt an vulkanischem Gas und Kristallen ab. Abschnitte 4.1.2.3. (Magmatische Prozesse) und 4.1.4. (Plattentektonik) zeigen, dass verschiedene Plattenränder im Allgemeinen Magmen mit unterschiedlicher Zusammensetzung aufweisen.

Die häufigsten Magmen an konstruktiven Plattenrändern sind die eisen-/magnesiumreichen Magmen, die Basalte produzieren. Über Subduktionszonen brechen am häufigsten die weniger eisenreichen (intermediären) Magmen aus, die Andesit-Laven produzieren, obwohl dort manchmal auch siliziumreiche Magmen ausbrechen. Das Gleichgewicht zwischen Eisen-/Magnesium- und Siliziumzusammensetzung verändert die Fließfähigkeit:

Eisen-/Magnesiumreiche Basaltmagmen sind am einen Ende der Skala am flüssigsten (niedrige Viskosität) und siliziumreiche Magmen am anderen Ende am wenigsten flüssig (hochviskos). Basaltische Magmen sind in der Regel auch die heißesten, und je heißer das Magma ist, desto weniger viskos ist es auch. Basaltische Magmen neigen auch dazu, wenige Kristalle zu enthalten, was ihre Fließfähigkeit erhöht. Wenn Magmen viel Gas enthalten, werden sie dadurch auch flüssiger, obwohl Basaltmagmen normalerweise nicht viel Gas enthalten. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eisen-/magnesiumreiche Basaltmagmen frei fließend und niedrigviskos sind, während intermediäre und siliziumreiche Magmen sehr klebrig und hochviskos sind.

Wenn flüssiges Basaltmagma als Lava ausbricht, ergießt es sich entlang langer Oberflächenrisse oder durch Vulkanschlote aus dem Boden und kann als spektakuläre Lavafontänen in die Luft gespritzt werden. Lavaströme können über den Boden fließen und sich langsamer fortbewegen, je mehr blockige Massen mitgeschoben werden. Dabei handelt es sich um spektakuläre Ausbrüche, die normalerweise recht ungefährlich sind, wenn man den Laven nicht zu nahe kommt.

Der Ausbruch von intermediärem und siliziumreichem Magma ist sehr unterschiedlich. Es bricht aus Schloten aus, manchmal als Lava, aber normalerweise wird das Magma innerhalb des Vulkanschlots fest, was zu viel explosiveren Eruptionen führt, wie in Tab. 6.1 gezeigt.

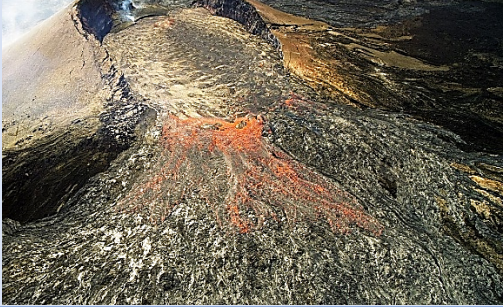
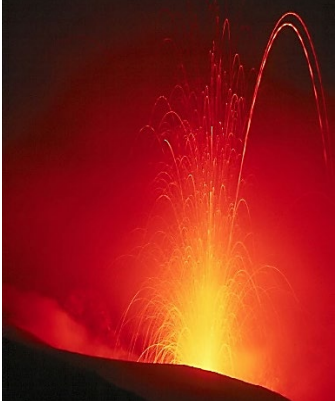
Tab. 6.1. Vulkanische Prozesse und ihre Auswirkungen

Vulkani-scher Prozess	Beschreibung		Bild	Beispiel
Lava eruption	Normalerweise niedrige Viskosität	Lava kann als Lavafontänen aus Spalten spritzen, bevor sie als Lavaström die Hänge des Vulkans hinunterfließt; Diese schnell fließenden Laven führen zu flachen Vulkanen oder, wenn unter Wasser, zur Bildung von Kissenlavas		Lavafontänen und Lavaström, Hawaii, 2004
Seitliche Explosion	Normalerweise hohe Viskosität; Magma verfestigt sich im Schlot, was zu einer explosiven Eruption führt	Wenn eine Eruption seitlich statt nach oben ausbricht, kann sie eine seitliche Explosion erzeugen, die Hunderte von Quadratkilometern Land in Richtung der Explosion verwüstet		Große Bäume, 1980 durch die Explosion am Mt. St. Helens in die gleiche Richtung umgeknickt (Menschen als Maßstab, unten rechts)
Aschen-eruption		Vulkanaschewolken werden hoch in die Atmosphäre geschleudert. Auch feste Blöcke werden ausgestoßen und regnen herab, wodurch ein steiler Vulkankegel entsteht. Asche kann vom Wind weit getragen werden		Ascheausbruch am Mt. St. Helens, Bundesstaat Washington, USA, 1980

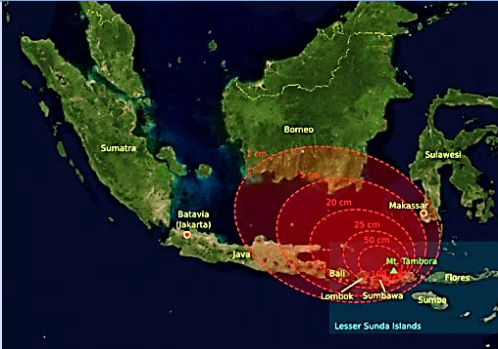
Pyroklastischer Strom (Nuée ardente, Glutwolke)		Ausgebrochene Vulkanaschewolken können mit hoher Geschwindigkeit als hochtemperierte Dichteströme, sog. pyroklastische Ströme (Nuées Ardentes, Glutwolken) an den Seiten von Vulkanen herunterfließen		Pyroklastischer Strom am Vulkan Mayon auf den Philippinen-Inseln, 1984
Lahar	Normalerweise hohe Viskosität; Magma verfestigt sich im Schlot, was zu einer explosiven Eruption führt	Wenn Vulkanasche vom Wasser eines Kratersees, geschmolzenem Eis/Schnee auf einem Vulkangipfel oder einem ausbruchbedingten Gewitter aufgenommen wird, fließt sie wie Hochgeschwindigkeitsbeton manchmal kilometerweit bergab		Lahar begräbt Häuser in der Nähe des Vulkans Galangung, Indonesien, 1983

Der Vulkanische Explosivitätsindex (VEI; Volcanic Explosivity Index) misst die Explosivität von Vulkanausbrüchen und reicht von nicht explosiv bis megakolossal, wie in Tab. 6.2 dargestellt.

Tab. 6.2. Eruptionen gemäß dem Vulkanischen Explosivitätsindex (VEI), der die Höhe der Wolke (m), das Volumen des ausgeworfenen Materials (m³) und die ungefähre Häufigkeit dieser Art von Eruption (globale Häufigkeit) anzeigt.

VEI	Beschreibung	Ausbruchshöhe Volumen Globale Häufigkeit	Bild	Beispiel
0	nicht explosiv	< 100m hoch		Glühende Lava fließt aus dem Vulkankegel Pu'u 'Ō'ō, Kilauea, Hawaii, 1997
		Tausende m ³ Volumen		
		kontinuierlich		
1	klein	100-1000m hoch		Ausbruch des Stromboli in der Nacht; Vulkanbomben werden mehr als 100 m in die Luft geschleudert, Italien, 1980
		Zehntausende m ³ Volumen		
		täglich		

2	mäßig	1-5 km hoch		Ausbruch des Mt. Sinabung, Medan, Indonesien, der die Weinreben im Vordergrund tötete, 2014
		Millionen m ³ Volumen		
		wöchentlich		
3	mäßig bis groß	3-15 km hoch		Nevado del Ruiz; Dieser Lahar aus ausgebrochener Asche begrub 1985 die Stadt Armero im Zentrum von Kolumbien
		0,01 km ³ Volumen		
		monatlich		
4	groß	10-25 km hoch		Eruptionswolke des Calbuco-Vulkans in der Nähe von Puerto Varas, Chile, 2015
		0.1 km ³ Volumen		
		2 Jahre		
5	katastrophal	> 25 km hoch		Satellitenaufnahme der 800 km langen Aschewolke des Puyehue-Cordón-Ausbruchs 2011, Chile
		1 km ³ Volumen		
		10 Jahre		
6	kolossal	> 25 km hoch		Aschewolke des Mt. Pinatubo während des Ausbruchs 1991 auf den Philippinen
		10er km ³ Volumen		
		50 – 100 Jahre		

7	super- kolossal	> 25 km hoch		Geschätzte Fläche, die vom Asche-fall des Tambora-Ausbruchs in Indonesien im Jahr 1815 bedeckt wurde
		100e km ³ Volumen		
		500 – 1000 years		
8	mega- kolossal	> 25 km hoch		Der riesige Vulkankrater (Caldera) aus drei Yellowstone-Ausbrüchen, Wyoming, USA – der letzte vor 630.000 Jahren
		1,000e km ³ Volumen		
		> 50,000 Jahre		

It can be difficult to picture what large eruptions might actually mean for the people living nearby, or to understand how they can affect the whole Earth, but case studies of particular eruptions give some idea.

Box 6.1. Ein kolossaler Ausbruch – Krakatau, 1883

Der VEI-6-Ausbruch des Krakatau in Indonesien war der erste kolossale Ausbruch, über den weltweit berichtet wurde, dank der damals neuen globalen Telegraphenverbindungen und der weit verbreiteten Berichterstattung in Zeitungen wie *The Times* in London.

VULKANISCHE ERUPTIONEN IN JAVA

BATAVIA, 27. August 1883

Gestern Abend waren gewaltige Detonationen von der Vulkaninsel Krakatau zu hören, die bis nach Soerakarta zu hören waren, und Ascheschauer fielen bis nach Cheribon. Die Blitze des Vulkans sind von hier aus deutlich sichtbar. Serang liegt jetzt in völliger Dunkelheit. An dieser Stelle sind Blöcke gefallen. Auch Batavia liegt fast im Dunkeln. In der Nacht wurden alle Gaslaternen gelöscht. Es ist unmöglich, mit Anjer zu kommunizieren und es besteht die Befürchtung, dass dort einiges Unheil angeordnet wurde. Mehrere Brücken zwischen Anjer und Serang wurden zerstört und ein Dorf in der Nähe des ehemaligen Ortes wurde weggespült, da die Flüsse durch das Eindringen des Meeres ins Landesinnere überschwemmt wurden.

Die Berichterstattung in *The Times* am folgenden Tag zeigt, wie sich das Ausmaß der Tragödie zu entfalten begann, als Nachrichten aus verschiedenen Quellen eindrangten.



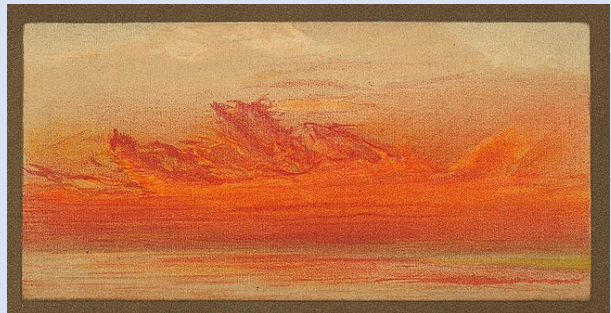
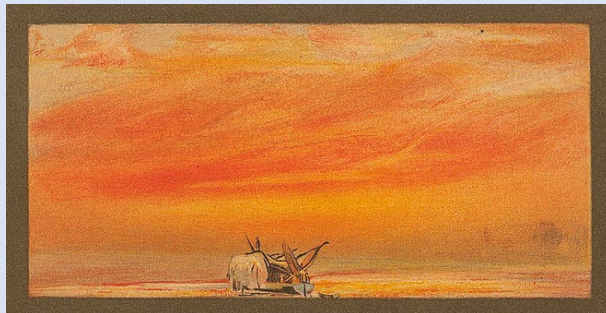
Künstlerische Darstellung kurz nach dem Ausbruch

Das ganze Ausmaß der Katastrophe wurde erst später klar, als vor Ort viele weitere Geschichten über den Ausbruch gesammelt wurden, Geologen das Gebiet untersuchten und Beobachtungen von Wissenschaftlern aus der ganzen Welt gesammelt wurden.

Die Untersuchungen haben ergeben:

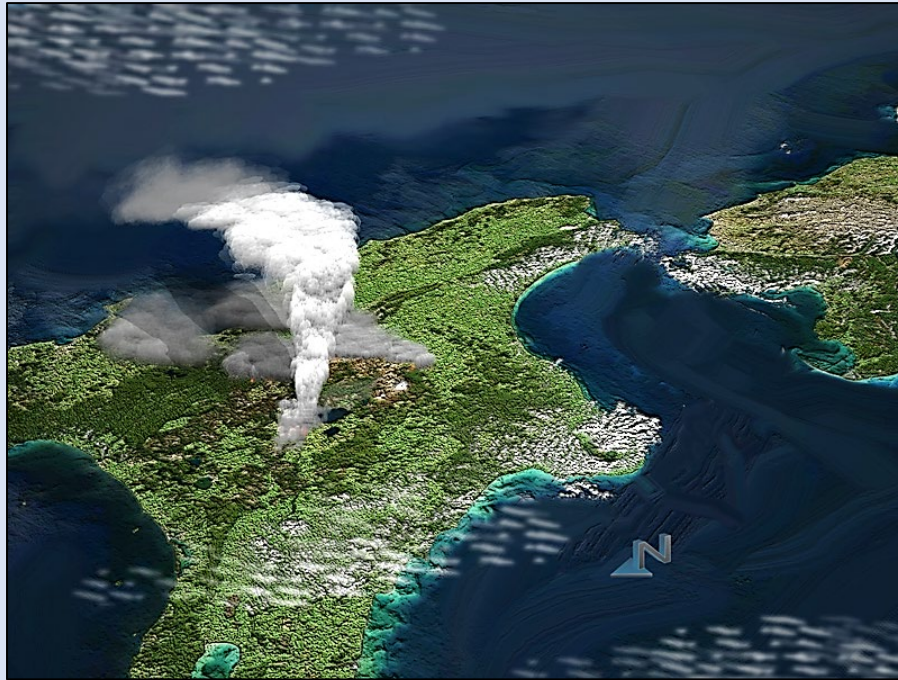
- Nahezu drei Viertel der kleinen Insel Krakatau wurden bei der letzten Eruption zerstört
- Fast 40.000 Menschen kamen durch den Ausbruch und die dadurch ausgelösten Tsunamis ums Leben
- Eine Aschewolke stieg 27 km hoch über dem Vulkan auf
- 10 cm große Bimssteinstücke fielen auf die Decks von Schiffen, die mehr als 20 km entfernt waren
- Riesige Inseln aus schwimmendem Bimsstein schwammen monatelang auf dem Ozean
- Etwa 20 km³ Material wurde ausgeworfen
- Die Explosion war in bis zu 4.800 km Entfernung zu hören, auf Rodrigues Island im Indischen Ozean (wo der Gouverneur vermutete, dass es vor der Küste zu einer Seeschlacht gekommen sein muss) und in den australischen Städten Perth und Alice Springs
- Diese Explosion war das lauteste Geräusch, das in den letzten zwei Jahrhunderten auf der Erde gehört wurde;
- Die daraus resultierenden Tsunamis waren mehr als 30 m hoch
- Kleine Tsunamiwellen wurden im Ärmelkanal auf der anderen Seite der Erde registriert
- Die atmosphärische Stoßwelle wurde auf der ganzen Welt aufgezeichnet und umkreiste mehrmals den Globus
- Asche stieg 80 km hoch in die Atmosphäre und beeinflusste jahrelang das globale Wettergeschehen
- Asche wurde mit dem Jetstream durch die obere Atmosphäre getragen, was das erste Mal war, dass dies beobachtet wurde
- Im folgenden Jahr sanken die globalen Temperaturen auf der Nordhalbkugel um schätzungsweise 1,2 °C, da das Sonnenlicht von den hohen Wolken, die durch die freigesetzten vulkanischen Gase entstanden, in den Weltraum zurückreflektiert wurde;
- Die Asche erzeugte mehrere Monate lang spektakuläre Sonnenuntergänge auf der ganzen Welt und Sonne und Mond erschienen manchmal in seltsamen Farben
- Es wird angenommen, dass die durch den Ausbruch freigesetzte Energie etwa viermal so groß war wie die Kraft der größten jemals explodierten Atombombe.

Diese Beobachtungen geben eine gute Vorstellung davon, wie ein „kolossaler“ Ausbruch tatsächlich aussieht.



Gemälde des Himmels im „Nachglühen“, das durch die Asche des Krakatau-Ausbruchs im Jahr 1883 verursacht wurde, von William Ashcroft (1832-1914)

Box 6.2. Ein gigantischer Ausbruch – der Oruanui-Ausbruch des Taupō vor etwa 25.360 Jahren



Künstlerische Darstellung des Oruanui-Ausbruchs aus dem Weltraum

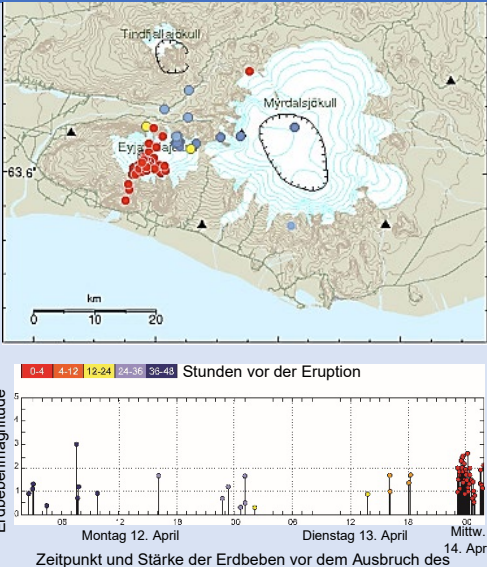
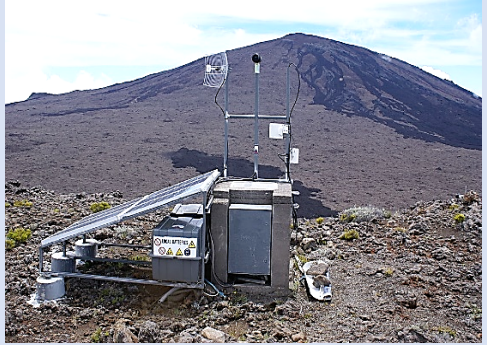
Der Megakolossalausbruch des Vulkans Taupō in Oruanui, Neuseeland, ist der jüngste VEI-8-Ausbruch, der die Erde betroffen hat. Der Ausbruch ereignete sich vor etwa 25.000 Jahren, lange bevor Menschen Neuseeland besiedelten. Das ist auch gut so, denn der Ausbruch hat vermutlich ganz Neuseeland verwüstet. Da wir keine Augenzeugenberichte über den Ausbruch haben, müssen wir unsere Vorstellungen davon, wie der Ausbruch aussah, auf die geologischen Befunde stützen. Daraus ergibt sich:

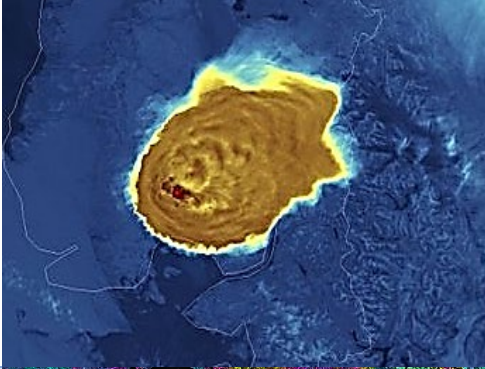
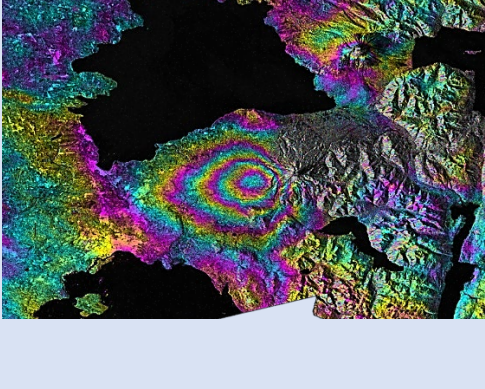
- 1170 km³ siliziumreiches Material wurde ausgeworfen, fast die 60-fache Menge an Material, das 1883 beim Ausbruch des Krakatau ausgeworfen wurde.
- 430 km³ Asche wurden in den Himmel geschleudert und bedeckten den größten Teil Neuseelands. Auf 1000 km entfernten Inseln wurden noch 18 cm dicke Ascheablagerungen registriert.
- 320 km³ Asche brach in pyroklastischen Strömen seitlich aus und hinterließ Ablagerungen mit einer Mächtigkeit von bis zu 200 m.
- Die Magmakammer kollabierte und bildete einen riesigen Krater (Caldera) mit einem Durchmesser von mehr als 30 km, der jetzt vom Lake Taupō gefüllt ist.
- Der Lauf des Waikato-Flusses wurde so verschoben, dass er nun an der Westküste der Nordinsel und nicht mehr an der Nordküste ins Meer mündet.

Auf diese Weise war das Gebiet Neuseelands betroffen, es gibt jedoch keine Aufzeichnungen über die Auswirkungen auf den Rest der Erde, da der Ausbruch lange vor der Erfindung der Schrift stattfand. Da sich der Ausbruch im Zentrum der Nordinsel befand, löste er möglicherweise keine Tsunamis aus, aber der Ausbruch riesiger Mengen an Asche und vulkanischem Gas in die Atmosphäre muss weltweite klimatische Auswirkungen gehabt haben. Wenn der VEI 7-Ausbruch von Tambora in Indonesien im Jahr 1815 ein „Jahr ohne Sommer“ und eine Hungersnot in Europa auslösen könnte, sind die globalen Auswirkungen des VEI 8 Oruanui-Ausbruchs nur zu erahnen, da er vielleicht zehnmal so viel Asche und vulkanisches Gas in die Atmosphäre brachte.

Ausbrüche hochexplosiver Vulkane können so verheerend sein, dass Wissenschaftler seit vielen Jahren daran arbeiten, sie vorherzusagen. Es wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden zur Vulkanüberwachung getestet. Einige davon sind in Tab. 6.3 beschrieben. Das Problem bei all diesen Methoden besteht darin, dass Daten mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auf einen naheliegenden Ausbruch hindeuten könnten, was zur Evakuierung der umliegenden Gebiete führen würde – nur dass die Anzeichen dann auch wieder verschwinden könnten, ohne dass es zu einem Ausbruch kommt. Danach ist es weniger wahrscheinlich, dass Menschen dem nächsten Evakuierungsbefehl Folge leisten. Obwohl wir wissen, dass es zu Ausbrüchen derzeit aktiver Vulkane kommen wird, bleibt die Vorhersage des genauen Zeitpunkts und Ausmaßes der Ausbrüche eine sehr schwierige Aufgabe.

Tab. 6.3. Methoden zur Überwachung von Vulkanausbrüchen

Überwachungsmethode	Beschreibung	Bild	Beispiel
Seismizität	Im Vorfeld von Vulkanausbrüchen können verschiedene Arten von Erdstößen entstehen, darunter auch harmonische Erschütterungen, der so.g vulkanische Tremor, von denen man annimmt, dass sie durch fließendes Magma im Untergrund entstehen	 Zeitpunkt und Stärke der Erdbeben vor dem Ausbruch des Eyjafjallajökull um 01:55 Uhr am Mittwoch, 14. April 2010	Erdbeben im Zusammenhang mit dem Ausbruch des Eyjafjallajökull im Jahr 2010 in Island
Gasemissionen	Der Gasaustritt kann vor Vulkanausbrüchen zunehmen oder abnehmen, was Hinweise auf zukünftige Ausbrüche gibt		Gelber Schwefel in einem vulkanischen Gasaustritt; Gas wird von einem Sensor überwacht, White Island, Neuseeland
Bodenverformung	Das Anschwellen eines Vulkans zeigt, dass sich nahe der Oberfläche Magma ansammelt. Dies kann überwacht werden, indem mithilfe des Global Positioning System (GPS) gemessen wird, wie sich die Position einer Station ändert, und auch durch Messung von Neigungsänderungen mithilfe von Neigungsmessern und Dehnungsänderungen mithilfe von Dehnungsmessstreifen		GPS-Überwachungsstation, Vulkan Piton de la Fournaise, Insel Réunion, Indischer Ozean

Thermische Überwachung	Magmabewegung, Gasfreisetzung und hydrothermale Aktivität können einen Vulkan vor einem Ausbruch aufheizen. Dies kann von Satelliten und am Boden erfasst werden. Bodenmessungen können die Oberflächentemperatur direkt messen oder Veränderungen in heißen Quellen oder Wasserbrunnen überwachen		Wärmebild; Hoher Wärmefluss (rot, braun und gelb) im Krater des Calbuco in Chile, 2015, vor dem kühlen blauen Hintergrund des Landes
Fernerkundung	Satelliten können wie oben die Temperatur überwachen, aber auch die Verformung des Bodens sowie die Freisetzung vulkanischer Gase und den Ausbruch von Aschewolken, die von Vulkanen erzeugt werden		Falschfarben-Satellitenbild zur Darstellung von Bodenverformungen im Zusammenhang mit dem Ausbruch des Calbuco in Chile im Jahr 2015

Der wirksamste Weg, das Risiko von Vulkanausbrüchen zu mindern oder zu reduzieren, ist eine Raumplanung, die Menschen daran hindert, in gefährlichen Gebieten zu bauen. Gefährliche Gebiete können untersucht werden, indem Gebiete geologisch auf Anzeichen gefährlicher Ausbrüche in der Vergangenheit untersucht und anschließend Gefahrenkarten erstellt werden (z. B. Abb. 6.2).

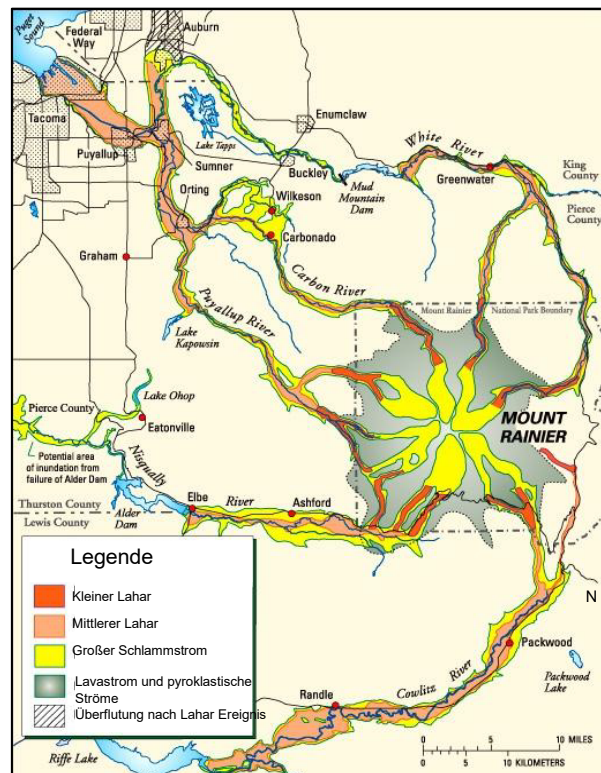


Abb. 6.2. Beispiel für eine vulkanische Gefahrenkarte, Mt. Rainier, Bundesstaat Washington, USA, die vorhersagt, was bei einem großen Vulkanausbruch passieren könnte

Wo es nicht möglich ist, außerhalb gefährdeter Gebiete zu bauen, werden Maßnahmen zur Vorbereitung auf gefährliche Eruptionen ergriffen. Dazu gehören die Überwachung von Vulkanen und die Vorbereitung auf

Notfallmaßnahmen bei Alarmen. Die Bevölkerung wird geschult, was im Notfall zu tun ist, und Systeme zur Warnung der Bevölkerung werden eingerichtet. Die Rettungsdienste sind in der Evakuierung von Personen sowie in Such- und Rettungsmethoden geschult. Es werden Vorbereitungen getroffen, um den Menschen bei der Bewältigung der Katastrophe des Verlusts von Häusern und Eigentum zu helfen und den Wiederaufbau von Siedlungen am selben Ort oder anderswo zu ermöglichen.

Wo Systeme wie diese eingerichtet wurden, waren sie erfolgreich. Die Eindämmung des Pinatubo-Ausbruchs VEI 6 im Jahr 1991 auf den Philippinen rettete 5.000 Menschenleben und Sachwerte im Wert von 250 Millionen US-Dollar. Die Eindämmung des VEI-3-Ausbruchs im Jahr 1995 auf der Insel Montserrat in Westindien rettete 11.000 Menschenleben.

6.1.2 Erdbeben

Schwere Erdbeben werden durch Störungen verursacht, aber das wurde erst durch die Studien von H.F. Reid im Jahr 1911 klar. Davor hatten die Menschen kaum eine Vorstellung davon, was Erdbeben verursachte, daher ist es nicht verwunderlich, dass auf der ganzen Welt viele Mythen und Geschichten darüber entstanden sind, um diese oft katastrophalen Ereignisse zu erklären.

Durch die Plattenbewegung baut sich in der Kruste Druck auf, bis das Gestein entlang einer Störung bricht, wenn sich beide Seiten aneinander vorbeibewegen. Der Ort, an dem die meiste Bewegung stattfindet, ist das **Erdbebenzentrum** (oder **Hypozentrum**). Der plötzliche Bruch erzeugt Stoßwellen, die als Erdbebenwellen in alle Richtungen ausstrahlen. Stoßwellen, die sich durch die Erde ausbreiten, werden **seismische Wellen** genannt.

Dort, wo die Stoßwellen die Erdoberfläche direkt über dem Hypozentrum erreichen, ist das Erdbeben am stärksten und dort gibt es die meisten Schäden. Dies ist das **Epizentrum** (Abb. 6.3). Die Stoßwellen breiten sich vom Epizentrum aus über die Erdoberfläche aus, wie Wellen auf einem Teich, und verlieren dabei an Stärke. Normalerweise entstehen die meisten Erdbebenschäden im Epizentrum, obwohl andere Faktoren, wie die Festigkeit des Bodens und der Fundamente, an manchen Orten mehr Schäden verursachen können als an anderen.

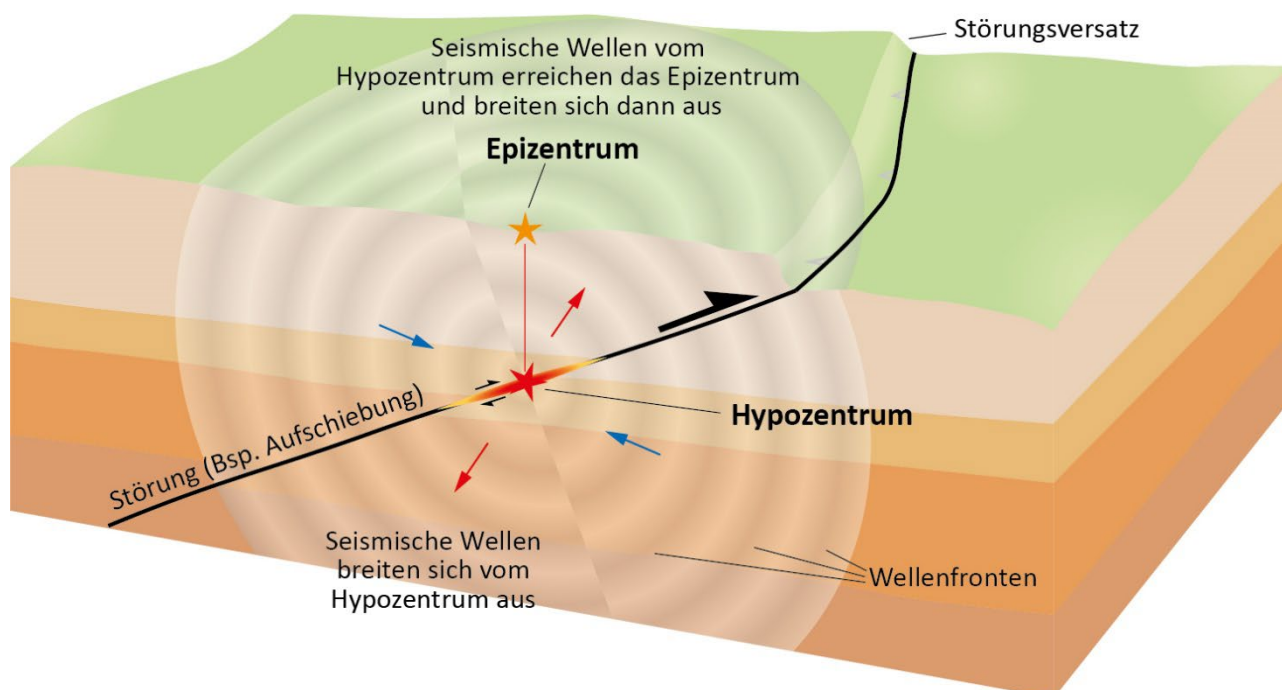
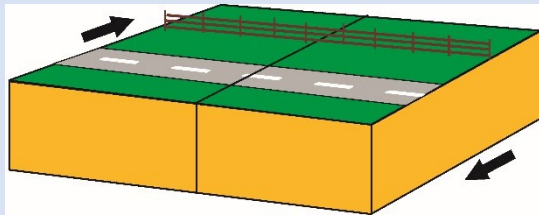


Abb. 6.3. Ein Erdbeben, das seismische Wellen erzeugt

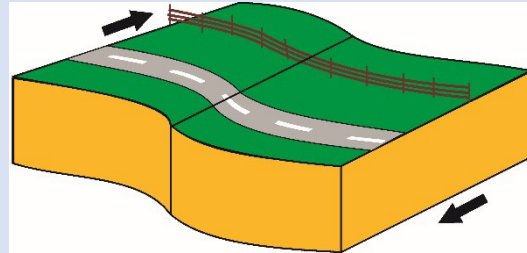
Box 6.3. Die elastische Rückpralltheorie

Eine wissenschaftliche Theorie zur Erklärung von Erdbeben wurde 1911 von H.F. Reid entwickelt, indem er Teile der San-Andreas-Störung in Kalifornien, USA, untersuchte. Er zeichnete die Bewegung der Punkte auf beiden Seiten der Verwerfung auf und erkannte, dass sich das Land vor dem Erdbeben auf beiden Seiten der Verwerfung in unterschiedliche Richtungen bewegte. Als der Druck zunahm, krümmte sich das Land auf beiden Seiten. Schließlich konnte es sich nicht mehr weiter biegen und die Störung brach, was zu einem Erdbeben führte. Er nannte dies seine „Theorie des elastischen Rückpralls“, weil der Boden elastisch zurückprallte, wenn sich die Verwerfung bewegte.

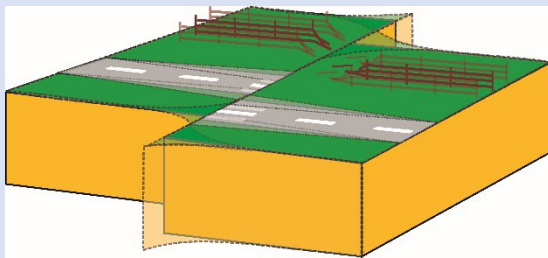
1. Zaun und Straße werden über einer blockierten Störung errichtet



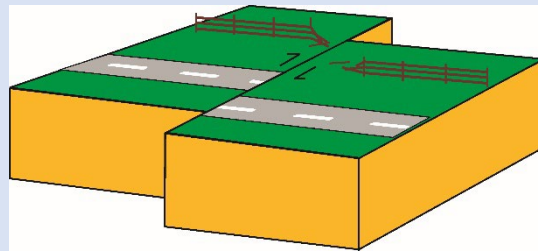
2. Druck baut sich auf, das Gestein, der Zaun und die Straße verbiegen sich



3. Die Störung bricht plötzlich, das Gestein prallt elastisch zurück, was ein Erdbeben verursacht



4. Nach dem Erdbeben hat sich die Störung verschoben, Zaun und Straße sind wieder gerade, aber über die Störung hinweg gebrochen



Bewegung des Bodens in H.F. Reids „Theorie des elastischen Rückpralls“

Kleine Erdbeben, die üblicherweise als Mikrobeben oder Tremor bezeichnet werden, sind so gering, dass sie nur von seismischen Messgeräten, sogenannten **Seismometern**, erkannt werden können. Seismometer sind so empfindlich, dass sie die Vibrationen von schweren Lastkraftwagen oder Zügen, Explosionen in Steinbrüchen und sogar das Geschrei der Menge erfassen können, wenn in einem Fußballstadion ein Tor geschossen wird. Netzwerke von Seismometern wurden auf der ganzen Welt aufgestellt und zeigen nicht nur die Größe eines Erdbebens, sondern auch die Lage seines Epizentrums und die Tiefe seines Hypozentrums. Diese Daten wurden verwendet, um die Orte und Tiefen von Erdbeben in Tab. 4.22 zu kartieren, die als Nachweis für die Plattentektonik-Theorie dienen.

Box 6.4. Seismometer

In Seismometern ist eine Masse im Inneren aufgehängt, sodass sich die Masse im Inneren in Ruhe bleibt, während die Erde das Seismometer bewegt. Der Unterschied zwischen der Bewegung des Seismometers und der Masse im Inneren wird vergrößert und mit einem Stift auf einer Trommel, die sich im Laufe der Zeit dreht, oder als elektronische Aufzeichnung registriert. Außenseismometer werden normalerweise in Löchern im Boden angebracht, in deren Nähe sich die Aufzeichnungsgeräte befinden, einschließlich der Ausrüstung zum Senden der Daten an ein Aufzeichnungslabor. Seismometer in Innenräumen müssen auf Betonböden montiert werden; Die oberen Stockwerke von Gebäuden vibrieren zu stark. Moderne Mobiltelefone verfügen über einen ähnlichen Vibrationssensor, der durch Herunterladen der entsprechenden App als Seismometer verwendet werden kann.



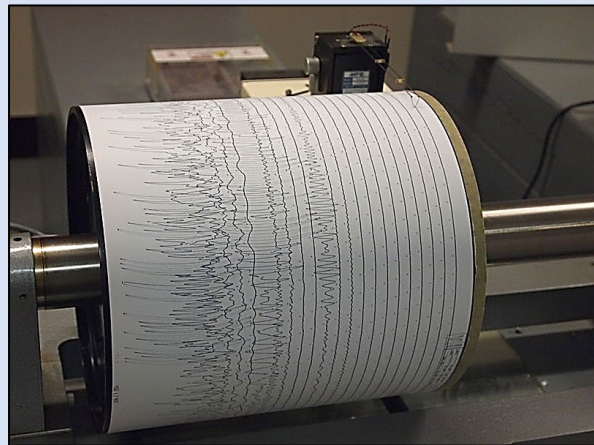
Aufzeichnungsausrüstung für eines einer Reihe von Seismometern, die in einem Loch in der Nähe des Golfs von Korinth, Griechenland, stationiert sind



Aufzeichnungsausrüstung und Notstromversorgung für ein Seismometer im Golf von Korinth



Zwei Seismometer, links das ältere, rechts das modernere, Seismologisches Labor Patras, Griechenland



Analoge Trommelaufzeichnung eines Seismometers

Seismometer können die Stärke oder Stärke eines Erdbebens im Epi- und Hypozentrum messen. Früher wurde dies mit der Richterskala erfasst, heutzutage wird jedoch stattdessen die Moment-Magnituden-Skala verwendet. Die Stärke eines Erdbebens beträgt auf jeder Stufe das Zehnfache der Stärke der vorherigen Erdbebenstufe (Tab. 6.4).

Tab. 6.4. Die Moment-Magnituden-Skala

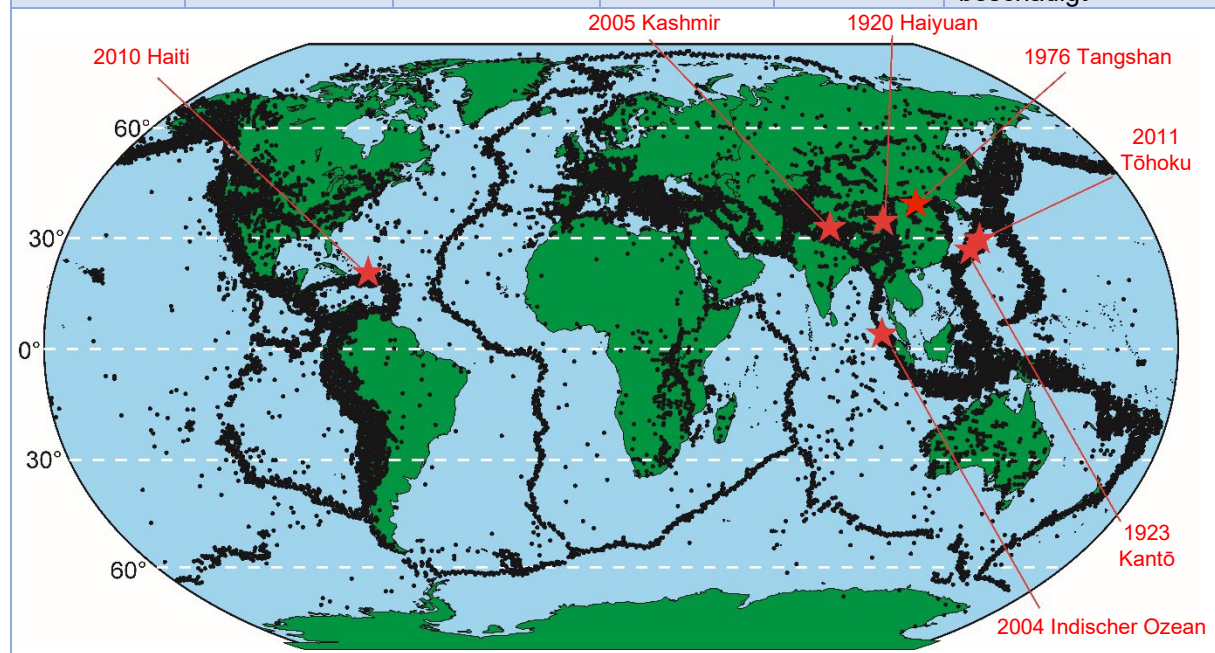
Moment-Magnitude	Beschreibung	Schaden	Häufigkeit pro Jahr
Weniger als 3	Von Menschen nicht gefühlt	keine	Große Anzahl
3 - 5	geringe Stärke	wenig	150.000
5 - 7	mäßig bis stark	mittel bis stark	150
7 - 8	sehr stark	massiv	15
Mehr als 8	großes Erbeben	katastrophal	1

Das größte jemals aufgezeichnete Erdbeben war das Erdbeben der Stärke 9,5 in Chile im Jahr 1960. Ein Erdbeben der Stärke 10 wurde noch nie registriert.

Einzelheiten zu einigen schweren Erdbeben, geordnet nach der ungefähren Zahl der Todesopfer, sind in Tab. 6.5 aufgeführt.

Tab. 6.5. Einige der stärksten Erdbeben, gemessen an der Zahl der Todesopfer

Erdbeben	Datum	Ort	Todesopfer	Magnitude	Kommentar
Haiyuan	16. Dezember 1920	Ning-Gansu, China	Mehr als 270.000	7,8	Erschütterungen, Bodenbrüche und Erdrutsche
Tangshan	28. Juli, 1976	Hebei, China	Mehr als 240.000	7,8	Erschütterungen durch weichen Boden verstärkt
Indischer Ozean	26. Dezember 2004	Vor Sumatra, Indonesien	Mehr als 230.000	9,2	Die meisten Todesopfer infolge eines Tsunamis
Haiti	12. Januar 2010	Haiti, Karibische See	100.000 – 316.000	7,0	Flache Tiefe des Erdbebenherdes verursachte starke Erschütterungen
Kantō	1. September 1923	Kantō, Japan	Mehr als 100.000	7,9	Durch das Erdbeben verursachte Feuerstürme forderten viele Todesopfer
Kaschmir	8. Oktober 2005	Muzaffarabad, Pakistan	Mehr als 85.000	7,6	Starke Erschütterungen
Tōhoku	11. März 2011	Vor Sendai, Japan	Mehr als 15.000	9,0	Die meisten Todesfälle wurden durch Tsunami verursacht; Kernkraftwerk beschädigt



Tab. 6.5 zeigt einige der verschiedenen Faktoren, die Erdbeben so gefährlich machen können. Bei den meisten Erdbeben ist die Haupttodesursache die Erschütterung der Bodenoberfläche, die zum Einsturz von Gebäuden führt. Polizeileutnant H.N. Powell beschrieb dies während des Erdbebens 1906 in San Francisco: „Valencia Street ... begann zu tanzen, sich aufzubäumen und in Wellen zu rollen wie eine raue See. ... Es war für einen Mann unmöglich zu stehen. ... Häuser brachen und verbogen und brachen genauso ein wie die Straße selbst.“ Erschütterungen und Zerstörungen können viel schlimmer sein, wenn der Boden weich ist, beispielsweise wenn Gebäude auf alten Seeablagerungen oder auf dem Meer abgerungenem Boden errichtet wurden.

Es lohnt sich, sich an das alte Sprichwort zu erinnern: „Es sind nicht Erdbeben, die Menschen töten, sondern Gebäude“.

Tiefereichende Störungen können manchmal als Brüche an die Oberfläche gelangen und große Bauwerke wie Brücken, Dämme und Kernkraftwerke beschädigen. Erdbeben lösen in Steilhanggebieten Erdrutsche und Lawinen aus. Defekte Strom- und Gasleitungen verursachen Brände, die nicht unter Kontrolle gebracht werden können, wenn auch die Wasserleitungen defekt sind. Einige Erdbeben verursachen Tsunamis, die in Küstengebieten große Schäden anrichten können. All diese Faktoren erhöhen das Erdbebenrisiko.

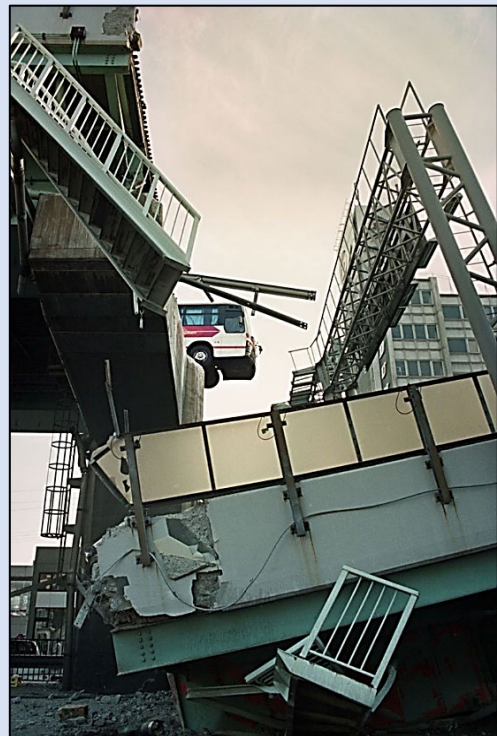
Tab. 6.5 zeigt, dass die Zahl der Todesfälle möglicherweise nicht eng mit der Stärke eines Erdbebens zusammenhängt. Wo Erdbeben moderne Städte treffen, die sich darauf vorbereitet haben, ist die Zahl der Todesopfer in der Regel viel geringer als bei Erdbeben in weniger entwickelten Regionen. In weniger entwickelten Gebieten sind die Gebäude möglicherweise schlecht gebaut und der Wiederaufbau kann aufgrund zusammengebrochener Kommunikationswege und schlechter Vorbereitungen nur langsam vonstattengehen. Beispielsweise betrug die Zahl der Todesopfer beim Erdbeben der Stärke 7,0 in Haiti im Jahr 2010 (siehe Tab. 6.5) mehr als 100.000, da die meisten Gebäude aus schlecht armiertem Beton bestanden. Als im selben Jahr ein viel größeres Erdbeben der Stärke 8,8 Chile erschütterte, betrug die Zahl der Todesopfer nur 520, da erdbebensichere Bauvorschriften streng durchgesetzt worden waren.

Box 6.5. Das Kobe Erdbeben, Japan, 1995 – Magnitude 6,9

**Schüler der Akatsukayama High School,
Yasuyo Morita (17 Jahre alt)**

„Damals habe ich geschlafen. Zuerst dachte ich, meine Mutter würde mich wecken, aber ich wusste an ihrem Schrei: Es ist ein Erdbeben! Ich wusste nicht, was ich im Dunkeln tun sollte. Die Treppe ist zerstört, also bin ich barfuß im Schlafanzug über eine Leiter hinuntergestiegen. Wegen der Dunkelheit und Kälte konnte ich meine Tränen nicht zurückhalten. Ich war in Panik. In meiner Nachbarschaft gibt es viele Holzhäuser. Jetzt werden sie ohne Mitleid zerstört. Bald wurde es heller und ich konnte meine Umgebung sehen. Einige wurden verrückt. Ich ging mit meiner Großmutter ins Krankenhaus, die aus einem Trümmerhaufen gerettet wurde. Ihr Finger riss ab. Wir kamen ins Krankenhaus. Es war die Hölle auf Erden. Ein Mann, der aus dem Kopf blutete, ein Kind – violett vielleicht wegen Erstickung. Es war voller Menschen. Meine Großmutter wurde desinfiziert, das ist alles. Ihre Verletzung war im Vergleich zu anderen nicht schwerwiegend. Das Haus meiner Großmutter und das Haus meines Großvaters sind beide niedergebrannt. Wir konnten nichts herausbekommen. Die Stadt, die ich mag, hat sich in einem Moment verändert. Ich war traurig. Jetzt lebe ich in einem der Zufluchtsorte und habe nachts Angst. Ich möchte, dass Kobe bald wiederaufgebaut wird.“

“Aus: <http://www.sln.org.uk/geography/7-11kobe.htm>“



Schaden an einer Brücke in Kobe

Das Erdbeben erschütterte die Stadt Kobe in Japan am Morgen des 17. Januar 1995 um 05.46 Uhr, als die meisten Menschen noch schliefen. Das Erdbeben hatte eine Stärke von 6,9 auf der Momentenmagnitudenskala; Der Schwerpunkt lag auf einer aktiven Störungslinie in einer Tiefe von 17 km. In manchen Gegenden kam es bis zu drei Minuten lang zu heftigen Erschütterungen. Die Bewegung entlang der Störung wurde durch die Subduktion der Philippinischen Platte unter die Eurasische Platte, auf der sich Japan befindet, ausgelöst.

Das Epizentrum lag 20 km von der Stadt Kobe mit ihren 1,5 Millionen Einwohnern entfernt. Rund 4.600 Einwohner von Kobe kamen ums Leben, hauptsächlich durch einstürzende Gebäude. Über der Stadt wüteten zahlreiche Brände, die durch kaputte Gas- und Stromleitungen verursacht wurden. Weicherer Boden im Hafengebiet verflüssigte sich, sodass Gebäude umstürzten und Kräne ins Meer stürzten. Viele Verkehrsverbindungen wurden zerstört und eine erhöhte Autobahn durch die Stadt stürzte ein. Elektrokabel,

Gas-, Wasser- und Abwasserleitungen waren alle kaputt, was die Probleme noch verschlimmerte. Die Rettungskräfte konnten die Stadt nur schwer erreichen und sahen sich dort mit blockierten Straßen und unterbrochener Kommunikation konfrontiert. Die Strecke des Hochgeschwindigkeitszuges und zwei weitere Eisenbahnstrecken waren kaputt, wodurch die Kommunikation in Japan halbiert wurde.

Die meisten der eingestürzten Gebäude waren nach den Bauvorschriften von 1960 gebaut worden; Gebäude, die nach neueren Bauvorschriften errichtet wurden, sind größtenteils erhalten geblieben. Nach dem Erdbeben reisten viele Freiwillige in die Region, um Hilfe anzubieten. Die Katastrophenvorsorgepläne des Landes wurden verbessert und waren bei einem späteren Erdbeben viel wirksamer. Viele erdbebensichere Notunterkünfte wurden gebaut und die Wirtschaft der Region normalisierte sich nahezu innerhalb eines Jahres.

Box 6.6. Das Kaschmir-Erdbeben, Pakistan, 2005 – Magnitude 7,6

Shazia Ahmed – eine Mutter

„Ich bin hungrig!“ Das waren die ersten Worte, die meine Tochter zu mir sagte, als ich sie aus den Trümmern zog, die einst unser Haus waren. Ich hatte in meinem ganzen Leben noch nie so viel Erleichterung gespürt. Obwohl Umbreen staubig und verletzt war, lebte sie, und in diesem Moment hätte es kein größeres Wunder geben können.

Es dauerte drei Tage voller qualvoller Angst, bis mein Mann und die Nachbarn unser Baby retten konnten. Drei Tage Folter, die nur eine Mutter verstehen konnte. Ich packte sie und suchte verzweifelt nach fehlenden Gliedmaßen, Fingern oder Zehen. Ich brachte sie ins Feldlazarett am Berghang und die Ärzte stellten ihr bis auf ein paar Schnittwunden und Prellungen ein einwandfreies Gesundheitszeugnis aus. Es ist ein Wunder, dass es ihr gut geht. ...

Unser „Dorf“ besteht jetzt nur noch aus etwa 200 Zelten am Fuße des Berges. Alle Häuser wurden zerstört. Zum Glück kamen die Mitarbeiter von Sungi (einem lokalen Oxfam-Partner), um uns zu helfen. Sie stellten nicht nur Zelte, Decken und sauberes Trinkwasser zur Verfügung, sondern boten uns auch eine Schulter, auf die wir uns stützen konnten, als wir sie am meisten brauchten.

Manchmal braucht man einfach jemanden, der zuhört und an der Trauer teilhaben kann.'

Aus: <https://www.oxfam.org.nz/what-we-do/emergencies/previous-emergencies/kashmir-earthquake-2005/stories-from-balakot>



Shazia mit ihrem Baby, das drei Tage in den Trümmern von Balakot überlebte, bevor es gerettet wurde



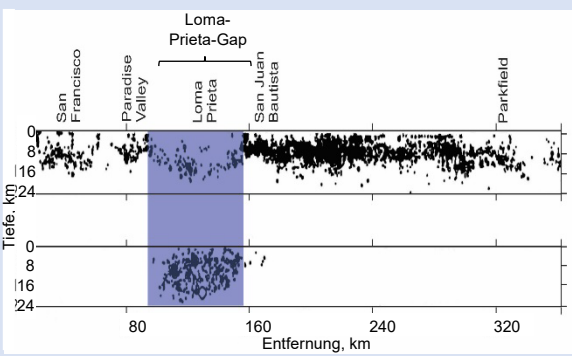
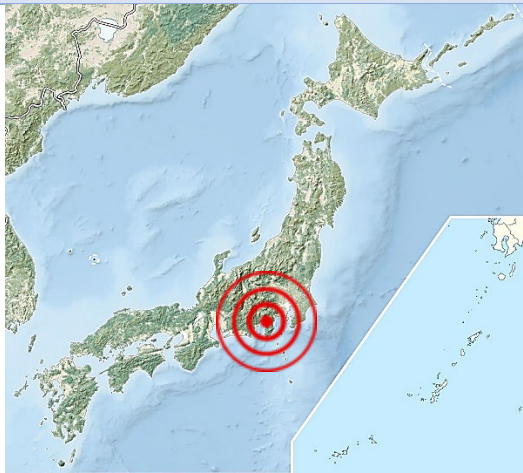
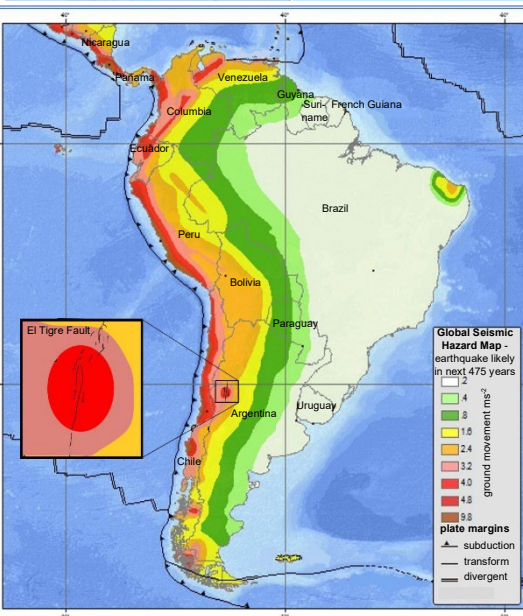
Die zerstörte Stadt Balakot

Das Kaschmir-Erdbeben erschütterte am Morgen des 8. Oktober 2005 um 08:50 Uhr den Norden Pakistans. Es befand sich in der Kollisionszone der eurasischen und indischen tektonischen Platten, zwischen denen sich das Himalaya-Gebirge erhob. Das Erdbeben war eine der schlimmsten Naturkatastrophen, die Südasien jemals heimgesucht hat. Die geschätzte Zahl der Todesopfer betrug mehr als 85.000. Die Stadt Muzaffarabad war am stärksten betroffen. Viele weitere Menschen wurden verletzt und 3,5 Millionen Menschen wurden obdachlos. Viele Schulen stürzten ein, Krankenhäuser und Rettungsdienste versagten. In abgelegenen Bergregionen wurden Städte und Dörfer völlig zerstört. Durch Erdrutsche blockierte Straßen erschwerten den Rettungskräften die Arbeit zusätzlich. Es gab viele starke Nachbeben. Spätere Satellitenmessungen zeigten, dass das Land über dem Epizentrum um mehrere Meter angehoben wurde.

Unmittelbar danach gab es eine große nationale und internationale Rettungsaktion, doch der Wiederaufbau der Einrichtungen in der Region verlief in den folgenden Monaten und Jahren nur langsam.

In Ländern, die von schweren Erdbeben heimgesucht werden können, muss die Bevölkerung geschützt werden. Zu den Schutzmaßnahmen gehören Versuche, starke Erdbeben vorherzusagen (Tab. 6.6), den Bau von Gebäuden, die Erdbeben standhalten, und Pläne zur Bewältigung der Auswirkungen von Erdbeben.

Tab. 6.6. Methoden der Erdbebenvorhersage

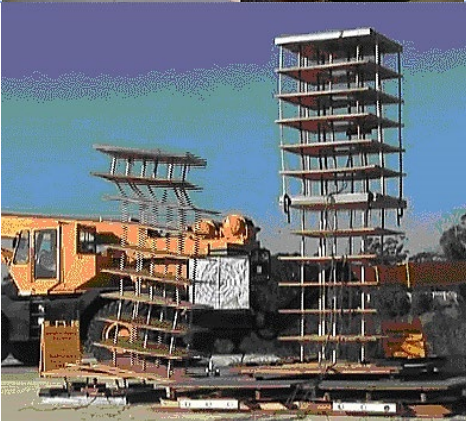
Erdbeben-Vorhersage-methode	Beschreibung	Bild	Beispiel
Seismische Lücke (Seismic Gap), räumlich	Entlang größerer Störungen gibt es oft Gebiete mit vielen Erdbeben und andere mit wenigen Erdbeben. Wo es nur wenige Erdbeben gegeben hat, kann es zu Spannungen kommen, sodass dort mit dem nächsten Erdbeben zu rechnen ist		Der Loma-Prieta-Gap an der San-Andreas-Störung, Kalifornien, USA. Das obere Diagramm zeigt, dass es in der Lücke (Gap) bis zum „großen“ und seinen Nachbeben im Jahr 1989 nur wenige Erdbeben gegeben hatte – unteres Diagramm
Seismische Lücke (Seismic Gap), zeitlich	Einige Erdbeben haben einen ziemlich regelmäßigen Zeitverlauf, sodass der Zeitpunkt des nächsten Erdbebens vorhergesagt werden kann		Die Tōkai-Erdbeben ereigneten sich in Japan regelmäßig alle 100–150 Jahre in den Jahren 1498, 1605, 1707 und 1854. Das nächste Erdbeben wird voraussichtlich bald stattfinden
Kartierung seismischer Gefahren	Dabei werden alle verfügbaren Daten genutzt, um die Gebiete mit dem höchsten Erdbebenrisiko anzuzeigen		Seismische Gefahrenkarte von Südamerika, erstellt vom US Geological Survey

Erdbebenvorhersagemethoden können zeigen, wann und wo schwere Erdbeben wahrscheinlich sind. Erdbebenvorhersagemethoden versuchen jedoch, den wahrscheinlichen Ort und die wahrscheinliche Zeit genauer zu bestimmen. Mehrere davon werden derzeit wissenschaftlich untersucht, aber keine davon hat sich bisher als zuverlässig erwiesen. Zu den Methoden gehören:

- Überwachung von Bodenhebung und -neigung in der Nähe von Störungen
- Messung kleiner Erdbeben mit Seismometern, falls es sich um „Vorbeben“ vor einem großen Erdbeben handelt
- Überwachung der Wasserstände in Brunnen, falls steigender Druck zu einem Anstieg des Grundwassers oder zunehmende Spannung zu mehr Brüchen führt, wenn der Wasserspiegel sinkt
- Überprüfung der Emission von Radongas aus dem Boden – im Vorfeld eines Erdbebens können kleine Risse mehr Radongas als üblich freisetzen das im Grundwasser nachgewiesen werden kann
- Die Fähigkeit von Gesteinen, Elektrizität zu leiten (ihr elektrischer Widerstand), kann sich vor einem Erdbeben ändern. Je mehr Wasser ein Gestein enthält, desto besser kann es Elektrizität leiten. Wenn sich also vor einem Erdbeben mehr Brüche bilden, füllen sich diese mit Wasser und können Elektrizität effektiver leiten (wodurch ihr Widerstand gegenüber elektrischen Strömen sinkt).

Wenn Gebäude erdbebensicher gebaut werden und die erdbebensicheren Bauvorschriften durchgesetzt werden, können Schäden und damit auch die Zahl der Todesopfer erheblich reduziert werden. In Tab. 6.7 sind verschiedene Methoden aufgeführt, mit denen Gebäude widerstandsfähiger gegen Erdbebenschäden gemacht werden können.

Tab. 6.7. Baumethoden zur Abwehr von Erdbebenschäden

Erdbeben-sichere Methode	Beschreibung		Bild	Beispiel
Strength during shaking	Erdbebenwellen bewegen sich sowohl nach oben als auch nach unten und seitwärts	Scherwände bestehen aus Paneelen, die wackeln können, ohne zu brechen		Scherwände, die einem Gebäude in Oregon, USA, zusätzliche Festigkeit verleihen sollen
		Fundamentbolzen verbinden Wände flexibel mit Fundamenten		Fundamentbolzen und -bänder, Napa, Kalifornien, USA
Isolieren bei Erschütterungen	Um Gebäude vom erdbeben-bewegten Boden zu trennen, können zahlreiche Methoden eingesetzt werden, darunter Gummistoßdämpfer, Federn, Räder und Kugellager			Schütteltisch zum Testen von Basisisolationsmethoden. Das normale, nicht isolierte Gebäude auf der linken Seite stürzt ein. Universität von Kalifornien, San Diego, USA

Gebäude mit Stahlbeton	Stahlbetongebäude werden mit Netzwerken aus Bewehrungsstäben errichtet – Stahlstäben im Beton, welche die Erschütterungen stoppen können, die zum Versagen des spröden Betons führen		Bewehrungsstahl-netz für ein Betonbrückenfundament
Widerstands-fähiges Wasser-, Gas- und Stromnetz	Gas- und Stromleitungen können mit automatischen Abschaltvorrichtungen ausgestattet sein – um Brände zu verhindern. Wasserleitungen mit flexiblen Verbindungen widerstehen Beschädigungen, sodass die Wasserversorgung bei durch Erdbeben verursachten Bränden nicht unterbrochen wird		Automatisches Absperrventil an einer Gasleitung, Seattle, USA

In den von Erdbeben betroffenen Gebieten sollten von den Behörden Pläne zum Schutz der Bevölkerung aufgestellt werden. Diese bestehen oft aus vier Phasen: Schadensbegrenzung (Reduzierung wahrscheinlicher Auswirkungen, zum Beispiel durch die Methoden in Tab. 6.7), Vorbereitung (einschließlich administrativer Planung, Vorbereitung und Schulung), Reaktion (wie die Rettungsdienste während und kurz nach dem Erdbeben reagieren sollten), und Wiederherstellung (Beginn der Erhaltung und des Wiederaufbaus der Gemeinschaft).

Teil der Erdbebenvorbereitung ist die Schulung von Schülern in Schulen und der breiten Öffentlichkeit darüber, was während und nach einem Erdbeben zu tun ist. Das Wichtigste dabei ist, dass jede Familie, jede Schule, jede Fabrik, jedes Büro usw. ihren eigenen Plan entwickelt.

Box 6.7. Ein Erdbebenplan

Die Earthquake Country Alliance in Kalifornien, USA, hebt „Sieben Schritte zur Erdbebensicherheit“ hervor:

Vorbereiten

- Schritt 1: Sichere deinen Raum – stell sicher, dass Möbel usw. nicht gefährlich umfallen können
- Schritt 2: Plane, um auf Nummer sicher zu gehen – erstell deinen eigenen Katastrophenplan und stell sicher, dass jeder weiß, was er beinhaltet
- Schritt 3: Organisiere Katastrophenvorräte – dort, wo sie leicht zu finden sind
- Schritt 4: Minimiere finanzielle Probleme – indem du deine Unterlagen organisierst, das Gebäude stärkst und eine Versicherung abschließt

Überleben und Erholen

- Schritt 5: Fallen lassen, abdecken und festhalten – schütz dich während des Erdbebens unter schweren Möbeln



Erdbebenvorsorgeschild in Vancouver, Kanada

Schritt 6: Verbessere die Sicherheit – verlass das Gebäude, wenn du kannst, hilf den Verletzten und verhindere weitere Verletzungen
Schritt 7: Neu verbinden und wiederherstellen – sich mit anderen vernetzen, Schäden reparieren und die Community neu aufbauen

6.1.3 Tsunami

Tsunamis sind große Wasserwellen, die durch Erdbeben, Vulkanausbrüche, ins Wasser fallende Erdrutsche oder Meteoriteneinschläge verursacht werden. „Tsunami“ bedeutet auf Japanisch „Hafenwelle“. Früher wurden Tsunamis „Flutwellen“ genannt, obwohl sie nichts mit Gezeiten zu tun haben.

Die Höhe der Tsunamiwellen, die die Küste erreichen, hängt von der Größe des auslösenden Prozesses und der Form der Küstenlinie ab. Im offenen Ozean sind die Tsunamiwellen nur von geringer Höhe, breiten sich aber mit Geschwindigkeiten von bis zu 800 km/h aus. Wenn sie in Küstennähe flacheres Wasser erreichen, verlangsamt die Reibung die Basis der Welle, wodurch sie immer höher wird. Flach abfallende Küsten erzeugen höhere Wellen als steil abfallende Küsten. Die größten Tsunamiwellen können eine Höhe von mehr als 40 Metern erreichen, was der Höhe eines 12-stöckigen Gebäudes entspricht.

Nicht nur die Wellenhöhe ist zerstörerisch, sondern wenn Tsunamis Land erreichen, können enorme Wassermengen an Land fließen. Diese können bis zu 10 km landeinwärts strömen und alles mitreißen, was nicht fest verankert ist. Aus diesem Grund können so viele Menschen durch Tsunamis getötet werden.

Große Tsunamiwellen können sich über weite Ozeane ausbreiten. Das stärkste jemals aufgezeichnete Erdbeben, das Valdivia-Erdbeben in Chile im Jahr 1960, verursachte einen Tsunami, der sich quer über den Pazifischen Ozean ausbreitete, dabei die Insel Hawaii verwüstete und Neuseeland, Australien, die Philippinen, Japan und China erreichte (Abb. 6.4).

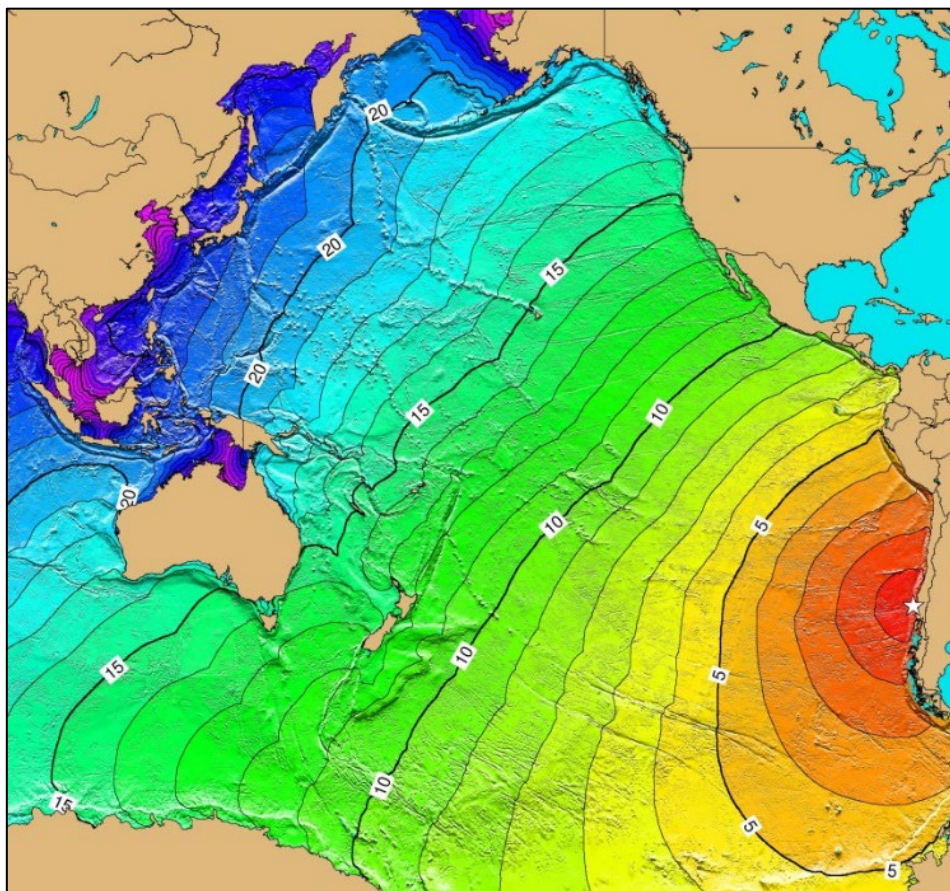


Abb. 6.4. Der Tsunami, der durch das Valdivia-Erdbeben von 1960 verursacht wurde, dargestellt sind die zeigt die Ausbreitung der Welle in Stunden über den Pazifischen Ozean an

Einzelheiten zu einigen großen und verheerenden Tsunamis sind in Tab. 6.8 aufgeführt.

Tab. 6.8. Große Tsunamis und ihre Auswirkungen

Tsunami	Beschreibung	Bild	Beispiel
2011 Tōhoku- Tsunami, Japan	Ein Erdbeben der Stärke 9,0 vor der Küste verursachte den Tsunami, der mehr als 15.000 Todesopfer und die Kernschmelze des Kernkraftwerks Fukushima mit der Evakuierung Hunderttausender Bewohner zur Folge hatte (Tab. 6.5 oben).		Der japanische Tōhoku-Tsunami; schwarzer Rauch aus einer beschädigten Ölraffinerie
2004 Indischer Ozean Tsunami	230.000 Menschen wurden in Indonesien und anderen Küstenländern des Indischen Ozeans, darunter Sri Lanka, Indien und Somalia, getötet (Tab. 6.5 oben).		Die ankommende Tsunamiwelle 2004 in Ao Nang, Provinz Krabi, Thailand
1883 Eruption des Krakatau	Mehr als 36.000 Todesopfer forderte der durch den Krakatau-Ausbruch verursachte Tsunami		Ein Ergebnis des Tsunamis, der durch den Krakatau-Ausbruch im Jahr 1883 verursacht wurde
1755 Lissabon- Erdbeben, Portugal	Mehr als 40.000 Tote durch Erdbeben, Tsunami und Brände. Die portugiesische Hauptstadt Lissabon wurde fast vollständig zerstört		Eine künstlerische Sicht auf das Erdbeben und den Tsunami von Lissabon im Jahr 1755

Box 6.8. Der Tsunami 2011 in Tōhoku, Japan

Am Freitag, dem 11. März 2011, löste das stärkste jemals in Japan registrierte Erdbeben (Stärke 9,0) einen großen Tsunami aus, der eine Höhe von 40 Metern erreichte und 10 km landeinwärts floss. Dies ist die Geschichte von Schulkindern im Bezirk Unosumaicho, aufgezeichnet von den Reportern Sho Komine und Yasushi Kaneko von der japanischen Nationalzeitung Yomiuri Shimbun

Öffentliches Krankenhaus in Minamisanriku nach dem Tsunami 2011



“Der Tsunami traf den Bezirk Unosumaicho in Kamaishi und die Überschwemmungen erreichten den dritten Stock der Mittelschule Kamaishi-Hogashi und die nahegelegene Grundschule Unosumai. Vor dem jüngsten Erdbeben hatten die beiden Schulen gemeinsam Katastrophenübungen durchgeführt. In der Mittelschule versagte das Durchsagesystem unmittelbar nach dem Erdbeben und konnte keinen Aufruf zur Evakuierung mehr senden. Die Schüler konnten das Gebäude und die Turnhalle jedoch schnell verlassen, weil sie dies geübt hatten, und sie ergriffen die Hände von Grundschulern – die ebenfalls kurz davorstanden, aus dem Gebäude zu fliehen – und rannten gemeinsam auf eine höhere Ebene.“ „Ein Erstklässler der Mittelschule, Dai Dote, 13, hielt die Hände von zwei Grundschulmädchen der dritten Klasse [8 Jahre alt]. Auf dem Weg den Hügel hinauf weinte eines der Mädchen und begann zu hyperventilieren, während das andere nicht mehr in der Lage war zu sprechen. „Es ist in Ordnung“, sagte Dote zu den Mädchen, als sie zur Spitze des Hügels rannten, mehr als zwei Kilometer von ihren Schulen entfernt. Als sie die Sicherheit aller ihrer Freunde bestätigten, wirkten die Mädchen erleichtert, sagte Dote.“ Ein Lehrer erzählte dem Yomiuri Shimbun: „Ich habe den Kindern im Unterricht wiederholt gesagt, dass wir einen Tsunami erleben könnten, der größer ist als jemals erwartet.“ Es grenzt fast an ein Wunder, dass so viele Kinder gerettet wurden. Ich bin stolz auf die Kinder, die selbst [lebensrettende] Entscheidungen treffen.“

Box 6.9. Der Tsunami im Indischen Ozean, 2004

Am 26. Dezember (dem Tag nach Weihnachten/Boxing Day) im Jahr 2004 war die 11-jährige englische Schülerin Tilly Smith mit ihrem Vater, ihrer Mutter und ihrer jüngeren Schwester am Strand in Phuket, Thailand.

Später erzählte sie einem Reporter ihre Geschichte.

Tsunami-Welle trifft auf die Küste von Phuket



Tilly's Geschichte:

„Ich erinnerte mich, dass es mir in einer Geographiestunde beigebracht worden war. Es war genau der gleiche Schaum wie bei einem Bier, es brutzelte irgendwie. Ich sagte: „Es wird definitiv einen Tsunami geben, und meine Mutter hat mir nicht geglaubt und ist deshalb weitergegangen.“ Aber mein Vater glaubte mir irgendwie und Holly, meine Schwester, hatte große Angst. Also rannte sie zurück zum Pool [im Hotel] und mein Vater ging mit ihr zurück. Und dann sagte ich: „Gut, Mama, ich gehe, ich gehe auf jeden Fall, es wird auf jeden Fall einen Tsunami geben.“ Und sie sagte nur: „Hmmm – dann tschüss.“ Also ging ich zurück und sie reagierte etwas stärker, als ich gegangen war, und so ging sie zurück, um zu sehen, ob es mir gut ging. Und kaum war sie zurückgekommen, begann das Wasser den Strand hinaufzulaufen.

„Nun, ich habe es meinem Vater erzählt, und mein Vater hat es dem Wachmann erzählt, und der Wachmann hat es den Leuten am Strand erzählt. Es waren ziemlich viele Familien am Strand, direkt im Wasser.

„Ohne Herrn Kearney (meinen Geografielehrer) wäre ich wahrscheinlich tot und meine Familie auch. Und deshalb bin ich ziemlich stolz, dass er mir das rechtzeitig beigebracht hat. „Meine Mutter wusste es nicht, weil ihr in ihrer Jugend nichts über Tsunamis beigebracht wurde und sie nicht wusste, was ein Tsunami ist. Sie wusste nicht einmal, dass dieses Wort existierte. Deshalb finde ich es wirklich gut, das Wort tatsächlich zu kennen und es gelernt zu haben.“

Tillys Familie ging nach oben im Hotel und musste zusehen, wie die Tsunamiwellen den Swimmingpool mit Trümmern füllten. Tilly hat an diesem Tag möglicherweise fast 100 Leben am Strand gerettet, an dem allein in Thailand mehr als 8.000 Menschen starben.

Das National Tsunami Hazard Mitigation Program in den USA besteht aus den drei in Abb. 6.5 dargestellten Teilen: Warnung, Anleitung, Eindämmung und Gefahrenbewertung, wie in Tab. 6.9 dargestellt.

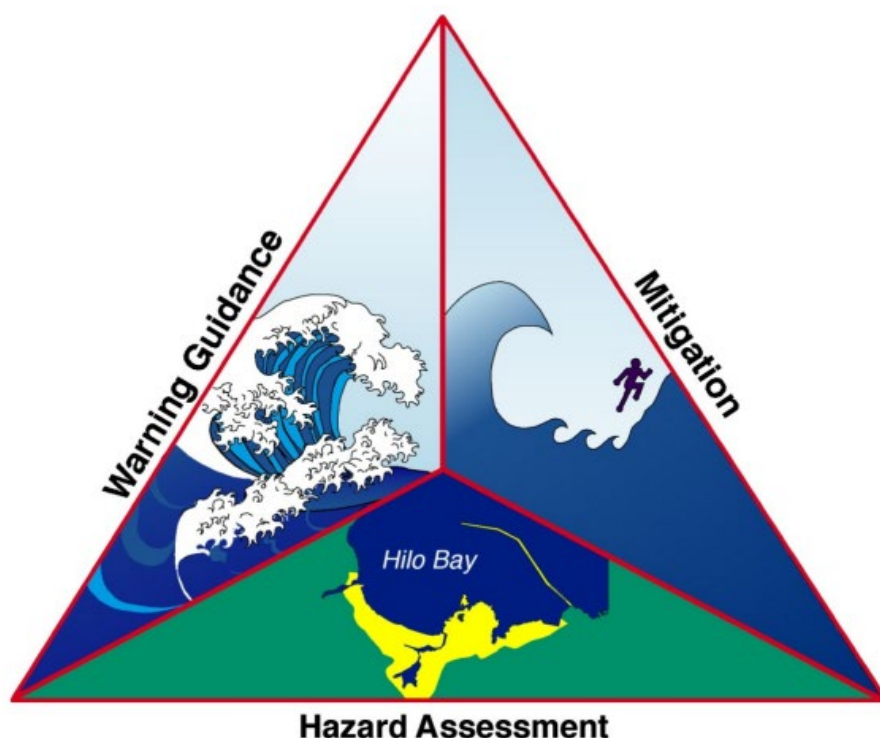


Abb. 6.5. Logo des US National Tsunami Hazard Mitigation Program

Tab. 6.9. Methoden zur Erhöhung der Sicherheit bei Tsunamis

Tsunami-Sicherheitsmethode	Beschreibung	Bild	Beispiel
Gefährdungsbeurteilung	Wahrscheinliche Gefahren werden bewertet und die Ergebnisse veröffentlicht, um der Gemeinschaft zu helfen. Diese chilenische Warnbroschüre enthält Informationen zu Tsunami-Risikogebieten, Treffpunkten, Notfallversorgungsbereichen und Evakuierungswegen		Merkblatt zur Tsunami-Warnung für die Küstenstadt Pichilemu in Zentralchile
Schadensbegrenzung	Die Tsunami-Gefahr wird durch den Bau von Tsunami-Mauern verringert		Tsunami-Mauer bei Tsu-shi in Japan
Warnung und Anleitung	Das Deep-Ocean Assessment and Reporting of Tsunamis (DART)-System basiert auf einer Reihe von Bojen quer über die Ozeane verteilt, die durch Tsunamis verursachte Druckänderungen erkennen, sodass Frühwarnungen ausgegeben werden können		Das Bojen- und Netzwerkwarnsystem DART II
	Die Öffentlichkeit wird darin geschult, was zu tun ist, wenn Warnungen zu hören sind, und Informationen werden in Flugblättern und auf Schildern veröffentlicht		Tsunami-Warnschild, Okumatsu-shima, Japan, mit Evakuierungswegen

Box 6.10. Informationen zur Tsunami-Warnung

Ein in den USA online veröffentlichtes Informationsblatt zur Schadensbegrenzung bei einem Tsunami-Ereignis enthält die folgenden Leitlinien:

Wenn Sie befürchten, dass ein Tsunami bevorsteht, der Boden unter Ihren Füßen bebt oder Sie eine Warnung hören, informieren Sie in jedem Fall Ihre Verwandten und Freunde und **begeben Sie sich schnell auf höher gelegenes Gelände.**

Wichtige Fakten, die man zum Thema Tsunamis wissen sollte

- Tsunamis, die Küstenorte am Pazifischen Ozean treffen, werden fast immer durch Erdbeben verursacht. Diese Erdbeben können weit entfernt oder in der Nähe Ihres Wohnortes auftreten.
- Manche Tsunamis können sehr groß sein. In Küstengebieten kann ihre Höhe bis zu 10 m oder mehr (im Extremfall über 50 m) betragen, und sie können landeinwärts mehrere hundert Meter bis zu mehreren Kilometern strömen.
- Alle tiefliegenden Küstengebiete können von Tsunamis heimgesucht werden.
- Ein Tsunami besteht aus einer Reihe von Wellen. Oft ist die erste Welle nicht die größte. Die Gefahr eines Tsunamis kann nach Eintreffen der ersten Welle noch mehrere Stunden anhalten.
- Tsunamis können sich schneller fortbewegen, als ein Mensch rennen kann.
- Manchmal führt ein Tsunami dazu, dass das Wasser in Küstennähe zurückgeht und den Meeresboden freilegt.
- Die Wucht mancher Tsunamis ist enorm. Große Steine mit einem Gewicht von mehreren Tonnen sowie Boote und andere Trümmer können durch die Tsunami-Wellen Hunderte von Metern landeinwärts bewegt werden. Häuser und andere Gebäude werden zerstört. All dieses Material und Wasser bewegt sich mit großer Kraft und kann Menschen töten oder verletzen.
- Tsunamis können zu jeder Tages- und Nachtzeit auftreten.
- Tsunamis können sich über Flüsse und Bäche ausbreiten, die ins Meer münden.

Wenn Sie sich an Land befinden:

- Seien Sie sich der Fakten zum Tsunami bewusst. Dieses Wissen könnte Ihr Leben retten! Teilen Sie dieses Wissen mit Ihren Verwandten und Freunden. Es könnte ihnen das Leben retten!
- Wenn Sie in der Schule eine Tsunami-Warnung hören, sollten Sie den Ratschlägen der Lehrer und des anderen Schulpersonals folgen.
- Wenn Sie zu Hause eine Tsunami-Warnung hören, sollten Sie sicherstellen, dass Ihre gesamte Familie über die Warnung Bescheid weiß. Ihre Familie sollte Ihr Haus evakuieren, wenn Sie in einer Tsunami-Evakuierungszone leben. Begeben Sie sich geordnet, ruhig und sicher zum Evakuierungsort oder an einen sicheren Ort außerhalb Ihrer Evakuierungszone. Befolgen Sie die Anweisungen der örtlichen Notfall- und Strafverfolgungsbehörden.
- Wenn Sie am Strand oder in der Nähe des Ozeans sind und spüren, wie die Erde bebt, begeben Sie sich sofort auf eine höher gelegene Stelle. Warten Sie NICHT auf die Ankündigung einer Tsunami-Warnung. Halten Sie sich von Flüssen und Bächen fern, die ins Meer münden, so wie Sie sich im Falle eines Tsunamis auch vom Strand und Meer fernhalten würden. Ein regionaler Tsunami aufgrund eines lokalen Erdbebens könnte einige Gebiete treffen, bevor eine Tsunami-Warnung angekündigt werden kann.
- Tsunamis, die an weit entfernten Orten entstehen, geben den Menschen im Allgemeinen genügend Zeit, sich in höher gelegene Gebiete zu begeben. Bei lokal erzeugten Tsunamis, bei denen Sie vielleicht spüren, wie der Boden bebt, haben Sie möglicherweise nur wenige Minuten Zeit, um sich auf höher gelegenes Gelände zu begeben.
- In vielen tief gelegenen Küstengebieten gibt es hohe, mehrstöckige Hotels aus Stahlbeton. Die oberen Stockwerke dieser Hotels können einen sicheren Zufluchtsort bieten, falls eine Tsunami-Warnung vorliegt und Sie nicht schnell landeinwärts in höher gelegene Gebiete vordringen können. Die örtlichen Zivilschutzverfahren lassen diese Art der Evakuierung in Ihrem Gebiet jedoch möglicherweise nicht zu. Häuser und kleine Gebäude in tief gelegenen Küstengebieten sind nicht dafür ausgelegt, den Auswirkungen des Tsunamis standzuhalten. Bleiben Sie nicht in diesen Gebäuden, wenn eine Tsunami-Warnung besteht.
- Vorgelagerte Riffe und flache Gebiete können dazu beitragen, die Kraft von Tsunamiwellen zu bremsen, große und gefährliche Wellen können jedoch immer noch eine Bedrohung für die Küstenbewohner in diesen Gebieten darstellen. **Bei einer Tsunami-Warnung ist es am sichersten, sich von allen tiefer gelegenen Gebieten fernzuhalten.**

6.1.4 Erdbeben

Erdbeben treten auf, wenn die Gesteinsfestigkeit versagt, und Gesteinsversagen kann durch Erdbeben, Eruptionen, Stürme oder dadurch ausgelöst werden, dass das Gestein auf irgendeine Weise geschwächt wurde. Erdbeben ins Wasser können wiederum Tsunamis auslösen.

Erdbeben, auch **Bergstürze** genannt, umfassen verschiedene Arten von Abbrüchen, Rutschungen und Gleitmassen, die katastrophal schnell, aber auch sehr langsam auftreten können. Selbst langsame Erdbeben sind schädlich (Tab. 6.10). Sie können an Land oder unter Wasser vorkommen.

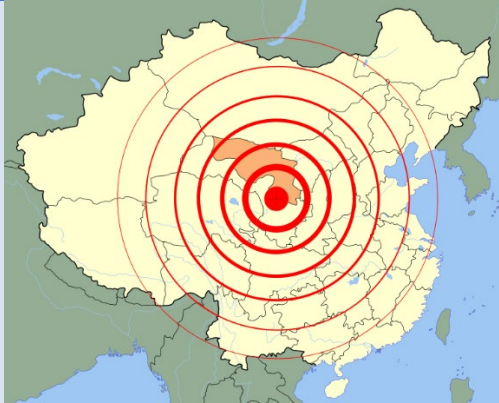
Tab. 6.10. Verschiedene Arten von Bergstürzen, Rutschungen und Strömungen

Rock failure type	Description	Image	Source
Steinschlag, Felssturz	Steine stürzen oder fallen steile Hänge oder Klippen aufgrund der Schwerkraft mit katastrophaler Geschwindigkeit hinunter.		Steinschlag in den Bergen von British Columbia, Kanada, 2011
Hang-rutschung	Steine und Schlamm stürzen zusammen als dichte Masse und nicht als einzelne Blöcke, mitunter mit katastrophaler Geschwindigkeit einen Hang hinab.		Hangrutschung am Oddicombe Beach, Devon, England, 2010
Gleitmassen	Gleitmassen sind Bewegungen von zusammenhängenden Massen, die einen Hang hinuntergleiten. Abgleitungen können katastrophal schnell verlaufen, während andere nur sehr langsam kriechen. Bei einigen Gleitungen handelt es sich um Rotationsbewegungen, bei denen die schräge Fläche nach hinten kippt, während der Block entlang einer gekrümmten Gleitfläche, der sog. Lustrischen Fläche, nach unten gleitet		Rotierte Gleit-schollen im Bereich einer teilweise abgerutschten Straße, Mam Tor, Derbyshire, England

Schuttstrom	Zu den Schuttströmen zählen Murgänge (Muren) und Schuttlawinen. Da sie viel Wasser enthalten, fließen sie mit hohen Geschwindigkeiten von bis zu mehreren Zehnerkilometern pro Stunde, insbesondere steile Hänge und Täler hinunter		Vargas, Venezuela, einen Monat nach einem Murgang im Dezember 1999
Hangkriechen	Oberflächenmaterialien des Bodens kriechen langsam bergab, entweder als rundliche Massen oder in Form von kleinen Terrassen, die später oft als Wege von Nutztieren genutzt werden		Bodenkriechen an einem Hang in Wyoming, USA
			Kleine Terrassenbildungen am Morgan's Hill, Wiltshire, England

Einige der weltweit verheerendsten Erdbeben sind in Tab. 6.11 aufgeführt.

Tab. 6.11. Verheerende Erdbeben

Große Erdbeben	Beschreibung	Bild	Beispiel
Erdbeben in Haiyuan, Dezember 1920	Die Erdbeben wurden durch das Haiyuan-Erdbeben der Stärke 7,8 (in China mit einer Stärke von 8,5 gemessen) am 16. Dezember 1920 ausgelöst (Tab. 6.5). Hänge aus instabilem, feinkörnigem Schluff (Löss) stürzten ein und verursachten mehr als 600 Erdbeben mit einer Gesamtzahl von mehr als 100.000 Todesopfern		Das Haiyuan-Erdbeben von 1920 löste die Haiyuan-Erdbeben in Zentralchina aus

Vargas-Murgang, Venezuela, Dezember 1999	Am 15. Dezember 1999 lösten heftige Regenfälle eine Reihe von Murgängen aus, bei denen mehr als 30.000 Menschen ums Leben kamen, viele Häuser zerstört und staatliche Einrichtungen zum Einsturz gebracht wurden. Ganze Städte verschwanden und Häuser wurden ins Meer gespült		Großflächige Zerstörung im Caraballeda-Gebiet durch einen 6 m dicken Murgang
Schuttstrom am Nevado Huascarán, Yungay, Peru, Mai 1970	Eine Inschrift auf dieser Ruine lautet: „Hier stand eine Stadt, in der 35.000 Menschen lebten. Nach einem Erdbeben und dem anschließenden Erdrutsch vom Huascarán [dem Vulkan im Hintergrund] ist hier nur noch ein Steintrümmer [sic] zu sehen. Es geschah alles innerhalb weniger Minuten am 31. Mai 1970.“		Foto aufgenommen in Yungay, zehn Jahre nach der Tragödie – im Vordergrund das Gebäude mit der Inschrift
Erdbeben in Khait, Tadschikistan, Juli 1949	Hunderte Erdbeben wurden durch das Khait-Erdbeben der Stärke 7,4 ausgelöst; Feinkörniger, mit Wasser gesättigter Schluff floss mit mehr als 30 m/s und tötete etwa 4.000 Menschen in Khait und etwa 28.000 Menschen in den umliegenden Gebieten		Die Narbe am Berg Chokrak in Tadschikistan und der Erdrutsch, der das Dorf Khait zerstörte

Erdrutsche können plötzlich und katastrophal auftreten, sodass Menschen keine Zeit haben, ihre Häuser zu evakuieren, was zu vielen Todesfällen führt.

Box 6.11. Der Oso-Schlammstrom, 29. März 2014

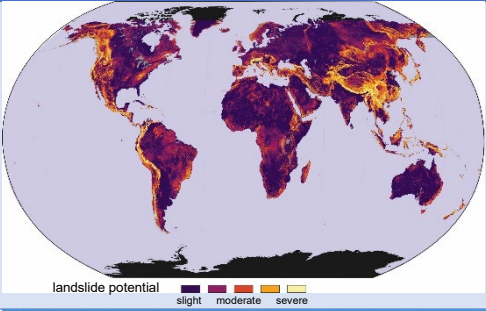
Der verheerendste Erdrutsch in der Geschichte der USA zerstörte rund 50 Häuser und tötete 43 Menschen in der Nähe von Oso in der Cascade Mountain-Region im US-Bundesstaat Washington, in der Nähe von Seattle. Ein mit Wasser gesättigter Hang kollabierte und erzeugte einen gewaltigen Schlammstrom. Augenzeugen berichteten von einer vielleicht acht Meter hohen Schlammwand, die mit dem Geräusch von Güterzügen, Flugzeugabstürzen und „Zehntausenden aufeinanderprallenden Dingen“ durch das Tal auf sie zuraste. Starke Regenfälle in den Wochen zuvor könnten den Hang destabilisiert haben.



Die Schlammlawine von Oso und ihre Narbe

Zur Reduzierung des Erdrutschrisikos werden verschiedene Methoden eingesetzt. Diese reichen von der Kartierung und Überwachung von Gefahren über Warnsysteme bis hin zu verschiedenen Möglichkeiten, Erdrutsche zu verhindern oder ihre Auswirkungen zu verringern, wie in Tab. 6.12 dargestellt.

Tab. 6.12. Methoden zur Reduzierung des Erdbeben- und Steinschlagrisikos

Reduzierung des Erdbebenrisikos	Beschreibung	Bild	Beispiel
Gefahrenkartierung	Erdbebengefahren werden auf lokaler bis globaler Ebene kartiert. Die NASA-Karte zeigt, dass die gefährlichsten Regionen in klimatisch und tektonisch aktiven Gebieten liegen, einschließlich der Gebirgszonen am Plattenrand.		Globale Erdbeben-Gefahrenkarte, zusammengestellt von der US-amerikanischen National Aeronautics and Space Administration (NASA)
Überwachung (Monitoring)	Hänge, bei denen ein Versagen droht, werden mit einer Reihe von Geräten überwacht, darunter drahtgebundene Extensometer, seismische Geophone und Regenmesser sowie durch Messung des Grundwasserdrucks		Ein drahtgebundenes Extensometer-Überwachungsgerät, das per Kabel mit einem instabilen Bereich verbunden ist und Daten per Funk aus der Ferne überträgt
Bauvorschriften und Warnschilder	Bauvorschriften verhindern (sofern sie durchgesetzt werden) den Bau von Gebäuden in hochgefährdeten Bereichen, während Warnschilder sowohl den Verkehr als auch die Öffentlichkeit warnen		Verkehrswarnschild
Reduzierung der Hangneigung und Terrassierung	Gefahren werden verringert, indem die Hänge flacher gestaltet werden und in Abständen eine Reihe horizontaler Terrassen ausgehoben werden. Die Terrassen verringern die Höhe der Felswände und fangen Geröll auf		Felsterrassen entlang der Route 23, Pound Gap, Cumberland Mountains, Virginia, USA
Drainage (Entwässerung)	An der Ober- und Unterseite von Hängen sowie innerhalb von Hängen werden Abflüsse angebracht, um das Wasser schnell abzuleiten und so das Risiko zu verringern, dass ein erhöhter Wasserdruck einen Erdbeben auslöst		Ein französischer Abflussgraben, der mit Kies gefüllt ist, um Sedimente aufzufangen, mit perforierten Rohren (mit kleinen Löchern an der Oberseite), um das Wasser abzuleiten

Bepflanzung	Bäume oder andere Pflanzen werden so gepflanzt, dass ihre Wurzeln lose Materialien zusammenbinden und Wasser ableiten, was zur Stabilisierung von Hängen beiträgt		Lärchen wurden gepflanzt, um die Erosion an einem steilen, lockeren Geröllhang im Skigebiet Broken River, Neuseeland, zu kontrollieren
Entfernung von losem Oberflächenmaterial und Felsverankerungen	Lockerer Schutt wird entfernt und größere Platten und anderes loses Material werden mit langen Felsankern am Hang befestigt		Felsanker am Black Rock an der Küste von Sussex, England
Abdeckung durch Drahtgeflechte und Geotextilien	Diese werden über dem Hang befestigt, um das Herabfallen von Geröll zu verhindern  Beispiele für Geotextilien		Drahtgeflechschutz gegen Steinschlag, Marine Drive, Llandudno, Wales
Abdeckung mit Spritzbeton	Um die losen Felswände zu verbinden und zu stabilisieren, wird eine Schicht Zement aufgesprüht		Eine durch Spritzbeton stabilisierte Klippe, Auckland, Neuseeland
Einschnitte und Flächen durch Mauern und Gabionen geschützt	Die Böden instabiler Böschungen werden geschützt, um die Rutsch- und Absackgefahr zu verringern Mauern bestehen aus Naturstein oder Beton, um lockere Hangwände zu schützen		Ein Straßeneinschnitt, der an der Basis durch eine Natursteinmauer und darüber durch eine Betonstützmauer stabilisiert wird, Rebernice, Slowenien

	und Erosion vorzubeugen	Gabionen sind mit Steinen gefüllte Maschen-draht-kästen. Das Netz ist zum Schutz verzinkt		Ein mit Gabionen stabilisierter Straßeneinschnitt in Deutschland
Barrieren	Barrieren werden gebaut, um Lockermaterial aufzufangen und so Platz zu lassen, dass sich dieser hinter den Barrieren ansammeln kann			Ein Felsfangnetz auf einem Wanderweg bei Multnomah Falls, Oregon, USA
Schutz-tunnel und -hütten	Schutz-tunnel werden gebaut, um Verkehrswege und öffentliche Bereiche vor herabfallenden Trümmern zu schützen			Erdrutsch-/Steinschlagschutz-tunnel, Narvik/Beisfjord-straße 751 in Norwegen
Beton-pfeiler und Stein-schüttung	Am Fuße von Hängen, die in Gefahr sind abzurutschen oder durch Fluss- oder Küstenströmungen erodiert werden könnten, werden Stützpfeiler aus Beton errichtet und große Steinblöcke geschüttet.			Steinschüttung an der Küste in East Sussex, England, zum Schutz für das darüber liegende Dorf Fairlight

6.2 Umweltthemen

Der Mensch beeinflusst die Umwelt auf allen Ebenen, von lokal bis global. Wir gewöhnen uns oft an diese Veränderungen und betrachten sie daher nicht als Problem für die Umwelt. Zu den großen Veränderungen zählen der Siedlungsbau und die Landwirtschaft in weiten Gebieten. Daher unterscheidet sich die Umwelt in vielen Teilen der Erde heute stark von ihrem ursprünglichen, wilden Zustand. Tatsächlich wurden die Auswirkungen menschlicher Aktivitäten in fast allen Umgebungen der Erde registriert, von den tiefsten Meeren bis zu den höchsten Bergen und von den Polen bis zu flachen tropischen Meeren.

6.2.1 Erosion

Wenn man einen Fußweg entlang geht, besteht die Gefahr der Erosion, insbesondere wenn auch viele andere Menschen den Weg benutzen (Abb. 6.6).

	Die einzige Möglichkeit, dieser Erosion durch die Öffentlichkeit vorzubeugen, besteht darin, den Weg zu sperren oder umzuleiten oder ihn durch die Anlage von Stein- oder Holzstegen zu verstärken. Wenn Böden hingegen durch schlechte landwirtschaftliche Methoden oder durch Abbrennen der Vegetation freigelegt werden, kann der Boden leicht durch Wasser und Wind erodiert werden (Tab. 6.13).
Abb. 6.6. Fußwegerosion, Wald von Fontainebleau in der Nähe von Paris, Frankreich	

Tab. 6.13. Bodenerosion

Boden- erosion	Beschreibung	Bild	Beispiel
Boden- erosion durch Wasser	In Hanglagen, die nicht durch Vegetation geschützt sind, können durch Bodenerosion tiefe Rinnen entstehen, die nach ihrer Entstehung nur sehr schwer wieder zurückgewonnen werden können. Solche Rinnengebiete werden Badlands genannt		Bodenerosion im Vordergrund, Provinz Huesco, Spanien. Das grüne Feld zeigt den Unterschied, den gute Anbaumethoden bewirken können
Boden- erosion durch Wind	Durch Winderosion können große Mengen des Bodens in Form von Staub abgetragen werden		Ein Staubsturm im Kreis Hamadan, Iran
	Schlechte Anbaumethoden führten in den 1930er Jahren in der Great Plains-Region im Zentrum der USA zum Verfall der Böden. Als es in den 1930er Jahren zu einer Dürre kam, wurden in den amerikanischen „Dust Bowl“-Regionen große Mengen Boden erodiert		Landwirtschaftliche Maschinen die im Wind-verwehten Staub begraben wurden, Dallas, South Dakota, USA, 1936

Zu den guten landwirtschaftlichen Praktiken zur Erhaltung der Böden gehören:

- Nicht Hangauf- und -abpflügen, sondern beim Konturpflügen quer zum Hang pflügen; Dadurch wird verhindert, dass bei Regenfällen das Wasser bergab strömt. Stattdessen versinkt das Wasser im Boden.
- Bäume in Rinnen pflanzen, damit ihre Wurzeln den Boden verbinden.
- Sicherstellen, dass der Boden möglichst das ganze Jahr über mit Feldfrüchten bedeckt ist, insbesondere in windigen Jahreszeiten.
- Anpflanzung von Baumreihen und Hecken als Windschutz zur Reduzierung der Winderosion.
- Zugabe von Nährstoffen in Form von Dünger zum Boden, damit die Pflanzen weiterwachsen.
- Sicherstellen, dass die Vegetation nicht überweidet und der Boden nicht durch Tiere übermäßig verdichtet wird.

Küsten werden auf natürliche Weise erodiert, wenn die Gezeiten die Wellen an den Stränden hinauf und hinunter bewegen, insbesondere bei Stürmen. Dies stellt kein Problem dar, es sei denn, es betrifft Gebiete, in denen Menschen leben, Küstenverbindungen bestehen oder Strände von Touristen genutzt werden. Verschiedene Methoden zur Reduzierung der Küstenerosion sind in Tab. 6.14 aufgeführt.

Tab. 6.14. Methoden zur Reduzierung der Küstenerosion

Reduzierung der Küstenerosion	Beschreibung	Bild	Beispiel
Buhnen	Buhnen sind Barrieren aus Holz, Felsbrocken oder Beton, die über Strände gebaut werden, um die Bewegung von Sedimenten entlang des Strandes zu reduzieren. Das Sediment lagert sich auf einer Seite ab und bildet eine Reihe kurzer, gekrümmter Strandabschnitte		Felsige Buhne am Strand „du Prevent“ in Capbreton, Landes, Frankreich
Deiche	Deiche bestehen aus großen Felsbrocken, behauenen Steinen, die zementiert werden können, oder Beton, um Küstengebiete zu schützen		Welle trifft auf einen Deich bei Plogoff, Finistère, Bretagne, Frankreich
Steinschüttungen	Steinschüttungen an erosionsgefährdeten Strandabschnitten		Steinschüttung und Deich, Beesands, Devon, England

Tetra- poden	Große Betonkonstruk- tionen, die speziell dafür entwickelt wurden, die Kraft der Wellen zu brechen		Tetrapoden in einem Wellenbrecher bei Górky Wschodnie, Danzig, Polen an der Ostseeküste
-------------------------	--	--	---

Eines der Probleme bei der Verringerung der Erosion an einem Küstenabschnitt besteht darin, dass das Gebiet möglicherweise die Sedimentquelle für andere Gebiete weiter entlang der Küste war. Wenn also ein Küstenabschnitt geschützt wird, kann die Erosion in anderen nahegelegenen Bereichen zunehmen. Das verdeutlicht, dass Küstenbau in dynamischen Küstengebieten anderswo „unvorhergesehene Folgen“ haben kann.

6.2.2 Änderungen im Drainagesystem

Die meisten Gebäude und andere Bauwerke leiten Regenwasser ab. Sobald Regenwasser in die Kanäle gelangt, fließt es schneller ab und verursacht eher Erosion. Daher sind für Gebäude Dachrinnen erforderlich, für Dachrinnen müssen spezielle Kanäle oder Regenabflüsse gebaut werden, und die Flüsse, in die sie münden, müssen so gestaltet sein, dass die Erosion verringert wird (Abb. 6.7). All dies führt dazu, dass Regenwasser von bebauten Flächen weggeleitet wird und nicht im Boden versickern kann, um die Grundwasserleiter wieder aufzufüllen. Es kann dabei flussabwärts auch zu Sturzfluten kommen. Diesem Problem begegnet man mancherorts dadurch, dass nicht alles zubetoniert oder asphaltiert wird, sondern bewusst Bereiche für das Versickern des Regenwassers im Boden gelassen werden.



Abb. 6.7. Sturmabfluss, Dobney Avenue, Wagga Wagga, New South Wales, Australien

6.2.3 Abfallentsorgung

Der Mensch produziert enorme Mengen an Abfall. Nach Schätzungen der Weltbank produziert jeder Mensch auf der Erde durchschnittlich mehr als 1 kg Abfall pro Tag. Allerdings ist die Zahl ungleichmäßig, da einige Regionen weitaus mehr Abfall produzieren als andere.

Viele Menschen werfen ihren Müll in die Mülltonne und denken nicht weiter darüber nach, was mit dem Müll passiert. Aber alle Abfälle müssen verwaltet werden. Die Methoden der Abfallbewirtschaftung unterscheiden sich von Region zu Region (Abb. 6.8 und 6.9) und haben sich im Laufe der Zeit geändert, aber moderne Methoden beinhalten normalerweise die wichtigsten Grundsätze „Reduzieren, Wiederverwenden und

Recyclen“. Ziel ist es, den größtmöglichen Wert aus dem Abfall zu ziehen und möglichst wenig Material zu entsorgen.



Abb. 6.8. Abfallmanagement in Kathmandu, Nepal



Abb. 6.9. Abfallmanagement in Stockholm, Schweden

So viel Material auch wiederverwendet und recycelt werden kann, einiges muss letztendlich entsorgt werden. Die wichtigsten Abfallarten, die deponiert werden müssen, sind in Tab. 6.15 aufgeführt.

Tab. 6.15 Abfallstoffe, die entsorgt werden müssen

Reststoff	Beschreibung	Bild	Beispiel
Inerter Abfall	Inerte Abfälle sind chemisch nicht reaktive Abfälle; Dazu zählen Bauschutt und Material abgerissener Gebäude. Allerdings kann dieser noch einige chemisch reaktive Materialien wie Papier, Holz und Gipskarton sowie gefährliche Materialien wie Asbest enthalten		Trümmer eines abgerissenen Gebäudes in Milovice, Tschechische Republik
Hausmüll	Hausmüll ist Hausmüll, der verschiedenste Materialien enthält. Beim Zerfall entsteht eine giftige Flüssigkeit, das sog. Sickerwasser und es werden Gase, darunter Methan, freigesetzt		Hausmüll wird auf einer australischen Mülldeponie verdichtet
Giftmüll	Giftmüll ist ein fester oder flüssiger, chemisch reaktiver Abfall, der beim Verschlucken, Einatmen oder der Aufnahme über die Haut gesundheitsschädlich sein kann. Darunter sind Farben, Öle und eine Vielzahl von Chemikalien, die		Giftmülldeponie Valley of the Drums, Kentucky, USA in den 1980er Jahren. Orte wie dieser haben das Umweltrecht in den USA verändert

	meistens auf undurchlässigen Mülldeponien entsorgt werden		
Radio-aktiver Müll	Radioaktiver Abfall setzt über Tausende von Jahren oder länger weiterhin schädliche Strahlung frei. Üblicherweise wird in schwach-, mittel- und hochaktive Abfälle eingeteilt. Schwach radioaktiver Abfall kann nahe der Oberfläche vergraben werden, hoch radioaktiver Abfall muss jedoch in tiefen Bergwerken oder unterirdischen Deponien entsorgt werden.		Entsorgung schwach radioaktiver Abfälle in Nevada, USA

Hausmüll und Giftmüll werden ordnungsgemäß an speziell dafür vorgesehenen Standorten entsorgt. Die besten Standorte sind alte Steinbrüche und Ziegelgruben in undurchlässigem Gestein, es werden aber auch Mulden in undurchlässigen Landflächen genutzt. Die Undurchlässigkeit verhindert, dass **giftiges Sickerwasser** ins Grundwasser sickert und Gase in die angrenzenden Grubenwände entweichen. An durchlässigeren Standorten können die Bodenschichten mit teuren undurchlässigen Kunststoffmembranen ausgekleidet werden (Abb. 6.10). In Gebieten, in denen es keine Mulden oder Steinbrüche gibt, können Deponien in niedrigen Hügeln errichtet werden, die abgedeckt und nachfolgend in die Landschaftsgestaltung einbezogen werden.



Abb. 6.10. Deponie der South East New Territories, Hongkong, ausgekleidet mit Geotextilmembran

Wenn Deponien voll sind, werden sie sorgfältig geformt und dann mit Ton oder einem anderen undurchlässigen Material abgedeckt, um das Regenwasser fernzuhalten, welches das Sickerwasser ausspülen könnte. Dann werden sie mit Mutterboden bedeckt und mit Methan-Entlüftungsöffnungen versehen, damit das Gas entweichen kann. Abschließend werden sie mit Gras oder anderen Pflanzen bepflanzt, damit sich der Standort besser in die Umgebung einfügt. An einigen Standorten wird das Methan gesammelt und zur Energieerzeugung genutzt, wodurch sein Beitrag zu den Treibhausgasen in der Atmosphäre verringert wird.



Abb. 6.11. Methangas-Entlüftungsöffnungen auf einer alten Landschaftsdeponie, auf der in der Vergangenheit Ölschiefer abgebaut wurde, Seafield, West Lothian, Schottland

Schließlich werden auf gut verwalteten Deponien Bohrlöcher in das umliegende Gestein gebohrt, um das Grundwasser auf Verschmutzungen zu überwachen (Abb. 6.12).

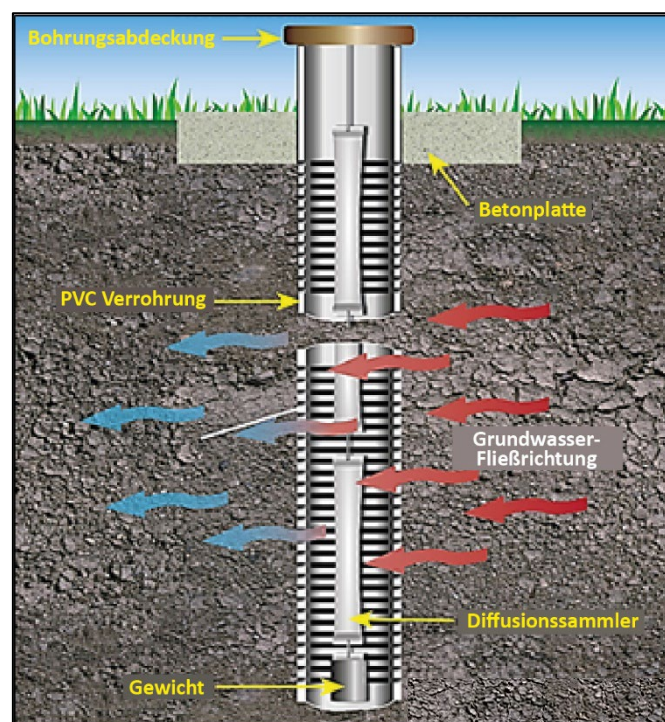


Abb. 6.12. Darstellung eines typischen Grundwasserüberwachungsbrunnens

6.2.4 Umweltverschmutzung

Schadstoffe sind Abfallstoffe, welche die Umwelt verunreinigen. Drei Faktoren beeinflussen den Grad der Verunreinigung: ihre chemische Zusammensetzung, ihre Konzentration und ihre Persistenz (wie lange sie giftig bleiben).

Grundwasser kann durch Leckagen aus Deponien, aber auch durch eine Reihe industrieller und landwirtschaftlicher Prozesse verunreinigt werden, wie in Abschnitt 4.2.1.3 dargestellt. Unter diesen Umständen ist die Überwachung durch Grundwasserbrunnen wie in Abb. 6.12. sehr wichtig.

Ähnliche Prozesse können auch Oberflächenwasser verunreinigen, weshalb Wasser für menschliche und industrielle Zwecke vor der Verwendung aufbereitet werden sollte.

Box 6.12. Säurehaltiger Abfluss aus einer Mine

In alten Bergbaugebieten entsteht ein Problem, wenn das Pumpen von Wasser aus den Minen stoppt und diese sich mit sauerstoffhaltigem Wasser füllen. Dieses reagiert mit den Mineralen in der Mine, löst sie auf und bringt sie als sehr saures, eisenreiches Wasser an die Oberfläche, das in Bächen, in die es hineinfließt, alles Leben töten kann. Da die Mine nicht mehr in Betrieb ist, fehlen oft die Mittel, um dieses kostspielige Problem anzugehen. Es bleibt dann den örtlichen Behörden überlassen, die Verschmutzung zu beseitigen.



Säurehaltiger Abfluss aus einer alten Mine,
Rio Tinto, Spanien

Neben der Oberflächen- und Grundwasserverschmutzung ist eine Vielzahl weiterer Verschmutzungsarten bekannt. Dabei handelt es sich um:

- Luftverschmutzung – Chemikalien, Gase und Partikel wie Ruß, die in die Atmosphäre gelangen
- Bodenverunreinigung – Industrie- und Agrarchemikalien gelangen in den Boden
- Müll wegwerfen (littering) – öffentliches Wegwerfen von Müll und illegale Müllentsorgung
- Lichtverschmutzung, insbesondere durch Straßenlaternen – Menschen, die in städtischen Gebieten leben, sehen am Nachthimmel weniger Sterne als in dunkleren Gebieten
- thermische Verschmutzung – insbesondere Kühlwasser aus Kraftwerken, die lokale Gewässer erhitzen
- Lärmbelästigung – einschließlich Straßen-, Flug- und Industrielärm
- visuelle Verschmutzung – durch Minen und Steinbrüche (siehe unten), aber auch durch Stromleitungen, Werbetafeln, Windparks, Mülldeponien und verlassene Industriestandorte
- Meeresverschmutzung – sowohl durch behandelte als auch unbehandelte Abfälle, die ins Meer geworfen werden.

In jüngster Zeit wird bei der Bekämpfung der Umweltverschmutzung das Verursacherprinzip angewendet, wonach diejenigen, die die Umwelt verschmutzen, für die Reinigungsarbeiten aufkommen sollen. Heutzutage ist dies in der Regel in die Verträge potenziell umweltverschmutzender Industrien sowie Bergbau- und Steinbruchbetriebe eingebaut, wo aber der Verursacher nicht gefunden werden kann, ist dies nicht möglich.

Es ist sehr schwierig, den Verursacher in Meeresgebieten zu finden, wo es drei Hauptquellen der Verschmutzung gibt: direktes Einbringen der Verschmutzung in die Ozeane, Abfließen von Regen durch Bäche und Flüsse und Schadstoffe aus der Atmosphäre. Schadstoffe können als Abwasser aus der Kanalisation oder als Industrieabfall, einschließlich Bergbauabfällen, direkt ins Meer gelangen. Abflüsse bringen Verschmutzung durch den Bau von Gebäuden, Straßen und Häfen sowie durch landwirtschaftliche Böden, Düngemittel und Pestizide mit sich. Zur Luftverschmutzung zählen Fahrzeugverschmutzung, vom Wind aufgewirbelter Staub und von Mülldeponien aufgewirbelter Müll. Der zunehmende Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre scheint die Ozeane zu versauern, was sich insbesondere auf Korallenriffgemeinschaften auswirkt.

Öl ist eines der am stärksten verschmutzenden Materialien in den Meeren, vor allem durch große Ölverschmutzungen. Der größte Teil der Ölverschmutzung in den Meeren entsteht durch Tanker, die Abwasser abpumpen, durch undichte Pipelines oder durch Öl, das durch Abwasserleitungen in die Umwelt gelangt.

Plastikmüll ist ein großes Problem, weil Plastik so langsam zerfällt. Winzige Mikroplastikkügelchen werden in vielen Küchenschwämmen oder -tüchern, Zahnpasten und Kosmetika verwendet und verschmutzen inzwischen

nachweislich die Meeresumwelt von Küstengebieten bis hin zu Tiefseerinnen. Meerestiere fressen diese Kügelchen mit ihrer Nahrung und Schätzungen zufolge sind mehr als ein Drittel der Fische im Ärmelkanal damit kontaminiert. Mittlerweile sind sie in mehreren Ländern verboten und es besteht die Hoffnung, dass sie bald weltweit abgeschafft werden.



Abb. 6.13. Von Scheuerschwämmen freigesetzte Mikroplastikkügelchen in einer weißen Schüssel; Mikrokügelchen haben eine Größe von einem Millimeter bis zu einem Hundertstel Millimeter

6.2.5 Bergbau/Abbau im Steinbruch

In der Vergangenheit haben Minen und Steinbrüche viele Gebiete der Welt optisch verschmutzt und auch Wasser-, Luft- und Lärmverschmutzung verursacht. Heutzutage gibt es in den meisten Teilen der Welt strenge Umweltkontrollen und eine Reihe von Methoden zur Reduzierung der Umweltverschmutzung, wie in Tab. 5.7 dargestellt. Mittlerweile sind viele alte Bergbaugelände bebaut und alte Steinbrüche zu Landschaftsparks und Naturschutzgebieten umgewandelt worden. Alte Steinbrüche können eine Vielzahl ökologischer Nischen wie Felswände und Teiche bieten, die der Tierwelt in der Region normalerweise nicht zur Verfügung stehen, was sie für die Natur und die Öffentlichkeit gleichermaßen attraktiv macht.



Abb. 6.14. Naturschutzgebiet Heeseberg in einem alten Steinbruch, Niedersachsen

6.2.6 Verbrennung fossiler Brennstoffe und Treibhauseffekt

Wie in Abschnitt 4.3.3 zum atmosphärischen Wandel erörtert, sind viele Wissenschaftler der Meinung, dass die Verbrennung fossiler Brennstoffe zu einem Anstieg des Kohlendioxidgehaltes der Atmosphäre beiträgt, was wiederum zum Klimawandel beiträgt. Beim Verbrennen von fossilen Brennstoffen wird Kohlendioxid freigesetzt, wobei Kohle fast doppelt so viel Kohlendioxid freisetzt wie Erdgas (siehe Abb. 5.6). Aber auch andere industrielle Prozesse setzen Kohlendioxid frei, insbesondere die Herstellung von Zement aus Kalkstein.

Derzeit wird erforscht, ob das bei diesen Prozessen entstehende Kohlendioxid „eingefangen“ und in alte Öl- oder Gasfelder gepumpt werden kann und so nicht in die Atmosphäre gelangt. Die Forschung zeigt, dass „**Carbon Capture**“ (oder „Carbon Capture and Storage“, CCS) möglich, aber auch teuer ist. Bisher gibt es nirgendwo auf der Welt eine groß angelegte CO₂-Abscheidungsanlage (Abb. 6.15).

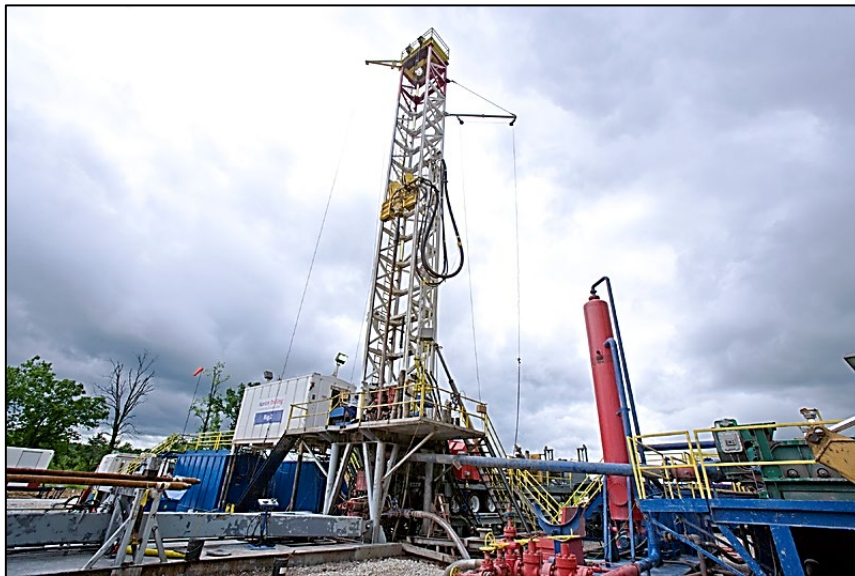


Abb. 6.15. Kohlenstoffabscheidungstechnologie wird in einem Kohlebergwerk getestet

6.3 Auswirkungen auf die Menschheitsgeschichte

Der Einfluss der Geowissenschaften auf den Verlauf der Menschheitsgeschichte ist oft schwer zu erkennen, da viele andere Faktoren gleichzeitig wirkten. Dennoch gibt es Beispiele, bei denen Prozesse auf der Erde entscheidende Auswirkungen hatten.

Box 6.13. Der Untergang der minoischen Kultur

Die minoische Kultur, die auf der Insel Kreta im Mittelmeer beheimatet war, war möglicherweise die erste große Kultur in Europa. Sie dauerte etwa 6600 bis 3400 Jahre v.h. und ihr Zusammenbruch wurde möglicherweise durch den Ausbruch der nahegelegenen Vulkaninsel Thera (heute Santorini genannt) verursacht.

Der Thera-Ausbruch war mit einem Vulkanexplosivitätsindex (VEI) von 6 oder 7 einer der größten Ausbrüche in der aufgezeichneten Geschichte. Es zerstörte die Insel Thera (Santorini), hinterließ einen riesigen Krater und begrub die minoische Stadt Akrotiri unter Schichten vulkanischer Asche. Ein durch den Ausbruch verursachter Tsunami scheint viele minoische Küstenstädte zerstört zu haben, möglicherweise begleitet von Erdbeben. Es kann sein, dass der Ausbruch die Minoer so sehr geschwächt hat, dass das später kommende Volk der Mykener sie leicht besiegen konnte.



Satellitenaufnahme des Kraters von Santorini (Thera) heute

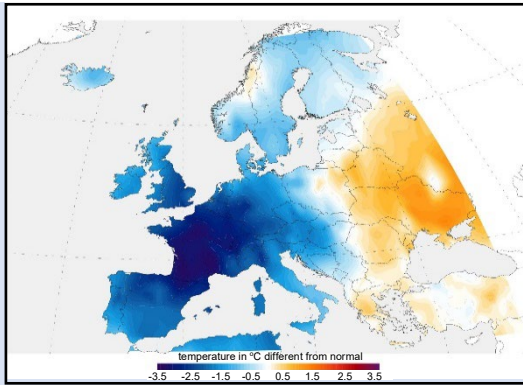
Box 6.14. 'Das Jahr ohne Sommer', 1816

1816 war ein katastrophales Jahr für die Landwirtschaft auf der ganzen Welt, in dem Zehntausende Menschen verhungerten. Es wird angenommen, dass diese globale Katastrophe durch den Ausbruch des Mount Tambora in Indonesien im Jahr 1815 verursacht wurde. Neben Asche wurden bei dem Ausbruch große Mengen Schwefeldioxidgas in die Atmosphäre freigesetzt. Dadurch sanken die globalen Temperaturen um etwa 0,5 °C, was sich wie folgt auswirkte:

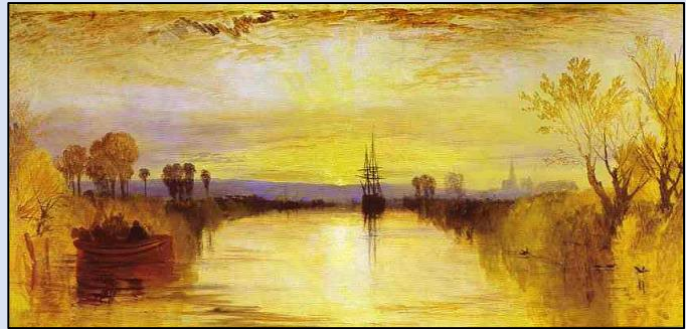
- Veränderungen des indischen Monsuns, was drei Ernteaussfälle zur Folge hatte;
- Kühle Temperaturen und starke Regenfälle führten europaweit zu Ernteaussfällen;
- Fröste, Schnee und ausgedehnter Nebel im Sommer im Landwirtschaftsgürtel der zentralen USA führten dazu, dass Tausende von Menschen anderswohin abwanderten;
- Kaltes Wetter tötete Bäume, vernichtete die Reisernte in Nordchina und überschwemmte das Tal des Flusses Yangtse;
- Maler wie William Turner oder Caspar David Friedrich malten Bilder von wunderschönen Sonnenuntergängen, die durch Asche in der Atmosphäre entstehen;
- Eine Gruppe von Autoren machte Urlaub in der Schweiz und sie waren gezwungen, im Haus zu bleiben, was sie für einen Wettbewerb im Schreiben von Gruselgeschichten nutzten. Bei diesem Wettbewerb wurden die Autoren zu den Büchern über Frankenstein und Dracula inspiriert.

Die Hungersnot von 1816 führte zu Unruhen und weitverbreiteten Krankheiten in verschiedenen Teilen der Welt.

Die hohe Schwefeldioxidkonzentration in der Atmosphäre von 1816 wurde in grönländischen Eisbohrkernen aufgezeichnet.



Temperaturrückgang 1816 in Europa



Chichester Canal, eine Sonnenuntergangsszene, möglicherweise beeinflusst durch Vulkanasche in der Atmosphäre, gemalt in England von J.M.W. Turner

6.3.1 Ressourcenkriege

Many wars have been fought over resources in past times. Sometimes resources are the main factor in the conflict, while they play more minor roles at other times, but they have clearly been key parts of war and peace in the past.

Box 6.15. Wasserkriege

Die Region Naher Osten umfasst die Länder der Arabischen Halbinsel und die umliegenden Gebiete Ägypten, Syrien, Irak, Iran und Türkei. Dieses Gebiet wird manchmal als „fruchtbarer Halbmond“ bezeichnet, da Wasser, insbesondere aus den Flüssen Nil, Tigris und Euphrat, zur Bewässerung und zum Pflanzenanbau genutzt wurde und die Grundlage für einige der frühesten Zivilisationen der Erde vor etwa 5000 Jahren bildete. In der langen Geschichte dieser Gegend gab es viele Kriege, einige davon um die Wasserversorgung. Beispielsweise basierte das Assyrische Reich auf weit verbreiteter Bewässerung, und es gibt Aufzeichnungen über assyrische Könige, welche die Bewässerungssysteme ihrer Feinde zerstörten oder Trümmer in Bewässerungskanäle schütteten, um die Städte ihrer Feinde zu überfluten.

Einer der neueren „Wasserkriege“ im Nahen Osten war der Konflikt um den Jordan Mitte der 1960er Jahre. Wasser aus dem Jordan ist eine wichtige Bewässerungsquelle in Israel. Ohne sie wäre es möglicherweise unmöglich, die Bevölkerung mit Wasser zu versorgen. Der Jordan entspringt jedoch außerhalb Israels und die umliegenden arabischen Staaten beschlossen, Wasser aus dem Quellgebiet des Jordan umzuleiten, um zu verhindern, dass 35 % des Wassers Israel erreichen. Dem widersetzten sich die Israelis im Sechs-Tage-Krieg von 1967, was dazu führte, dass der Plan aufgegeben wurde.



Der Jordan bringt Wasser aus dem Norden nach Israel

Box 6.16. Ölkriege

Viele der seit den 1930er Jahren geführten Kriege wurden als „Ölkriege“ bezeichnet, da die Ölressourcen eines Landes einer der Schlüsselfaktoren waren, die den Krieg überhaupt erst verursachten.

Der erste Krieg, der als „Ölkrieg“ bezeichnet wurde, fand Mitte der 1930er Jahre zwischen Bolivien und Paraguay in Südamerika statt. Obwohl Paraguay gewann, starben Zehntausende Soldaten und beide Länder wurden schwer getroffen. In den folgenden Jahren wurden in der Gegend keine kommerziellen Ölmengen gefunden, obwohl in jüngerer Zeit sowohl Öl als auch Gas gefunden wurden.

Der erste Golfkrieg im Jahr 1990 wurde durch die Invasion Kuwaits durch den Irak ausgelöst; Streitigkeiten zwischen den Ländern über Öl waren ein wichtiger Grund für die Invasion. Die kuwaitischen Ölfelder wurden in Brand gesteckt, wodurch große Schäden verursacht wurden, riesige Rauchwolken in die Atmosphäre strömten und weitreichende Umweltverschmutzung verursacht wurde. Es dauerte mehrere Monate nach Kriegsende, bis alle Brände gelöscht und die Ölquellen verschlossen waren.

Ein wichtiger Teil der Strategie während des zweiten Irak-Krieges, der 2003 begann, bestand darin, die irakischen Ölfelder zu sichern. Dies wurde ohne Schäden an den Ölfeldern durchgeführt.

Es wurde argumentiert, dass bei vielen anderen Konflikten weltweit Ölressourcen einer der wichtigsten Faktoren sind.



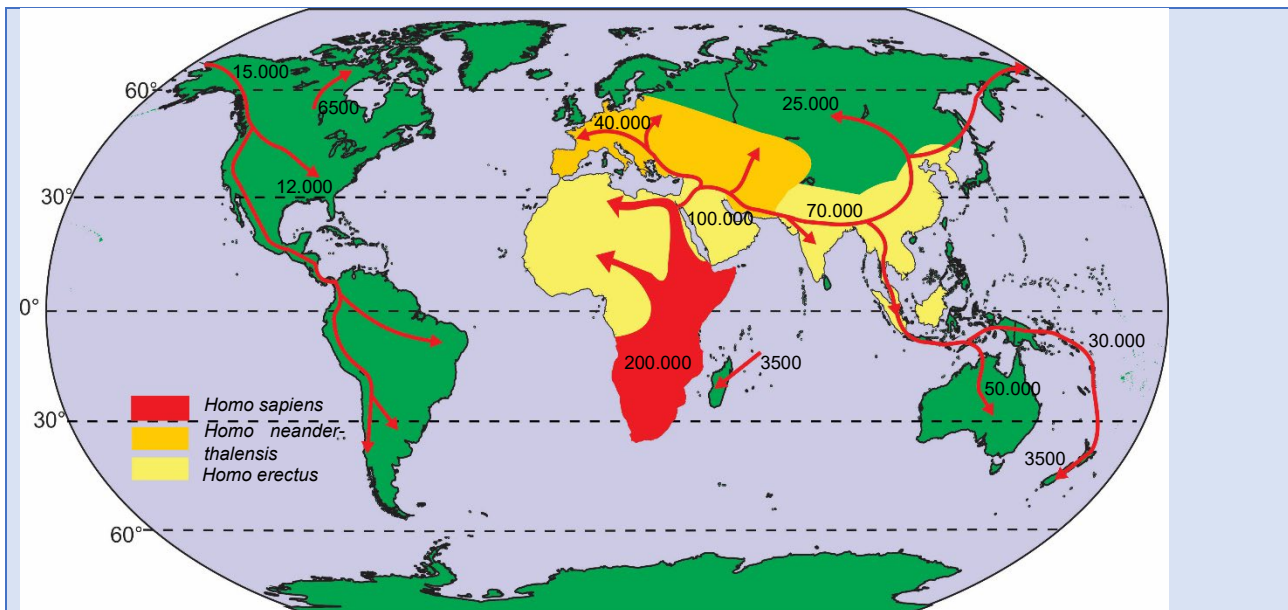
Brennende Ölfelder hinter einem verlassenen Panzer, Kuwait, 1991

6.3.2 Migration aufgrund des Klimawandels

Der natürliche Klimawandel hat in der geologischen Vergangenheit aufgrund des sich ändernden Klimas und der damit verbundenen Veränderungen des Meeresspiegels zur Migration von Tieren und Menschen geführt. Änderungen des Meeresspiegels und die Bewegung von Klimazonen und tektonischen Platten müssen in der geologischen Vergangenheit zu enormen Veränderungen der Lebensräume geführt haben, aber die detailliertesten Beweise für Wanderungen haben wir über diejenigen, die in jüngerer geologischer Zeit stattgefunden wurden.

Box.6.17. Die Migration der frühen Menschen aus Afrika

Die Migration der frühen Menschen und vieler anderer Gruppen ist eng mit dem Klimawandel verbunden. Die Sahara-Pumpen-Theorie erklärt, dass Nordafrika und der Nahe Osten in feuchteren Perioden zu Grasland wurden, was vielen verschiedenen Arten die Migration von Afrika nach Asien ermöglichte. Doch in trockeneren Zeiten verwandelten sich diese Gebiete wieder in Wüsten, da die „Sahara-Pumpe“ zum Stillstand kam. Die Pumpentheorie wurde verwendet, um Migrationswellen verschiedener Säugetiere, darunter Pferde, sowie verschiedener Gruppen früher Menschen zu erklären. Die erste frühe menschliche Migration von Afrika nach Asien scheint vor etwa 1,75 Millionen Jahren stattgefunden zu haben. Als sich später menschliche Gruppen in Afrika entwickelten, wanderte eine von ihnen vor etwa 70.000 Jahren auf derselben Route aus, um Asien und schließlich auch Europa, Amerika und den Rest der Welt zu kolonisieren.



Die Ausbreitung früher menschlicher Gruppen auf der ganzen Welt in Jahren v.h.:
Erste Auswanderung – *Homo erectus*; zweite – *Homo neanderthalensis*; dritte – *Homo sapiens*

Box 6.18. Die Austrocknung der Sahara

Noch vor etwa 6000 Jahren war das Gebiet, das wir heute Sahara-Wüste nennen, Grasland mit viel Niederschlag. Die dort lebenden Menschen hielten Szenen in Felsmalereien fest. Darauf sind viele verschiedene Tiere zu sehen, die damals in den Graslandgebieten gelebt haben müssen. Im unteren Teil des Bildes sind Kamele über andere Tiere gemalt und müssen daher später hinzugefügt worden sein. Dies könnte der Beginn des Klimawandels sein, der viele Teile des Tschad zu einer der trockensten Regionen der Erde machte, mit sehr wenig Wasser, Vegetation und Tierwelt.

Heute sorgt die in der Atmosphäre absinkende Luft der Hadley-Zirkulationszelle für sehr trockene Bedingungen in der Sahara. Die Befunde zeigen jedoch, dass regnerische äquatoriale Bedingungen sich weiter vom Äquator entfernen können als heute. Dies scheint zu erklären, warum Teile der Sahara in der Vergangenheit so viel feuchter waren. Wissenschaftler untersuchen weiterhin, warum sich Teile von Klimazonen auf diese Weise bewegen könnten.



Manda-Guéli-Höhle, Ennedi-Gebirge, Nordost-Tschad



Vom Wind erodierte Felsformation, Ennedi-Gebirge, Tschad

Box 6.19. 'Doggerland' im Gebiet der Nordsee

Doggerland ist der Name eines Gebiets, das heute unter der Nordsee liegt und einst trockenes Land war, welches die heutige Insel Großbritannien mit dem Festland Europa verband.

Das Gebiet war ein breites, flaches Tal mit niedrigen Hügeln und Sumpfgebieten sowie einer reichen Vegetation und Tierwelt, das von Jagd- und Sammlergruppen von Menschen bewohnt wurde. Das zeigen die Funde von Unterwasserdredgen, die prähistorische Werkzeuge und Waffen sowie Knochen von Mammuts, Löwen und anderen Tieren heraufzogen. Als die Eiskappen am Ende der letzten Eiszeit schmolzen, stieg der Meeresspiegel und überflutete das Gebiet nach und nach. Ein Tsunami im Zusammenhang mit einer plötzlichen Unterwasserrutschung in der nördlichen Nordsee vor etwa 8200 Jahren könnte einige Gebiete überschwemmt haben. Der steigende Meeresspiegel scheint Doggerland vor etwa 6.000 Jahren endgültig überflutet zu haben.

Seismische Untersuchungsdaten von Ölexplorationsunternehmen wurden verwendet, um zu rekonstruieren, wie Doggerland in der Vergangenheit aussah, bevor Menschen und andere Wildtiere durch den steigenden Meeresspiegel vertrieben wurden. Die Überschwemmung von Doggerland schnitt Großbritannien vom europäischen Festland ab und machte England, Wales und Schottland zu einer Insel.



Karte von Doggerland
um 12.000 Jahre v.h.

Wenn der Klimawandel heute zu großen Veränderungen des Meeresspiegels oder größeren Verschiebungen von Klimazonen führt, können wir in Zukunft mit mehr Wanderungen verschiedener Tierarten rechnen.

7 Erforschung des Erdsystems durch Feldarbeiten und Messungen

Geowissenschaftler erforschen die Erde auf vielfältige Weise vom atomaren bis zum globalen Maßstab. Diese reichen von der Datenerfassung durch Beobachtung und Messung während der Feldarbeit bis zum Einsatz von Fernerkundungstechniken, von der Modellierung geologischer Prozesse im Labor bis hin zur Modellierung am Computer und vom Einsatz hochtechnologischer Beobachtungs- und Messgeräte im Labor bis hin zu globalen Überwachungsprogrammen der Geosphäre, Atmosphäre, Hydrosphäre und Biosphäre.

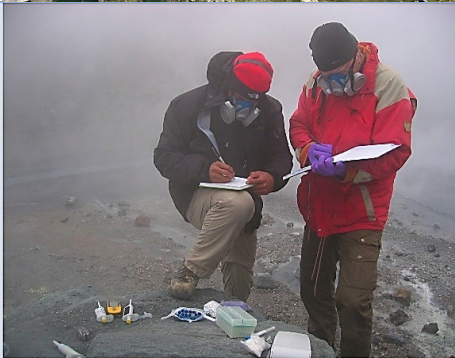
Geowissenschaftler sind alle diejenigen, die sich mit dem System Erde befassen und über ein breites Spektrum an Fachwissen verfügen, von denen einige in Tab. 7.1 aufgeführt sind.

Tab. 7.1. Einige der vielfältigen geowissenschaftlichen Fachgebiete

Geowissenschaftliche Fachrichtung	Beschreibung	Bild	Beispiel
Klimatologe	Klimatologen untersuchen langfristige Wettermuster in einer Region, normalerweise über 30-Jahres-Zyklen. Ihre Arbeit reicht von der Entnahme von Wasser-, Boden-, Eis- oder Sedimentkernproben bis hin zur Nutzung von Satellitendaten		Aufzeichnung von Gletscherdaten, Glacier National Park, Montana, USA
Ingenieur-geologe	Ingenieurgeologen tragen zu großen Bauprojekten bei, indem sie geologische Kartierungen durchführen, Bohrarbeiten leiten und interpretieren, Daten analysieren und Empfehlungen und Berichte erstellen		Bohrkernentnahme und beschreibung in West-Australien
Umweltgeologe	Umweltgeologen überwachen die Umwelt während der Gewinnung von Rohstoffen oder der Abfallentsorgung und sanieren die Umgebung anschließend mithilfe einer breiten Palette von Daten, die vor Ort und anderswo gesammelt werden		Begutachtung eines verlassenen Bergbaugebietes in den USA
Explorations-geologe	Explorationsgeologen sammeln Daten vor Ort und verknüpfen sie mit Karten, geochemischen, geophysikalischen und Bohrdaten, um unterirdische Gesteinsstrukturen während der Exploration nach Öl-, Gas- und		Untersuchung frischer Bohrkern, Chile

	Mineralvorkommen zu kartieren		
Geochemiker	Geochemiker untersuchen die geochemische Zusammensetzung der Erde auf atomarer bis globaler Ebene. Geochemie wird bei der Suche nach Öl, Gas und Mineralen sowie zur Überwachung der Umweltverschmutzung eingesetzt		Untersuchung der Geochemie vulkanischer Gase, Mount Baker, Washington, USA
Geomorphologe	Geomorphologen untersuchen, wie sich die Erdoberfläche bildet und durch Erdprozesse verändert wird; Sie untersuchen Landschaften, die mit Verwitterung, Erosion, Flüssen, Küsten und Vereisung in Zusammenhang stehen		Untersuchung der Vereisung, zentraler Rongbuk-Gletscher, Everest, Nepal
Geophysiker	Geophysiker erforschen Erdbeben und führen Erdbebengefährdungsbeurteilungen durch. Sie interpretieren seismische Daten, die bei der Exploration von Öl, Gas und Mineralen gesammelt werden, führen Standortuntersuchungen durch und untersuchen die Struktur der Erde von der Oberfläche bis zum Kern		Aussetzen eines Meeresboden-seismometers vor Barbados
Hydrogeologe	Hydrogeologen suchen nicht nur nach Wasser und bewerten die Entwicklung des Wassers, sondern überwachen auch das Grundwasser auf Verschmutzung und Gesundheitsrisiken, beteiligen sich an der Sanierung von Standorten und untersuchen die Entwässerung von Bergwerken und Steinbrüchen		Grundwasserprobenahme in Deutschland

Meteorologe	Meteorologen nutzen ein breites Spektrum wissenschaftlicher Methoden, um das Wetter sowie seine Physik und Chemie zu messen, zu verstehen, zu modellieren und vorherzusagen		Messung der Schneehöhe im Iran
Bergwerksgeologe	Bergbaugeologen untersuchen die Zusammenhänge zwischen der Geologie und den Erzvorkommen, um bekannten Erzvorkommen zu folgen und neue zu finden. Sie beraten zu kurz- und langfristigen Bergbauplänen mithilfe einer Reihe von Erhebungsmethoden		Flussspatader in einer Mine im Peak District, England
Oceanograph	Ozeanographie umfasst biologische, chemische, geologische und physikalische Fachgebiete. Geologische Ozeanographen untersuchen aktuelle und vergangene ozeanische Prozesse, einschließlich Plattentektonik, Ozeanzirkulation und Klimawandel		Einrichtung von Geräten zur Überwachung des Meeresbodens
Paläontologe	Paläontologen untersuchen fossiles Leben, von Mikrofossilien bis hin zu Dinosauriern, und untersuchen die Entwicklung des Lebens und die Paläoumgebungen, in denen einst Pflanzen und Tiere lebten. Fossilien werden verwendet, um Gesteine zu datieren und zu korrelieren und um Informationen über vergangene Temperaturen und Klimazonen zu liefern		Paläontologe mit dem Oberschenkelknochen eines großen Dinosauriers, Simbabwe

Forschungs-geologe	Grundlagenforschende Geologen arbeiten normalerweise an Universitäten, Museen oder für Regierungsbehörden. Geowissenschaftler an Universitäten halten Vorlesungen für Studierende, leiten Doktorandenprogramme und veröffentlichen ihre eigenen Forschungsergebnisse		Untersuchung eines Granit-Aufschlusses in den Fosdick Mountains, Antarktis
Sedimentologe	Sedimentologen untersuchen moderne Sedimente und alte Sedimentgesteine, um ihre Eigenschaften zu erforschen und die Prozesse zu verstehen, die sie ursprünglich gebildet haben. Sie arbeiten im Feld und im Labor und erstellen physikalische und Computermodelle		Sedimentgrößenanalyse im Labor, Naval Oceanographic Office, Mississippi, USA
Bodenkundler	Bodenkundler klassifizieren und kartieren Böden und testen ihre physikalischen, chemischen, biologischen und Fruchtbarkeitseigenschaften vor Ort und im Labor. Sie bewirtschaften Böden für die Landwirtschaft und sanieren Böden in umweltgeschädigten Gebieten		Vermessung von Bodenkrusten mit einem Quadrat, Tucson, Arizona, USA
Lehrer	Lehrer unterrichten Schüler und Studierende von der Grundschule über die weiterführende Schule bis hin zur Universität und darüber hinaus in Geowissenschaften, sowohl drinnen als auch draußen		Ein Lehrer diskutiert mit einer Gruppe von Schülern über Feldforschung in der Nähe von Ingleton, Yorkshire, Großbritannien
Vulkanologe	Vulkanologen erforschen alle magmatischen Prozesse, auch die aktiver Vulkane, und untersuchen Eruptionen, Lavaströme und die Freisetzung vulkanischer Gase, um herauszufinden, wie sie sich in Zukunft verhalten könnten		Testen von Proben im Krater des Mutnovsky-Vulkans, Kamtschatka, Ostrussland

Geowissenschaftler sollten bei ihrer Arbeit jederzeit dem geoethischen Versprechen folgen.

Box 7.1. Das geoethische Versprechen

Ich verspreche ...

- *Ich werde Geowissenschaften im vollen Bewusstsein der gesellschaftlichen Auswirkungen praktizieren und mein Bestes für den Schutz des Erdsystems zum Wohle der Menschheit tun.*
- *Ich verstehe meine Verantwortung gegenüber der Gesellschaft, zukünftigen Generationen und der Erde für eine nachhaltige Entwicklung.*
- *Ich werde bei meiner Arbeit das Interesse der Gesellschaft in den Vordergrund stellen.*
- *Ich werde meine geowissenschaftlichen Kenntnisse niemals missbrauchen und mich Zwängen oder Gewalt widersetzen.*
- *Ich bin jederzeit bereit, meine professionelle Unterstützung zu leisten, wenn sie benötigt wird, und werde mein Fachwissen den Entscheidungsträgern unparteiisch zur Verfügung stellen.*
- *Ich werde mein geowissenschaftliches Wissen lebenslang weiterentwickeln.*
- *Ich werde bei meiner Arbeit stets intellektuelle Ehrlichkeit wahren und mir der Grenzen meiner Kompetenzen und Fähigkeiten bewusst sein.*
- *Ich werde mich dafür einsetzen, den Fortschritt in den Geowissenschaften, den Austausch geowissenschaftlichen Wissens und die Verbreitung des geoethischen Ansatzes zu fördern.*
- *Bei meiner Arbeit als Geowissenschaftler werde ich die Prozesse auf der Erde stets voll und ganz respektieren*

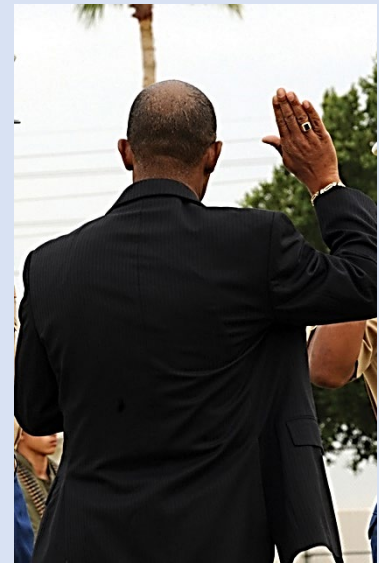
Ich verspreche!

Dieses wichtige Versprechen sollte jeder, der Geowissenschaften studiert, abgeben. Es kann auch etwas vereinfacht werden:

Ich verspreche ...

- *Ich werde in den Geowissenschaften arbeiten, um die Menschen auf der Erde und alle Erdsysteme bestmöglich zu schützen.*
- *Ich verstehe es als meine Aufgabe, durch nachhaltige Entwicklung dazu beizutragen, die Erde für die Zukunft zu schützen.*
- *Ich werde bei meiner Arbeit das Interesse aller Menschen in den Vordergrund stellen.*
- *Ich werde mein geowissenschaftliches Wissen niemals missbrauchen, egal was andere Leute sagen oder tun.*
- *Ich werde immer bereit sein, meine Kenntnisse der Geowissenschaften hilfreich einzusetzen und werde versuchen, den Menschen, die Entscheidungen treffen, eine ausgewogene Sichtweise zu vermitteln.*
- *Ich werde mein geowissenschaftliches Wissen im Laufe meines Lebens weiterentwickeln.*
- *Ich werde immer so ehrlich sein, wie ich nur sein kann.*
- *Ich werde versuchen, das Studium der Geowissenschaften voranzubringen, geowissenschaftliches Wissen zu teilen und allen dabei zu helfen, sich geoethisch zu verhalten.*
- *Ich werde in meinem Geowissenschaftsstudium immer die Prozesse auf der Erde respektieren.*

Ich verspreche!



Vereidigung in Yuma, Arizona



Afghanische Kinder

Geowissenschaftler in der Ausbildung und während ihres Berufslebens nutzen ein breites Spektrum an Fähigkeiten, um die Umwelt zu beobachten, zu messen und zu überwachen, ihre Beobachtungen zusammenzuführen, um zu erklären, wie Umwelten heute und in der geologischen Vergangenheit funktionieren, und um geologische Fragen und Fragestellungen zu erforschen.

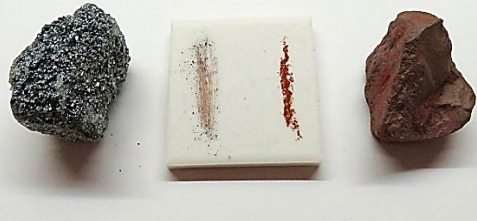
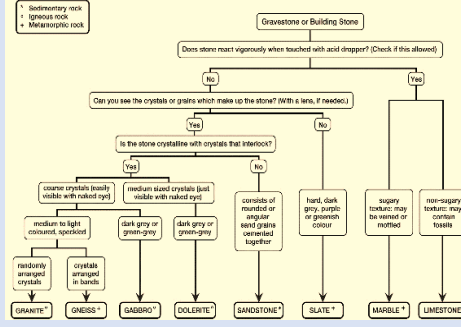
Feldarbeiten sollten nur nach sorgfältiger Risikobewertung und unter Einhaltung von Gesundheits- und Sicherheitsvorschriften sowie geologischen Verhaltenskodizes durchgeführt werden. Einzelheiten zu all diesen Bereichen sind im Internet frei verfügbar.

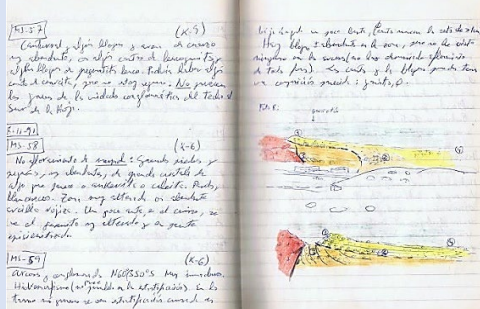
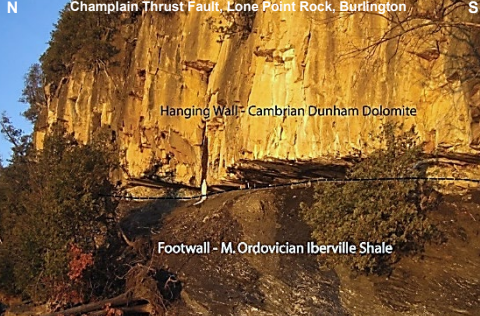
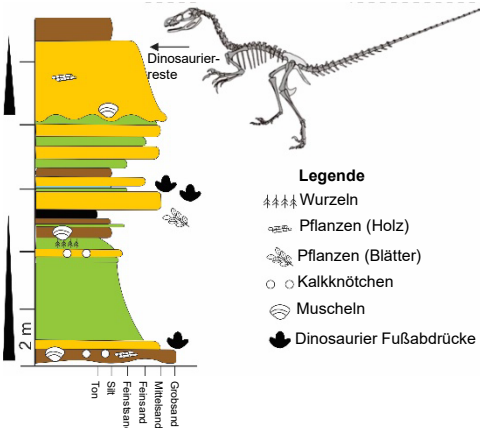
7.1 Beobachtung, Messung und Aufzeichnung

Geowissenschaftliche Beobachtungen, Messungen und Aufzeichnungen werden in verschiedenen Maßstäben durchgeführt, vom mikroskopischen bis zum Landschaftsmaßstab und größer. Viele der verwendeten Methoden sind in Tab. 7.2 aufgeführt.

Tab. 7.2. Methoden zur Beobachtung und Aufzeichnung der Umwelt, Erfassung geowissenschaftlicher Merkmale

Method	Description	Image	Source
Mikroskopische Beobachtung	Verwendung eines einzelnen Okulars oder Binokularmikroskops zur genauen Beobachtung von Erdmaterialien		Beobachtung mikroskopisch kleiner Diamanten in Swasiland
Beobachtung mit der Handlupe	Um eine Handlupe im Labor oder vor Ort zu verwenden, halten Sie sie nah an Ihr Auge und bringen Sie das Material nah heran, um die beste Sicht zu erhalten. Im Kamerabild lässt sich dies nicht darstellen		Beobachtung eines Fossils mit einer Handlupe
Landschaftsbeobachtung	Beobachtung der Landschaft als Hilfe für eine geologische Kartierung. Besonders berücksichtigt werden Brüche, Geländestufen und Neigungswinkel sowie Vegetationsveränderungen		Landschaftsbeobachtung in den Yorkshire Dales, England
Beobachtung mit Geografischen Informationssystemen (GIS)	Geologische Merkmale können auf GIS sowie Luftbildern und Satellitenbildern hervorgehoben werden		Satellitenbild gefalteter Gesteinssequenzen in der algerischen Wüste

Feld- und Labormessung	Messen des Neigungswinkels und der Richtung (Azimuth) einer geneigten Schicht. Der Neigungswinkel wird mit einem Neigungsmesser gemessen, um den Winkel des steilsten Gefälles zwischen 0 und 90 ° zu ermitteln. Die Neigungsrichtung ist der Azimuth (Abweichung von der Nordrichtung von 0-360°) der Richtung des größten Gefälles		Messung der Neigung einer Schicht Großbritannien
	Messung von unterschiedlich mächtigen Schichten		Messung der Schichtmächtigkeit in den Aberystwyth Grits in Wales
Feld- und Labortests	Gesteine und Minerale können im Labor und vor Ort auf eine Reihe von Eigenschaften getestet werden		Der Strich von Hämatitproben
Anwendung von Klassifizierungssystemen	Klassifizierungssysteme für Minerale, Gesteine, Fossilien, Gesteinstexturen, Gesteinsstrukturen, Gesteinszusammensetzungen usw. können unter Zuhilfenahme von Nachschlagewerken als Leitfaden verwendet werden		Der Gesteinsbeschreibungs-schlüssel der Earth Science Education Unit

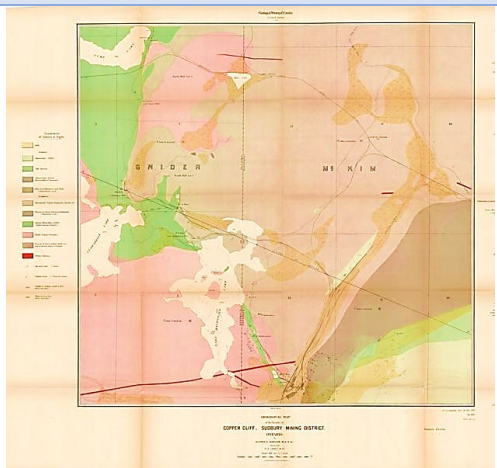
Notizen aufzeichnen	Notizen zu geologischen Merkmalen werden sorgfältig aufgezeichnet, mit Angaben zum Datum, den besuchten Orten, den gefundenen Merkmalen und ihrer Ausrichtung, in Notizbüchern oder auf Tablets		Geologische Feldnotizen
Aufzeichnung anhand von Diagrammen und Skizzen in Labor und Feld	Diagramme und Skizzen z.B. von Aufschlüssen werden maßstabsgetreu gezeichnet und beschriftet sowie ihre Standorte und Ausrichtungen vermerkt		Aufnahme eines Felddiagramms bei Strumble Head in Wales
Fotografische Dokumentation	Fotos sind wertvolle Aufzeichnungen, insbesondere wenn sie mit Anmerkungen versehen oder von Diagrammen oder Skizzen begleitet werden		Kommentiertes Foto – Champlain Thrust, Lone Rock Point, Burlington, Vermont, USA
Drawing a graphic log	Grafische oder stratigraphische Logs werden im vertikalen Maßstab erstellt und zeigen z.B. die Korngröße durch die Breite des Logs und die Sedimentgesteinsarten durch Farbe oder Schattierung an; weitere Merkmale wie Sedimentstrukturen oder Fossilhorizonte kommen hinzu		Stratigraphisches Log der fossilreichen Kitadani-Formation aus der Unterkreide in der Nähe der Stadt Katsuyama, Japan
Meteorologische Beobachtung	Regelmäßige Messungen durchgeführt an einem Stevenson-Instrument		Stevenson-Abschirmung zum Schutz der Wetterinstrumente, mit einem Regensmesser auf der rechten Seite

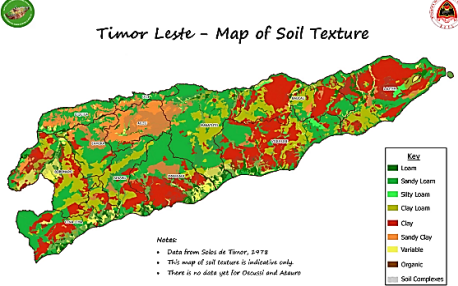
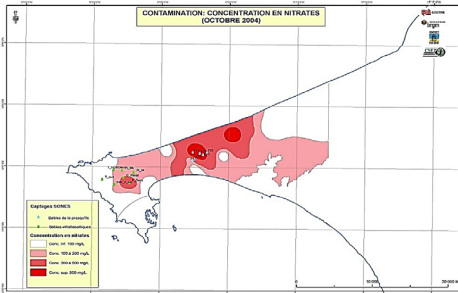
Probenahme für die Messung der Luftqualität	Die Luftqualität wird insbesondere in städtischen Gebieten überwacht		Probenahme für die Messung der Luftqualität in Frankreich
Erdgruben ausheben	Bodenprofile durch die horizontalen Schichten im Boden werden mithilfe von ausgehobenen Gruben vermessen		Erdgrube in den Ausläufern der Karpaten, Polen
Probenahme für die Messung der Wasserqualität	Die Qualität des Wassers wird durch eine Reihe von Tests überwacht		Prüfung der Wasserqualität, Port Macquarie, New South Wales, Australien
Ozeanographische Probenahme	Regelmäßige Messungen werden auf See mit verschiedensten Geräten durchgeführt		Probenahme in der Wassersäule im Ozean vor Australien

7.2 Synthese der Beobachtungen

Die im Feld gesammelten Daten und Beobachtungen werden für die Erstellung von dynamischen Modellen des untersuchten geologischen Prozesses, der Geschichte oder der räumlichen Verteilung verwendet, wie in Tab. 7.3 dargestellt. Diese Bilder sind gleichzeitig die Grundlage dafür, dass der Betrachter erkennen kann, welche weiteren Beobachtungen erforderlich sind und wie er sie am besten sammeln kann.

Tab. 7.3. Geowissenschaftliche Beobachtungen in Modelle und Karten umwandeln

Method	Description	Image	Source
Interpretation der Paläoumwelt	Geowissenschaftler nutzen die Hinweise, die sie in Sedimentgesteinen beobachtet haben, um sich ein Bild davon zu machen, wie die Gegend aussah, als die Sedimente abgelagert wurden		Jura-Diorama, Smithsonian Museum of Natural History, Washington DC, USA
Abkühlungsgeschichte eines magmatischen Gesteins	In magmatischen Gesteinen mit großen meist idiomorphen Kristallen begannen diese Kristalle schon früher in der Geschichte des Magmas zu wachsen, bevor es in einen kühleren Bereich eindrang und schneller abkühlte und eine feinkörnigere mineralische Matrix bildete		Große Feldspatkristalle in einer feinkörnigeren magmatischen Matrix – mit zweistufiger Abkühlung, in der Nähe von Porto, Portugal
Entwerfen einer geologischen Geschichte	Hier wurden die unteren Sedimente abgelagert, zu Gestein geformt und dann durch einen Gebirgsbildungsvorgang vertikal gekippt. Nach der Erosion wurden die Abbruchsteine flach auf die Oberfläche gelegt, bevor sie gekippt wurden und sich selbst erodierten		Die von James Hutton (1726-1797) am Siccar Point in Schottland entdeckte Diskordanz (markiert mit einer orangefarbenen Linie)
Zeichnen einer geologischen Karte	Oberflächenbeobachtungen von Aufschlüssen, Entwässerungsmustern und Veränderungen der Gefälle, die geologische Grenzen markieren, werden in der Erstellung einer geologischen Karte zusammengefasst – eine Sicht aus der Vogelperspektive auf die Gesteine des Gebiets, wenn der gesamte darüber liegende Boden entfernt würde		Geologische Karte von Copper Cliff, Sudbury Mining District, Ontario, Kanada
Erstellen eines geologischen Profils	Die Erstellung eines Querprofils zeigt die unterirdische geologische Struktur		Querprofil der Copper Cliff-Karte oben

Erstellen einer Bodenkarte	Bodenkundler kartieren Oberflächenböden nach ihren Merkmalen. Bodenkarten werden in der landwirtschaftlichen Planung verwendet	 Timor Leste - Map of Soil Texture Legend: - Red: Red - Green: Loam - Yellow: Sandy Loam - Orange: Silty Loam - Light Green: Clay Loam - Dark Green: Clay - Light Yellow: Sandy Clay - Dark Yellow: Silty Clay - White: Variable - Dark Grey: Organic - Light Grey: Soil Complexes Notes: - Data from Global Soil Map, 2012 - This map of soil texture is indicative only - There is no data yet for Dicaul and Akaul Seeds of Life, Produced by: Climate Change, Seeds of Life, 2012	Bodenkarte der Insel Timor
Erstellen einer Kontaminationskarte	Hydrogeologen kartieren die Grundwasserverschmutzung	 CONTAMINATION: CONCENTRATION EN NITRATES (OCTOBRE 2014) Legend: - Green: 0-10 mg/L - Yellow: 10-20 mg/L - Orange: 20-30 mg/L - Red: 30-40 mg/L - Dark Red: 40-50 mg/L - Black: 50-60 mg/L Cap-Vert, Senegal	Karte der Nitratbelastung des Grundwassers auf der Cap-Vert-Halbinsel, Senegal

7.3 Untersuchung und Überprüfung der Hypothesen

Geowissenschaftler führen Untersuchungen durch und suchen nach Beweisen zur Beantwortung geowissenschaftlicher Fragestellungen.

- Am Anfang steht eine Frage, die ihnen gestellt wird oder die sie sich selber stellen. Diese Frage muss beantwortet werden oder eine Hypothese oder Idee, muss getestet werden.
- Der nächste Schritt besteht darin, einen Plan zur Untersuchung der Hypothese oder der Idee zu erstellen, der flexibel genug ist, um während der Untersuchung geändert zu werden, wenn die ersten Ergebnisse nicht den Erwartungen entsprechen oder nicht hilfreiche Informationen liefern.
- Eine Risikoabschätzung wird durchgeführt und notiert.
- Anschließend wird der Plan ausgeführt und mit der Sammlung weiterer Informationen verändert und weiterentwickelt.
- Die gesammelten Daten werden auf unterschiedliche Weise verarbeitet, beispielsweise durch Kartierung, Zeichnen von Querschnitten, Durchführen von Berechnungen, Plotten von Daten auf unterschiedliche Weise oder durch Erstellen von Modellen, einschließlich physikalischer Modelle, Computermodelle und mathematischer Modelle.
- Die Ergebnisse werden ausgewertet, um ein Gesamtbild als Antwort auf die ursprüngliche Frage zu erstellen, ungewöhnliche Informationen zu erkennen, die möglicherweise wichtig sind oder auch nicht, und um die Sammlung weiterer Daten zu steuern.
- Während dieses Prozesses müssen die Ergebnisse über verschiedene Methoden, darunter Berichte, Präsentationen und wissenschaftliche Veröffentlichungen, an diejenigen weitergegeben werden, die die Informationen benötigen.

Wenn dies alles gelingt, werden sich eindeutige Ergebnisse aus den Untersuchungen einstellen, Antworten auf die Fragen können sich ergeben und Hypothesen und Ideen konnten erfolgreich getestet werden. Wenn Beweise fehlen, ist es aber auch möglich, dass am Ende kein Ergebnis erzielt wird.

Box 7.2. Geologische Kartierungen

Als Antwort auf die Frage „Wo liegen in diesem Gebiet geologische Formationen und die Grenzen zwischen ihnen?“ würde ein Geologe eine geologische Karte erstellen.

Geologische Karten sind Aufsichten (Ansichten von oben) eines Gebiets, die zeigen, wo die Grenzen zwischen geologischen Formationen sichtbar wären, wenn der gesamte Boden, Gebäude und andere darüber liegende Materialien entfernt würden. Geologische Karten sind komplex, da zunächst die Grenzen zwischen Formationen identifiziert und dann ihre Positionen auf topografischen Karten unter Berücksichtigung des Reliefs der Topografie eingezeichnet werden müssen. Dazu müssen Geologen jederzeit genau wissen, wo sie sich auf der topografischen Karte befinden, indem sie Peilungen vornehmen, Luft- oder Satellitenfotos verwenden oder globale Positionsbestimmungssysteme (GPS) verwenden.

Eine Linie, die eine geologische Grenze darstellt, lässt sich relativ einfach auf einer Karte einzeichnen, wenn der Unterschied zwischen den beiden Formationen deutlich ist, die Grenze gut sichtbar ist und nahezu vertikal verläuft. Wenn Grenzen nahezu horizontal verlaufen, wird die Form der Grenze stark von der Form des Bodens (der Topographie) bestimmt und kann daher komplex sein.

Geologen zeichnen Karten auf topografischen Grundkarten vor Ort. Zuerst identifizieren sie die Grenze, die sie kartieren möchten, und zeichnen dann die Position der Grenze mithilfe von Peilungen, Fotos oder GPS-Systemen auf ihren Basiskarten ein. Anschließend verfolgen sie die Grenze, die Neigung der Gesteinsschichten und andere Informationen und zeichnen unterwegs die Position der Grenze auf. Wo die Grenze unter der Erde verschwindet, nutzen sie Oberflächenmerkmale wie Veränderungen der Neigung, Vegetation, Entwässerung oder Veränderungen der Bodenfarbe oder die von grabenden Tieren ausgegrabenen Gesteinsfragmente, um den wahrscheinlichsten Weg für die Grenze zu finden. Wenn die Grenze wieder freigelegt wird, können sie ihre Zuordnung nach Bedarf anpassen. Die aufgezeichneten geologischen Grenzen umfassen die Formationsgrenzen, Störungen und den Versatz der Grenzen durch Störungen sowie andere Merkmale wie Diskordanzen oder die Ränder von Intrusionen. Bewegungsrichtungen entlang von Störungen werden ebenfalls aufgezeichnet.

Bei einer geologischen Kartierung werden die Neigungen und Richtungen des Einfallens der Gesteinsschichten aufgezeichnet und grafisch dargestellt, da diese einen Anhaltspunkt für die Strukturgeschichte der Abfolge geben – beispielsweise indem sie zeigen, wo geneigte Schichten, Antiklinalen, Synklinalen und Störungen gefunden werden.



Geologische Grenze zwischen grauem Sandstein und feinkörnigem hellem Granit, Sea Point, Kapstadt, Südafrika



Eine große Neigungsänderung an der geologischen Grenze zwischen den widerstandsfähigen magmatischen Gesteinen eines Sills auf der rechten Seite und den weicheren Sedimentgesteinen links, am Hadrianswall im Norden Englands

Box 7.3. Eine Schürfuntersuchung nach Diamanten

Diamanten stammen aus Vulkangestein, sogenannten Kimberliten, die normalerweise in vertikalen Vulkanröhren vorkommen, aber auch Gänge und Lagergänge bilden können. Diamanten sind in Kimberliten selten. Weitaus häufiger sind andere kimberlitische Minerale wie Granate, daher suchen die Prospektoren zunächst nicht nach Diamanten, sondern nach kimberlitischen Granaten.

Bei Fluss- und Bodenprobennahmen in einem Gebiet im südlichen Afrika wurde ein schmaler, von Nord nach Süd verlaufender Bodenbereich von etwa 1 km Länge entdeckt, der reich an Kimberlitmineralen ist und drei mikroskopisch kleine Diamanten hervorbrachte. Die Arbeitshypothese war, dass diese aus einem von Nord nach Süd verlaufenden Kimberlitgang stammen mussten, der Diamanten enthielt. Daher wurde auf der Suche nach dem Vulkanschlott eine Reihe von Ost-West-Gräben bis hinunter zum jurassischen Gestein an der Basis ausgehoben – es wurde jedoch kein Schlott gefunden.

Das jurassische Gestein an der Basis bestand größtenteils aus Sandstein mit einigen Tonsteinschichten und fiel nach Westen ab. Es handelte sich um ein Tonsteinschicht, die reich an kimberlitischen Granaten und einigen Diamanten war und dessen Nord-Süd-Aufschluss die granatreiche Bodenzone hervorgebracht hatte. Das war sehr ungewöhnlich: Noch nie zuvor wurden in alten Sedimentgesteinen in Afrika große Mengen an Kimberlitmineralen und Diamanten gefunden.

Die Untersuchungen mussten dann in zwei Richtungen vorangetrieben werden. Die Lagerstätte musste untersucht werden, um herauszufinden, ob sie reich genug an Diamanten für einen lohnenden Abbau war. In der Zwischenzeit mussten die Schürfarbeiten fortgesetzt werden, um die ursprüngliche Quelle der Diamanten zu finden, in der Hoffnung, dass auch diese abbaubar waren.

An der Schrägschichtung des Sandsteins wurden Messungen durchgeführt, die zeigten, dass der Fluss, der die Sandsteine in der Jurazeit ablagerte, von Westen her geflossen war. Das waren gute Nachrichten, denn wenn die ursprüngliche Quelle der Minerale und Diamanten ein Kimberlitschlott war, könnte dieser immer noch freiliegen. Wenn die Quelle im Osten gelegen hätte, wäre er unter mehr Jura-Sandsteinen begraben gewesen. Wäre er im Süden oder Norden gelegen, wäre er auch hier möglicherweise begraben worden.

Daher wurde im Westen ein weiteres umfangreiches Programm zur Entnahme von Bach- und Bodenproben durchgeführt, und schließlich wurde ein kreisförmiges Gebiet mit granatreichen Böden gefunden. Bei der Ausgrabung stellte sich heraus, dass es sich um einen Kimberlit handelte, der reich genug an Diamanten war, um abgebaut zu werden. Die Mine förderte mehr als fünfzehn Jahre lang erfolgreich Diamanten. In der Zwischenzeit wurde festgestellt, dass die ursprüngliche Lagerstätte nicht genügend Diamanten enthielt, um bei den damals verfügbaren Diamantenpreisen einen lohnenden Abbau durchzuführen, auch wenn sie möglicherweise in Zukunft noch abgebaut werden.



Ausheben von Gräben bis zum Gestein an der Basis (vor modernen Gesundheits- und Sicherheitsvorschriften)



Eine diamantreiche Tonsteinschicht



Schrägschichtung im Jura-Sandstein, der die Strömung des alten Flusses aus dem Westen zeigt (links)

Glossar

Jeder dieser Begriffe wird in **Fettschrift** an oder in der Nähe der Stelle angezeigt, an der er zum ersten Mal erscheint und dann im Text definiert wird. Bitte nutzen Sie Ihre Suchfunktion, um die erste Verwendung des Begriffs und seine dortige Definition zu finden.

Abschiebung	Gestein	Mondfinsternis
Absolute Datierung	Giftiges Sickerwasser	Nachhaltige Entwicklung
Akkretionskeil	Global Boundary Stratotype	Natürliche Selektion
Albedo	Section and Point (GSSP)	Negatives Feedback
Antiklinale	Grundwasser	Nipptide
Aquifer	Grundwasserspiegel	Normale magnetische Polarität
Artesisches Wasser	Halbwertszeit	Offene Falte
Asteroid	Hochdruckgebiet	Offenes System
Asthenosphäre	Hydrosphäre	Ozeanbodenspreizung
Atmosphäre	Hydrothermalquelle	Permafrost
Aufschiebung	Hypozentrum	Plattentektonik
Batholith	Infiltration	Plattenzug-Mechanismus
Bauzuschlagsstoff	Inselbogen	Pluton
Bergsturz	Intrusivmagmatisches Gestein	Porosität
Biosphäre	Inverse magnetische Polarität	Positives Feedback
Blattverschiebung	Isoklinalfalte	Prozess
Boden	Kippunkt	Produkt
Brunnen	Kluft	Radioaktive Zerfallskurve
Carbon capture	Komet	Radiometrische Datierung
Divergender Plattenrand	Kompaktion	Regionalmetamorphose
Durchlässigkeit	Kondensation	Relative Datierung
Dike	Konservativer Plattenrand	Rückendruckmechanismus
Eishausbedingungen	Kontaktmetamorphose	Rückwirkung
Enge Falte	Kontaktzone	Sanierung
Epizentrum	Kontinentalverschiebungstheorie	Schadstoffe
Erdbebenzentrum	Konvektionsstrom	Schneeball-Erde
Erdrutsch	Konvergenter Plattenrand	Sedimentgestein
Erneuerbare Energiequellen	Körperfossil	Seismische Welle
Erosion	Korrelation	Seismometer
Evolution	Kurzer Kohlenstoffkreislauf	Sill
Extrusivmagmatisches Gestein	Lithifizierung	Sonnenfinsternis
Falte	Lithosphäre	Speicher
Faltenscharnier	Magma	Springflut
Faltenschenkel	Magmakammer	Spurenfossil
Feedback	Magmatisches Gestein	Störung
Fließbrunnen	Mantelkonvektionsmechanismus	Störungsfläche
Fossil	Massensterben	Stoffflüsse
Geofahren	Matschball-Erde	Subduktion
Geosphäre	Metamorphe Aureole	Subduktionserosion
Gesättigte zone	Metamorphes Gestein	Superkontinent-Zyklus
Geschlossenes System	Metamorphose	Synklinale
Gespannter Grundwasserleiter	Mineral	System
	Minderung	Teilaufschmelzung

Thermometamorphose
 Tiefdruckgebiet
 Tiefengestein
 Transformstörung
 Transpiration
 Treibhausbedingungen
 Treibhauseffekt
 Überschiebung

Undurchlässigkeit
 Urknall(theorie)
 Verdunstung
 Verstärkter Treibhauseffekt
 Verweilzeiten
 Verwitterung
 Vulkangestein
 Vulkanschlot

Vulkanstopfen
 Wasserkreislauf
 Wilson-Zyklus
 Wurzelzone
 Zementierung

Glossar der Elemente, Verbindungen und Ionen

Elements	Verbindungen	Ionen
Al – Aluminium	CaO – Kalziumoxid, ungelöschter Kalk	Cl ⁻ – Chlor-Ion
Au – Gold	Ca(OH) ₂ – Kalziumhydroxid, ungel. Kalk	HCO ₃ ⁻ – Hydrogenkarbonat-Ion
Ca – Kalzium	CaCO ₃ – Kalziumkarbonat, Kalzit	K ⁺ – Kalium-Ion
Cl – Chlor	CaSO ₄ · 2H ₂ O – Kalziumsulfat, Gips	Mg ²⁺ – Magnesium-Ion
Fe – Eisen	CH ₄ – Methangas	Na ⁺ – Natrium-Ion
H – Wasserstoff	CO ₂ – Kohlendioxidgas	SO ₄ ²⁻ – Sulfat-Ion
K – Kalium	CuFeS ₂ – Kupfereisenpyrit, Chalcopyrit	
Mg – Magnesium	Fe ₃ O ₄ – Eisenoxid, Hämatit	
Na – Natrium	FeS – Eisensulfid, Pyrit	
O – Sauerstoff	KCl – Kaliumchlorid, Pottasche	
Pb – Blei	NaCl – Natriumchlorid, Halit	
S – Schwefel	PbS – Bleisulfid, Bleiglanz, Galena	
	SiO ₂ – Siliziumdioxid, Quarz	

Anhang

Internationaler Geowissenschaftlicher Lehrplan, den alle Schüler ab 16 Jahren beherrschen sollten

Erstellt als interner Bericht im Auftrag der International Geoscience Education Organization (IGEO) und der International Union of Geological Sciences Commission on Geoscience Education (IUGS-COGE) von:

Chris King – United Kingdom

Mit wichtigen Beiträgen von:

Ian Clark – Australien

Rosely Imbernon – Brasilien

Luis Marques – Portugal

Ian McKay – Südafrika

Bronte Nichols – Australien

Glenn Vallender – Neuseeland

Clara Vasconcelos – Portugal

Ashvin Wickramasooriya – Sri Lanka

Michael Wyssession – Vereinigte Staaten von Amerika

Internationaler Geowissenschaftlicher Lehrplan, den alle Schüler ab 16 Jahren beherrschen sollten

Dieser Lehrplan wurde von der International Geoscience Education Organization (IGEO) und der International Union of Geological Sciences Commission on Geoscience Education (IUGS-COGE) erstellt.

Der Lehrplan basiert auf den folgenden Grundsätzen:

- Er basiert auf bestehenden Lehrplänen auf der ganzen Welt, da ein Lehrplan, der auf bestehenden Lehrplänen basiert, höchstwahrscheinlich weltweit akzeptiert wird – die Matrix der Abdeckung durch bestehende Lehrpläne beginnt auf Seite 7;
- Die Struktur des internationalen Syllabus ist deutlich erkennbar, auch wenn eine solche Struktur in vielen bestehenden Lehrplänen nicht ohne weiteres erkennbar ist;
- Der Lehrplan wird knapp und präzise auf nur einer Seite präsentiert, da ein kurz gefasster Lehrplan von Pädagogen und Lehrern, die sich nicht mit Geowissenschaften befassen, eher akzeptiert wird. Weitere Einzelheiten werden anhand von Beispielen auf den folgenden Seiten erläutert, um den Umfang der Abdeckung zu verdeutlichen. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die Einzelheiten von Land zu Land unterschiedlich sein werden;
- Der Lehrplan zielt nicht darauf ab, einen wissenschaftlichen Fortschritt zu belegen.

Internationaler Geowissenschaftlicher Lehrplan, den alle Schüler ab 16 Jahren beherrschen sollten – Kernlehrplan

Bis zum Alter von 16 Jahren sollten die Schüler ein Verständnis für Folgendes entwickeln:

Die Erde ist ein sich veränderndes System

- Eigenschaften offen für Energie, nahezu geschlossen für Materie, im Laufe der Zeit veränderlich, innerhalb des Sonnensystems, bestehend aus Geosphäre, Hydrosphäre, Atmosphäre, Biosphäre
- Wechselbeziehungen Wechselwirkungen von Geosphäre, Hydrosphäre, Atmosphäre, Biosphäre
- Rückkopplung Positive und negativ
- Prozesse und Produkte Wasserkreislauf, Gesteinskreislauf, Kohlenstoffkreislauf
- Energiequellen Sonne, Erdinneres

Die Erde ist ein System innerhalb des Sonnensystems, innerhalb des Universums

- Ursprung Urknall; Akkretion aus Staub; Sterne; Planeten
- Die Sonne Einzige externe Energiequelle; Schwankungen
- Rotationseffekte Tag/Nacht, Jahreszeiten, Mondphasen, Finsternisse

Die Erde ist ein System, das sich im Laufe der Zeit verändert hat

- Geologische Zeit Zeitspanne, wichtige Ereignisse, relative und absolute Datierungsmethoden, Prozessgeschwindigkeiten

Das Erdsystem besteht aus interagierenden Sphären-

- Geosphäre

- Materialien und Eigenschaften der Erde Minerale, Fossilien, Sedimentgesteine, magmatische und metamorphe Gesteine, Boden
- Erdprozesse und erhaltene Merkmale Oberflächenprozesse, sedimentäre, magmatische und metamorphe Prozesse, Verformung (AW)
- Aufbau der Erde und Beweise Kruste, Mantel, Kerm, Lithosphäre
- Plattentektonik und Beweise Vereinende Theorie, Plattenbildung und Subduktion, Eigenschaften der Plattenränder, Mechanismus, Bewegungsgeschwindigkeiten; Beweise

- Hydrosphäre

- kontinentales Wasser Vorkommen, Bewegungsabläufe, Nutzungen
- Ozeanisches Wasser Zusammensetzung, Bewegungsabläufe

- Atmosphäre

- Zusammensetzung Entwicklung, aktuelle Zusammensetzung
- Störmung Bewegungsabläufe

- Veränderung Treibhauseffekt, Planeteneinflüsse, menschlicher Einfluss, Einfluss auf den Meeresspiegel

- Biosphäre

- Evolution natürliche Selektion, fossile Beweise, Massensterben
- Auswirkungen auf andere Systeme Rolle der Biosphäre im Erdsystem

Das Erdsystem produziert Ressourcen

- Rohstoffe und fossile Brennstoffe natürlich konzentriert, nicht erneuerbar, Verwendungszwecke, sorgfältiger Umgang (nachhaltige Entwicklung) erforderlich, potenziell umweltschädlich
- Erneuerbare Energie Möglichkeiten

Interaktionen Mensch/Erde-System

- Natürliche Gefahren Menschlicher Einfluss, Vorhersage, Schadensbegrenzung
- Umweltprobleme lokal bis global, Schadensbegrenzung
- Auswirkungen auf die Menschheitsgeschichte Ressourcenkriege; Migration aufgrund des Klimawandels

Das Erdsystem wird durch Feldforschung und praktische Arbeit untersucht

- Beobachtung Beobachtung, Messung und Aufzeichnung
- Synthese der Beobachtungen Interpretation
- Untersuchung und Hypothesen Pläne entwerfen und umsetzen, Daten verarbeiten, Schlussfolgerungen ziehen, Ergebnisse auswerten und Erkenntnisse kommunizieren

Internationaler Geowissenschaftlicher Lehrplan, den alle Schüler ab 16 Jahren beherrschen sollten – Kernlehrplan *mit Beispielen*

Bis zum Alter von 16 Jahren sollten die Schüler ein Verständnis für Folgendes entwickeln:

Die Erde ist ein sich veränderndes System

- Merkmale offen für Energie, fast verschlossen für Materie, sich im Laufe der Zeit verändernd, innerhalb des Sonnensystems, bestehend aus Geosphäre, Hydrosphäre, Atmosphäre, Biosphäre
- Wechselwirkungen Wechselwirkungen von Geosphäre, Hydrosphäre, Atmosphäre, Biosphäre
- Rückwirkung Positive und negativ
- Prozesse und Produkte Wasserkreislauf, Gesteinskreislauf, Kohlenstoffkreislauf
- Energiequellen Sonne, Erdinneres

Die Erde ist ein System innerhalb des Sonnensystems, innerhalb des Universums

- Ursprung Urknall; Akkretion aus Staub; Sterne; Planeten
- Die Sonne Einzige externe Energiequelle; Schwankungen
- Rotationseffekte Tag/Nacht, Jahreszeiten, Mondphasen, Finsternisse

Die Erde ist ein System, das sich im Laufe der Zeit verändert hat

- Geologische Zeit Zeitspanne, wichtige Ereignisse, relative und absolute Datierungsmethoden, Prozessgeschwindigkeiten

Veranschaulichung des Kernlehrplans, um den Umfang der Abdeckung anzuzeigen

(Es wird erwartet, dass dies von Land zu Land unterschiedlich sein wird)

*Die Wechselwirkung zwischen Lithosphäre und Hydrosphäre verursacht Küstenprozesse. Die Wechselwirkung zwischen Hydrosphäre und Atmosphäre verursacht Wellen und eine Erwärmung der Atmosphäre. Die Wechselwirkung zwischen Atmosphäre und Biosphäre steuert das Klima der Vegetation. Die Wechselwirkung zwischen Lithosphäre und Biosphäre beeinflusst die Bodenqualität. Die Geschwindigkeiten variieren von schnell bis langsam
positiv – die zunehmende Fläche der polaren Eisschilde führt zu einer stärkeren Reflexion der Sonnenenergie, sorgt für eine stärkere Abkühlung und führt zu einer zunehmenden Fläche der polaren Eisschilde; negativ – je mehr Kohlendioxid in die Atmosphäre gelangt, desto mehr wird von den Ozeanen absorbiert
einzigartige Eigenschaften von Wasser, Verdunstung, Transpiration, Kondensation, Niederschlag; Verwitterung/Erosion, Sedimentation, Metamorphose, Schmelzen, magmatische Aktivität; Photosynthese, Atmung, Verlagerung als Kalkstein/fossiler Brennstoff, Freisetzung durch Verbrennung/Verwitterung
innere Energie aus Radioaktivität und Energie aus der Erdentstehung*

Solarenergie treibt den Wasserkreislauf und das Wetter an; langfristige Schwankungen der Sonnenenergie im Zusammenhang mit Klimaveränderungen

Wichtige Ereignisse: 4570 Millionen Jahre (Ma) – Entstehung der Erde; 3600 Ma – frühes Leben; 550Ma – Tiere mit harten Teilen; 250 Ma – Massenaussterben, einschließlich Trilobiten; 65 Ma – Massenaussterben, auch der Dinosaurier; 1 Ma Eiszeit; Datierungsprinzipien: Überlagerung, Querschnittsbeziehungen, Fossilkorrelation; radiometrische Datierung; Prozesse treten in einem Frequenz-Größen-Spektrum von kontinuierlich bis katastrophal auf

Das Erdsystem besteht aus interagierenden Sphären -

- geosphere

- | | | |
|--|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Materialien und Eigenschaften der Erde | <p>Minerale, Fossilien, Sedimentgesteine, magmatische und metamorphe Gesteine, Boden</p> | <p><i>Definitionen von: Mineral, Fossil, Gestein, Sedimentgestein, magmatisches Gestein, metamorphes Gestein, Boden; Minerale einschließlich: Quarz, Feldspat, Glimmer, Granat, Kalzit, Halit, Gips, Pyrit, Bleiglanz; Fossilien, darunter: Trilobit, Ammonit, Dinosaurier; Versteinierungsprozesse, einschließlich: Einbettung, Fossilisierung, Formen und Abgüsse, Spurenfossilien; Gesteinstextur, Porosität, Durchlässigkeit; Sedimentgesteine, einschließlich: Kalkstein, Kalkmergel (Kreide), Konglomerat, Sandstein, Ton, Schiefer, Steinsalz; Sedimentmerkmale einschließlich: Lagerung (Schichtung), Kreuzschichtung, Wellenspurten; magmatisches Gestein, einschließlich: Granit, Basalt, Andesit, Gabbro, Vulkanasche; metamorphe Gesteine, darunter: Tonschiefer, Glimmerschiefer, Gneis, Marmor, Metaquarzit (Quarzit)</i></p> |
| <ul style="list-style-type: none"> • Erdprozesse und erhaltene Merkmale • Aufbau der Erde und Beweise • Plattentektonik und Beweise | <p>Oberflächenprozesse, sedimentäre, magmatische und metamorphe Prozesse, Verformung (AW)
Kruste, Mantel, Kerm, Lithosphäre</p> <p>Vereinende Theorie, Plattenbildung und Subduktion, Eigenschaften der Plattenränder, Mechanismus, Bewegungsgeschwindigkeiten; Beweise</p> | <p><i>Verwitterung (physikalisch/chemisch), Erosion, Transport, Ablagerung, Lithifizierung, Metamorphose, Intrusion, Extrusion, Faltung, Störung, Klüftung</i>
<i>Seismische Nachweise</i></p> <p><i>konstruktive, destruktive und konservative Plattenränder; vergangene und aktuelle Nachweise</i></p> |
| <h3>- Hydrosphäre</h3> | | |
| <ul style="list-style-type: none"> • kontinentales Wasser • Ozeanisches Wasser | <p>Vorkommen, Bewegungsabläufe, Nutzungen</p> <p>Zusammensetzung, Bewegungsabläufe</p> | <p><i>Oberflächenwasser, Grundwasser, Eiskappen/Gletscher; Infiltration, Abfluss; Wasserressourcenmanagement</i>
<i>Salzgehalt; Oberflächenströmung und durch Wind verursachte Wellen; tiefe Strömung basierend auf Dichteunterschieden aufgrund von Temperatur und Salzgehalt</i></p> |
| <h3>- Atmosphäre</h3> | | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Zusammensetzung • Störmung • Veränderung | <p>Entwicklung, aktuelle Zusammensetzung</p> <p>Bewegungsabläufe</p> <p>Treibhauseffekt, Planeteneinflüsse, menschlicher Einfluss, Einfluss auf den Meeresspiegel</p> | <p><i>Ausgasung durch frühe vulkanische Aktivität; Stickstoff, Sauerstoff, Spurengase einschließlich Wasserdampf und Kohlendioxid</i>
<i>ungleiche Erwärmung der Erde, Strömung aufgrund temperaturbedingter Dichteunterschiede, ozeanische Wärmequelle</i>
<i>Temperaturdiagramme über verschiedene Zeitspannen; Zusammenhang zwischen Temperaturänderung und Meeresspiegel</i></p> |

- **Biosphäre**

- Evolution natürliche Selektion, fossile Beweise, Massensterben *paläogeographische Auswirkungen auf die Evolution; Massenaussterben durch vulkanische Aktivität und Meteoritenimpakte*
- Auswirkungen auf andere Systeme Rolle der Biosphäre im Erdsystem *biologische Verwitterung; biologische Ablagerung*

Das Erdsystem produziert Ressourcen

- Rohstoffe und fossile Brennstoffe natürlich konzentriert, nicht erneuerbar, Verwendungszwecke, sorgfältiger Umgang (nachhaltige Entwicklung) erforderlich, potenziell umweltschädlich *Öl/Gas; Metallerze; Massenrohstoffe; lokale Beispiele für Bergbau/Steinbrüche*
- Erneuerbare Energie Möglichkeiten *geringe Umweltverschmutzung, Kosten, Regelmäßigkeit der Versorgung*

Interaktionen Mensch/Erde-System

- Natürliche Gefahren Menschlicher Einfluss, Vorhersage, Schadensbegrenzung *Eruption; Erdbeben; Tsunami; Erdrutsch*
- Umweltprobleme lokal bis global, Schadensbegrenzung *globale menschliche Auswirkungen (verursacht Erosion, Verschmutzung, Entwässerungsänderungen im Bergbau/Steinbruch); Verbrennung fossiler Brennstoffe und Treibhauseffekt*
- Auswirkungen auf die Menschheitsgeschichte Ressourcenkriege; Migration aufgrund des Klimawandels

Das Erdsystem wird durch Feldforschung und praktische Arbeit untersucht

- Beobachtung Beobachtung, Messung und Aufzeichnung
- Synthese der Beobachtungen Interpretation *Umgebung der Gesteinsformationen; geologische Geschichte; Umweltprobleme*
- Untersuchung und Texten von Hypothesen Pläne entwerfen und umsetzen, Daten verarbeiten, Schlussfolgerungen ziehen, Ergebnisse auswerten und Erkenntnisse kommunizieren

Abbildungen und Abbildungsnachweise

Legende

CCA-SA	Creative Commons Attribution-Share Alike
ESEU	Earth Science Education Unit
GNUFDL	GNU Free Documentation Licence (Version 1.2)
ipd	in/into the public domain
ISAL	Image Science and Analysis Laboratory
NASA	National Aeronautics and Space Administration
USGS	United States Geological Survey
USNOAA	United States National Oceanic and Atmospheric Administration
USRA	Universities Space Research Association

Abbildungen

Abb. 0.1. Interessante Kieselsteine und Sandformen

- Kieselsteine. Veröffentlicht von David Bleasdale unter der CCA A 2.0 Generic-Lizenz
- Sandformen. Veröffentlicht von Vasstateparksstaff unter der generischen CCA 2.0-Lizenz

Abb. 1.1. Offene und geschlossens Systeme

- Waschbecken. Veröffentlicht ipd von Chris McKenna
- Thermosflasche. Lizenziert von Termolar S.A. unter CCA-SA 4.0 Internationale Lizenz

Abb. 1.2. Die Erde – ein sehr komplexes System. Diese Datei ist ipd, da sie ausschließlich von der NASA erstellt wurde

Abb. 1.3. Salzgewinnung aus einer Salzlagune an der Küste Tunesiens. Veröffentlicht von Kalechnizar unter der CCA-SA 3.0 unported license

Abb. 1.4. Der arktische Eisschild in den Jahren 1984 und 2012. Herausgegeben von <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=79256> und ipd weil es ausschließlich von der NASA erstellt wurde

Abb. 1.5. Eine einfache Demonstration des Wasserkreislaufs. Foto: Chris King

Abb. 1.6. Produkte des Wasserkreislaufs (**blau**) und Prozesse (*kursiv*). Verändert nach Meschede, M., Murawski, H. & Meyer, W. (2021): Geologisches Wörterbuch. - Springer-Spektrum, Berlin-Heidelberg, 487 S. (13. vollständig überarbeitete und ergänzte Auflage).

Abb. 1.7. Produkte des Gesteinskreislaufs (**blau**) und Prozesse (*kursiv*).

Abb. 1.8. Produkte des Kohlenstoffkreislaufs (Boxen) und Prozesse (*kursiv*) – Prozesse, die Kohlenstoff „fixieren“, werden **rot**, Prozesse, die Kohlenstoff freisetzen, **blau** dargestellt.

Abb. 2.1. Mit dem Hubble-Teleskop fotografierte Galaxien. Basierend auf den gesammelten Daten wurden Farben hinzugefügt, um die wichtigsten Merkmale der Bilder hervorzuheben

- Messier 96, eine Spiralgalaxie. Veröffentlicht von NASA ipd
- Spiralgalaxien in Rosenform. Veröffentlicht von NASA ipd
- Zentrum von NGC 1097. Veröffentlicht von NASA ipd

Abb. 2.2. Die Sonne – unsere Hauptenergiequelle. Veröffentlicht von HalloweenNight unter der internationalen Lizenz CCA-SA 4.0

Abb. 2.3. Der Erwärmungseffekt des Winkels der Sonne am Himmel

Abb. 2.4. Die Mondphasen

Abb. 2.5. Der Mond wird zum Vollmond. Veröffentlicht von MKcray unter den Bedingungen von GNUFDL

Abb. 2.6. Collage aus Fotografien einer partiellen Sonnenfinsternis, gesehen von Deutschland aus. Veröffentlicht von Sgbeer unter den Bedingungen von GNUFDL Version 1.2.

Abb. 2.7. Collage aus Fotos einer Mondfinsternis, von Kalifornien, USA, aus gesehen. Published by Jason Snell unter CCA 2.0 Generic licence

Abb. 3.1. Die radioaktive Zerfallskurve für den Abbau aller radioaktiven Stoffe

Abb. 4.1. Porosität und Durchlässigkeit in Gesteinen. Die Porosität und Durchlässigkeit in (a) wurde durch Zement in (b) verringert; in (c) ist sie recht gering, da die Porenräume klein sind; in (d) ist sie ebenfalls gering, da die Porenräume zwischen größeren Körnern durch kleinere gefüllt wurden; der ungestörte Schiefer in (e) ist undurchlässig, bis er in wie (f) gebrochen wird.

Abb. 4.2. *Argentinosaurus* aus Argentinien, die größte bisher bekannte Dinosaurierart, und Rasterelektronenmikroskopaufnahmen (REM) von winzigen Meeresmikrofossilien.

- Rekonstruktion des *Argentinosaurus* in einer Sonderausstellung des Naturmuseum Senckenberg, Frankfurt, Deutschland. Herausgegeben von Eva Kröcher unter den Bedingungen der GNUFDL SEM-Bilder von Meeresmikrofossilien. Veröffentlicht von Hannes Grobe/AWI unter der CCAA 3.0 unported license

Abb. 4.3. Fossilisierung (Versteinerung)

Abb. 4.4. Bodenprofil in Altenberg, Sachsen. Veröffentlicht von Failbub unter CCA-SA 3.0 unported licence

Abb. 4.5. Abkühlung und Kristallisation magmatischer Gesteine

Abb. 4.6. Magmatische Gesteine der ozeanischen Kruste. Verändert nach Meschede et al. (2021, s. Abb. 1.6).

Abb. 4.7. Magmatische Gesteine in und auf kontinentaler Kruste. Verändert nach Meschede et al. (2021, s. Abb. 1.6).

Abb. 4.8. Auswirkungen der Kontaktmetamorphose

Abb. 4.9. Schnitt durch die Erde. Verändert nach Meschede et al. (2021, s. Abb. 1.6).

Abb. 4.10. Die Geologie der Erdkruste. Veröffentlicht von USGS und ipd, da es nur Materialien enthält, die ursprünglich von USGS stammen

Abb. 4.11. Die häufigsten Gesteine der kontinentalen Kruste

- Granit. ESEU. Foto: Peter Kennett
- Gneis. ESEU. Foto: Peter Kennett
- Tonstein. ESEU. Foto: Peter Kennett

Abb. 4.12. Der äußere Teil der Erde. Verändert nach Meschede, M. (2018): Geologie Deutschlands - ein prozessorientierter Ansatz. - 249 S., 2. Auflage (1. Auflage 2015), Springer-Spektrum, Berlin-Heidelberg.

Abb. 4.13. Meeresbodentopographie des südlichen Pazifischen Ozeans mit einem mittelozeanischen Rücken in der Nähe des Zentrums und Tiefseerinnen im Osten und Westen. Veröffentlicht von <https://www.ncei.noaa.gov/media/3340> und Public Domain.

Abb. 4.14. Magnetische Anomalien am Reykjanes-Rücken südwestlich von Island. Verändert nach Frisch, W. & Meschede, M. (2021): Plattentektonik und Gebirgsbildung. - 208 S., 6. Auflage (1. Auflage 2005), Wissenschaftliche Buchgesellschaft / Primus-Verlag, Darmstadt.

Abb. 4.15. Die Bildung magnetischer Streifenmuster durch Basalte am Meeresboden. Verändert nach Frisch & Meschede (2021, s. Abb. 4.14).

Abb. 4.16. Die Kette vulkanischer Inseln und unterseeischer vulkanischer Seeberge, die mit dem Hawaii-Hotspot im Pazifischen Ozean verbunden sind. Der Knick in der Kette ist mit einer Änderung der Bewegungsrichtung der Pazifischen Platte verbunden. Veröffentlicht vom National Geophysical Data Center/USGS und ipd, da es Materialien enthält, die ursprünglich von der USNOAA stammen.

Abb. 4.17. Transformstörungen als ausgleichendes geometrisches Element am mittelozeanischen Rücken des Atlantischen Ozeans. Veröffentlicht von <https://www.ncei.noaa.gov/media/3340> und ipd, da es Materialien enthält, die ursprünglich von der USNOAA stammen.

Abb. 4.18. Am mittelozeanischen Rücken im Mittelatlantischen Ozean entsteht neue ozeanische Lithosphäre. Verändert nach Frisch & Meschede (2021, s. Abb. 4.14).

Abb. 4.19. Riftgraben im Zentrum eines mittelozeanischen Rückens. Verändert nach Meschede (2022): <https://www.dggv.de/portfolio/3-1-grabenbruch-spreizungszone/>.

Abb. 4.20. Ein kleines Grabenbruchtal in Island, das mit einem mittelozeanischen Rückensystem in Verbindung steht. Die Brücke zwischen den Kontinenten befindet sich auf der Halbinsel Reykjanes im Südwesten Islands über den Alfabja-Graben, direkt an der Grenze der eurasischen und nordamerikanischen tektonischen Platten. Veröffentlicht von Chris 73 unter der CCA-SA 3.0 unported license

Abb. 4.21. Transformstörung, die einen mittelozeanischen Rücken versetzt. Aus Frisch & Meschede (2021, s. Abb. 4.14).

Abb. 4.22. Die San-Andreas-Störung in Kalifornien, USA. Der Block im Vordergrund ist um 130 Meter nach links verschoben worden, seit der Bach sein Tal zum ersten Mal eingeschnitten hat. Das Tal wurde um diese Strecke versetzt. Veröffentlicht von Robert E. Wallace und ipd, da es Materialien enthält, die ursprünglich vom USGS stammen.

Abb. 4.23. Erdbeben wurden in der gesamten Subduktionszone der Kurilen im Nordwestpazifik registriert. Die Erdbeben sind hinsichtlich ihrer Tiefe farblich gekennzeichnet, was zeigt, dass die Platte nach links subduziert wird. Veröffentlicht vom USGS und ipd, da es Materialien enthält, die ursprünglich vom USGS stammen.

Abb. 4.24. Subduktion bei der Kollision zweier ozeanischer Platten. Aus Frisch & Meschede (2021, s. Abb. 4.14).

Abb. 4.25. Der karibische Inselbogen in der Kollisionszone der nordamerikanischen mit der karibischen Platte. Zu sehen ist die kreisförmige Anordnung der Tiefseerinne und der dahinter liegende vulkanische Inselbogen. Veröffentlicht von <https://www.ncei.noaa.gov/media/3340> und ipd, weil es Materialien enthält, die ursprünglich von der USNOAA stammen.

Abb. 4.26. Eruption des Vulkans Soufrière Hills auf der Insel Montserrat im karibischen Inselbogen. Das Bild wurde von der Besatzung der NASA-Expedition 21 aufgenommen und als ipd veröffentlicht, da es ausschließlich von der NASA erstellt wurde.

Abb. 4.27. Subduktion einer ozeanischen unter eine kontinentale Platte. Aus Frisch & Meschede (2021, s. Abb. 4.14).

Abb. 4.28. Kollisionszone, die durch die Subduktion der Nazca-Platte unter die südamerikanische Platte entsteht. Veröffentlicht von <https://www.ncei.noaa.gov/media/3340> und ipd, weil es Materialien enthält, die ursprünglich von der USNOAA stammen.

Abb. 4.29. Das Anden-Gebirge zwischen Chile und Argentinien. Veröffentlicht von Jorge Morales Piderit und im ipd.

Abb. 4.30. Kollision zweier kontinentaler Platten. Aus Frisch & Meschede (2021, s. Abb. 4.14).

Abb. 4.31. Kollision der Indischen Platte mit der Eurasischen Platte mit der Bildung des Himalayagebirges. Veröffentlicht von <https://www.ncei.noaa.gov/media/3340> und ipd, weil es Materialien enthält, die ursprünglich von der USNOAA stammen.

Abb. 4.32. Blick auf das Himalayagebirge von der Internationalen Raumstation, mit dem Mount Everest im Zentrum des Bildes. Von http://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_152.html und ipd, da es von ISAL des NASA Johnson Space Center erstellt wurde.

Abb. 4.33. Plattenbewegungsgeschwindigkeiten. Die Längen der Pfeile zeigen die mithilfe von GPS-Messungen ermittelte Geschwindigkeit der Platte. Neu gezeichnet nach einer Abbildung, die von der NASA unter <https://sideshow.jpl.nasa.gov/post/series.html> und ipd veröffentlicht wurde, da sie ausschließlich von der NASA erstellt wurde.

Abb. 4.34. Plattenbewegungsmechanismen. Meschede (2023, neu gezeichnet).

Abb. 4.35. Die wichtigsten tektonischen Platten der Erde; Die Pfeile zeigen die Richtungen der Plattenbewegung an den Plattenrändern. Aus Meschede (2018, s. Abb. 4.12).

Abb. 4.36. Aquifere. Meschede (2023, neu gezeichnet).

Abb. 4.37. Brunnen-Test

Abb. 4.38. Ausbreitung der Grundwasserverschmutzung. Neu gezeichnet nach <http://pbisotopes.ess.sunysb.edu/classes/geo101-notes-07/ex-2-5.htm>

Abb. 4.39. Ebbe und Flut an der Humber Bridge, England. Beide Bilder wurden von David Wright auf der Geographie-Webseite veröffentlicht und zur Wiederverwendung unter der CCA-SA 2.0-Lizenz lizenziert.

Abb. 4.40. Der Mond verursacht Gezeitenausbuchtungen

Abb. 4.41. Gezeitenwechsel – ein Beispiel aus Bridgeport, Connecticut, USA. Veröffentlicht von NickyMcLean und als ipd.

Abb. 4.42. Wellen – groß und klein

- Surfen, Kalifornien. Veröffentlicht von [2010_mavericks_competition.jpg](#); Shalom Jacobovitz unter der CC A-SA 2.0 Generic-Lizenz
- Wellenbrechen, Shingleton Beach, Westaustralien. Veröffentlicht von Orderinchaos unter CCA-SA 3.0 unported licence

Abb. 4.43. Warmer, rot gefärbter Strom, der über die Oberfläche fließt; Kalter blauer Strom, der über den Boden fließt – ein Versuch durchgeführt in einer Plastikdose. Fotos: Chris King

Abb. 4.44. Luftmassenzirkulation auf der Erde. Basierend auf der Neuzeichnung nach <http://www.bbc.co.uk/education/guides/zym77ty/revision/2>

Abb. 4.45. Vereinfachte Darstellung des Oberflächenwindmusters auf der Erde. Basierend auf der Neuzeichnung nach https://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric_circulation#/media/File:AtmosphCirc2.png

Abb. 4.46. Oberflächenzirkulationen im Ozean. Basierend auf der Neuzeichnung nach <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9b/Corrientes-oceanicas.png>

Abb. 4.47. Das von flach nach tief fließende Zirkulationsmuster der Ozeane der Erde. Basierend auf der Neuzeichnung nach https://en.wikipedia.org/wiki/Thermohaline_circulation#/media/File:Thermohaline_Circulation_2.png

Abb. 4.48. Die besten Fischgründe, rot dargestellt, entstanden durch den Auftrieb von kaltem Tiefenwasser. Veröffentlicht von USNOAA und ipd, da es Materialien enthält, die ursprünglich von USNOAA stammen

Abb. 4.49. Die „blaue Marmor“-Erde („blue marble“) zeigt in blasser violetter Farbe die sehr dünne äußere Atmo-sphäre. Bild ipd, da es ausschließlich von der NASA erstellt wurde

Abb. 4.50. Die Raumfähre Endeavour kreist in der äußeren Atmosphäre, die Troposphären-schicht ist orangefarben und die weiße Schicht darüber enthält Ozon. Bild ipd, da es von ISAL des NASA Johnson Space Center erstellt wurde.

Abb. 4.51. Mikroskopisch kleine Bakterien im Ozean, die Photosynthese betreiben, Kohlendioxid absorbieren und Sauerstoff freisetzen. Veröffentlicht von Doc. RNDr. Josef Reischig, CSc. unter CCA-SA 3.0 unported licence

Abb. 4.52. Spiralförmige Wolken eines Zyklons in der Nähe von Island am 4. September 2003. Bild ipd, da es ausschließlich von der NASA erstellt wurde.

Abb. 4.53. Hurrikan Isabel im Nordatlantik im Jahr 2003, mit dem charakteristischen Auge in der Mitte. Es wurden äußerst zerstörerische Winde mit einer Geschwindigkeit von 265 km/h und vielen Millimetern Regen registriert. Bild ipd, da es ausschließlich von der NASA erstellt wurde.

Abb. 4.54. Ein Hochdruckgebiet (Antizyklon) in der Nähe von Südastralien im Jahr 2012. Winde und Wolkenstreifen drehen sich gegen den Uhrzeigersinn (auf der Nordhalbkugel würden sie sich im Uhrzeigersinn drehen), aber die sinkende, sich erwärmende Luft erzeugt im Zentrum keine Wolke. Bild ipd, da es ausschließlich von der NASA erstellt wurde.

Abb. 4.55. Verschmutzungsmog in Shanghai, China, eingeschlossen unter absinkender kühler Luft. Veröffentlicht von DL5MDA unter den Bedingungen von GNUFDL, Version 1.2.

Abb. 4.56. Ein Gleitschirmflieger in der Nähe von Reichen-burg, Schweiz, der Thermik zum Auftrieb nutzt. Veröffentlicht von Peter Greis, Stäfa, Schweiz unter der CCA 2.0 Generic-Lizenz.

Abb. 4.57. Die mittlere Temperatur der Erdoberfläche (°C) seit dem Beginn des Paläozoikums vor 540 Ma ermittelt anhand unterschiedlicher Nachweise. Die fünf Diagramme zeigen die Temperaturveränderungen über immer kürzere Zeiträume bis zum heutigen Tag. Die Nulllinie (0 °C) in den Diagrammen entspricht der heutigen mittleren Erdtemperatur von 14 °C. Neu gezeichnet nach einem veröffentlichten Bild von Glen Fergus unter CCA-SA 3.0 unported licence.

Abb. 4.58. Entnahme eines Eiskerns aus einem Kernrohr einer Eisbohrung. Veröffentlicht von Lonnie Thompson, Byrd Polar Research Center, Ohio State University und ipd, da es Materialien enthält, die ursprünglich von der USNOAA stammen.

Abb. 4.59. Temperaturänderungen und Variation des CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre während der letzten 400.000 Jahre, aufgezeichnet im Wostok-Eiskern aus der Antarktis (ppmv = Teile pro Million CO₂ in der

Atmosphäre nach Volumen). Neu gezeichnet aus einem von USNOAA unter den Bedingungen von GNUFDL, Version 1.2, veröffentlichten Bild

Abb. 4.60. Der Treibhauseffekt (Infrarotstrahlung ist Wärme)

Abb. 4.61. Veränderung des Kohlendioxidgehalts in der Atmosphäre während der letzten 2000 Jahre (oben) und seit Beginn der Messungen im Jahr 1958, gemessen am Mauna Loa-Observatorium auf Hawaii. (Der Gipfel des Mauna Loa wurde als Standort für diese Beobachtungen ausgewählt, da er hoch in der Atmosphäre und weit entfernt von kontinentalen Landmassen liegt. Die Messungen stehen in keinem Zusammenhang mit vulkanischer Aktivität.). Verändert nach Meschede et al. (2021, s. Abb. 1.6).

Abb. 4.62. Änderung der Oberflächentemperatur der Erde, basierend auf von der NASA zusammengestellten Daten. Neu gezeichnet anhand von ipd-Daten, da sie ausschließlich von der NASA erstellt wurden.

Abb. 4.63. Karte der Kontinente vor 280 Millionen Jahren während der Zeit des Perm, mit einem Superkontinent (Pangäa), der Landgebiete und miteinander verbundene flache Meere verbindet (langsamere Entwicklung). Hergestellt in Zusammenarbeit zwischen der Earth Science Education Unit und Cambridge Paleomap Services Ltd, die die verwendeten Kartenbilder erstellt haben. ESEU dankt Alan Smith und Lawrence Rush von CPSL für ihr Fachwissen und ihre Unterstützung. Bild mit Genehmigung von ESEU verwendet.

Abb. 4.64. Karte der Kontinente vor 85 Ma, während der Kreidezeit, mit getrennten Kontinenten und flachen Meeren (schnellere Entwicklung). Hergestellt in Zusammenarbeit zwischen der Earth Science Education Unit und Cambridge Paleomap Services Ltd, die die verwendeten Kartenbilder erstellt haben. ESEU dankt Alan Smith und Lawrence Rush von CPSL für ihr Fachwissen und ihre Unterstützung. Bild mit Genehmigung von ESEU verwendet.

Abb. 4.65. Der langfristige Trend des Lebens auf der Erde und die großen Artensterben, dargestellt durch die Anzahl der Gattungen (biologische Gruppierungen mit Artenzahlen). Neu gezeichnet nach einem Bild, veröffentlicht in: Rohde, R.A. und Muller, R.A. (2005-03). *Zyklen in der Fossilvielfalt*. Nature 434: 208-210, SVG-Version von Albert Mestre unter der CCA-SA 3.0 Unported-Lizenz

Abb. 5.1. Kommerzieller Torfabbau, Ljungby, Schweden. Veröffentlicht von Masse und als ipd.

Abb. 5.2. Ein Tagebau-Kohlebergwerk in einem dicken, abfallenden Kohleflöz, das einen alten tiefen Bergbaustollen freilegt. Foord-Naht in der Stellarton-Formation aus dem Karbon, Stellarton, Nova Scotia, Kanada. Veröffentlicht von Michael C. Rygel unter CCA-SA 3.0 unported licence.

Abb. 5.3. Zwei in Motoröl stehende Sandsteinplatten – es zeigt sich, wie verschiedene Sandsteine in ihren Porenräumen unterschiedlich viel Öl aufnehmen können. Peter Craig in King C. (2017) *Schottisches „Bring and Share“*. - ESTA-Konferenz in St. Andrews, September 2016. Unterrichten von Geowissenschaften 41.2. S. 24-5

Abb. 5.4. Eine aus aufrecht gefaltetem Gestein gebildete Falle (Antiklinale) – diese kann Erdöl, Erdgas oder beides zusammen enthalten. Veröffentlicht von MagentaGreen unter CCA-SA 3.0 unported licence.

Abb. 5.5. Globaler Energieverbrauch; Daten aus dem BP-Statistical Review of World Energy. Veröffentlicht von Martinburo aus Bp_world_energy_consumption_2016.gif unter der internationalen Lizenz CCA-SA 4.0.

Abb. 5.6. Globaler Energieverbrauch; Daten aus dem BP-Statistical Review of World Energy: <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2016/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-full-report.pdf>

Abb. 5.7. Mengen an Kohlendioxid, die bei der Verbrennung verschiedener fossiler Brennstoffe zur Erzeugung der gleichen Energiemenge freigesetzt werden. Daten der US Energy Information Administration (USEIA) unter <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=73&t=11>

Abb. 5.8. Aktuelle Energieproduktion aus verschiedenen erneuerbaren Quellen; Daten aus dem globalen Statusbericht REN21, Tabelle R1: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/10/REN21_GSR2016_FullReport_en_11.pdf

Abb. 6.1. Nächtliche Aufnahme vom Vulkan Stromboli in der Nähe von Sizilien, Italien, 2013, mit einer Eruption bei der „Bomben“ flüssiger Lava ausgeworfen werden. Veröffentlicht von Drtrotsky unter CCA-SA 3.0 unported licence

Abb. 6.2. Beispiel für eine vulkanische Gefahrenkarte, Mt. Rainier, Bundesstaat Washington, USA, die vorhersagt, was bei einem großen Vulkanausbruch passieren könnte. Veröffentlicht von Sémhur und ipd, da es nur Materialien enthält, die ursprünglich vom USGS stammen; Legende geändert.

Abb. 6.3. Ein Erdbeben, das seismische Wellen erzeugt. Meschede (2023, neu gezeichnet).

Abb. 6.4. Der Tsunami, der durch das Valdivia-Erdbeben von 1960 verursacht wurde, dargestellt sind die zeigt die Ausbreitung der Welle in Stunden über den Pazifischen Ozean an. Veröffentlicht von: http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/events/1960_05_22_tsunami.php und ipd, da es Materialien enthält, die ursprünglich von der USNOAA stammen

Abb. 6.5. Logo des US National Tsunami Hazard Mitigation Program. Aus: <http://nws.weather.gov/nthmp/documents/NTHMPStrategicPlan.pdf>. Published by USNOAA/National Science Foundation und ipd, da es Materialien enthält, die ursprünglich von der USNOAA stammen

Abb. 6.6. Fußwegerosion, Wald von Fontainebleau in der Nähe von Paris, Frankreich. Veröffentlicht von Romary unter den Bedingungen von GNUFDL.

Abb. 6.7. Sturmabfluss, Dobney Avenue, Wagga Wagga, New South Wales, Australien. Veröffentlicht von Bidgee unter CCA-SA 3.0 unported licence.

Abb. 6.8. Abfallmanagement in Kathmandu, Nepal. Veröffentlicht von Sigismund von Dobschütz unter den Bedingungen von GNUFDL

Abb. 6.9. Abfallmanagement in Stockholm, Schweden. Veröffentlicht von Holger.Ellgaard unter der CCA-SA 3.0 unported licence

Abb. 6.10. Deponie der South East New Territories, Hongkong, ausgekleidet mit Geotextilmembran. Veröffentlicht von Minghong unter den Bedingungen von GNUFDL, Version 1.2.

Abb. 6.11. Methangas-Entlüftungsöffnungen auf einer alten Landschaftsdeponie, auf der in der Vergangenheit Ölschiefer abgebaut wurde, Seafield, West Lothian, Schottland. Veröffentlicht von Paul Birrell als Teil der Geographie-Projektsammlung unter der CCA-SA 2.0 Generic-Lizenz.

Abb. 6.12. Darstellung eines typischen Grundwasserüberwachungsbrunnens. Veröffentlicht von AuntSpray unter CCA-SA 3.0 unported licence

Abb. 6.13. Von Scheuerschwämmen freigesetzte Mikroplastikkügelchen in einer weißen Schüssel; Mikrokügelchen haben eine Größe von einem Millimeter bis zu einem Hundertstel Millimeter. Veröffentlicht von Hungchaka unter der CCA-SA 4.0 internationalen Lizenz.

Abb. 6.14. Naturschutzgebiet Heeseberg in einem alten Steinbruch, Niedersachsen. Veröffentlicht von Manomaari unter der CCA-SA 3.0 unported licence

Abb. 6.15. Kohlenstoffabscheidungstechnologie wird in einem Kohlebergwerk getestet. Veröffentlicht von Peabody Energy, Inc unter CCA 3.0 unported licence

.....

Boxes

Box 1.1. Das Sonnensystem. Veröffentlicht von Planets2008.jpg unter CCA-SA 3.0 unported licence

Box 1.2.

- Regen in der Nähe von Lunde, Fünen, Dänemark. Herausgegeben von Malene Thyssen unter GNUFDL.
- Bodenfeuchtigkeit. Veröffentlicht von Ichor202 unter GNUFDL
- Grundwasserquelle in einem Steintrog gefangen, Owlcoats Lane in der Nähe von Bradford, England. Veröffentlicht von Betty Longbottom als Teil der Geographie-Projektsammlung unter der CCA-SA 2.0 Generic-Lizenz.

Box 1.3.

- Regentropfen fallen auf Wasser. Veröffentlicht von Juni aus Kyoto, Japan unter der CCA-SA 2.0 Generic-Lizenz
- Straßenrinne in der Altstadt von Stockholm, Schweden. Veröffentlicht von Bengt Nyman unter der CCA 2.0 Generic-Lizenz.
- Dasher Bari Teich. Veröffentlicht von Syed Aminul unter der internationalen Lizenz CCA-SA 4.0.

Box 1.4. Sandmuster, Barton on Sea, Hampshire, England. Veröffentlicht von Clive Perrin im Rahmen des Geographie-Projekts und veröffentlicht unter der CCA-SA 2.0 Generic-Lizenz.

Box 1.5. Wanderer ruht sich in der Tundra in der Nähe von Onion Portage in Alaska aus. Veröffentlicht von Western Arctic National Parklands unter der CCA 2.0 Generic-Lizenz.

Box 2.1. Das Universum im eigenen Garten.

- Savault-Kapelle in Ouroux-en-Morvan, Burgund, Frankreich in einer klaren sternenklaren Nacht. Veröffentlicht von Benh Lieu Song unter der internationalen Lizenz CCA-SA 4.0.
- Sternenbewegung, eingefangen durch einen offenen Kameraverschluss über dem La-Silla-Observatorium in Chile. Veröffentlicht von der Europäischen Südsternwarte unter der CCA 4.0 internationalen Lizenz.

Box 2.2. The asteroid belt

- Der Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter. Veröffentlicht ipd von seinem Autor Mdf in der englischen Wikipedia.
- Asteroid Gaspra, fotografiert von der Raumsonde Galileo. Ipd weil es ausschließlich von der NASA erstellt wurde.

Box 2.3. Kometen

- Der Hale-Bop-Komet 1997 gesehen von Kroatien aus. Veröffentlicht von Philipp Salzgeber unter der Lizenz CCA-SA 2.0 Austria
- Komet Churyumov-Gerasimenko im September 2014, fotografiert von der Raumsonde Rosetta bevor der Lander Philae auf seiner Oberfläche landete. Veröffentlicht von ESA/Rosetta/NAVCAM, CC BY-SA IGO 3.0 unter der CCA-SA 3.0 IGO-Lizenz.

Box 2.4. Planetengeologie – Mars

- Geologische Karte des Mars. Grünflächen zeigen Tieflandgebiete; Rot- und Violetttöne sind Vulkanangestein. Blau sind polare Gebiete. Braune und orange Farben sind felsige Hochlandgebiete; Gelb sind Einschlagskrater. Aus: http://pubs.usgs.gov/sim/3292/pdf/sim3292_map.pdf. Published by USGS und ipd weil es sich um ein Werk handelt, das von einem Beamten oder Angestellten der US-Regierung im Rahmen seiner offiziellen Pflichten erstellt wurde.
- The faulted canyon system near the equator. Veröffentlicht von NASA/JPL/USGS und ipd, da es nur Materialien enthält, die ursprünglich vom USGS stammen.
- Abflusskanal des Kasei Valle. Veröffentlicht von Areong unter den Bedingungen von GNUFDL.
- Blick vom Pathfinder-Standort auf dem Mars – Felsbrocken und Staub im Vordergrund mit niedrigen Hügeln im Hintergrund. Aus: <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA02405> und ipd weil es ausschließlich von der NASA erstellt wurde.

Box 2.5. Mit der Tageszeit wechselnde Schatten

- Fotos: Chris King

Box 3.1. Verwendung relativer Datierungsmethoden zur Ermittlung der geologischen Geschichte der Gesteine

- Gesteinsabfolge in Machtesh Ramon, Negev-Wüste, Israel. Veröffentlicht unter den Bedingungen von GNUFDL.

Box 3.2. Ein Beispiel für eine geologische Periode – die Trias

- Der „goldene Dorn“ am Global Boundary Stratotype Section and Point (GSSP) des Ladiniums Stufe (obere Mitteltrias), Bagolino-Abschnitt, Italienische Alpen. Veröffentlicht von Xavier Caré unter der CCA-SA 3.0 unported licence.

Box 3.3. Der Fehlerbereich bei absoluten radiometrischen Altersdaten

- Blick auf Edinburgh unter den Vulkangesteinen von Arthur's Seat in Schottland. Veröffentlicht von Andrew Bell unter den Lizenzen CCA-SA 3.0 unported und 2.5, 2.0 und 1.0 Generic Lizenzen.

Box 3.4. Von sehr, sehr schnellen bis hin zu sehr, sehr langsamen Prozessen

- Kerne von Tiefseesedimenten aus der Tiefsee bei Grönland; die Sedimentschichten haben sich über lange Zeiträume hinweg aufgebaut. Veröffentlicht von Hannes Grobe unter CCA 3.0 unported licence.
- Graue Schicht einer 8.000 Jahre alten Tsunami-Lage in Schottland, die in wenigen Minuten abgelagert wurde, mit Schichten aus dunklem Torf darüber und darunter. Veröffentlicht von Stozky10 unter CCA-SA 3.0 unported licence

Box 3.5. Katastrophale Einschlagereignisse (Impakt)

- Häufige Tektitformen – Hantel und Tropfen. Veröffentlicht von Brocken Inaglory unter den Bedingungen von GNUFDL.
- Geschockter Quarz mit Deformationsebenen, die unter dem Mikroskop in polarisiertem Licht sichtbar sind. Veröffentlicht von Glen A. Izett und ipd, da es nur Materialien enthält, die ursprünglich vom USGS stammen.
- Lonar-Meteoritenkrater in Indien – entstanden durch einen Einschlag, der vermutlich vor etwa 52.000 Jahren stattgefunden hat. Veröffentlicht von Nagwani unter CCA-SA 3.0 unported licence
- Der 100 km große Manicouagan-Krater in der Region Côte-Nord, Québec, Kanada, von der Internationalen Raumstation aus gesehen – entstanden durch einen Einschlag vor 215 Millionen Jahren. Veröffentlicht auf: <http://spaceflight.nasa.gov/gallery/images/station/crew-30/html/iss030e031663.html> und ipd weil es von ISAL des NASA Johnson Space Center erstellt wurde.
- Meteorkrater (Barringer) in der Nähe von Flagstaff in Arizona, USA, zeigt eine typische Einschlagsmulde mit erhöhtem Zentrum, umgeben von einem hohen Kraterrand – entstanden vor etwa 50.000 Jahren. Veröffentlicht von Neil unter www.nabber.org unter CCA 3.0 unported licence
- Stadien eines Impaktereignisses. Neu gezeichnet nach: <http://www.impact-structures.com/understanding-the-impact-cratering-process-a-simple-approach/>

Box 4.1. Ein ungewöhnliches Mineral – Diamant

- Die 'Big Hole' Diamantmine, Kimberley, Südafrika. Veröffentlicht von Lubor Ferenc unter der internationalen Lizenz CCA-SA 4.0.
- Diamant in Kimberlit. Dieses Bild ist ipd, da es nur Materialien enthält, die ursprünglich vom USGS stammen.
- Geschliffene Diamanten. Veröffentlicht von Mario Sarto unter den Bedingungen von GNUFDL, Version 1.2.

Box 4.2. Ein ungewöhnliches Sedimentgestein – Hornstein (oder Feuerstein)

- Feuersteine in Kalkmergeln aus der Kreidezeit in St. Margaret-at-Cliffe in der Nähe von Dover, Kent, England. Veröffentlicht von Clem Rutter, Rochester, Kent, Großbritannien unter GNUFDL.
- Pfeilspitze aus Feuerstein. Veröffentlicht von Adrian Michael unter GNUFDL.
- Feuersteinknolle in Kalkstein. Veröffentlicht von Acar54 und Benzer Fotograflar unter der CCA-SA 4.0 internationale Lizenz.

Box 4.3. Ein ungewöhnliches magmatisches Gestein – vulkanisches Glas

- Lavastrom aus vulkanischem Glas, Paulina Lake, Newberry National Volcanic Monument, Oregon, USA. Der Urheberrechtsinhaber dieser Datei erlaubt jedem, sie für jeden Zweck zu verwenden – Gary Halvorson, Oregon State Archives, USA.
- Obsidian, Lake Country, Oregon. Veröffentlicht von PAR~commonswiki, der das Werk ipd veröffentlicht hat.
- Obsidianmesser. Veröffentlicht von Birmingham Museums Trust, Tom Brindle unter CCA-SA 2.0 Generic Lizenz.

Box 4.4. Charles Darwin und der Boden

- Wurmkompostsäule. Fotos: Peter Kennett, Earthlearningidea

Box 4.5. Das tiefste Bohrloch der Erde, das “Kola Superdeep Borehole”. Veröffentlicht von Andre Belozeroff unter CCA-SA 3.0 unported licence

Box 4.6. Bildung von Kissenlava unter Wasser

- Eine Lavazunge unter Wasser. Veröffentlicht von der USNOAA/National Science Foundation und public domain, da es Materialien enthält, die ursprünglich von der USNOAA stammen.
- Kissenbasalt auf dem Meeresboden in der Nähe von Hawaii. Veröffentlicht von OAR/National Undersea Research Program (NURP) und ipd, da es Materialien enthält, die ursprünglich von der USNOAA stammen.
- Fossile Kissenlaven aus der Kreide, Oman, Wadi al Jizzi. Foto: Martin Meschede, Greifswald.

Box 4.7. Woraus besteht der Erdmantel?

- Xenolithe aus Peridotit (Lherzolith) in basaltischem Vulkangestein. Veröffentlicht von Khruner unter der internationalen Lizenz CCA-SA 4.0.
- Chromitischer Serpentin aus dem Krauth-Komplex (Speik-Komplex) in den Ostalpen Österreichs. Veröffentlicht von James St John unter der CCA 2.0 Generic-Lizenz.
- Steinmeteorit aus dem NWA 869-Meteorit. Veröffentlicht von H. Raab (Benutzer: Vesta) unter den Bedingungen von GNUFDL.

Box 4.8. Woraus besteht der Erdkern?

- Ein 1,7 kg schwerer einzelner Meteorit aus dem Sikhote Alin-Meteoritenschauer. Veröffentlicht von H. Raab (Benutzer: Vesta) unter den Bedingungen von GNUFDL, Version 1.2.

Box 4.9. Die Entdeckung schwarzer Raucher an ozeanischen Rücken

- Tiefseetauchboot *Alvin*. Veröffentlicht von USNOAA und ipd, da es Materialien enthält, die ursprünglich von USNOAA stammen.
- Schwarzer Raucher, Mittelatlantischer Rücken. Veröffentlicht von USNOAA und ipd, da es Materialien enthält, die ursprünglich von USNOAA stammen.
- Weiße Raucher, Marianenbogen,
- Pazifischer Ozean. Veröffentlicht von USNOAA und ipd, da es Materialien enthält, die ursprünglich von USNOAA stammen.

Box 4.10. Durch Plattenkollisionen verursachte Deckenüberschiebungen

- Die Glarner Überschiebung in den Schweizer Alpen, Martinsloch, Tschingelhörner. Veröffentlicht von Sunna unter CCA-SA 3.0 unported licence
- Faltenstruktur der Morcles-Decke. Veröffentlicht von GLOBE at Night, Jim Foster, Earth Science Picture of the Day, USRA.

Box 4.11. Im Handel erhältliches Quellwasser

- Evian. Veröffentlicht von Arroser unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Crystal geyser. Veröffentlicht von Cgroxane und ipd.
- Sasal. Veröffentlicht von Vincent de Groot unter <http://www.videgro.net> unter den Bedingungen von GNUFDL.
- Evergrande. Veröffentlicht von WKDx417 unter der internationalen Lizenz CCA-SA 4.0.
- Cre Cla Wasserkühler in Japan. Veröffentlicht von Pedia-City und als ipd.

Box 4.12. Grundwasserpumpmethoden

- Viktorianische Pumpstation in London, England, die einst eine riesige Dampfpumpmaschine enthielt. Veröffentlicht von R Sones für das Geographie-Projekt und zur Wiederverwendung unter der CCA-SA 2.0-Lizenz.
- Windpumpen, Namaqualand, Südafrika. Veröffentlicht von Caroline Auzias (Einzelheiten siehe Delphine Ménard) unter der Lizenz CCA-SA 2.0 France.
- Heute im Einsatz befindliche Diesel-Grundwasserpumpe, England. Veröffentlicht von John Poyser für das Geographie-Projekt und zur Wiederverwendung unter der CCA-SA 2.0-Lizenz.
- Eine moderne Handpumpe, Bahnhof Pindial, Indien. Veröffentlicht von Nikhilb239 unter der internationalen Lizenz CCA-SA 4.0.

Box. 4.13. Meeresströmungen und die am stärksten verschmutzte Insel der Erde. Worte der Wissenschaftlerin Jennifer Lavers aus: <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-4507612/World-s-polluted-island-revealed.html>

- Zirkulierende Oberflächenströmungen im Nord- und Südpazifik. Ipd, weil es Materialien enthält, die ursprünglich von der USNOAA stammen.
- Der verschmutzte Strand der unbewohnten Insel Henderson im abgelegenen Südpazifik. Veröffentlicht von American unter den Bedingungen von GNUFDL.

Box 4.14. Schneeball-Erde oder Matschball-Erde?

- Computer-simulierte Eisbedeckung während der Schneeball-Erde Zeit (Snowball Earth). Veröffentlicht von Linda Sohl und Mark Chandler bei http://www.giss.nasa.gov/research/briefs/sohl_01/ und ipd weil es ausschließlich von der NASA erstellt wurde.

Box 4.15. Die Erde während des thermischen Maximums im Paläozän/Eozän.

- Temperatur der Erde (°C) verglichen mit der heutigen Temperatur über die letzten 65 Ma. Veröffentlicht von Robert A. Rohde für Global Warming Art unter CC-SA 3.0 unported license.

Box 4.16. Charles Darwin und die Evolution

- Die Reiseroute der Beagle. Veröffentlicht von Sémhur unter der internationalen generischen Lizenz CCA-SA 4.0.
- Darwinfinken von der Galapagos-Insel. Gezeichnet von John Gould und ipd, da die Urheberrechtsdauer die Lebensdauer des Autors plus 100 Jahre oder weniger umfasst.

Box 4.17. Die Wallace-Linie

- Karte von Südostasien, veröffentlicht von <https://www.ncei.noaa.gov/media/3340> und ipd weil es Materialien enthält, die ursprünglich von der USNOAA stammen

Box 4.18. Das Massenaussterbeereignis "das große Sterben"

- *Glossopteris* Baumblätter und Samenkapseln, Houston Museum of Natural Science, Houston, Texas, USA. Veröffentlicht von Daderot unter CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication.

Box 4.19. Das K-Pg-Massensterben

- *Tyrannosaurus rex*, eine der letzten Dinosauriergruppen, die vor dem Massenaussterben der K-Pg gefunden wurden, Museum of the Rockies, Bozeman, Montana, USA. Veröffentlicht von FunkMonk unter der generischen CCA-SA 2.0-Lizenz.
- Geologen sammeln Sedimente an der K-Pg-Grenze, Wyoming, USA. Veröffentlicht von Dcondon unter CCA-SA 3.0 unported licence.

Box. 4.20. Die Gaia-Hypothese von James Lovelock

- StandardDaisyWorldRun2color.gif, neu gezeichnet nach einer Abbildung von Ginger Booth und veröffentlicht als ipd

Box 5.1. Ölbohrlochventile

- 'Weihnachtsbaum' aus Ventilen, North Dakota, USA. Veröffentlicht von Tim Evanson unter der generischen Lizenz CCA-SA A 2.0.

- Sprudelnde Erdölquelle – Lakeview-Erdöleruption in den USA, um 1911. Veröffentlicht unter <http://www.sjvgeology.org/history/lakeview/lakeview09.jpg> und ipd .

Box 5.2. Fracking von Schiefer und „dichtem“ Sandstein

- Neu gezeichnet nach einer Abbildung von MagentaGreen published unter der internationalen CCA-SA 4.0-Lizenz.

Box 5.3. Seismische Prospektion

- Seismisches Profil mit Interpretation durch die New York Bucht, vor New York City, USA. Veröffentlicht vom USGS und ipd, da es nur Materialien enthält, die ursprünglich vom USGS stammen.

Box 5.4. So findet man eine Diamantlagerstätte

- Entnahme einer Schwermineralprobe in einem ausgetrockneten Flussbett. Foto: Chris King.
- Schwermineralkonzentrat im Feld. Foto: Chris King.
- Schwermineralkonzentrat auf einem Kimberlit. Foto: Chris King.
- Premier-Diamantenmine, Cullinan, Südafrika. Veröffentlicht von Paul Parsons (paul.parsons@hyphen.co.za) unter CCA-SA 3.0 unported licence

Box 5.5. Geothermie – ist sie erneuerbar?

- Hydrothermales Kraftwerk und Bohrloch, Brühl, Nordrhein-Westfalen. Veröffentlicht von AnRo0002 unter Creative Commons CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication.

Box 6.1. Ein kolossaler Ausbruch – Krakatau, 1883

- Lithographie aus „*The Eruption of Krakatoa and Subsequent Phenomena*“, 1888. Herausgegeben von George James Symonds (1838-1900). Herausgegeben von der Royal Society (UK). Krakatoa Committee, 71-1250, Houghton Library, Harvard University, USA. Ipd, da die Urheberrechtsdauer das Lebensalter des Autors plus 100 Jahre oder weniger beträgt.
- Gemälde des Himmels im „Nachglühen“, das durch die Asche des Krakatau-Ausbruchs im Jahr 1883 verursacht wurde, von William Ashcroft (1832-1914) und enthalten in *The Eruption of Krakatoa, and Subsequent Phenomena* (1888), edited by George James Symonds. 71-1250, Houghton Library, Harvard University und ipd da sie bereits vor über 100 Jahren gemalt wurden.

Box 6.2. Ein gigantischer Ausbruch – der Oruanui-Ausbruch des Taupō vor etwa 25.360 Jahren

- Künstlerische Darstellung des Oruanui-Ausbruchs aus dem Weltraum. Veröffentlicht von Anynobody, basierend auf einem NASA-Foto, veröffentlicht unter CCA-SA.

Box 6.3. Die elastische Rückpralltheorie

- Bewegung des Bodens in der elastischen Rückpralltheorie von H.F. Reid.

Box 6.4. Seismometer

- Aufzeichnungsausrüstung für eines einer Reihe von Seismometern, die in einem Loch in der Nähe des Golfs von Korinth, Griechenland, stationiert sind. Foto: Chris King
- Aufzeichnungsausrüstung und Notstromversorgung für ein Seismometer im Golf von Korinth, Griechenland. Foto: Chris King
- Zwei Seismometer, links das ältere, rechts das modernere, Seismologisches Labor Patras, Griechenland. Foto: Chris King
- Analoge Trommelaufzeichnung eines Seismometers. Veröffentlicht von Z22 unter CCA-SA 3.0 unported licence

Box. 6.5. Das Kobe Erdbeben, Japan, 1995 – Magnitude 6,9

- Die Geschichte von Yasuyo Morita aus: <http://www.sln.org.uk/geography/7-11kobe.htm>
- Schaden an einer Brücke in Kobe. Veröffentlicht von 野田知明 unter internationaler Lizenz CCA-SA 4.0.

Box 6.6. Das Kaschmir-Erdbeben, Pakistan, 2005 – Magnitude 7,6

- Geschichte der Mutter Shazia Ahmed aus: <https://www.oxfam.org.nz/what-we-do/emergencies/previous-emergencies/kashmir-earthquake-2005/stories-from-balakot>

- Shazia mit ihrem Baby, das drei Tage in den Trümmern von Balakot überlebte, bevor es gerettet wurde. Oxfam aus: <https://www.oxfam.org.nz/what-we-do/emergencies/previous-emergencies/kashmir-earthquake-2005/stories-from-balakot>
- Die zerstörte Stadt Balakot. Herausgegeben von der US Air Force und ipd – erstellt von einem Offizier oder Mitarbeiter der US-Regierung.

Box 6.7. Ein Erdbebenplan

- Erdbebenvorsorgeschild in Vancouver, Kanada. Veröffentlicht von Wikiemon unter CCA-SA 3.0 Unported licence
- ighlights der Earthquake Country Alliance in Kalifornien 'Sieben Schritte zur Erdbebensicherheit'. <http://www.earthquakecountry.org/sevensteps/>

Box 6.8. Der Tsunami 2011 in Tōhoku, Japan

- Augenzeugenbericht entnommen aus <http://factsanddetails.com/japan/cat26/sub161/item1674.html#chapter-10>
- Public hospital in Minamisanriku after the 2011 Tōhoku tsunami, Japan. Published by Christopher Johnson unter CCA-SA 2.0 Generic licence

Box 6.9. Der Tsunami im Indischen Ozean, 2004

- Interview transkribiert aus einem UNISDR-Video, das auf YouTube veröffentlicht wurde: <https://www.youtube.com/watch?v=V0s2i7Cc7wA>
- Tsunami-Welle trifft auf die Küste von Phuket. Veröffentlicht von FlyAkwa unter der internationalen Lizenz CCA-SA 4.0.

Box 6.10. Informationen zur Tsunami-Warnung

- Blatt online veröffentlicht vom USNOAA Department of Commerce, dem National Weather Service, der Inter Governmental Oceanographic Commission und dem International Tsunami Information Center unter <https://earthweb.ess.washington.edu/tsunami/general/mitigation/mitigation.html>

Box 6.11. Der Oso-Schlammstrom, 29. März 2014

- Augenzeugenbericht aus <https://www.earthmagazine.org/article/oso-landslide-report-yields-some-answers>
- Die Schlammlawine von Oso und ihre Narbe. Herausgegeben von Samantha Ciaramitaro und ipd.

Box 6.12. Säurehaltiger Abfluss aus einer Mine

- Säurehaltiger Abfluss aus einer alten Mine, Rio Tinto, Spanien. Veröffentlicht von Carol Stoker, NASA und ipd, da es ausschließlich von der NASA erstellt wurde.

Box 6.13. Der Untergang der minoischen Kultur

- Satellitenaufnahme des Kraters von Santorini (Thera) heute. Herausgegeben von NASA und ipd.

Box 6.14. 'Das Jahr ohne Sommer', 1816

- Temperaturrückgang 1816 in Europa. Aus: http://www.giub.unibe.ch/klimet/docs/luterbacheretal_science.pdf. Veröffentlicht von Giorgiognp2 unter CCA-SA 3.0 unported licence
- Chichester Canal, eine Sonnenuntergangsszene, möglicherweise beeinflusst durch Vulkanasche in der Atmosphäre, gemalt in England von J.M.W. Turner. Ipd da die Urheberrechtsdauer das Lebensalter des Autors plus 100 Jahre oder weniger beträgt.

Box 6.15. Wasserkriege

- Der Jordan bringt Wasser aus dem Norden nach Israel. Veröffentlicht von Jean Housen unter den Bedingungen von GNUFDL.

Box 6.16. Ölkriege

- Brennende Ölfelder hinter einem verlassenen Panzer, Kuwait, 1991. Veröffentlicht von JO1 Gawlowicz von der US Navy und daher ipd.

Box 6.17. Die Migration der frühen Menschen aus Afrika

- Die Ausbreitung früher menschlicher Gruppen auf der ganzen Welt in Jahren v.h.: Erste Auswanderung – *Homo erectus*; zweite – *Homo neanderthalensis*; dritte – *Homo sapiens*. Neu gezeichnet nach einer von NordNordWest und ipd veröffentlichten Abbildung.

Box 6.18. Die Austrocknung der Sahara

- Manda-Guéli-Höhle, Ennedi-Gebirge, Nordost-Tschad. Veröffentlicht von David Stanley aus Nanaimo, Kanada unter der generischen Lizenz CCA-SA2.0.
- Vom Wind erodierte Felsformation, Ennedi-Gebirge, Tschad. Veröffentlicht von David Stanley aus Nanaimo, Kanada unter der generischen Lizenz CCA-SA2.0.

Box 6.19. 'Doggerland' im Gebiet der Nordsee

- Karte von Doggerland um 12.000 Jahre v.h. Neu gezeichnet nach einer Abbildung von Max Naylor unter CCA-SA 3.0 unported licence.

Box 7.1. Das geoethische Versprechen. Entnommen aus: <http://www.geoethics.org/geopromise>

- Verteidigung in Yuma, Arizona. Veröffentlicht von einem Mitarbeiter des US-Militärs oder des Verteidigungsministeriums, übernommen oder erstellt im Rahmen der offiziellen Pflichten dieser Person. Da es sich um ein Werk der US-Bundesregierung handelt, ist das Bild ipd.
- Afghanische Kinder. Veröffentlicht von einem Soldaten oder Angestellten der US-Armee, wie oben.

Box 7.2. Geologische Kartierungen

- Geologische Grenze zwischen grauem Sandstein und feinkörnigem hellem Granit, Sea Point, Kapstadt, Südafrika. Foto: Chris King.
- Eine große Neigungsänderung an der geologischen Grenze zwischen den widerstandsfähigen magmatischen Gesteinen eines Sills auf der rechten Seite und den weicheren Sedimentgesteinen links, am Hadrianswall im Norden Englands. Veröffentlicht von Nilfanion unter CCA-SA 3.0 unported licence

Box 7.3. Eine Schürfuntersuchung nach Diamanten

- Ausheben von Gräben bis zum Gestein an der Basis (vor modernen Gesundheits- und Sicherheitsvorschriften). Foto: Chris King.
- Eine diamantreiche Tonsteinschicht. Foto: Chris King.
- Schrägschichtung im Jura-Sandstein, der die Strömung des alten Flusses aus dem Westen zeigt (links). Foto: Chris King.

.....

Tabellen

Tab. 2.1. Planeten des Sonnensystems, in der Reihenfolge von der Sonne

- Merkur, Foto vom Messenger-Vorbeiflug. Herausgegeben von NASA und ipd.
- Venus, Foto von Mariner 10. Herausgegeben von NASA und ipd; Bildbearbeitung von R. Nunes unter <http://www.astrosurf.com/nunes>
- Erde, aus dem Tutorial von BlenderGuru.com. Veröffentlicht von Jason Harwell unter CCA-SA 3.0 unported licence
- Mars, Foto vom Hubble-Teleskop. Herausgegeben von der NASA und ipd.
- Jupiter, Foto von Voyager 1. Wie oben.
- Saturn, Foto von Voyager 2. Wie oben.
- Uranus Foto von Voyager 2. Wie oben.
- Neptune Foto von Voyager 2. Wie oben.

Tab. 2.2. Die Neigung der Erdachse verursacht Jahreszeiten

Tab. 3.1. Relative Datierungsmethoden

- Verkippte Grauwacken-Abfolge im Ruhrgebiet – die jüngsten Schichten liegen oben. Foto: Martin Meschede.
- Gefaltete Lagen in Grönland – der Felsen an der Spitze der Insel ist überkippt, auf der Oberseite liegt älteres Gestein. Veröffentlicht von Håvard Berland unter den Bedingungen von GNUFDL.
- Dikes in Granit, Korsika, Lumio. Ältestes: grauer Granit, durchlagen von hellem Aplitgang (horizontal). Jüngstes: dunkler Basaltgang (schräg). Foto: Martin Meschede.

- Herm, Kanalinseln, UK. Die Xenolithe (einschließlich der Fragmente) aus dunklem Gestein in hellerem Granit sind älter. Veröffentlicht von Kevin Walsh unter der CCA 2.0 Generic-Lizenz.
- Beispiel für eine von William Smiths Zeichnungen einer Gruppe von Fossilien, die zur Datierung eines Gesteins verwendet wurden. Ipd da als Urheberrechtsdauer das Lebensalter des Autors plus 70 Jahre oder weniger ist.
- Winkeldiskordanz in Bochum, Ruhrgebiet. Das undeformierte obere Gestein (Kreide) ist jünger als das darunter liegende deformierte und geneigte graue Gestein (Grauwacke, Karbon). Herausgegeben von Hermann A. Wiese unter den Bedingungen von GNUFDL.

Tab. 3.2. Prinzipien der Ablagerung von Sedimenten, Laven und Vulkanasche

- Horizontal abgelagerte kreidezeitliche Sedimente – Anröchte, Nordrhein-Westfalen. Foto: Martin Meschede
- Ursprünglich nicht horizontal abgelagerte Sedimente – kreuzgeschichtete (lagige) Sande abgelagert während der Vereisungsphase in Estland. Veröffentlicht von Hannu und als ipd.
- Lateral durchgehende Sedimentgesteine des Grand Canyon, Arizona, USA. Veröffentlicht von ‚selbst gemacht‘ unter der CCA-SA 3.0 unported licence.
- Nicht kontinuierliche Sedimente, – verflochtene Flussablagerungen in Island – die an den Talseiten enden. Veröffentlicht von Christopher Michel unter der CCA 2.0 Generic-Lizenz.

Tab. 3.3. William Smiths Methode, die das „Gesetz der Faunensukzession“ anwendet

Alle Zeichnungen von William Smith sind ipd, da die Urheberrechtsdauer das Lebensalter des Autors plus 70 Jahre oder weniger umfasst.

Tab. 3.4. Typische Fossilien, die in Gesteinen unterschiedlichen Alters gefunden wurden

- *Argopecten gibbous*, Jakobsmuschel. Veröffentlicht vom FWC Fish and Wildlife Research Institute unter der CCA 2.0 Generic-Lizenz.
- *Crassostrea titan*, Auster. Published by Kevmin unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Fossile Zähne von *Carcharias tingitana* aus Morocco. Veröffentlicht von Hectonichus unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- *Micraster leskei*, Stachelhäuter. Veröffentlicht von Didier Descouens unter der internationalen Lizenz CCA-SA 4.0.
- *Calliphyloceras*, Ammonit. Veröffentlicht ipd von Antonov.
- *Ceratites*, Ceratit, Ammonoid. Veröffentlicht von BerndH unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Goniatit, Ammonoid. Veröffentlicht von Ghedoghedo unter der internationalen Lizenz CCA-SA 4.0.
- *Caninia*, solitäre rugose Korallen.
https://en.wikipedia.org/wiki/Caninia_%28coral%29#/media/File:Caninia_torquia_coral_KGS.jpg
- *Phacops*, Trilobit. Veröffentlicht von Dwergenpaartje unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- *Monograptus*, Graptolith. Veröffentlicht von porshunta unter den Bedingungen von GNUFDL.
- *Tetragraptus*, Graptolith. Veröffentlicht von James St John unter der CCA 2.0 Generic-Lizenz.
- *Paradoxides*, Trilobit. Veröffentlicht von Sam Gon III zur Verwendung für jeden Zweck.

Tab. 3.5. Die wichtigsten Unterteilungen der geologischen Zeit basieren auf der neuesten International Chronostratigraphic Chart, die von der International Commission on Stratigraphy veröffentlicht wurde

Tab. 4.1. Häufig vorkommende Minerale, ihre Chemie, Form und physikalischen Eigenschaften

- Quarz. Doppelender-Quarz: Suttrop, Sauerland, Rauchquarz: Namibia, Bergkristall: Oman. Foto: Martin Meschede.
- Feldspat. Kalifeldpat-Kristalle in Granit: Insel Elba, Italien, Capo St. André. Foto: Martin Meschede.
- Glimmer. Kristalle von einer unbekannten Lokalität. Veröffentlicht von Pascal Terjan unter der CCA-SA 2.0 Generic-Lizenz.
- Kalzit – eine Ansammlung gelblicher Kalzitkristalle mit Hundezahnmuster aus der Nkana-Mine in Sambia. Veröffentlicht von Rob Lavinsky, iRocks.com – CC-BY-SA-3.0.
- Halit (Steinsalz). Kristalle aus: Wieliczka Salzbergwerk, Polen. Published by Lech Darski unter CCA-SA 4.0 International licence
- Gips – Kristalle von einer unbekannten Lokalität in Form einer 'Wüstenrose'. Veröffentlicht von Rama unter der Lizenz CCA-SA 2.0 France.
- Pyrit. Kristalle von einer unbekannten Lokalität. Veröffentlicht von Mauro Cateb unter CCA-SA 3.0 unported licence.

- Bleiglanz (Galena) auf Kalzit. Kristalle aus: Gibraltar Mine, Naica, Municipio de Saucillo, Chihuahua, Mexico. Veröffentlicht von Rob Lavinsky, iRocks.com – CC-BY-SA-3.0.

Tab. 4.3. Wichtige Prozesse der Fossilisierung

- *Eurohippus*, kleines, etwa hundegroßes Säugetierfossil, Vorfahr des Pferdes – mit Knochen und erhaltenem Fell. Creative-Commons-Lizenz „CC0 1.0 Verzicht auf das Copyright“.
- *Calymene*, Trilobit – Fossil aus der Henryhouse Formation near Ada, Oklahoma, USA; Silur. Veröffentlicht von Dwergenpaartje unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Ammonit, ursprünglich mit einem Gehäuse aus Kalziumkarbonat, ersetzt mit Pyrit. Fossil aus Bully Calvados, Frankreich; Jura. Veröffentlicht von Didier Descouens unter CCA 3.0 unported licence
- Die innere und äußere Form einer schneckenartigen Gastropode (das Fossil selbst wurde aufgelöst, sodass die Form der Innen- und Außenseite des Gehäuses zurückbleibt). Fossil aus der Galena-Formation, Iowa, USA; Ordovizium. Veröffentlicht von James St John unter der CCA 2.0 Generic-Lizenz.
- Abdruck eines Dinosaurier-Fußabdrucks, Fossil aus der Ashdown-Formation, Fairlight, Sussex, England; Kreide. Veröffentlicht von Sandpiper unter CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication.
- Wurmbauten und die Ruhestätte eines Trilobiten. Fossilien aus der Gog-Formation, Lake Louise, Alberta, Kanada; Kambrium. Veröffentlicht von Wilson44691 und als ipd.
- Wurzelspuren einer fossilen Lepidodendron-Pflanze (Körperfossil) mit Wurzelspuren (Hohlformen – Spurenfossilien). Fossil aus Nordost-Ohio, USA; Karbon. Veröffentlicht von Wilson44691 unter CCA-SA 3.0 unported licence.

Tab. 4.5. Häufig vorkommende Sedimentgesteine

Bilder von Handstücken

- Konglomerat. ESEU. Foto: Peter Kennett.
- Beiger Sandstein. ESEU, wie oben.
- Roter Sandstein. ESEU, wie oben.
- Tonstein/Siltstein. ESEU, wie oben.
- Tonstein. Veröffentlicht von Amcyrus2012 unter der internationalen Lizenz CCA 4.0.
- Ton aus San Julian, Santa Cruz, Argentinien. Veröffentlicht von Beatrice Murch unter der CCA 2.0 Generic-Lizenz.
- Fossilführender Kalkstein. ESEU, wie oben.
- Oolitische Kalkstein. ESEU, wie oben.
- Kreidekalk. Veröffentlicht von Superagent001 unter der internationalen Lizenz CCA 4.0.
- Steinsalz – Mongolisches Steinsalz aus dem Uvs-Nuur-Becken, Mongolei. Veröffentlicht von GFDL (Autor Mizu Basyo) unter GNUFDL.
- Kohle. ESEU, wie oben.

Bilder von Aufschlüssen

- Konglomerat-Aufschluss, Mt. Adarra nahe San Sebastian, Spanien; Kreide. Veröffentlicht von Joxemai unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Kreuzgeschichteter beigefarbener Sandstein, Isle of Bressay, Shetland Islands, UK; Devon. Das Urheberrecht liegt bei Anne Burgess und ist zur Wiederverwendung unter der CCA-SA 2.0 lizenziert.
- Roter Navajo Sandstein im Antelope Canyon, Arizona, USA. Die rote Farbe ist eine Folge des Zements aus hämatitischem Eisen; Trias/Jura, USA. Veröffentlicht von Meckimac unter den Bedingungen von GNUFDL.
- Permischer roter Tonstein mit helleren Siltstein-Lagen, Bassin de Lodève, Hérault, la Lieude, Mérifons, Frankreich. Veröffentlicht von Pinpin unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Mariner Tonstein. Slate Hill Road, Marcellus, New York, USA; Devon. Veröffentlicht von Lvklock unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Ton, Estland; Quartär. Herausgegeben von Siim Sepp unter GNUFDL.
- Fossilführender Kalkstein des Green Bridge of Wales Bogens, Pembrokeshire, Wales; Karbon. Veröffentlicht von JKMMX unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Oolitische Jura-Kalkstein im Steinbruch Rothenstein III, Jura-Region, Frankreich; Oberer Jura. Veröffentlicht von J. Stiegler unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Die hohen Kreidefelsen von Møn, Dänemark; Obere Kreide. Veröffentlicht von Chad K unter der CCA 2.0 Generic-Lizenz.
- Steinsalz im Salzbergwerk Asse, Remlingen, Niedersachsen. Foto: Martin Meschede.

- Abtauchendes Kohleflöz im Steinbruch Rauen, Mülheim an der Ruhr, Nordrhein-Westfalen; Oberkarbon. Foto: Martin Meschede.

Tab. 4.7. Häufig vorkommende magmatische Gesteine

Bilder von Handstücken

- Granit. ESEU. Foto: Martin Meschede.
- Gabbro. Wie oben.
- Dolerite. Sammlung des Nationalmuseums, Prag, Tschechische Republik. Veröffentlicht von Karelj und als ipd.
- Basalt. ESEU. Foto: Peter Kennett.
- Andesit. Veröffentlicht von Michael C. Rygel unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Vulkanische Asche. Quelle: <http://resourcescommittee.house.gov/subcommittees/emr/usgsweb/photogallery/>; English Wikipedia, Original-Upload vom 3. August 2004 von Chris 73. Da es sich um ein Werk der US-Bundesregierung handelt, ist das Bild ipd.

Bilder von Aufschlüssen

- Granitfelsen mit Wollsackverwitterung, Ruine Flossenbürg, Bayern; Karbon. Foto: Martin Meschede.
- Gabbro aus dem Lizard-Ophiolith-Komplex in Carrick Luz, Südengland; Devon. Foto: Martin Meschede.
- Dolerit-Gang am Ufer eines Flusses, Agwa Rock, Lake Superior Provincial Park, Kanada. Veröffentlicht von Fungus Guy unter CCA-SA 3.0 unported licence
- Basaltsäulen (entstanden, als der Basalt abkühlte) am Scheibenberg, Sachsen; Oligozän. Foto: Martin Meschede.
- Andesitischer Lavastrom, Stewart Peak Vulkan, San Luis Caldera Complex, Colorado, USA; Oligozän. Herausgegeben von P.W. Lipman; ipd, weil es Materialien enthält, die ursprünglich vom USGS stammen.
- Vulkanasche aus Tufflagen auf den Äolischen Inseln in der Nähe von Sizilien, Italien; Quartär. Veröffentlicht von Stefan Fotos aus Leipzig, Deutschland unter der CCA-SA 2.0 Generic-Lizenz.

Tab. 4.9. Common metamorphic rocks

Bilder von Handstücken

- Tonschiefer. ESEU. Foto: Peter Kennett
- Glimmerschiefer. Wie oben.
- Gneis. Wie oben.
- Marmor. Wie oben.
- Metaquarzit (Quarzit). Wie oben.

Bilder von Aufschlüssen

- Schiefer in einem durch Felsanker und Drahtgeflecht geschützten Straßeneinschnitt, Rothaargebirge, Nordrhein-Westfalen; Devon. Veröffentlicht von Elop unter CCA-SA3.0 unported licence.
- Glimmerschiefer, Le Brévent, Chamonix, Mont Blanc, Frankreich, Devon. Foto: Martin Meschede.
- Gebänderter Gneis am Zuckerhut, Rio de Janeiro, Brasilien; Präkambrium. Veröffentlicht von Raphael de Siqueira Ferreira unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Marmorblock im Carrara-Steinbruch, Italien. Veröffentlicht von Lucarelli unter GNUFDL.
- Aufschluss in Metaquarzit, El Castellar, Zaragoza, Spanien; Ordovizium. Veröffentlicht von PePeEfe unter der internationalen Lizenz CCA-SA 4.0.

Tab. 4.10. Häufige Verwitterungsprozesse

- Zerbrochener Felsbrocken, Südisland. Veröffentlicht von Till Niermann unter GNUFDL, Version 1.2.
- Granitplatten brechen aufgrund von Erwärmung/Abkühlung ab, Half Dome, Yosemite-Nationalpark, USA. Veröffentlicht von HylgeriaK unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Karbonalksteinpflaster mit verbreiterten Fugen (Grykes), Doolin Quay, Irland. Veröffentlicht von Bob Jones unter der CCA-SA 2.0 Generic-Lizenz.
- Chemische Verwitterung und Oxidation von Eisenmineralen entlang von Fugen in Sandstein, Wealden-Formation, Südengland. Foto: Martin Meschede
- Flechten aufgewachsen auf Quarzit, Südschweden. Foto: Martin Meschede.
- Bodenschichten im Rheintal bei Rastatt, Baden-Württemberg. Veröffentlicht von U. Burkhardt unter CCA-SA 3.0 unported licence.

Tab. 4.11. Wichtige Erosionsprozesse

- Ufereinsturz aufgrund von Unterhöhlung durch Erosion, Tista River, Sundarganj Thana, Bangladesch. Veröffentlicht von Ibrahim Husain Meraj unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Küstenerosion durch Kliffabbrüche, Halbinsel Jasmund, Rügen, Mecklenburg-Vorpommern. Foto: Martin Meschede.
- Geröllkegel, Bow Lake in der Nähe von Crowfoot Mountain, Alberta, Kanada. Veröffentlicht von Florian Fuchs unter CCA 3.0 unported licence
- Eine Sandsturmwolke weht über der Wüste in Marokko. Foto: Martin Meschede.
- Teufelstisch im Dahner Felsenland, Pfälzer Wald, Rheinland-Pfalz. Foto: Martin Meschede.
- Durch Eisbewegung glattgeschliffener felsiger Untergrund mit Gletscherschrammen, Aletschgletscher, Schweiz. Foto: Martin Meschede.

Tab. 4.12. Landschaftsformen, die aus widerstandsfähigen Gesteinsschichten bestehen

- Tafelbergplateau, Kapstadt, Südafrika. Veröffentlicht von Harvey Barrison aus Massapequa, NY, USA unter der CCA-SA 2.0 Generic-Lizenz.
- Cuesta von der Victoria Island-Fähre aus gesehen, Vancouver, Kanada. Foto, Chris King.
- Bergrücken Mount Rundle, in der Nähe von Banff, Alberta, Kanada. Veröffentlicht von Stevan Marcus Stevanm1 unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Abert Rim Fault Scarp, Oregon – einer der höchsten in den USA. Veröffentlicht von Abert Rim ACEC unter der CCA-SA 2.0 Generic-Lizenz.
- Eine Bucht zwischen Landzungen, Cabo de la Vela, Kolumbien. Veröffentlicht von Tanenhaus unter der CCA 2.0 Generic-Lizenz.
- Steile Klippen und ein Bogen, Island Archway, Great Ocean Road, Victoria, Australien. Veröffentlicht von Diliff unter der CCA-SA 3.0 Unported-Lizenz
- Abrutschende Küstenhänge, Shippards Chine, Isle of Wight, England. Veröffentlicht von Graham Horn unter der CCA-SA 2.0 Generic-Lizenz.

Tab. 4.13. Landschaftsmerkmale, die hauptsächlich durch Erosion und Ablagerung entstanden sind

- V-förmiges Flusstal, Goriot, Pakistan. Veröffentlicht von Khakan Ibrahim unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- U-förmiges Gletschertal, Prapic-Tal in der Nähe von Orcières, Hautes-Alpes, Frankreich. Veröffentlicht von Fr.Latreille unter GNUFDL.
- Mäandrierende Flüsse in der Sambesi-Flussebene in Namibia, aus der Luft gesehen; Fluglandebahn unten rechts. Veröffentlicht vom NASA Earth Observatory: zambezi_ali_2010128_lrg.jpg. Ipd, weil es ausschließlich von der NASA erstellt wurde.
- Silvaplana-Delta, mündet in den Silvaplannersee, Schweiz. Veröffentlicht von On-chan unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Der Isunnguata-Sermia-Gletscher im Hintergrund hat die Moräne im Vordergrund abgelagert, Kangerlussuaq, Grönland. Veröffentlicht von Chmee2/Valtameri unter CCA 3.0 unported licence.

Tab. 4.14. Wichtige Sedimentstrukturen

- Geschichtete Konglomerate und Sandsteine aus dem Rotliegend, Perm, Hettstedt, Tal der Heiligen Reiser, Sachsen-Anhalt. Foto: Martin Meschede.
- Laminierter Tonstein, Ohmden, Baden-Württemberg; Unterer Jura. Foto: Martin Meschede.
- Schrägschichtung in Bunt-sand-stein-Ablagerungen am Teufels-tisch, Pfälzer Wald, Rhein-land-Pfalz. Der Wind wehte von rechts nach links. Foto: Martin Meschede.
- Asymmetrische Wellen-rippeln in kambrischem Sandstein, Wiśniówka Duża, Polen. Das Wasser floss im Bild von oben nach unten. Veröffentlicht von Robert Niedźwiedzki unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Symmetrische Rippelmarken in feinkörnigem Sand, Gironde-Ästuar, Frankreich. Die Wellen bewegten sich von links nach rechts. Foto: Martin Meschede.
- Gradierte Schichtung in einer Turbiditlage (unten grob, nach oben hin feiner werdend), Broto, Südpirenen, Spanien. Foto: Martin Meschede
- Trockenrisse rund um einen Dinosaurier-Fußabdruck in Tonstein, Loulle, Franche-Compte, Frankreich. Veröffentlicht von PePeEfe unter CCA-SA 3.0 unported licence.

Tab. 4.15. Wichtige magmatische Strukturen

- Moderne Kissenlava auf dem Meeresboden, fotografiert während einer Expedition mit dem Forschungsschiff Polarstern im Südatlantik, East Scotia Rift, 2019. Foto: Marum Bremen.

- Kissenbasalte aus dem Jura, steilgestellt, die Oberseite zeigt nach links. Insel Elba, Italien. Foto: Martin Meschede.
- Kilt Rock Sill, Skye, UK. Die über dem Sill liegenden Schichten wurden erodiert. Veröffentlicht von arjecahn auf flickr unter der CCA 2.0 Generic-Lizenz.
- Dunkle Dolerit-Gänge aus dem Präkambrium (1100 Mill. J.), die durch helleres Gestein (1800 Mill. J.) schneiden, Koster-Inseln, Schweden. Veröffentlicht von Thomas Eliasson vom Geological Survey of Sweden: <http://www.flickr.com/people/geologicalsurveyofsweden/> unter der generischen CCA 2.0-Lizenz.
- Satellitenbild der 30 km großen Granitintrusion des Brand-berg-Massivs in Namibia, die das umliegende Gestein zu einer dunklen metamorphen Aureole verkrustete. Ipd, weil es Materialien enthält, die ursprünglich von USGS stammen.

Tab. 4.16. Durch Regionalmetamorphose gebildete metamorphe Gesteine

- Tonstein. ESEU. Foto: Peter Kennett
- Tonschiefer. Wie oben.
- Glimmerschiefer. Wie oben.
- Gneis. Wie oben.
- Granit. Wie oben.
- Sandstein. Wie oben.
- Metaquarzit (Quarzit). Wie oben.
- Fossilführender Kalkstein. Wie oben.
- Marmor. Veröffentlicht von Beatrice Murch unter der CCA 2.0 Generic-Lizenz.

Tab. 4.17. Brüche im Gestein, erzeugt durch Gesteinsversagen – Klüfte und Störungen

Alle Zeichnungen in Tab. 4.17: Meschede (2023, neu gezeichnet)

- Geklüftete Tonsteinlage in ordovizischem Schiefer, Fort Plain, New York, USA. Veröffentlicht von Michael C. Rygel unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Abschiebungen in den Wänden des Kanals von Korinth, Griechenland. Foto: Chris King
- Satellitenaufnahme der Piquiang-Störung, Tian Shan-Gebirge, China. Veröffentlicht vom NASA Earth Observatory, Bilder von Robert Simmon und Jesse Allen, und ipd, da es von der NASA erstellt wurde.
- Aufschubung in Sandstein, Oregon, USA. Von der AGI World Image Bank, hflo30, Marli Miller, University of Oregon, USA.
- Lengericher Überschiebung, oberer Block Mergel des Cenomaniums über Tonsteinen und Mergeln des Turoniums. Foto: Martin Meschede.

Tab. 4.18. Faltentypen

- Antiklinale in devonischen Ton-, Silt- und Sandsteinen. Teufelsley bei Vossenack, Eifel, Rheinland-Pfalz. Foto: Martin Meschede.
- Eine Synklinale in Sandsteinen der neogenen Barstow-Formation, San Bernardino County, Kalifornien, USA. https://en.wikipedia.org/wiki/Barstow_Formation#/media/File:Rainbow_Basin.JPG
- Gefalteter Kalkstein in der Glaserbachklamm, Österreich; Unterer Jura. Veröffentlicht von Viva La Ren unter den Lizenzen CCA-SA 3.0 Unported 2.5 Generic, 2.0 Generic und 1.0 Generic.
- Enge Falten bei Ágios Pávlos im Süden der Insel Kreta, Griechenland. Veröffentlicht von Dieter Müller unter GNUFDL
- Gefaltete, 2,6 Milliarden Jahre altes präkambrisches gebändertes Eisenerz in der Nähe von Sudan, Minnesota, USA. Veröffentlicht von James St John unter der CCA 2.0 Generic-Lizenz.
- Kleine isoklinale Falte in den Monts d'Arrée bei Commana, Frankreich. Veröffentlicht von Zarmel <http://www.geodiversite.net/auteur2> unter CCA-SA-Lizenz.

Tab. 4.19. Gesteine der ozeanischen Kruste

- Sedimentkern aus dem Südatlantik. Veröffentlicht von Hannes Grobe/AWI unter CCA unported licence.
- Basalt. Foto: Peter Kennett.
- Dolerite. Veröffentlicht von Karelj und als ipd.
- Gabbro. ESEU, Foto: Peter Kennett.

Tab. 4.22. Die wichtigsten Befunde zur Theorie der Plattentektonik

- Form der Puzzleteile – das Kontinentalpuzzle, Kontinentalschelf. © Andrew McLeish in Geological Science, neu gezeichnet von ESEU und mit Genehmigung verwendet.

- Geologische Befunde zum „Puzzle“ – Verteilung alter Gesteine in Südamerika und Afrika. © Andrew McLeish in Geological Science, neu gezeichnet von ESEU und mit Genehmigung verwendet
- Fossile Befunde zum „Puzzle“ – Verbreitung von Land-/Süßwassertieren und -pflanzen auf den zu „Gondwanaland“ gehörenden Kontinenten. Mit Genehmigung des USGS reproduziert, von ESEU neu gezeichnet und mit Genehmigung verwendet.
- Paläoklimatische Befunde – das kontinentale Puzzle mit der ehemaligen Eisverteilung auf den Gondwana-Kontinenten. © Andrew McLeish in Geological Science, neu gezeichnet von ESEU und mit Genehmigung verwendet
- Relief der Erde. Veröffentlicht in: <https://www.ncei.noaa.gov/media/3340> und ipd weil es Materialien enthält, die ursprünglich von der USNOAA stammen.
- Vorkommen von Vulkanen auf der Erde. Veröffentlicht unter http://vulcan.wr.usgs.gov/Glossary/PlateTectonics/Maps/map_plate_tectonics_world.html und ipd, da es Materialien enthält, die ursprünglich von USGS stammen.
- Vorkommen von Erdbeben auf der Erde. Veröffentlicht von NASA und ipd, da es ausschließlich von der NASA erstellt wurde.
- Tiefen der Erdbebenherde – aufgezeichnete Erdbeben auf den Kurilen, Russland, in der Subduktionszone. Veröffentlicht von USGS und ipd, da es Materialien enthält, die ursprünglich von USGS stammen
- Magnetisches Streifenmuster. © Geoscience, neu gezeichnet von ESEU und verwendet mit Genehmigung von ESEU.
- Transformstörungen im Südatlantik. Veröffentlicht vom National Geophysical Data Center/USGS und ipd, da es Materialien enthält, die ursprünglich von der USNOAA stammen.
- Hotspots, Hawaii-Emperor-Seamount-Kette. ESEU, wie oben.
- Alter des Ozeanbodens. Veröffentlicht von USNOAA und ipd, da es Materialien enthält, die ursprünglich von USNOAA stammen.
- Wärmefluss – das Muster des Wärmeflusses aus dem Meeresboden und dem oberen Teil des Mantels und der Kruste. © Chris King und Dee Edwards, verändert und neu gezeichnet von Martin Meschede (2023).
- Magmazusammensetzung – Stromboli, Italien, Lavaeruption. Veröffentlicht von Wolfgang Beyer unter den Bedingungen von GNUFDL.
- Magmazusammensetzung – Mount St Helens, Washington, USA. Veröffentlicht von USGS und ipd, da es Materialien enthält, die ursprünglich von USGS stammen.
- Messungen der Plattenbewegungen. Veröffentlicht von der NASA und ipd, da es ausschließlich von der NASA erstellt wurde.

Tab. 4.23. Kontinentales Wasser der Erde

Prozentangaben nach: <http://water.usgs.gov/edu/earthhowmuch.html>. Quelle: Igor Shiklomanov's Kapitel 'World Fresh Water Resources' in Peter H. Gleick (Herausgeber), 1993, *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources* (Oxford University Press, New York).

- Eiskappe, die Saundersons Island in der Baffin Bay in der Nähe von Grönland bedeckt. Veröffentlicht von der NASA und nicht urheberrechtlich geschützt.
- Eine Mineralwasserquelle im Kaukasusgebiet. Veröffentlicht von Ivtorov unter der internationalen CCA-SA Lizenz.
- Frostmusterboden (Polygonboden), der durch Permafrost in der gefrorenen Tundra der Western Arctic National Parklands, Alaska, USA, entsteht. Veröffentlicht von den Western Arctic National Parklands unter der CCA Generic-Lizenz.
- Satpara-See, einer der höchstgelegenen Seen Pakistans. Veröffentlicht von Waqas Usman unter der CCA-SA Generic-Lizenz.
- Feuchter Boden aus der Lüningsburg bei Neustadt am Rübenberge, Niedersachsen. Veröffentlicht von Ukko.de unter den Bedingungen von GNUFDL
- Wolken am Himmel bei Muelle de El Quisco, Valparaiso, Chile, 1997. Veröffentlicht von Jorge Barrios und als ipd.
- Der Ratargul-Süßwassersumpfwald von Sylhet, Bangladesch. Veröffentlicht von Md Habibur Rahman Salman unter Lizenz.
- Der mäandrierende Yukon River, nördliches Kanada. Veröffentlicht von Jessie Hey unter der CAA-SA 2.0 Generic-Lizenz.

- Ein unter dem Mikroskop betrachtetes Blatt von *Tradescantia zebrina* zeigt die grünen Spaltöffnungen, die durch Transpiration Wasser an die Atmosphäre abgeben. Veröffentlicht von AioftheStorm unter CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication.

Tab. 4.24. Küstenmerkmale, die durch Wellen und Gezeiten entstehen

- Sturmstrand hinter dem Veluga-Strand in Batanes auf den Philippinen. Veröffentlicht von anne_jimenez unter der CCA Generic-Lizenz
- Watten-meer in der Nähe von Palau Melaka, Malakka, Malaysia. Veröffentlicht von Vmenkov unter den Bedingungen von GNUFDL
- Satellitenaufnahme von Farewell Spit an der Nordspitze der Südinsel, Neuseeland. https://en.wikipedia.org/wiki/Farewell_Spit#/media/File:Farewell_spit.jpg

Tab. 4.26. Beitrag der Lebenwesen zur Gesteinsbildung

- Blattfossilien in Kohle aus dem Karbon. Aus dem Natural History Museum Library, London, und ipd, da die Urheberrechtsdauer das Lebensalter des Autors plus 70 Jahre oder weniger beträgt.
- Fossile Koralle aus dem Pleistozän im Windley Key Fossil Reef Geological State Park, Florida, USA. Veröffentlicht von Fredlyfish4 unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Verwitterter Baustein: Kalkstein aus zerbrochenen Muscheln und Schnecken aus dem Känozoikum am Zeustempel in Olympia, Griechenland. Veröffentlicht von Koelle unter den Bedingungen von GNUFDL.
- Eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Coccolithen. Die kleinen Plättchen bilden den sehr feinen Karbonatschlamm, der schließlich zu Kreide werden kann. Veröffentlicht von Hannes Grobe/AWI unter CCA-Lizenz.
- Wohnbauten krabbenähnlicher Tiere in Jura-Tonstein, Makhtesh Katan, Südisrael. Veröffentlicht von Mark A. Wilson (Department of Geology, The College of Wooster) und veröffentlicht als ipd von seinem Autor Wilson4469, 1 in der englischen Wikipedia.

Tab. 5.1. Natürliche Ressourcen der Erde

- Die Butchart Gardens, Victoria, British Columbia, Kanada, liegen in einem aufbereiteten, ehemaligen Kalksteinbruch. Veröffentlicht von Mitzi.humphrey unter der internationalen Lizenz CCA-SA 4.0.
- Salzverdunstungsteiche, La Palma, Kanarische Inseln. Veröffentlicht von Bernhard Hecke unter der Lizenz CCA-SA 2.0 Deutschland.
- Membran-sauerstoff-anlage zur Gewinnung von Sauerstoff aus der Luft. Veröffentlicht von grasys.com unter den Bedingungen von GNUFDL.
- Algenanbau in Indonesien. Veröffentlicht von Hassan Abdel-Rahman unter der CCA 2.0 Generic-Lizenz.

Tab. 5.2. Beispiele für im Bauwesen verwendete Massenrohstoffe

- Larvikit-Steinbruch (Syenit) bei Larvik, Norwegen, Blöcke für Steinplatten werden aus dem Gestein herausgesägt. Foto: Martin Meschede.
- Kalksteinbruch in Lengerich, Nordrhein-Westfalen, Oberkreide. Foto: Martin Meschede.
- Sand- und Kiesgrube in der Nähe von Lissabon, Portugal. Veröffentlicht von Hansueli Krapf unter der CCA-SA 3.0 Unported-Lizenz.

Tab. 5.3. Beispiele für Massenrohstoffe, die in der Baustoff-, Keramik- und Chemieindustrie verwendet werden

- Zementwerke, Holcim, Eclépens, Schweiz. Herausgegeben von Roland Zumbühl, www.picswiss.ch unter den Bedingungen von GNUFDL.
- Ein moderner Drehkalkofen, Wyoming, USA. veröffentlicht von P.D. Tillman und Greg Goebel aus Loveland, Colorado, USA unter der generischen CCA-SA 2.0-Lizenz.
- Kubische Kristalle des Minerals Halit, Salzbergwerk Merkers, Deutschland. Veröffentlicht von Wampi unter der CCA-SA 3.0 unported licence.
- In lösliches Kalierz gepumptes Wasser wird als Sole in Verdunstungsteiche gepumpt, um das Kali zu gewinnen, Utah, USA. Published by an unknown pilot and ipd as it was solely created by NASA
- Gipssteinbruch in Trias-Gesteinen in der Nähe von Nottingham, England. Veröffentlicht von Jim Thornton als Teil des Geograph-Projekts unter der CCA-SA 2.0 Generic-Lizenz.
- Abbau von Ziegelton, Baduria, Westbengalen, Indien. Veröffentlicht von Biswarup Ganguly unter den Bedingungen von GNUFDL.
- Kaolinabbau in der Nähe von Kaznějov in der Tschechischen Republik. Veröffentlicht von Petr Kinšt unter CCA-SA 3.0 unported licence.

- Luftaufnahme der riesigen Quarzsandgrube bei Frechen im Westen Deutschlands, Nordrhein-Westfalen. Veröffentlicht von Frank Herz und als ipd.

•

Tab. 5.4. Beispiele für die Metallerzgewinnung

- Tom-Price-Eisenerz Abbau, Westaustralien – alles im Blickfeld ist durch Hämatitstaub rot gefärbt. Veröffentlicht von Bärns unter den Bedingungen von GNUFDL.
- Kupfermine Bingham Canyon, Utah, USA. Veröffentlicht von Spencer Musick und als ipd.
- Mt. Isa-Mine, Queensland, Australien. Veröffentlicht von Tennis Expert unter der CCA-SA 2.5 Generic-Lizenz.
- Kommerzielles Goldwaschen durch das Volk der Sakalava in Madagaskar. Veröffentlicht von Heinonlein unter der internationalen Lizenz CCA-SA 4.0.

Tab. 5.5. Beispiele für die Gewinnung von Industriemineralen

- Satellitenaufnahme einer Seltene-Erden-Mine in Bayan Obo, China. Veröffentlicht von der NASA und als ipd.
- Die Mir-Mine, Mirny, Russland. Veröffentlicht von Staselnik unter CCA-SA 3.0 unported licence.

Tab. 5.6. Die fünf Grundvoraussetzungen zur Bildung eines Erdöl- und/oder Erdgasfeldes

- Antiklinale am Pang La Pass in Tibet. Veröffentlicht von Einar Fredriksen unter der CCA-SA 2.0 Generic-Lizenz.
- Tonstein in der Deakin-Antiklinale der siluri-schen Yarra-lumla-Formation, Canberra, Australien. Veröffentlicht von Graeme Bartlett unter der CCA-SA 3.0 unported licence.
- Von Natur aus ölhaltiger Sandstein aus dem Hutton-Ölfeld in der Nordsee. Peter Craig in King C. (2017) Scottish 'Bring and Share', von der St Andrews ESTA Konferenz, September 2016, *Teaching Earth Sciences*, 41.2. S. 25.
- Ölschiefer aus der eozän-zeitlichen Lagerstätte in der Grube Messel bei Frankfurt, Hessen. Veröffentlicht von Fafner unter CCA-SA 3.0 unported licence.

Tab. 5.7. Methoden des Umweltschutzes bei der Ausbeutung natürlicher Ressourcen

- Damm um einen Basaltsteinbruch in der Nähe von Hohenfels-Essingen, Eifel, Rheinland-Pfalz. Veröffentlicht von Beckstet unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Sichtschutz durch Baum-pflanzung rund um einen aktiven Basaltsteinbruch, Hühnerberg, Bayern. Veröffentlicht von Wolkenkratzer unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Absetzbecken der Eisenmine der Cagdianao Mining Corporation auf den Philippinen. Veröffentlicht von Edgardo Caringal unter den Bedingungen der Free Art License.
- Aufbereitung von Minenabwasser zur Entfernung von Metallverschmutzungen in Australien. Veröffentlicht von CSIRO unter CCA 3.0 unported licence.
- Eine LKW-Radwaschanlage in Deutschland. Veröffentlicht von FRUTIGER Company AG unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Mit Gras be-pflanzte Terrassen auf Abfalldeponien eines Kaolin-Abbaus, Higher Coldvreath, Cornwall, England. Veröffentlicht von Tony Atkin für das Geographie-Projekt unter der CCA-SA 2.0 Generic-Lizenz.
- Grundwasser-überwachung, Coronado National Memorial, Arizona, USA. Veröffentlicht von SonoranDesertNPS aus Tucson, Arizona, USA unter der CCA 2.0 Generic-Lizenz.

Tab. 5.8. Beispiele für Sanierungen

- Die ehemalige Uranmine Jackpile-Paguete an der Laguna Pueblo, westlich von Albuquerque, USA. Veröffentlicht von Mary Gant, NIEHS und ipd, da es sich um ein Werk handelt, das von einem Beamten oder Angestellten der US-Regierung erstellt wurde.
- Tagebau-Kohlebergwerk und neu gewonnenes Land am Kohlebergwerk North Antelope Rochelle, Wyoming, USA. Veröffentlicht von Peabody Energy unter CCA 3.0 unported licence.
- Erhaltenes Ofengebäude auf einer alten Zink-, Blei- und Schwefelmine, Co. Tipperary, Irland. Veröffentlicht von John Gibson für das Geographie-Projekt unter der CCA-SA 2.0 Generic-Lizenz
- Das Eden-Projekt in Cornwall, England. Veröffentlicht von Richard Johns für das Geographie-Projekt unter der generischen CCA-SA 2.0-Lizenz
- Studentische Feldforschung am Apes Tor, einem alten Kalksteinbruch, Staffordshire, England. Foto: Chris King

Tab. 5.9. Erneuerbare Energiequellen

- Wasserkanal, der vom Stausee Lake Pukaki in Neuseeland zu den Turbinen eines Kraftwerks verläuft. Veröffentlicht von Mark Oliver Dittrich und als ipd.
- Die Solarkraftwerke PS20 und PS10 in Andalusien, Spanien. Veröffentlicht von Koza1983 unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Biomasse-Fernheizwerk bei Steinfelde, Ternitz, Niederösterreich – Holzbrennstoffversorgung im Hintergrund. Veröffentlicht von Herzi Pinki unter der internationalen Lizenz CCA-SA 4.0.
- Offshore-Windpark, Bạc Liêu, Vietnam. Veröffentlicht von Tycho unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Das hydrothermale Kraftwerk Nesjavellir in Thingvellir, Island. Veröffentlicht von Gretar Ívarsson, Geologe in Nesjavellir, und als ipd.
- Modell des Gezeitenkraftwerks Kislogubskaya auf der Kola-Halbinsel im Norden Russlands. Veröffentlicht von Galin Vladimir Petrović und als ipd.
- Eine der drei Pelamis-Maschinen bricht durch eine Welle im Aguçadoura Wave Park, Portugal. Veröffentlicht von P123 und als ipd.

Tab. 6.1. Vulkanische Prozesse und ihre Auswirkungen

- Lavafontänen und Lavastrom, Hawaii, 2004. Ipd, weil es sich um ein Werk handelt, das von einem Beamten oder Angestellten der US-Regierung erstellt wurde.
- Große Bäume, 1980 durch die Explosion am Mt. St. Helens in die gleiche Richtung umgeknickt (Menschen als Maßstab, unten rechts). Veröffentlicht vom USGS Cascades Volcano Observatory und ipd, da es Materialien enthält, die ursprünglich vom USGS stammen.
- Ascheausbruch am Mt. St. Helens, Bundesstaat Washington, USA, 1980. Veröffentlicht von der Federal Emergency Management Agency Photo Library und als ipd.
- Pyroklastischer Strom am Vulkan Mayon auf den Philippinen-Inseln, 1984. Herausgegeben von C.G. Newhall und ipd, weil es Materialien enthält, die ursprünglich vom USGS stammen.
- Lahar begräbt Häuser in der Nähe des Vulkans Galunggung, Indonesien, 1983. Veröffentlicht von Robin Holcomb, USGS und ipd, da es Materialien enthält, die ursprünglich vom USGS stammen.

Tab. 6.2. Eruptionen gemäß dem Vulkanischen Explosivitätsindex (VEI)

- Glühende Lava fließt aus dem Vulkankegel Pu'u 'Ō'ō, Kilauea, Hawaii, 1997. Veröffentlicht von Brian Snelson (exfordy auf Flickr) unter <http://www.flickr.com/people/exfordy/> unter der CCA 2.0 Generic-Lizenz.
- Ausbruch des Stromboli in der Nacht; Vulkanbomben werden mehr als 100 m in die Luft geschleudert, Italien, 1980. Herausgegeben von Wolfgang Beyer unter den Bedingungen von GNUFDL.
- Ausbruch des Mt. Sinabung, Medan, Indonesien, der die Weinreben im Vordergrund tötete, 2014. Veröffentlicht von Rendy Cipta Muliawan unter der CCA 2.0 Generic-Lizenz.
- Nevado del Ruiz: dieser Lahar aus ausgebrochener Asche begrub 1985 die Stadt Armero im Zentrum von Kolumbien. Veröffentlicht von Jeffrey Marso, USGS-Geologe, und ipd, da es Materialien enthält, die ursprünglich vom USGS stammen.
- Eruptionswolke des Calbuco-Vulkans in der Nähe von Puerto Varas, Chile, 2015. Veröffentlicht von Aeveraal unter der internationalen Lizenz CCA-SA 4.0.
- Satellitenaufnahme der 800 km langen Aschewolke des Puyehue-Cordón-Ausbruchs 2011, Chile. Veröffentlicht von Jeff Schmaltz und ipd, da es ausschließlich von der NASA erstellt wurde.
- Aschewolke des Mt. Pinatubo während des Ausbruchs 1991 auf den Philippinen. Veröffentlicht von D. Harlow und ipd, da es Materialien enthält, die ursprünglich vom USGS stammen.
- Geschätzte Fläche, die vom Asche-fall des Tambora-Ausbruchs in Indonesien im Jahr 1815 bedeckt wurde. Basiskarte aus dem NASA-Bild Image:Indonesia_BMNG.png und Isopachen-Karten nach Oppenheimer (2003). Veröffentlicht von Indon~commonswiki unter CCA-SA3.0 unported licence.
- Der riesige Vulkankrater (Caldera) aus drei Yellowstone-Ausbrüchen, Wyoming, USA – der letzte vor 630.000 Jahren. Veröffentlicht von Ed Austin/Herb Jones und ipd als Werk eines Mitarbeiters des National Park Service der US-Bundesregierung.

Tab. 6.3. Methoden zur Überwachung von Vulkanausbrüchen

- Erdbeben im Zusammenhang mit dem Ausbruch des Eyjafjallajökull im Jahr 2010 in Island. Veröffentlicht von Veðurstofa Íslands unter CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication.
- Gelber Schwefel in einem vulkanischen Gasaustritt; Gas wird von einem Sensor überwacht, White Island, Neuseeland.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Yellow_sulphur_fumarole_on_White_Island_in_front_of_view_out_of_crater_area_towards_sea.jpg

- GPS-Überwachungsstation, Vulkan Piton de la Fournaise, Insel Réunion, Indischer Ozean. Veröffentlicht von B.navez unter den Bedingungen von GNUFDL.
- Wärmebild; Hoher Wärmefluss (rot, braun und gelb) im Krater des Calbuco in Chile, 2015, vor dem kühlen blauen Hintergrund des Landes Veröffentlicht von der NASA und ipd.
- Falschfarben-Satellitenbild zur Darstellung von Bodenverformungen im Zusammenhang mit dem Ausbruch des Calbuco in Chile im Jahr 2015. Veröffentlicht von ESA/NASA/JPL-Caltech und ipd.

Tab. 6.5. Einige der stärksten Erdbeben, gemessen an der Zahl der Todesopfer

- Erdbebenverteilungskarte. Veröffentlicht von NASA und ipd, da es ausschließlich von der NASA erstellt wurde.

Tab. 6.6. Methoden der Erdbebenvorhersage

- Der Loma-Prieta-Gap an der San-Andreas-Störung, Kalifornien, USA. Ipd, da es nur Materialien enthält, die ursprünglich vom USGS stammen.
- Die Tōkai-Erdbeben in Japan. Veröffentlicht von Alexrk2 unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Seismische Gefahrenkarte von Südamerika, erstellt vom US Geological Survey. Veröffentlicht vom USGS Department of the Interior/USGS und als ipd.

Tab. 6.7. Baumethoden zur Abwehr von Erdbebenschäden

- Scherwände, die einem Gebäude in Oregon, USA, zusätzliche Festigkeit verleihen sollen. Veröffentlicht vom Oregon Department of Transportation, USA, unter der CCA 2.0 Generic-Lizenz.
- Fundamentbolzen und -bänder, Napa, Kalifornien, USA. Veröffentlicht von Adam Dubrowa von der Federal Emergency Management Agency und daher ipd.
- Schütteltisch zum Testen von Basis-isolations-metho-den. Das normale, nicht isolierte Ge-bäude auf der lin-ken Seite stürzt ein. Universität von Kalifornien, San Diego, USA. Veröffentlicht von Shustov unter den Bedingungen von GNUFDL.
- Bewehrungsstahlnetz für ein Betonbrückenfundament. Veröffentlicht von Wonaw unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Automatisches Absperrventil an einer Gasleitung, Seattle, USA. Veröffentlicht von John Shea von der Federal Emergency Management Agency und daher ipd.

Tab. 6.8. Große Tsunamis und ihre Auswirkungen

- Der japanische Tōhoku-Tsunami. Veröffentlicht von der US Navy und daher ipd.
- Die ankommende Tsunamiwelle 2004 in Ao Nang, Provinz Krabi, Thailand. Veröffentlicht von: Davidsvågfoto.JPG, das Bild und darf von jedem für jeden Zweck verwendet werden.
- Ein Ergebnis des Tsunamis, der durch den Krakatau-Ausbruch im Jahr 1883 verursacht wurde. Aus den Anales de la Sociedad Espala de Historia Natural, Quelle:
<https://www.flickr.com/photos/internetarchivebookimages/18162559072/>; ipd, da es über 100 Jahre alt ist.
- Eine künstleri-sche Sicht auf das Erdbeben und den Tsunami von Lissabon im Jahr 1755. Ipd, da es mehr als 100 Jahre alt ist

Tab. 6.9. Methoden zur Erhöhung der Sicherheit bei Tsunamis

- Merkblatt zur Tsunami-Warnung für die Küstenstadt Pichilemu in Zentralchile. Veröffentlicht vom Gobierno de Chile, ONEMI unter der CCA 3.0 Chile-Lizenz.
- Tsunami-Mauer bei Tsu-shi in Japan. Veröffentlicht von Rudolf Ammann unter der CCA 2.0 Generic-Lizenz.
- Das Bojen- und Netzwerkwarnsystem DART II. Dieses Bild ist ipd, da es Materialien enthält, die ursprünglich von der USNOAA stammen.
- Tsunami-Warnschild, Okumatsushima, Japan, mit Evakuierungswegen. Veröffentlicht von David.Monniaux unter den Bedingungen von GNUFDL.

Tab. 6.10. Verschiedene Arten von Bergstürzen, Rutschungen und Strömungen

- Steinschlag in den Bergen von British Columbia, Kanada, 2011. Bild bereitgestellt von Natural Resources Canada, Geoscape Vancouver unter den Bedingungen von GNUFDL.
- Hangrutschung am Oddicombe Beach, Devon, England, 2010. Photo: David Hawgood,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oddicombe_Beach_landslide_-_geograph.org.uk_-_3238778.jpg

- Rotierte Gleit-schollen im Bereich einer teilweise abgerutschten Straße, Mam Tor, Derbyshire, England. Veröffentlicht von Mike Peel (www.mikepeel.net) unter der internationalen Lizenz CCA-SA 4.0.
- Vargas, Venezuela, einen Monat nach einem Murgang im Dezember 1999. Veröffentlicht von Veronidae unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Bodenkriechen an einem Hang in Wyoming, USA. Veröffentlicht von Jack Flanagan unter der CCA-SA 2.0 Generic-Lizenz.
- Kleine Terrassen-bildungen am Morgan's Hill, Wiltshire, England. Veröffentlicht als Teil des Geographie-Projekts von Derek Harper unter der CCA-SA 2.0 Generic-Lizenz

Tab. 6.11. Verheerende Erdbeben

- 1920 Haiyuan earthquake which triggered the Haiyuan flows in central China. Veröffentlicht von Benutzer: PhilP und als ipd.
- Großflächige Zerstörung im Caraba-lleda-Gebiet durch einen 6 m dicken Murgang. Veröffentlicht von Smith, Lawson, US ACE und ipd, da es Materialien enthält, die ursprünglich vom USGS stammen.
- Foto aufgenommen in Yungay, zehn Jahre nach der Tragödie – im Vordergrund das Gebäude mit der Inschrift. Veröffentlicht von DB und als ipd.
- Die Narbe am Berg Chokrak in Tadschikistan und der Erdbeben, der das Dorf Khait zerstörte. Veröffentlicht von R.L. Wesson (USGS) und als ipd.

Tab. 6.12. Methoden zur Reduzierung des Erdbeben- und Steinschlagsrisikos

- Globale Erdbeben-Gefahrenkarte, zusammengestellt von der US-amerikanischen National Aeronautics and Space Administration (NASA). Aus: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/89937/a-global-view-of-landslide-susceptibility>
- Ein drahtgebundenes Extensometer-Überwachungs-gerät, das per Kabel mit einem instabilen Bereich verbunden ist und Daten per Funk aus der Ferne überträgt. Veröffentlicht von Jfoster7991 unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Verkehrswarnschild. Veröffentlicht von Oimee unter der generischen CCA-SA 2.0-Lizenz.
- Felsterrassen entlang der Route 23, Pound Gap, Cumberland Mountains, Virginia, USA. Veröffentlicht von Nyttend und als ipd.
- Ein französischer Abflussgraben, der mit Kies gefüllt ist, um Sedimente aufzufangen, mit perforierten Rohren (mit kleinen Löchern an der Oberseite), um das Wasser abzuleiten. Veröffentlicht von Scooter133 und als ipd.
- Lärchen wurden gepflanzt, um die Erosion an einem steilen, lockeren Geröllhang im Skigebiet Broken River, Neuseeland, zu kontrollieren. Veröffentlicht von Alan Liefting und als ipd.
- Felsanker am Black Rock an der Küste von Sussex, England. Published as part of the Geograph project by Simon Carey unter CCA-SA 2.0 Generic licence
- Beispiele für Geotextilien. Veröffentlicht von Marilyn475 und als ipd.
- Drahtgeflechtsschutz gegen Steinschlag, Marine Drive, Llandudno, Wales. Veröffentlicht als Teil des Geographie-Projekts von Eric Jones unter der CCA-SA 2.0 Generic-Lizenz.
- Eine durch Spritzbeton stabilisierte Klippe, Auckland, Neuseeland. Veröffentlicht von Uploader und veröffentlicht als ipd.
- Ein Straßeneinschnitt, der an der Basis durch eine Natursteinmauer und darüber durch eine Betonstützmauer stabilisiert wird, Rebernice, Slowenien. Published by Ljuba brank under the terms of GNUFDL.
- Ein mit Gabionen stabilisierter Straßeneinschnitt in Deutschland. Veröffentlicht von Geolina163 unter der internationalen Lizenz CCA-SA.
- Ein Felsfangnetz auf einem Wanderweg bei Multnomah Falls, Oregon, USA. Veröffentlicht von Dar-Ape und als ipd.
- Erdbeben-/Steinschlagschutztunnel, Narvik/Beisfjordstraße 751 in Norwegen. Veröffentlicht von TorbjørnS unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Steinschüttung an der Küste in East Sussex, England, zum Schutz für das darüber liegende Dorf Fairlight. Veröffentlicht als Teil des Geographie-Projekts von Nigel Chadwick unter der CCA-SA 2.0 Generic-Lizenz.

Tab. 6.13. Bodenerosion

- Bodenerosion im Vordergrund, Provinz Huesco, Spanien. Das grüne Feld zeigt den Unterschied, den gute Anbaumethoden bewirken können. Veröffentlicht von Rockwurm unter CCA-SA 3.0 unported licence.

- Ein Staubsturm im Kreis Hamadan, Iran. Veröffentlicht von Saman-1984 unter der internationalen Lizenz CCA-SA 4.0.
- Landwirtschaftliche Maschinen die im Wind-verwehten Staub begraben wurden, Dallas, South Dakota, USA, 1936. Veröffentlicht von Sloan, einem Mitarbeiter des US-Landwirtschaftsministeriums, und daher ipd

Tab. 6.14. Methoden zur Reduzierung der Küstenerosion

- Felsige Buhne am Strand „du Prevent“ in Capbreton, Landes, Frankreich. Veröffentlicht von Tangopaso und als ipd
- Welle trifft auf einen Deich bei Plogoff, Finistère, Bretagne, Frankreich. Veröffentlicht von Henri Camus unter der CCA 1.0 Generic-Lizenz
- Steinschüttung und Deich, Beesands, Devon, England. Veröffentlicht von Nigel Chadwick als Teil des Geograph-Projekts unter der CCA-SA 2.0 Generic-Lizenz.
- Tetrapoden in einem Wellenbrecher bei Górký Wschodnie, Danzig, Polen an der Ostseeküste. Veröffentlicht von Andrzej Otrębski unter CCA-SA 3.0 unported licence.

Tab. 6.15. Abfallstoffe, die entsorgt werden müssen

- Trümmer eines abge-rissenen Gebäudes in Milovice, Tschechische Republik. Veröffentlicht von Tiia Monto unter der internationalen Lizenz CCA-SA 4.0.
- Hausmüll wird auf einer australischen Mülldeponie verdichtet. Veröffentlicht von Ropable und als ipd.
- Giftmülldeponie Valley of the Drums, Kentucky, USA in den 1980er Jahren. Veröffentlicht von der US-Umweltschutzbehörde (EPA) und als ipd.
- Entsorgung schwach radioaktiver Abfälle in Nevada, USA. Veröffentlicht von ENERGY.GOV und als ipd.

Tab. 7.1. Einige der vielfältigen geowissenschaftlichen Fachgebiete

- Aufzeichnung von Gletscherdaten, Glacier National Park, Montana, USA. Veröffentlicht von AlbertHerring von der USGS unter der CCA 2.0 Generic-Lizenz.
- Bohrkernentnahme und -beschreibung in West-Australien. Veröffentlicht von Jlawrencegeo unter der internationalen Lizenz CCA-SA4.0.
- Begutachtung eines verlassenen Bergbau-gebietes in den USA. Veröffentlicht von My Public Lands Roadtrip: Behind the Scenes with BLM Nevada Abandoned Mines and Lands Program Lead unter CCA 2.0 Generic-Lizenz.
- Untersuchung frischer Bohrkern, Chile. Veröffentlicht von Geoz und als ipd.
- Untersuchung der Geochemie vulkanischer Gase, Mount Baker, Washington, USA. Veröffentlicht von W. Chadwick von USGS und als ipd.
- Untersuchung der Vereisung, zentraler Rongbuk-Gletscher, Everest, Nepal. Veröffentlicht von Matthias Kuhle unter der CCA-SA 3.0 unported licence.
- Aussetzen eines Meeresbodenseismometers vor Barbados. Veröffentlicht von John Whitehead von Ocean Instruments und als ipd, da es ausschließlich von der NASA erstellt wurde
- Grundwasserprobenahme in Deutschland. Veröffentlicht von kreidefossilien.de unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Messung der Schneehöhe im Iran. Veröffentlicht von Mirisa56 in der persischen Wikipedia unter den Bedingungen von GNUFDL.
- Flussspatader in einer Mine im Peak District, England. Veröffentlicht von Neilwalker in der englischen Wikipedia unter den Bedingungen von GNUFDL.
- Einrichtung von Geräten zur Überwachung des Meeresbodens. Veröffentlicht von USNOAA und ipd, da es Materialien enthält, die ursprünglich von USNOAA stammen.
- Paläontologie mit dem Ober-schenkel-knochen eines großen Dinosauriers, Simbabwe. Veröffentlicht von Kevin Walsh unter der CCA 2.0 Generic-Lizenz.
- Untersuchung eines Granit-Aufschlusses in den Fosdick Mountains, Antarktis. Veröffentlicht von Csiddoway unter der internationalen Lizenz CCA-SA 4.0.
- Sedimentgrößenanalyse im Labor, Naval Oceanographic Office, Mississippi, USA. Bei dieser Datei handelt es sich um eine Arbeit eines Matrosen oder Angestellten der US-Marine, die im Rahmen der offiziellen Pflichten dieser Person angefertigt oder angefertigt wurde. Da es sich um ein Werk der US-Bundesregierung handelt, ist das Bild ipd.
- Vermessung von Bodenkrusten mit einem Quadrat, Tucson, Arizona, USA. Veröffentlicht von 08Biocrust unter der CCA 2.0 Generic-Lizenz.

- Ein Lehrer diskutiert mit einer Gruppe von Schülern über Feldforschung in der Nähe von Ingleton, Yorkshire, Großbritannien.
- Testen von Proben im Krater des Mutnovsky-Vulkans, Kamtschatka, Ostrussland. Veröffentlicht von Dr. Jake Maule unter CCA-SA 3.0 unported licence.

Tab. 7.2. Methoden zur Beobachtung und Aufzeichnung der Umwelt, Erfassung geowissenschaftlicher Merkmale

- Beobachtung mikrosko-pisch kleiner Diamanten in Swasiland. Foto: Chris King.
- Beobachtung eines Fossils mit einer Handlupe. Veröffentlicht von Catherine Christopoulou unter der internationalen Lizenz CCA-SA 4.0.
- Landschaftsbeobachtung in den Yorkshire Dales, England. Foto: Peter Kennett.
- Satellitenbild gefalteter Gesteinssequenzen in der algerischen Wüste. Google Earth™.
- Messung der Neigung einer Schicht Großbritannien. Foto: Peter Kennett.
- Messung der Schicht-mächtigkeit in den Aberystwyth Grits in Wales. Wie oben.
- Der Strich von Hämatit-proben. Veröffentlicht von KarlaPanchuk unter der internationalen Lizenz CCA-SA 4.0.
- Der Gesteinbeschreibungsschlüssel der Earth Science Education Unit. Mit Genehmigung der ESEU.
- Geologische Feldnotizen. Veröffentlicht von PePeEfe unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Aufnahme eines Felddiagramms bei Strumble Head in Wales. Foto: James Speed.
- Kommentier-tes Foto – Champlain Thrust, Lone Rock Point, Burlington, Vermont, USA. Veröffentlicht von Ed Meyer und als ipd.
- Stratigraphisches Log der fossilreichen Kitadani-Formation aus der Unterkreide in der Nähe der Stadt Katsuyama, Japan. Neu gezeichnet nach einer Abbildung veröffentlicht von Yoichi Azuma, Xing Xu, Masateru Shibata, Soichiro Kawabe, Kazunori Miyata & Takuya Imai unter der internationalen Lizenz CCA 4.0.
- Stevenson-Abschirmung zum Schutz der Wetterinstrumente, mit einem Regenschirm auf der rechten Seite. Veröffentlicht von Famartin unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Regelmäßige Messungen durchgeführt an einem Stevenson-Instrument. Veröffentlicht von J-H. Janßen gemäß den Bedingungen der GNUFDL.
- Probenahme für die Messung der Luftqualität in Frankreich. Veröffentlicht von Cjp24 unter der internationalen Lizenz CCA-SA 4.0.
- Erdgrube in den Ausläufern der Karpaten, Polen. Veröffentlicht von Plogeo unter der internationalen Lizenz CCA-SA 4.0.
- Prüfung der Wasserqualität, Port Macquarie, New South Wales, Australien. Veröffentlicht von Brian Tolagson unter der internationalen Lizenz CCA-SA 4.0
- Probenahme in der Wassersäule im Ozean vor Australien. Veröffentlicht unter <http://www.scienceimage.csiro.au/pages/about/> unter der CCA 3.0 unported licence.

Tab. 7.3. Geowissenschaftliche Beobachtungen in Modelle und Karten umwandeln

- Jura-Diorama, Smithsonian Museum of Natural History, Washington DC, USA. Veröffentlicht von Carl Malamud unter der CCA 2.0 Generic-Lizenz
- Große Feldspatkristalle in einer feinkörnigeren magma-tischen Matrix – mit zweistufiger Abkühlung, in der Nähe von Porto, Portugal. Veröffentlicht von Chmee2 unter den Bedingungen von GNUFDL
- Die von James Hutton (1726-1797) am Siccar Point in Schottland entdeckte Diskordanz (markiert mit einer orange-farbenen Linie). Veröffentlicht von Stuart Sutherland unter der internationalen Lizenz CCA-SA 4.0.
- Geologische Karte von Copper Cliff, Sudbury Mining District, Ontario, Kanada. Veröffentlicht vom Geological Survey of Canada unter der Open Government Licence, Canada 2.0.
- Querprofil der Copper Cliff-Karte oben. Wie oben.
- Bodenkarte der Insel Timor. Veröffentlicht von Seeds of Life unter CCA-SA 3.0 unported licence.
- Karte der Nitratbelastung des Grundwassers auf der Cap-Vert-Halbinsel, Senegal. Veröffentlicht von J-C. Comte, O. Banton & Y. Travi unter CCA-SA 3.0 unported licence.

.....

