

# Eiszeiten

Ausbildungsseminar Wetter und Klima im Wintersemester 09/10  
Naturwissenschaftliche Fakultät II – Physik  
Universität Regensburg



Florian Treutinger

05.01.2010

# Inhaltsverzeichnis

## 1 Eine kurze Geschichte der Erde (3)

- 1.1 Hadaikum (3)
- 1.2 Archaikum (3)
- 1.3 Proterozoikum (3)
- 1.4 Phanerozoikum (4)
  - 1.4.1 Kambrium (4)
  - 1.4.2 Ordovizium (4)
  - 1.4.3 Silur (5)
  - 1.4.4 Devon (5)
  - 1.4.5 Karbon (5)
  - 1.4.6 Perm (5)
  - 1.4.7 Trias (6)
  - 1.4.8 Jura (6)
  - 1.4.9 Kreide (6)
  - 1.4.10 Paläogen (7)
  - 1.4.11 Neogen (7)
  - 1.4.12 Quartär (7)

## 2 Ursachenforschung (7)

- 2.1 Irdische Ursachen (8)
  - 2.1.1 Plattentektonik (8)
  - 2.1.2 Vulkanismus (9)
  - 2.1.3 Albedo-Effekt (10)
- 2.2 Astronomische Ursachen (10)
  - 2.2.1 Umlauf der Erde um die Sonne (10)
  - 2.2.2 Aktivitätszyklen der Sonne (12)
  - 2.2.3 Meteoriteneinschläge (13)

## 3 Auswirkungen der Eiszeiten (14)

- 3.1 Vergletscherungen (14)
- 3.2 Absinken des Meeresspiegels (14)
- 3.3 Klima und Atmosphäre (15)
- 3.4 Lebenswelt (15)

## 4 Forschung im ewigen Eis (16)

- 4.1 Arktis (16)
- 4.2 Antarktis (17)

## 5 Eiszeitalter (18)

- 5.1 Känozoisches Eiszeitalter (18)
- 5.2 Frühere Eiszeitalter (19)

## 6 Aussichten (20)

# 1 Eine kurze Geschichte der Erde

Die Zeit seit der Entstehung der Erde (ca. 4,5 Milliarden Jahre) wird aus heutiger Sicht in 4 Äonen unterteilt, nämlich in das Hadaikum, das Archaikum, das Proterozoikum und das Phanerozoikum. Die ersten drei Äonen werden unter dem Begriff Präkambrium zusammengefasst. Die Äonen lassen sich bis auf das Hadaikum wiederum in Ären unterteilen. Die Ären lassen sich in Systeme unterteilen und diese in Epochen.

## **1.1 Hadaikum**

Im Hadaikum entstand die Erde aus einer riesigen Menge an Staub und Gas, die sich zu einer Masse aus zähflüssiger Magma formierten. Eine Theorie besagt, dass durch den Einschlag eines sogenannten Protoplaneten ein Teil der Erdmasse wieder zurück ins All geschleudert wurde und dort in ca. 384.000 km Entfernung zur Erde den Mond bildete. Darauf folgende weitere Einschläge mehrerer Asteroiden und Meteoriten ließ die Masse der Erde weiter wachsen. Dieser Massenzuwachs hatte den Effekt, dass das Magnetfeld der Erde stärker wurde und schließlich so stark war damit es die Sonnenwinde von der Erde fern halten konnte und sich so später die Ozonschicht bilden konnte. Das flüssige Gestein differenzierte sich allmählich und somit bildeten die schweren Elemente wie Eisen und Nickel den festen Erdkern und die leichteren Elemente wie Silizium den Erdmantel, sowie die Erdkruste. Mehrere Eismeteorite brachten das Wasser auf die Erde. Beim Einschlag verdampfte das Eis und ging anschließend als Regen nieder. Die Erdkruste war im Hadaikum aufgrund der vielen Einschläge von unzähligen Himmelskörper nicht stabil.

## **1.2 Archaikum**

Die Trennung von Erdkern, Mantel und Kruste führte vermehrt zu Vulkanausbrüchen. Die dadurch ausgetretenen Gase bildeten eine erste Atmosphäre, die hauptsächlich aus Wasserdampf ( $H_2O$ ), Stickstoff ( $N_2$ ), Kohlendioxid ( $CO_2$ ), Wasserstoff ( $H_2$ ), Kohlenmonoxid ( $CO$ ), Methan ( $CH_4$ ) und Ammoniak ( $NH_3$ ). Eine Abkühlung der Erde führte dazu, dass sich nun Wasserbecken bildeten und diese vom Regen gespeist wurden. Der hohe  $CO_2$ -Gehalt der Atmosphäre führte zu einem Treibhauseffekt der die geringe Leuchtkraft der Sonne kompensierte. Das Archaikum kann als Zeitpunkt der Entstehung des Lebens betrachtet werden. Makromoleküle waren in der Lage sich durch Anlagerung weiterer Moleküle zu vergrößern und sich selbst zu reproduzieren. Zu dieser Zeit bildeten sich die ersten Bakterien, sogenannte *Archaeobakterien*, die sich später zu *Cyanobakterien* entwickelten. Diese *Cyanobakterien* betrieben Photosynthese und konnten somit Kohlendioxid und Wasser mit Hilfe von Sonnenlicht zu Sauerstoff, Zucker und anderen organische Verbindungen umwandeln. Der Sauerstoff wurde jedoch sofort im Meer gebunden und konnte somit nicht in die Atmosphäre entweichen. Im Archaikum bildeten sich erstmals Stellen mit fester Erdkruste. Diese Schollen wuchsen, verschmolzen mit anderen und bildeten die ersten Kontinentalplatten, die auch Kratone genannt werden. Der Übergang vom Archaikum zum Proterozoikum war grundlegend dadurch bestimmt, dass nun der im Meer gebundene Sauerstoff in die Atmosphäre entwich.

## **1.3 Proterozoikum**

Dieser Zeitraum der Erdgeschichte ist mit Abstand der längste. Am Anfang des Proterozoikums waren 50–70 % des heutigen Erdkruste vorhanden. Der durch die Cyanobakterien erzeugte Sauerstoff konnte allmählich nicht mehr im Meer gebunden werden, denn es war nicht mehr genügend Eisen und Schwefel vorhanden und entwich somit in die Atmosphäre, was auch zur

Bildung der Ozonschicht führte. Die erste Vereisung der Erde vor etwa 2.300 Millionen Jahren nennt man heute das „Huronische Eiszeitalter“. Vor ungefähr 2.100 Millionen Jahren traten die ersten Eukaryoten auf (Organismen mit echten Zellkern). 600 Millionen Jahre später bildeten sich erstmals mehrzellige Lebewesen. Das Proterozoikum ist von starken tektonischen Bewegungen der Erdplatten geprägt. Die immer größer werdenden Kontinentalplatten bildeten vor ca. 1.100 Millionen Jahren den ersten Superkontinent (Rodina). Vor 750 Millionen Jahren zerbrach Rodina und bildete so den riesigen *Panthalassischen Ozean*. Weitere 150 Millionen Jahre später kollidierten beide Teile des ursprünglichen Rodina mit einem dritten Kontinent und bildeten somit erneut einen Superkontinent (Pannotia). Gegen Ende des Proterozoikums bis in Kambrium zerfiel Pannotia in mehrere kleinere Kontinente: Gondwana (Antarktis, Afrika, Südamerika, Indien, Australien), Baltica (Nordeuropa), Sibiria und Laurentia (Nordamerika). Gegen Ende des Proterozoikums gab es das wahrscheinlich stärkste Eiszeitalter der Erdgeschichte. Die Sturtische Vereisung (vor ca. 750-700 Millionen Jahre) und die Varanger Vereisung (vor ca. 620-580 Millionen Jahre) werden meistens zum Cryogenischen Eiszeitalter (im System Cryogenium) zusammengefasst. In diesem Eiszeitalter soll die Erde angeblich komplett mit Eis bedeckt gewesen sein (Schneeball-Erde). Es gibt allerdings keine schlüssigen Beweise und diese Theorie wird von vielen Forschern angezweifelt. Nach der letzten Vereisungsperiode gegen Ende des Proterozoikums vor ca. 600 Millionen Jahren traten die ersten Tiere in den Urozeanen auf. Diese Tiere hatten keine Schale und auch keine Knochen also existieren auch keine richtige *Fossilien* und erinnern an Quallen und Würmer.

## **1.4 Phanerozoikum**

Das Phanerozoikum umfasst mit den drei Ären Paleozoikum, Mesozoikum, Känozoikum die Zeit von 542 Millionen Jahre bis heute. Der Name des Äons bedeutet soviel wie Zeitalter des Lebens und ist eine Folge der in großer Anzahl auftretenden makroskopisch sichtbaren Fossilresten. Das Paläozoikum ist in die Systeme Kambrium, Ordovizium, Silur, Devon, Karbon und Perm unterteilt. Das Mesozoikum ist in die Systeme Trias, Jura und Kreide unterteilt. Das Känozoikum ist in die Systeme Paläogen, Neogen und Quartär unterteilt.

### **1.4.1 Kambrium**

Zu Beginn des Kambriums existierten die Urkontinente Gondwana, Baltica, Sibiria und Laurentia. Die Temperatur stieg und weite Regionen dieser Kontinente wurden überflutet. Der Sauerstoffgehalt war nun so hoch dass sich die Ozonschicht bildete und sich nun auch Lebewesen nahe der Wasseroberfläche aufhalten konnten da sie vor der schädlichen UV-Strahlung geschützt waren. In den warmen und licht durchfluteten Meeren entwickelte sich in kurzer Zeit eine riesige Vielfalt an kleiner wirbellosen Tieren (Kambrische Radiation). Von diesen Tieren sind heute Fossilien erhalten, denn sie hatten eine harte Schale.

### **1.4.2 Ordovizium**

Der größte Teil des Festlandes gehörte zum Kontinent Gondwana der restlich Anteil teilte sich in kleinere Kontinente auf. Es entwickelten sich Tiere die noch heute existieren, wie Seesterne, Schwämme, Muscheln und Schnecken. Aber es existierten auch Lebewesen die heute nicht mehr so bekannt sind wie Kopffüßler, Armfüßer und kieferlose Fische. Gegen Ende des Ordoviziums kam es aufgrund einer Eiszeit zu einem Massensterben.

### **1.4.3 Silur**

Am Anfang des Silurs waren weite Teile von Gondwana und anderer Kontinent mit Eis bedeckt. Die Temperatur stieg allerdings wieder und somit auch der Meeresspiegel und somit konnten sich neue Arten in den warmen Meeren entwickeln. Es entstanden die ersten Korallenriffe und auch die ersten Fische mit Kiefer schwammen in den Fluten. In den sumpfigen Regionen des Festlandes tauchten die ersten Urpflanzen auf. Diese Pflanzen konnten anfänglich nur in Wassernähe wachsen, später jedoch besiedelten sie auch wasserfernen Gebieten. Durch die Fotosynthese stieg der Sauerstoffgehalt in der Atmosphäre und ein Leben auf dem Festland wurde möglich. Der urzeitliche Tausendfüßler war das erste Tier das sich an Land wagte. Die Kontinente drifteten aufeinander zu sodass Laurentia und Baltica kollidierten und somit den neuen Kontinent Laurasia bildeten. In den Zonen des Zusammenstoßes türmten sich riesige Gebirge auf.

### **1.4.4 Devon**

Das weltweite Klima im Devon war sehr warm und somit gilt das Devon als Zeitalter der Fische aufgrund des hohen Meeresspiegel. Die Zeit der kieferlosen Fische ging zu Ende und die Wirbeltiere entwickelten sich weiter. Die Ersten Haie und Panzerfische tauchten auf. Die ersten Fische mit „Fußstummeln“ die als Verbindungsglied zu den Tieren an Land waren traten auf. Das Festland wurde immer lebendiger und an den Ufern der Binnenmeere und Flüssen wuchsen Farne, anfangs noch niedrig doch später auch baumhoch. Die ersten Insekten krabbelten und schwirrten umher und das erste Wirbeltier mit vier Gliedmaßen Fingern und Zehen, der Urlurch Ichtyostaga, bewegte sich vom Wasser auf das Land. Und somit begann die Zeit der Amphibien. Diese Tiere atmeten mit ihrer Lunge und bewegten sich auf vier Beinen fort, lebten aber noch in der Nähe des Wassers, und dort legten sie auch ihre Eier ab um sie vor dem Austrocknen zu schützen.

### **1.4.5 Karbon**

Am Anfang des Karbons herrschten weltweit tropische Bedingungen. Der Meeresspiegel war hoch und weite eile des Festlandes waren überflutet. Es gab Flachmeere mit weiten Küstenbereichen und riesige Sümpfe mit Wäldern – Eine grüne Erde. Durch die riesigen Wälder stieg der Sauerstoffgehalt in der Atmosphäre deutlich an. Das Karbon war ein idealer Lebensraum für Insekten und Amphibien und Reptilie, die sich in großer Vielfalt entwickelten. Durch den hohen Sauerstoffgehalt entwickelten sich Rieseninsekten, wie die Riesenlibelle Meganeura. Die Kontinente kollidierten erneut und Sibiria, Laurasia und Gondwana bildeten den neuen Superkontinent Pangäa. In den Kollisionszonen entstanden riesige Gebirge die durch die Wucht des aufpralls aufgeworfen wurden. Gegen Ende des Karbons trat eine neue Eiszeit auf und während im Gebiet des Regenwaldgürtels am Äquator ein feuchtwarmes Klima herrschte, waren der Südpol und die südlichen Regionen Gondwanas vereist (pemo-karbonische Vereisung). Aufgrund dieser Vereisung sank der Meeresspiegel drastisch.

### **1.4.6 Perm**

Der Superkontinent wuchs im Perm denn weite Teile des heutigen Asiens kamen hinzu. Die Klimaverhältnisse waren, wie zuvor im Karbon extrem gegensätzlich. Pangäa wanderte nordwärts und in den nördlichen Breiten wich das feuchtwarme Klima einem sehr heißen und trockenen Klima. Flüsse und Meeresbecken trockneten aus und der Lebensraum für die Amphibien schwand. Es entwickelten sich die säugetierähnlichen Synapsiden, die sich später zu den heutigen Säugetieren entwickelten. Es wanderten Herden von Pflanzen- und Fleischfresser auf der urzeitlichen Erde umher. Im oberen Teil des Perms schmolz die Eiskecke, die Gegensätze blieben. Während im

Norden heißes und trockenes Klima herrschte, war es im Süden feucht und warm. Am Ende des Perms gab es das größte Massensterben der Erdgeschichte: ca. 75% der Landtiere und 95% der Meerestiere starben aus. Der instabile Superkontinent brach an vielen Stellen auf und es kam zu gewaltigen Vulkanausbrüchen, die das Leben in weiten Teilen der Erde ausradierten. Durch die Vulkanausbrüche gelangten Staub, Kohlendioxid, Schwefeloxid und andere Gase in die Atmosphäre. Die Erde wurde von einer Wolke umschlossen, die kaum Sonnenstrahlen durchließ und somit sank die Temperatur. Das Schwefeloxid in der Luft reagierte mit dem Wasser und es prasselte saurer Regen auf die Erde nieder. Die Atmosphäre war so stark verändert, dass für eine lange Zeit kaum etwas wuchs und die Erde eine lebensfeindliche Umgebung war.

#### **1.4.7 Trias**

Der im Karbon und Perm gebildete Superkontinent Pangäa driftete langsam nach Norden. Da das Klima heiß und trocken war, entstanden große wüstenartige Landstriche. An den Ufern wuchsen lichte Wälder mit Nadelbäumen, Ginkgos und Farnen. Das Trias war nach dem Massensterben im Perm ein Neuanfang für die säugetierähnlichen Reptilien. Auch die Archosaurier, aus denen später die Krokodile und die Dinosaurier hervorgingen, entwickelten sich erfolgreich. Aber auch die echten Säugetiere erblickten das Licht der Welt im Trias. Es waren spitzmausähnliche Tiere, die hauptsächlich nachtaktiv waren. Am Ende des Trias begann Pangäa langsam zu zerbrechen.

#### **1.4.8 Jura**

Der zerbrechende Kontinent Pangäa war immer noch durch Landwege verbunden, was den Dinosauriern große Lebensräume eröffnete. Das Klima wurde feuchter, was dazu führte, dass sich die Wüsten in Lagunenlandschaften und Urwälder verwandelten. Weite Teile Europas, wie auch das heutige Deutschland, waren überflutet. Durch den steigenden Meeresspiegel wurden langsam die Verbindungen zwischen den einzelnen Kontinenten überflutet. Diese Trennung führte zu einer unterschiedlichen Artenentwicklung.

#### **1.4.9 Kreide**

Die Kontinente zerbrachen weiter und das Bild der Erde ähnelte immer der heutigen Kontinentalkonstellation. Am Anfang der Kreide stieg der Meeresspiegel weiter an und der Nordatlantik trennte Europa von Nordamerika. Das damalige Europa bestand übergehend aus Inseln. Zentralafrika war von feuchtem und tropischem Klima geprägt. Die neu entstandenen Pflanzen lieferten den Neuen Arten eine üppige Nahrungsgrundlage vor allem den Dinosauriern. Am Ende der Kreide sank der Meeresspiegel, was dazu führte, dass sich riesige Gebirge wie die Rocky Mountains bildeten. Heftige Vulkanausbrüche führten dazu, dass giftige Gase in die Atmosphäre entwichen. Die Ausbrüche förderten auch gewaltige Mengen an Lava an die Oberfläche. Durch diese beiden Faktoren änderte sich das Klima dramatisch, was einen erheblichen Einfluss auf die Flora und Fauna hatte. Das Aussterben der Dinosaurier ist auch heute noch ein Rätsel. Es existieren unzählige Theorien, doch zwei davon sind am weitesten verbreitet. Die eine Theorie besagt, dass die langanhaltenden Vulkanausbrüche das Ende der Dinosaurier herbeiführten, die andere spricht von einem gewaltigen Meteoriteneinschlag, der sich vor etwa 65 Millionen Jahren ereignet haben soll. Heutige Untersuchungen zeigen einen Krater im Süden Mexicos, der als Beweis für die Meteoritentheorie steht. Die Ausmaße des Kraters lassen Rückschlüsse auf den Meteoriten schließen. Demnach hatte er einen Durchmesser von 10 km und raste mit etwa 30 km/h auf die Erde zu. Der Aufprall schleuderte 50.000 km<sup>3</sup> Staub, glühende Steine und mehrere hundert Millionen Tonnen Schwefel in die Atmosphäre. Das Schwefel verband sich mit Wassertropfen und bildete sauren Regen. Dem Aufprall folgten Erdbeben der Stärke 10, riesige Flutwellen und Tsunamis. Der

Ruß und Staub in der Atmosphäre verdunkelte die Sonne und für Jahre, was die Temperatur stark sinken ließ. Wegen dem Fehlen des Sonnenlichts konnten Pflanzen nicht mehr wachsen. Damit hatten die Pflanzenfresser keine Nahrung mehr und somit auch die Fleischfresser. 75% der damals lebenden Tiere kamen in diesem Inferno um. Zu den Opfern gehörten die Dinosaurier, die Plesiosaurier, die Mesosaurier im Meer und die Pterosaurier in der Luft. Tiere wie Schnecken, Fische, Amphibien, Schlangen, Vögel und Säugetiere überlebten.

#### **1.4.10 Paläogen**

Das Bild der Erde näherte sich immer mehr dem heutigen an. Die Kollision von Indien und Asien führte zur Bildung des Himalaya-Gebirge. Amerika wanderte weiter nach Westen und Grönland trennte sich von Skandinavien, dabei entstand Island. Die Iberische Halbinsel und Italien trafen auf Europa was zur Auffaltung der Pyrenäen führte. Das Klima war weltweit heiß und feucht und riesige Urwälder bedeckten die Erde. Die ersten Primaten wanderten durch die dichten Wälder, dann die ersten Pferde. Viele Vorfahren der heutigen Tiere entwickelten sich dieser Zeit. Am Ende des Paläogen sank die Temperatur und es wurde trockener. Die riesigen Urwälder wichen weiten Graslandschaften und Grasfresser streiften auf ihnen umher. Der Rückgang der Wälder führte dazu dass sich die Primaten nun im Flachenbewegen mussten und somit aufrecht gingen- die erstem Menschenaffen.

#### **1.4.11 Neogen**

In den Gebieten der Antarktis und den nördlichen Polargebieten war das Klima im Gegensatz zu den restlichen Gebieten kalt, das Aktuelle Eiszeitalter brach heran. Die Graslandschaften breiteten sich immer mehr aus und bedeckten fast die gesamte Erde. Bei vielen Tieren aus dem Neogen sieht man sehr gut die Verwandtschaft mit ihren heutigen Verwandten.

#### **1.4.12 Quartär**

Das Quartär wird in die Epochen Pleistozän und Holozän unterteilt. Im Pleistozän wurde es auf der Nordhalbkugel immer kälter. Schnee und Eis bedeckten sehr große Flächen Nordamerikas, Europas und Asiens. In diesem Eiszeitalter wechselten sich vier Kalt- und drei Warmzeiten ab. Die Tier- und Pflanzenwelt aus dem Quartär war die die wir heute kennen, allerdings überlebten einige an die Eiszeit angepasste Tiere nicht in die heutige Zeit (Mammut). Das Holozän ist der Zeitabschnitt in dem wir heute leben. Die Differenzierung vom Pleistozän erfolgt durch das ansteigen der globalen Temperatur und dem Rückgang der Vergletscherung.

## **2 Ursachenforschung**

Die Ursachen einer Eiszeit sind sehr vielfältig. Oft sind nicht einzelne sondern mehrere Faktoren für die Abkühlung der Erde zuständig. Man unterscheidet allgemein zwischen irdischen und kosmischen Ursachen der Klimaänderung. Im Folgenden werden die wichtigste Faktoren aufgezählt und erklärt

## 2.1 Irdische Ursachen

### 2.1.1 Plattentektonik

Der Planet Erde besteht hauptsächlich aus Eisen (32,1 %), Sauerstoff (30,1 %), Silizium (15,1 %), Magnesium (13,9 %), Schwefel (2,9 %), Calcium (1,5 %) und Aluminium (1,4 %). Die restlichen 1,2 % teilen sich Spuren von anderen Elementen. Nach seismischen Messungen ist die Erde grob aus drei Schalen aufgebaut. Sie besteht aus der Erdkruste, dem Erdmantel und dem Erdkern. Diese Schalen sind durch sogenannte Diskontinuitätsfläche (Unstetigkeitsflächen) voneinander abgegrenzt. Die Erdkruste und der obere Teil des Mantels bilden die Lithosphäre, die zwischen 50 und 100 km dick sein kann, je nach Ort. Die Lithosphäre ist in kleine und größere Tektonische Einheiten (Platten) unterteilt. Diese Platten „schwimmen“ auf dem flüssigen Teil des unteren Erdmantels. Der untere Mantel hat eine Temperatur von etwa 2000 °C. Der Übergangsbereich vom Erdmantel zum Erdkern wird thermische Grenzschicht (oder D"-Schicht) genannt, sie ist der mögliche Ursprungsort für Aufstoßströme von flüssiger heißer Magma (sogenannte Plumes). Der äußere Erdkern liegt in einer Tiefe von rund 2900 km und 5100 km. Er ist flüssig bei einer Temperatur von etwa 2900 °C und besteht aus einer Nickel-Eisen-Schmelze mit einer geringen Konzentration an Schwefel und Sauerstoff. Diese Schmelze ist mit der Erdrotation verantwortlich für das Magnetfeld der Erde. Der innere Kern erstreckt sich zwischen 5100 km und 6300 km unter der Erdoberfläche. Vermutlich besteht er aus einer festen Eisen-Nickel-Legierung. Der Druck beträgt bis zu 4 Millionen Bar und die Temperatur liegt im Bereich von 400 °C bis 5000 °C, was der Temperatur von dunklen Flecken auf der Sonnenoberfläche entspricht.

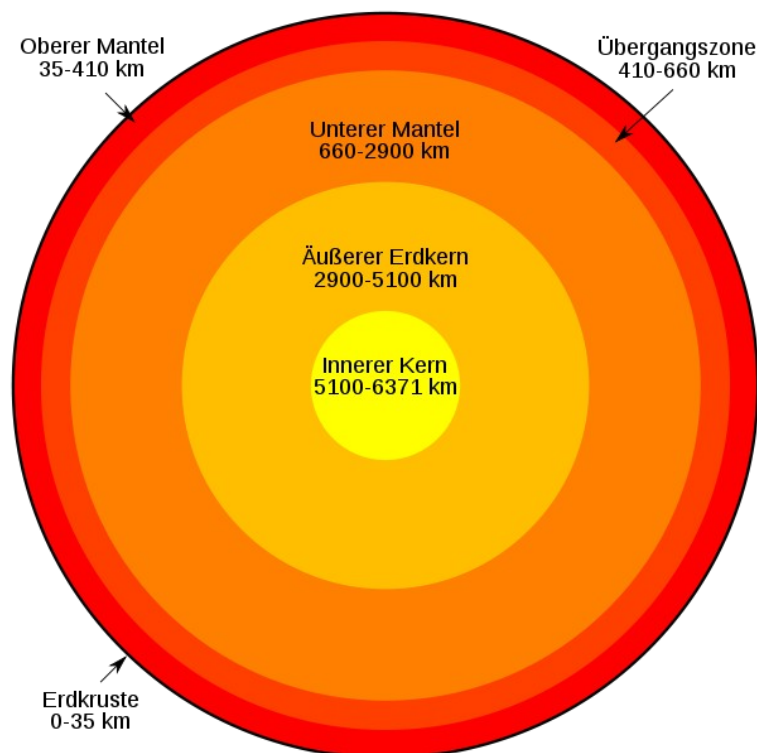


Abbildung 1: Schalenbau der Erde

Die plattentektonischen Prozesse können über unterschiedliche Mechanismen sich auf das Klima und die Temperatur auswirken. Durch das Verschieben von ganzen Kontinenten können bereits vorhandene Meeresstraßen geschlossen werden oder gar ganz neue entstehen. Dies verändert entscheidend die Meeresströmungen und somit auch den Wärmetransport auf der Erde. Ein Beispiel hierfür ist das Wegdriften des australischen Kontinents weg vom südamerikanischen im Oligozän.



Durch die Plattenbewegung wurden zwei neue Meeresstraßen geöffnet und somit konnte sich vor etwa 35 Millionen Jahren ein Strömungssystem um die Antarktis bilden. Dieser kalte Strom, der die Antarktika umfloss, isolierte den Kontinent völlig von warmen Oberflächenwassern, was zu einer Abkühlung und zur Bildung einer Eiskappe führte, die bis heute erhalten ist. Die Entstehung des Golfstroms ist auf die Schließung der Meeresstraße zwischen Nord- und Südamerika zurückzuführen. Der Transport von warmem Wasser nach Norden führte zunächst zu einer Erwärmung der Nordhalbkugel. Aber durch die erhöhte Feuchtigkeit in den nördlichen Breiten wurde der Grundstein zur Vergletscherung von Grönland, Nordamerika und Nordeuropa gelegt, die durch eine Abkühlung erfolgte.

Ein weiterer Mechanismus ist die Bildung von Hochgebirgen bei der Kollision von Kontinentalplatten. Da die Kontinente, wie schon oben beschrieben auf dem unteren Erdmantel driften, kann es dazukommen, dass zwei Platten zusammenstoßen und durch die gigantische Wucht Gebirge aufgefaltet werden. Reichen die Auffaltungen in bestimmte Höhen, kann dadurch die Luftströmung groß- oder kleinräumig verändert werden. Faltengebirge wie die Alpen, Rocky Mountains und das Himalaya-Gebirge waren durch die Änderung der Zirkulationsmuster in der Atmosphäre auch für eine Erhöhung der Feuchtigkeit auf der Nordhalbkugel und somit für die Vergletscherung verantwortlich. Darüber hinaus sind Hochgebirge bevorzugte Gebiete der Gletscherentstehung und führen durch den Albedo-Effekt zu einer weiteren Abkühlung.

Ein dritter Mechanismus ist der, dass in Zeiten hoher tektonischer Aktivität mehr Kohlendioxid in Sedimenten gebunden wird. Durch Verwitterung und Abtragung wird das  $\text{CO}_2$  in den Sedimenten gebunden. So soll das Modell der „Schneeball-Erde“ durch diesen Mechanismus erklärt werden. Die Ursache der extremen Vereisung wird in dem Auseinanderbrechen des Superkontinents Rodinia gesehen. Im Innern Rodinias gab es weder Niederschläge noch nennenswerte Verwitterungsprozesse. Durch das Zerbrechen des Superkontinents soll es aufgrund der neu entstandenen Küstenlage vieler Landstriche zu starken Niederschlägen gekommen sein. Der Niederschlag förderte die chemische Verwitterung, den Transport der Verwitterungsprodukte ins Meer und damit die Bindung von Kohlendioxid in Sedimenten. Dadurch nahm der  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre deutlich ab und es wurde deutlich kälter. Da sich größere Landmassen in Polargebieten befanden, kam es hier zu einer ausgedehnten kontinentalen Vereisung. Der Albedo-Effekt ließ das Eis von den Polen her immer weiter wachsen, was zu einer fast hundertprozentigen Vereisung der Erde führte.

### **2.1.2 Vulkanismus**

Unter Vulkanismus versteht man das Aufsteigen vom Magma aus dem Erdmantel bis hin zur Erdoberfläche. Vulkane treten hauptsächlich in tektonisch aktiven Regionen, in sogenannten Subduktionszonen auf. An diesen Stellen ist die Erdkruste nicht so dick und es kann dazukommen, dass flüssige Magma durch Schloten an die Oberfläche gelangt. Wie schon oben erklärt, bewegen sich die Kontinentalplatten auf dem flüssigen unteren Mantel. An den Berührungszonen der Platten in den Subduktionszonen schiebt sich die eine Platte unter die andere (Europa unter Afrika). Dort kommt es häufiger auch zu Erdbeben, denn die aufgebaute Spannung kann sich in einem Schlag entladen.

Es kann aber auch Magma aus tieferen Erdlagen aufströmen, dies nennt man dann Hotspot. Diese Zentren vulkanischer Aktivität lassen sich nicht durch Plattentektonik erklären, denn sie sind nicht an Plattenränder gebunden. Hotspots entstehen durch thermische Anomalien im tieferen Erdmantel auf.

Bei Vulkanausbrüchen werden Millionen Tonnen von Staub in die Atmosphäre geschleudert. Diese Staubpartikel bilden Aerosole und verringern dadurch die Sonneneinstrahlung, was zum Absinken der Temperatur führt. Aber nicht nur Staub, sondern auch Gase wie Kohlendioxid und Methan werden in die Atmosphäre entlassen. Da die Gase in den Sedimentschichten gebunden sind, werden sie bei der Subduktion und der damit verbundenen Aufschmelzung des Gesteins freigesetzt und bei einem Vulkanausbruch gelangen sie dann in die Atmosphäre. In der Stratosphäre (17 – 50 km Höhe)

bilden sich durch photochemische Prozesse winzige Partikel (Aerosole), die die Sonnenstrahlen reflektieren und damit die Einstrahlung von Wärmeenergie verhindern. Die daraus folgende Abkühlung kann zu einer Eiszeit führen.

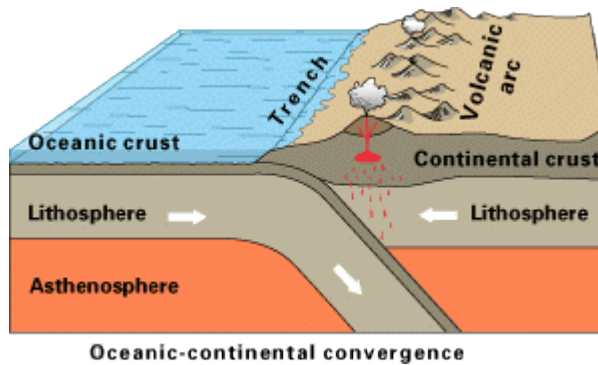


Abbildung 2: Subduktionszone mit vulkanisch aktiven Gebiet

### 2.1.3 Albedo-Effekt

Die Albedo ist ein Maß für das Rückstrahlvermögen von diffus reflektierenden. Wichtig für die Eiszeitforschung ist der Eis-Albedo-Rückkopplungseffekt. Dieser Effekt ist ein positiver Rückkopplungseffekt, was bedeutet, dass er sich selbst verstärkt. Wächst die Eisdecke an den Polen und auf den Gletschern, so steigt der Albedowert und die Absorption von Wärme sinkt, die Temperatur fällt weiter und die Eisschicht wächst.

## 2.2 Astronomische Ursachen

### 2.2.1 Umlauf der Erde um die Sonne

Erdumlaufbahn hat in guter Näherung die vom *Keplerschen Gesetz* verlangte Gestalt einer Ellipse, mit der Sonne in einem der beiden Brennpunkte. Diese Ellipse weicht nur geringfügig von einer Kreisbahn ab. Wegen den Gravitationseinflüssen der anderen Planeten (und des Mondes) verändert sich der Wert der Exzentrizität in periodischen Abständen. Die Periodizität dieser Schwankung beträgt 100.000 und 400.000 Jahre. Der Wert der Exzentrizität schwankt zwischen einem Wert von ca. 0,6 bis hin zu einem Wert nahe Null. Auch wegen den Einflüssen der anderen Himmelskörper dreht sich die Achse der Ellipse langsam und zwar in die selbe Richtung, in der die Erde die Bahn durchläuft. Das Perihel wandert in 110.000 Jahren einmal rund um die Erdbahn. Dieser Effekt der Periheldrehung hat jedoch keinen Einfluss auf das Klima der Erde. Neueste Erkenntnisse russischer Astrophysiker zufolge vergrößert sich der Abstand der Erde zur Sonne jedes Jahr um etwa 10 cm.

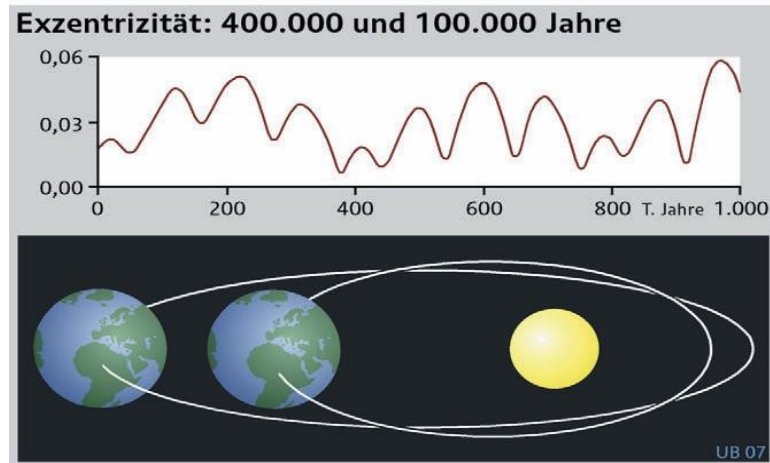


Abbildung 3: Exzentrizität der Erdumlaufbahn

Auch die Lage der Erdachse im Raum ist nicht konstant. Die Erde besitzt keine exakte Kugelform sondern die eines Ellipsoids. Durch die Gravitationskräfte der restlichen Himmelskörper kommt es zur Präzession der Erdachse. Die Periodizität der Präzession beträgt 19.00 und 23.000 Jahre. Der Wert der Präzession schwankt zwischen einem Wert von +0,6 bis hin zu -0,6.

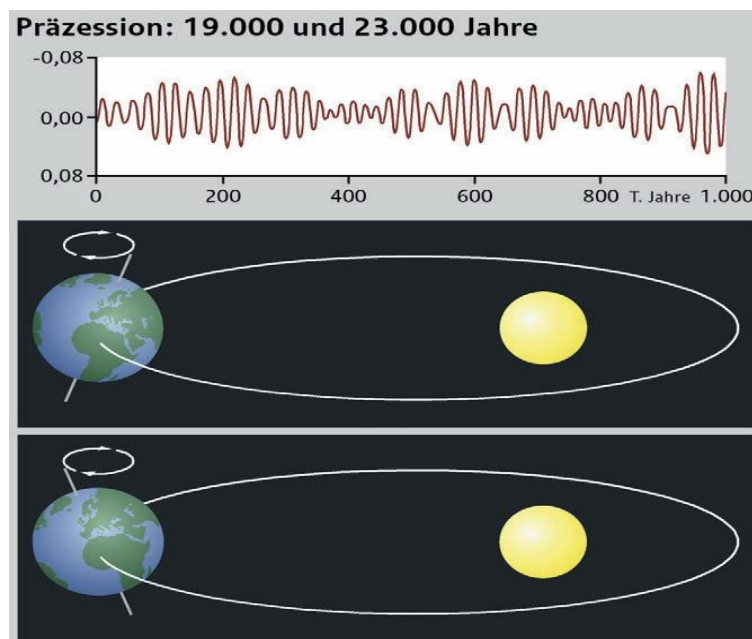


Abbildung 4: Präzession der Erdachse

Auch die Schiefe der Erdachse ist nicht fest. Sie wird durch die Anziehungskraft und der Umlaufbahn des Mondes beeinflusst. Da die Gravitationskraft des Mondes klein ist, ist auch die Änderung der Obliquität klein. Die Periodizität der Neigungsänderung beträgt ca. 41.000 Jahre. Die Neigung schwankt von  $21,5^\circ$  bis hin zu  $24,5^\circ$  zur Flächennormalen der Ellipsenbahn. Die Überlagerung der Erdachsenbewegung führt zur Nutation was einer „nickenden“ Bewegung der Erdachse gleicht. Der Zyklusdauer der Nutation beträgt ca 19 Jahre.

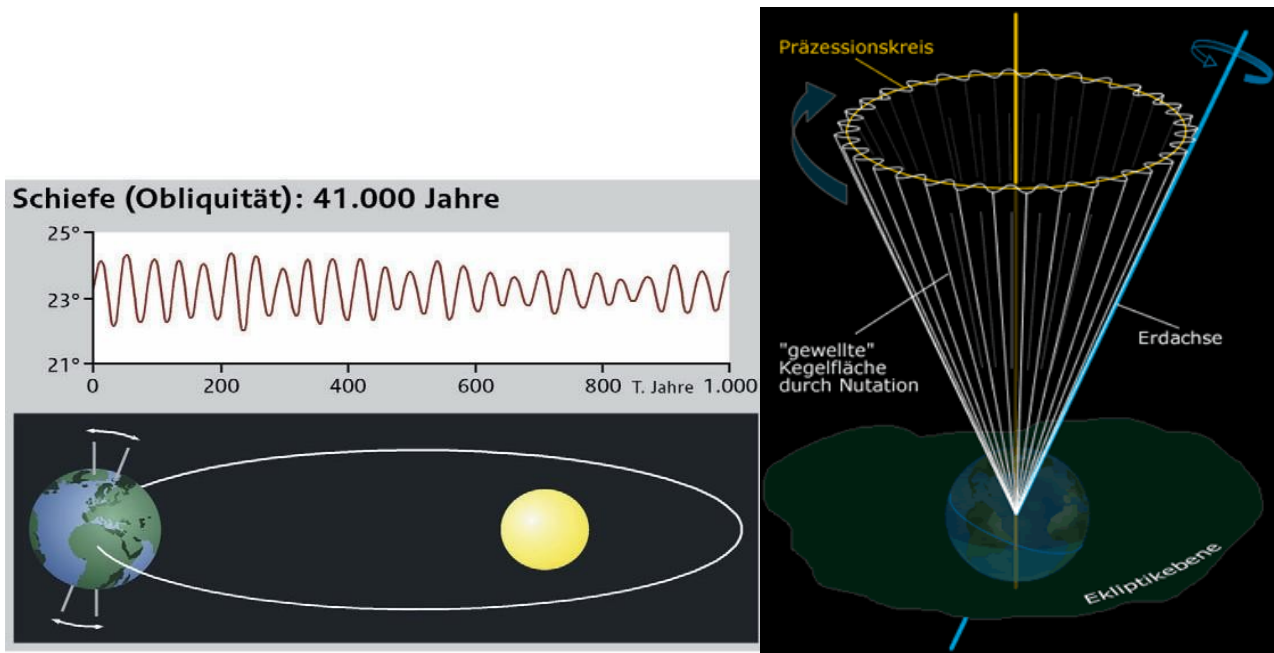


Abbildung 5: Obliquität und Nutation der Erdachse

Diese oben genannten Prozesse (bis auf die Perihelwandereung) werden *Milankovitch-Zyklen* genannt. Die Präzessionsbewegung der Erde verändert zwar nicht die globale Energiebilanz, führt aber dazu dass sich der Termin des sonnennächsten Punktes der Erde zur Sonne (Perihel) zeitlich ändert. Zeitweise empfangen Nord- bzw. Südhalbkugel mehr Strahlung, was durch die unterschiedlich Land-Meer-Verteilung zu einer Schwankung in der Energieumsetzung führt. Die Änderung der Neigung der Erdachse führt zu Unterschieden in den Klimazonen. Bei einer Zunahme der Obliquität wird es in den Polgebieten wärmer während es am Äquator kälter wird. Die Änderung der Exzentrizität der Erdumlaufbahn führt zu einer stärkeren (bzw. schwächeren) Bestrahlung der Erde. Im komplexen Zusammenspiel der Erdbahnparameterschwankungen ergeben sich Klimazyklen von 19.000, 23.00, 41.000 und 100.000 Jahren (*Bradley 1999*). *Milankovitch* vertritt die Hypothese, dass es immer dann zu einer Kaltzeit kommt, wenn die „Sommersonneneinstrahlung“ in hohen nördlichen Breiten minimal wird. *Wladimir Köppens* Theorie zu Kaltzeitenstehung, auf dessen Forschung sich *Milankovitch* stützt, besagt dass für den Eisaufbau kühle Sommer entscheidender sind als kalte Winter.

### 2.2.2 Aktivitätszyklen der Sonne

Die Sonnenstrahlung ist kein gleichmäßiger Fluss sondern variiert in sogenannten Aktivitätszyklen. Diese zahlreichen Zyklen lassen sich durch die wechselnde Zahl der Sonnenflecke zeigen. Die wichtigsten Zyklen sind der *Schwabe-Zyklus*, der eine Dauer von ca. 11 Jahren aufweist und der 80-jährige *Gleisberg-Zyklus*. In der letzten Kaltzeit gab es zwei Dutzend erhebliche Klima-Umschwünge, bei denen innerhalb nur eines Jahrzehnts die Lufttemperatur über dem Nordatlantik um bis zu 12° C anstieg. Diese *Dansgaard-Oeschger-Ereignisse* traten meistens alle 1470 Jahre auf. Diese Periodizität wird mit einer Überlagerung dieser Periodizität wird mit der Überlagerung von zwei bekannten Aktivitätszyklen von 87 und 210 Jahren zu erklären versucht. Nach 1470 Jahren ist der 210er-Zyklus siebenmal und der 86,5er-Zyklus siebzehnmals abgelaufen. In der heutigen Warmzeit traten diese Ereignisse nicht mehr auf, da die schwachen Strahlungsschwankungen die stabilen Atlantikströmungen der letzten 100.000 Jahren nicht mehr stören kann.

## 400 Jahre Sonnenflecken-Beobachtung

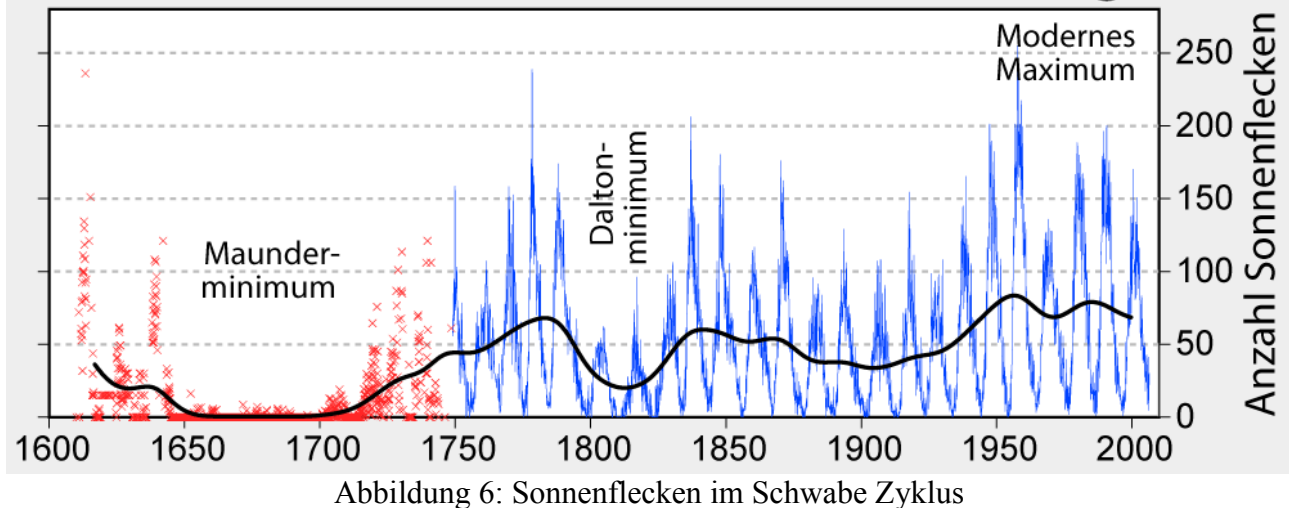


Abbildung 6: Sonnenflecken im Schwabe Zyklus

### 2.2.3 Meteoriteneinschläge

Ein Meteorit ist ein Festkörper kosmischen Ursprungs der die Atmosphäre durchquert und den Erdboden erreicht hat. Er besteht gewöhnlich überwiegend aus Silikatmineralen oder Eisen-Nickel Legierungen. Meteoriden bezeichnet man den Ursprungskörper, der sich noch im interplanetaren Raum befindet. Beim Eintritt in die Atmosphäre erzeugt er eine Leuchterscheinung, die als Meteor bezeichnet wird. Der Meteorid verglüht, aufgrund der Reibung entweder als Sternschnuppe in der Atmosphäre oder erreicht als Meteorit den Boden. Meteoriten werden beim Eintritt in die Erdatmosphäre abgebremst und dabei an der Oberfläche erhitzt und geschmolzen, während sie im Inneren kühl bleiben und nicht verändert werden. Auf die Erde regnen täglich Meteoriten mit einer Gesamtmasse von etwa 40 Tonnen – die meisten davon sind Mikrometeoriten. Die Himmelskörper haben im Bereich des Erdorbits eine heliozentrische Geschwindigkeit von 42 km/s. Da die Geschwindigkeit der Erde ca. 30 km/s beträgt, sind Relativgeschwindigkeiten von 72 km/s möglich. Die meisten Meteoriten sind Bruchstücke von Asteroiden und stammen aus dem Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter. Durch Kollision werden sie von ihrem Mutterkörper losgeschlagen. Zwischen dem Abtrennen vom Mutterkörper und dem Einschlag auf der Erde können einige Millionen Jahren bis hin zu hundert Millionen Jahren vergehen. Es existieren allerdings auch Meteoriten die vom Mond bzw. Mars stammen. Tritt ein Meteorid in die Atmosphäre ein kann er durch die auf ihn wirkenden Kräfte auseinander gerissen werden. Dies ist häufig bei Gesteinsmeteoriten der Fall, da sie schon kleinste Risse und Frakturen aufweisen die bei der Trennung von Mutterkörper auf auftraten. Aufgrund der höheren Dichte und der kompakteren Struktur, die den Torsions-, Zug- und Druckkräften, die durch den Luftstau und der hohen Geschwindigkeiten höheren Widerstand entgegengesetzt, zerbrechen Eisenmeteoriten seltener. Durch das Auseinanderbrechen treffen meist nur sehr kleine Fragmente auf den Erdboden auf. Nur in seltenen Fällen bilden sich große Krater. Allerdings Meteoriten mit einer Masse von über 100 Tonnen werden durch die Atmosphäre nicht nennenswert abgebremst. Beim Auftreffen wird ihre kinetische Energie explosionsartig freigesetzt, wodurch es zur Bildung von Einschlagkratern kommt. Derartige Einschläge können eine globale Katerstrophe darstellen und – wie im Falle des „KT-Impakts“ (Einschlag eines Meteors an der Kreide-Tertiär Grenze) – das Aussterben zahlreicher Pflanzen und Tierarten als Konsequenzen haben. Der Einschlag eines Meteoriten mit dem Durchmesser von mehreren Kilometern bewirkt eine gewaltige Explosion, die den Eintrag von Staubpartikeln und Gas in die Atmosphäre und eine dadurch bedingte weltweite Klimaänderung zur Folge haben kann. Durch die Abschwächung der Sonneneinstrahlung sinken die Temperaturen, das

Pflanzenwachstum geht zurück - Auswirkungen, die sich auf die gesamte Nahrungskette übertragen.

### **3 Auswirkungen der Eiszeiten**

#### **3.1 Vergletscherungen**

Während der Kaltzeiten im aktuellen Eiszeitalter breiteten sich die Eisschilde im Inland und die Gebirgsgletscher so stark aus dass sie schließlich 32 % der festen Erdoberfläche bedeckten (Abb 7). In der heutigen Warmzeit werden nur etwa 10% der Landoberfläche von Eismassen bedeckt. Vor allem auf der Nordhalbkugel waren große Teile von Asien, Europas und Nordamerika vergletschert. Die Spuren der Vereisung (Trogtäler, Moränen, Gletscherschliffe) sind dort heute noch zu sehen. Die Veränderung des Inlandeises der Antarktis war während des Eiszeitalters im Vergleich zur Arktis nicht so dramatisch. Einerseits wird angenommen, dass dies darauf zurückzuführen ist, dass der Eisaufbau auf dem Land der Nordhemisphäre effektiver ist als im zirkumantarktischen Ozeangebiet. Andererseits ist auch heute die Antarktis nahezu vollständig vergletschert. Eine Ausdehnung des Eisschildes wird im Wesentlichen auf die Absenkung des Meeresspiegels zurückgeführt.

#### **3.2 Absinken des Meeresspiegels**

Durch die Bildung kontinentaler Eismassen wurde den Meeren massiv Wasser entzogen. Während des Höhepunkts der letzten Eiszeit lag der Meeresspiegel um 120 bis 130 m tiefer als heute. Dadurch entstanden zahlreiche Landbrücken. Nebenmeere und Flachmeere wie die Nordsee fielen teilweise oder vollständig trocken. Große Bedeutung erlangte die Landbrücke über die heutige Beringstraße, die Nordasien mit Nordamerika verband. Der Austausch zahlreicher Tier- und Pflanzenarten sowie älteren Theorien nach die menschliche Besiedelung des amerikanischen Kontinents erfolgte über diese Landbrücke.

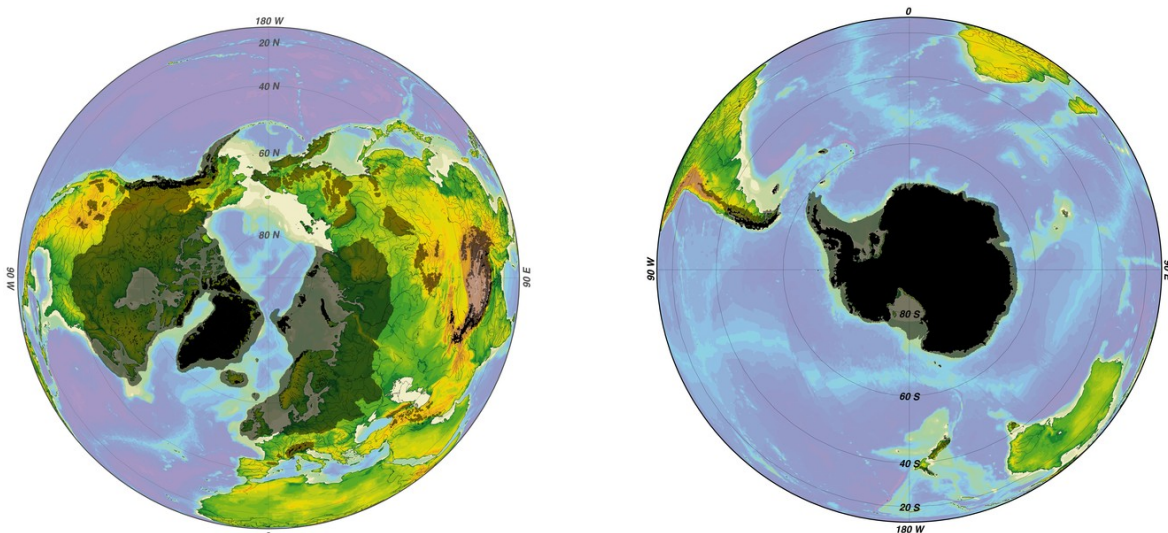


Abbildung 7: Vereisung der Erde während der letzte Kaltzeit

### 3.3 Klima und Atmosphäre

Während der Eiszeiten fiel, global gesehen, auf Grund der gesunkenen Temperaturen deutlich weniger Niederschlag als während der Zeit in der kein Pol vereist war. Die Niederschlagsänderungen während der Kaltzeiten fielen regional jedoch sehr unterschiedlich aus. Während es in den hohen und mittleren Breiten eher trockener wurde, gab es in den Subtropen deutlich Feuchtphasen. Die randtropischen Wüsten waren auch zu dieser Zeit extrem trocken, während die Fläche der feuchten Tropen zu dieser Zeit deutlich geringer war. Das verfügbare Wasserangebot in den hohen und den mittleren Breiten war aber während der Kaltzeiten zum Teil höher als heute, da auf Grund der gesunkenen Temperaturen und des deshalb fehlenden Waldes die Verdunstung deutlich geringer war.

Das „Letzte Glaziale Maximum“ (LGM, Maximum der Vereisung) war vor etwa 21.000 Jahren. Die Durchschnittstemperatur lag etwa 5 bis 6 °C niedriger als heute. Aufgrund der Gaseinschlüsse in polaren Eis weiß man, dass die atmosphärische Konzentration der Treibhausgase Kohlendioxid nur 70 % und Methan nur 50 % des vorindustriellen Wertes betrug (CO<sub>2</sub> im LGM: 200ppmv, vorindustriell: 288 ppmv, 2005: 381 ppmv; CH<sub>4</sub> im LGM: 350 ppbv, vorindustriell: 750 ppbv, 2005: 1750 ppbv).

Während der Endphasen der einzelnen Kaltzeiten stieg auf Grund der natürlichen Zunahme der Sonneneinstrahlung zuerst die globale Temperatur an und danach folgte, als Reaktion auf diesen initialen Anstieg, der Gehalt der Treibhausgase CO<sub>2</sub> und Methan. Der zeitliche Versatz beträgt einige hundert Jahre. Das gleiche gilt auch für Abkühlungsphasen, bei denen jede Abkühlung ein Absinken der Gaskonzentration nach sich zieht. Dabei steuert die Temperaturentwicklung die Konzentration in einer proportionalen Abhängigkeit: die Kurvenverläufe von CO<sub>2</sub> und Methan folgen der Temperaturkurve mit dem genannten zeitlichen Versatz fast kongruent. Diese Kongruenz der Verläufe über der Zeit ist eindeutig und weist keine Unstetigkeiten oder Kipp-Situationen auf, so dass im betrachteten Zeitraum der Zusammenhang: Sonne – Erdtemperatur als dominierend erscheint.

Es wird jedoch auch über eine von diesem Zusammenhang abweichende Theorie diskutiert. Die Freisetzung der Treibhausgase führte über Rückkopplungsprozesse zu einer Beschleunigung der Erwärmung und einer weiteren Freisetzung der Treibhausgase, bis sich schließlich Gleichgewichtszustände einstellten und sowohl das Klima als auch die Treibhausgaskonzentration in den Warmzeiten relativ stabil blieben. Dieser Mechanismus einer natürlichen Erwärmung könnte auch bei der aktuellen Erwärmung eine Rolle spielen, da ein Anstieg des Gehaltes an Treibhausgasen auf Grund der menschlichen Aktivität durch diesen Effekt möglicherweise verstärkt wird und die globale Temperatur weiter ansteigt.

### 3.4 Lebenswelt

Die Klimaschwankungen des Eiszeitalters hatten erheblichen Einfluss auf die Flora und Fauna ihrer Zeit. Mit den Abkühlungen und Wiedererwärmungen wurden die dem entsprechenden Klima angepassten Lebewesen zu einer Verlagerung ihrer Lebensräume gezwungen. Zahlreiche Tier- und Pflanzenarten konnten deshalb große Räume nicht wieder besiedeln oder starben ganz aus. Dieser Effekt war in Afrika und Europa, wo das Mittelmeer und die von Ost nach West verlaufenden Gebirgszüge Hindernisse für die Wanderung der Arten darstellten, deutlich größer als in Nordamerika und Ostasien.

## 4 Forschung im ewigen Eis

### 4.1 Arktis

Die erste wichtige Bohrung in der Arktis fand von 1963 bis 1966 auf 77.2° N statt. Das Camp Century genannte Projekt der U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL) lieferte einen Bohrkern, dessen Daten zurück bis 100.000 Jahre BP (before present) reichten. Auf Camp Century folgte in den Jahren 1979 bis 1981 die Bohrung am sogenannten „Dye 3“ im Rahmen des Greenland Ice Sheet Program (GISP), das von der amerikanischen „National Science Foundation“, dem „Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung“ und der „dänischen Kommission für Forschung in Grönland“ finanziert wurde. Die vorläufige GISP-Feldarbeit startete 1971 mit „Dye 3“, bei dem ein 372 Meter langer Bohrkern mit einer Dicke von 10,2 cm gewonnen werden konnte. Daraufhin wurden jährlich Feldexpeditionen unternommen, um Bohrkern aus mittleren Tiefen von unterschiedlichen Stellen des Eisschildes zu gewinnen. Die erste Bohrung brachte einen Bohrkern von 392m Länge bei Milcent und eine andere einen Bohrkern von 405m Länge im Jahr 1974 in der Nähe der Crete Station. Nach Lösung verschiedener logistischer und technischer Probleme, die sich auf die Entwicklung eines besseren Bohrturns bezogen, begann im Sommer 1979 eine Bohrung, die bis zum Gesteinsgrund von Dye 3 führen sollte. Im ersten Jahr wurde ein Loch mit einem Durchmesser von 18cm gebohrt und bis zu einer Tiefe von 80m ausgeschalt. Die Kernbohrung wurde über zwei Jahreszeiten hindurch fortgeführt und am 10. August 1981 wurde war der Gesteinsgrund bei einer Tiefe von 2037m erreicht.

Das nächste große Bohrprojekt in der Arktis startete 1990 unter dem Namen GRIP (Greenland Ice Core Project). Hierbei handelte es sich um ein multinationales europäisches Forschungsprojekt, das von der „European Science Foundation“ organisiert wurde. Man wählte einen Standort mit einer Eisdicke von ca. 3000 m und einer relativ flachen Topographie des Gesteinsuntergrundes. Außerdem befindet sich der Standort in unmittelbarer Nähe der momentanen Eisscheide. Dies reduziert die Gefahr von Störungen in den Ablagerungen durch Eisbewegung. In der ersten Bohrsaison 1990 kam man bis zu einer Tiefe von 770 m (entspricht ca. 3.840 Jahre), in der Bohrsaison 1991 drang man in eine Tiefe von 2521 m (40.00 Jahre) und stieß schließlich 1992 bei 3029 m (200.000 Jahren) auf den Grund. Anhand von Marker-Horizonten verwendete man die bei „Dye 3“ gewonnenen Daten zur Kalibrierung des neuen Bohrkerns. Des weiteren wurde bei dieser Bohrung auch neue Klimaproys untersucht, unter anderem Methan als anzeiger für Temperaturschwankungen und Spitzen von Ammonium und organischen Säuren als indikator für das Verbrennen von Biomasse.

Beinahe gleichzeitig nur etwa 30 km entfernt fand ab 1988 das US-amerikanische Forschungsprojekt GISP2 statt, das 1993 bei 3053 m auf Grund stieß. Hier wurden erstmals die Genauigkeit der Datierungsmethoden durch Vergleiche der Ergebnisse unterschiedlicher Methoden berechnet. Die Genauigkeit lagen beim GIPS2-Projekt im Bereich von 0-11.640 Jahren BP bei 2 %, zwischen 11.640 bis 17.380 Jahren BP bei 5 % und zwischen 17.380 bis 40.500 Jahren BP bei 10 %. Eine Angabe der Genauigkeit über diese Altersgrenze hinaus ist (noch) nicht möglich, da ab diesen Zeitpunkt nur noch  $\delta^{18}\text{O}$  zur Datierung herangezogen werden kann, während für die Schichten aus jüngerer Zeit mehrere Untersuchungsmethoden einsetzbar und vergleichbar sind. Ebenfalls im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde auch eine Umrechnungsformel von  $\delta^{18}\text{O}$  nach T(K) entwickelt:

$$T = [(\delta^{18}\text{O} + 18,2) / 0,53] + 273$$

Die aktuellste Bohrung auf Grönland in NordGRIP, hier begannen die Bohrungsarbeiten 1996 und endeten im Juli 2003. Zu dieser Bohrung liegen im Moment noch keine Daten vor.



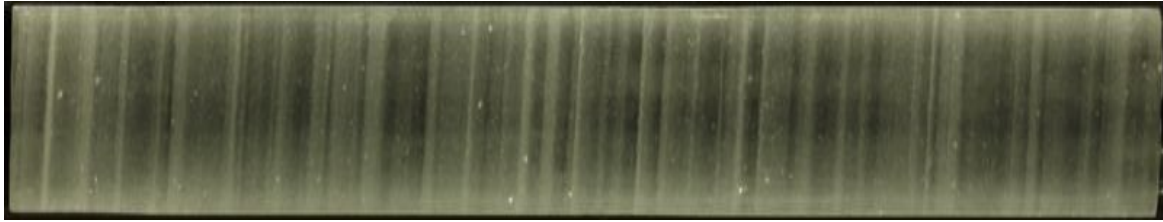


Abbildung 8: Eisbohrkern mit gut erkennbarer Jahresschichtung

## 4.2 Antarktis

Die Antarktis ist zugleich der kälteste, windigste, höchste und trockenste Kontinent der Erde. Der durchschnittliche Jahresniederschlag beträgt nur etwa 100mm, an manchen Stellen nur 20mm. Wegen den extrem niedrigen Temperaturen schmilzt nur wenig oder überhaupt kein Schnee ab. Deswegen konnte sich über Jahrtausende Schnee akkumulieren und sich im Laufe der Zeit diagenetisch in Eis umwandeln. Die Antarktis ist zu etwa 98% von einem Eisschild überdeckt, welches im Durchschnitt ungefähr 2500m mächtig ist. An den tiefsten Stellen werden gar Werte um 4700 m erreicht.

Aus der oben dargelegten groben Beschreibung des Untersuchungsraumes wird bereits klar, was die Besonderheiten dieser Eisbohrkerne sind und wie sie sich von den durchgeführten Projekten in Grönland unterscheiden. Durch die geringe Schneemassenakkumulation und der großen Mächtigkeit des Eisschildes kann zeitlich sehr weit zurück in die Vergangenheit Klimageschichte rekonstruiert werden. Selbstverständlich ist dadurch die zeitliche Auflösung der antarktischen Bohrkerne im Allgemeinen wesentlich schlechter als die der nordhemisphärischen Äquivalente. Kurzfristige Klimaschwankungen können daher nicht so einwandfrei rekonstruiert werden wie beispielsweise in Grönland. Bei den besonders tiefen Bohrungen in diesem Gebiet muss der Bohrstandort äußerst präzise ausgewählt werden, da mit zunehmender Tiefe immer mehr Scherkräfte und Eisfluss auftreten. Mittlerweile können in antarktischen Bohrkerne die letzten vier Glaziale und ihre warmzeitlichen Äquivalente nachgewiesen werden.

Das Byrd-Projekt (80.0°S/119.5°W; 1530m ü.N.N.) stand am Anfang und wurde dann wichtig für die Korrelation der späteren, größeren Eisbohrkern-Projekte.

Auch auf dem Australian Antarctic Territory wurden durch das Australian Antarctic Ice Core Project kleinere Bohrungen unternommen. Es wurde hier nur ein Alter des Eises um 1ka BP erreicht, dafür aber in für antarktische Verhältnisse hoher zeitlicher Auflösung. Besonders detailliert wurde hier die Methankonzentration während des Holozäns analysiert.

Eins der größten und aussagekräftigsten Projekte wurde nahe der russischen Station Vostok durchgeführt. Russland erbohrte zusammen mit Frankreich und den USA über zehn Jahre hinweg den 3623 m langen Eisbohrkern.

Jüngere Projekte werden vom European Project for Ice Coring in Antarctica (EPICA) durchgeführt, an dem das Alfred-Wegener-Institut Bremerhaven den deutschen Beitrag leistet. Außerdem sind Belgien, Dänemark, Frankreich, Italien, die Niederlande, Norwegen, Schweden, Schweiz und das Vereinigte Königreich beteiligt. Die Bohrkerne wurden an zwei Bohrstellen entnommen, die in unterschiedlichen Bereichen der Antarktis liegen. Der eine Bohrkern wurde an der Bohrstelle Dome C gezogen, die in der Ost-Antarktis liegt. Die zweite Bohrstelle liegt in Dronning Maud Land an der Kohlen-Station. Die ersten Vorarbeiten für das Projekt begannen im Jahre 1995 mit umfangreichen Vor-Ort-Untersuchungen in Dronning Maud Land. Nach Abschluss der Untersuchungen 2001 wurde im Januar 2002 mit der Bohrung bei der Kohlen-Station begonnen. Die Bohrung endete 2006 in einer Tiefe von 2775 m mit einem Stück gefrorenen Schmelzwassers von der Basis des antarktischen Eisschildes. An dem geförderten Eisbohrkern lässt sich die Klimaentwicklung der letzten 150.000 Jahre ablesen. Bereits 1996 begann die Bohrung auf Dome

C. Im Dezember 2004 wurde die endgültige Tiefe mit 3.270 m erreicht, ca. 5 m über dem erwarteten Grund der Eisschicht. Dieser Eisbohrkern birgt das älteste je geförderte Eis und die Klimageschichte der letzten 900.000 Jahre.

## **5 Eiszeitalter**

### **5.1 Känozoisches Eiszeitalter**

Das Känozoische Eiszeitalter ist eine Phase der Erdgeschichte, in der zu erst die Antarktis und seit etwa 2,7 Millionen Jahren auch die Arktis vergletschert ist. Vor allem seit etwa einer Million Jahren wechseln sich (längere) Kaltzeiten (Glaziale) mit (kürzeren) Warmzeiten (Interglaziale) ab.

Die Phase der arktischen Vergletscherung begann vor etwa 2,7 Millionen Jahren. Dem ging eine langsame, globale Abkühlung voraus. Etwa vor 4,6 Millionen Jahren begann die Schließung der Landenge von Panama, die zu großen Veränderungen in den ozeanischen Strömungsverhältnissen führte. Dies brachte eine Erhöhung der Luftfeuchte in der Arktis mit sich, welche letztlich den "Rohstoff" für die Nordhemisphärenvereisung lieferte.

Innerhalb der heutigen Eiszeit gibt es relativ warme und extrem kalte Zwischenphasen. Die Kältephasen (*Kaltzeiten*) sind gekennzeichnet durch massive Gletschervorstöße. Sie sind mit etwa 90.000 Jahren deutlich länger als die Wärmephasen (Warmzeiten), die nur rund 15.000 Jahre dauern. Warmzeiten beginnen häufig recht plötzlich, während die Abkühlung eher schleichend erfolgt. Dabei verläuft die Klimaveränderungen selten gleichmäßig, sondern mit abrupten Änderungen und dazwischenliegenden gegenläufigen Entwicklungen.

Ein gesamter Zyklus von einer Warmzeit zur nächsten dauert derzeit etwas mehr als 100.000 Jahre. Diese Zyklendauer ist allerdings erst seit 600.000 bis 800.000 Jahren gültig. Vor 2,7 Millionen Jahren bis vor etwa 700.000 Jahren lag die Dauer eines Zyklus nur bei etwa 40.000 Jahren. Dieses ist mit der etwa gleich langen Periode, mit der die Obliquität (Stellung der Erdachse) schwankt, in Verbindung zu bringen. Der aktuell gültige 100.000-Jahre-Zyklus beruht vor allem auf Änderungen der Exzentrizität der Erdbahn. Warum es zu dem Wechsel in der Dauer der Warm-Kaltzeit-Zyklen kam, ist nicht eindeutig geklärt.

Die aktuelle „Nacheiszeit“, in der geologischen Zeitskala als Holozän bezeichnet, ist eine Warmzeit innerhalb eines globalen Eiszeitalters, die seit etwa 11.000 Jahren andauert. Auch in den Wärmephasen eines globalen Eiszeitalters bleibt das Klima im erdgeschichtlichen Vergleich relativ kalt, die Eisbedeckung in der Nähe der Pole und höheren Gebirgen bleibt meistens erhalten. Gletschervorstöße bis in die Mittelbreiten werden aber zurückgebildet, und es kommt dort zu wesentlich gemäßigterem Klima, insbesondere mit milderem Wintern.

Als Ursachen der allgemeinen Abkühlung seit dem Eozän werden derzeit vor allem Änderungen auf der Erde selbst diskutiert, während die kurzfristigen Klimaschwankungen sich am besten mit periodischen Änderungen der Erdbahnparameter oder mit periodischen Schwankungen der Sonnenaktivität erklären lassen. Hauptantrieb für die allgemeine Abkühlung im Paläogen und Neogen waren Prozesse der Plattentektonik, das heißt die Verschiebungen der kontinentalen Platten.

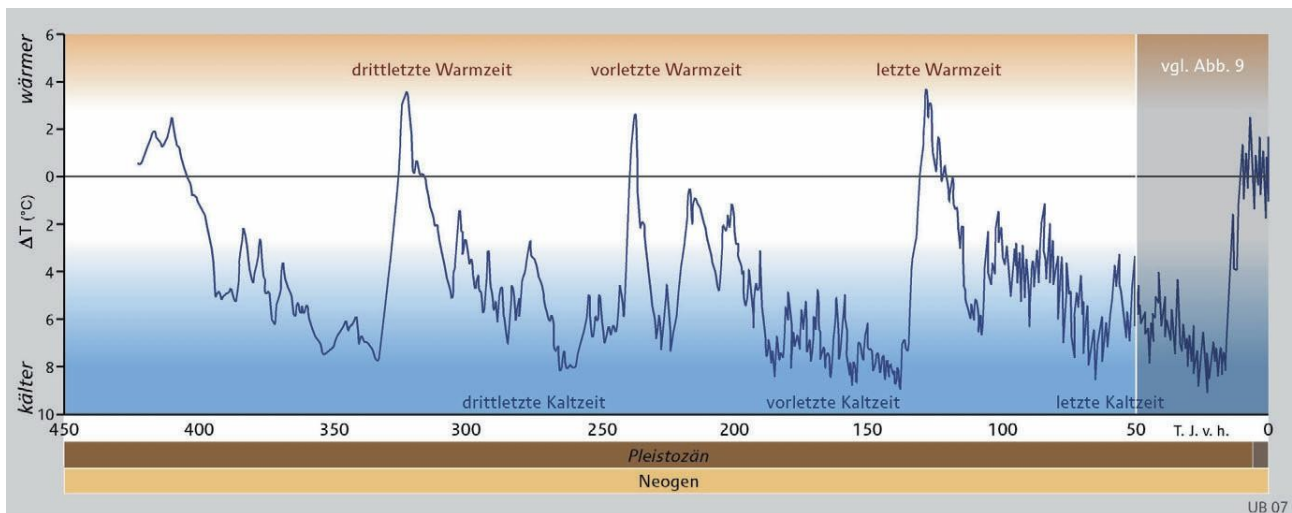


Abbildung 9: Abwechselnde Kalt und Warmzeiten im Zyklus von 100.000 Jahren

## 5.2 Frühere Eiszeitalter

Im so genannten Erdaltertum (Paläozoikum, 542-251 Millionen Jahre) herrschte wärmeres Klima vor, das jedoch im Übergang vom Ordovizium zum Silur von einem schwächeren und vom Karbon zum Perm von einem stärkeren Eiszeitalter unterbrochen wurde. Letzteres wird auch als GondwanaVereisung bezeichnet, weil es weite Teile des damaligen auf der Südhalbkugel gelegenen Großkontinents betraf, wie noch heute sichtbare Gletscherschrammen in Südafrika beweisen. Insgesamt scheinen auch im Paläozoikum die Klimaschwankungen von plattentektonischen Bewegungen und dem langsamen Kohlenstoffkreislauf verursacht worden zu sein, denn es gibt für beide Vereisungsphasen Hinweise auf verringerte Kohlendioxidgehalte (Royer *et al.* 2004). Ansonsten lag der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre mit Werten von mehr als 1000 ppm zumeist wesentlich höher als heute (ca. 380 ppm) und die Erde war eisfrei. Im Erdmittelalter (Mesozoikum, 251-65,5 Millionen Jahre) war die Erde vollständig ohne Eis. Daher lag der Meeresspiegel etwa 80 m höher als heute, und die Temperaturen überstiegen die heutigen um 6-8°C (Royer *et al.* 2004). Die Welt war beherrscht von tropischen Wäldern und Dinosauriern. Das Ende der mesozoischen Warmphase und der Dinosaurier wurde vermutlich von einem oder mehreren katastrophalen Meteoriteneinschlägen verursacht. Der in die Atmosphäre katapultierte Staub schwächte die einkommende Sonnenstrahlung, und damit kam es zur Abkühlung. Abschließend muss betont werden, dass bis heute genauere Aussagen über das Ausmaß und den zeitlichen Ablauf des Klimageschehens unseres Planeten vor der Erdneuzeit (Känozoikum, s.u.) schwierig zu machen sind und daher oft noch hypothetisch bleiben. Dies liegt vor allem auch an der Tatsache, dass für den Zeitraum keine detaillierten Tiefseesedimentkerne vorliegen und die Datierungsmöglichkeiten begrenzt sind.

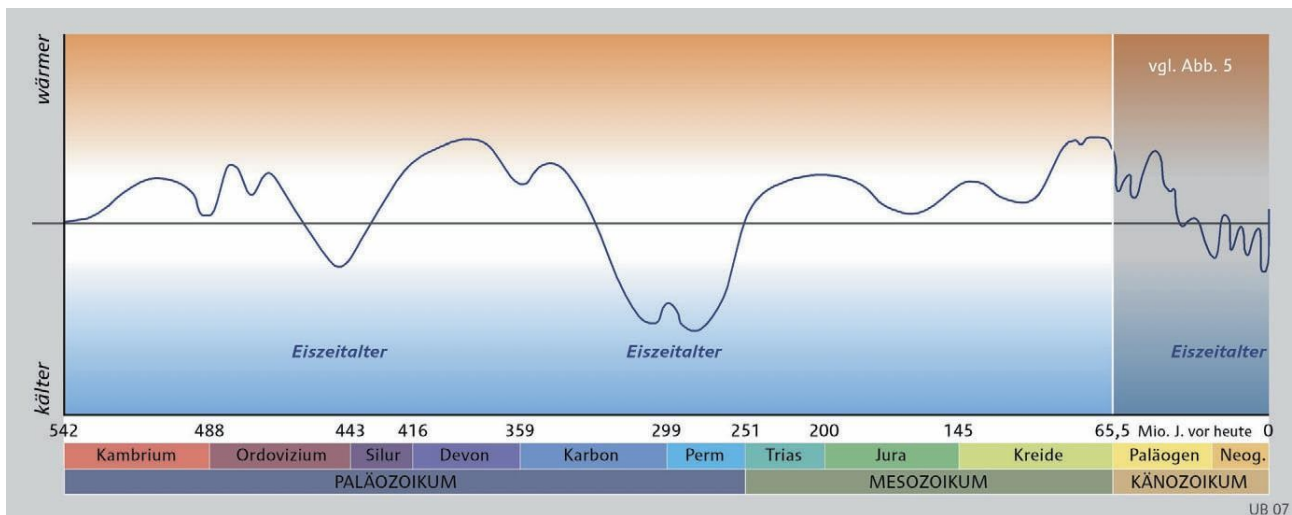


Abbildung 10: Eiszeitalter vom Kambrium bis heute

## 6 Aussichten

Würde man alleine auf der Milankovitch-Theorie eine Vorhersage wagen, wäre in den nächsten 6.000 Jahren mit einer Abkühlung zu rechnen und eiszeitliche Temperaturen würden in ca. 55.000 Jahren erreicht (100.000 Jahre-Zyklus). Jedoch wirkt neben den natürlichen Einflüssen heute auch der Mensch auf das Klima ein. Letztendlich wird klar, dass die möglichst genauen Kenntnisse über das Paläoklima eine grundlegende Vorbedingung für die Abschätzung der zukünftigen Entwicklung ist.