

Teil 2: Die Erde, eine kurze Einführung.

Die Zusammensetzung der Erde

Im Vergleich der chemischen Zusammensetzung zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen der Sonne und der Erde.

Die Zusammensetzung der Sonne ist bestimmt durch die Elemente H mit 92,1 % und He mit 7,8 %.

In den verbleibenden 0,1 % sind 80 der 92 bekannten natürlichen Elemente enthalten, vor allem C, O, N.

Sie entstehen in der Sonne durch Kernfusion.

Konzentration der chemischen Elemente in der Erde

Element	Chem. Symbol	%
Sauerstoff	O	29,53
Silizium	Si	15,20
Magnesium	Mg	12,70
Eisen	Fe	34,63
Summe		92,06

Element	Chem. Symbol	%
Nickel	Ni	2,39
Schwefel	S	1,93
Calcium	Ca	1,13
Natrium	Na	0,57
Aluminium	Al	1,09
Summe		7,11

Tabelle 3:

Die Werte für Eisen (ca. 85 %), Nickel und Schwefel sind fast ausschließlich auf den Erdkern bezogen. Während die anderen Elemente sich vorwiegend auf Erdmantel und Erdkruste konzentrieren.

Die Erde - Maße und Gewichte

Durchmesser $\varnothing = 12.756$ km, Radius $\varnothing = 6.378$ km

Die Abplattung der Erde beträgt 1/297, sie resultiert aus der Differenz zwischen :

Äquatorradius = 6.378,388 km
Polradius = 6.356,912 km
Abplattung = 21,476 km

Die Masse der Erde beträgt $5,975 \cdot 10^{24}$ kg
Die mittlere Dichte beträgt 5,52 g/cm³

Grobe Einteilung des Erdaufbaus:

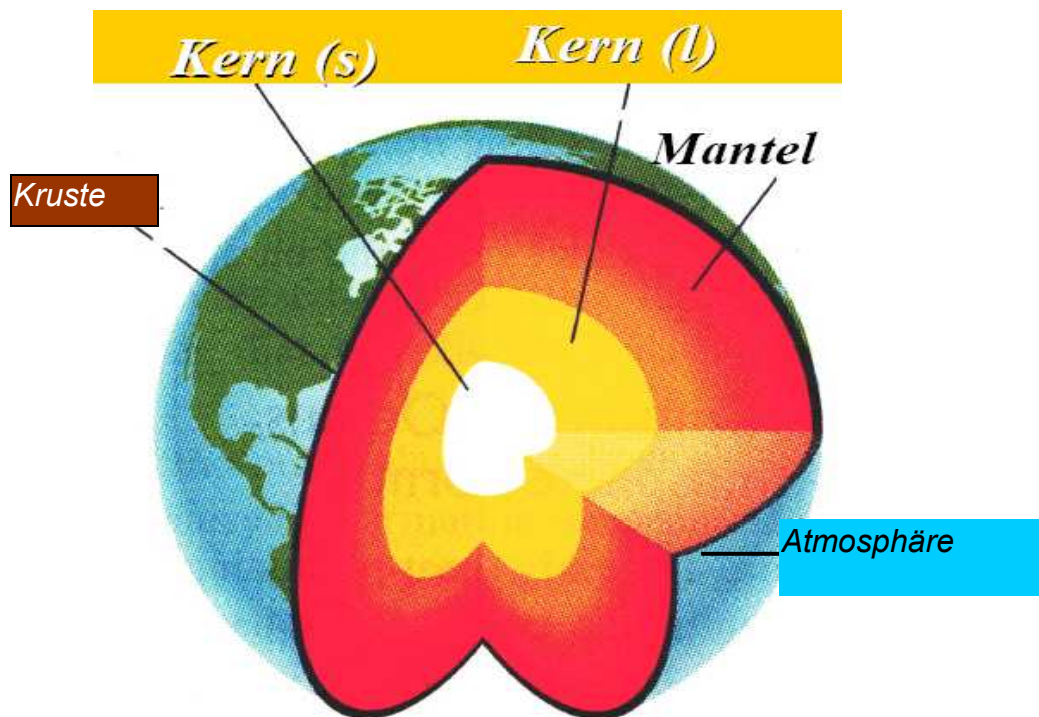


Abb. 16: Aufbau der Erde stark vereinfacht.

	Zusammensetzung	Bereich
Atmosphäre	<ul style="list-style-type: none"> • Gasmischung • Wasser- und Eispartikel • Aerosole 	Von der Erdoberfläche bis ca. 500 km über der Erde.
Erdkruste	<p>Unterschiedliche Gesteine, zusammengesetzt vor allem aus gesteinsbildenden Mineralen, die als Silikate bezeichnet werden. Die Silikate sind mit vielen Elementen verbunden.</p>	Erdoberfläche bis max. 200 km Tiefe. Sehr unterschiedlich dick.
Erdmantel	Silikatische Mineralien, vor allem in Verbindung mit Eisen (Fe) und Magnesium (Mg).	Von 7 km Tiefe, aber auch tiefer, bis 2900 km Tiefe
Erdkern	<ul style="list-style-type: none"> • Im äußeren Kern flüssig aus Eisen (Fe) und Nickel (Ni) mit etwas Sauerstoff und Schwefel • Im Inneren Kern fest aus Eisen und Nickel 	Von 2900 bis 6370 km im Erdmittelpunkt

Tabelle 4: Die Schalen der Erde

Fangen wir mit der Zusammensetzung der Atmosphäre an:

Die Atmosphäre besteht aus:
1. Gasgemisch
2. Wasser- und Eispartikel
3. Aerosole

Im Folgenden werden die 3 Komponenten im Einzelnen vorgestellt. Die chemische Zusammensetzung unserer Luft entspricht dabei einem Mittelwert, der in Bodennähe ermittelt wurde :

Zu 1. : Das Gasgemisch

Die chemische Zusammensetzung unserer Luft entspricht dabei einem Mittelwert, der in Bodennähe ermittelt wurde:

Gas	Chemisches Symbol	Prozent	Ppm = part per million = g/t
Stickstoff	N ₂	78,08	
Sauerstoff	O ₂	20,95	
Argon	Ar	0,93	
Kohlendioxid	CO ₂	0,035	350
Neon	Ne		18,2
Helium	He		5,2
Methan	CH ₄		2
Krypton	Kr		1,1
Wasserstoff	H ₂		0,5
Distickstoffoxid	N ₂ O		0,5
Xenon	Xe		0,09
Ozon	O ₃		0,06
u.a.m.			

Tabelle 5 : Die Zusammensetzung der Atmosphäre.

Für die Spurengase Kohlendioxid, Methan, Distickstoffoxid und Ozon ist ein steigender Trend zu verzeichnen.

Zu 2.

Wasser- und Eispartikel, werden auch als Hydrometeore bezeichnet. Sie sind zu erkennen als Wolken und in Niederschlägen, wie Regen, Schnee, Hagel.

Zu 3.

Aerosole sind feste oder flüssige schwebende Teilchen mit einer Größe von < 10⁻⁴ cm, wie Staub und Rauch.

Die Dichte der Atmosphäre nimmt mit der Höhe ab.

Die Hälfte der Masse der Atmosphäre liegt unterhalb 5.500 m, 3/4 bereits unterhalb 10.500 m.

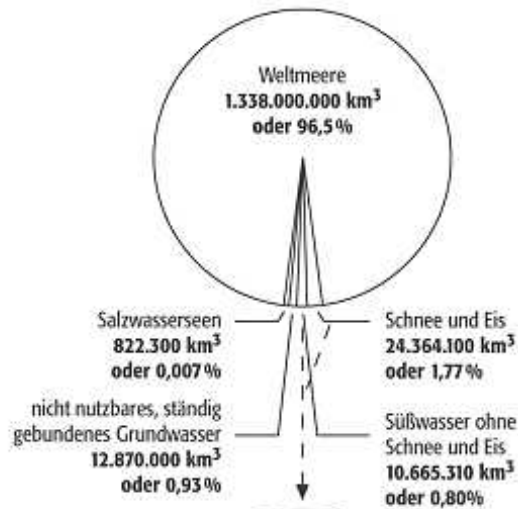
Die Gesamtmasse der Atmosphäre beträgt etwa 5,1 * 10¹⁵t, dies entspricht weniger als einem Millionstel der Masse der Erde.

Die Daten für die Schalen / Sphären der Erde im Detail:

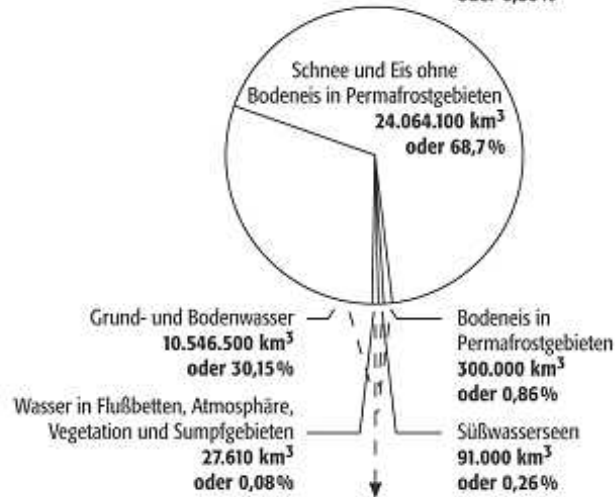
Sphäre	Material / Zusammensetzung	Bereich	Dichte
Exosphäre		Über 500 km	10^{-10} - 10^{-12}
Thermosphäre		bis 500 km	10^{-8}
Mesosphäre		bis 80 km	10^{-4}
Atmosphäre	Stickstoff (N) 78,08 %; Sauerstoff (O) 20,95%;		
Stratosphäre	Argon (Ar) 0,93 %; Kohlendioxid (CO ₂) 0,035 %	ca. 50 km bis	10^{-2}
Troposphäre		0 – 15 km	10^{-2}
Hydrosphäre s. Abb.	Ozeane 96,5 % Schnee und Eis 1,77 % Grundwasser 0,93 % Süßwasser 0,80 % Salzwasserseen 0,007 %		Ca. 1
Kryosphäre	Schnee- und Eisregion der Erde, auf Kontinenten und Ozeanen		
Biosphäre	Gesamte Pflanzen- und Tierwelt mit den Menschen		
Pedosphäre	Boden / Verwitterungsbereich der Lithosphäre	ca. 2 m	ca. 2
Lithosphäre	Silikatische Gesteine basisch – sauer		
Obere Kruste	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kontinentale Gesteine ▪ Basalte der Ozeanböden 	30 km 7 km	2,67
Untere Kruste	Silikat ist der Sammelname für Mineralien, die als Grundbaustein für ihr Kristallgitter eine Verbindung von Silizium und Sauerstoff besitzen. Im Erdmantel und in der Erdkruste trifft dies auf über 90 % der Materialien zu.		2,92
Asthenosphäre und Oberer Mantel	Silikatisch: basisch und ultrabasisch; z.T. säkularplastisch		3,3
	Silikatische, basische bis ultrabasische Gesteine	Ca. 670 km	4,3
Übergangszone	Ultrabasische Silikate in Hochdruckmodifikationen	Ca. 700 - 1000	4,68 5,3
Unterer Mantel	Ultrabasische Silikate in Hochdruckmodifikationen	1000 - 2700	bis 5,69
Übergangszone	Thermische Grenzschicht	2700 - 2900	6 - 10
Äußerer Kern	Vorwiegend flüssig : Ni-Fe-Verbindg. mit ca. 10-12 % O und S	2900 - 4980	10 - 12,3
Übergangszone		4980 - 5120	ca. 13
Innerer Kern	Fest: Fe-Ni in metallischer Bindung (Eisen-Nickel)	5120 - 6370	bis ca. 13,5

Tabelle 6: Dimensionen und Zusammensetzung der Sphären der Erde

Wasservolumen der Erde
1.385.984.610 km³



Süßwasservolumen
35.029.210 km³



Süßwasservolumen ohne Schnee und Eis
in Antarktis, Grönland und auf den arktischen Inseln
11.005.710 km³



Abb. 17: Wasservorräte der Erde: Gesamtwasservorräte und Süßwasservorräte der Erde. (Lexikon der Geowissenschaften 2002)

Die seismische Erkundung der Erde.

Die Daten, die wir in diese Tabelle eingetragen haben beruhen auf Forschungen von Geophysikern und Geologen. Eine wissenschaftliche Methode hierfür ist die Seismik. Wie schon am Anfang erläutert, wird das „AKTUALISMUS-PRINZIP“ auch zur Entwicklung von Vorstellungen über den Aufbau von uns nicht zugänglichen Bereichen in der Erde angewendet. Die Aussagefähigkeit der Ergebnisse der Seismik für die Ermittlung des Aufbaus der Erde beruht auf Erkenntnissen, die durch experimentelle Vorgehensweisen gewonnen wurden. Sie werden vergleichend auf die Daten, die „aus der Erde gewonnen“ werden angewendet. Dabei gehen Geophysiker davon aus, dass sich das Materialverhalten gegenüber Energiewellen auch im Erdinnern in etwa so verhält, wie an der Erdoberfläche.

Wichtige Begriffe in der Seismik sind :

Primär-Wellen = P-Wellen.

Sind Longitudinalwellen oder Kompressionswellen.

Sie kommen zuerst an den Geophonen = Empfangsstationen der Seismometer an.

Sie breiten sich in festen, wie in flüssigen Materialien aus.

Sekundär-Wellen = S-Wellen

Sind Transversal- oder Scherwellen

Sie sind langsamer als die P-Wellen und kommen mit einer deutlichen zeitlichen

Verzögerung an den Stationen an. Sie breiten sich nicht in Flüssigkeiten aus !

Oberflächenwellen sind Love-Wellen und Rayleigh-Wellen.

Sie führen zu Oberflächenschäden, vor allem bei Erdbeben.

Der Verlauf der Wellen wird im Erdinneren verändert. Dies geschieht durch :

Reflexion von Wellen = an Schichtgrenzen reflektierte Wellen

Refraktion von Wellen = an Schichtgrenzen gebrochene, abgelenkte Wellen

Durch die seismische Erkundung können Materialsprünge / Materialwechsel in der Erde festgestellt werden (Abb. 17). Die ermittelten Grenzflächen werden in den Geowissenschaften als **Unstetigkeitsflächen oder Diskontinuitäten** bezeichnet.

Aus den seismischen Befunden konnte auch die Dichte in den einzelnen Bereichen der Erde ermittelt werden. Abb. 18 zeigt die Zunahme der Dichte in der Erde und macht den Zusammenhang vor allem mit den P-Wellen deutlich. Die Geschwindigkeit der P-Wellen ist proportional zur Dichte.

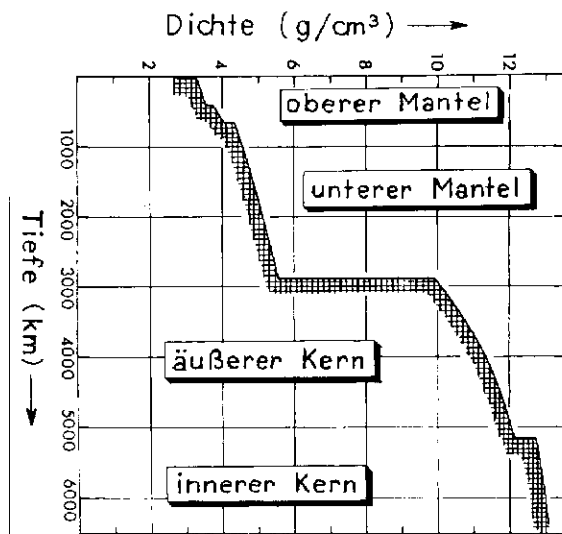


Abb. 18: Links
Verlauf der Dichte im Erdinneren. Deutlich zeigen sich im Bereich bis 670 km die treppenförmigen Übergänge für die Hochdruckminerale im Oberen Mantel. Deutlich ausgeprägt auch die Diskontinuitäten an der Mantel-Kern-Grenze und an der Grenze vom inneren zum äußeren Kern. Strobach, K. - Vom Urknall zur Erde – Darmstadt 1983; S. 59

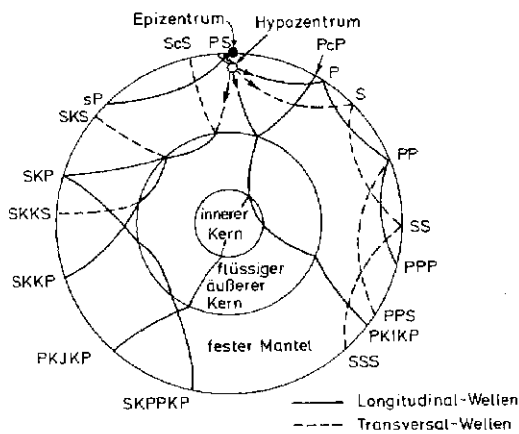


Abb. 9.10
Ausgewählte Wege von seismischen Wellen, die von einem Erdbebenherd (Hypozentrum) aus durch den Erdball laufen. Das Epizentrum befindet sich an der Erdoberfläche senkrecht über dem Hypozentrum. P, K, I sind Longitudinalwellen (K im äußeren, I im inneren Kern), S sind Transversalwellen, J sind hypothetische Transversalwellen im inneren Kern. Im äußeren, flüssigen Kern werden Transversalwellen absorbiert (vgl. Abschn. 9.2 und Abb. 9.8). Die Wellen werden an den großen Diskontinuitäten (Mantel – Kern, äußerer – innerer Kern, Erdoberfläche) refraktiert, reflektiert und z.T. umgeformt (z.B. aus K wird an der Grenze äußerer-innerer Kern I und J)(Abb. 9.9). Signale eines großen Erdbebens können von Meßstationen rund um den Globus aufgefangen werden. Die Laufzeit einmal quer durch die Erde beträgt ca. 20 min. Das Hypozentrum des Erdbebens, seine Stärke und Art lassen sich aus den gewonnenen Daten errechnen. Weiterhin geben sie Einblick in den Aufbau des Erdinneren. Mit Hilfe der seismischen Tomographie, der Computer-Tomographie in der Medizin vergleichbar, versucht man auf der Basis von vielen präzisen Erdbeben Daten und mit modernen Computern die Internstruktur des Mantels zu klären (nach ANDERSON, 1992).

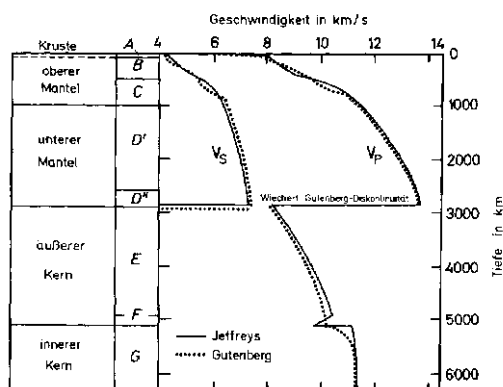


Abb. 9.8
Geschwindigkeiten von Longitudinal- (v_p) und Transversalwellen (v_s) im Erdinneren, A bis G = seismologische Gliederung des Erdinneren (nach ZEIL, 1990).

Abb. 19: Mitte
Reflexion und Refraktion der seismischen Wellen in der Erde. Bahlburg, H. & Breikreuz, Ch.; Grundlagen der Geologie. Stuttgart 1998; S. 150
Den idealisierten Verlauf von P- und S-Wellen durch die Erde zeigt Abb.19. Sie macht auch das Prinzip von Reflexion und Refraktion der Wellen an den Grenzflächen deutlich und sie zeigt den Ausfall der Scherwellen (Transversalwellen) an der Mantel-Kern-Grenze.

Abb. 20: Links.
Verlauf und Geschwindigkeit von P- und S-Wellen in der Erde. a.a.O.; S. 149

Die wichtigsten Diskontinuitäten in der Erde sind :

- **MOHOROVICIC-DISKONTINUITÄT (MOHO)**
zwischen Asthenosphäre und Lithosphäre zwischen 10-70 km Tiefe, im Durchschnitt bei 37 km
- **WIECHERT-GUTENBERG - DISKONTINUITÄT**
an der Mantel/Kern-Grenze bei 2900 km

Wir tragen die wichtigsten Daten für die Diskontinuitäten in die folgende Tabelle ein.

Die wichtigsten Diskontinuitäten und Übergangszonen in der Erde.

Schale	Tiefe in km ca.	Dichte in g/cm ³ Ø	Aggregatzustand
Lithosphäre	Ø 37 km	2,67 – 2,92	fest
Mohorovicic – Diskontinuität - D'			
Asthenosphäre	37 - Ø 135	3,3	säkularplastisch
Oberer Mantel	135 - 670	Bis 4,3	fest
Übergangszone	670 - 1000	4,68 – 5,3	fest
Unterer Mantel	- 2700	- 5,69	fest
Wiechert-Gutenberg-Diskontinuität - D''			
Übergangszone D''-Schicht - Thermische Grenzschicht	2700 - 2900	5,69 - 10	Fest – flüssig ⇒ Kristallisation ⇒ Aufschmelzen
Äußerer Kern	2900 - 4980	10 - 12,3	flüssig
Übergangszone	4980 - 5120	12,3 – ca. 13	Fest – flüssig „Ausfrieren“
Innerer Kern	- 6370	- 13,5	fest

Tabelle 7: Die wichtigsten Diskontinuitäten und Übergangszonen in der Erde.

Die folgende Abbildung 21 zeigt ein einfaches Schema für den Aufbau der Erde. Es ist um die Angaben für die Temperatur in den einzelnen Bereichen ergänzt. Hier wird sehr deutlich, dass es an den Grenzen der Sphären zu starken Temperaturgefällen kommt. Besonders ausgeprägt ist dies an den Grenzen vom unteren Mantel zum äußeren Kern und am Übergang vom inneren Kern zum äußeren Kern.

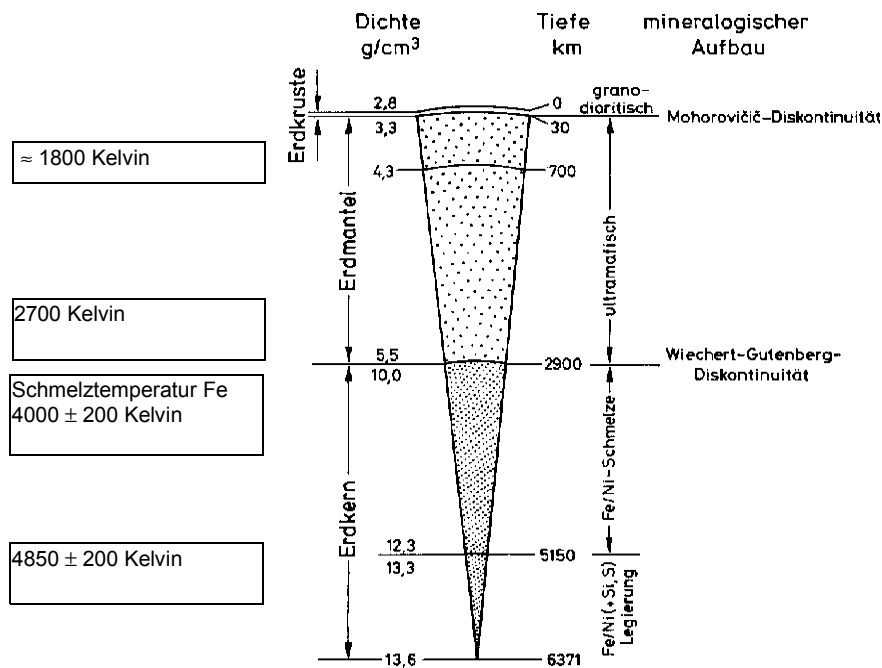


Abb. 21 .
**Vereinfachter
Aufbau der
Erde. (Möller,
P. 1986)**

Die Temperaturangaben sind entnommen aus: Lanius, K. - Die Erde im Wandel, 1994; S.79 f. und Strobach, K. 1991; S. 165.

Das Geodynamische Modell in Abb. 22 entwickelt wahrscheinliche Ausgangsbereiche für Konvektion in der Erde und damit den möglichen Motor der Kontinentalverschiebung/Plattentektonik oder auch die Quellen für einzelne Formen des Vulkanismus auf der Erde. Der Ausgangspunkt ist die thermische Grenzschicht, eine Übergangszone von etwa 200 km Mächtigkeit an der Basis des unteren Mantels.

Hier geht ein Wärmeübergang zwischen dem äußeren Kern und dem unteren Mantel vor sich (Abb. 22). Die mit großer Geschwindigkeit konvektierenden Schmelzströme des flüssigen äußeren Kerns (bis zu 30 km / Jahr = 82 m am Tag) treffen mit einem Temperaturunterschied von ca. 1000° K auf die festen Materialien des unteren Mantels. Dies führt zu Aufschmelzprozessen und Kristallisationsprozessen, in deren Folge schlauchförmige Schmelzströme von Mantelmaterial (mantle plumes) mit einer Geschwindigkeit von etwa 5 - 10 cm pro Jahr aufsteigen. Die Antriebskräfte resultieren aus dem Auftrieb der gebildeten Schmelzkörper gegenüber dem höheren spezifischen Gewicht ihrer festen Umgebung.

An der Erdoberfläche führen sie zur Bildung von „Hot-Spots“, über denen Vulkanen aktiv werden (z.B. Hawaii), oder sie setzen in der Asthenosphäre Konvektionsströme in Gang und im weiteren Verlauf die Prozesse der Plattentektonik.

Hierzu später mehr.

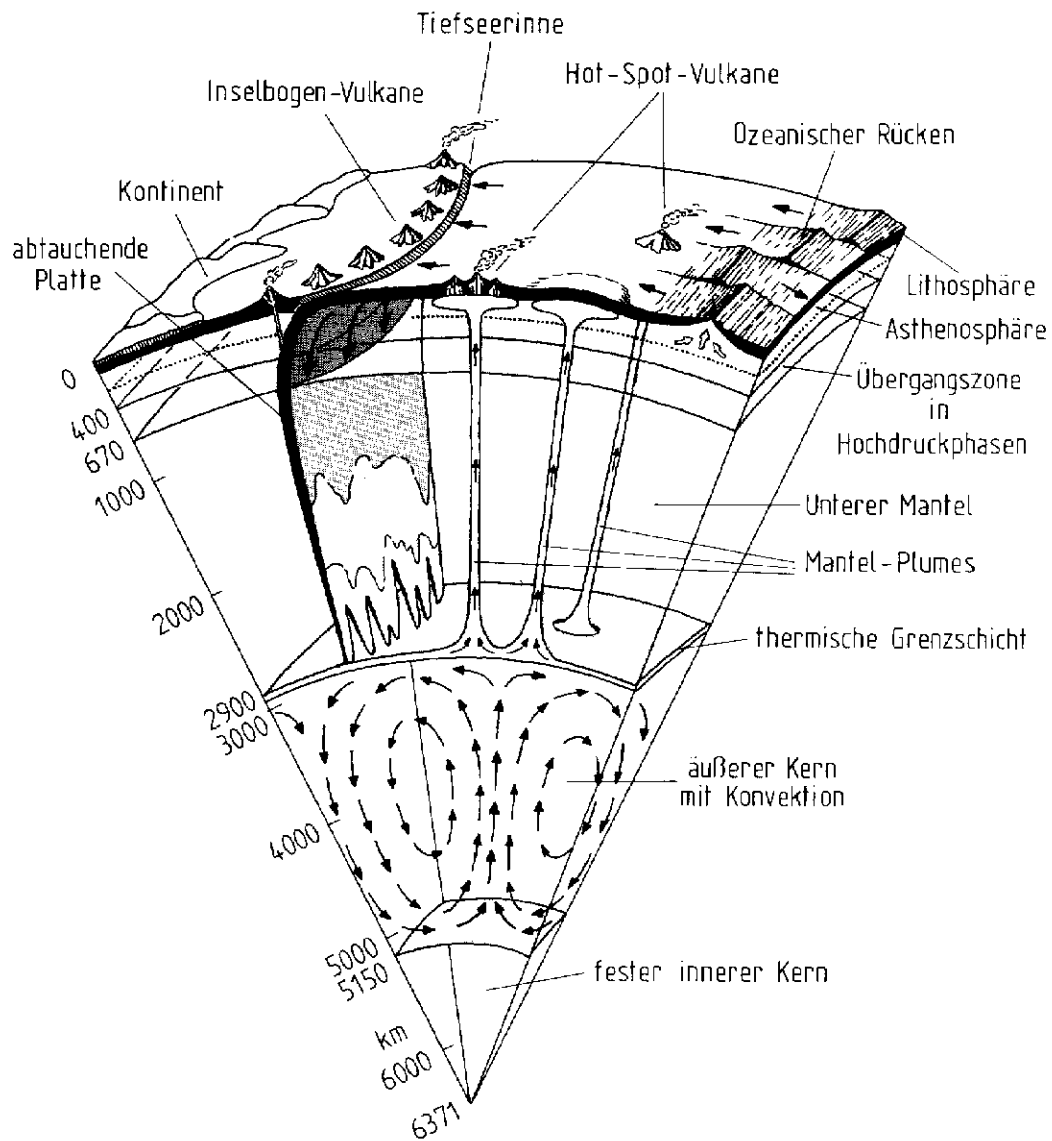


Abb. 22 : Geodynamisches Modell; Strobach, K. Unser Planet Erde, Berlin 1991; S. 187

Bei der Bearbeitung der Erde fallen drei Bereiche auf, die sich erst nach der Bildung der Erde entwickelt haben:

1. Die Erdkruste
2. Die Atmosphäre
3. Ozeane
4. Die Biosphäre

Für unsere Zwecke bearbeiten wir die Erdkruste .

1. Die Erdkruste:

Die Verfestigung der äußeren Erde und die Bildung einer festen Kruste, die sich aus dem Material des oberen Erdmantels bildete dauerte etwa 300 - 320 Mio. Jahre, wie aus neuesten Forschungsergebnissen bekannt ist. Dieser Prozess wird als Trennung von „Magmaozean“ und erster Erdkruste beschrieben, hierbei entstand der oberste obere Mantel. Die Gesteine an der Oberfläche der Erde waren vor allem die vulkanischen Basalte.

Die folgenden Abbildungen geben einen Überblick die Zusammensetzung von Erdmantel und Erdkruste.

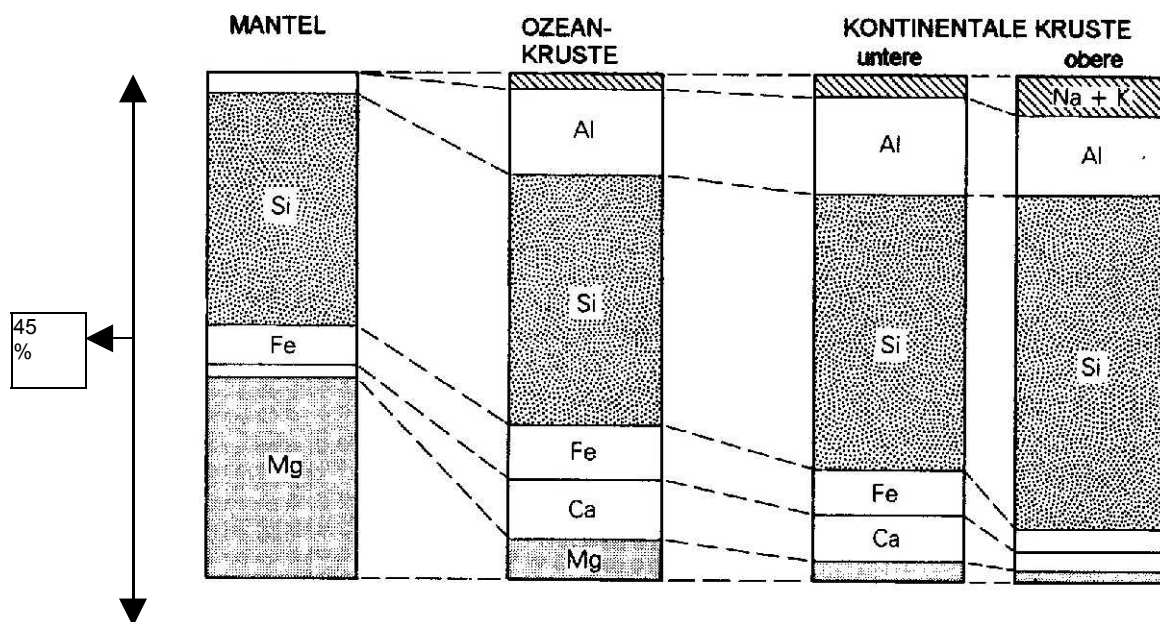


Abb. 23: Durchschnittliche Verteilung der wichtigsten Elemente in Erdmantel und Erdkruste. Die Werte sind dargestellt als Oxidprozent, also in der Verbindung mit O. SiO_2 , FeO , MgO , Al_2O_3 , CaO , Na_2O , K_2O . Der Autor gliedert die kontinentale Kruste in zwei Teile.

Bearbeitet nach: Gill, R.C.O.; Chemische Grundlagen der Geowissenschaften, Stuttgart 1993. S. 254.

Die Bildung der kontinentalen Kruste, wie wir sie heute kennen dauerte noch etwas länger. Die ältesten bekannten Gesteine unserer heutigen Erdkruste sind auf etwa 3.8 – 3.9 Mrd Jahre datiert.

Woraus bildeten sie sich?

Warum dauerte der Prozess 400-500 Millionen Jahre?

Um diese Frage zu beantworten blicken wir in die Frühphase der Entwicklung der Erde zurück. Die grafische Darstellung zeigt eine deutliche Veränderung der Proportionen der Elemente zueinander. Einige Elemente nehmen in Richtung Erdoberfläche zu, andere nehmen ab. Um diese Veränderung zu realisieren müssen die Gesteine der ersten Erdoberfläche aufgelöst worden sein und anschließend die Elemente in neuer Konstellation in anderen, neuen Gesteinen zusammengefügt worden sein. Entscheidend dafür sind die Bildungsbedingungen der Minerale, die ja die Gesteine aufbauen.

Die Oberfläche der Erde war nach ihrer Verfestigung geprägt durch heißes vulkanisches Gestein und brodelnde Vulkane aus denen explodierend Gase (vor allem viel Wasserdampf) entwich.

Der Wasserdampf sammelte sich in einer gigantischen Wolkendecke, bis die Oberfläche der Erde nach und nach abkühlte und schließlich auch die Temperaturgrenze von 100°C unterschritt. Damit war eine Temperatur erreicht, bei der das Wasser aus dem dampfförmigen Zustand in den flüssigen Zustand übergehen konnte. Es begann ganz fürchterlich zu regnen. Und es regnete jahrelang, jahrhundertlang, hundertausende, ja Millionen von Jahren lang. Das Wasser füllte Senken und Mulden auf der Erdoberfläche, floss an den Vulkanhängen ab, breitete sich zwischen den Vulkanen aus. Mit sich trug es den Gesteinsschutt, der durch die Verwitterung angefallen war. Schicht für Schicht wurde übereinander gestapelt. Langsam wurde der Schutt zu neuen Gesteinen umgewandelt.

Der Kreislauf der Gesteine war in Gang gesetzt.

Das Regenwasser, das erst einmal wenig andere Elemente als Wasserstoff, Sauerstoff und einige andere Gase enthalten haben dürfte, löste die Mineralien in den Gesteinen an der Erdoberfläche in ihre Bestandteile auf. Die Minerale des vulkanischen Gesteins Basalt, das in der Frühzeit der Erde die Erdoberfläche bedeckte enthalten unter anderem die Elemente Natrium, Kalium, Calcium, Eisen, Magnesium, Aluminium, Silizium und Sauerstoff.

Diese Elemente gelangten nun als Ionen nach und nach in das Meerwasser. Hinzukamen Anionen, wie Chloride, Sulfate, Carbonate usw. Aber noch wichtiger für dieses „Einfüllen von Salz“ in die Meere waren Lösungsprozesse, die sich am Boden der jungen Meere abspielten. Hier traf das Wasser auf die heißen und teilweise porösen Gesteine und laugte sie tiefgründig aus. Das heißt es löste auch hier, aber viel intensiver als auf dem Festland, die Elemente aus den Mineralien heraus. Direkt aus den Vulkanschlotten eruptierten Gase in die Atmosphäre, verbanden sich mit dem kondensierenden Wasserdampf und regneten in die Meere ab, wo sie in Lösung gingen oder gelangten aus Spalten und Rissen am Meeresboden direkt in das Meerwasser.

Die Meere erhielten langsam ihren Salzgehalt.

Das System Erde wurde immer komplexer.

Die folgende Abbildung zeigt die Zusammenhänge aus heutiger Sicht. Es ist ein System von komplexen Kreislauf- und Wechselwirkungsprozessen.

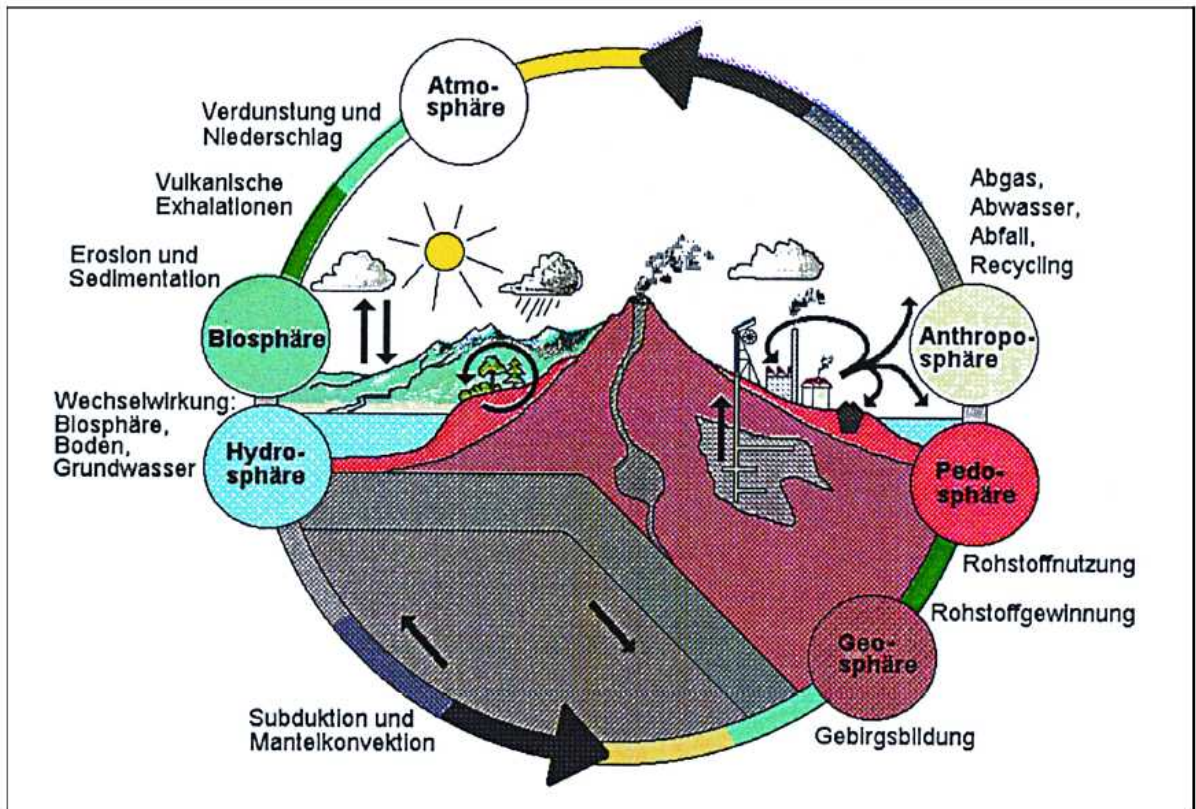


Abb. 23: aus: System Erde – BMWF 2001