Eine kurze Geschichte der Erde

Vom Urknall bis heute

Zusammenfassung aus verschiedenen Quellen in den Worten der AuthorInnen

Impressum

Kontakt: haeberli.ernst@gmail.com

Website: www.haeberliblog.ch

Oktober 2022

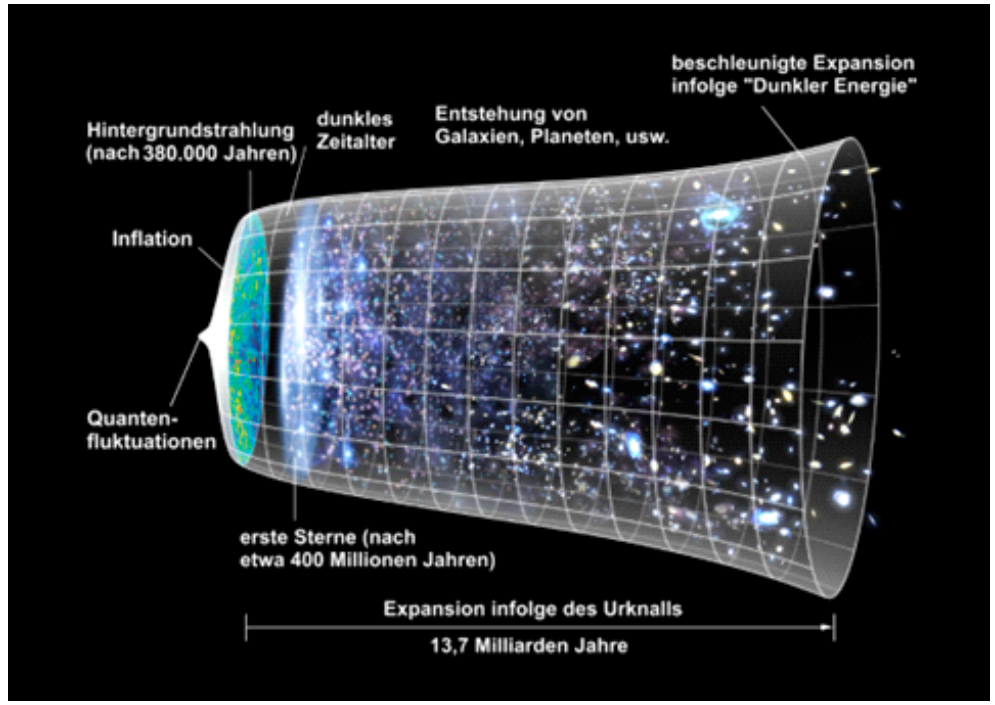
Am Anfang war der Knall.

Inhalt

Der Urknall	8
Unsere Milchstrasse	9
Unser Sonnensystem	10
Ursprung der Erde	11
Der Mond	12
Hadaikum	14
Archaikum	18
Proterozoikum	22
Kambrium	36
Ordovizium	48
Silur	62
Devon	72
Karbon	82
Perm	94
Trias	104
Jura	112
Kreide	126
Paläogen	138
Neogen	158
Quartär	176
Zusammenfassung	200
Eine kurze geologische Geschichte der Schweiz	206
Erdgeschichte generell	208
Fazit	212

Ära	System	Epoche	Alter (Mio. Jahre)	Wichtige Ereignisse
Erdneuzeit (Känäozoikum)	Quartär	Holozän	0,01	▲Landwirtschaft, Sesshaftigkeit
		Pleistozän	2,6	▲ erste Menschen
	Neogen	Pliozän	5,3	▲ Jurafaltung
		Miozän	23	
	Paläogen	Oligozän	34	◯33 bis heute Känozoische Eiszeit
		Eozän	56	▲Alpenbildung
		Paläozän	66	✸Kreide-Paläogen Massensterben
Erdmittelalter (Mesozoikum)	Kreide	obere	100	
		untere	145	
	Jura	oberes	161	
		mittleres	176	
		unteres	200	✸Trias-Jura-Massensterben
	Trias	obere	228	▲erste Säugetiere
		mittlere	245	
		untere	251	✸Perm-Trias Massensterben
Erdaltertum (Paläozoikum)	Perm		300	▲erste Reptilien
	Karbon		360	✸Devon-Massensterben ◯360-260 Karoo Eiszeit
	Devon		416	▲erste Amphibien
	Silur		444	✸Silur-Massensterben
	Ordovizium		488	◯460-420 Anden-Sahara Eiszeit
	Kambrium		542	▲erste Fische
Neues Proterozoikum	Ediacarium		635	◯650-580 Marinoische/Gaskiers Eiszeiten
	Cryogenium		850	◯750-700 Sturtische Eiszeit
	Tonium		1'000	
Mittleres Proterozoikum			1'600	▲ab 1'500 Eukaryoten
Frühes Proterozoikum			2'500	◯2'400-2'100 Huronische Eiszeit
Archaikum			4'000	▲ab 2'700 Photosynthese, Cyanobakterien ▲ab 3'800 erste Einzeller
Hadaikum			4'600	
Urknall			13'700	

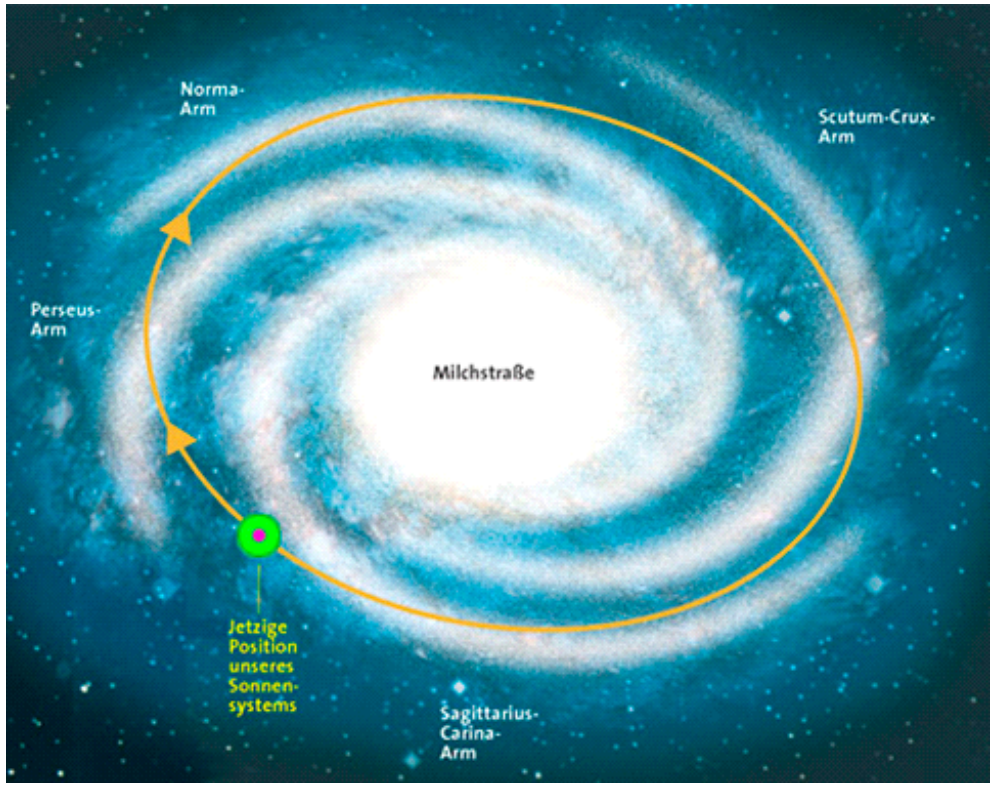
Der Urknall



Durch Messungen konnte festgestellt werden, dass sich das Universum ausdehnt. Also muss es einen Anfang gehabt haben: der Urknall.

Der Urknall vor 13,7 Milliarden Jahren ist keine erwiesene „Tatsache“, weil seine Darstellung durch eine vollständige Theorie noch aussteht. Gleichwohl ist er aufgrund unseres derzeitigen Wissens und unserer wissenschaftlichen Methoden ein äusserst erfolgreiches Modell, das das Verhalten des Universums von der Zeit unmittelbar nach seiner Entstehung bis zur Gegenwart beschreibt.

Unsere Milchstrasse

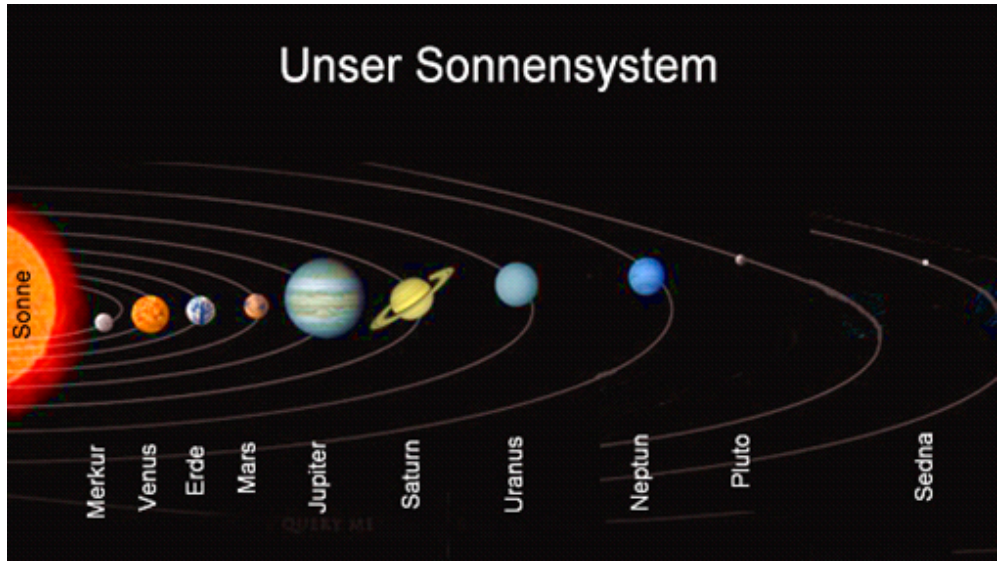


Der Durchmesser unseres sichtbaren Universums beträgt neunzig Milliarden Lichtjahre. Es gibt rund hundert Milliarden Galaxien (Milchstrassen) im sichtbaren Universum, die im Schnitt jeweils hundert Milliarden Sterne enthalten. Unsere Galaxie hat einen Durchmesser von mindestens 50‘000 Lichtjahren. Unsere Sonne mit ihren Planeten ist 24‘000 Lichtjahre vom Zentrum der Galaxie entfernt. Unser Sonnensystem bewegt sich mit 792‘000 km/h um das Zentrum der Milchstrasse.

Unsere Sonne, oder unser Standort innerhalb der Galaxie, ist etwas ganz Gewöhnliches. Unser „besonderer Stern“ gleicht einer Unmenge anderer Sterne, die uns umgeben. Die Galaxie, in der wir leben, oder der Ort unserer Galaxie innerhalb des Universums zeichnet sich durch nichts aus.

Nach Simulationen geht man davon aus, dass in unserer Galaxie mindestens eine Milliarde Sterne mit Wirtsplaneten mit stabilen Bedingungen gibt, die zur Entwicklung von Leben führen könnten.

Unser Sonnensystem



Unser Sonnensystem, und damit auch unsere Erde, ist 4,6 Milliarden Jahre alt.

Die Planeten waren ursprünglich unregelmässig geformt. Doch die Wucht der andauernden Einschläge lässt ihr Inneres schmelzen, ebenso die grosse Menge der kurzlebigen radioaktiven Elemente, deren Zerfall sie aufheizt. Die Schwerkraft brachte die Planeten mit ihrem flüssigen Kern in die einfachste, gleichförmigste geometrische Form: die Kugel. Alle Punkte ihrer Oberfläche sind gleich weit von ihrer Mitte entfernt. Die Erde ist aber keine perfekte Kugel, sie ist durch die Drehbewegung an den Polen etwas abgeflacht.

Ursprung der Erde

Zeitraum:

Unsere Erde ist ca. 4,6 Milliarden Jahre alt.

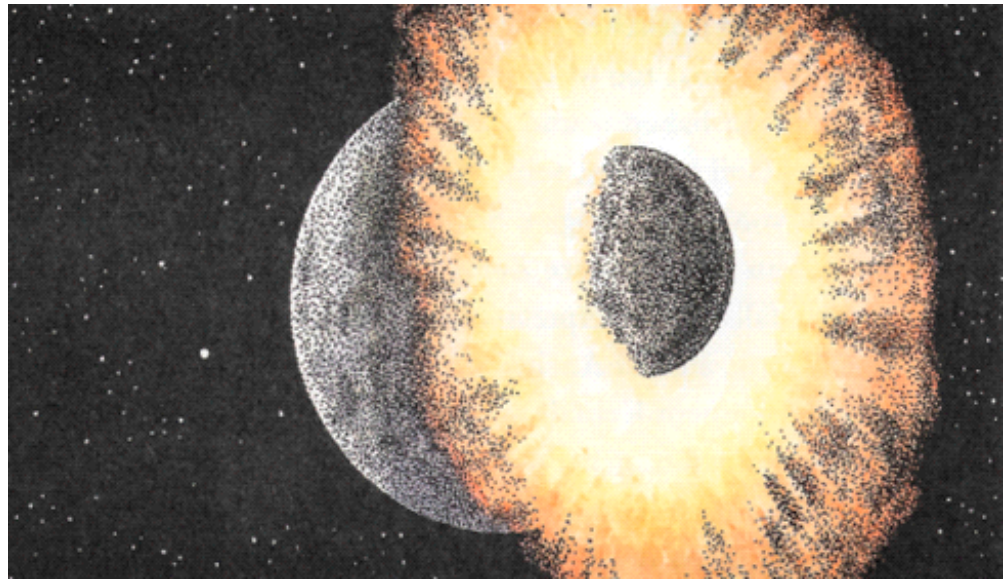
Plattentektonik:

In dieser Zeit sind die Planetenkörper weich, vielleicht sogar teilweise geschmolzen. Leichte Elemente wie Magnesium und Kalzium schwimmen auf, bilden die erste Kruste. Gleichzeitig sickern schwere Elemente wie Eisen und Nickel hinab und bilden den flüssigen, metallischen Kern.

Geologie:

Die Erde muss sich nach ihrem Entstehen sehr schnell abgekühlt haben. Innerhalb von gerade mal 100 Millionen Jahren könnte es flüssiges Wasser auf ihr gegeben haben – und damit vielleicht auch Meere. Wo das Wasser hergekommen ist, ist unklar. Es könnte bei der Planetenentstehung gleich mit eingebaut und zum anderen von Kometen ausserhalb des Sonnensystems angeschleppt worden sein.

Der Mond



Die Erde ist genau so alt wie der Mond. Der gängigen Theorie nach entstand der Mond, als ein Planet namens **Theia**, so gross wie der Mars, in die Erde raste. Diese Kollision fand vor 4,5 Milliarden Jahren statt.

Die Wucht des Einschlages zerschmetterte Theia und zerrüttete die grössere Erde zutiefst. Gestein verdampfte und Magma spritzte bis in den Weltraum hinauf, ebenso Asche und Staub. Ein Ring von **Trümmern** kreiste um die Erde. Aus diesem Trümmerring wuchs der Mond, in vielleicht 18 000 bis 25 000 Kilometern Entfernung von ihr. Er sammelte den restlichen Schutt und kühlte ab. Nach weniger als 20 Millionen Jahren war er wohl fertig.

Der Mond hat keine Plattentektonik und darum auch schon seit längerer Zeit keinen Vulkanismus mehr. Er hat keine Atmosphäre und kein Wasser und darum auch keine Erosion und ist dem Meteoriten-Bombardement schutzlos ausgeliefert. Kleinste Meteoriten können durch die hohe Aufschlagsgeschwindigkeit auf der Mondoberfläche riesige Krater verursachen. Man vermutet, dass der Mond einen flüssigen Kern hat wie die Erde.

Der Kern des Mondes wird aber verhältnismässig viel kleiner als der der Erde angenommen.

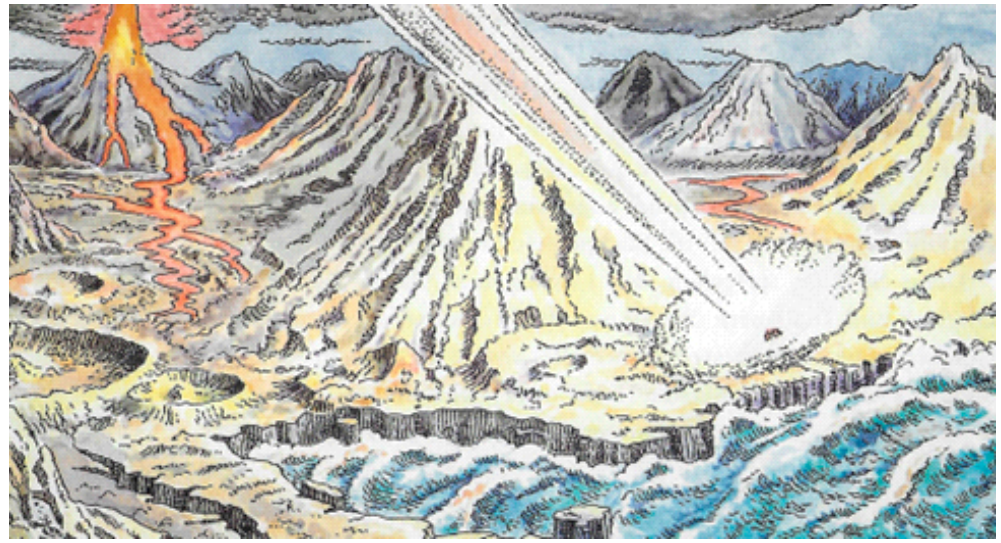
Ära	System	Epoche	Alter (Mio. Jahre)	Wichtige Ereignisse
Erdneuzeit (Kanäozoikum)	Quartär	Holozän	0,01	▲Landwirtschaft, Sesshaftigkeit
		Pleistozän	2,6	▲ erste Menschen
	Neogen	Pliozän	5,3	▲ Jurafaltung
		Miozän	23	
	Paläogen	Oligozän	34	◯33 bis heute Känozoische Eiszeit
		Eozän	56	▲Alpenbildung
		Paläozän	66	✸Kreide-Paläogen Massensterben
Erdmittelalter (Mesozoikum)	Kreide	obere	100	
		untere	145	
	Jura	oberes	161	
		mittleres	176	
		unteres	200	✸Trias-Jura-Massensterben
	Trias	obere	228	▲erste Säugetiere
		mittlere	245	
		untere	251	✸Perm-Trias Massensterben
Erdaltertum (Paläozoikum)	Perm		300	▲erste Reptilien
	Karbon		360	✸Devon-Massensterben ◯360-260 Karoo Eiszeit
	Devon		416	▲erste Amphibien
	Silur		444	✸Silur-Massensterben
	Ordovizium		488	◯460-420 Anden-Sahara Eiszeit
	Kambrium		542	▲erste Fische
Neues Proterozoikum	Ediacarium		635	◯650-580 Marinoische/Gaskiers Eiszeiten
	Cryogenium		850	◯750-700 Sturtische Eiszeit
	Tonium		1'000	
Mittleres Proterozoikum			1'600	▲ab 1'500 Eukaryoten
Frühes Proterozoikum			2'500	◯2'400-2'100 Huronische Eiszeit
Archaikum			4'000	▲ab 2'700 Photosynthese, Cyanobakterien ▲ab 3'800 erste Einzeller
Hadaikum			4'600	
Urknall			13'700	

Hadaikum

Zeitraum:

Vor rund 4,6 bis 4 Milliarden Jahren.

Plattentektonik:



Das Hadaikum ist das erste Weltalter der Erdgeschichte. Aus dieser Zeit, als Kollisionen mit anderen Himmelskörpern noch häufig waren, gibt es kaum Zeugnisse. Man nimmt an, dass es eine feste Erdkruste gab und so etwas wie eine ozeanische Wasserhülle.

Die Hülle des Planeten unterliegt, seit sie sich zur festen Kruste abgekühlt hatte, einem steten Wandel. Die Erdkruste besteht aus einzelnen Platten. Diese «schwimmen» dabei gewissermassen auf den darunterliegenden, heissen und daher zähflüssigen Gesteinen des tieferen Erdmantels. Wie gigantische Flösse auf einem See können die Schollen aneinander vorbeischrammen oder seitlich kollidieren. Sie können auseinanderbrechen oder sich ineinander verkeilen.

Umwelt:

Die Erde war ein lebensfeindlicher Ort, höllisch aufgeheizt durch schwere Meteoriteneinschläge und intensiven radioaktiven Zerfall im Innern.

Geologie:

Das mit einem Alter von 4 Milliarden Jahren älteste Gestein der Erde entstammt dem Acasta-Gneis im Kanadischen Schild. Seine Erforschung zeigte, dass es bereits in diesem frühen Zeitalter - wenige hundert Millionen Jahre nach der Entstehung der Erde - einen Ozean und zumindest eine Festlandinsel gegeben hat. Ähnlich alt, möglicherweise mit 4,3 Milliarden Jahren sogar noch älter als der Acasta-Gneis, sind die Gesteine des Nuvvuagittuq-Grünsteingürtels in der kanadischen Provinz Québec. Aus solchen frühen Kratonen (Kerngebiete der Kontinente) des Hadaikums könnte sich im Archaikum der hypothetische erste Superkontinent Ur gebildet haben.

Fauna und Flora:

Es gab zu dieser Zeit noch keine Lebewesen auf der Erde. Die Verhältnisse waren dazu viel zu unwirtlich.

Ära	System	Epoche	Alter (Mio. Jahre)	Wichtige Ereignisse
Erdneuzeit (Kanäozoikum)	Quartär	Holozän	0,01	▲Landwirtschaft, Sesshaftigkeit
		Pleistozän	2,6	▲ erste Menschen
	Neogen	Pliozän	5,3	▲ Jurafaltung
		Miozän	23	
	Paläogen	Oligozän	34	◯33 bis heute Känozoische Eiszeit
		Eozän	56	▲Alpenbildung
		Paläozän	66	✸Kreide-Paläogen Massensterben
Erdmittelalter (Mesozoikum)	Kreide	obere	100	
		untere	145	
	Jura	oberes	161	
		mittleres	176	
		unteres	200	✸Trias-Jura-Massensterben
	Trias	obere	228	▲erste Säugetiere
		mittlere	245	
		untere	251	✸Perm-Trias Massensterben
Erdaltertum (Paläozoikum)	Perm		300	▲erste Reptilien
	Karbon		360	✸Devon-Massensterben ◯360-260 Karoo Eiszeit
	Devon		416	▲erste Amphibien
	Silur		444	✸Silur-Massensterben
	Ordovizium		488	◯460-420 Anden-Sahara Eiszeit
	Kambrium		542	▲erste Fische
Neues Proterozoikum	Ediacarium		635	◯650-580 Marinoische/Gaskiers Eiszeiten
	Cryogenium		850	◯750-700 Sturtische Eiszeit
	Tonium		1’000	
Mittleres Proterozoikum			1’600	▲ab 1'500 Eukaryoten
Frühes Proterozoikum			2’500	◯2'400-2'100 Huronische Eiszeit
Archaikum			4’000	▲ab 2'700 Photosynthese, Cyanobakterien ▲ab 3'800 erste Einzeller
Hadaikum			4’600	
Urknall			13’700	

Archaikum

Zeitraum:

Vor 4 bis 2,5 Milliarden Jahren

Plattentektonik:

Ur ist ein hypothetischer Superkontinent, der erste und damals einzige Kontinent, der sich vor 3 Milliarden Jahren, im frühen Archaikum, in Äquatornähe geformt hat. Er wird kleiner als das heutige Australien angenommen. Die Bezeichnung "Superkontinent" ist wohl insofern inkorrekt, als er wohl nur aus einem einzigen Kontinentalkern bestand. Ur schloss sich nach diesem plattentektonischen Modell mit Nena und Atlantika vor 1,1 Milliarden Jahre zum globalen Superkontinent **Rodinia** zusammen.

Umwelt:

Die Atmosphäre im frühen Archaikum enthielt noch keinen freien Sauerstoff. Die Photosynthese der ersten Prokaryoten oxidierte vorerst die Minerale des Urozeans und erst gegen Ende des Archaikums – vor 2,5 Milliarden Jahre – wurde Sauerstoff an die Atmosphäre abgegeben.

Geologie:

Innerhalb des Archaikums ereigneten sich einige der grössten bislang nachgewiesenen Einschläge durch Meteoriten. So fand man im Jahr 2014 im Barberton-Grünsteingürtel (Südafrika) Impaktgläser, die auf den Einschlag eines 37 bis 58 km durchmessenden Impaktors schliessen lassen, der unseren Planeten vor etwa drei Milliarden Jahren traf und weitreichende Folgen für die damalige Ökosphäre gehabt haben dürfte.

Fauna und Flora:

Während des Archaikums erschien die Erde noch «öd und leer». Leben spielte sich zunächst in Dimensionen ab, die nur mit dem **Mikroskop** zu erfassen gewesen wären.

Alle Lebewesen heute setzen die Desoxyribonukleinsäure (DNA) als Trägerin der Erbinformation -der Gene- ein. Die ersten Lebewesen vor mehr als dreieinhalb oder vielleicht vier Milliarden Jahren werden so etwas Kompliziertes wie die DNA-Doppelhelix wohl nicht besessen haben. Wie sie die Erbinformationen weitergaben, ist unklar.

Die Spuren des **ersten Organismus** haben sich im Dunkel der Geschichte verloren. Derzeit gibt es nur Vermutungen dazu, wie er den Sprung von der Chemie zur Biologie geschafft haben könnte. Dieses erste Wesen war vollkommen anders als alles, was wir heute um uns sehen. In uns sorgen Myriaden von unterschiedlichen **Zellen** dafür, dass wir denken, atmen, essen, trinken, schlafen, arbeiten. Sie bestehen aus Molekülen und diese aus Atomen – und nichts davon ist lebendig. Erst wenn alle diese Atome und Moleküle in genau der richtigen Struktur und Anordnung gemeinsam eine Zelle bauen, wird daraus **Leben**. Ausserdem steckt in allem, was mit uns die Erde teilt, eine lange Evolutionsgeschichte: Jedes Lebewesen, selbst der primitivste Einzeller, ist sehr hoch entwickelt und viel zu komplex, als dass er eine Ahnung von den schlichten Anfängen vermitteln könnte.

Immerhin ist klar, wo die Anfänge zu suchen sind: im **Wasser**. Flüssiges Wasser ist die unverzichtbare Ingredienz des irdischen Lebens!

Wie auch immer die früheste Lebensform ausgesehen haben mag, sie hat im Zusammenspiel von Wasser, der Atmosphäre, Mineralien, den entsprechenden Temperaturen und Zufällen die Grenze von der Chemie zur Biologie überschritten.

Es gibt Hinweise, dass das erste Leben in untermeerischen **Thermalquellen** entstanden sein könnte. Aus ein paar Atomen Stickstoff, Sauerstoff und Schwefel lassen sich mögliche Lebensbausteine zusammensetzen, von Lipiden für die Zellmembran, bis zu Aminosäuren für Proteine.

Jedenfalls gehörte die Erde in dieser Zeit den einzelligen Mikroorganismen: den **Bakterien** und Archaeen.

So ähnlich wie diese Clostridien könnte der Urahn aller Bakterien ausgesehen haben.

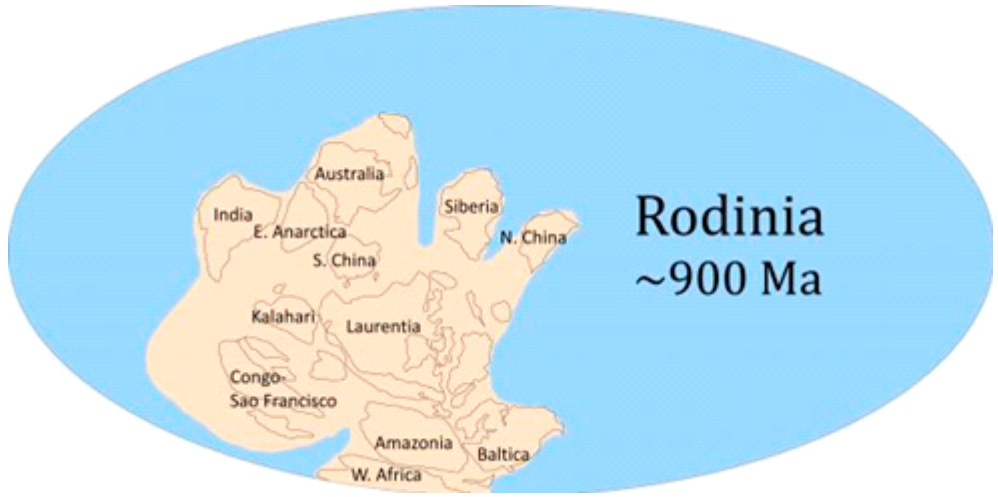
Ära	System	Epoche	Alter (Mio. Jahre)	Wichtige Ereignisse
Erdneuzeit (Kanäozoikum)	Quartär	Holozän	0,01	▲Landwirtschaft, Sesshaftigkeit
		Pleistozän	2,6	▲ erste Menschen
	Neogen	Pliozän	5,3	▲ Jurafaltung
		Miozän	23	
	Paläogen	Oligozän	34	◯ 33 bis heute Känozoische Eiszeit
		Eozän	56	▲Alpenbildung
		Paläozän	66	✸ Kreide-Paläogen Massensterben
Erdmittelalter (Mesozoikum)	Kreide	obere	100	
		untere	145	
	Jura	oberes	161	
		mittleres	176	
		unteres	200	✸ Trias-Jura-Massensterben
	Trias	obere	228	▲ erste Säugetiere
		mittlere	245	
		untere	251	✸ Perm-Trias Massensterben
Erdaltertum (Paläozoikum)	Perm		300	▲ erste Reptilien
	Karbon		360	✸ Devon-Massensterben ◯ 360-260 Karoo Eiszeit
	Devon		416	▲ erste Amphibien
	Silur		444	✸ Silur-Massensterben
	Ordovizium		488	◯ 460-420 Anden-Sahara Eiszeit
	Kambrium		542	▲ erste Fische
Neues Proterozoikum	Ediacarium		635	◯ 650-580 Marinoische/Gaskiers Eiszeiten
	Cryogenium		850	◯ 750-700 Sturtische Eiszeit
	Tonium		1’000	
Mittleres Proterozoikum			1’600	▲ ab 1'500 Eukaryoten
Frühes Proterozoikum			2’500	◯ 2'400-2'100 Huronische Eiszeit
Archaikum			4’000	▲ ab 2'700 Photosynthese, Cyanobakterien ▲ ab 3'800 erste Einzeller
Hadaikum			4’600	
Urknall			13’700	

Proterozoikum

Zeitraum:

2‘500 bis 635 Millionen Jahre vor heute. Dieses Erdzeitalter wird aufgeteilt in Frühes, Mittleres und Neues Proterozoikum.

Plattentektonik:



Rodinia soll vor 1,1 Milliarden Jahren entstanden sein und zerbrach vor etwa 800 Millionen Jahren. Dieser **Superkontinent** war von dem weltumspannenden Urozean Mirovia umgeben. Die Landmassen der Erde bildeten immer wieder einzelne Superkontinente - über den ältesten, genannt Rodinia, gibt es bis heute wenige gesicherte Daten. Doch schon im Präkambrium - lange bevor die Landmassen der Erde von Pflanzen und Tieren bevölkert wurden - bewegten sich die Erdmassen sehr viel aktiver, als man bislang angenommen hat.

Umwelt

Kennzeichen des Proterozoikums ist das Vorhandensein einer **sauerstoffhaltigen Atmosphäre**. Schon gegen Ende des Archaikums, vor 2,5 Milliarden Jahren, begann der Sauerstoffgehalt in der Erd-

atmosphäre zu steigen. Obwohl die Produktion von Sauerstoff durch photosynthetisierende Lebewesen schon rund eine Milliarde Jahre zuvor begonnen hatte, wurde erst ab diesem Zeitpunkt Sauerstoff in die Atmosphäre abgegeben. Zuvor wurde dieser Prozess durch die Sauerstoffaufnahme bei der Oxidation der im Meerwasser gelösten anorganischen Stoffe, insbesondere Eisen-Ionen und Ionen anderer Schwermetalle, verhindert. Mit steigender Sauerstoffkonzentration in der Atmosphäre konnte sich **Ozon** bilden, das in der Lage war, das für Lebewesen schädliche UV-Licht zu filtern. Erst der Sauerstoff ermöglichte die Entwicklung tierischen Lebens.

Auch das Klima war zeitweise bedeutend anders als heute, es gibt Hinweise auf globale Vereisungen (Schneeball-Erde).

Geologie:

Es bildeten sich erste **Kontinentalplatten** aus basaltartigen Gesteinen, Granit (= Feldspat, Quarz und Glimmer) und Gneis in der Form, wie sie zu einem grossen Teil heute noch bestehen.

Granit ist das häufigste Gestein der kontinentalen Erdkruste. Granite sind sehr weit verbreitete, massige und relativ grobkristalline magmatische Tiefengesteine (Plutonite). Sie bilden in etwa 44 Vol.-% aller kontinentalen plutonischen Gesteine. Sie entstehen, wenn zwei Kontinente miteinander kollidieren. Unter hohem Druck und Hitze schmilzt das Gestein. Durch Spalten im Erdreich versucht es aufzusteigen, schafft es nicht an die Erdoberfläche, kühlt aus, erstarrt und kristallisiert zu fein- oder grobkörnigem Granit, je nach Dauer des Vorgangs. Granite entstehen in den meisten Fällen nicht aus Material des Erdmantels, sondern aus aufgeschmolzenem Material der unteren Erdkruste.

Gneise entstehen durch Umwandlung von Gestein unter hohem Druck und bei hohen Temperaturen. Die Ausgangsgesteine von Gneisen sind Gesteine magmatischen Ursprungs wie Granit, aber auch Gesteine metamorphen Ursprungs und Sedimentgesteine, bspw. Tonschiefer, Sandstein und Schieferton.

Bei Temperaturen von 700°C und Druckbedingungen bis zu 6 kBar, die beispielsweise bei der Gebirgsbildung infolge tektonischer Vorgänge vorliegen, wird Gneis als Gestein neugebildet.

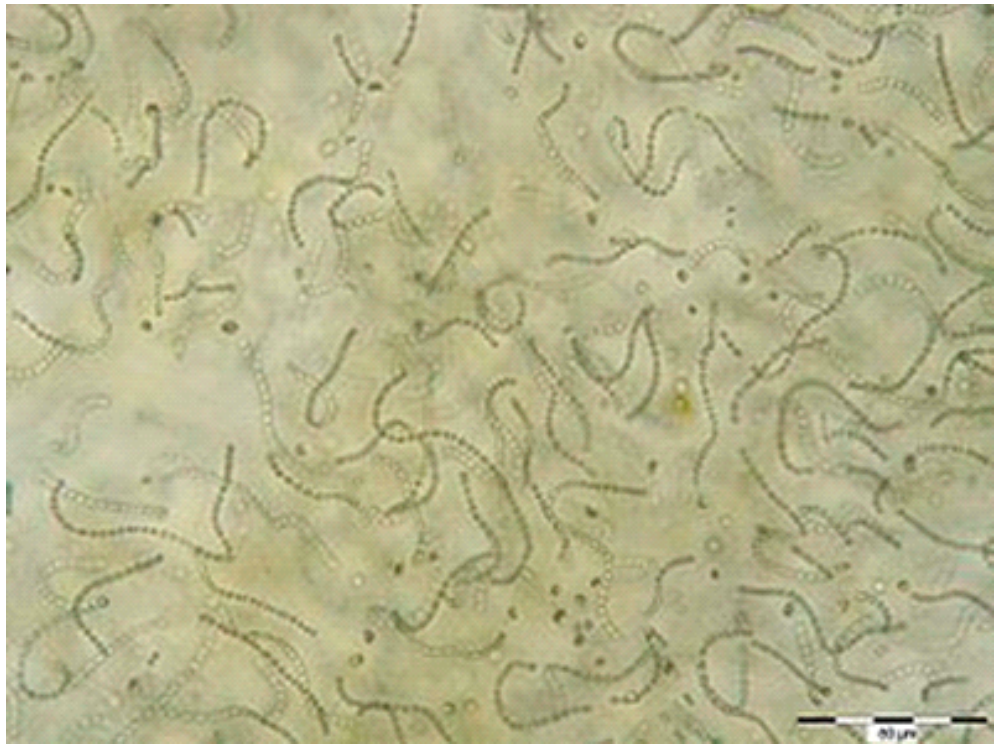
Einige Geologen glauben, dass die Verschiebung der Kontinente von unten her angetrieben wird – dass die Erde wie eine Herdplatte arbeitet. Die Hitze aus dem **Erdkern** lässt im Erdmantel Strömungszellen entstehen, auf denen die Kontinente reiten und mitgezogen werden. Andere sehen den Motor in der Abkühlung an der Erdoberfläche. Wenn die Erdkruste unter dem Meer alt, kalt und schwer geworden ist, sinkt sie ins Erdinnere ab und zieht dabei die Kontinente mit sich, die oben auf schwimmen, weil sie aus leichterem Material bestehen und deshalb nicht abtauchen können.

Fauna und Flora:

Vor dreieinhalb Milliarden Jahre wäre uns die Erde wohl sehr fremdartig erschienen. Spätestens damals spannte sich der Himmel orangerot über das bleierne Meer, denn Archaeen hatten die Luft mit **Methan** gefüllt. Die dichten Wolken filterten das Sonnenlicht, so dass es selbst mittags dämmrig war. Das Land war kahler Stein. Nichts Grünes zu sehen, nur gelber Schwefel, der sich zwischen dem Geröll sammelte. Es war schwül, unerträglich heiss. Es wäre wohl immer noch so, hätte es nicht das aus unserer Sicht wichtigste Ereignis der Evolution gegeben: die Erfindung der **Fotosynthese**, bei der freier **Sauerstoff** entsteht. Vor Jahrmilliarden lernten Mikroben, mithilfe des **Sonnenlichts** aus energiearmen, anorganischen Verbindungen energiereiche Biomasse zu machen – und setzten dabei Sauerstoff als Abfallprodukt frei.

Bis dahin waren Archaeen und Bakterien das Höchste, was auf Erden existieren konnte, der Schleim dieser Zeit. Kein grösseres Lebewesen konnte existieren. Dazu hätte es Sauerstoff gebraucht. Den verdanken wir dem Urahn aller **Cyanobakterien**. Der Urahn aller Cyanobakterien entwickelte das grüne Pigment **Chlorophyll**. Mit seiner Hilfe lassen sich aus dem allseits vorhandenen Wasser, aus Kohlendioxid und Sonnenlicht Kohlenhydrate produzieren - und dabei als Abfall freier **Sauerstoff**. Das war der Trick, mit dem die Cya-

nobakterien die Erde tiefgreifender verändern sollten als jedes andere Lebewesen vor oder nach ihnen.



Übrigens haben wir allen Grund, diesem ersten Cyanobakterium dankbar zu sein, denn es legte den Grundstein für das Leben. Ohne freien Sauerstoff wäre die Erde immer noch ein Planet des Schleims und hätte keine Chance, dass sich je anderes auf ihm entwickelt.

Heute ist es die Fotosynthese, die das Leben antreibt. Sie erzeugt 85-90% der «biologischen Energie» auf der Erde.

Ob Alge oder Baum – alles was grün ist und Sauerstoff freisetzt, stammt letztendlich von Cyanobakterien ab.

Zunächst jedoch bedeutete der erste Sauerstoff eine **Katastrophe**. Schliesslich setzte die Mikrobe, die mit der Produktion begann, ein hochwirksames **Zellgift** frei – ein sehr reaktionsfreudiges Gas, das organische Materie oxydiert. Obwohl der Sauerstoffanteil in den Meeren und der Luft zunächst verschwindend gering war, stiess er eine Revolution an: Wer langfristig überleben wollte, musste mit dem Gift umzugehen lernen, sich anpassen und Enzyme entwickeln, die es im Körper unschädlich machten.

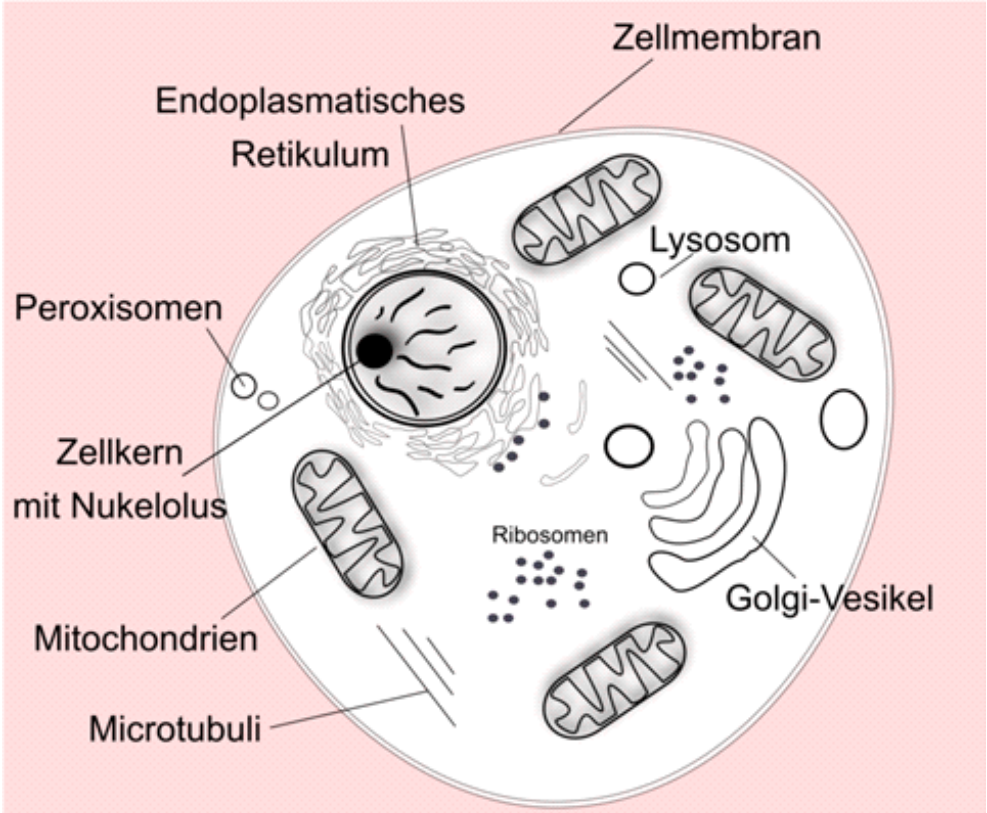
Kaum hatte sich der Sauerstoff in der Atmosphäre angereichert, «rostete» die Erde auch an Land: Felsen, Steine, Minerale. Der chemisch aggressive Sauerstoff brachte die Verwitterung auf Touren und zersetzte Minerale, die vorher stabil waren. Das sorgte nicht nur dafür, dass plötzlich Unmengen an Nährstoffen in die Ozeane gelangten, sodass die Bakterien schwelgen konnten. Es gab noch eine ganz andere Überraschung: Die Cyanobakterien griffen tief in das **Klimageschehen** ein. Forscher glauben, dass die Erde damals vollkommen vereiste – das erste Mal von mehreren, viel jüngeren Ereignissen dieser Art. Ihrer Meinung nach gab es vor rund 850 bis 580 Millionen Jahren mehrere «Schneebälle» und dann eben auch viel früher, vor rund 2,4 Milliarden Jahren.

Mit dieser **Eiszeit** sollen die Cyanobakterien die Quittung dafür bekommen haben, dass sie mit dem Sauerstoff eine mächtige Substanz, die das Klima beeinflusst, ins Spiel gebracht haben. Das **Kohlendioxid** allein reichte immer noch nicht aus, um den Planeten warm zu halten, sondern das von Mikroorganismen produzierte **Methan** musste als 20-mal stärkeres Treibhausgas helfen. Angenehm warm war es aber nur, bis dieser verflixte Sauerstoff ins Spiel kam. Zum einen holte die durch ihn angekurbelte chemische Verwitterung reichlich Kohlendioxid aus der Luft. Zum anderen griff er begierig das Methan an, baute es zu Kohlendioxid und Wasser um. Und so brachten sich die Cyanobakterien selbst in grösste Schwierigkeiten, weil durch sie das schöne Methantreibhaus zusammenbrach und zum den ersten Mal in der Erdgeschichte die **Gletscher** vorrückten. Sie wuchsen und wuchsen so lange, bis die Eisfläche eine kritische Grenze überschritten hatte: Jetzt reflektierte die Erde das Sonnenlicht so stark, dass die Temperaturen endgültig abstürzten. Die Eisflächen erreichten den Äquator: Die Erde verwandelte sich in einen gleissenden **Schneeball**. Das orangerote Schummerlicht der Methanwelt hatte einem tiefblauen Himmel Platz gemacht. Es war klirrend kalt, selbst im Sommer kletterte das Thermometer nicht über minus 30 Grad. Die Cyanobakterien zerstörten ein komplettes planetares Ökosystem, als sie die Erde in der «Huronischen Vereisung» tiefgefrieren liessen. Und so hing das Leben am seidenen Faden – für Hunderte Millionen Jahre.

Nach dieser Schneeball-Hypothese wäre es den Vulkanen vorbehalten gewesen, uns zu retten. Allerdings dauerte es 300 Millionen Jahre, ehe sie den Planeten wieder aus seiner eisigen Umklammerung befreit hatten. Die Vulkane pumpten Kohlendioxid in die Luft, bis sie davon übervoll war: Ein galoppierender Treibhauseffekt liess die Temperaturen hochschnellen. Der Schneeball schmolz dahin, es war wieder warm.

Sonderbare **Ozeane** entstanden. Sie glichen wahrscheinlich dem Schwarzen Meer heute, wo sich unter einer dünnen Schicht aus sauerstoffhaltigem Wasser die grosse Welt der **anaeroben** Mikroorganismen erstreckt. Und vielleicht folgte deshalb auf das Ende der 300 Millionen währenden Huronischen Vereisung eine andere ungewöhnliche Epoche: die **«langweilige Milliarde».** Obwohl ein bisschen Sauerstoff in der Luft war, schien sich fast 1‘000 Millionen Jahre lang nichts zu tun. Auf den ersten Blick sieht es so aus, als ob die Evolution für ein Viertel der Erdgeschichte eine Pause eingelegt hätte.

Aber das Bild ist verzerrt. Denn in dieser angeblich so langweiligen Milliarde sind beispielsweise **Eukaryoten** entstanden, Organismen, die ihre genetische Information fein säuberlich mit einem **Zellkern** umschliessen. Nur sie konnten irgendwann Lebewesen wie uns hervorbringen, mit Kopf, Rumpf und Gliedmassen. Dazu braucht es nämlich Zellkomplexe mit spezialisierten Aufgaben, ein Nervensystem und Muskeln für die Bewegung. Sonst funktioniert nichts. Und dafür muss auf Zellniveau alles stimmen, denn die eukaryontischen Zellen mit Kern sind grösser als die Prokaryonten, der Lebewesen ohne Zellkern. Damit sie problemlos funktionieren, brauchen die Eukaryoten Organellen, die wie Organe eines vielzelligen Körpers arbeiten: **Mitochondrien** zur Energiegewinnung etwa oder **Chloroplasten** zur Fotosynthese. In den Zellen komplexer Organismen läuft eine ausgefeilte Maschinerie, aber die mussten sie sich erwerben – Baustein für Baustein.



Das Leben hat – nach derzeitigen Forschungstand – drei Domänen. Da sind die beiden Linien der Prokaryonten, der Lebewesen ohne Zellkern, die ihre Erbsubstanz DNA frei in der Zelle «schwimmen» lassen: die Archaeen und die Bakterien. Und da sind als dritte Linie die Eukaryoten – also Organismen, die wie wir ihre DNA in einem Zellkern verstauen.

Algen zählen zu den ersten bekannten Eukaryoten: Mal wogten sie als Fäden in der Strömung, mal hatten sie es sich als Untermieter in den von den Cyanobakterien erbauten Stromatolithen (Riffe) gemütlich gemacht, mal trieben sie als planktonische Kugeln durchs Meer. Vor allem in Gesteinen, die zwischen 850 und 1‘000 Millionen Jahre alt sind, treten sie in Massen auf. Die erste Alge ging vermutlich vor 1,6 bis 1,4 Milliarden Jahren aus der Verschmelzung einer eukaryotischen Zelle mit einem Cyanobakterium hervor.

Die erste eukaryontische Zelle war eine Chimäre, ein Mischwesen auch Archeon und Bakterie. Der Schauplatz für diese Zusammenkunft war wieder der Meeresgrund und wir befinden uns in der langweiligen Jahrmilliarde. Irgendwann stülpte sich eine diese Archaeen über ein Bakterium und zog es in sich hinein – und aus diesem Bakterium wurde das Hydrogenosom. Das ist ein Zellkraftwerk, das wie Mitochondrien Energie gewinnt – dabei jedoch ohne Sauerstoff auskommt. Dieses Hydrogenosom war der Vorläufer des Mitochondriums: Das entwickelte sich erst später, als der stinkende Ozean verschwand, weil der Sauerstoff sich mehr und mehr ausbreitete. In der ganz offensichtlich doch nicht langweiligen Jahrmilliarde sind noch ganz andere bahnbrechende Neuerungen gelungen, etwa die Entwicklung der **zweigeschlechtlichen Fortpflanzung**. Aus Sicht der Evolution hat sie grosse Vorteile: Während sich die Organismen bis dahin einfach nur geteilt hatten, sodass der Fortschritt ganz von zufälligen Veränderungen im Erbgut abhing, eröffnete die zweigeschlechtliche Fortpflanzung neue Möglichkeiten. Die ständige Neukombination des Erbguts beschleunigte das Wachstum der Vielfalt erheblich.

Den im Vergleich zu den Bakterien und Archaeen komplexen Eukaryoten müssen die Ozeane der langweiligen Jahrmilliarde echten Verdruss bereitet haben, weil die Welt nach oben hin von der Luft begrenzt wurde und nach unten durch die für sie hochgiftigen **Schwefelwasserstoffe**. Solange nur wenige Meter unter der Oberfläche eine Giftbrühe lauerte, war die Evolution der Eukaryoten ein ständiges Stop and Go, wurde immer wieder unterbrochen, um später weiterzugehen.

Die Bakterien hingegen fühlten sich pudelwohl, verbrauchten Sauerstoff, setzten noch mehr Schwefelverbindungen frei und sorgten nach Kräften dafür, dass das tiefere Wasser blieb, was es war – die Eukaryotenhölle.

Dann, zwischen 900 und 500 Millionen Jahre vor heute, veränderte sich alles. Warum, das ist offen. Ein möglicher Faktor könnte sein, dass damals irgendwann Algen und Flechten das **Land** besiedelten. Dort produzierten sie dann nicht nur mehr Sauerstoff, sondern sie zogen vor allem Nährstoffe aus den Steinen, auf denen sie lebten

und brachten so die Verwitterung auf Touren. Damit gelangten mehr Nährstoffe ins Meer, wo inzwischen nicht mehr nur die Cyanobakterien darauf warteten, sondern auch jede Menge von Algen. Immer mehr Organismen waren mit der Fotosynthese beschäftigt und der Sauerstoffgehalt stieg. Doch diesmal jedoch wiederholte sich die Geschichte von vor 2,4 Milliarden Jahren nicht – auf das Sauerstoffhoch folgte kein Absturz. Die Ökosysteme müssen sich seit damals also weiterentwickelt haben.

Trotzdem spielte das Klima erst einmal verrückt. Die Gletscher wuchsen und das Cryogenium (etwa 850 bis 580 Millionen Jahre vor heute) brach an. Ob die Erde damals mehrmals vom Äquator bis zu den Polen vollständig gefror, wird kontrovers diskutiert. Die eine Fraktion meint, dass das Meereis und die **Gletscher** weit bis in subtropische oder tropische Gebiete vorstiessen, wo dann weite Gebiete nur mit einer dünnen Eisschicht bedeckt war, oder im Sommer ganz eisfrei gewesen wären. Der Frost legte den Planten nicht lahm.

So oder so, eine Zeit lang fuhr das Klima **Achterbahn**. Eine Klimaschaukel setzte ein: Während den Warmphasen zwischen den Vereisungen blühte das Leben und holte reichlich Kohlendioxid aus der Luft, sodass der Treibhauseffekt nachliess und die Temperaturen abstürzten. Während den Eiszeiten hatten es die Organismen schwer und zogen viel weniger Kohlenstoff aus der Atmosphäre – und das Kohlendioxid aus den **Vulkanen** sammelte sich wieder in der Luft an, der Planet erwärmte sich wieder.

Das Spiel mit dem schnellen Entstehen und Vergehen von Arten scheint damals begonnen zu haben. Die Umwelt war nicht mehr gleichförmig: Wer überleben wollte, musste flexibel reagieren können.

Eiszeiten tendieren ganz allgemein dazu, der Evolution einen Schub zu versetzen, eben weil sie die biogeochemischen Zyklen verändern und damit beispielsweise auch die Chemie der Ozeane.

Die derzeit ältesten identifizierbaren **Tiere** (Vielzeller) erschienen in 650 bis 640 Millionen Jahre alten Sedimenten – wahrscheinlich sind es **Schwämme**. Sie gelten als hervorragende Anwärter auf den Titel

«primitivstes Tier», schliesslich besitzen sie weder ein Nervensystem noch irgendeine Art von Kreislauf. Sie stehen für einen gewaltigen Fortschritt in der Evolution. Schliesslich muss bei einem Organismus, der aus vielen Zellen besteht, die Signalübertragung zwischen diesen Zellen funktionieren, sonst ist nichts mit der Zusammenarbeit.

Lange bevor es jedoch so weit war, neigte sich die «langweilige Jahrmilliarde» ihrem Ende zu. Zu diesem Zeitpunkt waren alle Zutaten für die weitere Evolution vorhanden. Allerdings blieben die Organismen zunächst sehr klein. Bis grössere Tiere auftauchten, sollte die Erde aus unserer Sicht bereits drei Viertel ihrer Geschichte hinter sich gebracht haben.

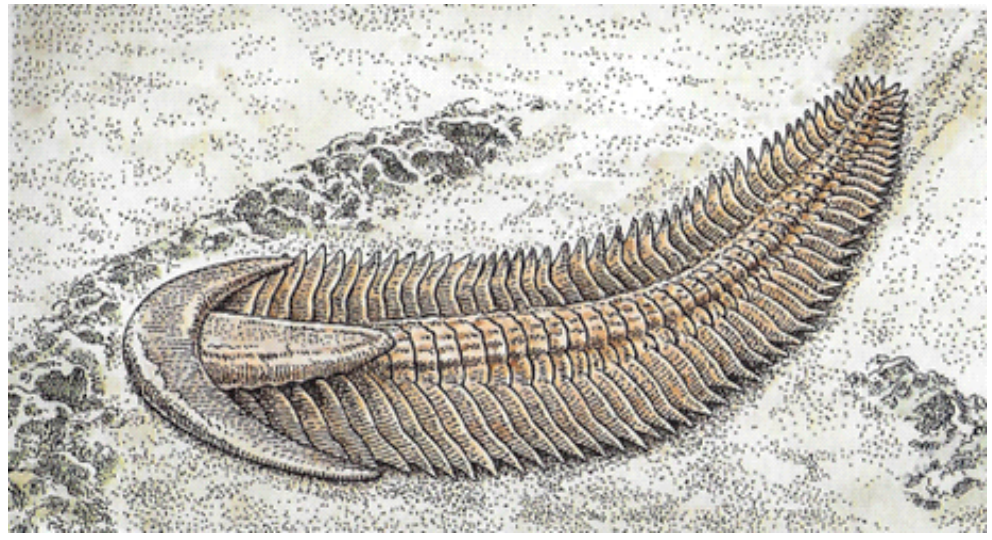
Obwohl Schwämme weder Kiemen hatten noch einen Blutkreislauf oder irgendeine Form von harter Schale, veränderten sie die Ozeane für immer – und zwar indem sie die alten Herrscher der Meere verspeisten, die **Mikroorganismen**. Damit befreiten sie und die anderen früheren Tiere sich selbst aus ihrem Gefängnis: Sie sorgten dafür, dass sich die Ozeane allmählich mit Sauerstoff füllten und drangen so in immer grössere Tiefen vor.

Ansonsten passierte während des Cryogeniums nicht sehr viel, vielleicht, weil das Hin und Her der Eiszeiten recht stressig für die Ökosysteme war. Weiter ging es erst vor 580 Millionen Jahren als die ersten, rätselhaften Überreste **bilateraler Tiere** auftauchten. Von da ging es zunächst langsam vorwärts, bis mit der **Kambrischen Explosion** die Kronengruppen erschienen, die letzten gemeinsamen Vorfahren der heute noch lebenden Tiere: die aller Glieder- oder Weichtiere beispielsweise oder die aller Wirbeltiere…

Diese ein bis zwei Zehntelmillimeter grossen Wesen waren also bilateralsymmetrisch – so wie in unserer Welt alles vom Wurm bis zum Mensch. Diese bilaterale Symmetrie bedeutet einen gewaltigen Schritt hin zu Kopf, Armen und Beinen.

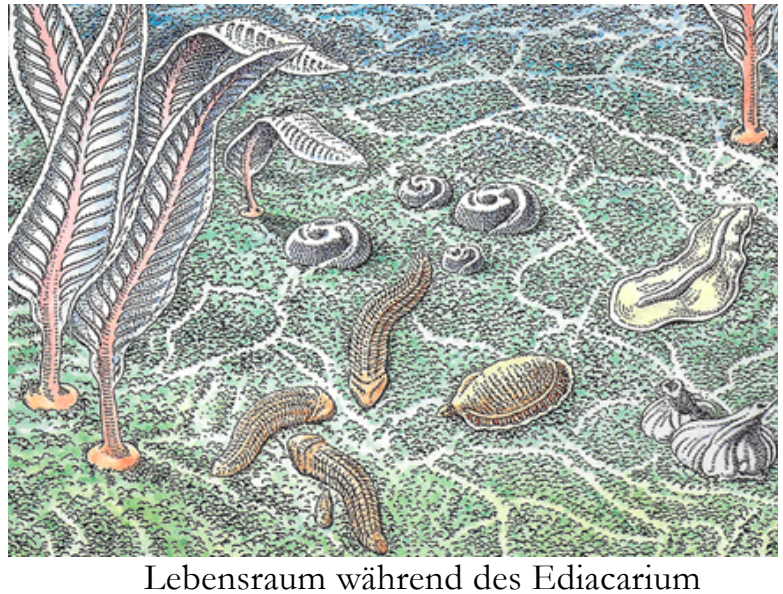
Man konnte jetzt quasi daran denken, seinen Stoffwechsel anspruchsvoller zu gestalten und zu wachsen. So waren die nächsten Fossilien schon sehr viel grösser. Die Normalen brachten es auf mehrere Zentimeter, die Grossen sogar auf ein oder zwei Meter: Vor

575 Millionen Jahren brach die Zeit der rätselhaften **Ediacara-Fauna** an, die 20 Millionen Jahre währen sollte.



Spriggina

Spriggina lebte vor mehr als 550 Millionen Jahren. Sie war etwa fingerlang und bestand aus 20 bis 40 Segmenten. Die beiden ersten unterscheiden sich von den übrigen und werden deshalb als Kopf angesehen. Vielleicht hat das Tier auch einen Mund. Aber sicher ist das nicht.



Lebensraum während des Ediacarium

Während der Ediacarium-Zeit lebten dort in unseren Augen bizarre Wesen. Sie waren fremdartig und vielfältig, sahen aus wie Pizzen oder Federn, glichen Palmwedeln, den verzweigten Ästen von Lebensbäumen, Knöpfen, Säcken, Knoblauchknollen… Sie waren erfolgreich und haben alle Ozeane rund um die Erde erobert.

Die Ediacara-Fauna bestand aus **weichteiligen Organismen,** bei denen weder Verteidigungs- noch Angriffsorgane zu entdecken sind. Es gibt auch keine Fossilien mit Bissspuren. Die Ökosysteme damals werden noch etwas anders funktioniert haben als heute.

Nach der Meinung von Forschern erscheinen diese Ediacara-Fossilien wie ein eigenständiges **Experiment** der Evolution, das verschwunden ist, um mit der Kambrischen Explosion den Tieren Platz zu machen – und dass diese seltsamen Lebewesen einen zentralen Schritt in der frühen Entwicklung der Tiere darstellen.

Zwischen der alten Welt der zwei Milliarden Jahre währenden Welt des Archaikums, und der neuen Weltordnung, die mit dem Kambrium begann, lag eine **Periode des Aussterbens.** Denn anscheinend gingen zum ersten Mal zahllose Entwicklungen der Evolution für immer verloren – und diese Gefahr besteht von nun an immer.

Cyanobakterien und Algen hatten die Welt zu einem Ort gemacht, an dem Tiere leben konnten. Und die machten sich über ihre Wohltäter her und frassen sie – und dieses Fressen hat seit damals nie aufgehört. Mit den Tieren kamen nicht nur **Zähne und Klauen** in die Welt, sondern auch Tempo in die Evolution und das Aussterben.

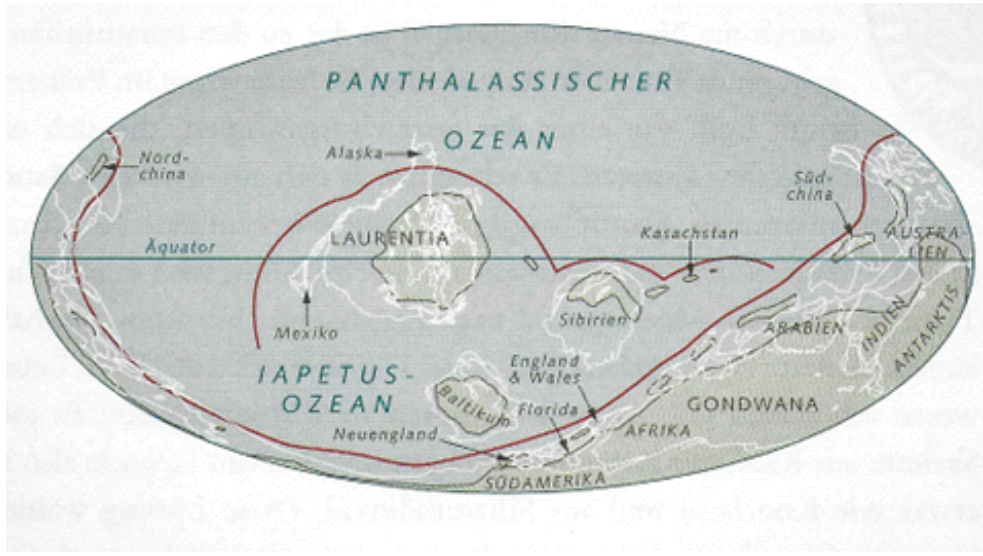
Ära	System	Epoche	Alter (Mio. Jahre)	Wichtige Ereignisse
Erdneuzeit (Känozoikum)	Quartär	Holozän	0,01	▲Landwirtschaft, Sesshaftigkeit
		Pleistozän	2,6	▲ erste Menschen
	Neogen	Pliozän	5,3	▲ Jurafaltung
		Miozän	23	
	Paläogen	Oligozän	34	◯33 bis heute Känozoische Eiszeit
		Eozän	56	▲Alpenbildung
		Paläozän	66	✸Kreide-Paläogen Massensterben
Erdmittelalter (Mesozoikum)	Kreide	obere	100	
		untere	145	
	Jura	oberes	161	
		mittleres	176	
		unteres	200	✸Trias-Jura-Massensterben
	Trias	obere	228	▲erste Säugetiere
		mittlere	245	
		untere	251	✸Perm-Trias Massensterben
Erdaltertum (Paläozoikum)	Perm		300	▲erste Reptilien
	Karbon		360	✸Devon-Massensterben ◯360-260 Karoo Eiszeit
	Devon		416	▲erste Amphibien
	Silur		444	✸Silur-Massensterben
	Ordovizium		488	◯460-420 Anden-Sahara Eiszeit
	Kambrium		542	▲erste Fische
Neues Proterozoikum	Ediacarium		635	◯650-580 Marinoische/Gaskiers Eiszeiten
	Cryogenium		850	◯750-700 Sturtische Eiszeit
	Tonium		1'000	
Mittleres Proterozoikum			1'600	▲ab 1'500 Eukaryoten
Frühes Proterozoikum			2'500	◯2'400-2'100 Huronische Eiszeit
Archaikum			4'000	▲ab 2'700 Photosynthese, Cyanobakterien ▲ab 3'800 erste Einzeller
Hadaikum			4'600	
Urknall			13'700	

Kambrium

Zeitraum:

Vor 542 bis 488 Millionen Jahren

Plattentektonik:



Zu Beginn des Kambriums existierte der grosse Südkontinent **Gondwana**, dessen Ausläufer über den Äquator hinweg bis in nördliche Breiten reichte. Ihm standen drei kleinere Kontinente gegenüber: Laurentia (Teile Nordamerikas und Grönlands), Baltica (Nordeuropa) und Sibiria (Sibirien). Sie alle lagen etwas südlich des Äquators und waren von kleinen Ozeanen getrennt, dem Iapetus-, dem Aegir- und dem Tornquist-Ozean. Und dann gab es noch einen isolierten kleinen Kontinent namens Kasachstania. Gondwana wanderte während des Kambriums über den Südpol hinweg. Der Nordpol lag im Meer.

Umwelt:

Die Erde im Kambrium in Zahlen:

Tageslänge	Etwa 12 Stunden
Atmosphärischer Sauerstoffanteil	Durchschnittlich etwa 12,5 Volumenprozent. Das entspricht etwa 63% des heutigen Niveaus
Atmosphärischer Kohlendioxidanteil	Durchschnittlich etwa 4500 ppm. Das ist das 16-fache des vorindustriellen Gehalts
Durchschnittliche Oberflächentemperatur	Durchschnittlich 21°C und damit 7 Grad über dem heutigen Wert
Meeresniveau	Zwischen 30 und 90 Meter über dem heutigen Niveau, ansteigend

Während dem Kambriums fand eine sanfte **Klimaerwärmung** statt, vermutlich im Zusammenhang mit dem Vulkanismus. Die Vulkane stiessen grosse Mengen CO2 aus, die als Treibhausgas in der Atmosphäre zur Erwärmung beitrugen. Dadurch stieg der Meeresspiegel, vor allem im Unterkambrium, stark an und überflutete die Kontinentalschelfe. Von diesen Meeresüberschreitungen profitierte die damals rein marine Fauna, die in den neu zugänglich gemachten, ökologischen Nischen eine rapide Erweiterung erlebte (Kambrische Explosion).

Neben dem Anstieg des CO2-Gehalts der Atmosphäre, von etwas über 4‘200 auf circa 4‘800 ppm (etwa 12-fache Menge des heute in der Atmosphäre enthaltenen CO2s) stieg auch ihr Sauerstoffgehalt durch die Photosyntheseaktivität des Phytoplanktons leicht an, er blieb jedoch unter einem Atmosphärenanteil von 13%.

Mit einer Durchschnittstemperatur von 21°C war die Welt im Kambrium deutlich heisser als die heutige (~14°C).

Geologie:

In Mitteleuropa gibt es nur sehr wenige Aufschlüsse bzw. Gebiete, in denen Gesteine des Kambriums an die Erdoberfläche treten. Es ist in den meisten Gebieten von dicken jüngeren Sedimentschichten bedeckt.

In dieser Zeit befand sich die Gegend der **Schweiz** noch südlich des Äquators. Das kristalline Grundgebirge baute einen grossen Teil des Schwarzwaldes und des tiefen Untergrunds der Nordostschweiz auf. Die ältesten Granite im Schwarzwald sind älter als 500 Millionen Jahre.

Tier- und Pflanzenwelt:

Die Ökosysteme müssen damals, vor 542 Millionen Jahren, gewaltige Veränderungen durchlaufen haben. Organismen tauchten auf, die im Untergrund gruben oder Nahrungspartikel von den Schlammkörnern absaugten. Sie veränderten die Meere tiefgreifend und entrissen den anaeroben Mikroorganismen einen weiteren Teil ihres Reichs, weil sie den Untergrund mit Sauerstoff versorgten und winzige Nahrungspartikel aus den tieferen Bodenschichten nach oben brachten. Die konnten dann von den Strömungen erfasst, fortgetragen und von anderen gefressen werden. Die **Nahrungsnetze** wurden komplexer, bekamen mehr tierische Zwischenglieder mit gefährlichen **Topräubern** an der Spitze.

Die Fossilien verraten die Reaktionen auf diesen Druck durch die Neuen. Ein Beispiel sind gewisse Einzeller. Sie lebten schon im Präkambrium und leisteten sich ein **Aussenskelett**. Sie schusterten es sich aus winzigen Sandkörnern zusammen. Damit reagierten sei auf eine Neuerung der Evolution: Die harte Aussenhaut machte Sinn, weil es plötzlich Tiere gab, die den Meeresgrund nach **Fressbaren** absuchten.

Damals entstand unsere Welt, die allerdings zunächst noch mit vielen Wesen bevölkert zu sein scheint, die wir heute nicht mehr verstehen. Es gab viele **Rätseltiere**. Etwa *Chancelloria*, die aussieht wie ein kugeliger Kaktus mit sternförmigen Stacheln. Sie wuchs auf dem Meeresboden und fügte dabei an ihrer Spitze immer wieder neue Nadelkreise zu. Auf den ersten Blick gleichen die Nadeln denen von Schwämmen. Allerdings sind *Chancellorias* Kalknadeln hohl und besitzen ein kleines Loch an der Basis, als ob das Tier seinen Körper hineingestülpt hätte wie die Finger in einen Handschuh. Vielleicht gehört sie zu den frühen Mollusken, den Weichtieren, aber sicher ist das keineswegs.

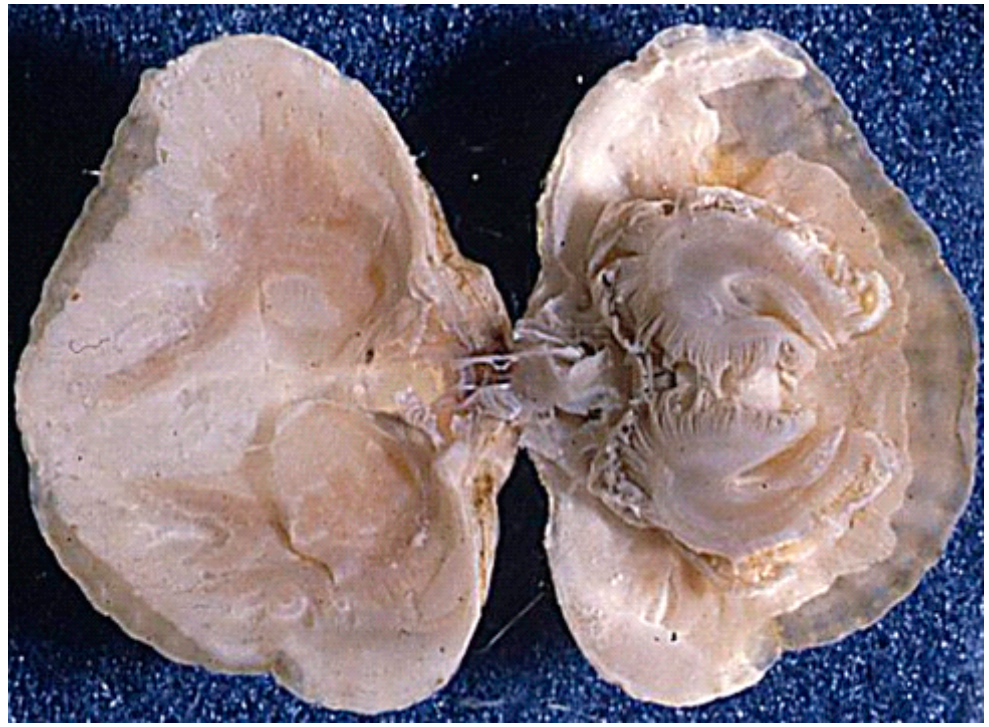
Chancellaria, Rekonstruktion

Innerhalb weniger Millionen Jahre hatte sich die Erde gewandelt: Die Saat ging auf. Warum gerade zu diesem Zeitpunkt, ist ein Geheimnis. Wahrscheinlich werden die Tiere selbst eine wichtige Rolle gespielt haben.

Cloudina gehört zu den «Kleinschalentieren», die vor rund 550 Millionen Jahren in allen Meeren lebte. **Kleinschalentiere** waren plötzlich überall und einige von ihnen machten sich sicherlich über die präkambrischen Algenmatten her.

Nicht alle der ersten skelettragenden Tiere waren so winzig, wie ihre Überreste nahelegen. Einige brachten es schon auf mehrere Zentimeter.

Damals tauchten auch die **Brachiopoden** (Armfüsser) auf. Sie sehen aus wie seltsam geformte Muscheln. Mindestens 12‘000 Arten fossiler Brachiopoden sind bekannt. Sie waren im Paläozoikum, im Erdaltertum (541-251 Millionen Jahre vor heute), eine sehr wichtige Gruppe. Sie sind lebende Fossilien, die bereits seit mehr als einer halben Milliarde Jahren auf der Erde existieren.



Brachiopode

Zu Beginn des Kambriums tauchten erst einmal auch die berühmten *Trilobiten* auf, die auf den ersten Blick etwas von hochstaplerischen, weil riesigen Kellerasseln haben. Ihren Namen verdanken die **Trilobiten** («Dreilapper») ihrem harten Rückenpanzer, der in drei Abschnitte unterteilt ist. Mit der kambrischen Explosion brach ihre grosse Zeit an!

Trilobiten waren fantastische Lebewesen. Sie gehörten zu den **Gliederfüssern** (Arthropoden), also zu den **wirbellosen** Tieren, deren Beine durch Gelenke gegliedert und beweglich sind. In diese Kategorie fällt so ziemlich alles, was krabbelt, und vieles von dem, was bei Menschen äusserst unbeliebt ist: Skorpione und Spinnen, Fliegen und Zecken, aber auch Krabben, Käfer, Krebse, Hummer.

Trilobiten waren hoch entwickelt: Sie besassen ein voll ausgebildetes Nervensystem, so etwas wie ein Gehirn, Kiemen, Antennen, Füsse zum Krabbeln – und vor allem Augen, einzigartige Augen, sichelförmig, manchmal aus 15‘000 einzelnen Kalzitlinsen bestehend.

Allein die Existenz von Augen beweist, wie sehr die Welt sich seit der Ediacara-Wesen verändert hat. Ohne effiziente **Sinnesorgane** ging es nicht mehr.

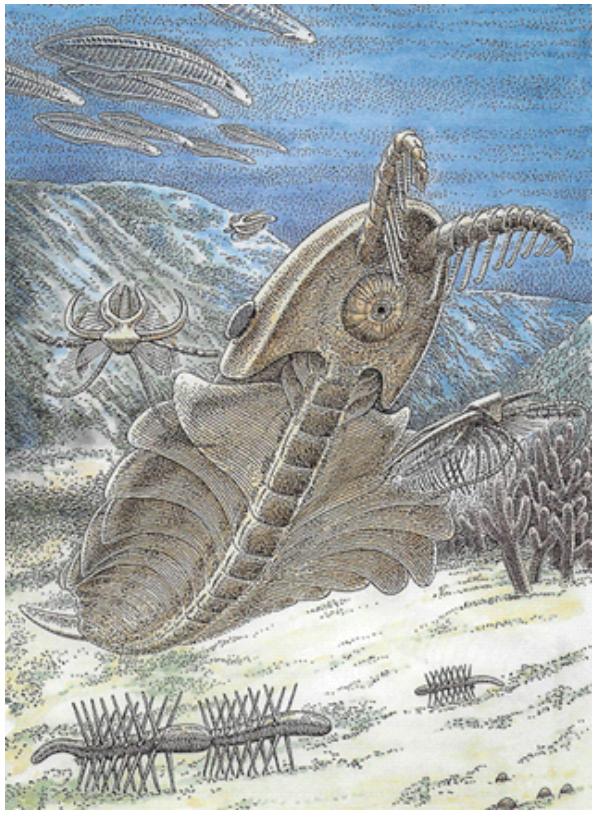
Im Lauf von Jahrmillionen hatten sich die Trilobiten alle möglichen Lebensräume erobert. Sie waren im Erdaltertum ungeheuer vielfältig und zahlreich.

Die meisten Tiere der kambrischen Lebenswelt lebten sesshaft oder krochen über den Boden, so wir die Trilobiten oder die fünfäugige Opabinia.

Will sich ein Vielzeller bewegen, braucht er ein **Gehirn** – oder zumindest Nervenzellen, die mit elektrischen und chemischen Signalen miteinander kommunizieren. Ohne eine Struktur, die die **Informationen** aus den Körperregionen zusammenführt, ein Ergebnis ableitet und die Reaktion steuert, gäbe es nur Chaos. Also entwickelte die Evolution auf dem Weg vom Schwamm zur **Qualle** Nervenzellen (Neuronen): Zur Informationsverarbeitung baute sie bei den Quallen Zellen der äusseren Hautschicht um, die mit ihrer Umgebung im Kontakt stehen. Jede Qualle durchzieht ein einfaches Nervensystem aus einem Netz verknüpfter **Neuronen**.

Mehr brauchen radialsymmetrische Tiere nicht. Aber das ist kein Gehirn. Das wird erst wichtig bei **spiegelsymmetrischen** Lebewesen, die vorne ein Maul besitzen und hinten ein Anus, denn dann gibt es automatisch eine bevorzugte Bewegungsrichtung: immer mit dem Maul dem Fressen nach. Vorne ballt sich der Grossteil der Nerven- und Sinneszellen zusammen, schliesslich wartet dort am ehesten die nächste Mahlzeit oder der böse Feind. Damit sitzt vorn ein **Kopf** samt Gehirn. Weil auch das Hinterteil ein paar Nervenzellen braucht, durchzieht ein Strang den Körper der Länge nach und leitet alle Signale aus der Umwelt an das Gehirn weiter.

Im Laufe der Evolution prägte sich der Kopf stärker aus, das **Gehirn** legte an Volumen zu, wurde leistungsfähiger und komplexer, und zwar, weil durch Mutationen (Veränderungen im Erbgut) die Zahl der Neuronen und ihre Verknüpfungen untereinander zunahm.



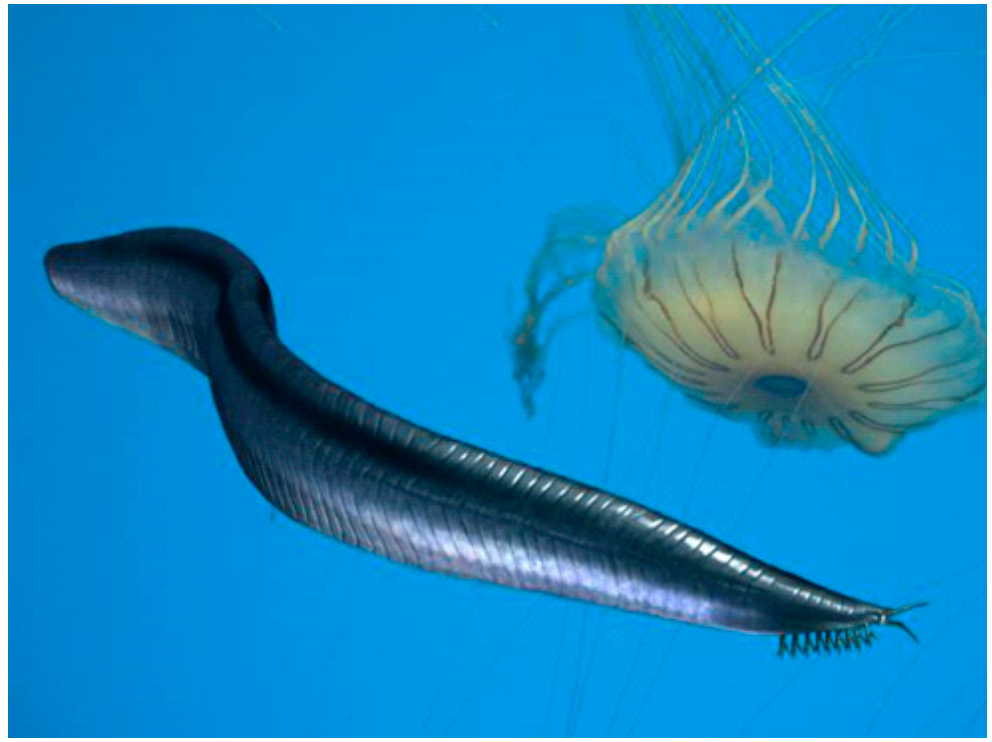
Anomalcaris zählt zu den Top-Räubern der Kambriums. Wo er auftauchte, mussten sich die anderen in Acht nehmen. Mit Längen zwischen einem halben und bis zu zwei Metern war er auch das grösste Tier seiner Zeit. Sowohl die Trilobiten als auch die Hallucigenia (auf dem Bild unten) nahmen sich vor ihm in Acht.

Der **Anomalcaris** («von der Norm abweichende Garnele») ist der «Hai» es Kambriums. Er erinnert an einen Hundertfüsser, aber mit breiten beweglichen Flanken, die ihn wie ein Rochen mit sanftem Flügelschlag vorwärts schweben liessen.

Was für ein Unterschied zu der Welt der Ediacara-Fauna! Aus dem «ruhig vor sich Hinleben», waren Nahrungsnetze geworden, in denen die **Jagd** im Mittelpunkt stand: Fressen und gefressen werden wurde zum Grundprinzip. Nun gab es überall Dramen.

Es sind nicht nur die fossilen Überreste der frühen Panzerträger erhalten. Vor allem sind die weichhäutigen Organismen überliefert worden. Sie machen mit weit mehr als 80 Prozent das Gros der Fossilien dort aus. Verwunderlich ist das nicht, schliesslich haben sie auch heute in den maritimen Ökosystemen die Mehrheit. Auf jeden Fall war die Erfindung des **Skeletts** ein sehr bedeutsamer Schritt,

wenn auch für die gesamte weitere Geschichte nicht so bedeutend wie der Übergang in die räuberische Welt, in der das **Recht des Stärkeren**, Schnelleren, Geschickteren oder auch besser Getarnten zählt. Aus menschlicher Sicht verlief das Leben auf der Erde über Jahrmilliarden hinweg ziemlich ereignislos. Das Leben wurde erst mit dem Wettbewerb spannend. Dieser Punkt in der Evolution war fast ebenso bedeutsam wie die Entwicklung der Fotosynthese, die alles in Gang setzte.



Pikaia Rekonstruktion

Pikaia war ein lanzettförmiges Tier, das in Schwärmen dicht über den Meeresboden schwamm. Es gehört wahrscheinlich zu den **Ahnen aller Wirbeltiere**. Die Segmente, in die die Skelettmuskulatur unterteilt war, verrät ihre Verwandtschaft mit uns: Während die Muskulatur der Würmer schlicht aus ringförmigen Abschnitten besteht, ist diese hier beidseitig v-förmig. Das ist das erste verräterische Merkmal. Das andere ist der feste, aber elastische «Achsenstab», Notochord genannt, der mit einer geleeartigen Substanz befüllte Vorläufer der **Wirbelsäule**.

Sucht man die nächsten lebenden Verwandten von Pikaia, wird man am ehesten bei den **Lanzettfischen** fündig, den einzigen heute noch lebenden Vertretern der Schädellosen. Dass aus diesem schädellosen Wesen einmal unsere eigene, vielfältige Gruppe entstehen sollte, war vor 505 Millionen Jahren aber noch lange nicht abzusehen.

Lanzettfischchen

Flora: Im Gegensatz zu früheren Annahmen wird inzwischen davon ausgegangen, dass die Besiedelung des Festlands durch moosartige **Pflanzen** und frühe Pilzformen wahrscheinlich bereits im mittleren Kambrium begann.

Ära	System	Epoche	Alter (Mio. Jahre)	Wichtige Ereignisse
Erdneuzeit (Känäozoikum)	Quartär	Holozän	0,01	▲Landwirtschaft, Sesshaftigkeit
		Pleistozän	2,6	▲ erste Menschen
	Neogen	Pliozän	5,3	▲ Jurafaltung
		Miozän	23	
	Paläogen	Oligozän	34	○ 33 bis heute Känozoische Eiszeit
		Eozän	56	▲Alpenbildung
		Paläozän	66	✸ Kreide-Paläogen Massensterben
Erdmittelalter (Mesozoikum)	Kreide	obere	100	
		untere	145	
	Jura	oberes	161	
		mittleres	176	
		unteres	200	✸ Trias-Jura-Massensterben
	Trias	obere	228	▲erste Säugetiere
		mittlere	245	
		untere	251	✸ Perm-Trias Massensterben
Erdaltertum (Paläozoikum)	Perm		300	▲erste Reptilien
	Karbon		360	✸ Devon-Massensterben ○ 360-260 Karoo Eiszeit
	Devon		416	▲erste Amphibien
	Silur		444	✸ Silur-Massensterben
	Ordovizium		488	○ 460-420 Anden-Sahara Eiszeit
	Kambrium		542	▲erste Fische
Neues Proterozoikum	Ediacarium		635	○ 650-580 Marinoische/Gaskiers Eiszeiten
	Cryogenium		850	○ 750-700 Sturtische Eiszeit
	Tonium		1’000	
Mittleres Proterozoikum			1’600	▲ab 1'500 Eukaryoten
Frühes Proterozoikum			2’500	○ 2'400-2'100 Huronische Eiszeit
Archaikum			4’000	▲ab 2'700 Photosynthese, Cyanobakterien ▲ab 3'800 erste Einzeller
Hadaikum			4’600	
Urknall			13’700	

Ordovizium

Zeitraum:

488 bis 444 Millionen Jahre vor heute

Plattentektonik:

Im Ordovizium liess die Plattentektonik den Iapetus-Ozean schrumpfen. Während das Ozeanbecken immer schmaler wurde, tauchte vor der Küste des Kontinents Laurentia eine Inselkette aus äusserst aktiven **Vulkanen** auf, so wie heute Japan vor Eurasien. Die Eruptionen sollen zu den heftigsten der Erdgeschichte gehört haben.

Dank der Plattentektonik ist die irdische Geografie höchst wandelbar. Vor einer Milliarde Jahren beispielsweise waren alle damals existierenden Landmassen zu dem Superkontinent **Rodinia** vereint. Rund um Rodinia brandete ein einziges Meer: Panthalassa, der Panthalassische Ozean. Vor 800 Millionen Jahren begann Rodinia zu zerfallen. So wie heute unter Ostafrika öffnete die Plattentektonik auch damals Riffsysteme, durch die ein Stück Kontinent nach dem anderen abbrach.

Neue Meere entstanden: Zwischen Gondwana, das als ein grosser Südkontinent von Rodinia übrigblieb, und den kleinen Kontinenten Baltica und Laurentia spannte sich der Iapetus auf. Der ist so etwas wie der Vorläufer des Atlantiks, schliesslich lag er zwischen Landmassen, die sich heute mehr oder weniger gegenüberliegen.

Der Iapetus wuchs bis vor etwa 500 Millionen Jahren: Im Unteren Ordovizium bildete sich vor der Westküste Laurentias eine Subduktionszone (Gebiet, in dem die ozeanischen Erdkruste unter die des Kontinents abtaucht). In der Zwischenzeit hatte sich von Gondwana auch der kleinere Kontinent Avalonia abgespalten, der nun schnell in Richtung Laurentia und Gondwana driftete. Dafür hatte sich zwischen Baltica und Avalonia das Tornquist-Meer und zwischen Avalonia und Gondwana der Rheische Ozean geöffnet.

Die beiden Kontinente drifteten gemeinsam gegen Laurentia und liessen später Iapetus verschwinden. Dafür schweisste das bei der Kollision entstandene Kaledonische Gebirge den neuen Grosskontinent **Laurussia** zusammen, was die Appalachen, Schottland und Skandinavien sowie Ostgrönland bezeugen. So wie heute mit jedem abgeholzten Urwald oder jeder bebauten Feuchtwiese verschwanden auch damals mit jedem verschwundenen Meer maritime Lebensräume – sowohl in der Tiefsee als auch in den lichten Küstenstreifen, die zu Teilen neuer Gebirge geworden waren.

Umwelt:

Atmosphärischer Sauerstoffanteil	Über das ganze Ordovizium durchschnitllich etwa 13,5 Volumenprozent. Das entspricht etwa 68% des heutigen Niveaus
Atmosphärischer Kohlendioxidanteil	Durchschnittlich etwa 4200 ppm. Das ist das 15-fache des vorindustriellen Gehalts
Durchschnittliche Oberflächentemperatur	Etwa 16°C und damit 2°C über dem derzeitigen Wert
Meeresniveau	180 bis 200 Meter über dm heutigen Niveau. Während der Eiszeiten am Ende des Ordovizius fiel der Meeresspiegel abrupt um 140 Meter

Zu Beginn des Ordoviziums lag der atmosphärische CO2-Gehalt zwischen 4‘000 und 5‘000 ppm (=parts per million). Das daraus resultierende Treibhausklima war unverändert warm und bis in polnahe Regionen ausgesprochen mild. Die Durchschnittstemperatur auf dem Festland lag bei 16°C, nur circa 2 Grad über dem heutigen Niveau, wobei man bedenken muss, dass Gondwana einen Grossteil der Landfläche ausmachte und im Ordovizium über dem Südpol lag. Der Sauerstoffgehalt der Atmosphäre lag zwischen 13 und 13,5%, ein kontinuierlich ansteigender Trend ist jedoch zu beobachten.

Bis ins Oberordovizium hinein geht man davon aus, dass es auf keinem der Kontinente langlebige Gletschereismassen gab. Dies änderte sich vor ca. 460 Millionen Jahren, mit einer langen Vereisungsperiode, die als Anden-Sahara-Eiszeit bekannt ist. Diese Entwicklung hängt ursächlich mit der **Vegetationsausbreitung** auf dem Festland zusammen. Wahrscheinlich erfolgte die Besiedelung der Kontinente durch moosartige Pflanzen und frühe Pilzformen bereits ab dem Mittleren Kambrium und setzte sich im Ordovizium verstärkt fort. Die dichter und umfangreicher werdende Pflanzendecke entwickelte

sich dabei zu einem elementaren Klimafaktor, da sie erheblich zur beschleunigten chemischen Verwitterung der Erdoberfläche beitrug. Daraus resultierten eine Reduzierung des atmosphärischen Kohlenstoffdioxids und im Zusammenwirken mit anderen Faktoren eine weltweite **Abkühlung**.

Geologie:

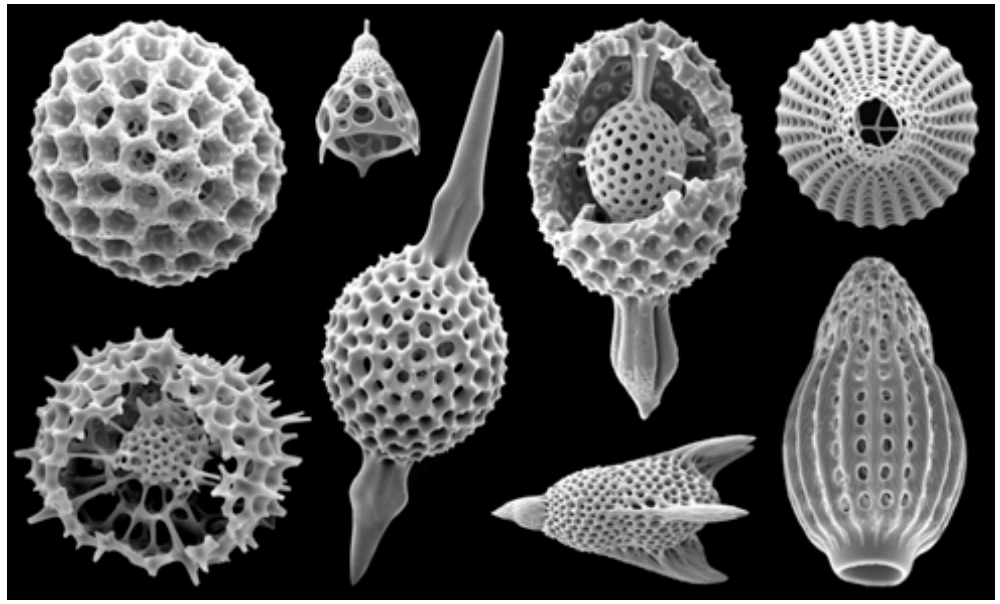
Durch zeitweilige Meeresspiegelhöchststände waren weite Teile der Landmassen überflutet und es kam zur Ablagerung von flachmarinen **Sedimenten**. Charakteristisch für das Ordovizium sind **Kalkablagerungen**, unter anderem in weiten Teilen des heutigen Skandinaviens und des Baltikums.

Ordovizische Sedimente sind meist durch einen hohen Anteil an Kalziumkarbonat geprägt: Der Meeresspiegelhochstand sorgte auf den überfluteten Kontinentalschelfen der Tropen für die Entstehung grosser Riffe, die als Kalkstein in die Sedimentfolge eingingen.

Fauna und Flora:

Seitdem das Prinzip „Fressen und Gefressenwerden“ erfunden wurde, hatten sich die Meeresbewohner jede nur mögliche Art sich zu ernähren erschlossen: Allerdings sollte sich der Nutzungsgrad verschieben und die Akteure wechselten. Vor allem in den Hauptrollen: Die Gliederfüsser gaben den Starruhm an die **Kopffüsser** ab und die mussten ihn später den **Fischen** überlassen. Mit den sich wandelnden Ökosystemen schritt die Evolution voran.

Seit es Tiere gibt, bildet das **Plankton** den Anfang der Nahrungskette. Dazu gehören Algen, Foraminiferen (Einzeller mit vielkammrigen Gehäusen), Pfeilwürmer und die Eier und Larven der Meeresbewohner. Auch die **Strahlentierchen** sind seit Ewigkeiten Teil des Planktons. Diese grazilen Winzlinge bauen sich ihr Skelett aus Opal. Seit dem Kambrium strecken sie ihre Scheinfüsschen durch die Löcher ihrer Hülle, um andere Planktonorganismen zu erbeuten. Diese Lebensweise ist so erfolgreich, dass sie sie ohne grosse Veränderungen über Hunderte Millionen Jahre beibehalten haben.



Strahlentierchen (Radiolarien)

Zunächst schien es immer nur bergauf zu gehen. Bei der Kambrischen Explosion waren alle Stämme bis auf einen (der Moostierchen) entstanden. Die Meere füllten sich mit mehr oder weniger bizarren Bewohnern. Dann allerdings, gegen Ende des Kambriums, gab es **Komplikationen**. Etliche der Organismen verschwanden bei kurzen, scharfen Einschnitten, die anscheinend nur Tausende von Jahren dauerten. Es war ein ständiges **Auf und Ab**: Sobald sich die Verhältnisse besserten, erholten sich die Ökosysteme wieder – bis zum nächsten Crash. Irgendetwas warf also immer wieder die maritimen Ökosysteme durcheinander. Was dieses «Etwas» angeht, haben die Paläontologen einen Verdacht: Der Übergang von den sauerstofflosen bis -armen Ozeanen der ersten vier Milliarden Jahre hin zu den **sauerstoffreichen** späteren Zeiten kann nicht reibungslos und stetig abgelaufen sein, sondern es ging eher drei Schritte vor und zwei zurück. Die Verhältnisse müssen extrem wechselhaft gewesen sein: Es gab gute Zeiten und solche, in denen am Meeresboden anscheinend eine erstickende Brühe schwappte.

Der stete Wachstumstrend war gebrochen: So stagnierte im weiteren Verlauf des Kambriums die Vielfalt – für Jahrmillionen. Erst im Ordovizium (488 bis 444 Millionen Jahre vor heute) beruhigten sich die

Verhältnisse. Zu Beginn wirkte noch der starke Treibhauseffekt nach, dann wurde es allmählich kühler.

Damals stieg auch der **Meeresspiegel** an. Die Ursache soll bei der Plattentektonik zu suchen sein: Die produzierte zunächst an den **Mittelozeanischen Rücken** ungewöhnlich viel **Lava**, die submarinen Gebirge sollen dadurch angeschwollen sein und grosse Wasservolumen aus der Tiefsee auf die Kontinente gedrängt haben. Weil weite Teile des Festlands eher flach waren, überflutete das Meer riesige Bereiche des Kontinentalsockels. Weite, lichte Lebensräume entstanden – und die sind bei vielen Ozeanbewohnern äusserst beliebt.

Mitten im Ordovizium also legte die Evolution mit einem wahren Feuerwerk los: Über 25 Millionen Jahre hinweg wuchs die Zahl der maritimen Arten exponentiell an. Die Gruppen, die durch die Ozeane wuselten, sollten sie 200 Millionen Jahre lang beherrschen. Dabei wurden die Ökosysteme immer **komplexer** und begannen sich regional deutlich zu unterscheiden. Einer der Faktoren dabei war vielleicht die ganz allmähliche Abkühlung: Obwohl das Klima auf der Erde - noch – überall warm war, prägten sich langsam Temperaturunterschiede zwischen Äquator und den Polen heraus.

Im Ordovizium ist die Liste der Entwicklungen und Verbesserungen lang. So war der Druck der **Räuber** so gross, dass potenzielle Beutetiere immer mehr Wert auf ihre **Verteidigung** legten und beispielsweise ihre Schalen massiver, eine Öffnung unzugänglicher oder ein Schloss widerstandsfähiger machten. Trotzdem zeigten viele Fossilien die Spuren von Angreifern. So gibt es zahllose Brachiopoden, die von Seesternen, Kopffüssern, Seeskorpionen oder Schnecken attackiert worden sind.

Die Stellung der Sardinen von heute nahmen in den ordovizischen Ozeanen die **Conodonten** ein: Sie waren Schwarmtiere. Seitdem sie im Kambrium entstanden waren, hatten sie 342 Millionen Jahre lang die Hauptrolle als Futter für viele in der Nahrungskette inne.

Conodont Rekonstruktion

In 340 Millionen Jahre alten schottischen Gesteinen aus der Zeit des Devons und in 435 Millionen Jahre alten ordovizischen Soom-Schiefern in Südafrika fand man die ersten Abdrücke von Conodontentieren. Es waren weiche, knochenlose, wurmähnliche Wesen, die etwa so lang waren wie ein kleiner Finger. Die Conodontenapparate (Zähnchen) sassen paarweise in der Nähe des Kopfes. Untersuchungen zeigten, dass ihre grossäugigen Träger wahrscheinlich zu den Chordatieren gehörten – und damit zu den **Ahnen der Wirbeltiere**. Sie sind also Teil unserer Sippschaft, waren urzeitliche **kieferlose** Fische, die noch keine Knochen entwickelt hatten und deren einzige Hartteile, die **Zähne** waren.

Die Conodontenzähnchen enthielten Hydroxyl-Apatit, das Mineral, das den Zahnschmelz und auch die Knochen hart macht, weil es die Molekül- und Zellstruktur verstärkt.

Damit waren diese Tiere, die ersten uns bekannten Lebewesen, die diesen besonderen Stoff einsetzten, die das Geheimnis unseres **Skeletts** ausmachen sollte. Und die ersten harten, hydroxylapatithaltigen Strukturen im Körper waren so etwas wie Zähne.

Der älteste «echte» **Knochen**, der als Teil eines fossilen Wirbeltierskeletts zu erkennen ist, bringt es auf 490 Millionen Jahre. Er stammt aus dem frühen Ordovizium und wurde in Zentralaustralien entdeckt. Zu Lebzeiten gehörte er einer büroklammergrossen *Haikouichthys*, die in einem flachen Meer schwamm, das sich damals über Südchina erstreckte. Und Südchina lag in der Nähe von Gondwana. Also vermutet man, dass die Wiege von Haikouichthys – und damit die der «richtigen» **Wirbeltiere** und die der Fische – in Gondwana lag, oder besser vor seiner Küste. Die Linie, die mit *Pikaia* und ihre Zeitgenossen begann, hatte sich erfolgreich weiterentwickelt.

Haikouichthys Rekonstruktion

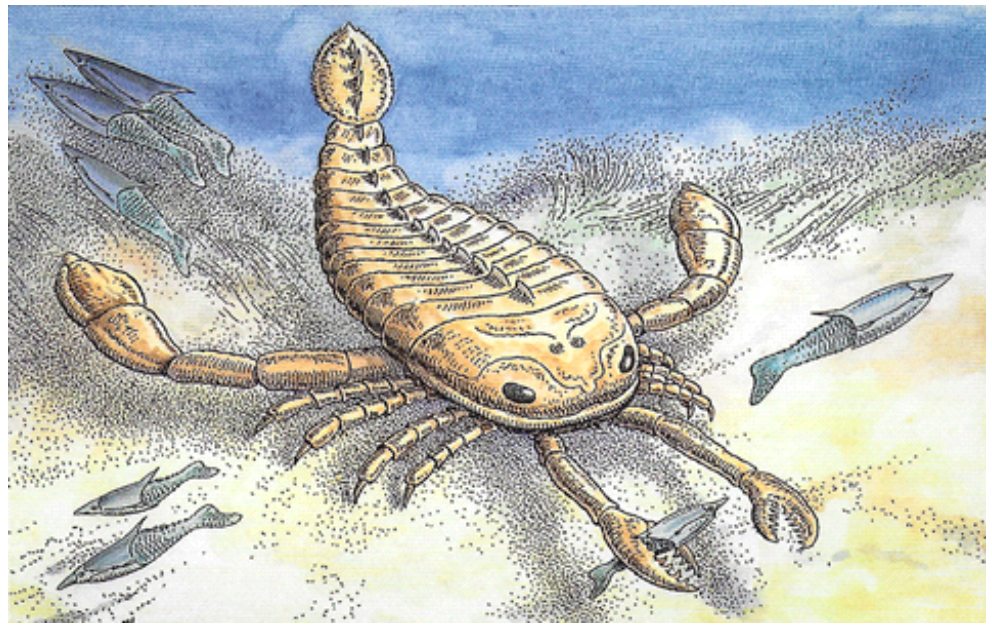
Bevor gegen Ende des Ordovizium ein Massensterben kurzfristig die Vielfalt des Lebens zurückdrängte, hat es erstmals eine bis dahin ungekannte Fülle erreicht. Damals begann der Aufstieg der **Kopffüsser**, von denen sich gerade einer über einen Trilobiten hermacht. Sie konnten bis neun Meter lang werden und sie hatten sich seit dem Kambrium aus einfachen Anfängen heraus zu Topräubern entwickelt. Auch die Seelilien entwickelten sich während des Ordoviziums schnell.

Schwärme von solchen geradschaligen Kopffüssern frassen, was sie überwältigen konnten. Im Ordovizium erschienen auch die Ahnen des *Nautilus'*, dem heute noch lebenden **Perlboot**, in der Tiefsee. Zunächst waren deren Schalen nur leicht gekrümmt, rollten sich aber zunehmend schneckenähnlich auf. Sie waren erfolgreich und breiteten sich neben den geradschaligen Kopffüsser aus: Kopffüsser beherrschten die Meere.

Nautilus (Perlboot)

Zwar schwebt Nautilus mühelos im Wasser, aber sein Gehäuse macht ihn langsam. Sie sind auch zu langsam, um selbst als schnelle Jäger Beute zu machen. Also mussten die Kopffüsser im Laufe der Evolution ihre Schale loswerden. Um im Konkurrenzkampf gewappnet zu sein, verzichtete ein Teil der Ahnen der Tintenfische, Oktopoden und Kalmare auf ihre schützende Hülle.
Im Ordovizium tauchten auch die **Seeskorpione** auf. Sie sind mit den Pfeilschwanzkrebsen, Skorpionen, Spinnen oder Zecken verwandt und auch sie waren beeindruckende Jäger, obwohl es die grössten Exemplare damals nur auf einen Meter brachten – plus die beiden mit Zangen und Zähnen bestückten Kieferklauen.

Die Seeskorpione übten ein ganz ausserordentliche Einfluss auf ihre Mitlebewesen aus: Als sie auftauchten, legten sich andere Tiere grössere und dickere Schalen zu.



Seeskorpion

Im Grunde hat das Ordovizium Pech, im Schatten des Kambriums zu stehen oder besser in dem der Kambrischen Explosion. Die war ein so überragendes Ereignis, das dieses zweite evolutionäre Feuerwerk nicht so recht zur Geltung kommt. Die Vielfalt wuchs und wuchs, vor allem ab dem Mittleren Ordovizium, als die ersten **Pflanzen** den Sprung ans **Land** schafften.

Was war die Triebfeder hinter der Ordovizischen Explosion? War sie eine schlichte Fortsetzung des Geschehens im Kambrium unter den ruhigeren Bedingungen, wie sie herrschten?

Oder hängt alles mit der Tektonik zusammen? Während des Ordoviziums und vor allem während des folgenden Silurs kollidierten Kontinente miteinander, die so schöne Namen Avalonia, Baltica oder Laurentia trugen, und brachten den Iapetus-Ozean zum Verschwinden. Die **Gebirge**, die sich auftürmten, bilden heute Teile von Schottland, Wales, Irland, der Bretagne, Ostgrönlands, Norwegens, Spitzbergens oder Neufundlands und der Appalachen. Wachsende Gebirge greifen tief in das System Erde ein. Der Vulkanismus, der die Plattenkollision begleitet, pumpt Klimagase wie Kohlendioxid in die Luft. Das kurbelt den Treibhauseffekt an.

Ausserdem entstanden durch die geografischen Veränderungen neue ökologische Möglichkeiten, indem zum Beispiel einst verbundene Meeresbecken voneinander getrennt wurden. **Isolierung** fördert die Entstehung neuer Arten.

Welche Idee auch immer die richtige sein mag: Die ordovizische Blüte der Evolution kam ohnehin zu einem Ende und schlug in ein Massenaussterben um – das erste grosse, das wir kennen.

Ära	System	Epoche	Alter (Mio. Jahre)	Wichtige Ereignisse
Erdneuzeit (Kanäozoikum)	Quartär	Holozän	0,01	▲Landwirtschaft, Sesshaftigkeit
		Pleistozän	2,6	▲ erste Menschen
	Neogen	Pliozän	5,3	▲ Jurafaltung
		Miozän	23	
	Paläogen	Oligozän	34	◯33 bis heute Känozoische Eiszeit
		Eozän	56	▲Alpenbildung
		Paläozän	66	✸Kreide-Paläogen Massensterben
Erdmittelalter (Mesozoikum)	Kreide	obere	100	
		untere	145	
	Jura	oberes	161	
		mittleres	176	
		unteres	200	✸Trias-Jura-Massensterben
	Trias	obere	228	▲erste Säugetiere
		mittlere	245	
		untere	251	✸Perm-Trias Massensterben
Erdaltertum (Paläozoikum)	Perm		300	▲erste Reptilien
	Karbon		360	✸Devon-Massensterben ◯360-260 Karoo Eiszeit
	Devon		416	▲erste Amphibien
	Silur		444	✸Silur-Massensterben
	Ordovizium		488	◯460-420 Anden-Sahara Eiszeit
	Kambrium		542	▲erste Fische
Neues Proterozoikum	Ediacarium		635	◯650-580 Marinoische/Gaskiers Eiszeiten
	Cryogenium		850	◯750-700 Sturtische Eiszeit
	Tonium		1'000	
Mittleres Proterozoikum			1'600	▲ab 1'500 Eukaryoten
Frühes Proterozoikum			2'500	◯2'400-2'100 Huronische Eiszeit
Archaikum			4'000	▲ab 2'700 Photosynthese, Cyanobakterien ▲ab 3'800 erste Einzeller
Hadaikum			4'600	
Urknall			13'700	

Silur

Zeitraum:

444 bis 416 Millionen Jahre vor heute

Plattentektonik:

Während des Silurs war der Nordpol meerbedeckt; über dem Südpol lag Gondwana. Aufgrund der Plattentektonik veränderte sich die Anordnung der Kontinente grundlegend: So verschwand unter anderen der Iapetus-Ozean, und Laurentia und Baltica kollidierten und verschmolzen.

Umwelt:

Atmosphärischer Sauerstoffanteil	Über das ganze Silur durchschnitllich etwa 14 Volumenprozent. Das entspricht etwa 70% des heutigen Niveaus
Atmosphärischer Kohlendioxidanteil	Durchschnittlich etwa 4500 ppm. Das ist das 16-fache des vorindustriellen Gehalts
Durchschnittliche Oberflächentemperatur	Etwa 17°C und damit 3°C über dem derzeitigen Wert
Meeresniveau	180 Meter über dem heutigen Niveau mit kurzfristigem Rückzug des Meeres

Mit einer Bodentemperatur von durchschnittlich 17°C war das Silur ca. 3°C wärmer als unser gegenwärtiges Klima. Der CO2-Gehalt der Atmosphäre lag mit ca. 4500 ppm auf dem rund 12-fachen des heutigen Niveaus, jedoch mit einer klar abnehmenden Tendenz gegen Ende des Silurs. Diese Abnahme des atmosphärischen CO2-Gehalts könnte sich womöglich durch die Evolution der **Landpflanzen** und die dadurch gestiegene Photosyntheserate erklären lassen. Der atmosphärische Sauerstoffgehalt stieg dementsprechend erstmals über 14%, was etwa 7/10 des heutigen Volumenanteils entspricht.

Die Pole, von denen der Südliche auf Gondwana, sprich auf dem Festland lag, blieben vermutlich ganzjährig eisfrei, wenn man von regelmässigen Kalt- und Warmzeitperioden und den damit verbundenen lokalen Vergletscherungen absieht. Der Meeresspiegel lag entsprechend hoch und überflutete den Kontinentalschelf, sank aber ab Mitte des Silurs wieder.

Geologie:

Silurische Sedimente zeichnen sich am Anfang des Zeitalters durch einen charakteristisch hohen Anteil an **Schiefer** aus. Später dominiert meist der **Kalkstein**, der hier von den Riffbildnern hinterlassen wurde. In den meisten Fundstellen macht Kalkstein schliesslich die gesamten oder besonders grossen Teile am Ende des Silurs aus.

Fauna und Flora:

Normalerweise kommen Erde und Leben wunderbar miteinander aus. Hin und wieder jedoch steht plötzlich alles auf Messers Schneide: Dann verschwinden mehr als die Hälfte aller bekannten Arten, die Ökosysteme lösen sich auf, die Welt steckt in einer tiefen **Krise** – in einem **Massenaussterben**. Seit mit der Kambrischen Explosion die Tiere unübersehbar auf der Bühne erschienen, hat es fünf dieser besonders tiefen Einschnitte gegeben. Allerdings sieht es gerade danach aus, als ob der Mensch selbst die sechste auslöst.

Massensterben ist nicht gleich Massenaussterben. Wie sehr sie sich auf die Zukunft auswirken, ist unterschiedlich. Bislang waren zwei der Grossen Fünf von ihren Folgen her so gravierend, dass sie tatsächlich die Weichen der Evolution neu stellten: das Massenaussterben vor rund 250 Millionen, das das Paläozoikum beendete und die Therapsiden (säugetierähnliche Reptilien) vom Thron stiess, zu dem auch die Vorfahren der Säugetiere gehörten; und vor 65 Millionen Jahren, das das Mesozoikum abschloss und das Zeitalter der Säugetiere einläutete.

Aber auch die **Grossen Fünf** (oder Sechs) stehen nicht für alle Krisenzeiten des Lebens. Es gab sehr viel mehr, allerdings waren diese Ereignisse nicht so gravierend wie die Massenaussterben. Sprich: Es verschwanden weniger als die Hälfte aller bekannten Arten. Ein Beispiel dafür ist die Aussterbewelle während der jüngsten Kaltzeit (vor 115‘000 bis vor 11‘700 Jahren). Sie traf vor allem die Grosstierfauna, wie Mammuts, die alle Kontinente bevölkerte. In Afrika konnten sich Grosssäuger halten, auch in Asien schafften es ein paar. Ansonsten verschwanden alle Arten mit mehr als einer Tonne Gewicht und 80 Prozent aller Arten mit 100 bis 1‘000 Kilogramm: meist zugleich

mit klimatischen Veränderungen und dem Vordringen des **modernen Menschen**. Wen nun die Schuld am Verschwinden grosser Tiere trifft, darüber rätseln die Wissenschaftler. Wahrscheinlich trugen beide Faktoren dazu bei.

Das Massenaussterben am Ende des **Ordoviziums** war nicht nur das erste, sondern auch das zweitgrösste, das sich in der Zeitspanne zwischen der Kambrischen Explosion und heute ereignet hat (das grösste war das Perm-Trias-Massenaussterben). Es fiel zeitlich mit einer riesigen **Eiszeit** zusammen: Die Welt war im Lauf von Jahrmillionen immer kühler geworden und schliesslich bildete sich Eis an den Polen: Wie heute (noch) trieb Packeis auf dem Meer und über dem Südpol wuchsen die Gletscher.

Anscheinend kühlt die Erde alle paar Hundert Millionen Jahre ab und dann gibt es Gletscher, Eis und Schnee. Dabei spielen mehrere Faktoren eine Rolle. Ein zentraler Punkt ist die **Plattentektonik**. Wenn der Mensch nicht gerade nachhilft, hängt der Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre von der Aktivität der **Vulkane** ab. So war während der Kreidezeit die vulkanische Aktivität höher als heute und das Klima wohl deshalb wärmer.

Ausserdem schiebt die Plattentektonik die Kontinente über die Erde und greift so in das System der **Meeresströmungen** ein und damit auch in das Zusammenspiel zwischen Atmosphäre und Meer. Durch die Hochgebirge, die sie wachsen lässt, treibt sie die **Verwitterung** an, was wiederum das Klimagas Kohlendioxid verbraucht. Wenn die Eisfläche wächst, setzen Rückkoppelungsmechanismen ein: Je grösser sie sind, desto «weisser» wird die Erde und desto mehr Wärme reflektiert sie in den Weltraum.

Eiszeiten sind keine «monolithischen» Blöcke, sondern ein stetes Auf und Ab. Kältere und wärmere Perioden wechseln einander ab. Klettern die Temperaturen, schmilzt ein Teil der Gletscher, und der Meeresspiegel steigt. Dann breiten sich die Flachwasserorganismen aus, erobern das «Neuland» - aber nur, um in der nächsten Kaltphase, wenn auf den Kontinenten wieder die Eispanzer wachsen, erneut ihren Lebensraum zu verlieren. Unter diesem **Hin und Her** litten die sonst so beliebten Ökosysteme in den lichtdurchfluteten Zonen um die Kontinente und Inseln. Selbst die Bewohner, die es in die

Rückzuggebiete schafften, überstanden diese Tortur auf die Dauer nicht: Irgendwann waren sie verschwunden.

Einer Studie zufolge lösten die ersten **Landpflanzen** die ordovizische Eiszeit aus: Um an Nährstoffe zu gelangen, trieben sie die chemische Verwitterung der Böden an. Die entzog der Atmosphäre Kohlendioxid. Das Klima kühlte global um fünf Grad ab, wodurch die Gletscher wuchsen, und das Massenaussterben einsetzte.

Zu Beginn des **Silurs** gab es nur noch ein zwei Arten. Die reichen Korallenriffe waren verschwunden, etliche Arten von Moostierchen, **Korallen** und Armfüsser ausgestorben. Die Kopffüsser und die Nautilusse, sie waren fast alle zugrunde gegangen.

Die Ozeane hatten sich geleert: Rund 75 bis 80 Prozent aller bekannten Arten hatten aufgehört zu existieren.

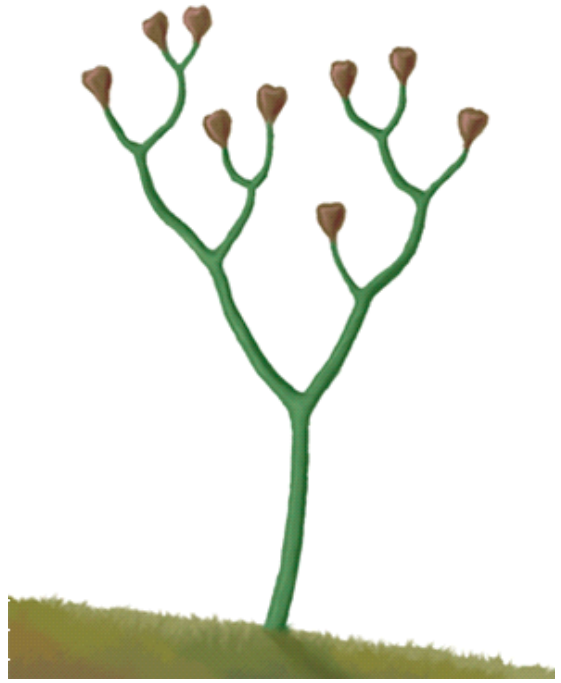
Sind bei dem Massenaussterben die dominierenden Gruppen verschwunden, können nur Aussenseiter von einst ihre Chance erhalten und die Welt umkrempeln, so wie es vor 65 Millionen Jahren geschehen ist, als die Saurier abtraten.

Als die Gletscher verschwanden, kehrte im Silur (444 bis 416 Jahre vor heute) auf den Kontinenten die ausgedehnten **tropischen Binnenmeere** zurück. Riesige Riffkomplexe wuchsen üppiger als zuvor:

Wer überlebt hatte, nutzte seine Chance und brachte neue Arten hervor. 120 Millionen Jahre lang dominierten Korallen den Riffbau und bildeten etwas später, im Devon, gigantische Strukturen.

Nach dem Einbruch am Ende des Ordoviziums entfaltete sich während des Silurs das Leben zu neuer Blüte.

Nachdem im Ordovizium wohl genügend Sauerstoff für eine schützende Ozonschicht in der Atmosphäre war, konnten die **Pflanzen** an **Land** im Silur grösser werden. Gefässpflanzen eroberten sich den neuen Lebensraum. Zunächst überzogen winzige Gewächse die Sumpfgebiete: Urfarngewächse besassen weder Blätter noch echte Wurzeln, sondern nur zylindrische, sich verzweigende Stängel.



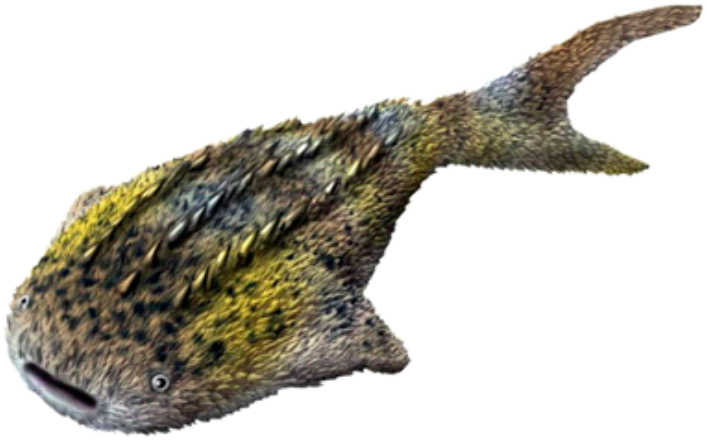
Cooksonia Rekonstruktion

Als Nächstes erschien vor 420 Millionen Jahren die nur wenige Zentimeter grosse *Cooksonia*, die vor allem auf der Nordhalbkugel wuchs, und die ebenso bescheidenen Vorläufer der Bärlappgewächse.

Zunächst waren diese Pflanzen noch klein und ihre Wurzeln, mit denen sie Nährstoffe aufnahmen, kurz. Im Grunde waren sie anfangs nicht mehr als eine grüne Oberfläche, die Fotosynthese betrieb. Mit der Zeit jedoch wurde die Pflanze besser und besser darin, die Herausforderungen ihres Lebensraums zu meistern. Schon bald, im Devon, sollten sie es endgültig geschafft haben.

Bis dahin, im Silur, blieben die höher wachsenden Pflanzen im Wassernähe. Aber schon das reichte, um den **Tieren** einen Anreiz zu bieten, es mit dem Leben a**n Land** zu versuchen. Die **Gliederfüsser** gehörten zur Vorhut. Die Gliederfüsser standen für kurze Zeit an der Spitze der Lebenspyramide. Im späten Silur scheint es erste Tausendfüsser und Spinnen gegeben zu haben. Es sieht also so aus, als ob sich in dieser neuen Welt sehr schnell Nahrungsnetze ausbildeten.

Die Tage der Kopf- und Gliederfüsser als Herrscher der Ozeane waren gezählt. Die künftigen Regenten machten sich bereit: Die Fische. Nach rund 100 Millionen Jahren einer bescheidenen Existenz brachten die **kieferlosen Fische** nun eine ganze Reihe von Formen hervor, von denen etliche gepanzerte Kopfschilde aus Hautknochenplatten trugen.



Theledonti, Rekonstruktion

Die Theledonti gehörten auch zu den Kieferlosen. Sie wirken vom Körperbau her moderner und vertrauter, unter anderem, weil ihre Schwanzflossen bereits gegabelt waren. Die Theledonti hatten einiges gemeinsam: Sie legten keinen Wert auf einen Panzer. Dafür bedeckten sie Körper, Kiemen und selbst das Innere ihres Maules mit sehr charakteristischen, schön geformten **Schuppen**, denen ihre «Verwandtschaft» mit den Zähnen noch deutlich anzusehen ist. Weil die Evolution sie schon weit gebracht hatte, zählen sie zu den möglichen Ahnen der Fische mit Kiefern.

Während des Silurs waren die Kieferlosen die dominierenden Fische. Die Fische mit Kiefer spielten noch keine grosse Rolle. Ihre Stunde schlug im Devon, dem «Zeitalter der Fische»: Sie sollten sich durchsetzen. Auch wenn die meisten Kieferlosen rätselhafterweise vor 355 Millionen Jahren ausstarben, so hatten sie sich doch 60 Millionen Jahre lang hervorragend behaupten können. Sie zählten damit zu den **erfolgreichsten Wirbeltiergruppen**, die jemals auf diesem Planeten gelebt haben. Der moderne Mensch mit seinen derzeit etwas mehr als 200‘000 Jahren Geschichte kann davon nur träumen…

Ära	System	Epoche	Alter (Mio. Jahre)	Wichtige Ereignisse
Erdneuzeit (Kanäozoikum)	Quartär	Holozän	0,01	▲Landwirtschaft, Sesshaftigkeit
		Pleistozän	2,6	▲ erste Menschen
	Neogen	Pliozän	5,3	▲ Jurafaltung
		Miozän	23	
	Paläogen	Oligozän	34	○ 33 bis heute Känozoische Eiszeit
		Eozän	56	▲Alpenbildung
		Paläozän	66	✸ Kreide-Paläogen Massensterben
Erdmittelalter (Mesozoikum)	Kreide	obere	100	
		untere	145	
	Jura	oberes	161	
		mittleres	176	
		unteres	200	✸ Trias-Jura-Massensterben
	Trias	obere	228	▲erste Säugetiere
		mittlere	245	
		untere	251	✸ Perm-Trias Massensterben
Erdaltertum (Paläozoikum)	Perm		300	▲erste Reptilien
	Karbon		360	✸ Devon-Massensterben ○ 360-260 Karoo Eiszeit
	Devon		416	▲erste Amphibien
	Silur		444	✸ Silur-Massensterben
	Ordovizium		488	○ 460-420 Anden-Sahara Eiszeit
	Kambrium		542	▲erste Fische
Neues Proterozoikum	Ediacarium		635	○ 650-580 Marinoische/Gaskiers Eiszeiten
	Cryogenium		850	○ 750-700 Sturtische Eiszeit
	Tonium		1'000	
Mittleres Proterozoikum			1'600	▲ab 1'500 Eukaryoten
Frühes Proterozoikum			2'500	○ 2'400-2'100 Huronische Eiszeit
Archaikum			4'000	▲ab 2'700 Photosynthese, Cyanobakterien ▲ab 3'800 erste Einzeller
Hadaikum			4'600	
Urknall			13'700	

Devon

Zeitraum:

Vor 416 Millionen bis 360 Millionen Jahren

Plattentektonik:

Im Verlauf des Silur stiessen die beiden Urkontinente Laurentia und Baltica endgültig zusammen, so dass der Kontinent Laurussia/Euramerika entstand.

Zwischen Laurussia und dem teilweise über dem Südpol gelegenen Superkontinent Gondwana lag der Rheische Ozean.

Umwelt:

Atmosphärischer Sauerstoffanteil	Über das ganze Devon durchschnitllich etwa 15 Volumenprozent. Das entspricht etwa 71% des heutigen Niveaus
Atmosphärischer Kohlendioxidanteil	Durchschnittlich etwa 2200 ppm. Das ist das 9-fache des vorindustriellen Gehalts
Durchschnittliche Oberflächentemperatur	Etwa 20°C und damit 6°C über dem derzeitigen Wert
Meeresniveau	180 Meter über dem heutigen Niveau, allmählich bis auf 120 Meter absinkend

Das Devon war eine sehr warme und trockene Periode, gleichzeitig lag der Meeresspiegel ab dem Mitteldevon sehr hoch und stieg über die gesamte Dauer des Devons hinweg kontinuierlich weiter an. Man geht davon aus, dass es kein oder nur sehr wenig kontinentales Inlandeis gab; obwohl das brasilianische Amazonasbecken damals als Teil Gondwanas über dem Südpol lag, bildeten sich dort wohl nur vereinzelte Gletscher und Eisflächen. Insgesamt war der Temperaturunterschied zwischen Äquator und Polarregionen geringer als heute.

Im Durchschnitt lag die Temperatur der Erdoberfläche bei 20°C, ca. 6 Grad über unserem heutigen Durchschnitt. Der Sauerstoff-Anteil in unserer Atmosphäre stieg auf durchschnittlich 15% an, war jedoch vermutlich am Ende des Devons schon nahe unserem heutigen Niveau. Gleichzeitig enthielt die Luft aber auch den knapp fünfeinhalbfachen Anteil an CO2, das als Treibhausgas zur Erwärmung beitrug.

Geologie:

Auf dem tiefen Schelf (Flachmeer) und im offenen Ozean wurden in Mitteleuropa die Gesteine sedimentiert (abgelagert). Es sind häufig dunkel gefärbte Tone oder Mergel, in denen Plankton aus dem Wasserkörper fossil erhalten sind. Der Meeresboden war meist sauerstoffarm, so dass nur bereichsweise Bodenorganismen als Fossilien überliefert sind.

Flora und Fauna:

Die **Kiefermäuler** sind sehr viel besser darin, andere zu packen und zu verspeisen, und auch viel besser darin, Feinde abzuwehren. Deshalb sind heute von den mindestens 51‘000 lebenden Wirbeltierarten 99,9 Prozent Kiefermäuler!

Die Frage ist, wem die Ehre gebührt, die Evolution einen so grossen Schritt vorangebracht zu haben. Das sind zum einen die **Theledonti**. Viele Theledonti-Arten tragen zu Tausenden seltsame **Schuppen** an ihrem Körper, in ihrem Mund und sogar in den Schlitzen der Kiemen: Diese Schuppen sind genauso aufgebaut wie die **Zähne** der ersten Kiefermäuler.

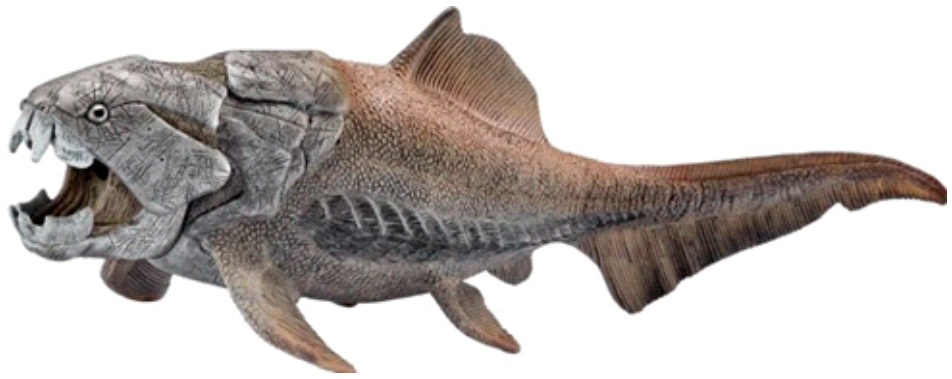
Aber wie konnten die Kiefermäuler die absolute Herrschaft über die kieferlosen Fische erobern? Die Kieferfische entwickelten rasch eine grosse Vielfalt: Schnell gab es an einem Ende der «Skala» schmale Kiefer mit scharfen, spitzen Zähnen, und am anderen Ende dicke, sehr kräftige Kiefer, die mit breiten stumpfen Platten bewehrt waren.

Wahrscheinlich entwickelten die Kiefermäuler einfach neue Ernährungsstrategien, denn sie konnten grössere Beutetiere packen und harte Schalen knacken – und das war das Geheimnis ihres Erfolges.

Während des Devons entstanden bei den Fischen in einem wahren Feuerwerk der Evolution immer neue Formen. Und so nahmen zu Beginn des Devons die **Plattenhäuter** die Position des Spitzräubers ein. Sie waren im Untersilur entstanden. Kopf und Körper dieser bizarren Fische waren mit einem Mosaik aus überlappenden Knochenplatten bedeckt.

Plattenhäuter, Rekonstruktion

Eine andere wichtige Gruppe der Plattenhäuter waren die «Gelenkhälse» (Arthrodira), die ebenfalls das Süsswasser erobern sollten. Allerdings schafften sie es auch die Meere zu beherrschen. Die Arthrodira erschienen im Devon und waren gefährliche Räuber: mit Knochenplatten schwer gepanzerte, aber sehr aktive Schwimmer, die Jagd auf andere aktive Schwimmer machten.



Dunkleosteus, Rekonstruktion

Bevor sie Ende des Devons verschwanden, brachten sie beispielsweise **Dunkleosteus** hervor, das grösste Tier seiner Zeit: bis zu 10 Meter lang und mehr als eine Tonne schwer.

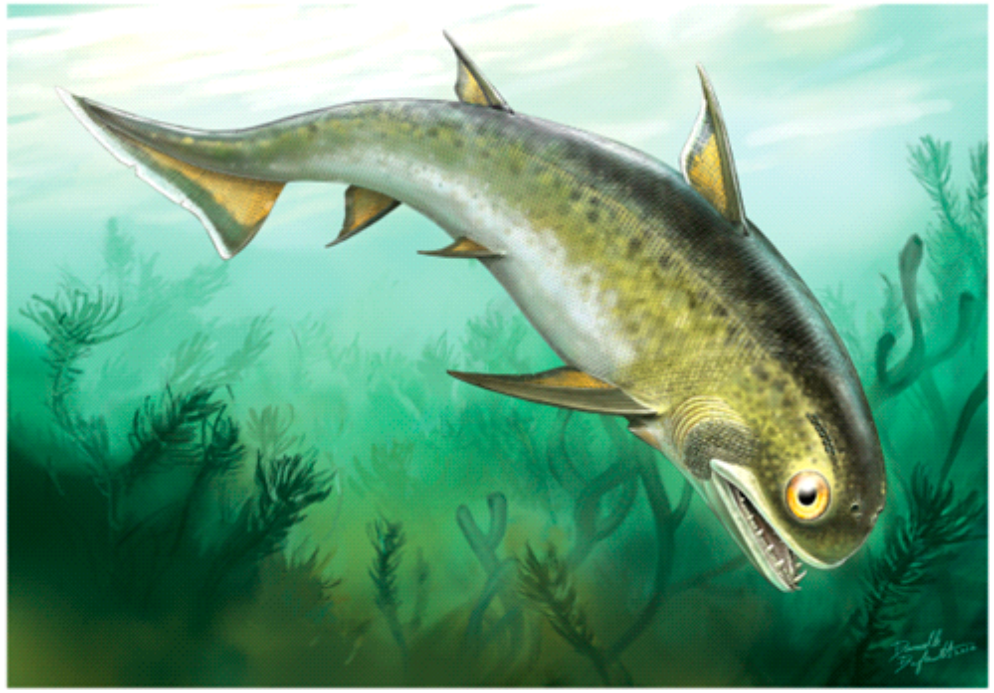
Kiefer besassen auch die ersten **Knochenfische**, die Ahnen aller Heringe bis Thunfische, die seit dem Obersilur in den Meeren schwammen, und natürlich auch die der **Haie** und Rochen, der **Knorpelfische**.

Zwar waren die grossen, gestreckten Kopffüsser des Ordoviziums und Silurs ausgestorben, aber ihre grosse Zeit stand ihnen durchaus noch bevor. Im Devon entwickelten sich die **Ammoniten**, die die Meere bis zum Ende des Mesozoikums (251-65 Millionen Jahre vor heute) in einer unglaublichen Formenfülle besiedelten. Es soll zwischen 30‘000 und 40‘000 Arten gegeben haben.

Ammonit

Die Forscher gehen davon aus, dass sich die Ammoniten und die Nautilusse unabhängig voneinander entwickelt haben.

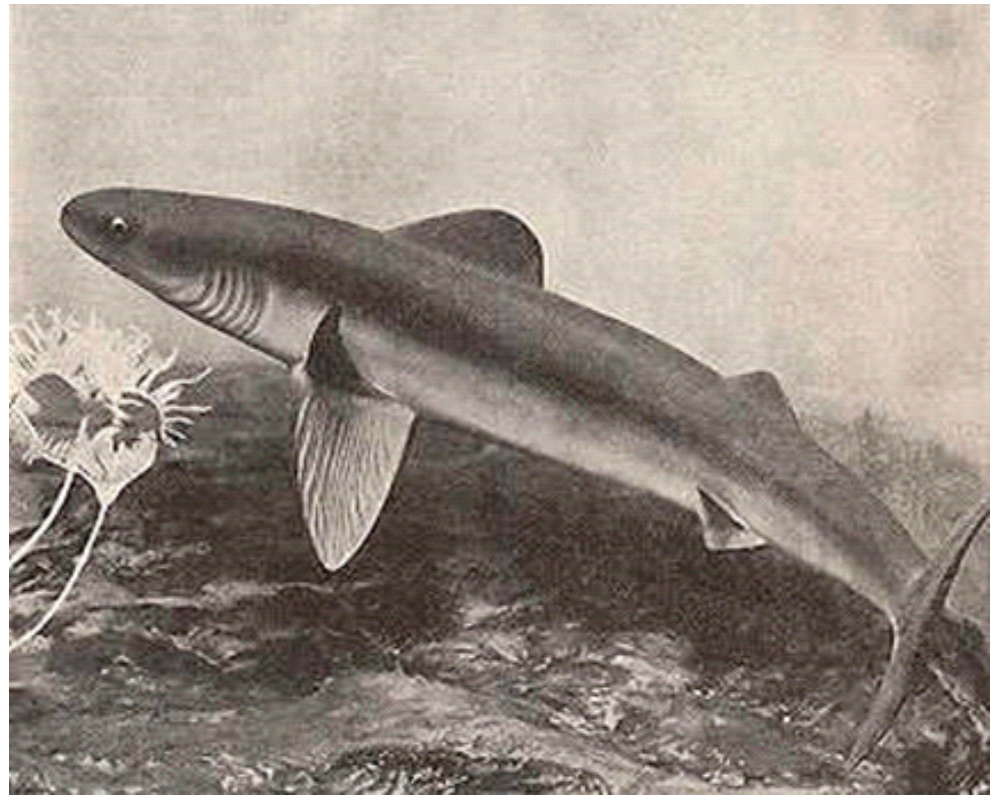
Die ersten **Stachelhaie** tauchten schon im Silur auf. Den Höhepunkt erlebten sie jedoch erst jetzt, als sie neben den Ozeanen auch die Flüsse und Seen eroberten. Die Stachelhaie waren zwar nicht sehr gross, aber ein hungriger Angreifer wird es sich trotzdem überlegt haben, ob er sich mit ihnen anlegen wollte. Der Grund waren die gefährlich scharfen Stacheln, mit denen sie am Vorderrand ihre Flossen verstärkten.



Stachelhai, Rekonstruktion

Ihr Skelett bestand aus **Knorpel**. Allerdings schützen viele von ihnen ihre Hirnschädel mit Knochenplatten. Viele Stachelhaie waren selbst Jäger. Auf den kräftigen Kieferknochen der schlanken Fische mit den langen Stacheln ragten aus kleinen Zacken Reihen von dreieckigen, gebogenen Zähnen heraus. Geholfen hat es ihnen nichts: Sie waren den besseren Räubern nicht gewachsen und verschwanden.

Dass die Stachelhaie trotz allem im Laufe des Devons nicht mehr mithalten konnten, lag unter anderen an den **Haien**. Sie schwammen erstmals vor etwa 420 Millionen durch die Meere. Wer die Ahnen der Haie waren, ist offen. Schliesslich wird Knorpel nur sehr selten fossil überliefert. Ausser Zähnen und Schuppen bleibt nicht viel von ihnen erhalten.



Hai im Devon, alte Rekonstruktion

Haie sind eine ganz grosse **Erfolgsgeschichte** der Natur: Nachdem sie sich die Spitze der maritimen Nahrungskette erobert hatten, gaben sie sie nicht mehr ab. Auf den Kontinenten wechselten die führenden Raubtiere – da erging es den zangenbewehrten Seeskorpionen nicht anders als später den fleischfressenden Gorgonopsiden des Perms, den diversen Topräubern unter den Dinosauriern, den Säbelzahnkatzen… Aber die Haie blieben.

Anders als im ordovizischen Meer ohne Fische hatte in den Riffen des Devons die Zukunft bereits begonnen – und die markierten die frühen **Knochenfische**. Heute gehören fast alle Fische, die im Salz-Brack- oder Süsswasser schwimmen, in diese Gruppe. Sie machen 95 Prozent der rund 30‘000 bekannten Fischarten aus und sind höchst anpassungsfähig. Angehörige der Knochenfische leben am Boden der Tiefseegräben in mehr als zehn Kilometer Wassertiefe, während ihre Verwandten in 4‘500 Meter Höhe durch Gebirgsbäche schwimmen.

Die Knochenfische bewiesen im Lauf der Evolution ein enormes Potential. Ihre Wurzeln reichen mindestens 420 Millionen Jahre ins Silur zurück.

Die Vielfalt von Strategien bei der Sauerstoffversorgung ist eines der Erfolgsrezepte der Knochenfische. Die meisten haben einen geschlossenen Blutkreislauf mit einem nahe an den Kiemen gelegenen, einfach Herzen. Es pumpt venöses Blut direkt in die Kiemen, die aus zahlreichen, mit Kapillaren durchzogenen Blättchen, feinen Hautausstülpungen, bestehen. Die Kiemen nehmen über ihre grosse Oberfläche gelösten Sauerstoff aus dem Wasser auf und geben ihn an das Blut weiter. Es gibt aber auch Fische die durch Haut- oder Darmatmung oder durch die Schwimmblase Sauerstoff aufnehmen.

Zu den Knochenfischen gehören auch die **Fleischflosser**. Auch sie verdanken ihren Namen einem körperlichen Merkmal: Sie stützen ihre Flossen mit einem Knochen und das Ganze sieht aus wie fleischige Stiele. Aus ihren Reihen kamen die Ahnen aller Landwirbeltiere.

Fleischflosser

Im Devon waren die meisten Fleischflosser gefährliche Raubtiere, die zunächst durch alle Weltmeere schwammen. Sie waren weltweit verbreitet und besiedelten mehrmals unabhängig voneinander das Süsswasser. Begonnen hat ihre Entwicklung im Silur.

Die **Flora** erlebte im Devon einen ebenso beachtlichen Durchbruch. Aus einer Schwestergruppe der **Moose** gingen damals die ersten Farne und Schachtelhalme hervor. Diese konnten durch ihre grösseren Blätter und den insgesamt höheren Pflanzenkörper deutlich effektiver Photosynthese betreiben. Ihr vermehrtes Auftreten Millionen Jahre vor den grossen luftatmenden Landtieren ist ein wahrscheinlicher Grund für den steilen Anstieg des Sauerstoffgehalts in der Atmosphäre während des Devons und Karbons.

Es finden sich auch erste Zeichen einer **Mykorrhiza**, einer Symbiose zwischen Pflanzen und Pilzen, die den Pilz ernährt und der Pflanze leichteren Zugang zu Wasser gewährt. Da die Vegetation im Devon generell nur entlang der Wasserwege gedeihen konnte, war diese Symbiose wahrscheinlich ein entscheidender Vorteil gegenüber Konkurrenten ohne **Symbiosepartner** oder in trockeneren Arealen.

Parasitäre Pilze gab es vermutlich schon seit dem Archaikum, und sie waren während des Ordoviziums innerhalb der Pflanzen an Land gegangen, doch diese Beziehung war stets einseitig und für die Pflanze von Nachteil gewesen.

Im Laufe der Erdgeschichte hat es mindestens fünf grosse **Massenaussterben** gegeben – den aktuell stattfindenden Artenschwund nicht mitgerechnet. Bei diesen Ereignissen starben jeweils grosse Teile der Tier- und Pflanzenwelt aus, ganze Gruppen von Organismen wie die Dinosaurier oder die Trilobiten verschwanden für immer. Was jedoch diese urzeitlichen Katastrophen verursachte, ist bisher nur in Teilen geklärt.

Während es Devons hatte sich die Welt gewandelt. An Land und im Meer wimmelte es nur so von Leben. Aber der Frieden hielt nicht ewig. Als sich das Devon zu Ende neigte, wurde die Situation instabil.

Warum diese Welt zwischen 372 und 359 Millionen Jahren vor heute unterging, ist weit weniger gut verstanden als im Fall des ersten grossen Massenaussterbens am Ende des Ordoviziums.

Wahrscheinlich kamen mehrere Faktoren zusammen: eine Sauerstoffarmut in den Ozeanen bei gleichwohl steigenden Meeresspiegeln, gefolgt von einer globalen Abkühlung. Die Beteiligung von Vulkanen und der Plattentektonik ist möglich.

Wie auch immer, als das auf das Devon folgende Karbon begann, waren 80 bis 90 Prozent aller Meerestierarten, wie Panzerfische, viele Ammoniten- und Korallenarten, und der Dunkleosteus, verschwunden. An den neuen Landpflanzen jedoch war das Desaster weitgehend spurlos vorbeigegangen.

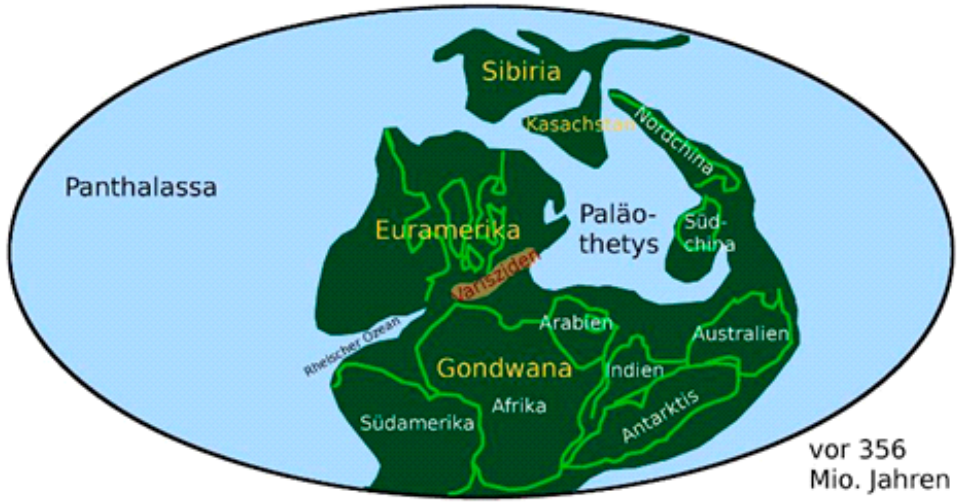
Ära	System	Epoche	Alter (Mio. Jahre)	Wichtige Ereignisse
Erdneuzeit (Känozoikum)	Quartär	Holozän	0,01	▲Landwirtschaft, Sesshaftigkeit
		Pleistozän	2,6	▲ erste Menschen
	Neogen	Pliozän	5,3	▲ Jurafaltung
		Miozän	23	
	Paläogen	Oligozän	34	○ 33 bis heute Känozoische Eiszeit
		Eozän	56	▲Alpenbildung
		Paläozän	66	✸ Kreide-Paläogen Massensterben
Erdmittelalter (Mesozoikum)	Kreide	obere	100	
		untere	145	
	Jura	oberes	161	
		mittleres	176	
		unteres	200	✸ Trias-Jura-Massensterben
	Trias	obere	228	▲erste Säugetiere
		mittlere	245	
		untere	251	✸ Perm-Trias Massensterben
Erdaltertum (Paläozoikum)	Perm		300	▲erste Reptilien
	Karbon		360	✸ Devon-Massensterben ○ 360-260 Karoo Eiszeit
	Devon		416	▲erste Amphibien
	Silur		444	✸ Silur-Massensterben
	Ordovizium		488	○ 460-420 Anden-Sahara Eiszeit
	Kambrium		542	▲erste Fische
Neues Proterozoikum	Ediacarium		635	○ 650-580 Marinoische/Gaskiers Eiszeiten
	Cryogenium		850	○ 750-700 Sturtische Eiszeit
	Tonium		1'000	
Mittleres Proterozoikum			1'600	▲ab 1'500 Eukaryoten
Frühes Proterozoikum			2'500	○ 2'400-2'100 Huronische Eiszeit
Archaikum			4'000	▲ab 2'700 Photosynthese, Cyanobakterien ▲ab 3'800 erste Einzeller
Hadaikum			4'600	
Urknall			13'700	

Karbon

Zeitraum:

360 bis 300 Millionen Jahre vor heute

Plattentektonik:



Bereits im Silur war es zur **Kollision** der beiden Kontinentmassen Laurentia (Nordamerika) und Baltica (Nordeuropa und Russische Tafel) gekommen. Im Verlauf des Unterkarbon setzte sich der Zusammenstoss von Euramerika und Gondwana fort und erreichte an der Wende von Unter- und Oberkarbon einen ersten Höhepunkt. Diese Kontinent-Kontinent-Kollision ist die Ursache der **variszischen Gebirgsbildung** in Europa. Im Oberkarbon schloss sich der Bereich zwischen Nordwestafrika und Nordamerika, die Bildung der Appalachen fand damit ihren Abschluss. Mit dem Anschluss der sibirischen und des Kasachstan-Kruste an Euramerika (dabei entstand das Ural-Gebirge) waren schliesslich im Perm alle grossen Kontinentmassen zu einem Superkontinent, der **Pangäa**, vereinigt. Der die Pangäa umgebende Ozean wird Panthalassa genannt.

Die Tektonik scheint regelrechte Aktivitätsschübe durchlebt zu haben, durch die ein neues Gebirge entstand: die Varisziden. Die erstreckten sich – von heute betrachtet – als Mittelgebirge von Amerika über Nordafrika nach Spanien, Frankreich und Deutschland bis nach Polen hinein.

Umwelt:

Atmosphärischer Sauerstoffanteil	Über das ganze Karbon durchschnitllich etwa 32,5 Volumenprozent. Das entspricht etwa 163% des heutigen Niveaus
Atmosphärischer Kohlendioxidanteil	Durchschnittlich etwa 880 ppm. Das ist das 3-fache des vorindustriellen Gehalts
Durchschnittliche Oberflächentemperatur	Etwa 14°C also etwa auf dem derzeitigen Wert
Meeresniveau	Allmählich von 120 Meter über dem derzeitigen Niveau auf heutige Werte absinkend, am Ende stieg der Meeresspiegel kontinuierlich auf plus 80 Meter an.

Das Karbon war von einer kontinuierlichen **Abkühlung** gekennzeichnet. Weite Teile Gondwanas lagen über dem Südpol, wo sich grosse kontinentale Eisschilde bilden konnten, was zu einer Eisrückstrahlungs-Rückkoppelung führte. Der Rest des Landes war weitflächig **bewaldet**, von einigen sehr trockenen Klimazonen abgesehen. Die Entstehung von Pangäa unterbrach einige warme Strömungen, und der Wärmeaustausch zwischen den Ozeanen wurde unterbrochen. Der reduzierte Vulkanismus und die geringere Aktivität der Ozeanspreizungszonen heizten die Atmosphäre nicht mehr in gewohntem Massstab auf und gleichzeitig entzogen die Landpflanzen der Atmosphäre zunehmend Treibhausgase.

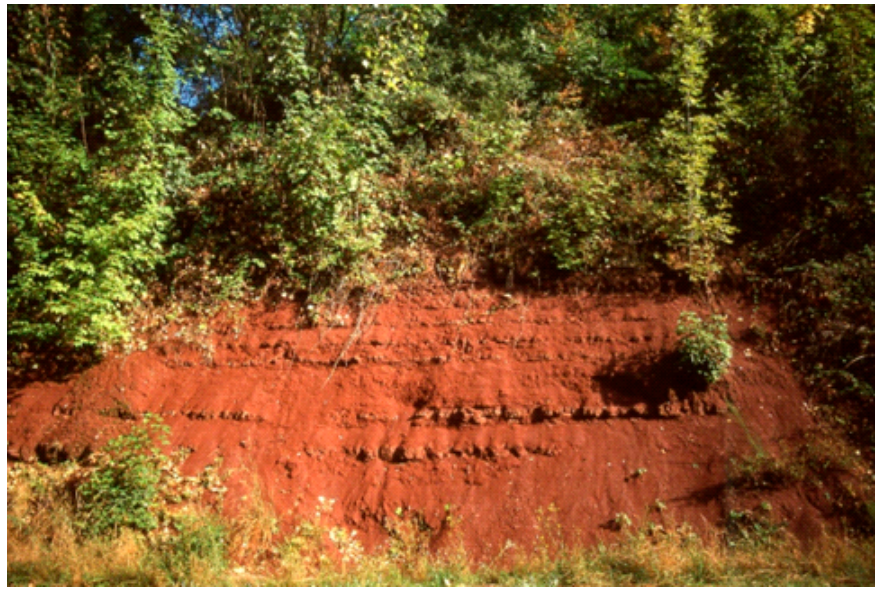
Letzteres taten sie so effektiv, dass der Sauerstoffanteil der Atmosphäre ab Mitte des Karbons bei über 32% lag, etwa eineinhalbmal so hoch wie heute. In Spitzenzeiten sollen lokal bis zu 40% Atmosphärenanteil erreicht worden sein. Der CO2-Gehalt der Atmosphäre sank von weit jenseits von 2‘000 ppm auf unter 800 ppm. Das ist nur noch knapp das Doppelte unseres heutigen Durchschnitts. Als Konsequenz sank die Temperatur auf durchschnittlich 14 °C im gesamten Karbon, wobei der Temperatursturz kontinuierlich stattfand, sprich am Ende lag der weltweite Durchschnitt bei unter 12°C. Diese Kälteperiode wird auch als Permokarbonisches Eiszeitalter bezeichnet.

Auf das Devon-Massenaussterben folgte die Perm-Karbon-Eiszeit. Die permokarbonische Eiszeit, veraltet auch Karoo-Eiszeit, war ein Eiszeitalter, das vom frühen Karbon bis zum späten Perm über gut 70 Millionen Jahre (grob vor etwa 335 bis etwa 260 Millionen Jahren) andauerte. Wie das (derzeit noch andauernde) känozoische Eiszeitalter handelte es sich nicht um eine durchgehende Vereisung, sondern eher um eine Abfolge von **Kaltzeiten und Warmzeiten**. Die Vereisung war beinahe ausschliesslich auf die Südhalbkugel mit dem grossen Südkontinent Gondwana beschränkt. Die Gründe für dieses Eiszeitalter sind noch nicht völlig geklärt.

Geologie:

Unter dem Einfluss der Witterung wurde das varizische Gebirge im späten Karbon und im Perm abgetragen. Als Zeugen dieser Abtragung findet man alte, mit Schutt gefüllte Täler und tiefe Gräben. Ein ehemaliges Tal, ein sogenannter «**Permokarbon-Trog**», liegt unter dem schweizerischen Mittelland. Nach seismischer Erkundungarbeiten erreicht die Trogfüllung eine Mächtigkeit von mindestens 4000m.

Am Ende des Karbons muss sich das Klima hin zur **Steppe** und trockener Wüste geändert haben, denn die jüngeren Ablagerungen bestehen aus roten Tonsteinen und tonig verwitterten Sandsteinen und Konglomeraten, dem «Rotliegenden».



Flora und Fauna:

Landpflanzen sind mehr als grüne Sauerstofflieferanten. Bevor sie als Pelz die Kontinente überzogen, funktionierte das System Erde wenig vorteilhaft für Wirbeltiere mit ihren recht hohen Ansprüchen. In den Sedimenten finden sich nur Zeugnisse für endlose Felswüsten.

Das änderte sich erst, als grössere Pflanzen das Land eroberten. Nachdem sie den Trick erlernt hatten, Wurzeln zu bilden und sich über spezialisierte Leitbündel mit Nährstoffen und Wasser zu versorgen, konnten sie sich über das Bodenniveau erheben.

Begonnen hatte alles gegen Ende des Silurs, vor 420 Millionen Jahren, als es an Land die ersten wirklich grossen Organismen gab. Es waren ein paar verrückte Gewächse wie die *Prototaxiten*. Sie waren zwei bis neun Meter hoch. Sie waren vermutlich **Pilze**.

Auch Pilze zählen zu den eukaryontischen Lebewesen mit Zellkern, Mitochondrien und anderem Inventar. Neben Tieren und Pflanzen bilden sie ein eigenständiges Reich. Ihre Gene verraten, dass sie eher mit den Tieren als mit den Pflanzen verwandt sind, und dafür spricht auch ihre Biochemie: Wie Tiere ernähren sie sich von organischem Material in ihrer Umgebung, das sie regelrecht verdauen, also mit Enzymen aufschliessen. 80 bis 90 Prozent aller Pflanzen werden in ihrem Wachstum von Pilzen gestützt. So gäbe es ohne Pilze keine Bäume: Sie umschlingen mit fadenförmigen Zellen die Saugwurzeln der Pflanzen und bilden so den «Myzelmantel», über den die Wurzeln Nährstoffe aus dem Boden aufnehmen.

Dann entwickelten sich Riesenfarne, Palmfarne tauchten auf, **Bäume,** die am Ende des Devons bis zu 30 Meter hoch wuchsen.

Archeopteris

Den Anfang der Bäume machte vor etwa 385 Millionen Jahren *Archeopteris*. Er wuchs vom Devon zum Karbon auf allen Kontinenten. Er war der wichtigste Baum in den frühen **Wäldern**.

Wälder wuchsen in den Auen, an Seeufern und entlang der Meeresküsten, und weil sie sehr viel Wasser verdunsteten, stieg der Wasserdampfgehalt in der Luft: Es regnete mehr und so emanzipierte sich der Wald allmählich von den Uferzonen und breitete sich bis in die Bergregionen hinein aus. Das Ganze lief in rasanten Tempo ab: Nach 10 oder 20 Millionen Jahren war die Entwicklung abgeschlossen, und die Flüsse von der Mündung bis zu Quelle stabile und zuverlässige Ökosysteme.

Das Karbon war eine ungewöhnliche Zeit. Der Grund waren die **Bäume**. Sie holten Unmengen von Kohlendioxid aus der Luft, indem sie es durch die Fotosynthese in Biomasse verwandelten und für den Aufbau der komplexen Verbindungen nutzten, die man **Holz** nennt. Aber Holz ist biologisch kaum abbaubar. Selbst heute schaffen das nur spezialisierte Organismen. Die Bakterien und Pilze damals mussten zunächst den Umgang mit dem neuen Stoff lernen und das dauerte viele Millionen Jahre. Also endete viel von dem Kohlendioxid, die die Bäume durch die Fotosynthese aus der Luft fischten, im Holz. Wenn ein Baum umfiel, verrottete er nicht und er Kohlenstoff wurde nicht wieder freigesetzt. Damals bildeten sich die grossen **Kohlenflöze**, voll gefangenem Kohlenstoff.

In den Kohlesümpfen des Karbons wuchsen vor allem Schuppen- und Siegelbäume. Sie gehören zu den heute unscheinbaren **Bärlappgewächsen**, die damals Höhen von 40 Metern erreichen konnten. In dieser Zeit entstanden die weltgrössten Kohlenvorräte.

Die Geschichte mit dem Kohlendioxid steht jedoch nur für einen Teil des Geschehens – und hier nähern wir uns den **Riesenlibellen**. Denn durch die Fotosynthese wird nicht nur Kohlendioxid verbraucht, sondern auch **Sauerstoff** hergestellt. Und die Bäume betrieben das Geschäft in einem ganz grossen Ausmass. Der Sauerstoff sammelte sich an, kletterte auf einen Anteil von vielleicht 30 Prozent an der Atmosphäre und damit knapp ein Drittel über dem modernen Wert. Dank dem vielen Sauerstoff konnte aus Krabbeltieren Giganten werden. Der Grund ist, dass Libellen, Tausendfüsser oder Spinnentiere nicht mit Lungen atmen, sondern mit Tracheen. Das sind Kanalröhren, mit denen sie Sauerstoff in ihren Körper transportieren. Weil er dabei passiv aus der Luft ins Blut dringt, ist diese Methode nicht sonderlich effizient, sodass Insekten und Co. heute eher klein sind.

Meganeura monyi Rekonstruktion

Die Riesenlibelle *Meganeura monyi* gehört mit einer Flügelspannweite von bis zu 70 Zentimetern zu den grössten Insekten, die jemals gelebt haben.

Die **Insekten** hatten die Lüfte erobert und das Fliegen gelernt – und für lange Zeit machte ihnen niemand diesen Raum streitig. Als Nächstes würde das jemand von den **Sauriern** lernen, aber bis dahin sollten Gebirge entstehen und vergehen.

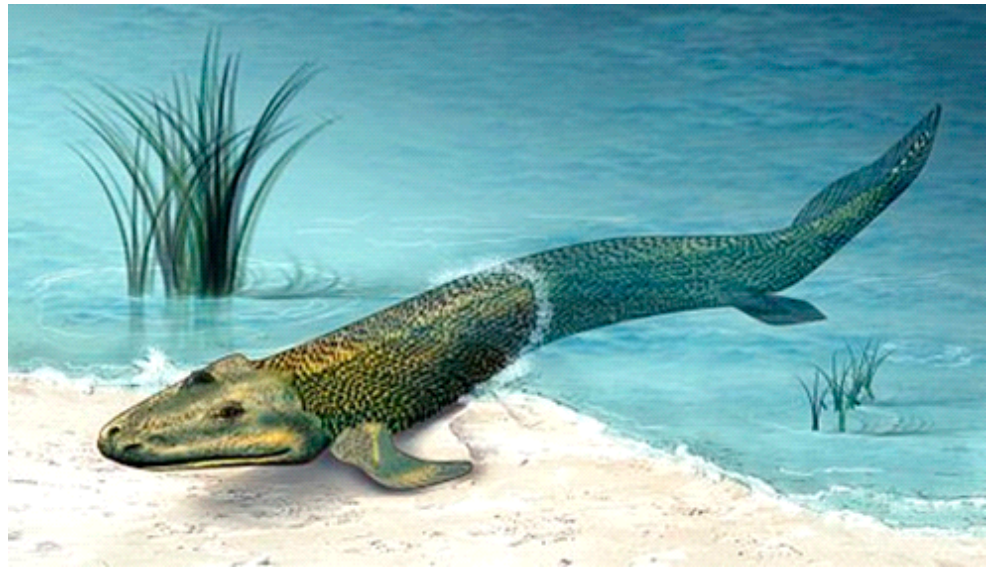
Die Wälder beschatteten auch das Wasser, ihre Wurzeln ragten hinein. Sie boten einen idealen Lebensraum für kleine Fische, die sich dorthin zurückzogen, und für Fleischflosser, die sich dort wie im Schlaraffenland fühlen konnten und die von da aus den Landgang wagten: Aus ihren Reihen kamen die Ahnen der Tetrapoden, der **Landwirbeltiere**. Sie glichen am ehesten den modernen **Quastenflossern** oder den **Lungenfischen**.

Quastenflosser

Die einen wie die anderen fristen heute ihr Dasein nur noch als «lebende Fossilien»: Die Quastenflosser im Meer und die Lungenfische an Land – in Afrika, Südamerika und Australien. Die grosse Zeit der Fleischflosser war das Devon. Danach verloren sie an Bedeutung, die Quastenflosser schienen bereits seit 70 bis 80 Millionen Jahren ausgestorben zu sein – «schienen», wie sich im Jahre 1938 zeigte, als sich einer von ihnen ins Bewusstsein der Paläontologen brachte. Einer der gefürchteten Räuber des Devons war «auferstanden».

Zwar sehen die Quastenflosser aus wie Fische mit Beinchen, aber mit uns sind sie trotzdem nur sehr weitläufig verwandt. Unsere Vorfahren haben mehr mit den **Lungenfischen** zu tun. Ausser ihren **Kiemen** besassen (und besitzen) sie Lungen, um sich aus der Atmosphäre mit Sauerstoff zu versorgen.

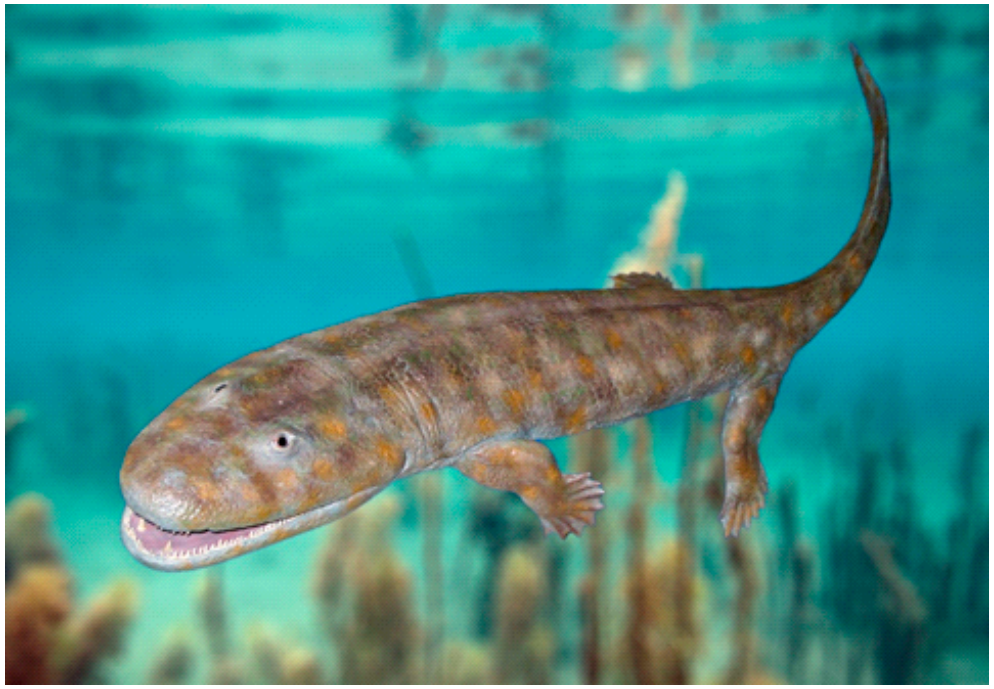
Dass die Lungenfische, die am nächsten mit uns **verwandten** lebenden Fische sind, dafür spricht eine ganze Reihe von gemeinsamen Merkmalen: Sie besitzen, wie wir, ein Lymphgefässsystem, ihre Schädelstruktur ist ähnlich und sie trennen sauerstoffreiches Blut aus der Lunge und sauerstoffarmes Blut aus dem Körper. Ausserdem deutet die Analyse ihrer Erbsubstanz darauf hin, dass sie nahe an der stammesgeschichtlichen Wurzel aller Landwirbeltiere stehen. Überhaupt ist ihr Genom etwas Besonderes: Es ist das grösste und komplexeste, das wir bislang kennen.



Lungenfisch

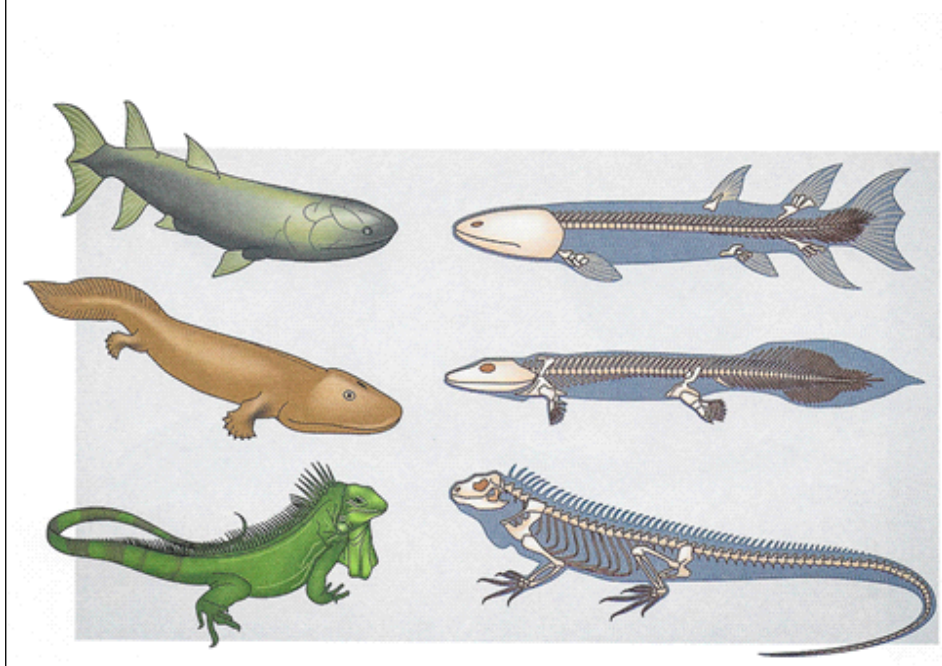
Die Sache mit dem **Laufen** begann im Devon mit einem Tier, das ähnlich aussah wie ein Lungenfisch. Es war der Ausgangspunkt für Lurche und Frösche, Salamander, Eidechsen, Krokodile und Vögel, Schildkröten, Hunde, Katzen, Kühe und Menschen, die heute auf der Erde leben. Allerdings musste ein Fisch, der vom Leben auf dem Land träumte, seinen Körper schon sehr stark anpassen.

Das **Landleben** erfordert viel mehr als Lungen zum Atmen und Beine mit Füssen und Zehen zum Laufen. Um auf dem Trockenen leben zu können, musste man auch seinen Körper vor dem Austrocknen schützen lernen, neue Wege des Fressens entwickeln und vieles mehr. Starke Knochen und Muskeln sind wichtig, weil die Tiere an Land mehr Kraft brauchen als unter Wasser, wo sie mehr oder weniger schwerelos sind. Angepasst wurden auch die Sinne, vor allem das Gehör, schliesslich lässt sich Schall in der Luft nicht mehr fühlen.



Acanthostega, Modell

Acanthostega war weder Fisch noch Fleisch. Er war ein Mischwesen durch und durch. Er besass **Gliedmassen** mit Füssen und Zehen, aber sie taugten nicht für ein Leben auf dem Trockenen: Es fehlen richtige Gelenke, um das Gewicht dieser Tiere an Land zu stemmen. Die flachen Schädel dieser Übergangswesen legen nahe, dass die Ahnen der Landwirbeltiere aus den Reihen der Flachwasserspezialisten kamen: Dort jagten sie und pflanzten sich fort – und dann lockte das Land.



Um vom Fisch zum Vierbeiner zu werden, waren viele Umbauten notwendig. So mussten aus Flossen Arme und Beine mit Fingern und Zehen werden. Die Wirbel mussten ineinandergreifen, die Schwanzflosse musste verschwinden, der Kopf beweglich und die Schnauze verändert werden.

Der Landgang selbst jedoch erwies sich als hervorragende «Idee»: Die frühen Tetrapoden (Landwirbeltiere), lebten überall, waren Kosmopoliten, die die Kontinente Laurasia im Norden und Gondwana im Süden besiedelten. Da die meisten Überreste früher **Vierfüsser** in Laurasia gefunden worden sind, stand dort vielleicht die Wiege der Landwirbeltiere.

Ära	System	Epoche	Alter (Mio. Jahre)	Wichtige Ereignisse
Erdneuzeit (Kanäozoikum)	Quartär	Holozän	0,01	▲Landwirtschaft, Sesshaftigkeit
		Pleistozän	2,6	▲ erste Menschen
	Neogen	Pliozän	5,3	▲ Jurafaltung
		Miozän	23	
	Paläogen	Oligozän	34	◯33 bis heute Känozoische Eiszeit
		Eozän	56	▲Alpenbildung
		Paläozän	66	✸Kreide-Paläogen Massensterben
Erdmittelalter (Mesozoikum)	Kreide	obere	100	
		untere	145	
	Jura	oberes	161	
		mittleres	176	
		unteres	200	✸Trias-Jura-Massensterben
	Trias	obere	228	▲erste Säugetiere
		mittlere	245	
		untere	251	✸Perm-Trias Massensterben
Erdaltertum (Paläozoikum)	Perm		300	▲erste Reptilien
	Karbon		360	✸Devon-Massensterben ◯360-260 Karoo Eiszeit
	Devon		416	▲erste Amphibien
	Silur		444	✸Silur-Massensterben
	Ordovizium		488	◯460-420 Anden-Sahara Eiszeit
	Kambrium		542	▲erste Fische
Neues Proterozoikum	Ediacarium		635	◯650-580 Marinoische/Gaskiers Eiszeiten
	Cryogenium		850	◯750-700 Sturtische Eiszeit
	Tonium		1'000	
Mittleres Proterozoikum			1'600	▲ab 1'500 Eukaryoten
Frühes Proterozoikum			2'500	◯2'400-2'100 Huronische Eiszeit
Archaikum			4'000	▲ab 2'700 Photosynthese, Cyanobakterien ▲ab 3'800 erste Einzeller
Hadaikum			4'600	
Urknall			13'700	

Perm

Zeitraum:

299 bis 251 Millionen Jahre vor heute

Plattentektonik:

Seit dem Silur hatten sich alle damaligen Kontinente auf Kollisionskurs befunden. Als schliesslich noch Sibiria andockte, war der Superkontinent **Pangäa** komplett. Zu Beginn des Perms lagen über dem Südpol die Gletscher der permo-karbonischen Vereisung. Später – im heiss-trockenen Klima – entstanden die reichsten Salzlagerstätten der Erdgeschichte.

Als das Perm begann, gab es diesen gigantischen Kontinent, der vom Süd- bis fast zum Nordpol reichte. Das Meer konnte das Klima kaum ausgleichen: Im Landesinnern waren die Sommer heiss und die Winter eisig kalt. Geformt war Pangäa wie ein langgestrecktes C und um das All-Land herum schwappte das Panthalassische Ozean, der fast drei Viertel der Erde bedeckte. Die flachen Zonen des Pan-

thalassischen Ozeans und der Paläothetys sprudelte über von Leben.

Pangäa war der jüngste Superkontinent und bestand zwischen 300 und 150 Millionen Jahren vor unserer Zeit. Sein Vorgänger Rodinia existierte zwischen 1100 und 800 Millionen Jahren vor heute. Die älteren Superkontinente sind umstritten: Columbia etwa vor 1800 bis 1500 Millionen Jahren und Ur vor drei Milliarden Jahre.

Zu Beginn des Perms herrschten über den am Pol gelegenen Teilen Pangäas immer noch die Gletscher. Sie verschwanden erst vor 290 Millionen Jahren, als das Perm schon ein paar Millionen Jahre alt war.

Umwelt:

Atmosphärischer Sauerstoffanteil	Über das ganze Perm durchschnittlich etwa 23 Volumenprozent. Das entspricht etwa 115% des heutigen Niveaus
Atmosphärischer Kohlendioxidanteil	Durchschnittlich etwa 900 ppm. Das ist das 3-fache des vorindustriellen Gehalts
Durchschnittliche Oberflächentemperatur	Etwa 16°C und damit 2°C über dem derzeitigen Wert
Meeresniveau	Zunächst bei plus 60 Meter über dem heutigen Niveau, dann fiel es zum Ende des Perms auf -20 Meter ab

Die klimatische Entwicklung im Perm war der im Karbon exakt entgegengesetzt. Auf das Devon-Massensterben folgend begann eine rapide Erwärmung des Klimas. Der CO2-Anteil der Atmosphäre stieg wieder auf durchschnittlich 900 ppm, während der Sauerstoffanteil der Atmosphäre auf durchschnittlich 23 Volumenprozent fiel. Mit einer **Durchschnittstemperatur** von 16°C lag diese nahe unserer heutigen Temperatur. Es wird jedoch vermutet, dass durch den verstärkten Treibhauseffekt die saisonalen Temperaturunterschiede deutlich extremer waren als heute. Im Inland von Pangäa breiteten sich die Wüstengebiete weiter aus, das Klima wurde insgesamt deutlich trockener.

Geologie:

Dank der Kontinentalverschiebung ist die Schweiz vom Äquator abgedriftet, bis auf die Höhe der heutigen **Sahara**. Das Klima ist heiss und trocken. Fallen Niederschläge, so geschieht dies in seltenen Güssen von Monsunregen. Die Vegetation ist dünn und beschränkt sich weitgehend auf die Flusstäler. Der rote Boden besteht aus Schwemmsedimenten von tonigem Sand und Kies. Eine trostlose Landschaft!

Weltweit ist das Perm geprägt durch intensiven **Vulkanismus**. Dieser ist auch in der Schweiz belegt, etwa durch Gerölle vulkanischen Ursprungs in den Sedimenten des alpinen Verrucano. Im Süden des Tessins finden sich Zeugen eines Vulkans in der Form von Erstarrungsgesteinen und vulkanischen Sedimenten, im Speziellen von verbackenen Vulkanschlacken.

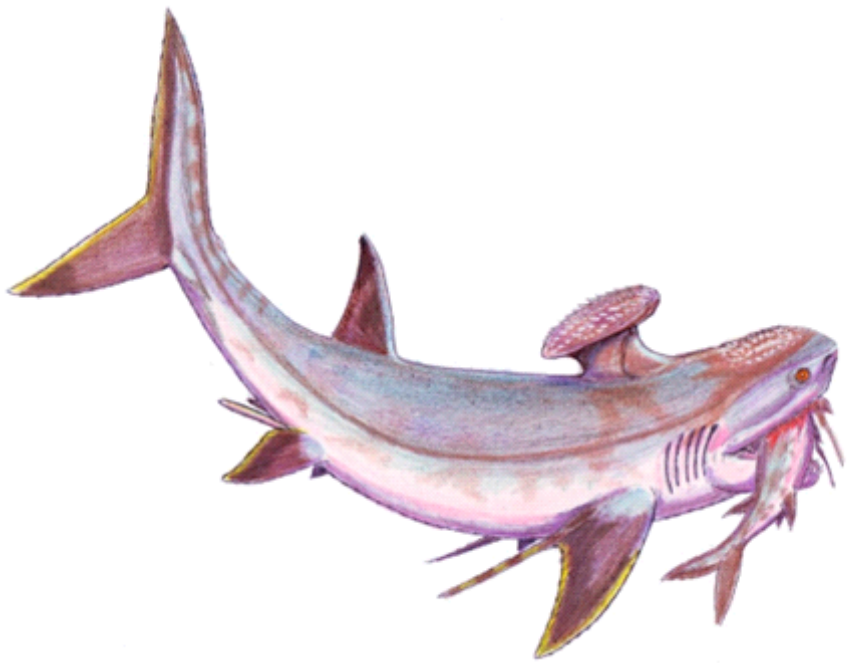
Fauna und Flora:

In den Meeren hatte sich seit dem Ende des Devons einiges geändert, schliesslich hat das Devon-Massenaussterben vor 347 Millionen Jahren mindestens 75 Prozent aller bekannten maritimen Arten hinweggerafft.

Viele Riffbaumeister gab es nicht mehr, sie wurden nach und nach von anderen **Korallen**, Schwämmen und Moostierchen ersetzt. Dafür krochen Seeigel in Mengen über den Meeresboden und Seelilien-Wälder (Stachelhäuter) überwucherten sandige Flächen.

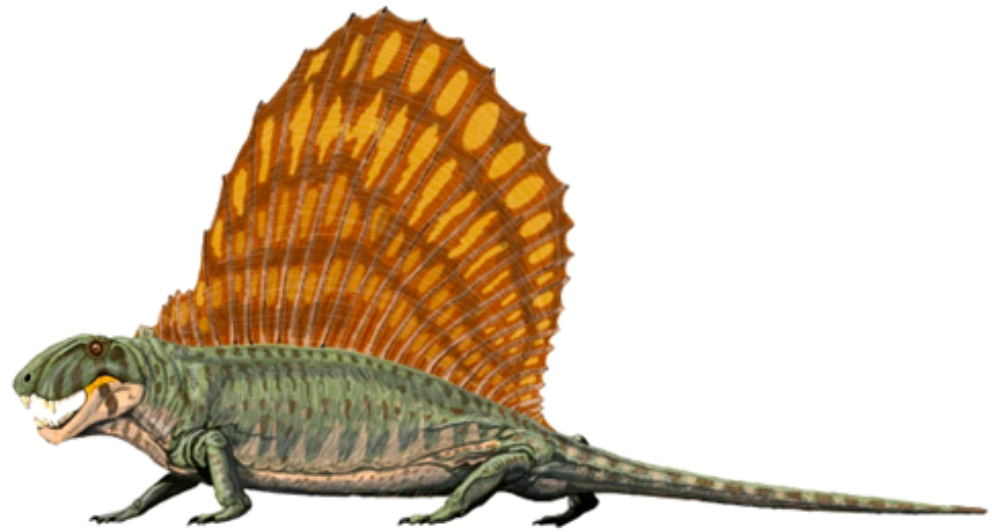
Nachdem sie die schweren Zeiten am Ende des Devons überstanden hatten, ging es auch den **Ammoniten** wieder so richtig gut. Von den langsamen Kopffüssern konnten sich nur ein paar Nautiloideen halten.

Die **Fische** hatten alle behäbigeren Formen wie die Plattenhäuter hinter sich gelassen. Die **Haie** nutzten dieses «Vakuum»: Die Rolle als grösster Fisch im Meer übernahm der bis 6 Meter grosse Stethacanthus, ein Hai mit langen Bruststacheln und einem knöchernen Kopfschild aus «Zähnen». Dieser Hai verdient mit Sicherheit in einer Liste der bizarrsten Lebewesen dieser Erde einen Platz ganz weit vorne.



Stethacanthus

Irgendwo auf diesem ungewöhnlichen Riesenkontinent spielte sich damals ein entscheidender Schritt ab. Aus den **Amphibien** (s.u.) entwickelten sich **Reptilien**. Ihnen ging es damals blendend: Das heisse Klima war für sie optimal, denn genau wie Fische oder Amphibien können sie ihre Körpertemperatur nicht konstant halten, sondern sind von der Umgebungstemperatur abhängig. Sie waren für die damalige Zeit schnell, beweglich und konnten gut beissen – egal ob ins Fleisch eines anderen oder in zähe Pflanzenkost. Das waren entscheidende Vorteile im harten Überlebenskampf und die Evolution «experimentierte» mit ihnen. So spalteten sich die Reptilien in mehrere Gruppen auf: Eine dieser Gruppen schlug einen Weg ein, der zu den Ururahnen aller **Dinosaurier** führte, eine andere mauserte sich zur Stammlinie der **Säugetiere**. Während des Perms waren unsere eigenen entfernten Urahnen die Nummer eins an Land. Dass die Säugetiere entstehen und die Herrschaft übernehmen, dahin schien es kein weiter Weg mehr zu sein.

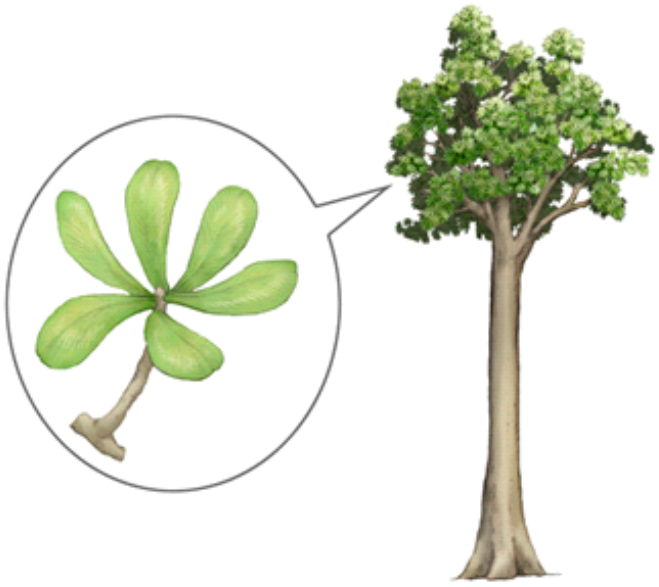


Dimetrodon, ein säugetierähnliches Reptil

Innerhalb der Landwirbeltiere gelten die **Amphibien** als die ursprünglichste („primitivste“) Gruppe, unter anderem, weil sie bei der Fortpflanzung auf Gewässer angewiesen sind, weil einige Teile ihres Skelettes nicht verknöchern und aufgrund der relativ geringen Leistungsfähigkeit ihrer Lungen und ihres Herz-Kreislaufsystems. Darin unterscheiden sie sich von den „höheren“ Landwirbeltieren, den Sauropsiden (einschliesslich Vögeln) und Säugetieren.

Amphibien sind, wie auch die modernen Reptilien, die Vögel und die Säugetiere, evolutionäre Nachfahren einer bestimmten Gruppe von Knochenfischen, die im Oberdevon ab etwa 380 Millionen Jahren damit begann, ihren Lebensraum auf die Landflächen in der unmittelbaren Umgebung von Binnengewässern auszudehnen. Daher werden die Amphibien zusammen mit Reptilien, Vögeln und Säugern in die Gruppe der **Landwirbeltiere** (Tetrapoden) eingeordnet.

Pangäa, das waren auch die endlosen Wälder von Samenfarnen. Sie wuchsen im Süden, wo die Eiskappe endete. Von Norden her eroberten die frühen Nadelholzgewächse mehr und mehr Lebensraum. An den Rändern des Kontinents hatte es das Leben leicht. Dort konkurrierten in üppigen **Regenwäldern** Bäume mit riesigen Baum- und Samenfarnen, Bärlapp- und Schachtelhalmgewächsen um Nährstoffe und Licht.



Samenfarn

Dass es anders kam, hat etwas mit dem Geschehen zu tun, das das Perm beenden sollte. Zu diesem Zeitpunkt war das Leben vielfältiger als jemals zuvor. Dann wirbelte die bislang schlimmste **Katastrophe**, die die Erde je gesehen hat, aller durcheinander. Vor 251 Millionen Jahren begann das **grösste Massenaussterben** aller Zeiten: Mehr als 95 Prozent der uns bekannten Tierarten im Meer und mehr als 75 Prozent der an Land starben aus. Seit die Pflanzen und Tiere die Erde erobert hatten, sind sie nie wieder ihrer Vernichtung so nahe gewesen wie damals.

Meeressedimente jener Zeit tragen die Zeichen des Untergangs. Die Wellen zerschlugen tote Riffe, während **Bakterien** wieder Mauern und Hügel auftürmten: Nach 400 Millionen Jahren forderten sie von den Tieren ihren Platz zurück. Weite Bereich des Ozeans müssen sich in bizarre Urwelten zurückverwandelt haben, in denen dicke Schleier von Sauerstoff hassenden Mikroben waberten. Aus heutiger Sicht wirkten weite Meeresbecken wie leergefegt.

Die Sedimente liefern noch ein Indiz: Nach dem grossen Sterben, in der Trias, war der Sauerstoffgehalt in der Luft erheblich gesunken und die Erde hatte sich stark aufgeheizt.

Was war geschehen? Die erste Spur führt nach Sibirien, das am Ende des Perms hoch im Norden von Pangäa lag. Dort begann vor 251 Millionen Jahren der grösste **Vulkanausbruch** aller Zeiten – jedenfalls der grösste, von dem wir wissen. Der Theorie nach passiert dabei Folgendes: Durch die Hitze des Erdkerns angetrieben, steigt von der Grenze zwischen Erdmantel und Erdkern ein «Superplume» auf: eine Art Riesenpilz aus ultraheissem, aber durch den Umgebungsdruck festem Gestein. Wie ein Schneidbrenner frisst er sich durch den gesamten Erdmantel. Damals hielt Sibirien den Plume zunächst auf, aber weil die dicke Kontinentalkruste wie eine Decke wirkte, wurde er noch heisser. Er schob sich weiter hoch, der Umgebungsdruck wurde immer geringer, Gestein begann zu schmelzen und ein unvollstellbar gewaltiges Magmareservoir entstand. Irgendwann hielt die Erdkruste dem Druck nicht mehr stand und riss auf. Aus mindestens vier Förderspalten ergoss sich **Basaltstrom** um Basaltstrom. Die türmten sich zu mehreren Kilometer mächtigen schwarzen Gesteinsdecken auf – und begruben ein Gebiet fast von der Grösse Europas unter sich.

Dieser Ausbruch lief nicht regelmässig über eine Million Jahre hinweg ab, vielmehr wechselten Ruhephasen mit gigantischen Schüben.

Was dieses Feuerwerk so tödlich machte, waren anscheinend vor allem Gesteinsschichten in Sibirien, in die das Magma bei seinem Aufstieg aus dem Erdinneren eingedrungen war. Es sucht sich seinen Weg ausgerechnet durch eine der grössten **Kohlelagerstätten** der Welt und durch ordovizische Schichten, in denen reichlich Gips steckte. Die **Hitze** kochte unfassbare Mengen an Kohlendioxid, Schwefelverbindungen und anderen sehr unangenehmen Verbindungen aus den Sedimenten heraus, die mit jedem Lavaschub die Atmosphäre fluteten. Die unterirdisch schwelenden Flöze (Kohlevorkommen) setzten dem Ganzen reichlich Methan zu, ein weitaus potenteres Klimagas als Kohlendioxid.

Das Szenario: Die Schwefelverbindungen verwandelten den Regen in Säure, die Pflanzen verätzte und Böden zerstörte. Gleichzeitig trieb das viele Kohlendioxid samt Schwefel die **Meeresversauerung** an. Alle Lebewesen, die Kalk für ihren Körperbau einsetzten, kamen in grosse Schwierigkeiten – und damit auch die, die diese Lebewesen gefressen hatten. Ausserdem geriet das Klima aus den Fugen, die Temperaturen kletterten. Das Methan setzte noch eine zweite «Waffe» gegen das Leben ein: in der Luft oxidiert es allmählich zu Kohlendioxid und verbraucht dabei reichlich Sauerstoff. Der schwand ohnehin schon dahin, da immer weniger Pflanzen Fotosynthese betrieben. Der Sauerstoffgehalt in der Luft stürzte ab – bis auf 13 Prozent.

Erst acht Millionen Jahre nach dem Massenaussterben hatten sich die Riffe wieder erholt. Wälder und Steppen an Land brauchten 12 bis 15 Millionen Jahre, um wieder auf ihre ursprüngliche Grösse anzuwachsen.

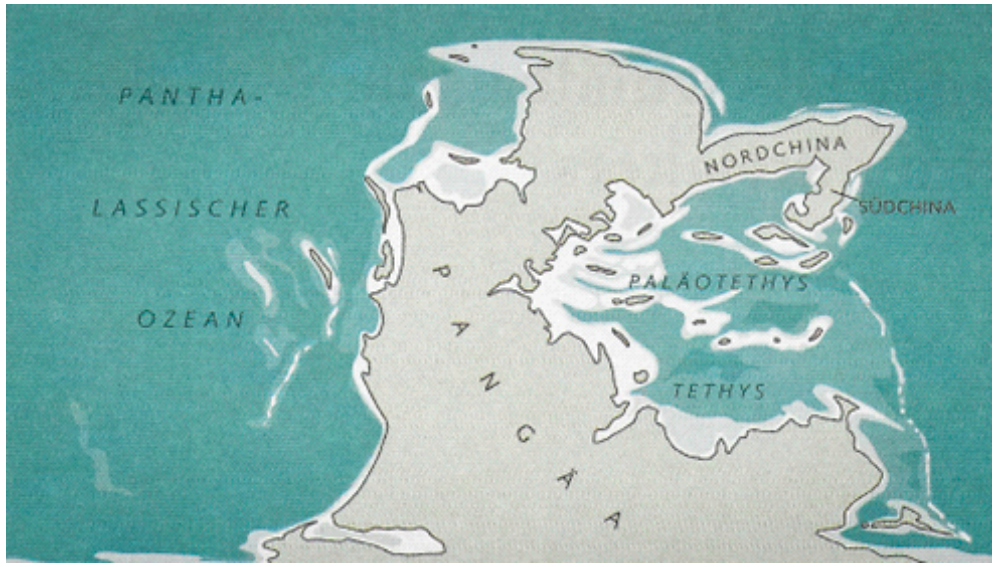
Ära	System	Epoche	Alter (Mio. Jahre)	Wichtige Ereignisse
Erdneuzeit (Kanäozoikum)	Quartär	Holozän	0,01	▲Landwirtschaft, Sesshaftigkeit
		Pleistozän	2,6	▲ erste Menschen
	Neogen	Pliozän	5,3	▲ Jurafaltung
		Miozän	23	
	Paläogen	Oligozän	34	⬭ 33 bis heute Känozoische Eiszeit
		Eozän	56	▲Alpenbildung
		Paläozän	66	✸ Kreide-Paläogen Massensterben
Erdmittelalter (Mesozoikum)	Kreide	obere	100	
		untere	145	
	Jura	oberes	161	
		mittleres	176	
		unteres	200	✸ Trias-Jura-Massensterben
	Trias	obere	228	▲erste Säugetiere
		mittlere	245	
		untere	251	✸ Perm-Trias Massensterben
Erdaltertum (Paläozoikum)	Perm		300	▲erste Reptilien
	Karbon		360	✸ Devon-Massensterben ⬭ 360-260 Karoo Eiszeit
	Devon		416	▲erste Amphibien
	Silur		444	✸ Silur-Massensterben
	Ordovizium		488	⬭ 460-420 Anden-Sahara Eiszeit
	Kambrium		542	▲erste Fische
Neues Proterozoikum	Ediacarium		635	⬭ 650-580 Marinoische/Gaskiers Eiszeiten
	Cryogenium		850	⬭ 750-700 Sturtische Eiszeit
	Tonium		1'000	
Mittleres Proterozoikum			1'600	▲ab 1'500 Eukaryoten
Frühes Proterozoikum			2'500	⬭ 2'400-2'100 Huronische Eiszeit
Archaikum			4'000	▲ab 2'700 Photosynthese, Cyanobakterien ▲ab 3'800 erste Einzeller
Hadaikum			4'600	
Urknall			13'700	

Trias

Zeitraum:

251 bis 200 Millionen Jahre vor heute

Plattentektonik:



Die Landmasse von Pangäa war gewaltig, aber bereits im Perm begann der Zerfall. In der Obertrias sollte sich die Öffnung des Nordatlantiks andeuten: Zwischen dem, was Nordamerika werden sollte, und dem künftigen Europa entstanden Riffsysteme, in die schliesslich ein Meer einbrach.

Umwelt:

Atmosphärischer Sauerstoffanteil	Über die gesamte Trias durchschnitllich etwa 16 Volumenprozent. Das entspricht etwa 80% des heutigen Niveaus
Atmosphärischer Kohlendioxidanteil	Durchschnittlich etwa 1750 ppm. Das ist das 6-fache des vorindustriellen Gehalts
Durchschnittliche Oberflächentemperatur	Etwa 17°C und damit 3°C über dem derzeitigen Wert

Das Klima in der Trias war in weiten Teilen warm und trocken. Die Trockenheit war das Resultat der grossen Fläche Pangäas, sommerliche Tiefdruckgebiete saugten dadurch eher trockene, kontinentale Luft ins Landesinnere statt der feuchteren über dem Meer. Dadurch entstanden vermutlich grosse Wüstengebiete im Landesinneren.

Die Bodentemperatur stieg auf durchschnittlich 17 °C an (2,5°C über dem heutigen Niveau), allerdings mit stärkeren Temperaturunterschieden zwischen den Küstenregionen und dem Landesinneren, sowie zwischen den Polen und der Äquatorregion. An den von Land bedeckten Polen gab es Permafrost, in den kontinentalen Wüsten hingegen herrschten Jahresdurchschnittstemperaturen von teilweise über 40°C.

Die Atmosphäre bestand zu ca. 16% aus Sauerstoff, etwa 80% unseres heutigen Sauerstoffgehalts, und der Anteil des Treibhausgases CO2 lag mit durchschnittlich 1750 ppm beim etwa Viereinhalbfachen unseres heutigen Niveaus.

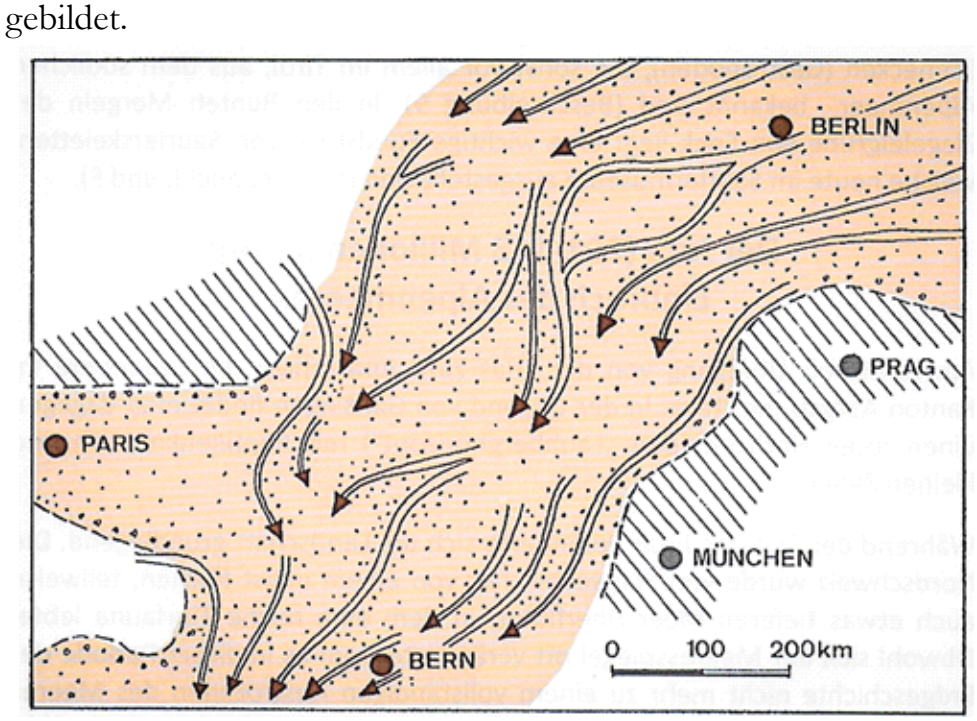
Geologie:

Das heutige Gebiet der Alpenländer war von einem riesigen Meer bedeckt. Darin lebten Meerespflanzen, Ammoniten, Muscheln, Schnecken und Fische, die wir heute als Versteinerungen finden können.

Die Versteinerungen entstanden, indem im Mesozoikum (vor rund 250 - 65 Millionen Jahren) tote Tiere und Pflanzen zusammen mit Sand, Ton und Kalk in mehreren Schichten am Meeresboden abgelagert wurden (Sedimente) und später durch die Anhebung der Erdkruste über den Wasserspiegel zu liegen kamen.

Die Gesteinsformation aus der frühen Trias ist der Buntsandstein. Er besteht aus roten, quarzitischen Sandsteinen, sind tonig und oft grün gefleckt. Das Sandmaterial des Buntsandsteins wurde durch Flüsse von Westen, aus der Gegend des Pariser Beckens, eingeschwemmt. Das Klima war wüstenartig.

Zu Beginn der Mittleren Trias überflutete das germanische Meer die Nordschweiz. In diesem Zeitabschnitt wurde der Muschelkalk gebildet.



Der Schilfsandstein ist eine Flussablagerung. Es sind rote und grünliche Sandsteine mit Pflanzenresten. Die Vorkommen von Schilfsandstein durchziehen die Nordschweiz und Deutschland mit

einem Netz von Strängen, das den Verlauf dieses verzweigten Flusssystems in der späten Trias von Polen bis in die Schweiz zeigt.

Fauna und Flora:

Die Steine der Unteren Trias sind schlicht langweilig. Ob in Süddeutschland, China den USA, irgendwie sehen sie alle gleich aus und beschreiben eine Welt, die eintönig war, wüst und leer. **Fossilien** sind rar: Anscheinend gab es nicht viel, was versteinern konnte. In den Meeren feierten längst vergessen geglaubte Ökosysteme wie Bakterienriffe und Mikrobenmatten ihr Comeback, weil niemand sie mehr abfrass. Die Vielfalt war dahin.

Die Erde lag zu Beginn der Trias auf der **Intensivstation**. Wie desolat der Zustand des Meeres war, zeigten die Kohlenstoffisotope: Ihren Signalen zufolge war es zu warm, übersäuert, arm an Sauerstoff und reich an giftigem Schwefelwasserstoff.

Zunächst blieb es schwierig. Wirklich zu Ende war es erst nach fünf Millionen Jahren.

Die frühe Trias war die Zeit der **Opportunisten**, die nicht an eine kleine, begrenzte Nische gebunden waren. Weil sie sehr bescheiden waren in ihren Ansprüchen, verbreiteten sie sich global und konnten die Welt dominieren.

Zu den Opportunisten gehörte die Brachiopode *Lingula*: vielleicht, weil sie durch ihr Jahrmillionen währendes Schattendasein im allseits unbeliebten Brackwasser an den Überlebenskampf unter widrigen Umständen gewöhnt war. Vielleicht hatten ein paar von ihnen an einem geschützten Ort überlebt. Irgendwo während dieser ersten schwierigen Jahrmillionen der Trias müssen die Ahnen der späteren Artenvielfalt «überwintert» haben.

Lingula

Das schwerste Massenaussterben traf nicht nur die Meere, sondern auch die Kontinente. Wälder und Sümpfe verschwanden. Die Vegetation muss damals also eingebrochen sein – damit rissen auch an Land die Nahrungsketten. Die meisten Landwirbeltierarten starben aus, darunter auch viele der säugetieriähnlichen Reptilien. Aber sie brachten den entscheidenden Vertreter durch. Im Lauf der Trias entstanden dann sowohl **Säugetiere** als auch **Saurier,** und die waren die nächsten dominanten Lebewesen.

In der Trias, vor rund 240 Millionen Jahren, begannen die Ahnen der Saurier ihren Siegeszug. Das Massenaussterben am Ende des Perms hatte ihnen zwar auch zugesetzt, aber vor allem hatte es viele der säugetierähnlichen Reptilien ausgelöscht. Die anfangs kaum hundegrossen Vorfahren der Dinosaurier wuchsen schnell zur vielfältigen Gruppe der Landwirbeltiere heran. Und mehr noch: Sie eroberten auch den Luftraum und die Meere. Die ersten Saurier waren wahrscheinlich **Fleischfresser**. Die Pflanzenfresser unter den Sauriern kamen später dazu. Übrigens stammen nicht nur die Saurier aus dem Erdmittelalter, sondern auch Frösche, Schildkröten und Säugetiere.

An Land fasste das Leben wieder Tritt, nur vollkommen anders als zuvor. Auf Madagaskar (damals Teil von Pangäa) lebten vor 230 Millionen Jahren Herden *Prosauropoden*, frühe Dinosaurier (hinten im Bild) ebenso wie *Traversodontia* (Mitte) und *Chiniquodontiae* vorne links, die zu den säugetierähnlichen Reptilien gehören. Es gab auch pflanzenfressende Reptilien wie den *Rhynchosaurier* (vorne rechts). Schon bald sollten die Dinosaurier die Erde regieren, und die Säugetiere in den Schatten stellen.

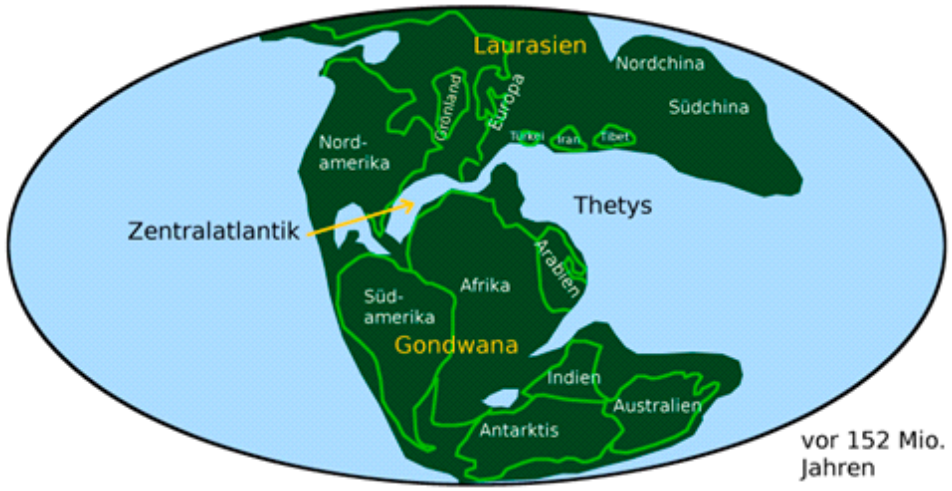
Ära	System	Epoche	Alter (Mio. Jahre)	Wichtige Ereignisse
Erdneuzeit (Kanäozoikum)	Quartär	Holozän	0,01	▲Landwirtschaft, Sesshaftigkeit
		Pleistozän	2,6	▲ erste Menschen
	Neogen	Pliozän	5,3	▲ Jurafaltung
		Miozän	23	
	Paläogen	Oligozän	34	○ 33 bis heute Känozoische Eiszeit
		Eozän	56	▲Alpenbildung
		Paläozän	66	✸ Kreide-Paläogen Massensterben
Erdmittelalter (Mesozoikum)	Kreide	obere	100	
		untere	145	
	Jura	oberes	161	
		mittleres	176	
		unteres	200	✸ Trias-Jura-Massensterben
	Trias	obere	228	▲erste Säugetiere
		mittlere	245	
		untere	251	✸ Perm-Trias Massensterben
Erdaltertum (Paläozoikum)	Perm		300	▲erste Reptilien
	Karbon		360	✸ Devon-Massensterben ○ 360-260 Karoo Eiszeit
	Devon		416	▲erste Amphibien
	Silur		444	✸ Silur-Massensterben
	Ordovizium		488	○ 460-420 Anden-Sahara Eiszeit
	Kambrium		542	▲erste Fische
Neues Proterozoikum	Ediacarium		635	○ 650-580 Marinoische/Gaskiers Eiszeiten
	Cryogenium		850	○ 750-700 Sturtische Eiszeit
	Tonium		1'000	
Mittleres Proterozoikum			1'600	▲ab 1'500 Eukaryoten
Frühes Proterozoikum			2'500	○ 2'400-2'100 Huronische Eiszeit
Archaikum			4'000	▲ab 2'700 Photosynthese, Cyanobakterien ▲ab 3'800 erste Einzeller
Hadaikum			4'600	
Urknall			13'700	

Jura

Zeitraum:

Vor 200 Millionen bis 145 Millionen Jahren. Diese Zeitperiode wird aufgeteilt in Malm (weisser), Dogger (brauner) und Lias (schwarzer) Kalk.

Plattentektonik:



Während des Juras zerbrach der Superkontinent Pangäa. Zunächst trennte sich der Nordkontinent Laurasia vom Südkontinent Gondwana. War die Tethys bis dahin in weiten Bereichen ein Flachmeer gewesen, das Landmassen geflutet hatte, entstanden nun zwischen Laurasia und Gondwana Tiefseebecken. Das war die Geburt des Nordatlantiks. Als er sich öffnete, entstanden die nordamerikanischen Kordilleren. Ausserdem fluteten Flachmeere weite Teile Nordamerikas und Europas. Damals zerfiel auch Gondwana. Australien und die Antarktis trennten sich, ebenso Indien und Madagaskar. Zuletzt verliess Südamerika den Verband. Durch diese Abspaltungen öffneten sich der Indische Ozean und der Südamerikas, was für die südamerikanischen Kordilleren sorgte. Afrika blieb allein zurück, drängte aber nach Norden. Dadurch begann sich die Tethys wieder zu schliessen, die Alpen entstanden. Indien «raste» nun allein mit einem Tempo von neun Metern pro Jahrhundert in Richtung Eurasien.

Umwelt:

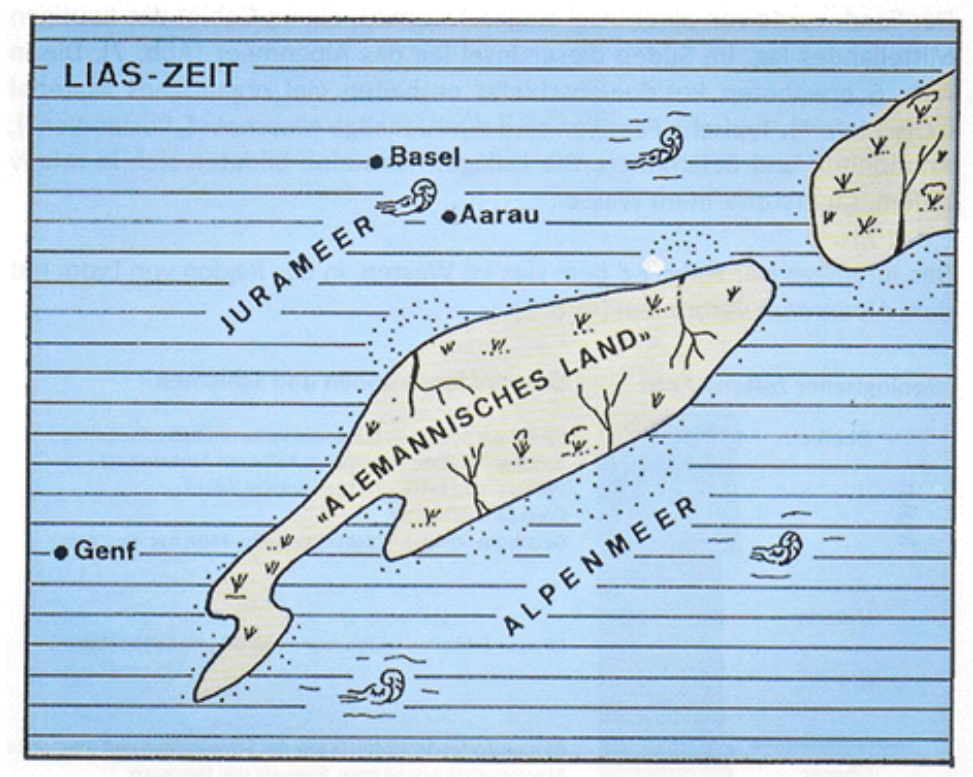
Atmosphärischer Sauerstoffanteil	Über das ganze Jura durchschnittllich etwa 26 Volumenprozent. Das entspricht etwa 130% des heutigen Niveaus
Atmosphärischer Kohlendioxidanteil	Durchschnittlich etwa 1950 ppm. Das ist das 7-fache des vorindustriellen Gehalts
Durchschnittliche Oberflächentemperatur	Etwa 16,5°C und damit 2,5°C über dem derzeitigen Wert

Entgegen der ursprünglichen Annahme war das Jurazeitalter keine ruhige, von klimatischer Stabilität geprägte Ära. Der aktive Vulkanismus sorgte für massive Klimaschwankungen, begleitet von einem Steigen und Absinken des Meeresspiegels um bis zu 75m, durchschnittlich alle 500‘000 bis 1 Million Jahre. Küstenlinien verschoben sich regelmässig, was Überprägungen und Schrägschichtungen in der Sedimentfolge erklärt. Obwohl noch keine Spuren kontinentaler Vereisung gefunden wurden, geht man davon aus, dass es in den Kaltzeiten des Juras auch zu weitläufigen Vergletscherung kam, anders seien die massiven Meeresspiegelschwankungen nicht zu erklären.

Im Durchschnitt lag die Temperatur der Erdoberfläche bei 16,5°C, nur etwa 2°C über unserem heutigen Durchschnitt und der Sauerstoff-Anteil der Atmosphäre lag etwa ein Drittel über der heutigen Norm mit etwa 26%, ein deutlicher Anstieg verglichen mit den 18% in der vorausgegangenen Trias. Der CO2-Anteil der Atmosphäre lag beim etwa Fünffachen des heutigen Werts, auch dieser Wert war im Vergleich zur Trias gestiegen.

Geologie:

Während der Zeit des Juras veränderte sich die Landschaft grundlegend. Die Nordschweiz wurde von Südwesten her von einem meist flachen, teilweise auch etwas tieferen Meer überflutet, in dem reiche Tierfauna lebte.



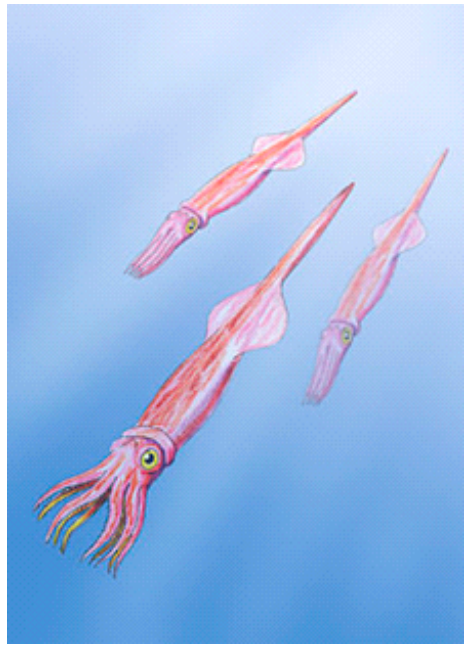
Ablagerungen enthalten versteinerte Muscheln, Krebse, Landpflanzen und Seeigel. Der Oberteil des Lias (vor 200 Millionen Jahren) wird dominiert durch Mergel mit kalkigen und feinsandigen Einschaltungen. Der Sand wurde von einer Insel eingeschwemmt, die im Gebiet des heutigen Mittellandes lag. Im Süden dieser Insel lag das Alpenmeer. Vor 170 bis 160 Millionen Jahren lag der westliche Teil des heutigen Juragebirges unter seichtem Wasser, im Osten hingegen war das Meer tiefer. Zu dieser Zeit öffnete sich das Jurameer gegen Süden, zum Alpenmeer.

Die Gesteine der **Säntis**-Decke wurden über einen Zeitabschnitt von gegen 100 Millionen Jahren abgelagert. Es handelt sich dabei um marine Sedimentgesteine, welche in variablen Meerestiefen gebildet wurden und eine Mächtigkeit von rund 600m erreichen. Während der Sedimentation sank dabei der Untergrund langsam ab, wobei das Meer öfters nur eine geringe Wassertiefe hatte. Bei subtropischem bis tropischem Klima entstand hauptsächlich durch Organismen gebildeter Kalk. Wichtige, an der Kalkbildung beteiligte Organismen sind Korallen, Kalkschwämme und andere Mikroorganismen. Riffbildende Korallen leben bei ausreichenden Lichtverhältnissen in Meerestiefen von bis zu 80m. Kalksedimente können zusätzlich auch durch eine direkte Ausfällung von Kalk aus dem Meereswasser entstehen. Später wurde der Kalkschlamm verfestigt und wandelte sich in den stabileren Calcit um, welcher Hauptbestandteil des Kalksteins ist.

Flora und Fauna

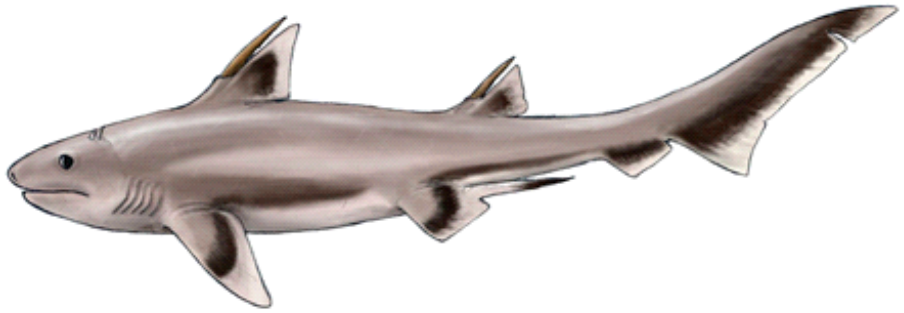
In den mesozoischen Meeren, also denen des Erdmittelalters, steuerte das Leben auf einen neuen Höhepunkt zu. Es war vielfältig, wie nie zuvor und die Ozeane ernährten auch bis dato nicht gekannte Riesenfische und gewaltige Meeresreptilien. Am anderen Ende der Nahrungskette ging es dem Plankton prächtig, denn vom Lande gab es reichlich Dünger. Auf den kleineren Kontinenten, die nun zunehmend durch den Zerfall Pangäas entstanden, herrschten längst nicht mehr so extreme, wüstenartige Bedingungen. Das warme Klima des Erdmittelalters tat ein Übriges: Die Pflanzen gediehen und sorgten dafür, dass grosse Mengen von leicht bioverfügbaren Nährstoffen in die Ozeane gelangten.

Mit dem Mesozoikum war die grosse Zeit der **Ammoniten** angebrochen. Es gab sie in allen erdenklichen Variationen: als «klassische» flache Spiralform mit Rippen, Wellen, Stacheln oder glatt. Manche streckten ihr Gehäuse, andere bogen sie zu «Bischofsstäben» oder «Büroklammern». Als «Grosswildjäger» sieht man sie nicht: Wahrscheinlich suchten einige Ammonitenarten nach Aas, während die meisten mit ihren Tentakeln nach kleiner, schwimmender Beute oder nach Plankton angelten.



Belemniten

Während viele Ammoniten also eher sanfte Riesen waren, waren ihre Zeitgenossen, die **Belemniten**, von anderem Kaliber. Ihr Körperbau war ganz auf die Jagd ausgelegt. Riesig wuchsen sie ausserdem, vor allem im Jura, als *Megateuthis giganteus* drei Meter lang wurde.



Hybodus

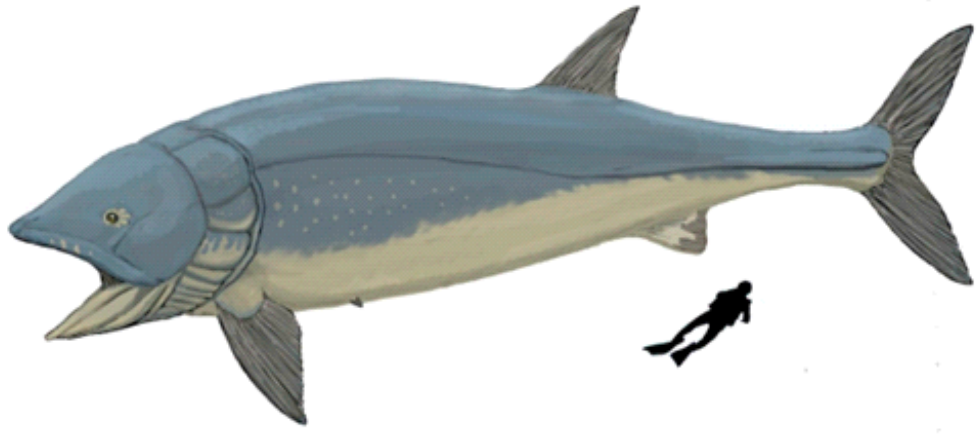
Die Belemniten waren eine beliebte Beute der Haie, *Hybodus*. Diese **Haie** waren im Mesozoikum sehr erfolgreich. Aber auch für sie wuchsen die Bäume nicht in den Himmel: Sie mussten sich zunehmend mit der Konkurrenz durch andere Knorpelfische auseinandersetzen. Sie schafften es aber während des Juras die Rochen und die modernen Haie abzuzweigen.

Im Erdmittelalter trieben zwei Faktoren die Evolution der Haie und ihrer Verwandten an: erstens die Konkurrenz durch die oft riesigen **Meeresreptilien** und zweitens die Fische. Besonders die **Knochenfische** modernisierten ihren Bestand erheblich. Die echten Knochenfische tauchten auf, die heute mit mehr als 28‘000 Arten die grösste Gruppe unter den Fischen stellen. Das Geheimnis ihres Erfolgs ist ihre enorme Anpassungsfähigkeit.

Zu den Knochenfischen zählte auch der *Xiphactinus*, eines der vielen Meeresungeheuern des Erdmittelalters. Sie wurden bis zu sechs Meter lang.

Xiphactinus, Rekonstruktion

Ein anderes dieser Monster war *Leedsichthy*s, der im Jura lebte. Das Tier brachte es auf bis zu 22 Meter.



Leedsichthys

Das Erdmittelalter war die Zeit der Echsen. Schon in der späten Trias eroberten die Reptilien die Kontinente. Kaum waren sie entstanden zog es sie in die Lüfte - und wieder zurück ins Meer.

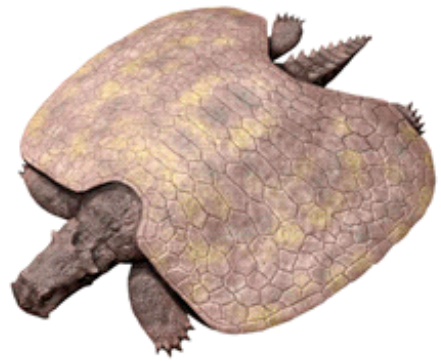
Flugsaurier

Flugsaurier (*Pterosaurier*) sind die grössten Lebewesen, die sich jemals aus eigener Kraft in die Lüfte erheben konnten. Mit einer Flügelspannweite von bis zu 12 Metern und einem Gewicht von rund 100 Kilogramm beherrschten sie in der Jura- und Kreidezeit während mehr als 150 Millionen Jahren den Luftraum.

In der Trias stapften die ersten **Schildkröten** übers Land, im Jura schickten sie bereits Vertreter in die Ozeane. Ganz ähnlich hielten es die **Krokodile**, die ihre Beine zu Paddeln umbildeten und auch den Schwanz für den Antrieb einsetzten.

Dass die Reptilien die Ozeane eroberten, war naheliegend, schliesslich war der Konkurrenzdruck an Land sehr hoch, und als der Superkontinent Pangäa zu zerbrechen begann, überfluteten flache, fruchtbare Meere weite Bereiche der Kontinente. Und die Reptilien liessen sich locken und entwickelten sich zu wahren Meeresungeheuern, allerdings zu solchen, die immer wieder zum Atmen an die Oberfläche zurückkehren mussten, so fischähnlich manche von ihnen auch ausgesehen haben mögen.

In Küstennähe lebten die *Palcodontia*. Sie ähnelten Krokodilen, die in einen Schildkrötenpanzer gekrochen sind. Trotz ihrer Panzerung überlebten sie das Ende der Trias nicht – ebenso wenig wie ihre Verwandten, die Bastardechsen.

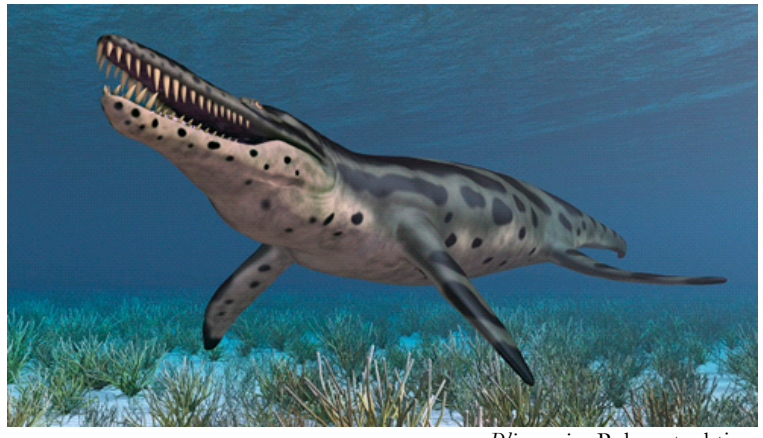


Palcodontia, Rekonstruktion

Bevor die Bastardechsen verschwanden, entwickelten sich aus ihnen heraus die **Plesiosaurier**, die so gross wurden, wie Raubwale heute. Dank ihren zu grossen, flügelartigen Paddeln umgestalteten Beine flogen sie durchs Wasser. Auf dem extrem langen Hals mit bis zu 72 Wirbeln sass ein kleiner Kopf, mit dem wohl nach Schlangenart blitzschnell vorgestossen werden konnte.

Plesiosaurier

Während die Plesiosaurier in Küstennähe blieben, hatte es die **Pliosaurier** auf die hohe See verschlagen. Ihr Hals war zwar mit 13 Wirbeln verhältnismässig kurz, ihr Kopf hingegen mit vier Metern umso grösser. Die Pliosaurier zählten zu den grössten Raubtieren der jurassischen Ozeane.



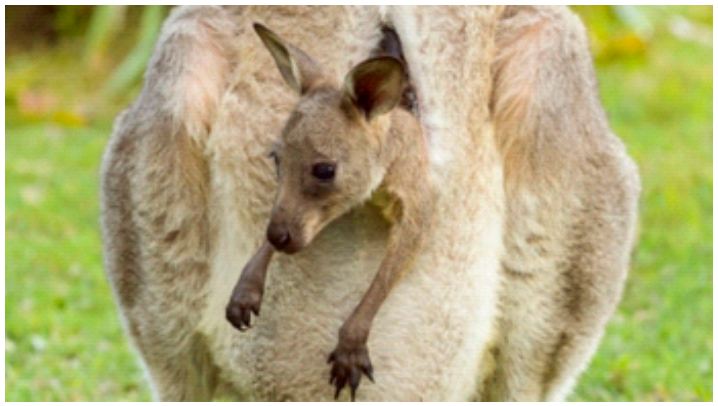
Pliosaurier, Rekonstruktion

Vor 160 Millionen Jahren, im Jura, erstreckte sich in der heutigen Liaoning-Provinz in China eine Seenlandschaft, in der kleine Dinosaurier lebten, die Ahnen der Vögel, dazu Amphibien, Insekten – und kleine Säugetiere. Zum Beispiel **Juramaia sinensis**, eines dieser nur wenige Gramm schweren **Spitzmauswesen**. Die Backenzähne des Tiers verraten etwas ganz Besonderes. *Juramaia* steht im evolutionären Stammbaum ganz nahe an der 'Astgabel', an der sich die Entwicklung von **Beuteltieren** und **Plazentatieren** trennte. *Juramaia* besass zwar noch keine Gebärmutter, steht aber den modernen Plazentatieren sehr viel näher als den modernen Beuteltieren. Man kann das Tier unserer Ahnenreihe zuordnen. Damit ist *Juramaia* die Urgrossmutter einer sehr erfolgreichen Gruppe. Immerhin gehören heute 94 Prozent aller modernen Säugetieren zu ihren Nachfahren, vom Wal bis zum Menschen. In der Säugetierevolution spaltete sich eine Gruppe nach der anderen aus den gemeinsamen Vorfahren ab: als Erstes die **Kloakentiere**, dann die Plazentatiere und die Beuteltiere.

Juramaia sinensis, Rekonstruktion

Als primitivste der drei lebenden Säugetiergruppen gelten die **Kloakentiere** (Ursäuger), zu denen Schnabeltier und Ameisenigel gehören. Sie bringen keinen lebendigen Nachwuchs zur Welt, sondern legen Eier und sind damit so etwas wie Zeitreisende, die übrig geblieben sind von den Anfängen der Säuger.

Dann gibt es die **Beuteltiere**, die winzige Junge zur Welt bringen. Ihre Mutter feuchtet das Fell an, damit sie in dem Beutel kriechen können, in dem sie getragen und gesäugt werden. Beuteltiere tauchten in der Kreidezeit in Nordamerika auf, von wo sie die Welt besiedelten. Heute leben sie noch in Australien und Südamerika.



Am durchsetzungsfähigsten und am verbreitetsten waren die **Plazentatiere**, die ihre Jungen vor der Geburt in der Gebärmutter heranziehen und nach der Geburt säugen.

Als die Trias vor 201 Millionen Jahren zu Ende ging, traf ein neuerliches **Massenaussterben** die Welt. Im Wasser und an Land verschwanden 50 bis 80 Prozent aller Arten. Zu den Opfern zählten die Conodonten und die Placodontia, ebenso viele Arten der Ammoniten, die Plesio- und die Ichthyosaurier. An Land fielen unter anderem die letzten Therapsiden heraus, die Vorfahren der Dinosaurier. Allerdings erholten sich die Überlebenden diesmal während des Juras schnell und brachten neue Arten hervor.

Auslöser für das Massenaussterben waren wahrscheinlich erneut Flutbasalte, denn damals öffnete sich der Zentralatlantik. In einem Areal, grösser als Brasilien und Argentinien zusammen, stapelten die Ausbrüche kilometerdicke Basaltdecken übereinander. Das Klima geriet aus den Fugen, weil die Basalte kohlenstoffreiche Sedimente durchbrachen, und Schwefelverbindungen machten den Regen sauer.

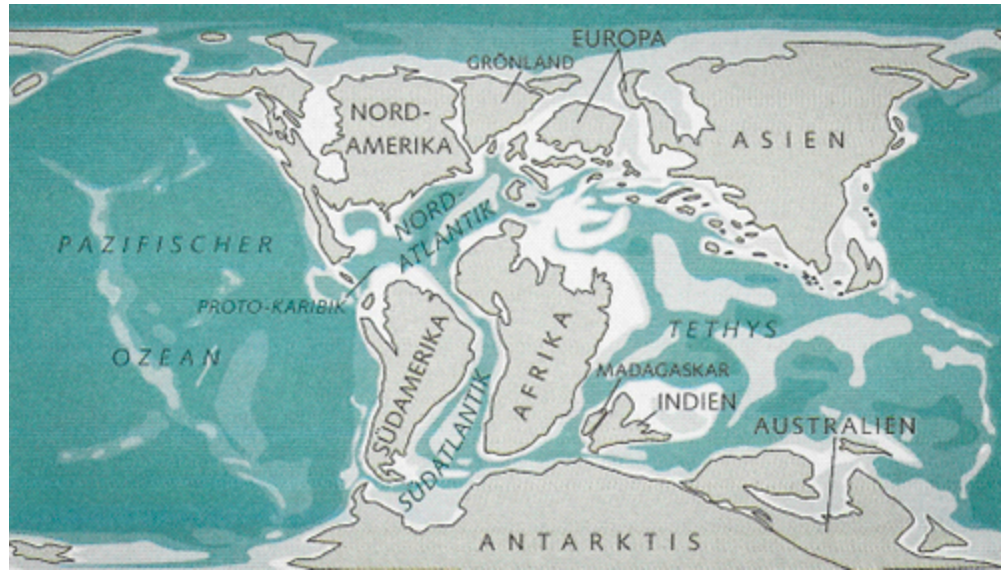
Ära	System	Epoche	Alter (Mio. Jahre)	Wichtige Ereignisse
Erdneuzeit (Kanäozoikum)	Quartär	Holozän	0,01	▲Landwirtschaft, Sesshaftigkeit
		Pleistozän	2,6	▲ erste Menschen
	Neogen	Pliozän	5,3	▲ Jurafaltung
		Miozän	23	
	Paläogen	Oligozän	34	○ 33 bis heute Känozoische Eiszeit
		Eozän	56	▲Alpenbildung
		Paläozän	66	✸ Kreide-Paläogen Massensterben
Erdmittelalter (Mesozoikum)	Kreide	obere	100	
		untere	145	
	Jura	oberes	161	
		mittleres	176	
		unteres	200	✸ Trias-Jura-Massensterben
	Trias	obere	228	▲ erste Säugetiere
		mittlere	245	
		untere	251	✸ Perm-Trias Massensterben
Erdaltertum (Paläozoikum)	Perm		300	▲ erste Reptilien
	Karbon		360	✸ Devon-Massensterben ○ 360-260 Karoo Eiszeit
	Devon		416	▲ erste Amphibien
	Silur		444	✸ Silur-Massensterben
	Ordovizium		488	○ 460-420 Anden-Sahara Eiszeit
	Kambrium		542	▲ erste Fische
Neues Proterozoikum	Ediacarium		635	○ 650-580 Marinoische/Gaskiers Eiszeiten
	Cryogenium		850	○ 750-700 Sturtische Eiszeit
	Tonium		1’000	
Mittleres Proterozoikum			1’600	▲ ab 1'500 Eukaryoten
Frühes Proterozoikum			2’500	○ 2'400-2'100 Huronische Eiszeit
Archaikum			4’000	▲ ab 2'700 Photosynthese, Cyanobakterien ▲ ab 3'800 erste Einzeller
Hadaikum			4’600	
Urknall			13’700	

Kreide

Zeitraum:

145 bis 65 Millionen Jahre vor heute

Plattentektonik:



Die Erde während der Kreidezeit: Seit dem Jura hatte sich der Zerfall Pangäas beschleunigt, die Bruchstücke waren Nordamerika, Europa, Asien und Gondwana. Dann zerbrach Gondwana selbst: Australien und Antarktika spalteten sich ab, Afrika samt Südamerika, dann Indien. Der Südatlantik öffnete sich, und es entstand eine Verbindung zum Nordatlantik.

Umwelt:

Das Klima erwärmte sich ab ca. 135 Millionen Jahren vor heute deutlich, was in einem ansteigenden Meeresspiegel resultierte. Diese Klimaerwärmung wurde durch die westpazifischen Superplumes (Aufstieg von heissem Material im Erdinnern) weiter verstärkt, sodass die Durchschnittstemperatur und der Meeresspiegel auf ein Rekord-Hoch stiegen. Mit durchschnittlich 23°C Bodentemperatur lag die Kreidezeit 8,5°C über dem heutigen Jahresmittel. Mit circa 30% Atmosphärenanteil stieg auch der Sauerstoffgehalt der Luft auf ein Niveau, das seit dem Karbonzeitalter nicht mehr erreicht worden war. Gleichzeitig sank der CO2-Gehalt der Luft um ein Fünftel, auf nur noch das Vierfache unseres heutigen Werts.

Die Polkappen blieben vermutlich für die gesamte Dauer der Kreidezeit eisfrei. Der Temperaturhöhepunkt der Erwärmung wurde vor ca. 90 Millionen Jahren erreicht, danach folgte eine langsame Abkühlung.

Insgesamt war das Klima in der Kreidezeit sehr stabil. Erwärmungen und Abkühlungen fanden über lange Zeiträume statt und es ist anzunehmen, dass es keine starken Temperaturschwankungen im Sinne von Warm- oder Kaltzeiten gab.

Geologie:

Die Kreide bekam ihren Namen im Jahr 1822 durch den Geologen Jean Baptiste Julien d'Omalius d'Halloy. Er wählte ihn aufgrund des hohen Kalkgehalts in den gefundenen Fossilien von Muscheln, Krebstieren, Korallen, Einzellern und Schnecken. Die Gesteinsform "Kreide" ist eine Art Kalkstein.

Kreide wurde hauptsächlich durch **Kalkalgen** gebildet. Die Kalkalgen lebten vor etwa 70 Mio. Jahren im lichtdurchfluteten Oberflächenwasser eines Meeres, das u.a. Norddeutschland bedeckte. Nach ihrem Tod sanken sie auf den Meeresboden und bildeten im Laufe der Zeit mächtige Ablagerungen aus Kalkschlamm. Dieser Kalkschlamm ist heute z.B. in Form der berühmten Rügener Kreide überliefert.

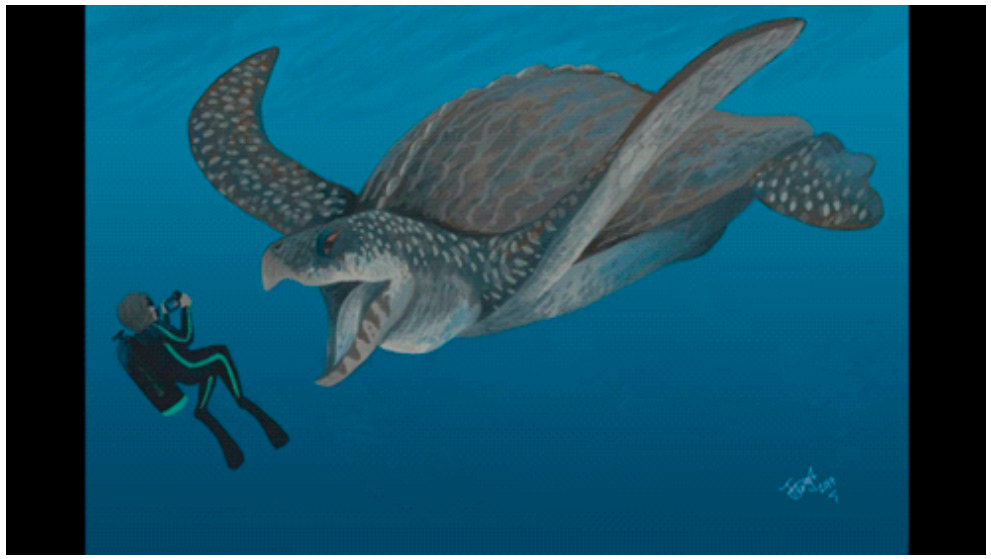
Klippe aus Rügener Kreide

Kreidesedimente fehlen im zentralen und östlichen Jura, unter weiten Teilen des Mittellandes und bis auf den nordöstlichen Teil der helvetischen Plattform. Es stellt sich die Frage: Ragten diese Regionen während der Kreide aus dem Wasser? Oder wurden die einst abgelagerten Kreidesedimente vor der Bildung der Molasse erodiert?

Fauna und Flora:

Vor rund 145 Millionen Jahren begann mit der Kreide die letzte Phase des Erdmittelalters. Damals entwickelte sich in den flachen, lichtdurchfluteten Meeresbereichen der Schelfe oder Inseln ein neues Ökosystem: Seegraswiesen überzogen im flachen Wasser die sandigen Böden.

Damals zeichneten sich die modernen Meere immer deutlicher ab, auch wenn noch Riesenammoniten mit einem Durchmesser von über zwei Metern durchs Wasser schwebten und Meeresreptilien mit modernen Haien, Rochen und Echten Knochenfischen konkurrierten. In der Bodenfauna tauchten grosse Krebse und Krabben mit Scheren zum Zerquetschen auf.



Archelon, Rekonstruktion

Archelon aus der Oberkreide war die grösste **Schildkröte**, die jemals gelebt hatte. Er wurde etwas mehr als vier Meter lang und die Spitzen der ausgebreiteten Vorderpaddel lagen dann vier Meter auseinander.

Archelon lebte vor rund 75 bis 65 Millionen Jahren. Er schwamm durch die flachen Gewässer, die weite Teile des zentralen Nordamerikas überflutet hatten.

Rudisten

Ausserdem versuchten sich die **Muscheln** in den flachen Schelfmeeren der Tethys als beeindruckende Riffbauer, und zwar mit den **Rudisten**, also Muscheln, die wie Korallen lebten. Dazu hatten sie die untere Klappe ihrer Schalen kegelförmig umgebaut und die obere zu einem Deckel verwandelt. Wo die Plattentektonik den Untergrund schnell absinken liess, konnten die wuchskräftigen Muscheln mit den Veränderungen Schritt halten und bis zu 1‘000 Meter dicke Schichten aufbauen.

Die Party der Rudisten währte nicht ewig. Sie verschwanden 100‘000 Jahre vor dem Ende der Kreide. Auch die Meeresreptilien gingen damals den Weg alles Irdischen. Meereskrokodile sah man nur noch selten.

Zu den wenigen **Meeresreptilien**, die noch jagten, gehörten die Plesiosaurier. Auch sie hatten ihren Höhepunkt überschritten, brachten aber noch etwas Besonderes hervor: die *Elasmosaurier* – 14 Meter lange Riesen, deren Körper zu mehr als die Hälfte aus einem Hals bestand, auf dem ein recht kleiner Kopf sass.

Elasmosaurier, Rekonstruktion

Vor 70 Millionen Jahren verschwanden die Elasmosaurier. Länger hielt nur die Gruppe der **Mosasaurier** durch.

Mosasaurier, Rekonstruktion

Sie sahen aus wie langgezogene Komodowarane. Am Ende der Kreidezeit gehörten sie zu den gefährlichsten Räuber der Ozeane. Einige Arten brachten es sogar auf eine Länge von bis zu 17 Metern.

Hesperornis, Rekonstruktion

Zur Beute der Mosasaurier wird auch immer wieder ein **Hesperornis** gehört haben. Diese flugunfähigen und fast flügellosen Tauchvögel sammelten sich an den Küsten Nordamerikas in grossen Kolonien. Ihr Element war das Meer. Dort erwiesen sich diese anderthalb Meter grossen Tiere dank ihrer kräftigen Beine und übergossen Füsse als geschickte Schwimmer. Sie zählten zu den letzten Wundern des Erdmittelalters – das nun bald zu Ende ging.

Wie schon in der vorausgehenden Jura-Zeit wurde die Fauna an Land von Dinosauriern beherrscht. Die *Titanosauria* der Oberkreide waren die grössten je lebenden **Landlebewesen**. Mit einer Länge von bis zu 30 Metern und einer Höhe von sechs Metern vom Boden bis zur Hüfte gilt das Tier als wahrer Koloss der Kreidezeit. Er wog 60 bis 88 Tonnen. Knochen des Pflanzenfressers, der vor etwa 95 Millionen Jahren lebte, waren vor 15 Jahren im Südwesten von Queensland entdeckt worden.

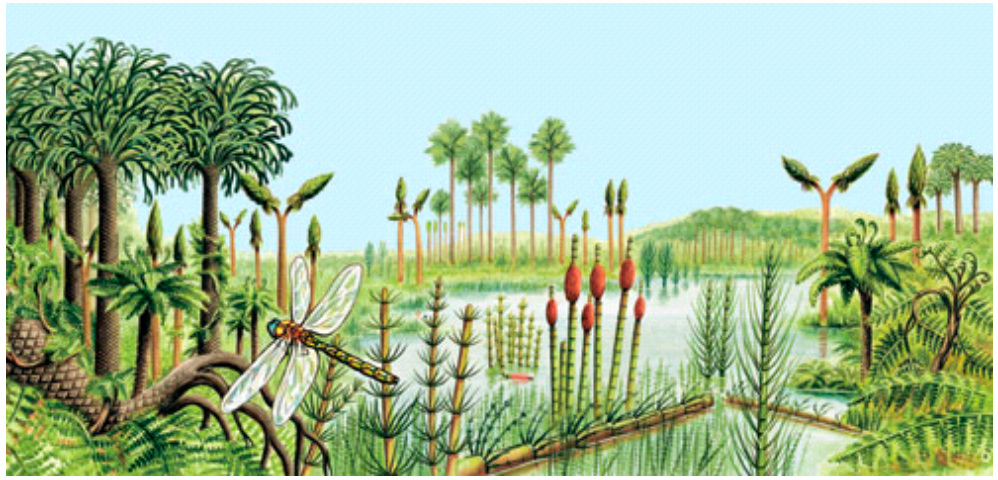
Titanosaurier, Rekonstruktion

Fossilien des Tyrannosaurus fanden sich in verschiedenen Gesteinsformationen im westlichen Nordamerika, die auf die letzten drei Millionen Jahre der Kreidezeit datiert werden, also vor etwa 68 bis 66 Millionen Jahren. Tyrannosaurus gehörte damit zu den letzten Nichtvogel-Dinosauriern, die bis zum Kreide-Tertiär-Massenaussterben existierten.

Tyrannosaurus Rex

Belege zeigen, dass Säuger bereits in der frühen Kreidezeit eine gewisse ökologische Vielfalt entwickelt hatten und begannen, aus dem „Schatten der Dinosaurier“ herauszutreten. Besonders instruktiv ist *Repenomamus giganticus,* der grösste bekannte Säuger des Mesozoikums, mit einer Schädellänge von knapp 20 Zentimetern und einem geschätzten Lebendgewicht von 12 bis 14 Kilogramm. In seinem Rippenkorb wurden Überreste von Jungtieren der Dinosauriergattung *Psittacosaurus* gefunden, was als erster unzweifelhafter Nachweis dafür gedeutet wird, dass Säugetiere in der Kreidezeit Dinosauriern nachstellten und diese auch frassen.

In der Unterkreide waren noch Bärlapppflanzen, Farne, Baumfarne, Ginkos und Nadelbäume die vorherrschenden **Pflanzen**.



Ära	System	Epoche	Alter (Mio. Jahre)	Wichtige Ereignisse
Erdneuzeit (Känozoikum)	Quartär	Holozän	0,01	▲Landwirtschaft, Sesshaftigkeit
		Pleistozän	2,6	▲ erste Menschen
	Neogen	Pliozän	5,3	▲ Jurafaltung
		Miozän	23	
	Paläogen	Oligozän	34	○33 bis heute Känozoische Eiszeit
		Eozän	56	▲Alpenbildung
		Paläozän	66	✸Kreide-Paläogen Massensterben
Erdmittelalter (Mesozoikum)	Kreide	obere	100	
		untere	145	
	Jura	oberes	161	
		mittleres	176	
		unteres	200	✸Trias-Jura-Massensterben
	Trias	obere	228	▲erste Säugetiere
		mittlere	245	
		untere	251	✸Perm-Trias Massensterben
Erdaltertum (Paläozoikum)	Perm		300	▲erste Reptilien
	Karbon		360	✸Devon-Massensterben ○360-260 Karoo Eiszeit
	Devon		416	▲erste Amphibien
	Silur		444	✸Silur-Massensterben
	Ordovizium		488	○460-420 Anden-Sahara Eiszeit
	Kambrium		542	▲erste Fische
Neues Proterozoikum	Ediacarium		635	○650-580 Marinoische/Gaskiers Eiszeiten
	Cryogenium		850	○750-700 Sturtische Eiszeit
	Tonium		1’000	
Mittleres Proterozoikum			1’600	▲ab 1'500 Eukaryoten
Frühes Proterozoikum			2’500	○2'400-2'100 Huronische Eiszeit
Archaikum			4’000	▲ab 2'700 Photosynthese, Cyanobakterien ▲ab 3'800 erste Einzeller
Hadaikum			4’600	
Urknall			13’700	

Paläogen

Zeitraum:

65 bis 23 Millionen Jahre vor heute, Aufteilung in Paläozän, Eozän und Oligozän.

Plattentektonik:

Während des Paläogens verschwanden zwischen Afrika und Europa die Reste der Tethys. Australien und Antarktika hatten sich zwar getrennt, lagen jedoch dicht beieinander. Nord- und Südamerika waren noch nicht miteinander verbunden. Dafür kollidierte die Indische Platte mit Eurasien, der Himalaya begann zu wachsen.

Umwelt:

Atmosphärischer Sauerstoffanteil	Über das ganze Paläogen durchschnitllich etwa 26 Volumenprozent. Das entspricht etwa 130% des heutigen Niveaus
Atmosphärischer Kohlendioxidanteil	Durchschnittlich etwa 500 ppm. Das ist das Doppelte des vorindustriellen Gehalts
Durchschnittliche Oberflächentemperatur	Etwa 18°C und damit 4°C über dem derzeitigen Wert

Ein **Eiszeitalter** ist ein Abschnitt der Erdgeschichte, in dem die Festlandsbereiche mindestens einer Polarregion vergletschert beziehungsweise von Eisschilden bedeckt sind. Nach einer anderen, enger gefassten und weniger gebräuchlichen Definition wird der Begriff Eiszeitalter erst dann verwendet, wenn sowohl auf der Nordhalbkugel als auch auf der südlichen Hemisphäre ausgedehnte Vergletscherungen auftreten.

Nach der ersten Definition befindet sich die Erde seit rund 34 Millionen Jahren im **Känozoischen Eiszeitalte**r, da seit dieser Zeit die **Antarktis** vergletschert ist. Nach der zweiten Definition begann das derzeitige Eiszeitalter erst vor etwa 2,6 Millionen Jahren, seit auch die **Arktis** dauerhaft und in grösserem Umfang mit Eis bedeckt ist. Dieser Zeitraum entspricht annähernd dem geologischen Zeitabschnitt des Quartärs (vor 2,6 Millionen Jahren bis heute).

Schon in der Kreide hatte ein langsamer **Klimawandel** eingesetzt. Die Erde befand sich in einem zunächst sachten Übergang vom Treib- zum Kühlhaus. Die Gründe für den Umschwung waren vielschichtig und wir haben erst eine blasse Ahnung davon, wie die Klimamaschine funktioniert. Unter anderem spielte die Plattentektonik eine Rolle. Im Erdmittelalter, als sie Pangäa und dann Gondwana und Laurasia geduldig Stück für Stück auseinandergenommen hatte, war sie über lange Zeit ungeheuer aktiv gewesen.

Im Paläogen wuchsen in tektonischen Senkungsgebieten dichte Wälder: Wie im Karbon waren sie der Rohstoff, aus dem mächtige Kohlelagerstätten werden sollten. Und genau wie im Erdaltertum entzogen sie der Atmosphäre auch reichlich Kohlendioxid in Form von Biomasse. In dieser Phase breiteten sich auch endlose Grasländer aus, die nicht nur die Ökosysteme an Land bereicherten, sondern auch ins Klima eingriffen und den Treibhauseffekt schwächten.

Besonders wichtig waren aber wohl die Veränderungen in den Polarregionen: In der **Antarktis** arbeitete die Plattentektonik intensiv am Projekt «Eiszeit». Vor 65 Millionen Jahren war das Klima dort subtropisch, Beuteltiere fühlten sich ebenso wohl wie etliche Millionen Jahre zuvor die altertümlichen Saurier, die sich dort lange halten konnten. Als sich dann vor 40 Millionen Australien samt Neuguinea von der Antarktis trennte, begannen die neuen Meeresströmungen das warme Wasser von ihren Küsten abzudrängen.

Aber das war nur das Vorspiel. Das Klima schwankte, war mal wärmer, mal kühler, mal gab es Gletscher, mal verschwanden sie wieder. Dann öffnete sich vor 23 Millionen Jahren die Drake-Passage zwischen der Antarktis und Südamerika: Seitdem rauscht ein starker Meeresstrom rund um den Kontinent über den Pol und hält die Wärme von ihm fern. Weil gleichzeitig der Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre sank, kühlte sie mehr und mehr aus.

In der **Arktis** lief der Prozess ähnlich ab. Nachdem es dort während des gesamten Mesozoikums angenehm warm gewesen war und sich der Abkühlungstrend erst spät abgezeichnet hatte, kam es vor 56 Millionen Jahren zu einem ungewöhnlichen Temperaturmaximum. Es herrschten plötzlich subtropische Verhältnisse. Es setzte schlagartig ein galoppierender Treibhauseffekt ein – das **Paläozän-Eozän-Wärmemaximum**. In der Arktis lag die Oberflächentemperatur des Ozeans bei rund 24 Grad Es war sehr regnerisch und selbst in der halbjährlichen polaren Winternacht sank die Temperatur nicht unter 13 Grad. An den Ufern wuchsen Zypressen, Mammut- und Zitronenbäume und im Meer schwammen tropische und subtropische Planktonarten. 200‘000 Jahre dauerte diese höchst abnorme «Hitzewelle».

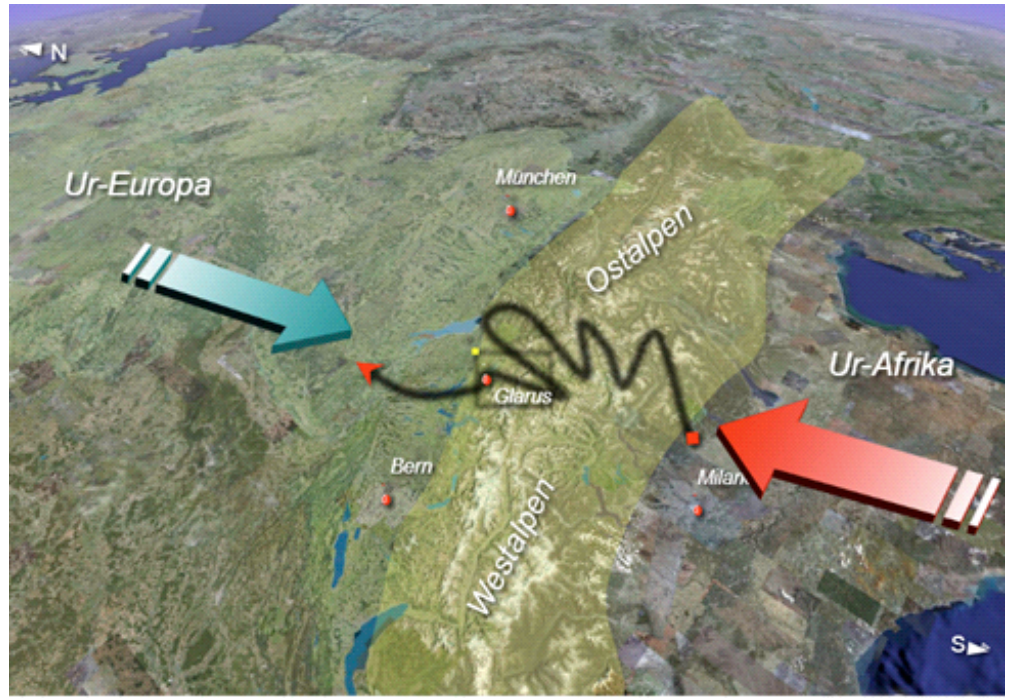
Was passiert sein könnte, darüber gibt es lediglich Theorien. So könnten Gashydrate, also gefrorene Knollen aus Wasser und Methan ein Grund sein. Sie liegen tief im Ozeanboden und sind nicht sonderlich stabil. Durch z.B. steigende Temperaturen im Tiefseewasser könnten sie schlagartig in grossen Mengen schmelzen und in kürzester Zeit Unmengen an Methan freisetzen. Gelangt es in die Atmosphäre, heizt Methan noch mehr ein als Kohlendioxid.

Nun lösen sich grosse Mengen Gashydrate nicht von allein auf. Es gab auch keine Menschen, die so viel Klimagase freisetzten, das den Treibhauseffekt ankurbeln konnte. Aber es gab etwas, das ihre Rolle übernahm: vor 56 Millionen Jahren riss ein Flutbasaltausbruch den Nordatlantik auf. Das Kohlendioxyd, das er ausstiess, sorgte für einen ersten Temperaturanstieg – und könnte das Gashydrat-Domino angestossen haben, mit allen möglichen Folgen für die Ökosysteme weltweit.

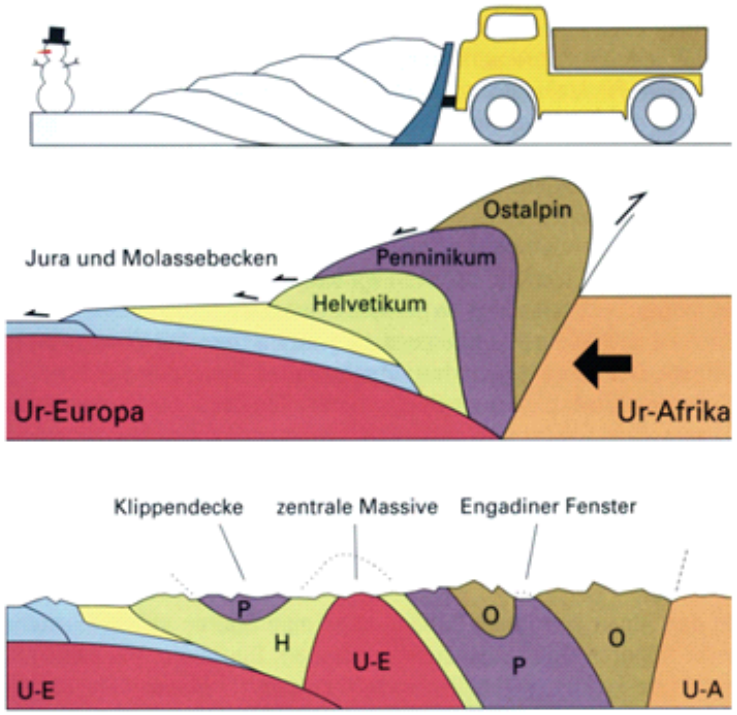
Doch bald darauf setzte sich die Abkühlung wieder durch. Als vor 49 Millionen Jahren über dem Pol die Entengrütze blühte, lagen die Oberflächentemperaturen nur noch bei rund 20 Grad. Ein paar Millionen Jahre später müssen die ersten Gletscher gewachsen sein. Aber noch immer siegten die Gletscher nicht: Das Klima schwankte zwischen warm und kalt.

Damals begann eine klimatisch instabile Zeit. Isotopenuntersuchungen legen nahe, dass es im Laufe des Paläozäns immer wieder kurze, scharfe «Wärmeausbrüche» gegeben hat, allerdings sehr viel kleiner als das Ereignis vor 56 Millionen Jahren. Jedes Mal stieg die Temperatur innerhalb weniger Jahrtausende an, um etwas langsamer wieder abzufallen.

Geologie:



Vor gut 100 Millionen Jahren begann sich der afrikanische Kontinent gegen Europa hinzubewegen. Dabei wurden die Alpen langsam in die Höhe gedrückt: Bisher flach liegende Gesteinsschichten wurden durch gewaltige Kräfte aufeinander geschoben, verfaltet und zu Bergen aufgestapelt. Unter dem Gewicht des entstehenden Gebirges senkte sich das Gebiet des heutigen Mittellandes ab, wobei es zur Ausbildung eines Vorlandbeckens kam. Dieses Becken war anfangs so tief, dass vor ungefähr 34 Millionen Jahren eine Verbindung zum damaligen Meer zustande kam. Aus diesem Grund war das Vorlandbecken mit Meerwasser gefüllt. Grosse Flüsse, die aus den Alpen in dieses Meer mündeten, führten Material mit und lagerten es im Meer ab (Ablagerungsgesteine = Sedimente). Weil sich das Vorlandbecken allmählich mit Sedimenten füllte und eine weltweite Meeresspiegelabsenkung einsetzte, verschwand das Meer wieder. In der Folge lagerten riesige Flusssysteme Unmengen von Gestein und Sand im nördlichen Alpenvorland ab. Es entstanden mächtige Schuttfächer, und wo Flüsse in Seen mündeten, bildeten sich Deltas.



Schematische Darstellung zur alpinen Deckenbildung

Situation in Zentral- und Südeuropa während des frühen Oligozäns
(vor 34 Millionen Jahren)

Fauna und Flora:

Das Erdmittelalter endete vor 65 Millionen Jahren – mit einem **Massenaussterben**. Und zwar dem berühmtesten, dem, das nach 150 Millionen Jahren der Existenz der **Dinosaurier** ein furioses Ende setzte: sei es durch den Einschlag eines Himmelskörpers oder durch den Ausbruch der Dekkan-Basaltdecke oder durch beides. Auch ob es den Sauriern vor der Katastrophe noch gut ging, ob sie auf dem absteigenden Ast oder bereits verschwunden waren, ist Gegenstand wissenschaftlicher Debatten. Jedenfalls traf die Krise das Leben an Land und in den Meeren schwer. In den Ozeanen zerrissen Nahrungsnetze: In vielen Gesteinsproben aus der Zeit unmittelbar nach der Katastrophe verraten Kohlenstoffisotope, dass die Planktonprodukton eingebrochen war.

Welcher «Killer» auch immer zuschlug, er war selektiv in seiner Opferwahl.

So kamen Kieselalgen, die ihr Skelett aus Opal aufbauen, recht gut durch die Krise. Wer jedoch von den Planktonorgansimen auf Kalk zum Aufbau seines Körpers setzte, hatte schwer zu kämpfen. Das spricht dafür, dass **Meeresversauerung** eine Rolle gespielt haben könnte. Und folgerichtig litten dann auch die Korallen unter der veränderten Wasserchemie, aber auch unter dem Planktonmangel.

Ungewöhnlich war ebenfalls, dass es bei den Knochenfischen keine grösseren Probleme gab. Erstaunlicherweise liegen ihre Verluste nur bei etwa zehn Prozent der Arten, obwohl viele recht anspruchsvoll waren.

Auf der Seite der Verluste stehen nicht nur die Kult-Dinos. Auch die Zeit der Ammoniten war abgelaufen, ebenso die der Belemniten. Kraken und Kalmare hingegen überstanden die Katstrophe und die Nautiloideen brachten wenigstens die Perlboote durch. Warum es die einen schafften und die anderen nicht, ist offen.

Die Welt schien sich bereits in der späten Kreidezeit allmählich zu verändern. Damals passierte vieles gleichzeitig und manche Trends liefen auch in der Erdneuzeit weiter. Plattentektonische Bewegungen vertieften die Meeresbecken, die dadurch mehr Wasser fassten. Als Folge sank der Meeresspiegel, sodass die weiten Flachmeere verloren gingen, die über Jahrmillionen hinweg einen idealen Lebensraum geboten hatten.

Nach dem Ende des Massensterbens erholten sich die **Ökosysteme** erstaunlich schnell. Was die Meere weltweit angeht, zeigen Kohlenstoffisotope, dass sie sich nach rund 400‘000 Jahren erholt hatten.

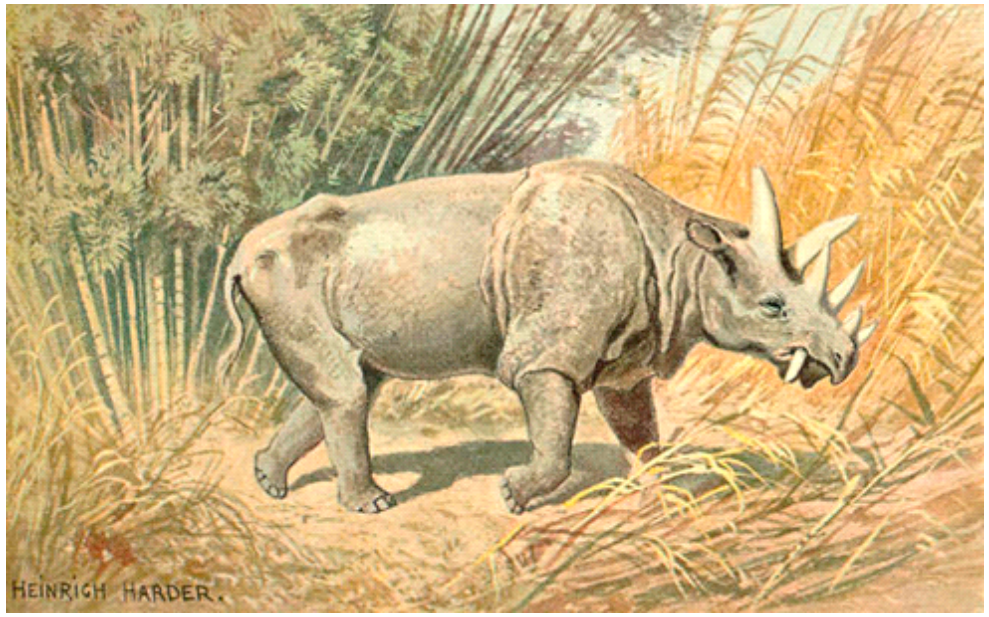
Im Laufe der Erdneuzeit war das Klima äusserst variabel und die Ökosysteme mussten sich immer wieder umstellen – das heisst, es gab reichlich Anreize für die Evolution. Ausserdem hatte das Zeitalter der **Säugetiere**, die mehr als zwei Drittel ihrer Entwicklung zu Lebzeiten der Saurier absolvieren mussten, begonnen.

Die neue Welt bot ihnen so viele Chancen, dass sie mit grossem Tempo immer neue Formen hervorbrachten. Als einzige andere Gruppe konnten die **Vögel** mithalten. Die Eidechsen, Krokodile und Schildkröten hingegen waren zwar auch an den Start gegangen, gerieten jedoch schnell ins Hintertreffen. Reptilien und Amphibien, die mit den grösseren Raubtieren nicht konkurrieren konnten, entwickelten bevorzugt kleinere Arten.

Eine wesentliche Grundlage für den Erfolg der Säugetiere hatten dabei die **Blütenpflanzen** und Gräser gelegt. Sie waren im Erdmittelalter entstanden und hatten die Krise überlebt. Davon profitierten nun die Säugetiere: Sie brachten oft riesige **Grasfresser** hervor und neue Jäger, und zwar vielfältiger als je zuvor.

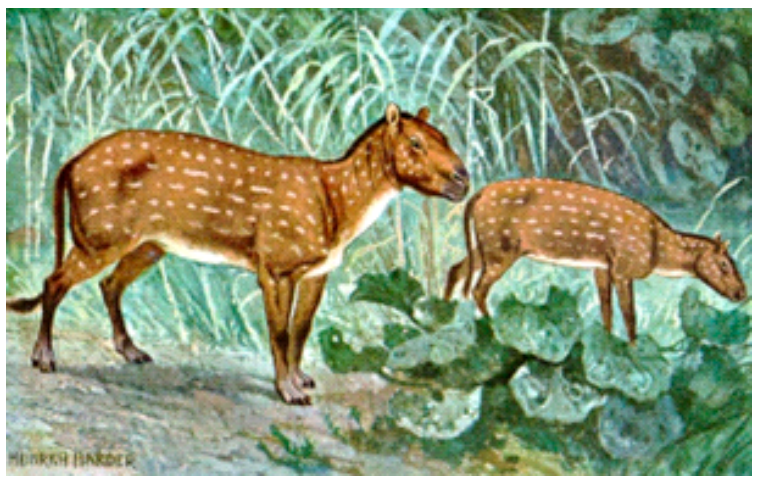
Als die Erdneuzeit begann, schlug die Evolution also neue Wege ein. Das heisst: Obwohl zahlenmässig bei diesem Massenaussterben längst nicht so viele Arten verschwanden wie bei den vorhergehenden, sind doch auf allen Stufen die einflussreichen, zentralen Organismen herausgefallen. Die Ökosysteme mussten neu formiert werden. Die Säugetiere erhielten ihre Chance. Während des Erdmittelalters schienen sie allesamt spitzmausartige Winzlinge gewesen zu sein, die Insekten fingen. Doch die Ehre der Säugetiere konnte dank Funden aus Nordamerika, Australien, der Mongolei und China gerettet werden. Überall dort strich vor 130 Millionen Jahren ein katzengrosses Säugetier namens *Repenomamus robustus* durch dichte Wälder. Repenomamus hatte Appetit auf Dinos. Gerne riss er den eine oder anderen Nestling in Stücke und verleibte ihn sich ein.

Vor *Repenomamus robustus* mussten sich kleine und junge Dinosaurier in Acht nehmen: Dieses Säugetier war ein ernst zu nehmender Gegner.



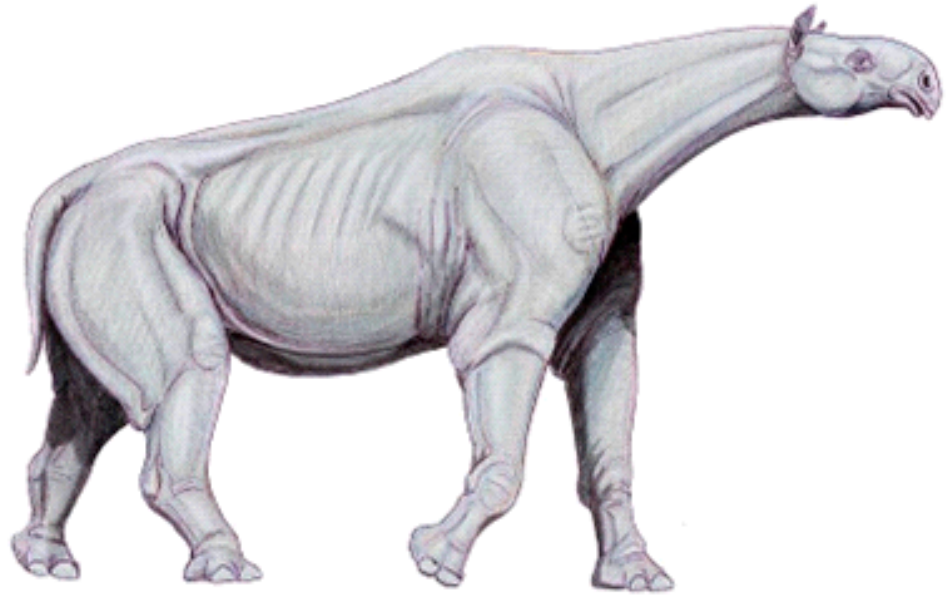
"Das Ungeheuer von Utah"

Im Gebiet der Uinta-Berge des heutigen Utah (USA) lebte das grösste Säugetier dieser Zeit, das sogenannte "Ungeheuer von Utah". Das *Uintatherium* hatte eine Schulterhöhe von zwei Metern und eine Länge von vier Metern. Auf seinem massigen Schädel trug es sechs Hörner, die ihm ein bizarres Aussehen verliehen. Zwei Hörner standen auf der Stirn, zwei über den Augen und zwei auf dem Maul. Der Körper dieses Tieres ähnelte dem eines heutigen Nashorns. Sein Gewicht wird auf 1500 bis 2000 Kilogramm geschätzt. Seine stämmigen, elefantenähnlichen Beine endeten in jeweils fünf Strahlen mit Hufen.



Eohippus

Im Gebiet des heutigen Europa und des heutigen Nordamerika lebte der Urahn des heutigen Pferdes, der *Eohippus* („Pferd der Morgenröte"). Eohippus war kaum grösser als heutige Füchse. Ihre Beine hatten noch keine Hufe, sondern Pfoten. An den vorderen Pfoten gab es vier und an den hinteren drei Zehen. Damit konnten diese Pferdeahnen rasch auf sumpfigen Urwaldböden laufen. Diese "Urpferde" frassen Blätter und Kräuter.



Indricotherium

Im heutigen Asien, unter anderem in Beluchistan im heutigen Pakistan, lebte das *Indricotherium*, das mit einem Gewicht von bis zu 20 Tonnen grösste landbewohnende Säugetier aller Zeiten. Es stammte aus der Familie der Nashornartigen und zeichnete sich durch lange Beine, einen verlängerten Hals und einen vergleichsweise kleinen, aber hornlosen Schädel aus. Diese Gattung ist von zahlreichen, teils gut erhaltenen Fossilresten aus Ost-, Zentral- und Westasien bekannt, kommt aber auch im heutigen Südosteuropa vor. Seine Backenzähne verraten, dass es sich hauptsächlich von Pflanzen ernährte.

Castorcauda lutrasimilis, Rekonstruktion

Selbst im Wasser waren die Säugetiere damals schon vorgedrungen: In der heutigen Mongolei lebte vor ca. 164 Millionen Jahren *Castorocauda lutrasimilis*. Er war so gross wie ein Schnabeltier, hatte Fell und den breiten schuppigen Schwanz eines Bibers.

Gastornis

Der erste und grösste **Laufvogel** Laurasias (Europas), der zwei Meter grosse *Gastornis*, der einen grossen Schädel, ein kleines Flügelskelett und riesige Füsse hatte, kam auf. Überreste dieses Tieres werden später in Frankreich gefunden.

In den Meeren brachte die neue Zeit auch den Knochenfischen – allen voran den **Echten Knochenfischen** – einen ungeheuren Aufschwung. Sie entwickelten sich zur artenreichsten Wirbeltiergruppe. Auch wenn die Arten damals noch andere waren als heute, so wären die Fische doch bekannt vorgekommen – in den Korallenriffen ebenso wie in der offenen See oder am Meeresboden. Neue Gruppen tauchten auf: die Heringsartigen, die Lachsfische, die Welsartigen, die Fliegenden Fische, die Seepferdchen, die Skorpionfische, die Doktorfische, die Barsche, Barrakudas, Aale, die Plattfische und Flundern… Die Haie hatten die Krise ebenfalls gut gemeistert und behielten ihren Platz an der Spitze der Nahrungskette. Sie tummelten sich vor allem in der Tethys und ihren Randmeeren. Allerdings entwickelte sich Konkurrenz von überraschender Seite.

Ambulocetus natans, Rekonstruktion

Ambulocetus natans sieht aus wie eine Mischung aus Krokodil und Robbe. Etwa so gross wie ein Seelöwe, besass er kräftige Kiefer, vorne Flossen, hinten muskulöse Beine mit riesigen Füssen und einen Pelz. Ein Reptil ist er nicht, sondern ein Säugetier, nämlich ein **früher Wal**, der vor 48 Millionen Jahren jagte. Er war einer der vielen Wale, die den Übergang vom Land- zum Wasserleben markierten.

Die Wale entstanden an den Ufern der Tethys, vor etwa 50 Millionen Jahren, wo sie zunächst noch als Vierbeiner an Flüssen lebten. Dann wagten sie sich als archaische Wale ins Wasser, bevölkerten erst die seichten, warmen Küstenzonen und eroberten allmählich die weiten des Meeres. Ein paar Millionen Jahre später, nach einigem Auf und Ab des Klimas, tauchten die modernen Wale auf: die **Bartenwale** und die **Zahnwale** (Pottwale, Delfine, Orcas).

Für das Leben im Wasser mussten die Wale ihre Körper vollkommen umbauen. Um vom Ansitzjäger der Küste zum Herrscher der Hochsee zu werden, verlagerten die Wale die Augen aus ihrer «Krokodilposition» zu den Seiten hin. Die Nasenöffnung wanderte von der Schnauzenspitze hoch auf den Kopf, wo sie das Blasloch formte.

Am augenfälligsten war jedoch, dass sie sich ihrer Beine entledigten. Aus den Vorderbeinen wurden **Flossen** und die Hinterbeine schrumpften zu äusserlich unsichtbaren Anhängseln. So schwierig es gewesen war, Extremitäten zu bekommen, so langwierig war es nun, sich ihrer zu entledigen. Auf dem Weg zur perfekten «Fischform» kennen die Forscher inzwischen alle möglichen Übergangsformen und es dauerte viele Millionen Jahre, ehe es geschafft war.

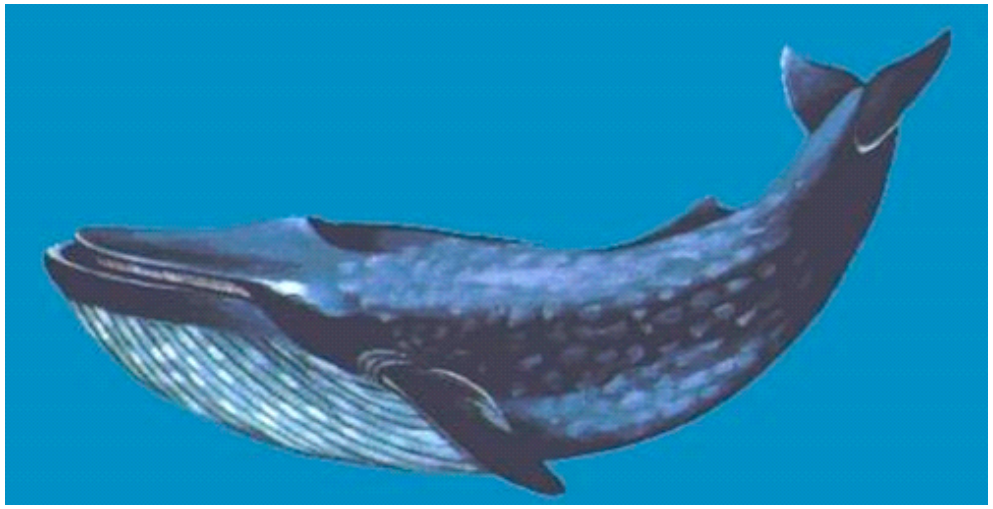
Basilosaurus, Rekonstruktion

Vollkommen an das Leben im Wasser angepasst war *Basilosaurus*. Erlebte vor ungefähr 41 bis 35 Millionen Jahren und war mit seinen 18 bis 20 Metern wohl das **grösste Säugetier** seiner Zeit. *Basilosaurus* hatte einen kurzen, stumpfen Kopf, einen schmalen schlangenähnliche Körper und lächerlich winzige Hinterbeine. Fürs Laufen taugte dieses Erbe nicht mehr. Die Arme von *Basilosaurus* waren Flossen und für den Antrieb sorgte, der zur Fluke umgestaltete Schwanz.

Es dauerte einige Millionen Jahre, bis die Urwale die **Tethys** und von da aus die Weltmeere erobert hatten. Als sie entstanden, gab es noch die Randmeere der Tethys, die reich an Nährstoffen waren und schier vor Fischen platzten. Da ausser den Haien kein wirklich grosser Räuber mehr da war, konnten sich die Urwale ausbreiten. Dann sank der Meeresspiegel, viele flache Meere verschwanden fürs Erste, Indien rammte Asien, die Tethys war Geschichte, der Himalaya stieg auf. Australien und die Antarktis trennten sich, öffneten den Südozean: Ein neuer Meeresstrom entstand, die Erde rutschte Stückchen für Stückchen in Richtung **Eiszeit**.

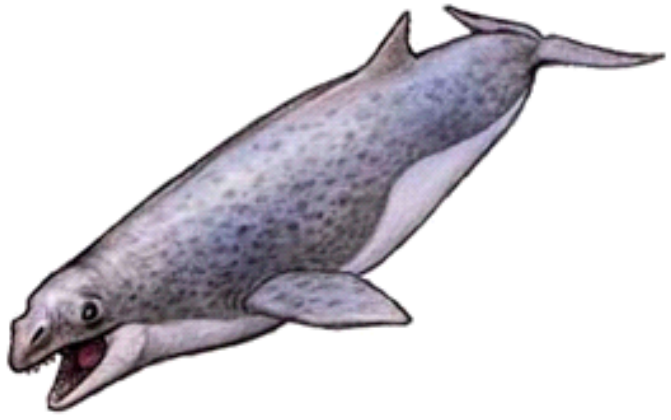
Llanocetus, Rekonstruktion

In dieser Phase wurden die Meere nicht nur kälter und damit sauerstoffreicher, weil kaltes Wasser mehr Sauerstoff aufnehmen kann als warmes. Die neuen Strömungen stellten auch die Menge und Verteilung der Nährstoffe grundlegend um und damit die des Planktons. Die Paläontologen glauben, dass deshalb ziemlich zu selben Zeit die **Zahn- und Bartenwale** entstanden, die dann die Urwale verdrängten. Einer der Neuen war *Llanocetus*. Er lebte vor 34 Millionen vor der Küste der Antarktis und er steht zwischen den archaischen und den modernen Walen. Anscheinend ernährte er sich schon vom Krillfang, so wie die Bartenwale heute.



Bartenwal heute, Rekonstruktion

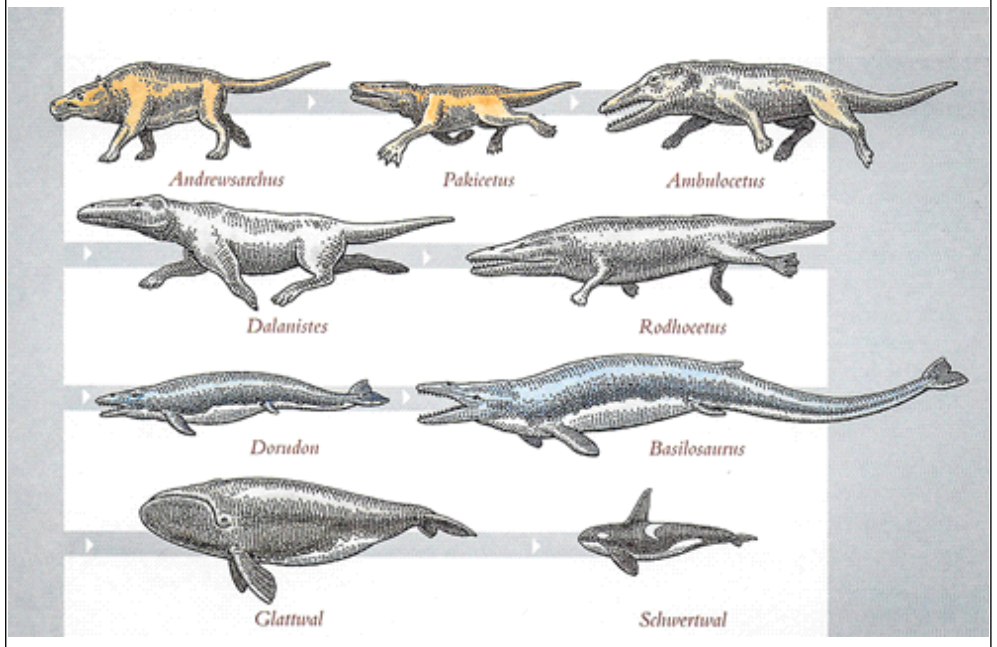
Bartenwale sind heute – in unseren Augen – sanfte Riesen. Um ihre bis zu 180 Tonnen schwere Körper zu erhalten, brauchen sie Tag für Tag etwa 3,6 Tonnen Nahrung in Form von kleinen Krustentieren und Fischen, die sie mit ihren Barten aus dem Wasser fischen. Dafür müssen sie gewaltige Wassermassen durchseihen und das geht nur mit der entsprechenden Anatomie: Sie haben riesige, breite Köpfen und dementsprechend voluminöse Mäuler samt Barten entwickelt.



Janjucetus, Rekonstruktion

Auch die Bartenwale begannen als Raubtiere – wie *Janjucetus*. Er hatte sich noch nicht zum friedlichen Planktonfresser entwickelt und besass Zähne.

Wie man zum Wal wird:



Die Ozeane reizten auch andere Säugetiere. Etwa die Ahnen der Rüsseltiere. An den Stränden der Tethys schickten sie vor 50 Millionen Jahren die **Seekühe** ins Rennen. Deren landlebende Vorfahren waren schweinegrosse Tiere mit recht stämmigen Beinen. Sie liefen wie Flusspferde über Land, bevorzugten aber das Wasser. Sie paddelten und schwammen wie Riesenotter und «grasten» Unterwasserpflanzen ab.

Über Jahrmillionen hinweg waren sie als **Pflanzenfresser** sehr erfolgreich. Sie schätzten vor allem die warmen, flachen Randmeere der Tethys und brachten immer neue Arten hervor. Erst als sich die Erde auf Eiszeit einstellte, verschwand die Vielfalt von einst – und «nur» die modernen Seekühe blieben zurück.

Ein paar Klimaschwankungen später, vor 23 Millionen Jahren, als die Erde wieder einmal wärmer war, zog es die nächsten Säugetiere ins Wasser: die Ahnen aller Robben, Seelöwen und Walrosse. Die sollten übrigens auch die Ahnen der Wiesel, Otter und Bären gewesen sein, die allesamt um diese Zeit entstanden.

Das Stammtier hatte etwas von einem **Wiesel**. Von ihm zu den ersten echten Robben, Ottern, Seelöwen und Walrossen sollten nur wenige Millionen Jahre vergehen.

Ära	System	Epoche	Alter (Mio. Jahre)	Wichtige Ereignisse
Erdneuzeit (Känäozoikum)	Quartär	Holozän	0,01	▲Landwirtschaft, Sesshaftigkeit
		Pleistozän	2,6	▲ erste Menschen
	Neogen	Pliozän	5,3	▲ Jurafaltung
		Miozän	23	
	Paläogen	Oligozän	34	○33 bis heute Känozoische Eiszeit
		Eozän	56	▲Alpenbildung
		Paläozän	66	✸Kreide-Paläogen Massensterben
Erdmittelalter (Mesozoikum)	Kreide	obere	100	
		untere	145	
	Jura	oberes	161	
		mittleres	176	
		unteres	200	✸Trias-Jura-Massensterben
	Trias	obere	228	▲erste Säugetiere
		mittlere	245	
		untere	251	✸Perm-Trias Massensterben
Erdaltertum (Paläozoikum)	Perm		300	▲erste Reptilien
	Karbon		360	✸Devon-Massensterben ○360-260 Karoo Eiszeit
	Devon		416	▲erste Amphibien
	Silur		444	✸Silur-Massensterben
	Ordovizium		488	○460-420 Anden-Sahara Eiszeit
	Kambrium		542	▲erste Fische
Neues Proterozoikum	Ediacarium		635	○650-580 Marinoische/Gaskiers Eiszeiten
	Cryogenium		850	○750-700 Sturtische Eiszeit
	Tonium		1'000	
Mittleres Proterozoikum			1'600	▲ab 1'500 Eukaryoten
Frühes Proterozoikum			2'500	○2'400-2'100 Huronische Eiszeit
Archaikum			4'000	▲ab 2'700 Photosynthese, Cyanobakterien ▲ab 3'800 erste Einzeller
Hadaikum			4'600	
Urknall			13'700	

Neogen

Zeitraum:

23 bis 2,6 Millionen Jahre vor heute. Das Neogen ist aufgeteilt in Miozän und Pliozän.

Plattentektonik:

Im Neogen ist der ehemalige Superkontinent Pangäa zerfallen, die Landkarte wird zu der, die wir heute kennen: Die Kontinente rücken auf ihre heutige Position. Nord- und Südamerika werden durch den Isthmus von Panama verbunden. Die letzten Reste der Tethys werden subduziert, die Alpen bauen sich auf, ebenso der Himalaya in Asien.

Vor rund 5,6 Millionen Jahren führten Bewegungen der Kontinentplatten und im Erdmantel dazu, dass die Meeresverbindung zwischen Atlantik und **Mittelmeer** verschlossen wurde. Als Folge strömte kein frisches Meerwasser mehr in das Becken nach. Weil der Wassernachschub über die Flüsse nicht ausreichte, um die Verdunstung auszugleichen, sank der Wasserspiegel des Mittelmeeres immer mehr. Das trockene, heisse Klima sorgte dafür, dass das Mittelmeerbecken innerhalb weniger tausend Jahre nahezu vollkommen austrocknete.

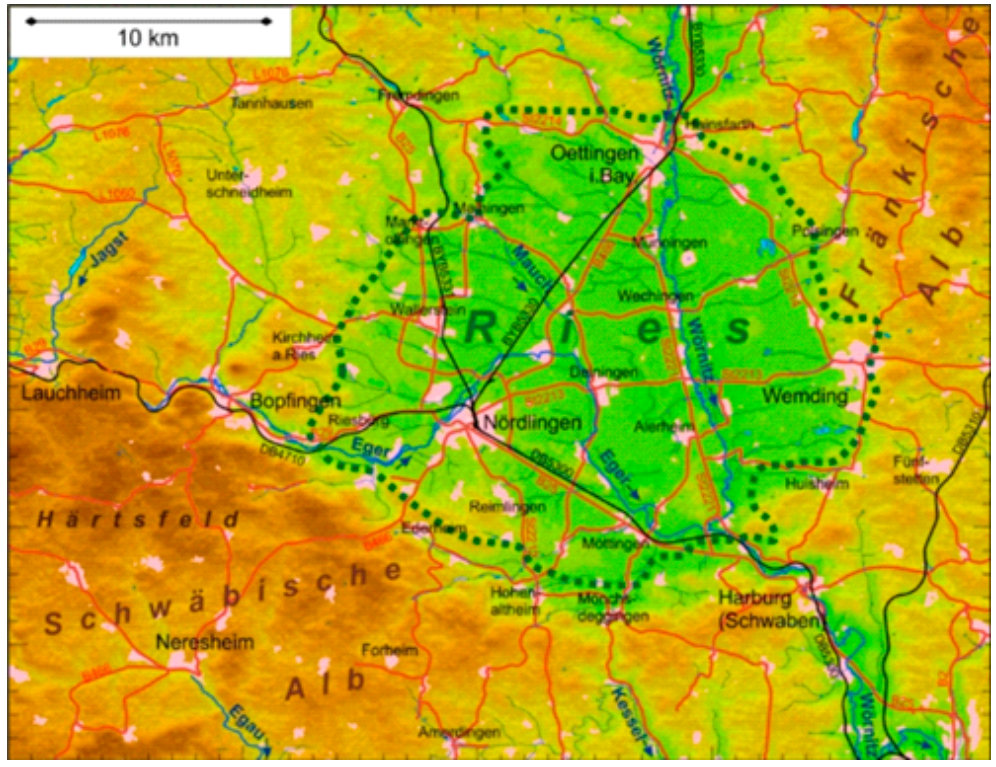
Anstelle des Meeres fand sich hier nun eine weite, an einigen Stellen eine bis zu 5 000 Meter unter dem Meeresspiegel liegende Senke, in der nur noch einige extrem salzige **Tümpel** vom einstigen Wasserreichtum zeugten. Erst vor 5,33 Millionen Jahren endete diese auch als messinische Salinitätskrise bezeichnete Epoche und die Strasse von Gibraltar öffnete sich wieder. Es dauerte 100 Jahre, bis sich das Mittelmeer wieder aufgefüllt hatte.

Das nahezu ausgetrocknete Mittelmeer während der messinischen Salinitätskrise

Der **Meteorit**, der vor 15 Millionen Jahren im Miozän das **Nördlinger Ries** erzeugte, dürfte einen Durchmesser von etwa 1,5 km gehabt haben und mit einer Geschwindigkeit von etwa 15–50 km/s (das entspricht 54‘000–180‘000 km/h) eingeschlagen sein. Die Explosion beim Auftreffen des Meteoriten hatte die Energie von 1,8 Millionen Hiroshima-Bomben. Durch den Einschlag wurden 150 km³ Gestein ausgeworfen, sogar Teile aus dem kristallinen Grundgebirge, denn der Meteorit durchschlug das 600 m starke Deckgebirge aus mesozoischen Sedimentgesteinen (Kalkgesteine, Tone). Einzelne Steine des Auswurfs wurden bis zu 70 km weit geschleudert, Tektite (Glasobjekte) sogar bis zu 450 km. In wenigen Minuten war ein Krater von beinahe 25 km Durchmesser und rund 500 m Tiefe entstanden. Nahezu jegliches Leben im Umkreis von mindestens 100 km wurde schlagartig ausgelöscht.

Über die folgenden zwei Millionen Jahre verlandete der Kratersee nach und nach. Erst während der Eiszeiten wurde der heutige Rieskessel durch Erosion freigelegt und Löss (feinkörniges Sediment) eingetragen, der die Grundlage für die heutige landwirtschaftliche Nutzung bildet.

Das Nördlinger Ries liegt im Städtedreieck Nürnberg-Stuttgart-München.



Umwelt:

Atmosphärischer Sauerstoffanteil	Über das ganze Neogen durchschnitllich etwa 21,5 Volumenprozent. Das entspricht etwa 108% des heutigen Niveaus
Atmosphärischer Kohlendioxidanteil	Durchschnittlich etwa 280 ppm. Das ist vorindustrielles Niveau
Durchschnittliche Oberflächentemperatur	Über das gesamte Neogen durchschnittlich 14 °C und damit das derzeitige Niveau

Am Ende des Oligozäns war die Antarktis grösstenteils wieder aufgetaut, wodurch die globale Durchschnittstemperatur zu Beginn des Miozäns wieder bei ca. 4°C über dem heutigen Niveau lagen.

Dieses Klima war vergleichsweise stabil, die stärkeren Temperaturschwankungen setzten erst vor ca. 12 Millionen Jahren ein, als die Antarktis wieder einen vollständigen Eisschild ausbildete und die Temperatur ungefähr auf das heutige Niveau sank.

Klimaschwankungen in der Erdneuzeit:

Das **Paläozän** begann kühler und trockener als die Kreide. Vor 56 Millionen Jahren stiegen die globalen Durchschnittstemperaturen plötzlich innerhalb von höchstens 1‘000 Jahren um fünf bis sieben Grad an. Diese Anomalie sollte 200‘000 Jahre dauern.

Das **Eozän** war zunächst warm und auch feucht: Ob an den Polen oder in der Tiefsee – die Temperaturen lagen weit über den derzeitigen. Dann schlug der Abkühlungstrend wieder durch, allerdings unterbrochen von kurzen Erwärmungsphasen.

Am Übergang zum **Oligozän** stürzten die Temperaturen innerhalb weniger Tausend Jahre ab, wahrscheinlich durch den antarktischen Zirkumpolarstrom. Gletscher entstanden, konnten sich jedoch noch nicht recht halten.

Im **Miozän** stiegen die Temperaturen zunächst an und brachten selbst nördlichen Breitengraden subtropische bis gemässigte Bedingungen. Das Eis verschwand wieder. Gegen Ende des Miozäns kippte das Klima erneut und die Gletscher wuchsen.

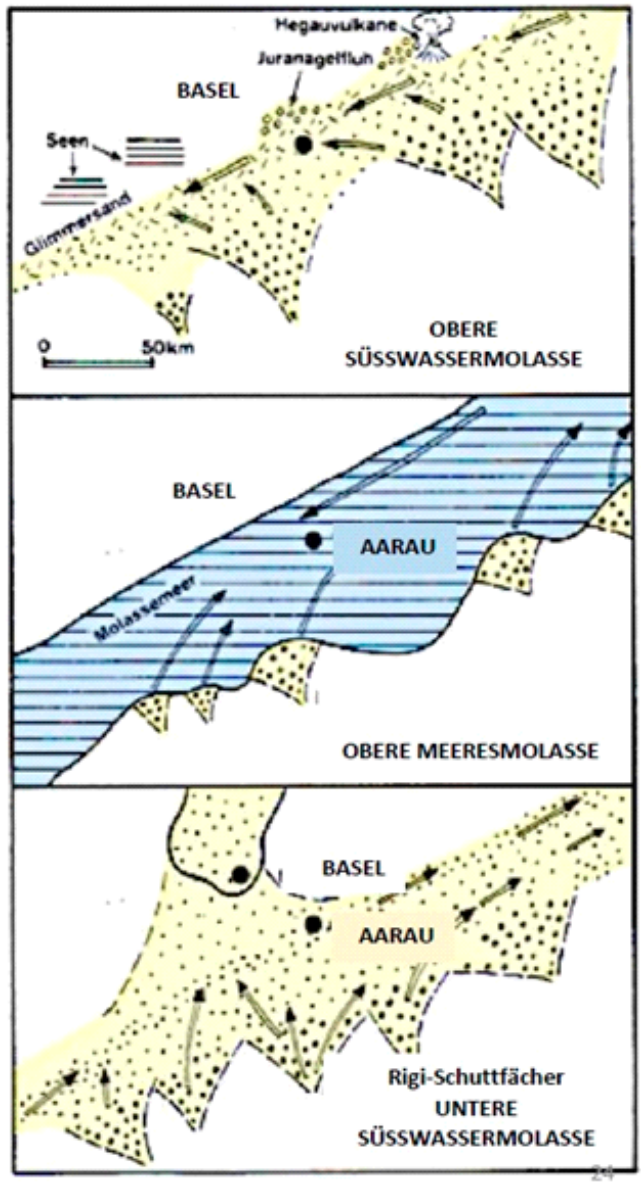
Im **Pliozän** war das Klima wieder relativ stabil und noch recht warm, teilweise wärmer als heute. Zum Ende hin vereisten die Polkappen – bis heute (noch) endgültig.

Mit dem **Pleistozän** begann das eigentliche Eiszeitalter.

Im Pleistozän eroberten die **Gletscher** die Erde. Zunächst an den Polen und in den Hochgebirgen, schliesslich stiessen sie bis in die mittleren Breiten vor. Die gleichmässig warme Welt, die Hunderte Millionen Jahre bestanden hatte, war verschwunden. Stattdessen gab es ausgeprägte Jahreszeiten. Wärmeliebende Meeresbewohner verschwanden, wenn sie sich nicht an die Kälte anpassen oder in subtropischen und tropischen Breiten zurückziehen konnten. Weil dort die Meere nicht abkühlten, wuchs die Temperaturdifferenz zwischen den Tropen und den Polen. Die Meeresströmungen wurden stärker und damit auch der Sauerstoff- und Nährstofftransport in den Ozeanen. Für das Plankton brachen optimale Zeiten an. Seit der Zirkumpolarstrom um die Antarktis rauschte, legt das aufwallende kalte, nährstoffreiche Tiefenwasser die Basis für den ungewöhnlichen Planktonreichtum und damit die Nahrungsgrundlage für viele Tiere bis hin zu den Walen.

Geologie:

Vor 34 Millionen Jahren begann der rasche Aufstieg der Alpen. Dabei wurde das neu gebildete Relief an der Oberfläche teilweise laufend wieder abgetragen. Der Erosionsschutt wurde durch die Flüsse gegen Norden befördert, wo er auf grossen Schuttfächern und Schwemmebenen liegenblieb und so die Ablagerungen der **Molasse** bildete.



Im Miozän (vor 23 Millionen Jahren) schritt die Alpenfaltung weiter nach Norden voran. Die Schuttkegel der **Unteren Süsswassermolasse** wurden nach Norden überschoben. Das Meer stieg erneut an und überflutete das Gebiet vom zentralen Mittelland bis zum Jura. Diese **Obere Meeresmolasse** erstreckte sich vom Wiener Becken über das schweizerische Mittelland bis zum Mittelmeer. Nach dem Rückzug des Meeres bildeten sich nochmals Schuttkegel, die sich auf der Höhe der Zentralschweiz vom Nordrand der Subalpinen Molasse bis ins Mittelland hinaus erstreckten (**Obere Süsswassermolasse**). Ein Flusssystem aus dem Osten lieferte Glimmersand bis in den Tafeljura. Kurz vor Ende des Miozäns, vor etwa 7 Millionen Jahren, war die Sedimentation im Alpenvorland abgeschlossen.

Gegen Ende der Molasseablagerungen im Alpenvorland (zwischen 11 und 3 Millionen Jahren vor heute) fand eine letzte starke Phase der **Gebirgsbildung** statt. Dabei wurden sämtliche abgelagerten Sedimente im Vorlandbecken nach Nordwesten geschoben. Dort, wo die Molassesedimente dünner wurden, kam es zur Auffaltung des **Juras**.

Dabei stiessen diese mittelländische Molasse mit den darunterliegenden Trias- und Juragesteinen nach Norden. Im Gebiet des heutigen Faltenjuras hielten die Gesteine dem Druck von Süden nicht mehr stand; sie falteten sich und schoben sich übereinander.

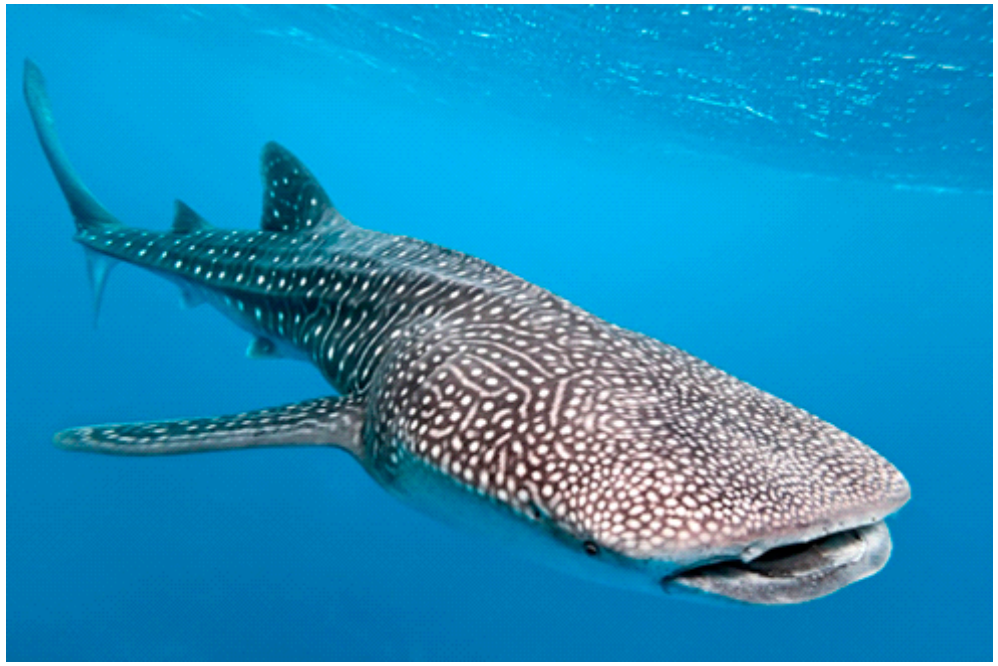
Erst jetzt wurde das Vorlandbecken wirklich zum «Mittel»-Land.

Vor allem in der Nordwestschweiz sind die Schichten zusätzlich durch Nord-Süd-verlaufende Störungszonen in Schollen aufgeteilt. Diese typische Oberflächengestalt des **Tafeljuras** mit höher gelegenen Bereichen und Tälern ist als Bruchschollengebirge bekannt.

Der **Faltenjura** beschreibt einen Bogen, der von der Region Genf und dem angrenzenden Frankreich im Westen bis nach Baden im Osten verläuft. Im Faltenjura wurden die Sedimentgesteine aufgrund der alpinen Gebirgsbildung gestaucht und dabei verfaltet. Schön erkennen lassen sich die mächtigen Kalkablagerungen zum Beispiel am **Creux du Van** (NE). Der Faltenjura wird nur an einzelnen Stellen von engen Quertälern, den Klusen, durchbrochen.

Creux de Van

Fauna und Flora:



W*alhai*

Das Miozän, als es noch ein letztes Mal vor der Eiszeit richtig warm war, war nicht nur die Hochzeit der **Meeressäuger**. Auch die Haie brachten neue Formen hervor. Etwa den *Walhai*, der grösste Fisch unserer Tage. Er schwimmt inzwischen seit 15 Millionen Jahre durch die Meere, immer dem Plankton nach.

Säugetiere sind eine Gruppe von Tieren, die grossen Veränderungen unterzogen wurden. Eine der Gruppen, die sich am meisten entwickelten, waren Tiere der Familie der Bovidae und Cervidae. In diesen beiden Tiergruppen finden wir Ziegen, Schafe, Antilopen und Hirsche. Alle diese Tiere haben ihr Verbreitungsgebiet erheblich erweitert.
Ebenso gibt es andere grosse Säugetiere wie Elefanten, Mammuts und Nashörner, die eine grosse Entwicklung erfahren haben. Einige dieser Arten wie Mammuts konnten aufgrund bestimmter Veränderungen, die später eintraten, nicht überleben.

Charakteristisch für die Fauna der letzten Kaltzeit waren **Grosstiere** (Megafauna), insbesondere grosse Säugetierarten, aber auch Vögel, die heute ausgestorben sind.
In Eurasien lebten **Mammuts**, Mastodonten, Saigas, Riesenhirsche, **Säbelzahnkatzen**, Höhlenlöwen, Höhlenhyänen und Höhlenbären. In Nordamerika gab es weitere Arten wie Präriemammuts, das Amerikanische Mastodon, Helm-Moschusochsen, Buschochsen, **Riesenfaultiere** und Riesengürteltiere. In Australien lebten nashorngrosse Beuteltiere, der Beuteltapir, der Beutellöwe, das Riesenrattenkänguru, riesige Wombats, bis zu drei Meter hohe **Riesenkängurus**, der grosse flugunfähige Vogel Genyornis und der riesige Waran Megalania.
Die Gattung der Elefantenartigen breitete sich weiter aus und erreichte neue Höhen. Deinotherium erreichte eine Schulterhöhe von 4 m, spätere Vertreter wie das amerikanische **Mastodon**, das sibirische und kolumbianische Mammut und der Afrikanische Elefant würden diese Masse jedoch noch übertreffen.
Die Carnivora (**Raubtiere**) brachten zu all diesen Pflanzenfressern die passenden Räuber hervor. Grosse Raubkatzen wie Löwen und Tiger eroberten den eurasischen und afrikanischen Raum.

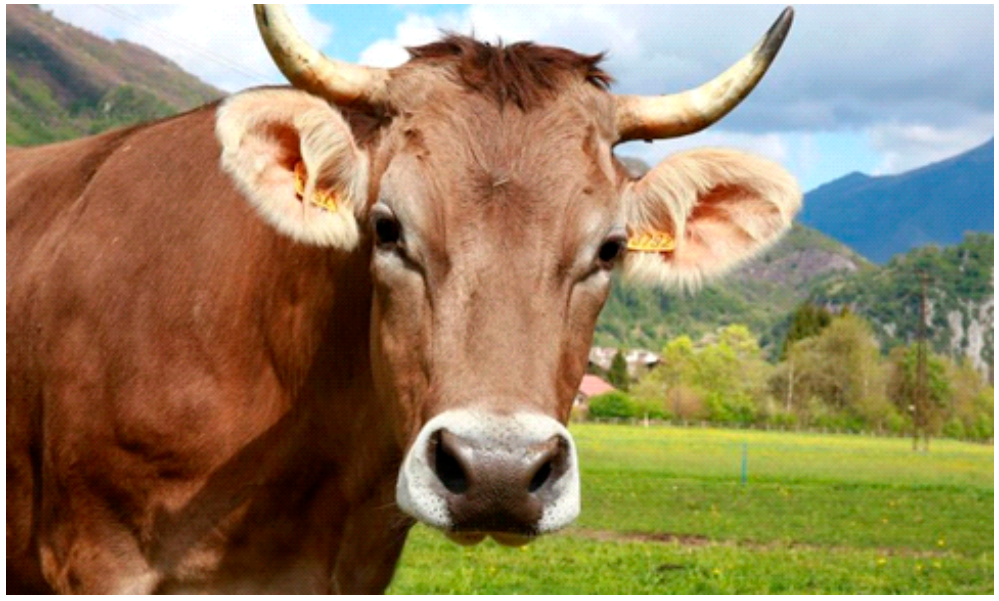
Mammut

Säbelzahntiger

Riesen-Faultier

Im Miozän erreichten die **Landsäuger** ihre bis dato grösste Ausmasse, mit den Rhinozeros-Verwandten, die bis zu 8,4 m lang werden konnten.
Auf allen Kontinenten dominierten jetzt Säugetiere aller Art. Jede Säugetier-Art brachte grosswüchsige Vertreter hervor.

Die Unpaarhufer brachten mit Vertretern wie Miohippus, Pliohippus und Megahippus grössere **Pferde** hervor. Sie alle überragten ihre paläogenen Vorgänger, blieben jedoch in punkto Körpergrösse noch unter ihren heutigen Verwandten. Auf der gesamten Nordhalbkugel traten im Neogen neue Pferdearten auf.
Kamele entwickelten sich im Obermiozän aus den Wiederkäuern und verbreiteten sich von Amerika aus über Landbrücken auf der gesamten Nordhalbkugel und im Norden Afrikas. Aus ihnen gingen später die afrikanischen Dromedare und Trampeltiere hervor, wie auch die amerikanischen Lamas, Alpakas, Guanakos und Vikunjas.



Hornträger: vom Aussterben bedroht

An der Grenze zwischen Oligozän und Miozän entwickelte sich zudem die Familie der **Stirnwaffenträger**. Kleinere Vertreter wie Hirschferkel, die vor allem in Afrika und Asien weit verbreitet waren, trugen noch keine Stirnwaffen, ihre grösseren Verwandten, Antilopen, Giraffen, Hirsche, Moschustiere und **Hornträger** (Kühe) jedoch schon. Sie verbreiteten sich über Landbrücken auf der gesamten Nordhalbkugel und in Afrika.

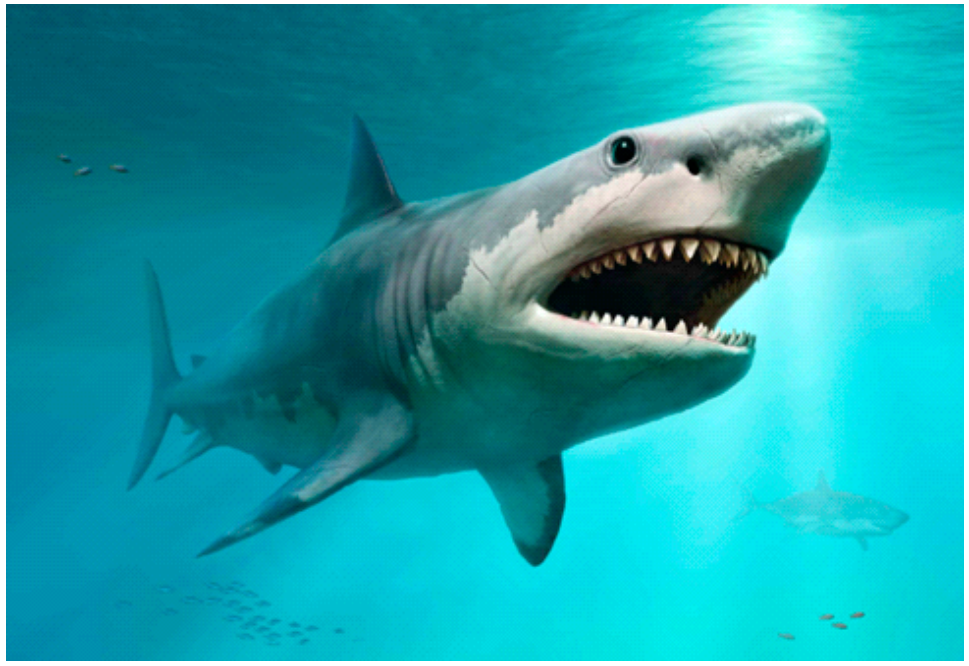
Riesen-Moa

Die **Vögel** standen nun im Schatten der grösseren Säugetiere. Obwohl sich noch einige Male riesenwüchsige Exemplare entwickelten, so zum Beispiel die **Terrorvögel** Südamerikas oder die Riesen-Moas Australiens, wurden sie meist schon wenig später von Säugetieren verdrängt. Der Selektionsdruck durch Raubkatzen und Nesträuber erlaubte tendenziell kleineren, schnelleren und vor allen flugfähigen Vögeln das Überleben und eine ungestörte Brut. Wer sein Nest in Bäumen errichtete, war vor den meisten Gefahren sicher.

Während und vor allem am Ende der letzten Kaltzeit kam es zum Aussterben vieler dieser Arten. Das kann entweder mit den **Umweltveränderungen**, der Überjagung durch den Menschen oder einer Kombination beider Ursachen erklärt werden.

Reptilien und Amphibien, die mit den grösseren Raubtieren nicht konkurrieren konnten, entwickelten bevorzugt kleinere Arten. Ihre Nahrung basierte hauptsächlich auf Insekten, die sehr reichlich vorhanden waren.

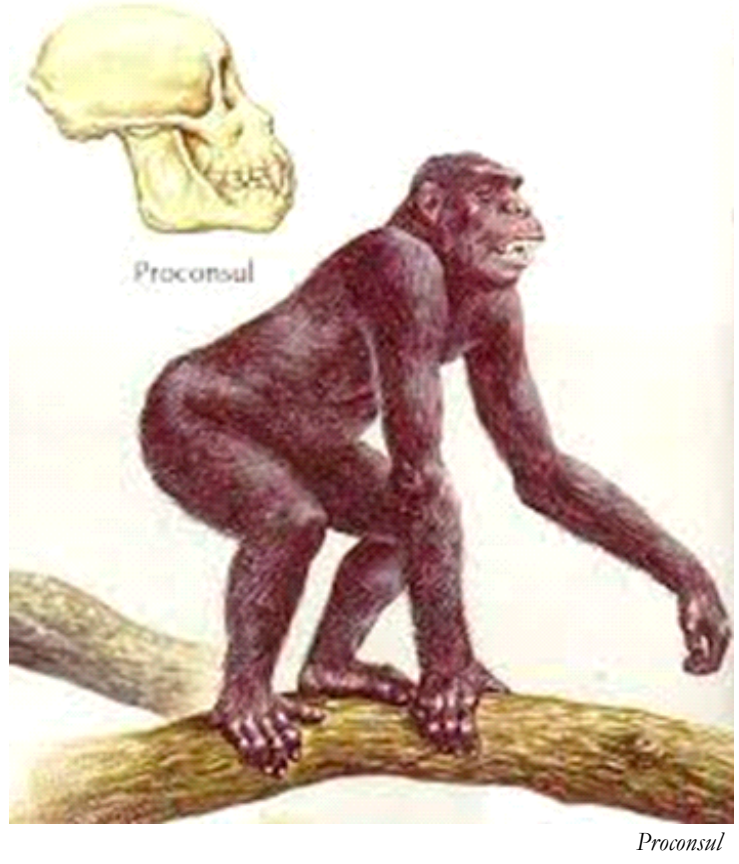
Fische hingegen waren nur selten einer kontinuierlichen Bedrohung durch Säugetiere ausgesetzt, und ihre grössten Vertreter, die Haie, waren diesen mehr als nur gewachsen. Lange existierten **Hai** und **Wal** als ebenbürtige Konkurrenten im Ozean. Die grössten Wale erreichten im Miozän knapp 20 m Länge. **Megalodon** überragte seinen nächsten heute lebenden Vertreter, den weissen Hai, um das ca. Dreifache seiner Körperlänge und das Achtfache seines Kiefervolumens. Wie alle Haie gehörte Megalodon zu den Knorpelfischen, von ihm sind also meist nur die gewaltigen Zähne überliefert. Die Entstehung des Isthmus zwischen Nord- und Südamerika schnitt für die Riesenhaie jedoch eine wichtige Strömung und Route ab, vermutlich zwischen ihren Jagd- und Laichgebieten, wodurch die Art vor ca. 3,6 Millionen Jahren ausstarb.



Megalodon, Rekonstruktion

Innerhalb der Gruppe der Säugetiere fand eines der wichtigsten Ereignisse im Evolutionsprozess des **Menschen** statt. Der erste **Hominide** tauchte auf und entwickelte sich. Der erste entwickelte Hominide wurde auf den Namen **Australopithecus** („südlicher Affe“) getauft. Es zeichnete sich hauptsächlich durch eine geringe Grösse und eine Zweibeinbewegung aus.

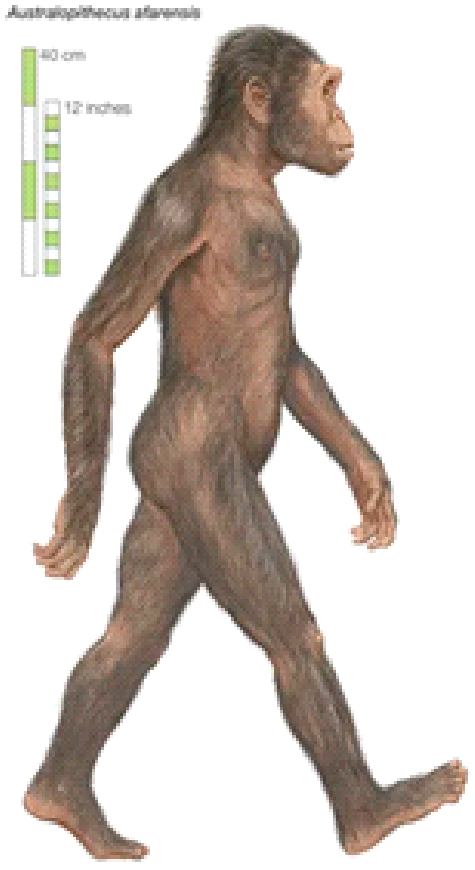
Gegen Ende des Neogens entwickelte sich jedoch im Südosten Afrikas noch eine weitere Gattung, die Gattung **Homo**, zu der auch unsere Art *Homo sapiens* gehört.



Proconsul

Die Unterklasse der Trockennasenaffen ist durch Fossilfunde bereits aus dem Paläogen bekannt, aus ihr ging vor ca. 21 Millionen Jahren, zu Beginn des Miozäns, die Gattung *Proconsul* hervor. Auf sie folgte vor 16 Millionen Jahren *Ramapithecus*, vor 4 Millionen Jahren **Australopithecus** und schliesslich vor circa 2,6 Millionen Jahren die Gattung **Homo**.
Jede dieser Arten differenzierte sich in mehrere physiologischen Nischen, in unserer vermeintlich direkten Abstammungslinie brachte jede neue Gattung ein grösseres Gehirn mit sich, spezialisierte sich weiter auf Seh- und Gehörsinn und verfeinerte die Handstruktur für ein effektiveres Leben in und unter den Bäumen.

Während dem späten Neogen kam es jedoch zu immer stärker werdenden Klimaschwankungen, die einen Rückgang der Wälder im Habitat des *Australopithecus* bedingten. Durch diese Veränderung zu einem Leben auf dem Erdboden gezwungen, entwickelten spätere Australopithecus eine leicht aufrechtere Körperhaltung und sogar die Fähigkeit eines kurzzeitig aufrechten Ganges, was eine höhere Sicht im Savannengras erlaubte. Die ersten Hominiden, die vermutlich nicht mehr auf die Bäume zurückkehrten, bildeten schliesslich den Stamm der Gattung *Homo*. Mit dem ersten Vertreter der modernen menschlichen Gattung, *Homo rudolphensis*, endete das Neogen.



Australopithecus

Die **Vegetation** auf der Erde änderte sich der Klimaveränderung entsprechend. Weite Gebiete des nicht von Eis bedeckten Landes wurden zu Steppe und Tundra, (Kälte-)Wüsten und Grasland. Die Waldgebiete und auch die tropischen Regenwälder gingen zurück. Moose und Flechten verbreiteten sich vor allem in den durch die Klimaabkühlung grösser werdenden Gebieten in nördlichen Zonen.

Ära	System	Epoche	Alter (Mio. Jahre)	Wichtige Ereignisse
Erdneuzeit (Kanäozoikum)	Quartär	Holozän	0,01	▲Landwirtschaft, Sesshaftigkeit
		Pleistozän	2,6	▲ erste Menschen
	Neogen	Pliozän	5,3	▲ Jurafaltung
		Miozän	23	
	Paläogen	Oligozän	34	○ 33 bis heute Känozoische Eiszeit
		Eozän	56	▲Alpenbildung
		Paläozän	66	✸ Kreide-Paläogen Massensterben
Erdmittelalter (Mesozoikum)	Kreide	obere	100	
		untere	145	
	Jura	oberes	161	
		mittleres	176	
		unteres	200	✸ Trias-Jura-Massensterben
	Trias	obere	228	▲erste Säugetiere
		mittlere	245	
		untere	251	✸ Perm-Trias Massensterben
Erdaltertum (Paläozoikum)	Perm		300	▲erste Reptilien
	Karbon		360	✸ Devon-Massensterben ○ 360-260 Karoo Eiszeit
	Devon		416	▲erste Amphibien
	Silur		444	✸ Silur-Massensterben
	Ordovizium		488	○ 460-420 Anden-Sahara Eiszeit
	Kambrium		542	▲erste Fische
Neues Proterozoikum	Ediacarium		635	○ 650-580 Marinoische/Gaskiers Eiszeiten
	Cryogenium		850	○ 750-700 Sturtische Eiszeit
	Tonium		1'000	
Mittleres Proterozoikum			1'600	▲ab 1'500 Eukaryoten
Frühes Proterozoikum			2'500	○ 2'400-2'100 Huronische Eiszeit
Archaikum			4'000	▲ab 2'700 Photosynthese, Cyanobakterien ▲ab 3'800 erste Einzeller
Hadaikum			4'600	
Urknall			13'700	

Quartär

Zeitraum:

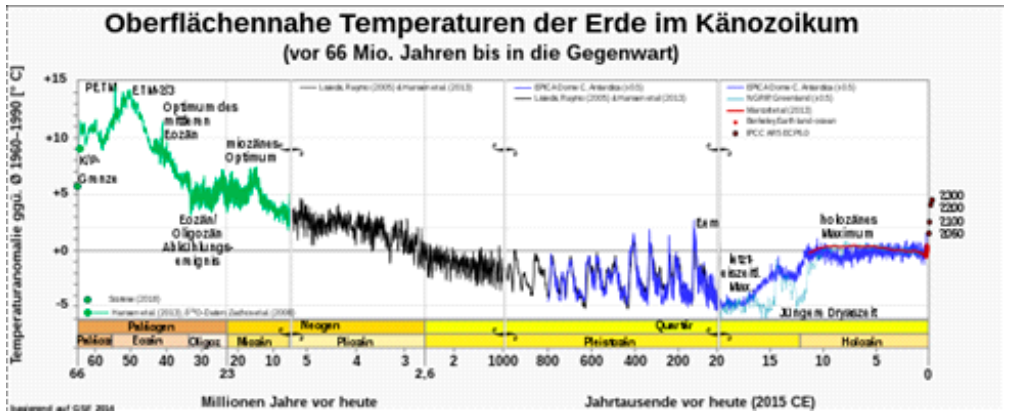
Das Quartär ist das letzte und kürzeste der drei Zeitalter der Erdneuzeit (Känozoikum). Es begann vor 2,588 Millionen Jahren mit dem Ende des Pliozäns und dauert bis heute an. Dieses Zeitalter wird aufgeteilt in **Pleistozän**, das ab Beginn bis 10'000 Jahren vor heute dauerte und dem **Holozän**, das sich ab diesem Zeitpunkt bis heute erstreckt.

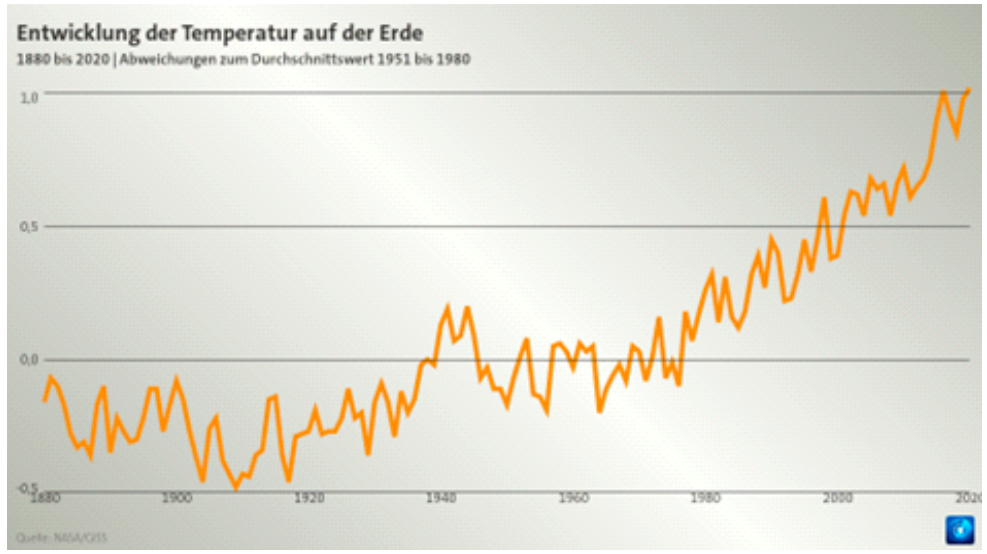
Plattentektonik:

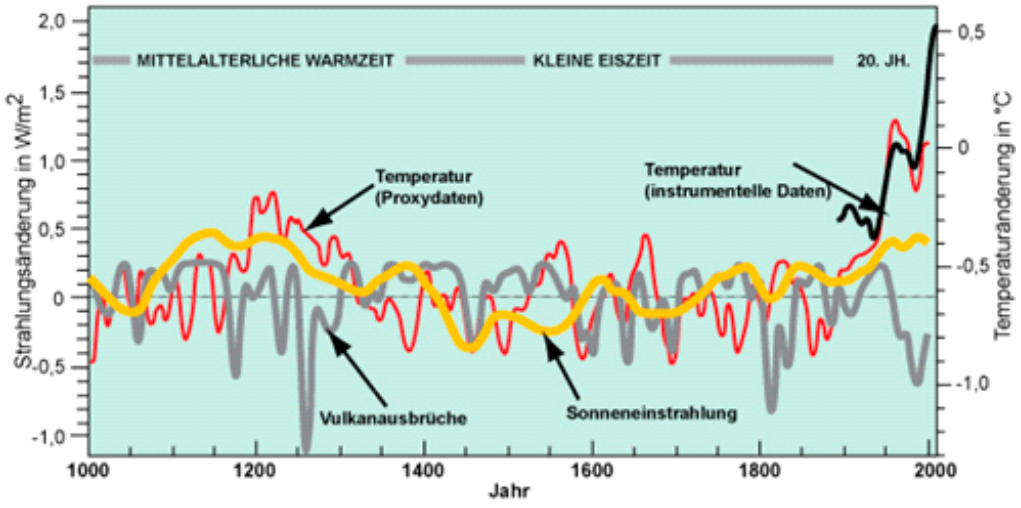
Mit Ausnahme kleiner Veränderungen sah die Erde am Beginn des Quartärs bereits so aus wie heute. Derzeit finden Subduktionen an beiden Seiten des Pazifiks statt, während der Atlantik sich nach wie vor weitet. Dadurch wachsen an der Westküste von Nord- und Südamerika und an der Ostküste Asiens die Gebirge (Anden, Rocky Mountains, der Isthmus von Japan, Kamtschatka, usw.) weiter an. Afrika, und Indien schieben sich durch die noch aktive Ozeanspreizung im Südpolarmeer noch nach wie vor nordwärts, die Gebirge an ihrer Nordseite (Alpen, Zagros im Iran, Himalaya) sind also noch immer im Wachstum begriffen. Das Uralgebirge, das norwegische Fjordland, die schottischen Highlands und die Appalachen an der amerikanischen Ostküste sind Relikte früherer Gebirgsbildungen. Daher wachsen sie nicht mehr, sondern werden von der Erosion langsam abgetragen.

Umwelt:

Temperaturentwicklung und CO2-Gehalt in der Atmosphäre:







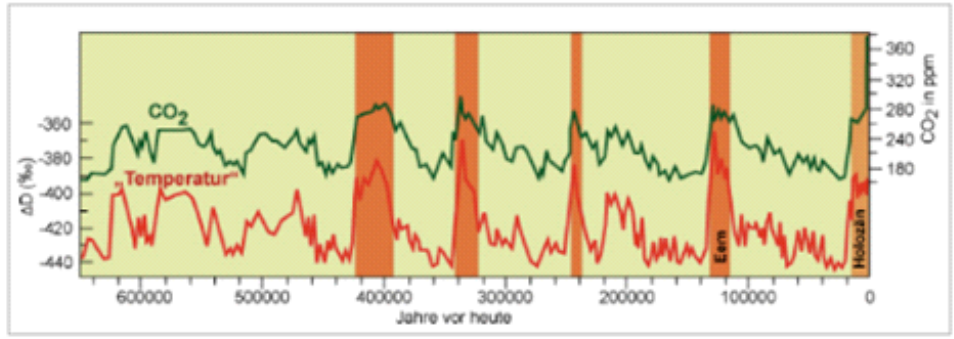


Abb. 1: Änderungen der atmosphärischen CO_2-Konzentration in den letzten 640 000 Jahren sowie Schwankungen von Deuterium als Proxy (Stellvertreterdaten) für Temperatur nach Eisbohrkernmessungen in der Antarktis.[1]

Im weiteren Verlauf des Oligozäns und vor allem während des Miozäns waren die CO2-Konzentration und das globale Klima relativ starken **Schwankungen** unterworfen. Auf dem Höhepunkt des Miozänen Klimaoptimums (vor 17 bis 15 Millionen Jahren) stieg der atmosphärische Kohlenstoffdioxid-Anteil von 350 ppm am Beginn des Miozäns für längere Zeit auf 500 bis 600 ppm. Im Zuge der weltweiten Erwärmung, an der wahrscheinlich die massiven CO2-Ausgasungen des Columbia-Plateaubasalts massgeblich beteiligt waren, wurden die Wald-Habitate zurückgedrängt, und an ihre Stelle traten vermehrt Steppen- und Graslandschaften. Gleichzeitig verloren die damaligen Antarktisgletscher einen Teil ihrer Masse, ohne jedoch ganz abzuschmelzen. Simulationen unter Einbeziehung des damaligen CO2-Levels deuten darauf hin, dass die Kernbereiche des Ostantarktischen Eisschilds von der Temperaturzunahme im Mittleren Miozän kaum betroffen waren. Unter dem Einfluss starker Erosions- und Verwitterungsprozesse sank die CO2-Konzentration gegen Ende des Optimums vor 14,8 Millionen Jahren wieder auf etwa 400 ppm, gekoppelt mit einer erneuten Zunahme des antarktischen Inlandsvereisung. Im jüngeren Miozän (vor 10,2 bis 9,8 Millionen Jahren und 9,0 bis 8,5 Millionen Jahren) traten in grossen Teilen Europas zwei „Waschküchen-Phasen“ auf, in denen das Klima deutlich subtropischer und feuchter wurde (mit jährlichen Niederschlagsmengen von teilweise über 1‘500 mm).

Die Quartären Kaltzeitperioden als Unterabschnitt des Känozoischen Eiszeitalters begannen vor rund **2,7 Millionen Jahren** mit weiträumigen **Vergletscherungen** auf der nördlichen Hemisphäre und wurden häufig mit der Schliessung der **Landenge von Panama** in Zusammenhang gebracht. Inzwischen herrscht jedoch in der Wissenschaft die Auffassung, dass die zunehmende arktische Vergletscherung mit einem deutlichen Rückgang der globalen CO2-Konzentration in Verbindung steht, wodurch vor allem die Sommermonate kühler ausfielen. Einige Studien konstatieren eine erste Abkühlungsphase im späten Pliozän (vor 3,2 Millionen Jahren) und eine zweite nach Beginn des Pleistozäns (vor 2,4 Millionen Jahren), in deren Verlauf der CO2-Gehalt von ursprünglich 375 bis 425 ppm auf 275 bis 300 ppm sank, mit einer weiteren Abnahme während der folgenden Kaltzeitzyklen. Zum wahrscheinlich ersten Mal während des 541 Millionen Jahre umfassenden Phanerozoikums waren damit **beide Pole** grossflächig von Eis bedeckt.

Im Verlauf der Quartären Kaltzeit wechselten warme mit sehr kalten Abschnitten. Die Kältephasen (Glaziale) zeichneten sich durch massive Gletschervorstösse aus. Sie waren mit 41‘000 beziehungsweise 100‘000 Jahren deutlich länger als die Warmzeiten (Interglaziale), die durchschnittlich rund 15‘000 Jahre andauerten.

Seit Beginn der **Industrialisierung** im 19. Jahrhundert erhöhen die Menschen den Anteil an Treibhausgasen in der Atmosphäre in signifikantem Umfang. Besonders die Verbrennung fossiler Energieträger trug dazu bei, dass die Kohlenstoffdioxid-Konzentration von 280 ppm auf 410 ppm stieg (Stand 2019). Hinzu kommen beträchtliche Methan-Emissionen sowie weitere Treibhausgase wie Stickstoffmonoxid (Lachgas) oder Carbonylsulfid. Wenn es nicht gelingt, die anthropogenen Emissionen in hohem Umfang zu reduzieren, könnte in absehbarer Zeit der **Klimazustand** des Pliozäns und im Extremfall der des Eozäns wieder erreicht werden, mit deutlich höherer Globaltemperatur, Anstieg des Meeresspiegels, Zunahme von Wetterextremen sowie einer Verschiebung der Klimazonen.

Das Klima im Quartär ist ausgesprochen wechselhaft. Mit Ende des Pliozäns durchlief die Erde immer zunächst eine lange Kälteperiode, ein sogenanntes Glazial, gefolgt von einer kürzeren Wärmeperiode, einem Interglazial.

Meist dauern diese Interglaziale jedoch nur etwa 10‘000 bis 20‘000 Jahre an. Danach führt die CO2-Auswaschung durch Regen wieder zu einer Abkühlung und ein Glazial setzt ein.

Derzeit befindet sich die Erde in einem **Interglazial** (Zwischeneiszeit**).** Vor ca. 11‘000 Jahren endete die Würm-Eiszeit mit einem Temperaturanstieg von ca. 6° Celsius auf unser heutiges Temperaturniveau. Da durch den Eingriff des Menschen in Klima und Umwelt seit der industriellen Revolution grosse Mengen an fossil konservierten Kohle-, Öl- und Erdgasvorkommen abgebaut und durch Verbrennung der Atmosphäre in Form von CO2 zugeführt wurden, ist derzeit nicht vom Beginn eines neuen Glazials auszugehen.

Das Interglazial des **Holozäns** als jüngster Abschnitt des Känozoikums begann nach dem Ende der bisher letzten Kaltzeit vor 11‘700 Jahren. Dieser Zeitraum umfasst alle bekannten **Hochkulturen** sowie die gesamte historisch belegte Menschheitsgeschichte einschliesslich der modernen Zivilisation. Während des Holozäns herrschte ein durchgehend stabiles Globalklima mit einem Temperaturkorridor von ungefähr ± 0,6 °C. Das Ausbleiben von geophysikalischen, biologischen und klimatischen Krisen wird als Garant dafür betrachtet, dass abgesehen von regional begrenzten Einschnitten eine relativ gleichmässige kulturelle und technologische Entwicklung der menschlichen Gesellschaften stattfinden konnte.

Geologie:

Am vorläufigen Ende der Faltung von Alpen und Jura muss die Nordschweiz durch ein relativ ausgeglichenes Relief geprägt gewesen sein, denn die Bildung der Täler geschah vor allem später, unter dem Einfluss der Gletscher.

In der Nordschweiz lassen sich aus den Moränen der Alpengletscher vier vergangene Eiszeiten rekonstruieren. Die älteste war das ca. 800‘000 bis 650‘000 Jahre zurückliegende **Günz-Glazial**, gefolgt von dem circa 460‘000 bis 400‘000 Jahre zurückliegenden **Mindel-Glazial**. Die vorletzte Kaltzeit begann vor 300‘000 Jahren und dauerte bis vor ca. 130‘000 Jahren als das **Riss-Glazial**, und vor 120‘000 Jahren begann das **Würm-Glazial,** das vor erst 11‘000 Jahren endete.

Die Wirkung der Gletscher war zweifacher Natur. Einerseits trugen das Eis und das Schmelzwasser unter dem Eisstrom das feste Gestein des Untergrundes ab. Andererseits wurden die Täler vor den Gletscherzungen durch Moränenmaterial, durch feine Seeablagerungen und Schotter teilweise wieder aufgefüllt.

Die bis anhin letzte Eiszeit, die **Würmeiszeit**, ist besser bekannt als ihre Vorgängerinnen. Ihr Ablauf kann auf der nördlichen Hemisphäre wie folgt beschrieben werden:

- Ab 120‘000 Jahren vor heute stieg die Eismenge an den Polen und in den Gebirgen stark an.
- Nach einer lagen Periode von Gletscherschwankungen wurde eine erste maximale Ausdehnung der Gletscher um 70‘000 Jahren vor heute erreicht. Sie dauerte bis vor 60‘000 Jahren.
- Die Geschichte ging weiter mit schnellen Schwankungen. Ein letzter Vorstoss ist mit 20‘000 Jahren datiert.
- Darauf folgte das Abschmelzen der Gletscher, unterbrochen durch kurze Kälteperioden. Die zwei wichtigsten Pausen in diesem Gletscherschwund liegen um 16‘800 und 12‘000 Jahre. Während diesen Ereignissen gingen die Temperaturen weltweit stark zurück. Die Ursache lag am Ausfluss von riesigen Gletscherseen in der Region der Grossen Seen Nordamerikas in den Nordatlantik.
- Das Ende der Würmeiszeit liegt im Alpenraum etwas mehr als 11‘000 Jahre zurück. Blickt man aber über Mitteleuropa hinaus, so stellt man fest, dass die skandinavischen Gletscher noch während Jahrtausenden Widerstand leisteten.

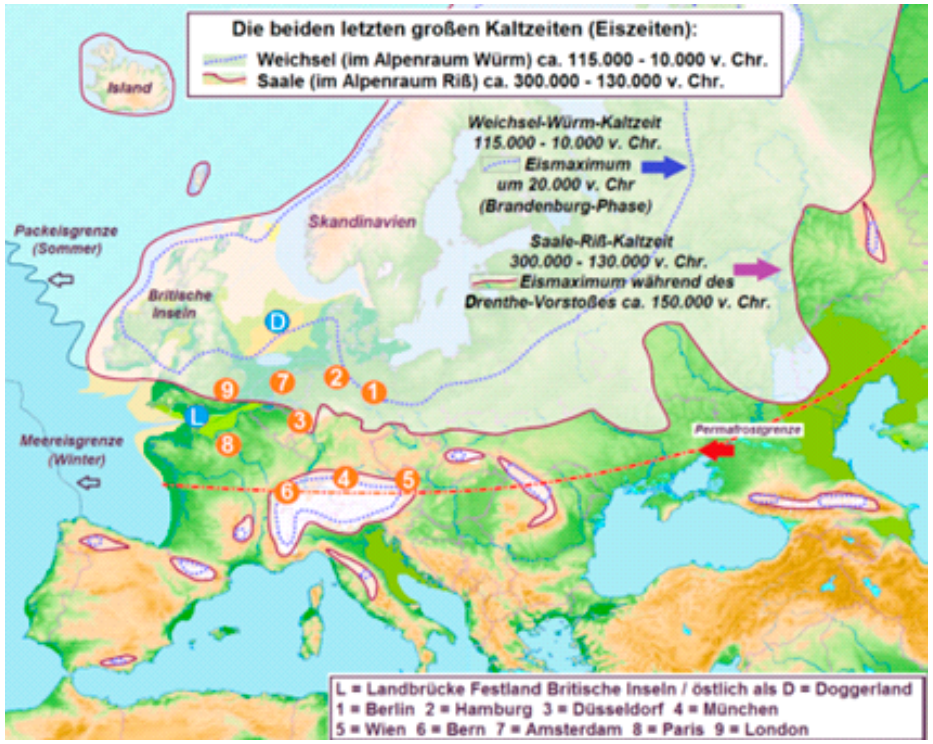
In der Schweiz stiessen die Gletscher der Würmeiszeit in mehreren Phasen ins nördliche Mittelland vor. Der Rückzug der Eisströme vollzog sich mit mehreren Zwischenhalten, wobei bei jeder Haltlinie ein Moränenkranz zurückblieb. Im Gegensatz zu den **Moränen** der Risseiszeit sind diejenigen der Würmeiszeit sehr ausgeprägt erhalten geblieben. Dies gilt auch für die seitlich der Gletscher gebildeten Wälle.

Unsere Landschaften wurden durch die Würmeiszeit stark geprägt. Nicht nur Moränen und **Findlinge** blieben in den Haupttälern zurück, sondern auch ein System von Schotterterrassen.

Endmoräne bei Möhlin

Die Tüfelsburdi auf dem Jolimont besteht aus drei grossen Granitblöcken. Sie kamen auf dem Rhonegletscher daher und stammen aus dem Val de Bagnes.

Die durch die Gletscher der Würmeiszeit besetzten Täler wurden durch diese tief ausgegraben. Beim Rückzug der Gletscher blieb in diesen Tälern daher jeweils ein Gletschersee zurück. Dieser wurde oft zuerst mit Moränenmaterial, sodann mit feinen Seesedimenten aufgefüllt. Hallwiler- Baldegger- und Zürichsee sind Relikte ehemaliger Gletscherseen.



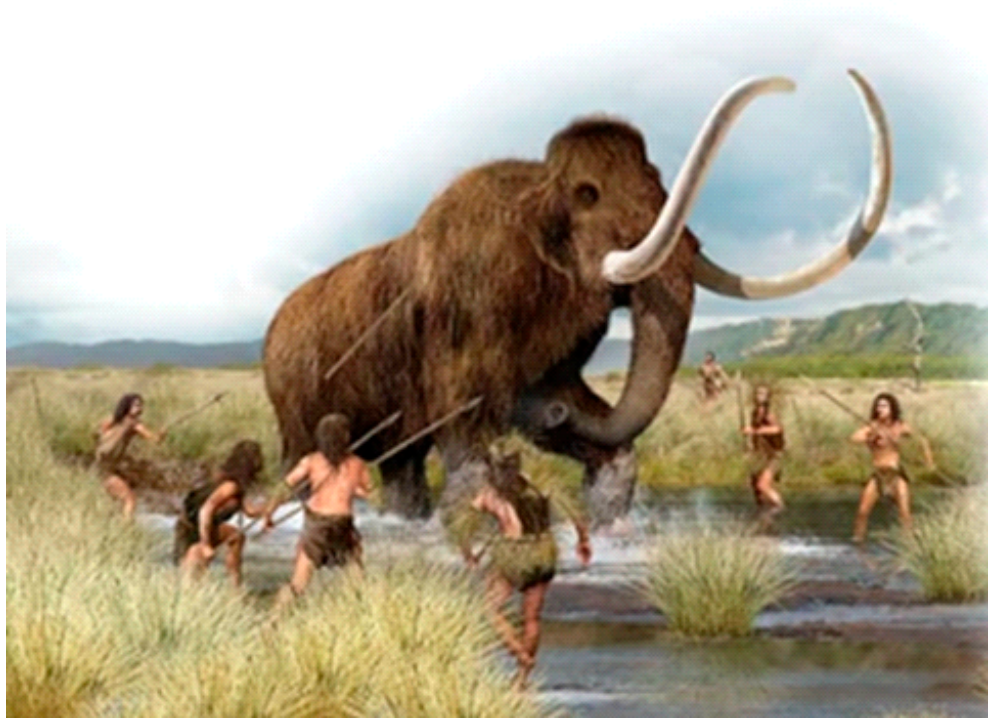
Ausdehnung der alpinen Vereisung in der Würmkaltzeit. Blau: Eisrandlage früherer Kaltzeiten

Vereisung vor 24‘000 Jahren (Würm-Glazial). Roter Punkt: Zürich.

Flora und Fauna:

Im Quartär ging die **Artenvielfalt** deutlich zurück, weshalb das Zeitalter in Expertenkreisen teilweise als das sechste Grosse Massenaussterben neben globalen Verheerungen wie der Kreide-Tertiär- und der Perm-Trias-Krise bezeichnet wird. Besonders die spätneogene Megafauna ging im Pleistozän verloren. Teilweise geschah dies durch den klimabedingten Verlust ihrer Lebensräume, teilweise aber auch durch den Jagddruck von Seiten der jungen Menschheit. Besonders fluchtunfähige, zutrauliche und schmackhafte Tiere fielen dem Menschen zum Opfer, so zum Beispiel der Riesen-Moa.

Auch Arten wie das sibirische Mammut, das Wollhaarnashorn oder das amerikanische Mastodon fielen vermutlich trotz ihrer Wehrhaftigkeit der Bejagung durch die neue Spitze der Nahrungskette zum Opfer, wobei im Fall der Wollhaarvarianten der Elefanten und Nashörner wohl auch das Klima eine grosse Rolle bei ihrem Aussterben spielte.



Tatsächlich hat der Mensch auch seine Rivalen aus der Familie Carnivora stark dezimiert, vor allem Europa ist nahezu raubtierarm, was heutzutage die Regulierung der Wildbestände durch Jagd notwendig macht. Bären, Wölfe, Luchse und Wildkatzen sind in Mitteleuropa rar geworden. Die bis in die Würmzeit noch Europa besiedelnden Höhlenlöwen, Höhlenbären und Höhlenhyänen sind inzwischen vollständig ausgestorben. Auch auf anderen Kontinenten sind natürliche Räuber selten geworden, viele stehen auf der Roten Liste der bedrohten Arten.

Auch die **Pflanzenwelt** hat unter der Expansion des Menschen gelitten. War die initiale Lichtung der dichten Urwälder in den temperierten Zonen eine Chance für die **Artenvielfalt** der Wiesen- und Heidepflanzen, so sorgen Herbizide und Monokultur-Anbau mittlerweile zu einem starken Rückgang der Pflanzenvielfalt.

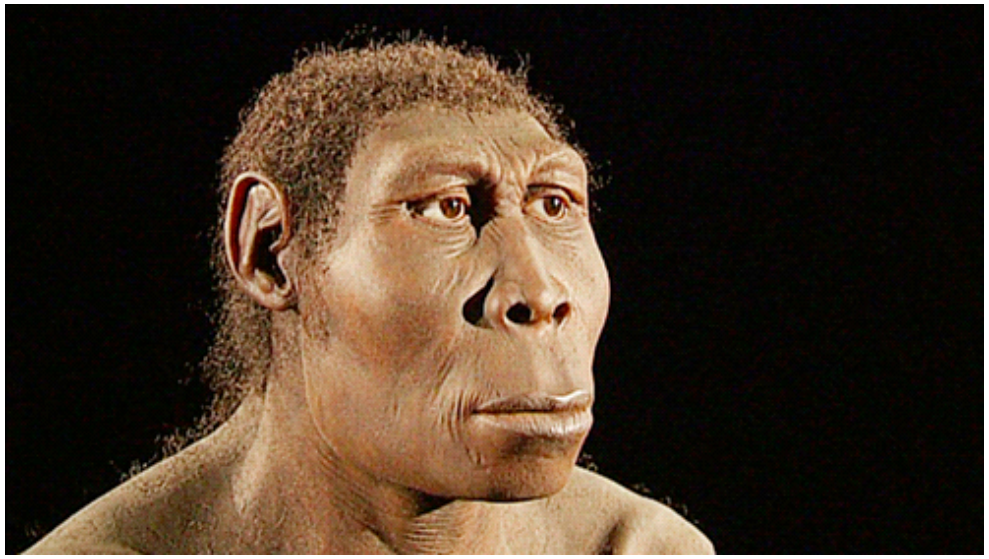
Der Mensch vernichtet als «erdumformende» Spezies auch grosse Areale an Lebensraum, was sie für einheimische Arten unbewohnbar macht. Durch das Trockenlegen von Sümpfen, das Abholzen von Wäldern, das Umleiten oder Aufstauen von Flüssen, der Bodenversiegelung zum Städtebau und nicht zuletzt einer Atmosphärenveränderung durch **Abgase** und einem damit zusammenhängenden Klimawandel verändert er die Erdoberfläche mit nie dagewesener Geschwindigkeit. Tiere und Pflanzen können sich meist nicht schnell genug anpassen, um mit der raschen Umweltveränderung Schritt halten zu können und viele von ihnen werden im Umfeld des Menschen auch nicht geduldet. Stand 2019 stehen 28 338 Arten von Tieren und Pflanzen auf der **Roten Liste** der bedrohten Arten. Man geht davon aus, dass pro Jahr ca. 1‘000 Tierarten aussterben. Obwohl aufgrund der Unvollständigkeit des Fossilberichts keine konkreten Aussagen über den prähistorischen Status quo bei diesem Wert getroffen werden können, wird abseits grosser Aussterbeereignisse meist von einer Extinktionsrate von ca. 10 Arten pro Jahr ausgegangen. Ein Anstieg dieses Wertes um den Faktor 100 stellt also eine eindeutige Anomalie dar.

Der Mensch

Zur Entwicklung der Menschheit gibt es eine Vielzahl an Hypothesen und möglichen Erklärungen. Eine davon nennt Afrika, speziell den Ostafrikanischen Grabenbruch als **“Wiege der Menschheit”,** von wo aus sich unsere Vorfahren in mehreren Auswanderungswellen auf den Kontinenten verbreiteten.

Die Menschheit begann das Quartär noch in der gebeugten, halbvierfüssigen Gestalt des *Homo rudolphensis*. Die Art stammte vermutlich direkt von **Australopithecus** *afarensis* ab, wobei die genauen Verwandtschaftsverhältnisse im menschlichen Stammbaum noch immer umstritten sind.

Auf *Homo rudolphensis* folgte vor ca. 2,1 Millionen Jahren *Homo ergaster*. Homo ergaster lebte zeitgleich mit zwei anderen, nahen verwandten Menschenarten, *Australopithecus africanus* und *Homo habilis*. Beide Arten starben kurz nach Auftreten von *Homo ergasters* Nachfahren, **Homo erectus**, aus, allerdings machte *Homo habilis* zuvor noch eine bedeutende Entdeckung, die Herstellung und den Gebrauch von Werkzeug. Die Geschichte von Werkzeugen wie Ästen und Steinen reicht bis in die prähumane Zeit zurück. Man geht davon aus, dass bereits frühe Formen von *Australopithecus* Objekte seiner Umgebung zur Selbstverteidigung nutzen konnten. Mit Knochenfunden von *Homo habilis* wurden jedoch erstmals bewusst veränderte Naturmaterialien gefunden, die als Werkzeug dienten, z. B. geschärfte und zugespitzte Steine.



Homo erectus

Der nächste Hominide, nach *Homo ergaster*, in unserer vermutlich direkten Abstammungslinie war vor 2,0 Millionen Jahren *Homo erectus*, der aufgerichtete Mensch. Fossilfunde in Südasien belegen, dass das Verbreitungsgebiet dieses reinen Zweibeiners bereits über den afrikanischen Kontinent hinausreichte. Da der letzte Australopithecus um diese Zeit herum ausstarb und auch die Artenvielfalt des Parallelstrangs zur Menschheit, *Paranthropus*, während dem folgenden Jahrmillion auf null sank, ist davon auszugehen, dass *Homo erectus* die konkurrierenden Hominiden verdrängte.

Wie lange *Homo erectus* tatsächlich die Welt dominierte ist unbekannt. Knochenfunden von 2019 nach, die auf das Riss-Würm-Interglazial datiert werden konnten, lebte *Homo erectus* noch bis vor 117‘000 Jahren, zumindest auf der Insel Java in Indonesien. Die letzten verbliebenen Vertreter mussten jedoch in der Würmzeit einer neuen Art Platz machen, solchen mit geschickteren Händen, weiter entwickelten Werkzeugen und einem grösseren Hirnvolumen. Der moderne Mensch, **Homo sapiens**, eine Art, die sich vermutlich, während der späten Mindelzeit in Ostafrika entwickelt hatte, stand seinem Vorfahren in punkto Expansionswillen in nichts nach. Nach der Eroberung des afrikanischen Kontinents breitete sich die Art nach Europa und Asien aus. Gebirge stellten ein enormes Hindernis dar, aber bis vor ca. 40‘000 Jahren hatte Homo sapiens selbst abgelegene und nahezu unzugänglichen Gebiete Eurasiens wie zum Beispiel die Iberische Halbinsel erobert.

Neandertaler-Familie

In den kältesten Jahrtausenden der Würm-Eiszeit sank der Meeresspiegel auf ein Niveau, das Indonesien und die Aleutenkette zu langgezogenen Landbrücken werden liess. In diesen Zeiten verbreitete sich *Homo sapiens* bis nach Australien und Amerika. Der einzige Rivale, der ihm in dieser Ausbreitung entgegenstand, war *Homo neanderthalensis*. Wo genau der **Neandertaler** entstanden war, ist unbekannt. Der Neandertaler war dem *Homo sapiens* körperlich leicht überlegen, auch sein Hirn war grösser als das von *Homo sapiens*, wenn auch vermutlich weniger stark gefurcht. Eine Parallelexistenz beider Arten von Menschen war selten von langer Dauer, und die Beziehungen zwischen beiden können nur erahnt werden. Bekannt ist nur, dass charakteristische Werkzeuge von *Homo neanderthalensis* auch in *Homo sapiens*-Siedlungen gefunden wurden. Ob es sich dabei um Handelsgüter, Fundsachen oder Kriegsbeute handelt, ist unbekannt. In jedem Fall verschwand der *Homo neanderthalensis* meist kurz nach Eintreffen des *Homo sapiens*. Obwohl die Theorie einer Verpaarung beider Arten noch immer besteht, konnte sie bislang nicht bestätigt werden. Bis vor circa 30‘000 Jahren, also noch während der Würm-Eiszeit, starb der *Neandertaler* als solcher aus, und *Homo sapiens* war die letzte überlebende Art seiner Gattung.

Rascher als jede Spezies vor ihr entwickelte sich **Homo sapiens** zum “Global Player”. Die Fähigkeit, komplexe, schlagkräftige Werkzeuge zu konstruieren war ein entscheidender Vorteil im Vergleich zu Raubtieren, die auf ihre begrenzte Zahl biologischer Merkmale beschränkt war. Das hochentwickelte **Gehirn** des Menschen ermöglichte ihm neben Kommunikation und Rudelbildung das Konzipieren von Fallen zum Beutefang. Ausserdem zeichnete sich der Mensch durch eine hohe Ausdauer aus. Im Gegensatz zu vielen anderen Räubern setzte der moderne Mensch nicht auf hohe Geschwindigkeit und eine schnelle Überwältigung der Beute, er bewegte sich stattdessen energiesparender und spezialisierte sich auf die **Verfolgungsjagd**, wobei vor allem Fähigkeiten wie das Fährtenlesen wichtig wurden. Fliehende Beute musste sich ausruhen, Energie schöpfen, kontinuierlich grasen, und diese Gelegenheiten nutzte der Mensch zum Angriff.

Dieser erfolgte meist auf weite Distanz mittels Wurf-, Schleuder- und später Schusswaffen. Die Möglichkeit, ein Tier erlegen zu können, ohne sich in dessen Reichweite begeben zu müssen, war ebenfalls ein entscheidender Vorteil, sowohl gegen wehrhafte Beutetiere als auch gegen Raubtiere.

Ein weiterer Vorteil des Menschen war seine **omnivore Ernährung**, die von hartschaligen Pflanzen, über Früchte, Samen und Wurzeln bis hin zu Fleisch und anderen Tierprodukten reichte. Er war nicht rein auf einen Jagderfolg angewiesen, um gut überleben zu können.

Umstritten ist, seit wann Hominiden **Feuer** aus natürlichen Quellen wie Blitzschlag nutzten. Einigen Vermutungen nach nutzten schon *Homo habilis* und die späten Australopithecinen das Feuer zur Nahrungszubereitung und -desinfektion, sowie zur Abwehr von Raubtieren, als Licht- und Wärmequelle und als Kommunikationssignal. Unter *Homo erectus* und *Homo sapiens* diente das Feuer schliesslich auch der Treibjagd. Die Angstwirkung des Feuers konnte genutzt werden, um Tiere in eine bestimmte Richtung zu lenken; indem man bestimmte Areale eines Waldes in Brand setzte, konnten Tiere in Richtung der Jäger oder der Fallen getrieben werden. Feuer bereicherte den Menschen zudem um ein weiteres Farbpigment. Neben den seit jeher genutzten Ocker- und Rottönen, aus Lösserde, Lehmen und Blut, konnte jetzt auch mit schwarzer Kohle auf Felsen und die Haut gezeichnet werden. Gegen Ende der Altsteinzeit, vor ca. 32‘000 Jahren, wurden Flintsteinknollen (eine mikrokristalline Quarzvariante) in den Höhlen des Homo sapiens prominenter. Mittels eines Flintsteins und einer Pyrit- oder Markasit-Klinge können gezielt Funken zur Feuerentfachung geschlagen werden.

Der Mensch ist auch die erste Tierart, die, nach menschlicher Definition des Wortes, eine **Kultur** entwickelte. Kunst, Kultur und Religion entwickelten sich vermutlich im Einklang miteinander. So ist zum Beispiel die Grotte Chauvet in der Ardèche Südfrankreichs eine der ältesten Fundstellen von Höhlenmalereien (ca. 35‘000 Jahre alt). Gleichzeitig war die Höhle aber vermutlich auch eine religiöse Stätte, was aufgrund der Anordnung von Bärenschädeln in der Grotte vermutet wird. Die ersten Naturreligionen entstanden vermutlich aus der Verehrung lebender natürlicher Vorbilder, vor allem Raubtiere, die für ihre Stärke und Schnelligkeit bewundert und beneidet wurden.

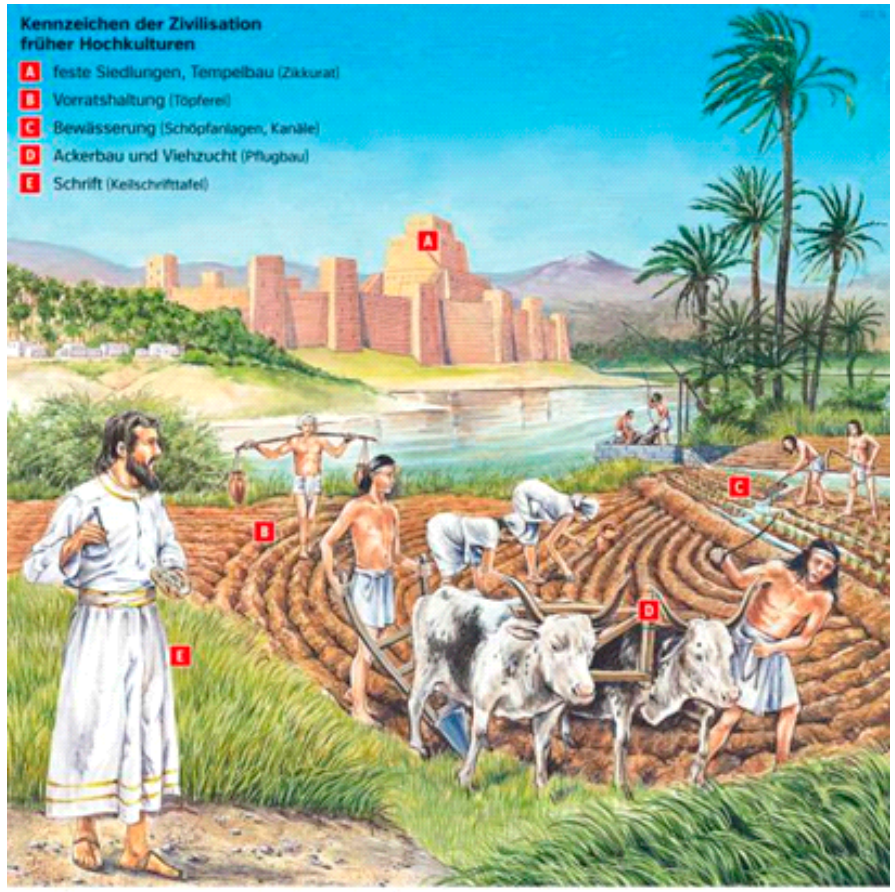
Die Verehrung abstrakterer Naturelemente, wie z.B. den Geistern bestimmter Lebensräume, wie Flüsse oder Wälder und nicht zuletzt Sonne und Mond folgte erst deutlich später. Aus diesen Grundelementen entwickelte sich später ein meist polytheistischer **Götterglaube**. Diese frühen Religionen versprachen den Menschen Sicherheit und Erfolg durch die Gunst der Götter, sofern sie diese durch Kunst, Zeremonie, Opfergaben oder einen bestimmten Lebensstil gnädig stimmte.

Kunst hatte allerdings auch noch eine andere Funktion, die der Selbstdarstellung, der Verehrung anderer Menschen oder dem Überbringen, bzw. Konservieren von Botschaften. Meist ist aus heutiger Sicht jedoch nicht mehr eindeutig, welche Botschaft die damaligen Kultobjekte vermitteln sollten. Im Hohlenstein-Stadel, einer Höhle im Lonetal auf der Schwäbischen Alb, wurde eine circa 37‘000 Jahre alte Figur aus Mammutelfenbein gefunden, die einen Mann mit einem Löwenkopf darstellt. Die Verknüpfung von Mann und Raubtier kann hier entweder zu Ehren eines starken Jägers oder Kriegers geschaffen worden sein, könnte aber auch einen religiösen Würdenträger, ein Fabelwesen oder einen Naturgeist darstellen, den es zu achten oder zu fürchten galt. Noch weiter geht die Schere der Bedeutungen bei der „Venus vom Hohlen Fels“ auseinander. Die 40‘000 Jahre alte Darstellung einer üppig proportionierten Schwangeren könnte sowohl eine schöpferische Muttergottheit, eine konkrete Person aus dem Umfeld des Künstlers oder einfach ein fiktives Objekt sexueller Begierde darstellen. Letzteres ist in der Kunst bis heute nicht selten, auch in den **Höhlen Chauvet und Lascaux** wurden Genitaldarstellungen unkonkreter Personen beider Geschlechter gefunden. Naturreligionen tendieren dazu, den lebensschöpferischen Anteil des menschlichen Lebenszyklus zu glorifizieren. Die Frau in ihrer Funktion als Mutter war und ist ein heiliges Symbol in vielen Naturreligionen.

Höhle von Lascaux

Global wichtige Fundstellen für die frühe Entwicklung der menschlichen Kultur sind die Höhlen La Grotte Chauvet und Lascaux in Südfrankreich, in denen die ältesten **Felsmalereien** der Welt gefunden wurden, so wie der Hohle Fels bei Blaubeuren, Baden-Württemberg, wo die älteste menschengemachte Statuette gefunden wurde, eine 40‘000 Jahre alte Frauendarstellung (Venus vom Hohle Fels).

Im Rahmen der Würm-Eiszeit, zwischen ca. 100‘000 und 15‘000 Jahren vor heute gelang dem Menschen zudem die Domestikation des Wolfes zum **Hund**. Zunächst war es wohl noch eine sehr lose Bindung beider Arten. Wölfe folgten Menschen und bedienten sich aus deren Jagdabfällen, Menschen folgten Wölfen und jagten diesen die Beute ab. Dieses wechselseitige Profitieren entwickelte sich schliesslich zu einer symbiotischen Beziehung. Die menschliche Nähe sicherte das Überleben der Wölfe und die Menschen profitierten von deren Fähigkeit, Beute im Sprint schneller zu verfolgen als ein Mensch es könnte.



Neolithische Revolution durch frühe Landwirtschaft und ersten Städtebau

Die Altsteinzeit (Paläolithikum) ging mit der sogenannten **Neolithischen Revolution** in die Jungsteinzeit (Neolithikum) über. Die Neolithische Revolution bezeichnet die Entwicklung einer **Agrikultur**, eines gezielten Pflanzenanbaus zur Nahrungsproduktion, sowie der **Domestizierung** verschiedener Tiere wie Schweine, Rinder, Schafe, Ziegen und Pferde. Da diese Entwicklung von Ort zu Ort früher oder später stattfinden konnte, sich vermutlich auch durch Nachahmung von „Kulturepizentren" aus verbreitete und über einen längeren Zeitraum hinweg stattfand, kann die Neolithische Revolution nicht auf ein bestimmtes Jahrtausend datiert werden. Die älteste Neolithische Revolution fand vermutlich im Fruchtbaren Halbmond Vorderasiens statt, einer Region zwischen den Flüssen **Euphrat und Tigris**, und entlang der östlichen Mittelmeerküste, im Bereich des heutigen Israel. Hier werden die ersten Ackerbauspuren auf 9'500 vor Christus datiert, wobei ein vereinzelt als Kornspeicher interpretiertes Gebäude aus Jordanien bereits 11'000 v. Chr. bestand. Weitere Kulturepizentren waren Südchina circa 7'000 v. Chr., Neuguinea circa 6'500 v. Chr., Mexico circa 3'000 v. Chr., die Südamerikanische Westküste circa 2'500 v. Chr. und die Mississippi-Region circa 2'000 bis 1'000 v. Chr. In Westeuropa kam die Neolithische Revolution von Vorderasien aus circa 5'500 v. Chr. an. Die Konstruktion von Häusern war eine Entwicklung, die meist kurz vor oder kurz nach der Neolithischen Revolution stattfand.

Das erste Metall, dass Menschen in Vorderasien, Südosteuropa und Ägypten nutzbar machten, war das vergleichsweise stabile Edelmetall **Kupfer**. Die Kupfersteinzeit, die (wieder lokal unterschiedlich) von circa 5'500 v. Chr. bis 2'500 v. Chr. andauerte, zeichnete sich durch eine exzessive Nutzung des Metalls in Werkzeugen, Schmuckstücken und Waffen aus. Hauptquelle des Kupfers war der Malachit-Abbau in Syrien und Israel. In den speziell konstruierten Keramikhochöfen der Halaf-Kultur (Zentralsyrien) konnte das Kupfer bei Temperaturen von bis zu 1'000°C aus den Erzen ausgeschmolzen und in Form gegossen werden.

Die wohl bekannteste der fünf frühen **Hochkulturen**, Ägypten, etablierte sich ca. 4'500 vor Christus entlang des Nils, wo die jährliche Nilflut nährstoffreichen Schlamm mitbrachte und den Boden für Ackerbau prädestinierte. Kupferklingen an Erntewerkzeugen und Pflügen erleichterten die Arbeit erheblich. Da in den frühen Hochkulturen Nahrung nun im Überfluss vorhanden war, konnten die Menschen nun auch anderen Beschäftigungen nachgehen, eine soziale **Arbeitsteilung** entstand. Menschen spezialisierten sich auf einen bestimmten Beruf und begannen, ihre Technologien weiter zu verfeinern. Architektur, Kleidung, Kunst, Werkzeugherstellung, in allen Bereichen des damaligen Lebens wurde experimentiert. Ein Finanzsystem entwickelte sich, und eine universelle Währung. Verwaltungsposten entstanden, Machtpositionen wurden vereint, Regierungsapparate etablierten sich, meist geführt vom erfolgreichsten, beliebtesten oder selbstbewusstesten Mitglied einer Kommune und dessen Erben. Das Konzept einer sozialen Hierarchie war nicht neu, aber in den frühen Hochkulturen wurde sie mehrstufiger und schwerer zu erklimmen.

Keilschrift

Um dem Verlust von Wissen und Fortschritt entgegenzuwirken, entstanden im Nahen Osten mehrere komplexe Zeichensysteme, die, von einem verständigen Auge gelesen, Wissen vermitteln konnten. **Schrift**, ein meist nur den höheren Bürgerschichten zugängliches Konzept, erlaubte die Dokumentation von wissenschaftlichen Entdeckungen, technischen Neuentwicklungen, Vermutungen oder rein fiktiver Prosa, sowie deren Konservierung für die Nachwelt. Mit der Schrift entwickelten sich auch neue Berufe: Schreiber, Übersetzer, Schriftgelehrter, Aktenverwalter. Die wohl älteste Schriftart aller Zeiten ist die mesopotamische Keilschrift (3‘400 vor Christus).

Vor circa 3‘000 Jahren gelang im Nahen Osten schliesslich ein weiterer Durchbruch der Metallurgie: Die Vermischung von Kupfer und einem kleinen Anteil des unedlen Metalls Zinn erhöhte die Stabilität der entstehenden Legierung erheblich. Die heute unter dem Namen **Bronze** geläufige Legierung war so revolutionär, dass die gesamte Epoche von 2‘500 bis circa 880 vor Christus heute als Bronzezeit bezeichnet wird.

Ein beliebtes Beispiel für eine bronzezeitliche Hochkultur ist das Alte Griechenland, wobei der **Hellenismus**, die griechische Kultur, in stetigem Wandel und einer kontinuierlichen Veränderung unterworfen war. Durch die Expansion der Griechen im Mittelmeerraum entstand eine Vielzahl unabhängiger Kolonien, die sich zwar grundlegend ähnelten, aber keine übergeordnete Regierung besassen. Jede Kolonie hatte ihren eigenen Führungsstil, individuelle Gesetze und Normen, und eigene Herrschaftsansprüche über die anderen Kolonien.

Das Aufschmelzen von Eisenerzen brachte schliesslich ein noch härteres Metall hervor, dass der Zeit ab 880 vor Christus die Bezeichnung **Eisenzeit** gab. Bis zur Gründung Roms 753 vor Christus war das Metall im ganzen griechischen Mittelmeerraum verfügbar und genutzt.

Das **Römische Reich** war ein Staat im Altertum. Etwa von 200 vor Christus bis 480 nach Christus war es das grösste Reich im damaligen Europa.

Das Römische Reich zur Zeit seiner grössten Ausdehnung

Nach dem Untergang des Römischen Reiches und dem Ende der Antike, begann bei uns das **Mittelalter**, das bis ca. 1‘500 n. Chr. dauerte. Es war die Zeit der Romanik, Gotik und der Renaissance.

Anschliessend begann die **Neuzeit** mit der Erfindung des Buchdruckes, der «Entdeckung» der Neuen Welt, die Begründung des heliozentrischen Weltbildes und der Reformation.

Ein Einschnitt, mit der die Neueste Zeit beginnt, ist die **Französische Revolution** von 1789. Mit ihr brachen die veraltete Feudalordnung und der Absolutismus zusammen. Die Nationalversammlung beseitigte alle Standesrechte des Adels und verkündete die Menschen- und Bürgerrechte.

Zu den besonderen Merkmalen der Neuzeit im Unterschied zu früheren Epochen der Menschheitsgeschichte gehören bei verlängerter Lebenserwartung verminderte Geburtenraten, ein beschleunigter Wandel wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Verhältnisse sowie die Globalisierung von Verkehrsverbindungen, ökonomischen Zusammenhängen und Kommunikationsmöglichkeiten. Als Beschleunigungsfaktoren des **neuzeitlichen Wandels** sind wissenschaftliche Erkenntnisse, revolutionäre Umwälzungen, kapitalistische Wirtschaftsstrukturen und demokratisches Freiheitstreben bedeutsam.

Ära	System	Epoche	Alter (Mio. Jahre)	Wichtige Ereignisse
Erdneuzeit (Känozoikum)	Quartär	Holozän	0,01	▲ Landwirtschaft, Sesshaftigkeit
		Pleistozän	2,6	▲ erste Menschen
	Neogen	Pliozän	5,3	▲ Jurafaltung
		Miozän	23	
	Paläogen	Oligozän	34	◯ 33 bis heute Känozoische Eiszeit
		Eozän	56	▲ Alpenbildung
		Paläozän	66	✸ Kreide-Paläogen Massensterben
Erdmittelalter (Mesozoikum)	Kreide	obere	100	
		untere	145	
	Jura	oberes	161	
		mittleres	176	
		unteres	200	✸ Trias-Jura-Massensterben
	Trias	obere	228	▲ erste Säugetiere
		mittlere	245	
		untere	251	✸ Perm-Trias Massensterben
Erdaltertum (Paläozoikum)	Perm		300	▲ erste Reptilien
	Karbon		360	✸ Devon-Massensterben ◯ 360-260 Karoo Eiszeit
	Devon		416	▲ erste Amphibien
	Silur		444	✸ Silur-Massensterben
	Ordovizium		488	◯ 460-420 Anden-Sahara Eiszeit
	Kambrium		542	▲ erste Fische
Neues Proterozoikum	Ediacarium		635	◯ 650-580 Marinoische/Gaskiers Eiszeiten
	Cryogenium		850	◯ 750-700 Sturtische Eiszeit
	Tonium		1'000	
Mittleres Proterozoikum			1'600	▲ ab 1'500 Eukaryoten
Frühes Proterozoikum			2'500	◯ 2'400-2'100 Huronische Eiszeit
Archaikum			4'000	▲ ab 2'700 Photosynthese, Cyanobakterien ▲ ab 3'800 erste Einzeller
Hadaikum			4'600	
Urknall			13'700	

Zusammenfassung

Infolge einer als **Urknall** bekannten kosmischen Explosion vor ca. 13,7 Milliarden Jahren entstanden gleichzeitig Raum, Zeit und Materie. Das Universum war geboren.

Was wir heute als **Sonne** kennen, begann vor 4,6 Milliarden zu scheinen.

Die grosse Hitze bei der Entstehung der Erde hatte wahrscheinlich zur Folge, dass der gesamte Planet anfangs aus **geschmolzener Materie** bestand. Festere Materie sank zuerst zum Erdmittelpunkt, leichtere stieg zur Erdoberfläche. Als sich der Planet dann allmählich abkühlte, bildete diese leichtere Materie eine dünne Erdkruste, die Basis der vergangenen und heutigen Kontinente und Ozeanbecken.

Die auf der zähflüssigen Schmelze des Erdmantels driftenden **Kontinentalplatten** reichen tief in den Erfdmantel hinein. Gemäss der Plattentektonik ist die Erdkruste in verschieden grosse, relativ starre Platten von bis zu 200 Kilometern Dicke gegliedert, die mit vielen Grenzzonen entlang ozeanischer Rücken und Gräben aneinanderstossen und sich aufgrund der Strömungsprozesse im Erdmantel langsam bewegen.

Unser blauer Planet "**Erde**" ist ein Unikat unseres Sonnensystems: nur auf ihm ist bisher Leben nachgewiesen worden. Rund siebzig Prozent der Oberfläche sind von einer zusammenhängenden **Wassermasse** bedeckt. Die Erde ist im gesamten Sonnensystem der einzige Planet, der über derart grosse Wassermassen in flüssiger Form verfügt. In der über 4,5 Milliarden Jahre währenden Geschichte unseres Planeten war das Wasser die Wiege des Lebens.

Die Anfangszeit der Erde, welche auch als **Archaikum** bezeichnet wird, war zunächst ohne organisches Leben. Diese Epoche umgreift allgemein die Zeitstellung von 4 bis 2,5 Milliarden Jahren. Ab 3,8 Milliarden Jahren entstanden die **Bakterien** als erste Organismen und ab 2,7 Millarden Jahren können die ersten Cyanobakterien, die **Sauerstoff** produzierten, nachgewiesen werden. Diese Cyanobakterien lösten die sog. Huronische Eiszeit aus, die 300 Millionen Jahre dauerte.

Ab 1,5 Milliarden Jahren vor heute entstanden die **Eukaryoten** mit einem Zellkern, die erst die Bildung von höheren Lebewesen ermöglichten. Diese als **Proterozoikum** genannte Epoche dauerte sehr lange, bis vor 550 Millionen Jahren.

In der nachfolgenden Epoche des **Kambrium** ab etwa vor 540 Millionen Jahren waren mit Ausnahme der Wirbeltiere bereits alle wichtigsten Tiergruppen, wie maritime Wirbellose, erste Chordatiere und die maritimen Pflanzen vertreten.

Im Kambrium kam es offenbar durch heftigen Vulkanismus mit vergleichsweise schnell driftenden Landmassen zu einer enormen Veränderung der ehemaligen Lebensräume. Die resultierende, verhältnismässig "rasche" Neuverteilung der Landmassen könnte in jener Zeit die so genannte **Kambrische Explosion** verursacht haben - eine Art "Biologische Spontanzündung": Auf den damaligen Kontinenten entwickelten sich dementsprechend mit einer bislang beispiellosen Beschleunigung der biologischen Evolution in rascher Folge eine Vielzahl neuer Lebewesen.

Aus dem nachfolgenden **Ordovizium** ab 495 Millionen Jahren kennen wir die ersten Wirbeltiere; die Fische treten auf. Dieses Erdzeitalter endet mit einem erstem **Massenaussterben** auf unserem Planeten. Dieses Ereignis vor 443 Millionen Jahren führte - wohl infolge der Kontinentaldrift zu sich abwechselnden Warm- und Kaltzeiten zu entsprechendem Klimawandel, so dass mehr als 80 Prozent aller damaligen Arten ausstarben.

Im warmen, jahrmillionenlangen Klima des nachfolgenden **Karbon** entwickelte sich die Pflanzenwelt in beeindruckendem Umfang weiter. Zum ersten Mal in der Erdgeschichte kam es damals zu wirklich umfangreichem Pflanzenwachstum und anschliessend zu riesigen Ablagerungen von organischem Material, aus denen die mächtigen **Steinkohlelager** entstanden.

Mit der Periode des **Perm** endete vor 250 Millionen Jahren das Erdaltertum. Das Perm ist in tektonischer Sicht eine unruhige Zeit. Durch die Kollision von Gondwana mit Laurasia und Sibiria wurde der Superkontinent **Pangäa** gebildet.

In den Meeren übernahmen die Haie das Szepter. Die ersten Landwirbeltiere entstanden: Aus den Amphibien entwickelten sich die **Reptilien**, die sich aufspalteten in den Urahn der Dinosaurier und die Stammlinie der späteren Säugetiere.

Der Übergang vom Perm zur **Trias** war eine Zeit des grossen Sterbens: Meerestiere wurden vor 250 Millionen Jahren ebenso dezimiert wie Landbewohner, Wirbeltiere ebenso wie Weichtiere und Insekten. 95% der Meerestiere und 75% der Landbewohner starben aus. Der Grund war ein riesiger **Vulkanausbruch** mit Flutbasalten im heutigen Sibirien. Das viele Kohlendioxid und die Schwefelverbindungen versauerten die Meere und die Temperaturen stiegen durch den Treibhauseffekt. Erst acht Millionen Jahre nach diesem Massenaussterben hatten sich die Riffe wieder erholt. Wälder und Steppen an Land brauchten 12 bis 15 Millionen Jahre, um wieder auf ihre ursprüngliche Grösse anzuwachsen.

Die nachfolgende Epoche des **Juras** beginnt ab etwa 205 Millionen Jahren. Die Zeit war zunächst einheitlich warm bis heiss und feucht. In den Klimazonen breiteten sich verschiedene Lebensräume mit einer artenreichen Flora aus. Im Jura rückte das Meer weltweit vor: Grosse Teile des Festlandes wurden übeflutet, darunter auch weite Teile Mitteleuropas. Auf dem Festland wurden die **Dinosaurier** die bestimmende Form. Die ersten Vögel entstanden.

Die letzte Epoche des Erdmittelalters, die **Kreidezeit**, datieren wir ab 144 Millionen Jahren bis 65 Millionen Jahren vor heute. Seit dem Jura hatte sich der Zerfall Pangäas beschleunigt, die Bruchstücke waren Nordamerika, Europa, Asien und Gondwana. Das Klima erwärmte sich deutlich, was in einem ansteigenden Meeresspiegel resultierte. Kreide wurde hauptsächlich durch **Kalkalgen** gebildet. Im Meer herrschten riesige Reptilien und an Land die Saurier.

Das Erdmittelalter endete vor 65 Millionen Jahren mit einem **Massenaussterben**. Es wurde durch einen Meteoriteneinschlag ausgelöst, durch einen Ausbruch von Flutbasalten oder durch beides.

Mächtige Tsunamis, hohe Staubfreisetzung, tektonische Schockwellen mit weltweiten Erdbeben und Vulkanausbrüchen, Verringerung der Sonneneinstrahlung und der Zusammenbruch ganzer Nahrungsketten waren die Folgen. Daraus resultierte das Aussterben u.a. der Dinosaurier.

Auf die Kreide folgte das **Paläogen** (65 Millionen Jahre bis 23 Millionen Jahre vor heute) und die Erdneuzeit begann. Schon in der Kreide hatte ein langsamer **Klimawandel** eingesetzt. Die Erde befand sich in einem zunächst sachten Übergang vom Treib- zum Kühlhaus. Zu Beginn dieses Zeitalters wuchsen in Mitteleuropa noch üppige tropische und subtropische Urwälder, Palmen waren bis nach Grönland und Alaska verbreitet. Seit 34 Millionen Jahren ist die Antarktis vergletschert und das war der Anfang des Kanäozoische Eiszeitalters. Das Klima war äusserst variabel und gab reichlich Anreize für die Evolution. Das Zeitalter der **Säugetiere** hatte begonnen. In den nun kalten Meeren kamen die ersten Wale auf. Die **Alpen** wurden gebildet und teilweise wieder abgetragen.

Das **Neogen** überspannt den Zeitraum von 23 Millionen Jahren bis vor 2,6 Millionen Jahren. Im Neogen ist der ehemalige Superkontinent Pangäa zerfallen, die Landkarte wurde zu der, die wir heute kennen: Die Kontinente rückten auf ihre heutige Position. **Molasse** von der Alpenerosion wurde in der Schweiz im Mittellandtrog abgelagert und der Jura wurde aufgefaltet. Vor 15 Millionen Jahren war ein Meteorit die Ursache des Nördlinger Ries. Vor 5,6 Millionen Jahren trocknete das Mittelmeer für 300`000 Jahre aus. Charakteristisch für die Fauna der letzten Kaltzeit waren Grosstiere, wie **Mammuts**, Säbelzahnkatzen, Riesenfaultiere, Riesenkängurus und grosse flugunfähige Vögel. Innerhalb der Gruppe der Säugetiere fand eines der wichtigsten Ereignisse im Evolutionsprozess statt: die Entstehung der **Homoiden**. Im Meer schwimmt seit 15 Millionen Jahren der Walhai dem Krill nach.

Das Pleistozän am Anfang des Quartärs, als jüngster Abschnitt der Erdgeschichte ist seit 2,6 Millionen Jahren nahezu weltweit durch mehrfach zyklische wechselnde Klimabedingungen charakterisiert. Kaltzeiten wurden durch Warmzeiten mit entweder gleichen oder höheren Temperaturen voneinander getrennt wie heute. Für den Alpenraum lassen sich ab 800`000 Jahren bis heute vier **Eiszeiten** rekonstruieren. Die letzte Eiszeit, die Würmeiszeit, endete vor ca. 11`000 Jahren.

Unsere Landschaften wurden durch die Würmeiszeit stark geprägt. Nicht nur Moränen und **Findlinge** blieben in den Haupttälern zurück, sondern auch ein System von Schotterterrassen.

Nach verschiedenen Zwischenschritten erschien vor 200`000 Jahren in Afrika der **Homo sapiens**.

Vor 70`000 Jahren brach auf Sumatra ein Supervulkan aus. Es folgte eine tausendjährige **Kälteperiode**. Das Überleben der Menschheit stand damals auf Messers Schneide.

Vor ca. 40`000 Jahren erreichte der Homo sapiens Europa.

Im Quartär ging die **Artenvielfalt** deutlich zurück. Teilweise geschah dies durch den klimabedingten Verlust ihrer Lebensräume, teilweise aber auch durch den Jagddruck von Seiten der jungen Menschheit. Auch die **Pflanzenwelt** hat unter der Expansion des Menschen gelitten.

Der Mensch ist die erste Tierart, die, nach menschlicher Definition des Wortes, eine **Kultur** entwickelte. Kunst, Kultur und Religion entwickelten sich vermutlich im Einklang miteinander.

Die Altsteinzeit ging mit der sogenannten **Neolithischen Revolution** vor ca. 10`000 Jahren in die Jungsteinzeit über. Die Neolithische Revolution bezeichnet die Entwicklung einer **Agrikultur**, eines gezielten Pflanzenanbaus zur Nahrungsproduktion, sowie der Domestizierung verschiedener Tiere wie Schweine, Rinder, Schafe, Ziegen und Pferde. Auch wurden die Menschen erstmals sesshaft und eine Arbeitsteilung entstand. Die Geschichte seit damals lässt sich anhand der benutzten Werkzeuge und Waffen beschreiben: Auf die Steinzeit folgte die Kupferzeit, anschiessend die Bronzezeit und darauf die Eisenzeit.

Nach dem Untergang des Römischen Reiches und dem Ende der Antike um 500 n. Chr., begann bei uns das **Mittelalter**, das bis ca. 1500 n. Chr. dauerte. Anschliessend begann die **Neuzeit** mit der Erfindung des Buchdruckes, der «Entdeckung» der Neuen Welt, die Begründung des heliozentrischen Weltbildes und der Reformation.

Zu den besonderen Merkmalen der Neuzeit, im Unterschied zu früheren Epochen der Menschheitsgeschichte, gehören bei verlängerter Lebenserwartung, verminderte Geburtenraten, ein beschleunigter Wandel wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Verhältnisse, sowie die

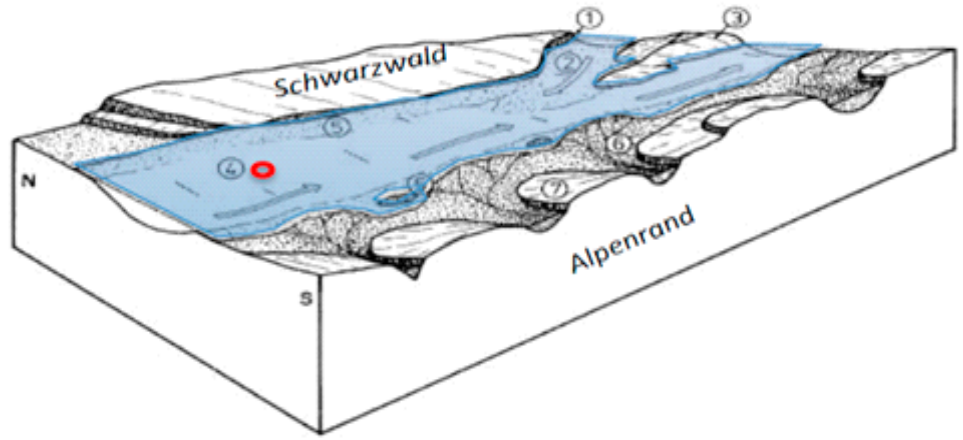
Globalisierung von Verkehrsverbindungen, ökonomischen Zusammenhängen und Kommunikationsmöglichkeiten.

Das heutige Bild aller Lebensräume unserer Erde ist das Ergebnis einer seit mehr als 3,5 Milliarden Jahren andauernden biologischen Evolution. Sie hat mit den Dinosauriern und Walen die mächtigsten Tiere geschaffen, die die Erde je bewohnt haben. Und mit winzigen Spitzmäusen, hummelgrossen Kolibris und stecknadel-kopfkleinen Taufliegen hat sie Formen hervorgebracht, die sich trotz ihrer Zwergenhaftigkeit genauso perfekt in der Welt orientieren und bewegen wie die Riesen.

Es haben unter anderem auch ständige Kontinentalbewegungen, Meteoriteneinschläge, Gebirgsbildungen, vulkanische Aktivitäten sowie Vegetations- und Klimawandel das Bild unseres Globus bis auf den heutigen Tag verändert und gestaltet.

Eine kurze geologische Geschichte der Schweiz

Zu Beginn dieser Geschichte, vor etwas mehr als 300 Millionen Jahren, lag die Schweiz knapp südlich des Äquators, im feuchten Tropenwald. Dann glitt sie als Folge der Kontinentalwanderung in den Bereich der heissen Sand- und Salzwüsten der Subtropen. Mit der beginnenden Öffnung des ozeanischen Alpenmeeres und des Atlantischen Ozeans vor 200 Millionen Jahren stieg der Meeresspiegel an und ein warmes, seichtes Meer überflutete die Schweiz und grosse Teile Europas. Etwa 150 Millionen Jahre dauerte diese Überflutung, bis die Alpenfaltung, verursacht durch die Kollision von Afrika und Europa, den Meeresboden heraushob. Das Meer senkte sich ab und eine Bergkette so hoch wie die Anden kratzte am Himmelszelt. Flüsse schwemmten das abgetragene Material auf riesige Schuttkegel im feuchtwarmen Regenwald.



Flachmeer vor ca. 20 Millionen Jahren: 1) Steilküste (Kliff), 2) Grobsandschüttung von Osten, 3) Albstein-Schwelle, 4) roter Kreis: ungefähre Position von Zofingen 5) Strandsäume, 6) Alpine Schuttfächer, 7) Alpenrand

Sodann drang vor 20 Millionen Jahren nochmals ein seichter Meeresarm vom Mittelmeer dem Alpennordrand entlang nach Osten vor. Dann verschwand das Meer auf der Nordseite der Alpen definitiv.

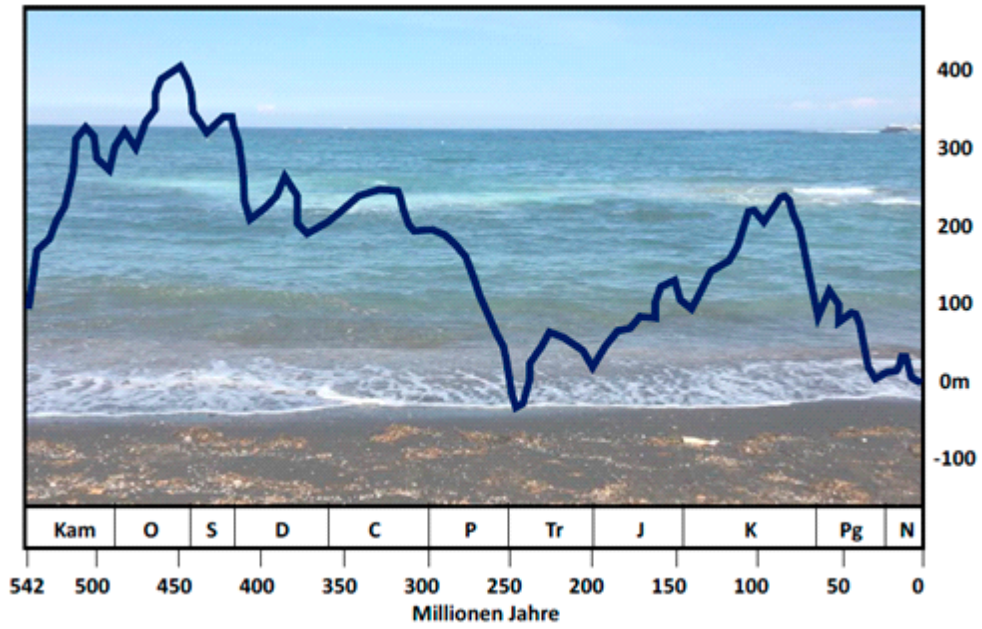
Die Schweiz war nunmehr auf der heutigen Breite Zentraleuropas angelangt. Das Klima kühlte allmählich ab und kippte vor zweieinhalb Millionen Jahren um, in arktische Verhältnisse: Gleichzeitig wie die Eiskappen auf den Nordkontinenten wuchsen die Alpengletscher an und sandten ihre Eisströme bis ins Mittelland und in die südalpinen Täler. Im Rhythmus der Fluktuationen der Erdumlaufbahn um die Sonne und der Neigung der Erdachse, wechselten Eiszeiten und Zwischeneiszeiten ab.

Letztmals standen die Gletscher vor gut 20’000 Jahren im Mittelland und den Südalpentälern. Dann schmolzen die Eiszungen zurück und erreichten vor 11'700 Jahren etwa ihre heutige Ausdehnung. Menschen tauchten vor 50'000 bis 35’000 Jahren auf und besiedelten das Mittelland und die Alpentäler ab 15’000 Jahren.

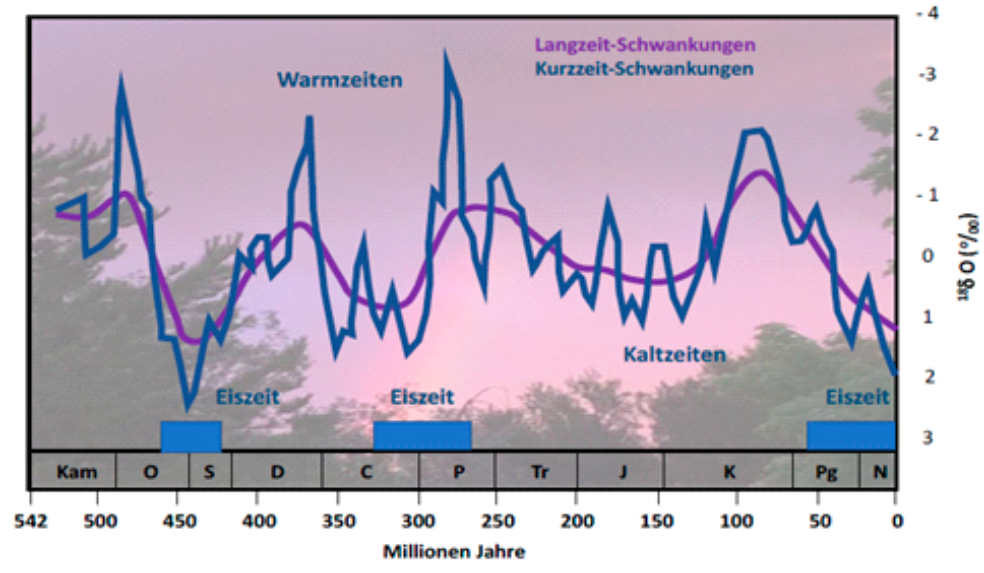
Seit dem Ende der letzten Eiszeit schwankt das Klima mit weltweiten Temperaturamplituden von wenigen Grad Celsius. Der letzte grössere Gletschervorstoss, während der sogenannten Kleinen Eiszeit, begann in den Alpen im sechzehnten Jahrhundert und endete um das Jahr 1850. Er folgte auf ein warmes Mittelalter mit fast eisfreien Alpengipfeln. Und zum ersten Mal in der Geschichte der Erde ist die Erwärmung nicht ausschliesslich natürlichen Ursprungs, sondern wird auch durch Treibhausgasemissionen, Rodung, Austrocknung von Agrarlandschaften, die Rückhaltung von Nährstoffen aus der kontinentalen Erosion in Stauseen und andere Folgen menschlicher Aktivitäten beeinflusst.

Dies ist eine kurze Zusammenfassung der jüngeren Erdgeschichte, so wie wir sie aus den geologischen Zeugnissen, aus Gesteinen, Fossilien und geochemischen Signalen ableiten können. Sie zeugen von dynamischen Ökosystemen und einem Zusammenspiel von geologischen und biologischen Prozessen, welche über Jahrmillionen hinweg sowohl auf stetige Veränderungen als auch auf katastrophale Ereignisse Antworten fanden und so dem immer vielfältigeren Leben Raum und Nahrung boten. Aber seien wir uns bewusst: Wir verstehen den Umfang und die Konsequenzen der heute beobachteten Reduktion der Biodiversität und ihre langfristigen Konsequenzen für die Ökosysteme noch längst nicht vollumfänglich.

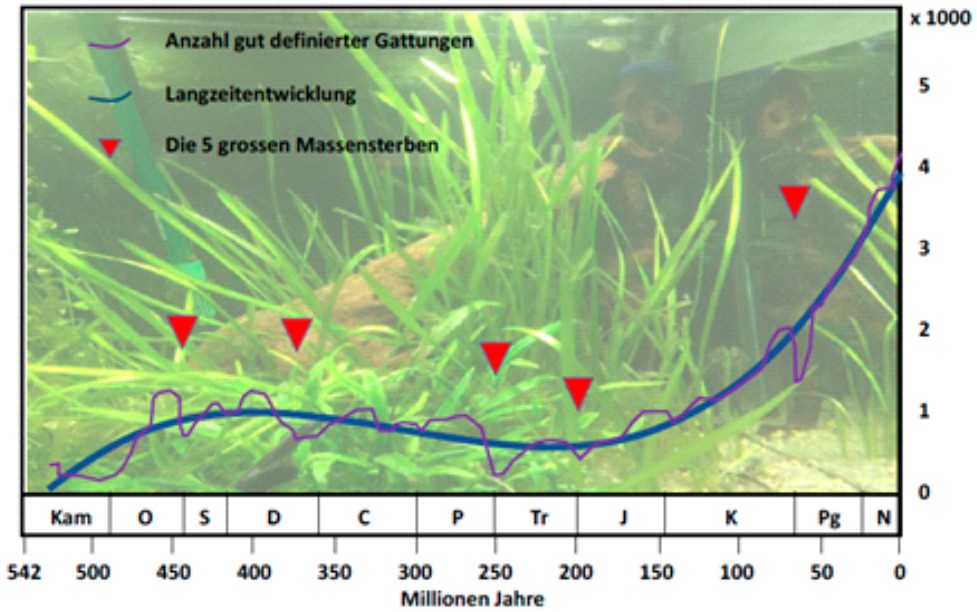
Erdgeschichte generell



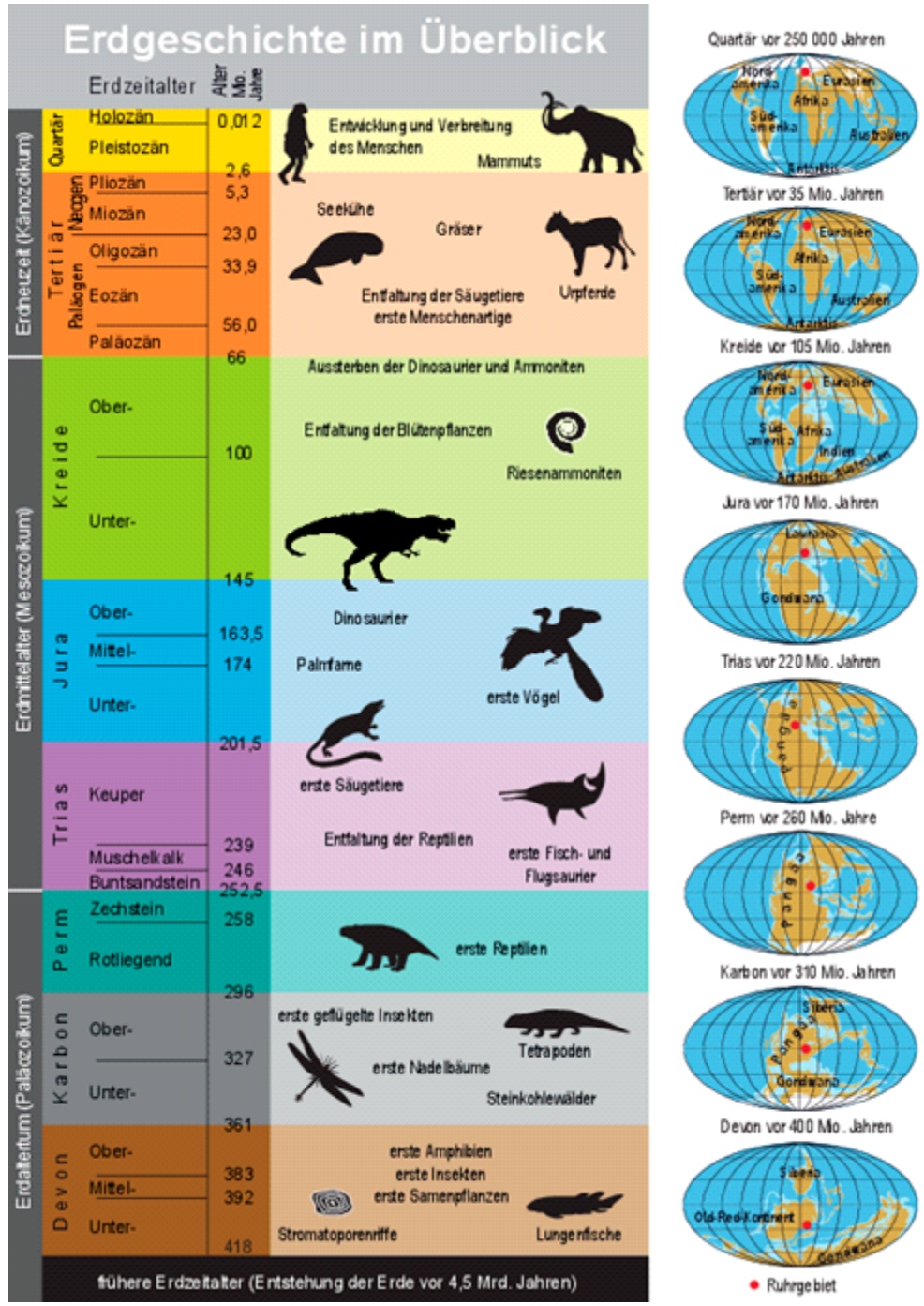
Meeresspiegelschwankungen seit dem Kambrium (vor 542 Millionen Jahren).

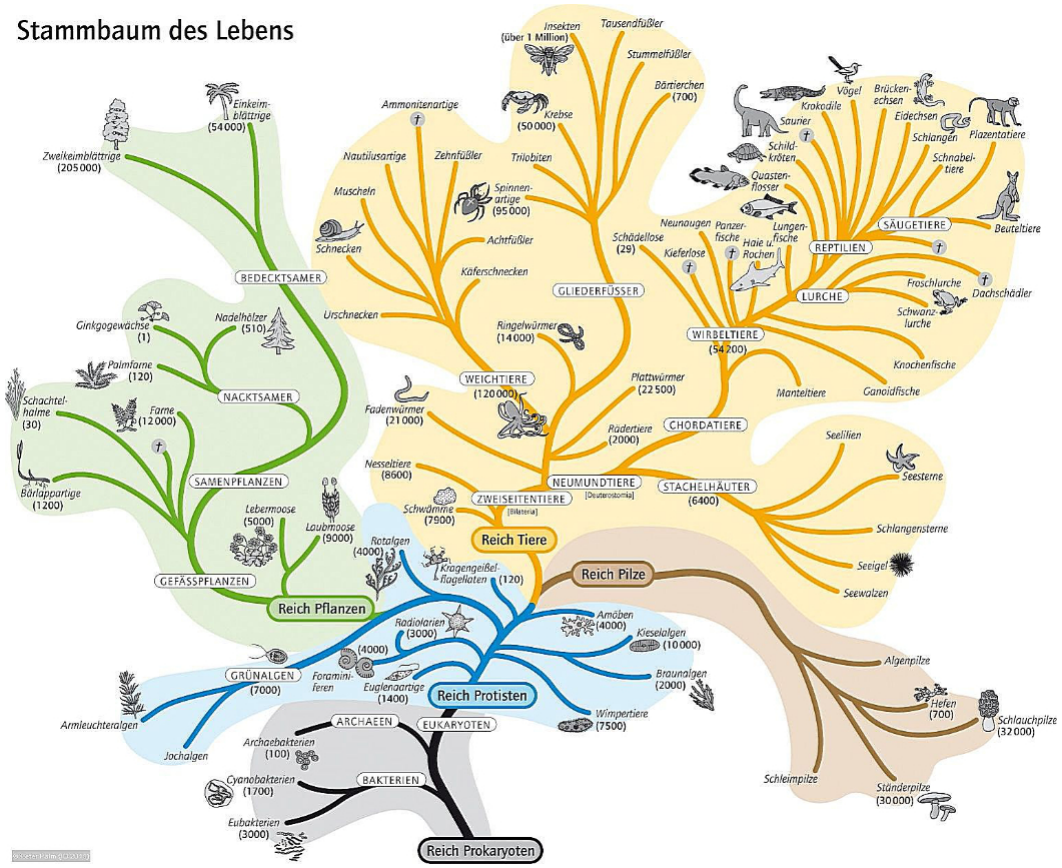


Mittlere Jahrestemperaturen im Verlaufe der Erdgeschichte seit dem Kambrium (vor 542 Millionen Jahren), ausgedrückt durch die Schwankungen des Sauerstoffisotops O-18 in marinen Sedimenten.



Entwicklung der Biodiversität (Anzahl Gattungen x 1000) seit Beginn des Kambriums vor 542 Millionen Jahren.





Fazit

Für die Natur ist nichts von Bedeutung. Ob ein Stern entsteht oder verlischt, ob ein Kontinent auftaucht oder untergeht, ob ein Lebewesen entsteht oder stirbt, ist für die Natur ohne Belang.

Die Natur arbeitet blind, ohne Ziel, Absicht, Verständnis oder Plan. Sie überlässt alles dem Zufall. Es gibt keine Instanz, die in das Geschehen eingreift.

Wenn ein Lebewesen den sich verändernden Lebensbedingungen nicht anpassen kann, stirbt es.

Im Laufe der Erdgeschichte hat es fünf Massenaussterben gegeben. Dabei sind jeweils mindestens 50 % der Arten ausgelöscht worden. In der Zeit von Hundertausenden bis Millionen Jahren hat anschliessend das Leben mit neuen Arten wieder begonnen.

Wir sind auf dem Weg zum sechsten (menschengemachten) Massenaussterben.

Die Evolution findet in unvorstellbar grossen Zeiträumen statt. Als vor 200 Millionen Jahren die ersten Säugetiere auftauchten, war schon 95% der Erdgeschichte vergangen.

Quellen

Dieses Buch ist eine **Zusammenfassung** aus folgenden Unterlagen:

- Dagmar Röhrlich: Urmeer, Die Entstehung des Lebens, mareverlag (hauptsächlich)
- Ben Moore: Elefanten im All, Kein & Aber Pocket
- Stephen W. Hawking: Eine kurze Geschichte der Zeit, rororo-Verlag
- Walter Wildi: Auf den Spuren der Erdgeschichte in der Schweiz, Section des sciences de la Terre et de l'environnement, Université de Genève
- Peter Bitterli-Dreher: Die geologische Geschichte der Landschaft des Hochrheingebietes, Neujahrsblatt Naturforschende Gesellschaft Zürich, Jahrgang 208, 2005: Der Rhein – Lebensader einer Region.
- Prof. Dr. Richard Pott: Die Biologische Evolution, Leibnitz Universität, Hannover
- Yuval Noah Harari: Eine kurze Geschichte der Menschheit, Deutsche Verlagsanstalt
- Diverse Einträge in Websites (Wikipedia etc.)