



# Tipping points in past climate

Een Geo Future Module over klimaatverandering in het verleden

drs. Rob Adriaens (KNAG & CSG Het Streek)  
prof. dr. Appy Sluijs, Margot Cramwinckel MSc, Robin van der Ploeg MSc,  
dr. Tine Béneker (NESSC / Universiteit Utrecht)



- © Deze module is eigendom van het Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap (KNAG) en Netherlands Earth System Science Centre (NESSC).  
Gebruik van deze module is toegestaan aan scholen of instellingen onder vermelding van de auteurs en de hieronder weergegeven instellingen.

Foto voorzijde: Bellen methaangas onder ijs, <http://images.fineartamerica.com>



# Tipping points in past climate

Een Geo Future School module over  
klimaatverandering in het verleden

Deze module is gecertificeerd door het Koninklijk  
Nederlands Aardrijkskundig Genootschap (KNAG).  
De module maakt onderdeel uit van het concept  
Geo Future School

drs. Rob Adriaens, Prof. dr. Appy Sluijs, Margot  
Cramwinckel MSc, Robin van der Ploeg MSc, dr.  
Tine Béneker,  
©2016



## Inhoudsopgave

Inleiding .....	4
Curriculum .....	6
De opdracht .....	7
De opbouw van de module .....	7
Startopdracht .....	8
Hoofdstuk 1: De geologische tijdschaal .....	9
Hoofdstuk 2: De koolstofkringloop en het broeikaseffect .....	17
Hoofdstuk 3: De diepzee als klimaatarchief .....	25
Hoofdstuk 4: Klimaatverandering in het verleden .....	29
Hoofdstuk 5: De eindopdracht .....	41
Beoordeling .....	43



## Inleiding

De film *The day after tomorrow* van Ronald Emmerich (2004) schetst een interessant scenario over wat er kan gebeuren als klimaatverandering een zekere grenswaarde overschrijdt. In de film ontstaan allerlei natuurrampen die uiteindelijk uitmonden in het begin van een nieuwe ijstijd. Noord-Amerika wordt zwaar getroffen. Waar vandaag de dag migranten vooral de grens tussen Mexico en de Verenigde Staten in noordelijke richting willen oversteken, gebeurt dat in de film in omgekeerde richting: klimaatvluchtelingen uit de Verenigde Staten willen naar Mexico. Hoewel *The day after tomorrow* in veel opzichten vooral een typische Hollywood blockbuster is en er inhoudelijk het nodige valt af te dingen op het verhaal, snijdt de film toch een interessante vraag aan: hoe sterk kan het klimaat veranderd worden, voordat we een kantelpunt of *tipping point* bereiken waarop het klimaat doorslaat in een bepaalde richting? Dat is de centrale vraag waarop je in deze module een antwoord gaat proberen te vinden.



Hoewel er nog enkelen zijn die het ontkennen, is de overgrote meerderheid van de klimaatwetenschappers het er inmiddels over eens dat de huidige klimaatverandering in ieder geval voor een deel het gevolg is van menselijk handelen. Om de vraag te kunnen beantwoorden wanneer de klimaatverandering leidt tot een onomkeerbaar proces, kunnen we kijken naar het verleden. Er zijn momenten in de geologische geschiedenis van de aarde geweest waarop abrupte klimaatveranderingen plaatsvonden. Als we in staat zijn om te achterhalen wat er destijds is gebeurd, biedt het verleden wellicht niet alleen de sleutel tot het heden, maar ook tot de toekomst.

Het Netherlands Earth System Science Centre (NESSC) is een virtueel onderzoeksinstituut waar onderzoekers van de Universiteit Utrecht, de Wageningen Universiteit, de Vrije Universiteit, de Radboud Universiteit en het Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee (NIOZ) hun kennis delen en onderzoek doen naar klimaatverandering. *Tipping points* spelen daarin een belangrijke rol.

Voordat je de centrale vraag van deze module kunt beantwoorden moet je eerst wat meer weten over het klimaat van het verleden (het paleoklimaat). Dit ga je doen door eerst de geologische tijdschaal en de koolstofkringloop te bestuderen.

## Curriculum

<p>Aan het einde van deze module kun je</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ beschrijven hoe de geologische tijdschaal is opgesteld en in hoofdlijnen aangeven hoe de tijdvakken kunnen worden gekarakteriseerd</li> <li>▪ beschrijven hoe het paleoklimaat gereconstrueerd wordt</li> <li>▪ aangeven hoe fluxen in de koolstofkringloop veranderen als er een verstoring van deze kringloop plaatsvindt</li> <li>▪ een scenario schrijven voor een documentaire en deze documentaire filmen</li> </ul>		
Aandachtspunten	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ De geologische tijdschaal is een stratigrafie gebaseerd op relatieve datering.</li> <li>▪ Op verschillende momenten in de geologische tijdschaal zijn er grote veranderingen in het klimaat geweest (bijvoorbeeld de overgang van de broeikasarde naar de diepvriesarde).</li> <li>▪ In de koolstofkringloop stroomt koolstof tussen reservoirs. De stromen verlopen in de korte koolstofkringloop vrij snel, maar in de lange koolstofkringloop langzaam.</li> <li>▪ Er bestaat gedurende het geologische verleden een sterk verband tussen temperatuur en CO<sub>2</sub>- gehalte.</li> </ul>	
Denkvaardigheid (uit de gereviseerde taxonomie van Bloom)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Begrijpen: de indeling van de geologische tijdschaal</li> <li>▪ Toepassen: een practicum uitvoeren</li> <li>▪ Analyseren: de fluxen en terugkoppelingen in de koolstofkringloop analyseren.</li> <li>▪ Creëren: een documentaire ontwerpen</li> </ul>	
Begrippen	Geologische tijdschaal	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ (Bio)stratigrafie</li> <li>▪ Relatieve datering</li> <li>▪ Absolute datering</li> <li>▪ Gidsfossielen</li> <li>▪ Eon/era/periode</li> <li>▪ Massa extinctie</li> <li>▪ Paleoklimaat</li> <li>▪ Proxy</li> </ul>
	Koostofkringloop	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reservoirs</li> <li>▪ Fluxen</li> <li>▪ Methaanhyaat</li> <li>▪ Permafrost</li> <li>▪ Carbonaat-compensatie diepte</li> </ul>
	De diepzee als klimaatarchief	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Foraminiferen</li> <li>▪ Dinoflagellaten</li> <li>▪ <math>\delta^{18}\text{O}</math>-waarde</li> </ul>
	Klimaatverandering in het verleden	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tipping point</li> <li>▪ PETM</li> <li>▪ Milankovitch-variabelen</li> <li>▪ Jonge Dryas</li> <li>▪ Thermohaliene circulatie</li> </ul>

## De opdracht

De eindopdracht van deze module luidt: Maak een korte documentaire over klimaatverandering in het verleden en wat deze ons kunnen vertellen over de huidige klimaatverandering.

## De opbouw van de module

Les	Activiteit	Uitwerking
1 2	Introductie	Filmpje van <a href="http://www.tippingpointahead.nl">www.tippingpointahead.nl</a> Startopdracht klimaat in het verleden
go – no go: de startopdracht moet goedgekeurd worden door de docent		
3 4	De geologische tijdschaal	Hoofdstuk 1 College over de geologische tijdschaal  ► Verwerkingsopdrachten + stamboomopdracht met Prezi
go – no go: de stamboom moet goedgekeurd worden door de docent		
5 6	De koolstofkringloop	Hoofdstuk 2 College over de koolstofkringloop  ► Verwerkingsopdrachten
7 8	De diepzee als klimaatarchief	Hoofdstuk 3  ► Verwerkingsopdrachten
9 10	Klimaatveranderingen in het verleden	Hoofdstuk 4  ► Verwerkingsopdrachten + onderzoekopdracht dinoflagellaten
go – no go: de onderzoekopdracht moet goedgekeurd worden door de docent		
11 12 13 14	Eindopdracht	Scenario schrijven voor de documentaire Documentaire opnemen en bewerken.  ► Eindopdracht: documentaire + scenario
Presentatie van de documentaires		



## Startopdracht

### 65 miljoen jaar klimaatverandering

### Go – no go

Bij deze module hoort een excel-spreadsheet met daarin temperatuurgegevens van de afgelopen 65 miljoen jaar. Van deze gegevens zijn alleen die van de laatste 135 jaar direct gemeten. De andere gegevens zijn op indirecte wijze verkregen. Het bestand bestaat uit vijf tabbladen. Eén met daarin de gegevens tot 65 miljoen jaar geleden, één met daarin de gegevens van de afgelopen 13.000 jaar (het Holoceen) en één met daarin de gegevens sinds 1880. Het vierde en het vijfde tabblad bevat het CO<sub>2</sub>-gehalte van de atmosfeer gedurende de afgelopen 11.000 jaar.

- Maak met behulp van dit excelbestand drie grafieken van het temperatuurverloop
  - één grafiek van de afgelopen 65 miljoen jaar (tabblad 1)
  - één grafiek van de afgelopen 13.000 jaar (tabblad 2)
  - één grafiek van de afgelopen 135 jaar (tabblad 3)
- Geef in de grafieken onderstaande gebeurtenissen aan. Je kunt dit doen door de Excelgrafieken op te nemen in een presentatieprogramma als Prezi of Powerpoint. Zoek op internet op wanneer deze gebeurtenissen plaatsvonden.

De onderstaande gebeurtenissen horen bij de grafiek die tot 65 miljoen jaar teruggaat

- de (geologisch) korte periode met de hoogste temperatuur in de afgelopen 65 miljoen jaar (het PETM = Paleoceen Eoceen Thermisch Maximum)
- het ontstaan van de ijskappen op Antarctica
- begin van de ijstijden op het noordelijk halfrond

De onderstaande gebeurtenissen horen bij de grafiek die tot 13.000 jaar teruggaat

- het opdrogen van de Sahara (5.000-6.000 jaar geleden)
- het ineenstorten van vroege beschavingen als die van Mycene en de Hettieten (ca. 3.200 jaar geleden)
- Romeinse periode
- Periode van ineenstorting van het Romeinse Rijk en de volksverhuizingen
- Warme periode in de middeleeuwen
- Kleine ijstijd

De onderstaande gebeurtenis hoort bij de grafiek die tot 1880 teruggaat

- De warmste drie decennia van deze periode
- Maak ook een grafiek van het CO<sub>2</sub>-gehalte van de afgelopen 11.000 jaar (tabblad 4 en 5). Vergelijk deze met de temperatuurgrafiek van die periode.
- Noteer de conclusies die je op basis van deze opdracht kunt trekken.

## Hoofdstuk 1: De geologische tijdschaal

Leonardo da Vinci concludeerde ongeveer vijfhonderd jaar geleden dat een laag kalksteen die fossielen van schelpen en vissen bevat, ook daadwerkelijk ooit in de nabijheid van de zee gevormd moet zijn. In de tijd van Leonardo was platentektoniek nog volstrekt onbekend. Leonardo heeft dan ook geen verklaring gegeven voor het feit dat de kalksteen zo hoog in de bergen was gelegen. Hij nam wel waar dat bergen bestaan uit lagen van gesteenten, waarbij hij dacht dat de jongste lagen bovenop en de oudste lagen onderop lagen.



*Bron 1: de oudst bekende tekening van Leonardo da Vinci, een landschap in Toscane (1473)*

Zoals met allerlei vormen van wetenschap was Leonardo da Vinci zijn tijd ver vooruit. Zijn aanname dat gesteentelagen van oud naar jong op elkaar gestapeld zijn, bleek juist. Deze stapeling wordt ook wel **stratigrafie** genoemd. De geologische tijdschaal die te zien is in bron 2 toont eigenlijk ook gesteentelagen. De jongste lagen liggen bovenop en de oudste onderop. Om de ouderdom van de gesteentelagen ten opzichte van elkaar te bepalen is gebruik gemaakt van fossielen. Het correleren van verschillende gesteentelagen op basis van fossielen wordt **biostratigrafie** genoemd. Niet alle fossielen zijn daarvoor echter bruikbaar. Alleen fossielen van diersoorten die een hard skelet hebben, een relatief korte periode op aarde leefden en in die periode wijdverbreid voorkwamen, zijn geschikt. Deze fossielen worden **gidsfossielen** genoemd. De meeste gidsfossielen zijn kleine schelpdieren. Met de gidsfossielen kan alleen de ouderdom van de lagen en opzichte van elkaar worden bepaald. Deze

methode is dus een voorbeeld van een **relatieve datering**. Pas in de twintigste eeuw slaagde men erin om ook de absolute ouderdom van gesteentelagen te bepalen. Dit wordt gedaan door radioactief verval van bepaalde elementen in de gesteenten te meten. Een datering die op die manier wordt gedaan, wordt een **absolute datering** genoemd.

De geologische tijdschaal maakt onderscheidt in eonen, era's, periodes en tijdvakken. De grootste eenheid is het eon. De hele periode waarin fossielen zijn gevonden van complexe organismen wordt het Phanerozoïcum genoemd. Dit eon is onderverdeeld in drie era's: het Paleozoïcum, Mesozoïcum en het Cenozoïcum, achtereenvolgens de tijd van het oude leven, het midden leven en het nieuwe leven. Deze era's zijn verder onderverdeeld in twaalf periodes. De grenzen tussen de Era's en periodes laten een duidelijke verandering zien in de fossielinhoud van de gesteentelagen. Deze grenzen markeren meestal het uitsterven van een specifieke diersoort, maar sommige worden gekenmerkt door het verdwijnen van een heleboel diersoorten (**massa-extincties**). Na zo'n massa-extinctie ontstaan na verloop van tijd weer nieuwe soorten die de leeggekomen plekken in de ecosystemen invullen, totdat er opnieuw een massa-extinctie plaatsvindt. De bekendste grens bevindt zich tussen de periodes Krijt en Paleogeen (en de era's Mesozoïcum en Cenozoïcum). Deze grens markeert het uitsterven van talloze diersoorten waaronder de dinosauriërs die domineerden in de ecosystemen van het Mesozoïcum. In het Cenozoïcum wordt hun plaats ingenomen door zoogdieren en vogels.

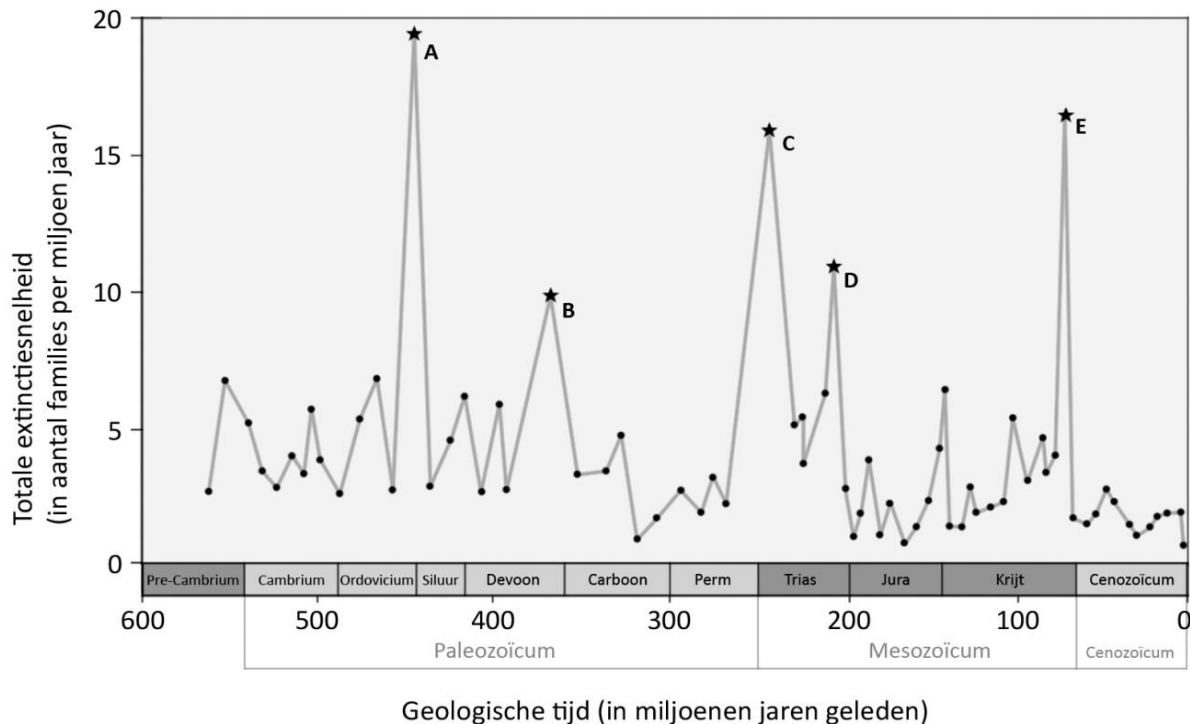
De geologische tijdschaal kan gekoppeld worden aan de ligging van de continenten in de verschillende era's, periodes en tijdvakken én aan het **paleoklimaat**: het klimaat uit het verleden. Met behulp van **proxy's**, indicatoren voor het klimaat in het verleden, hebben geologen namelijk een beeld van hoe het klimaat in de verschillende era's en periodes moet zijn geweest. Veelgebruikte proxy's zijn bijvoorbeeld de chemische eigenschappen van fossiele kalksschaaltjes die in diepzeesedimenten zijn gevonden, of variaties in stuifmeelpollen die in veenlagen zijn bewaard.

De koppeling van geologische tijdschaal, continentverschuiving en paleoklimaat vertelt samen een lang verhaal over de aarde. In het hele Mesozoïcum en het Paleogeen lagen de concentratie van CO<sub>2</sub> in de atmosfeer en de gemiddelde mondiale temperatuur ver boven de huidige waarden. Je zou die periode de *broeikasaarde* kunnen noemen. Binnen die periode bevinden zich enkele opvallende uitschieters, waarin de temperatuur tot recordhoogte reikt. 55 miljoen jaar geleden, tijdens het Eoceen, was het op de noordpool naar schatting 23°C, groeiden er palmbomen in Groenland en Canada en leefden er nijlpaarden op Spitsbergen.

Op de grens van de tijdvakken Eoceen en Oligoceen (ongeveer 33,9 miljoen jaar geleden) blijkt uit diepzeesedimenten een afname in de temperatuur. Vanaf dat moment kunnen we spreken over de *diepvriesaarde*, die in het Pleistoceen haar hoogtepunt bereikt met een hele reeks ijstijden.

De *broeikasaarde* en de *diepvriesaarde* zijn goede voorbeelden uit het verleden om de gevoeligheid van ons klimaat te onderzoeken. Om de klimaatveranderingen in het verleden te kunnen begrijpen moeten we ons echter eerst verdiepen in een essentieel onderdeel: de koolstofkringloop. Dit ga je in hoofdstuk 2 doen.

## Opdrachten



In bovenstaande afbeelding (naar Raup en Sepkoski 1982) zie je de hoeveelheid families (groepen) van soorten zeedieren die over de afgelopen 540 miljoen jaar uitstierven.

### Opdracht 1

Massa-extincties zijn perioden waarin in korte tijd veel soorten organismen uitsterven, meer dan 60% van alle soorten.

Hoeveel massa-extincties zijn er de afgelopen 540 miljoen jaar geweest?

### Opdracht 2

De laatste massa extinctie vond plaats aan het eind van het Krijt, zo'n 66 miljoen jaar geleden. Toen stierven bijvoorbeeld dinosauriërs en ammonieten (een bepaalde groep schelpdieren) plotseling uit.

Wat veroorzaakte deze massa-extinctie?

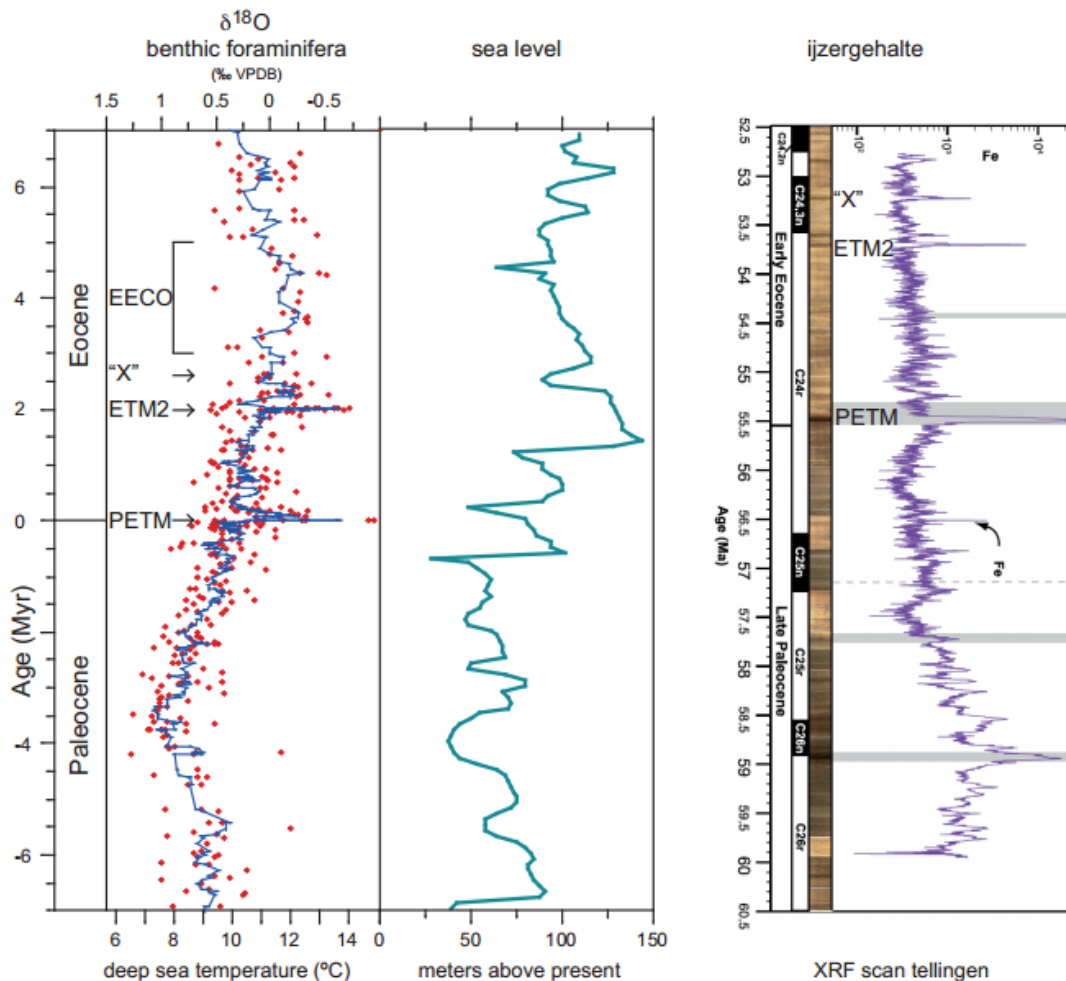
### Opdracht 3

Het uitsterven van soorten is van alle tijden. Per tijdseenheid is er dus altijd een aantal soorten dat uitsterft. Biologen meten het aantal uitstervingen per tijdseenheid ook voor de huidige tijd. Deze metingen suggereren dat het uitsterven van soorten



momenteel 100 tot 1.000 keer sneller gaat dan voordat de mens grote delen van de wereld bevolkte.

Beredeneer of we momenteel in een massa-extinctie zouden kunnen zitten.



**A.** Reconstructie van diepzee temperatuur (uit Zachos et al. 2008 en Lourens et al. 2005) en mondiaal-gemiddeld zeeniveau (uit Kominz et al. 2008) tijdens het laat Paleoceen en vroeg Eoceen, gebaseerd op verschillende boorkernen. Ouderdommen in miljoenen jaren zijn weergegeven relatief tot de PETM. Figuur is aangepast van Sluijs et al. 2008 (Paleoceanography).

**B.** IJzergehalte van sedimenten van laat Paleoceen en vroeg Eoceen ouderdom van een boorkern uit de Atlantische Oceaan (Walvis Rug, Ocean Drilling Program Site 1262). Ouderdommen volgens de tijdschaal van Vandenberghe et al. 2012). Figuur van Littler et al. 2014 (EPSL).

## Opdracht 4

Bovenstaande afbeelding geeft gegevens van boorkernen weer. De boorkernen bevatten diepzeesedimenten uit de tijdvakken Paleoceen en Eoceen. De ouderdom staat aan de linkerkant van de figuren.

Beredeneer bij elk van de figuren A en B of er sprake is van relatieve of absolute ouderdom.

## De geologisch tijdschaal

Go – No go

Bij deze module hoort een presentatie die je leidt door de geologische tijdschaal. Open de presentatie via <https://prezi.com/e4yxv7xgxo47/de-geologische-tijdschaal/>

Bekijk de inhoud aandachtig.

Maak daarna een stamboom van het leven op aarde. Teken deze stamboom naast een afbeelding van de geologische tijdschaal zodat je goed kunt zien in welke periode bepaalde plant- of diersoorten voorkwamen. Geven aan in welke geologische periodes deze dier- of plantensoorten voorkwamen. In je stamboom moet je in ieder geval de volgende groepen opnemen: *dinosaurussen*, *eencelligen*, *trilobieten*, *vissen*, *insecten*, *spinachtigen*, *amfibieën*, *reptielen*, *zoogdieren*, *vogels*, *grassen*, *landplanten*, *bloeiende planten*. Laat in je stamboom zien waar bepaalde soorten zich afsplitsen van anderen.

Geef in de stamboom ook de 'big five' massa-extincties aan.

Je stamboom moet goedgekeurd zijn door je docent voordat je verder kunt werken in de module.

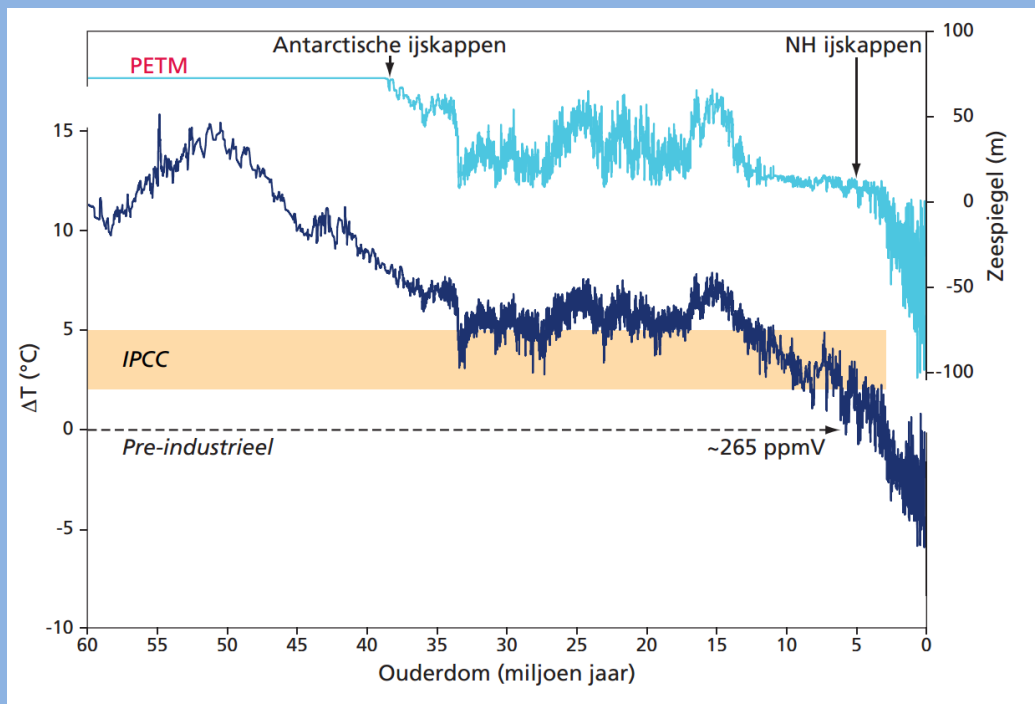


## Waarom zorgen om opwarming?

In onderstaande grafiek is het verschil in temperatuur ( $\Delta T$ ) weergegeven op verschillende momenten in het geologische verleden ten opzichte van de huidige temperatuur. Hieruit valt af te lezen dat met uitzondering van de laatste miljoenen jaren de gemiddelde temperatuur op aarde hoger lag dan tegenwoordig. Tot zo'n 38 miljoen jaar geleden stond de zeespiegel ongeveer 70 meter hoger dan tegenwoordig. Grote delen van de continenten waren bedekt door zeeën. Niet lang daarna ontstonden de Antarctische ijskappen. Naarmate deze ijskappen groeiden, daalde de mondiale zeespiegelstand. Op het noordelijk halfrond ontstonden de eerste ijskappen zo'n 5 miljoen jaar geleden. De zeespiegelstand daalde daardoor nog verder. Tijdens de maximale uitbreiding van het landijs in het Pleistoceen stond de zeespiegel ongeveer 100 meter lager dan tegenwoordig. Ondiepe zeeën, zoals de zuidelijke Noordzee, stonden toen droog.

Op basis van deze grafiek zou je je kunnen afvragen waarom de huidige opwarming tot zorgen leidt. In het geologische verleden is de temperatuur immers vele malen hoger geweest dan nu. Dit was zeker het geval in de korte tijdspanne die wordt aangeduid als PETM (daarover lees je meer in hoofdstuk 4).

De zorgen zijn echter wel degelijk terecht: mensen hebben zich tegenwoordig massaal in laag gelegen kustgebieden gevestigd en een zeespiegelstijging van slechts enkele tientallen centimeters kan al grote gevolgen hebben. Daarnaast kent het huidige tempo van klimaatverandering geen natuurlijk equivalent in het verleden. De balk waarin IPCC staat geeft de bandbreedte aan van de verwachte temperatuursveranderingen die zijn opgesteld door het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

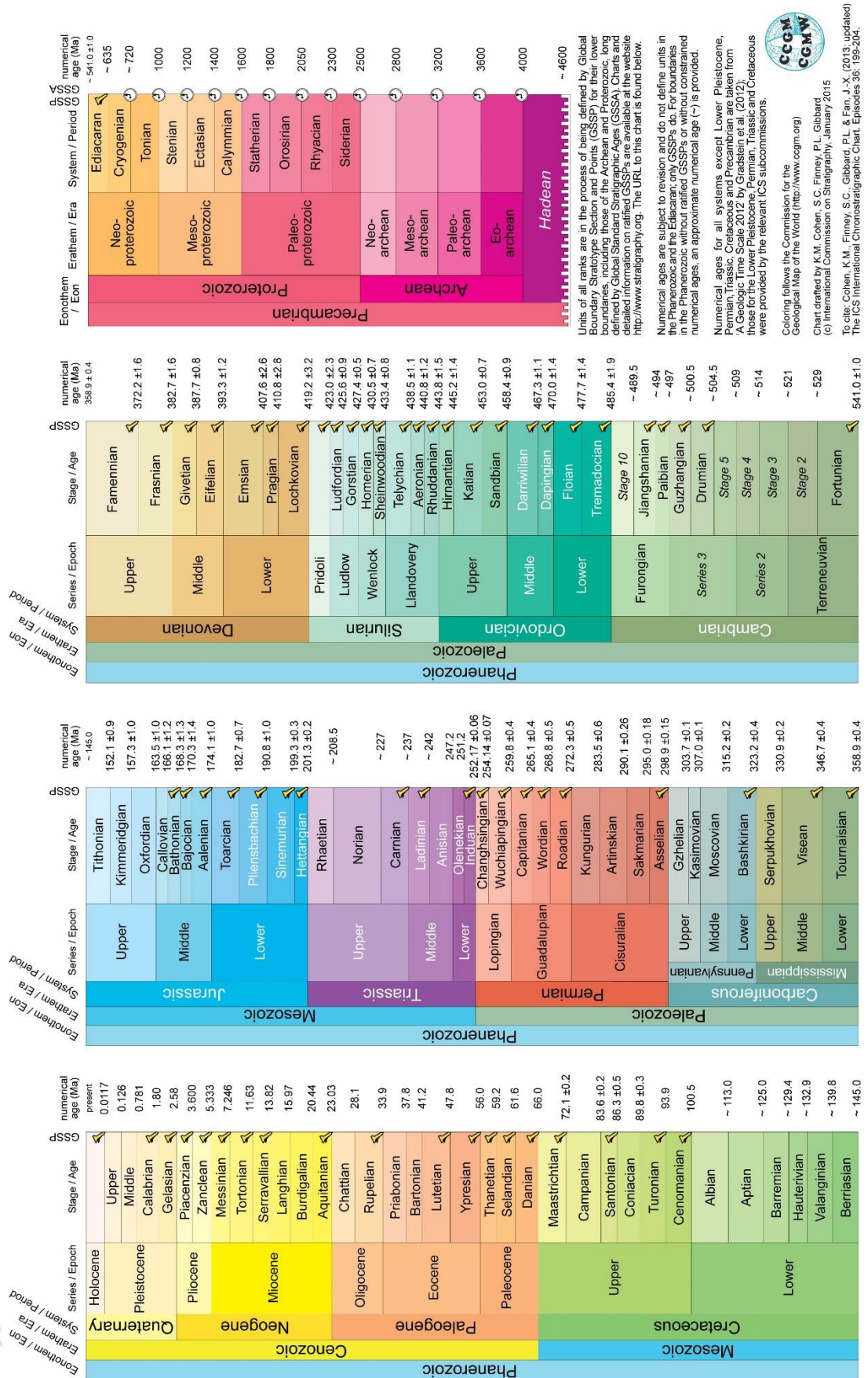


Bron afbeelding: L. Lourens (2011) naar De Boer et al., 2010, Van de Wal et al., 2011 en Zachos et al., 2005

# INTERNATIONAL CHRONOSTRATIGRAPHIC CHART

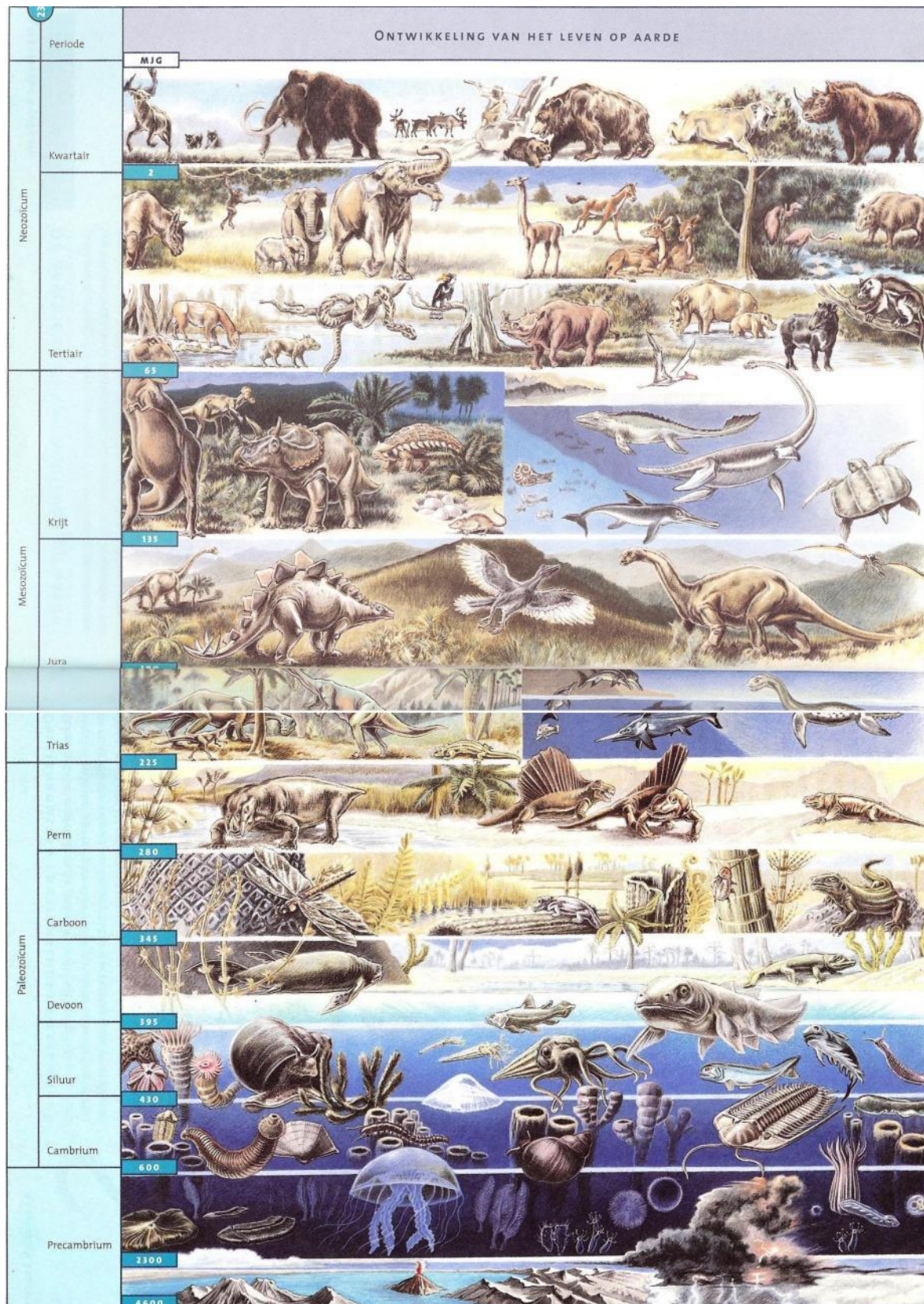
v 2015/01

www.stratigraphy.org International Commission on Stratigraphy





## Tipping points in past climate

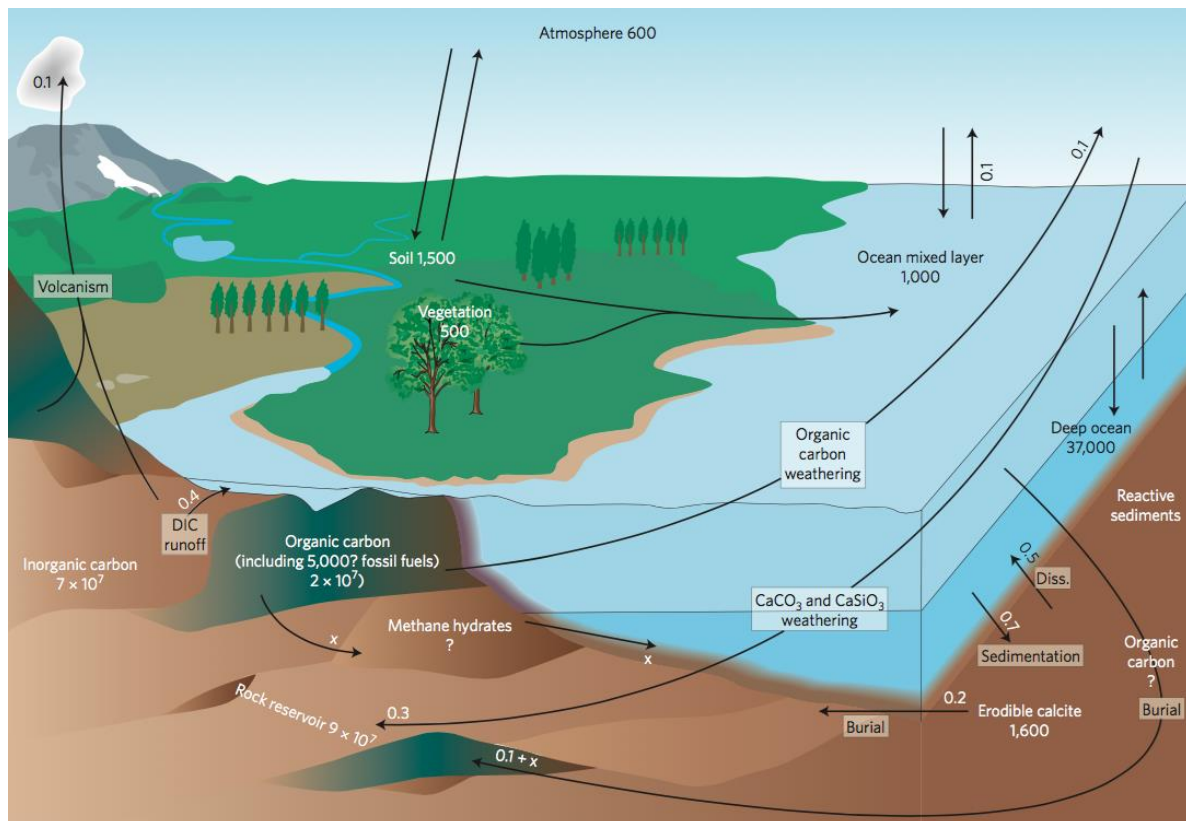


Bron 3: Schematische voorstelling van de geologische tijdschaal en het leven in de verschillende geologische periodes. NB. de naam Tertiair wordt tegenwoordig niet meer gebruikt. In plaats daarvan wordt gesproken van het Paleogeen en het Neogeen. Bron: <http://users.skynet.be>



## Hoofdstuk 2: De koolstofkringloop en het broeikaseffect

Vanuit de aardrijkskundelessen ben je bekend met de kringloop van het water. Water bevindt zich in verschillende reservoirs of opslagplaatsen en tussen die reservoirs vindt voortdurend uitwisseling van water plaats. Er bestaat niet alleen voor water zo'n kringloop, maar voor alle elementen op aarde. Zo ook voor koolstof (C). De koolstofkringloop toont hoe het element koolstof (C) stroomt tussen verschillende reservoirs (zie bron 4).



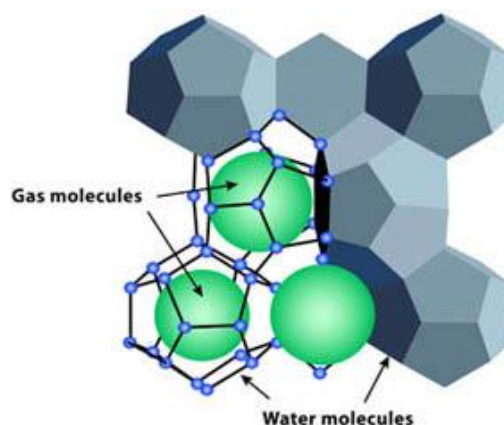
Bron 4: Een overzicht van de reservoirs en fluxen die een rol spelen in de moderne koolstofkringloop. De reservoirs zijn weergegeven in Pg C en de fluxen in Pg C per jaar. Bron Sluijs et al. (2013).

Eén van de reservoirs van koolstof is de atmosfeer. Hier bevindt zich slechts 0.001% van alle koolstof op aarde, voornamelijk in de vorm van koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>). Koolstofdioxide is één van de zogenaamde **broeikasgassen**. Deze gassen houden warmte die van het aardoppervlak uitstraalt vast. Zonder dit natuurlijke effect zou de gemiddelde temperatuur op aarde -18° C bedragen. Uit analyses van ijskernen op Antarctica en Groenland blijkt een sterk verband tussen de temperatuur en het CO<sub>2</sub> – gehalte in de atmosfeer. Het is dan natuurlijk de vraag of een hogere temperatuur een hoger CO<sub>2</sub> – gehalte veroorzaakt, of juist andersom.

De hoeveelheid  $\text{CO}_2$  in de atmosfeer wordt vaak aangeduid in ppmV (aantal deeltjes koolstofdioxide per miljoen deeltjes in de atmosfeer, uitgedrukt in volume). Momenteel bedraagt het  $\text{CO}_2$ -gehalte ongeveer 400 ppmV. Maar dit is niet altijd zo geweest. Tijdens de laatste ijstijd bedroeg dit gehalte slechts 180 ppmV en nog maar honderd jaar geleden 280 ppmV. De snelle stijging van de afgelopen honderd jaar wordt toegeschreven aan de uitstoot van  $\text{CO}_2$  die vrijkomt bij de verbranding van fossiele brandstoffen. Ook door het in brand steken van bossen en het droogleggen van moerassen, waarna oxidatie van veen plaatsvindt, komt  $\text{CO}_2$  vrij. Het huidige  $\text{CO}_2$ -gehalte is het hoogste van de afgelopen 650.000 jaar. Tijdens het zeer warme Eoceen (ongeveer 56 tot 34 miljoen jaar geleden) was het  $\text{CO}_2$ -gehalte nog veel hoger, wel 1.000 ppmV.

Naast koolstofdioxide bevindt koolstof zich in de atmosfeer ook in de vorm van methaan ( $\text{CH}_4$ ). De hoeveelheid methaan in de atmosfeer is veel kleiner dan de hoeveelheid koolstofdioxide. Het methaangehalte is slechts 1,75 ppmV, maar als broeikasgas is methaan wel tien keer zo sterk als koolstofdioxide.

Een veel groter reservoir van koolstof vormt het gesteente van de diepere aarde (de aardkorst en de mantel). Daarin is zo'n 99,8% van alle koolstof opgeslagen, bijvoorbeeld in de vorm van kalksteen, steenkool, aardolie en aardgas. Deze voorraden zijn voor langere tijd in de ondergrond vastgelegd. Een bijzonder vorm waarin koolstof is vastgelegd is **methaanhyaat**. Dit is een vaste ijs-achtige stof waarin methaan opgesloten zit in holtes binnen een kristalrooster van watermoleculen. In de **permafrost** (permanent bevroren bodems) en in sedimenten op de bodem van de zee in noordelijke streken bevinden zich grote hoeveelheden van dit methaanhyaat. Tot slot zijn in de hydrosfeer (het water) en de biosfeer (planten en dieren) – relatief kleine – hoeveelheden koolstof opgeslagen.

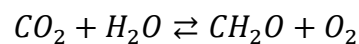


*Bron 5: Methaanhyaat is gas 'gevangen' in het kristalrooster van water. Dit komt alleen voor bij lage temperaturen en hoge druk. Deze situatie doet zich voor op de zeebodem en in permafrostgebieden.*

*Bron <http://archive.noc.ac.uk>*

Tussen de reservoirs vindt voortdurend uitwisseling van koolstof plaats. Deze stromen van koolstof worden **fluxen** genoemd. De meeste fluxen verlopen vrij traag, op tijdschalen van dagen tot miljoenen jaren. Net als in de kringloop van het water valt er in de koolstofkringloop een korte en een lange kringloop te onderscheiden.

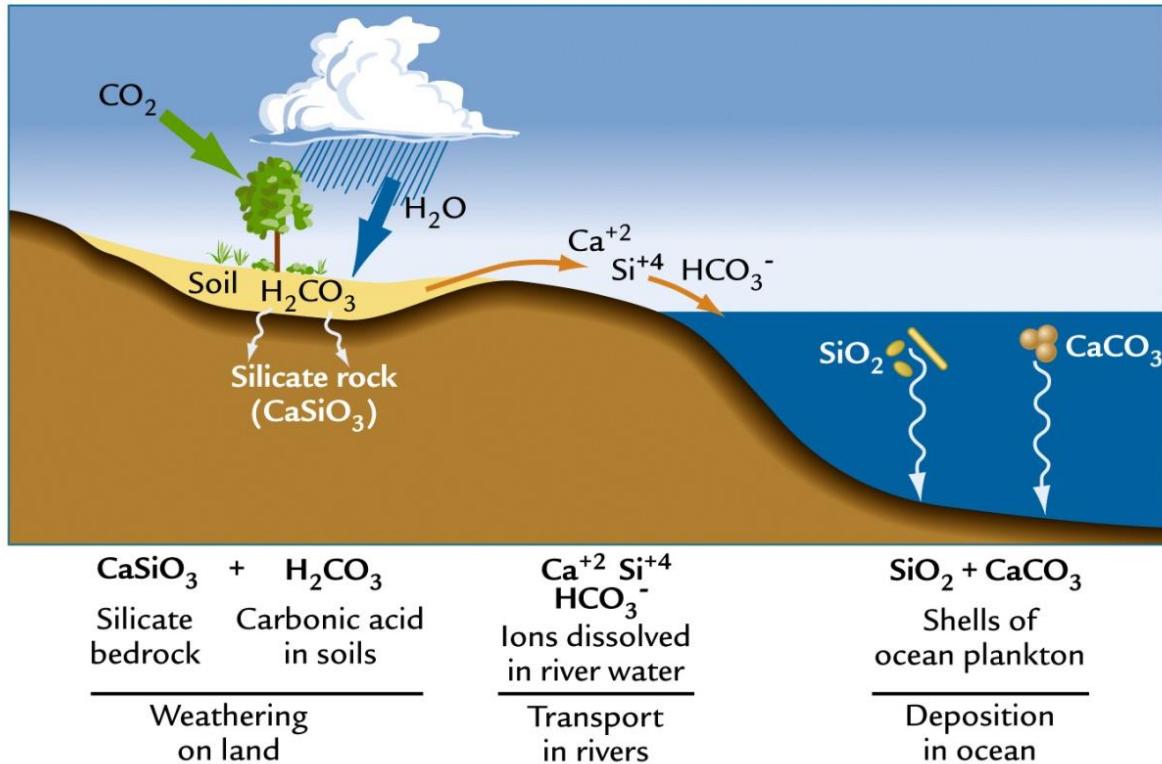
De korte kringloop bestaat uit de uitwisseling van koolstof tussen de atmosfeer, oceanen en biosfeer. Landplanten en plankton nemen tijdens fotosynthese  $\text{CO}_2$  op uit de atmosfeer en oceaan en zetten dit met behulp van zonlicht om in koolhydraten zoals glucose (zie bron 6). Bij het omgekeerde proces, de verbranding van organisch materiaal, komt energie vrij en ontstaat  $\text{CO}_2$  dat weer in de atmosfeer en oceaan terecht komt. In de korte koolstofkringloop wordt  $\text{CO}_2$  dus opgenomen door organismen en weer (in iets kleinere hoeveelheden) afgegeven aan de atmosfeer en oceaan. De uitwisseling van koolstof tussen de verschillende reservoirs van de korte koolstofkringloop gebeurt op tijdschalen van dagen tot tienduizenden jaren.



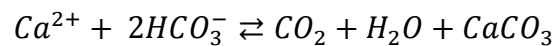
*Bron 6: De chemische evenwichtsreactie voor de vorming van organisch materiaal tijdens fotosynthese.*

De lange kringloop omvat de uitwisseling van koolstof tussen de atmosfeer en oceanen aan de ene kant, en het gesteente van de diepere aarde aan de andere kant. De processen van deze kringloop verlopen veel trager en spelen een rol op tijdschalen van miljoenen jaren. In de lange koolstofkringloop kan  $\text{CO}_2$  aan de atmosfeer worden onttrokken als dood organisch materiaal wordt afgesloten van de lucht en langzaam wordt omgezet in steenkool, aardolie of aardgas. Een andere manier waarop  $\text{CO}_2$  aan de atmosfeer kan worden onttrokken is door de chemische verwerking van gesteente (zie Bron 7). Koolstof komt via rivieren in de vorm van bicarbonaat ( $\text{HCO}_3^-$ ) terecht in de oceanen en wordt daar weer opgenomen door allerlei eencellige organismen. Deze organismen gebruiken opgeloste koolstof om een kalkskelet te maken van calcium carbonaat ( $\text{CaCO}_3$ , zie bron 8). Na het afsterven van de organismen hopen de skeletten zich op de oceaانبodem op en als deze op elkaar worden geperst ontstaat kalksteen.





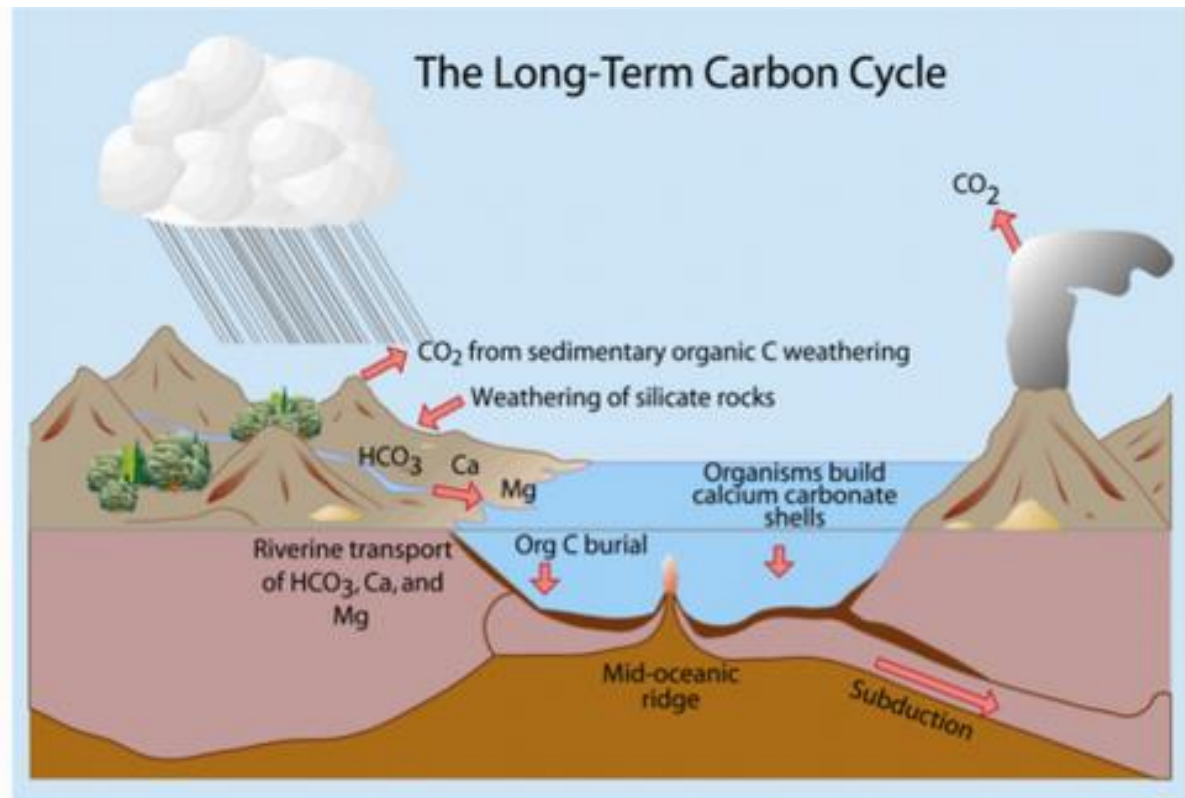
Bron 7: De chemische verwerking van gesteente neemt  $\text{CO}_2$  op uit de atmosfeer, wat uiteindelijk wordt vastgelegd in de skeletjes van kalkvormende organismen. Bron W.F. Ruddiman, *Earth's climate, past and future* (2001).



Bron 8: De chemische evenwichtsreactie voor de vorming van kalk (calcium carbonaat) in de oceaan.

In steenkool, aardolie, aardgas en kalksteen is koolstof voor miljoenen jaren vastgelegd. De koolstof komt pas weer terug in de atmosfeer als bijvoorbeeld aardgas of aardolie uit de ondergrond ontsnapt en aan het aardoppervlak komt. Of als kalksteen door convergerende platen tot bergen wordt opgeheven en er opnieuw verwerking plaatsvindt (denk hierbij aan de waarnemingen van Leonardo da Vinci). Koolstof dat is vastgelegd in kalksteen tijdens het Krijt en het Eoceen vinden we vandaag de dag bijvoorbeeld aan het oppervlak terug in Zuid-Limburg, Normandië of de (Krijt)rotsen in Dover. Een andere manier waarop koolstof weer vrij kan komen is als kalkhoudende gesteenten in aanraking komen met magma in het binnenste van de aarde en smelten, bijvoorbeeld bij subductie. Bij vulkaanuitbarstingen kan de koolstof dan weer als  $\text{CO}_2$  vrijkomen (zie Bron 9). Bij deze module hoort het filmpje: koolstoflang.mov. Dit filmpje geeft de lange koolstofkringloop goed weer.

Op tijdschalen van miljoenen jaren kan het CO<sub>2</sub>-gehalte in de atmosfeer – en dus de gemiddelde temperatuur op aarde – via de lange koolstofkringloop sterk beïnvloed worden. Het vastleggen van koolstof in steenkool, aardolie, aardgas en kalksteen gaat echter erg langzaam, dus de verhoging van het CO<sub>2</sub> gehalte in de atmosfeer van de afgelopen circa 150 jaar zal dan ook niet snel gebalanceerd worden door de lange koolstofkringloop.



Bron 9: de lange kringloop van koolstof waarbij door verweering koolstof wordt vrijgemaakt en in de vorm van kalksteen op de zeebodem wordt vastgelegd. Als de kalksteen in een subductiezone terecht komt, smelt het gesteente. Bij vulkanische uitbarstingen komt de koolstof weer vrij als CO<sub>2</sub>. Bron:

<https://qph.is.quoracdn.net>

## Opdrachten

### Opdracht 1

Maak een schematische weergave van de koolstofkringloop waarin je de diepere aarde, hydrosfeer, atmosfeer en biosfeer weergeeft en zowel de korte als de lange kringloop. Geef bij de verschillende sferen aan welk percentage van de totale hoeveelheid koolstof op aarde zich daarin bevindt.

### Opdracht 2

*Gebruik de bronnen 7 en 8.*

Sinds de industriële revolutie vindt veel uitstoot van CO<sub>2</sub> plaats. De verhoging van het CO<sub>2</sub>-gehalte van de atmosfeer leidt tot veranderingen in de koolstofkringloop. Beschrijf deze veranderingen.

### Opdracht 3

Beschrijf in stappen de wijze waarop koolstof (C) uit de atmosfeer kan worden vastgelegd in kalksteen op de zeebodem. Geef bij elke stap de chemische formule van de stof waarin koolstof zit.

### Opdracht 4

Het CO<sub>2</sub> –gehalte van de atmosfeer is in de loop van de geologische tijdschaal enkele keren abrupt gestegen.

- Beschrijf de wijze waarop dit de temperatuur op aarde beïnvloedde;
- Geef twee oorzaken voor abrupte stijgingen van het CO<sub>2</sub> –gehalte.

### Opdracht 5

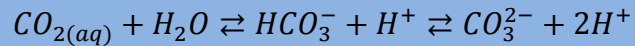
Bij vulkaanuitbarstingen komt behalve veel CO<sub>2</sub> ook veel as vrij in de atmosfeer. Op korte termijn (tot 2 à 4 jaar) hebben vulkaanuitbarstingen daardoor een heel ander effect op de temperatuur op aarde dan op langere termijn.

Geef aan

- wat het effect is op korte en wat het effect is op lange termijn;
- op welke wijze elk effect ontstaat.

## Het carbonaat evenwicht en de carbonaat-compensatie diepte

Het carbonaat evenwicht in de oceanen vormt een belangrijk onderdeel van de koolstofkringloop. Koolstof komt in de oceanen voor in drie verschillende opgeloste vormen:  $\text{CO}_2$ , bicarbonaat ( $\text{HCO}_3^-$ ) en het carbonaat ion ( $\text{CO}_3^{2-}$ ). Deze verschillende vormen van koolstof zijn aan elkaar verbonden in het carbonaat evenwicht:



*Bron 10: De chemische evenwichtsreactie van het carbonaat evenwicht.*

Het carbonaat evenwicht kan twee kanten op schuiven. Als de concentratie  $\text{CO}_2$  in de oceanen toeneemt als gevolg van hogere  $\text{CO}_2$  concentraties in de atmosfeer, verschuift het carbonaat evenwicht naar rechts en komen er waterstof ionen ( $\text{H}^+$ ) vrij. Hierdoor wordt het water van de oceanen zuurder. Aan de andere kant, als de concentratie  $\text{CO}_3^{2-}$  in de oceaan toeneemt als gevolg van de oplossing van kalk ( $\text{CaCO}_3$ ), verschuift het carbonaat evenwicht naar links en wordt er  $\text{H}^+$  opgenomen. Daardoor wordt het water van de oceanen minder zuur. In de natuur houden deze processen elkaar in evenwicht op tijdschalen van 5.000 tot 10.000 jaar.

Het carbonaat evenwicht kan echter worden verstoord als er in relatief korte tijd (duizenden tot tienduizenden jaren) grote hoeveelheden  $\text{CO}_2$  in de atmosfeer en oceanen vrijkomen. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren tijdens periodes met veel gigantische vulkaanuitbarstingen, of als opwarming van het klimaat ertoe leidt dat grote hoeveelheden methaanhyaat ineens instabiel worden. Tijdens zulke gebeurtenissen leidt de snelle toename van  $\text{CO}_2$  concentraties in de oceanen ertoe dat veel kalkskeletjes ( $\text{CaCO}_3$ ) op de zeebodem oplossen. Deze verstoring van het carbonaat evenwicht kan op langere termijn (honderdduizenden tot miljoenen jaren) weer gecompenseerd worden door de aanvoer van nieuwe  $\text{Ca}^{2+}$  en  $\text{HCO}_3^-$  ionen als gevolg van vertering op land. Vertering en het carbonaatevenwicht spelen dus een belangrijke rol in de lange koolstofkringloop.

Kalk ( $\text{CaCO}_3$ ) lost beter op diep in de oceaan, waar de druk hoog is en het water koud. De carbonaat-compensatie diepte (CCD) markeert de diepte waarop de snelheid waarmee kalk wordt gevormd precies gelijk is aan de snelheid waarmee kalk oplost. Beneden de CCD wordt alle kalk opgelost. In sediment dat boven de CCD ligt, kan wel kalk bewaard blijven. Kalk heeft net als sneeuw een witte kleur. En net als de sneeuwgrens op een berg, kan de CCD in de oceaan naar boven en naar beneden schuiven. Als de  $\text{CO}_2$  concentratie toeneemt en de oceanen zuurder worden, verschuift de CCD omhoog. Als de  $\text{CO}_3^{2-}$  concentratie in de oceanen toeneemt en de oceanen minder zuur worden, verschuift de CCD omlaag.

Momenteel ligt de CCD op ongeveer vier kilometer diepte. Omdat het grootste deel van de oceaانبodem minder dan vier kilometer diep is, zullen de kalkskeletten die op de bodem opgestapeld liggen, niet oplossen.

## Opdrachten

### Opdracht 6

Beschrijf wat het gevolg zal zijn van een plotseling sterke toename van het CO<sub>2</sub>-gehalte in de atmosfeer voor de CCD.

### Opdracht 7

Waarom kun je in de sedimenten op de oceaانبodem een periode met een heel hoog CO<sub>2</sub>-gehalte in de atmosfeer en oceaan herkennen?

Bekijk het volgende filmpje <https://www.youtube.com/watch?v=MOXqw7XyDqM>

### Opdracht 8

Het schip in het filmpje bevindt zich in de buurt van de plek waar de Titanic is gezonken. In het filmpje wordt gezegd dat het geen toeval is geweest dat de Titanic juist op die plek is gezonken.

Leg dit uit.

### Opdracht 9

Leg met behulp van het filmpje uit dat juist het sediment op de zeebodem zo geschikt is om het klimaat uit het verleden (het paleoklimaat) te onderzoeken.

### Opdracht 10

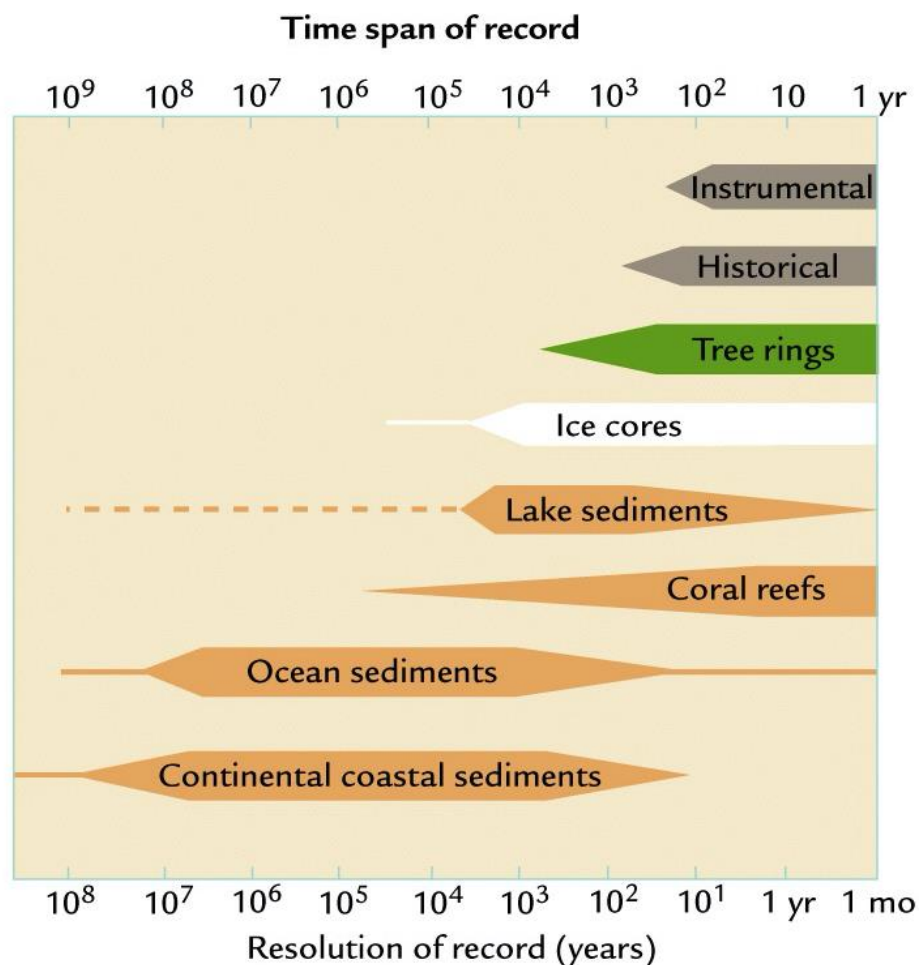
In het filmpje is een boorkern weergegeven waarin de Paleoceen-Eoceen overgang is te zien.

Geef aan

- op welke manier de Paleoceen-Eoceen overgang te zien is in de boorkern;
- wat je op basis van de boorkern kunt concluderen over de gebeurtenissen op de Paleoceen-Eoceen overgang.

### Hoofdstuk 3: De diepzee als klimaatarchief

In deze module zijn we op zoek naar situaties uit het geologische verleden die analoog zijn aan de huidige klimaatverandering. Paleoklimatologen kunnen daarbij geen gebruik maken van directe meetgegevens, die gaan slechts zo'n 150 jaar terug in de tijd. Om verder terug te gaan maken zij gebruik van **proxy's**, indirecte indicatoren van het klimaat in het verleden. Methodes die hierbij horen zijn bijvoorbeeld de analyse van boomringen (**dendrochronologie**) en de analyse van stuifmeelkorrels die bijvoorbeeld gevonden worden in veenlagen (**palynologie**). Niet iedere methode gaat even ver terug in de tijd. Met een analyse van boomringen (ook uit bomen die bijvoorbeeld zijn verwerkt in oude gebouwen) kan een indruk van het klimaat worden verkregen tot enkele duizenden jaren terug. Met behulp van ijskernen kan een reconstructie van het klimaat worden gemaakt die tot maximaal 1,5 miljoen jaar terug gaat. Analyse van diepzeesedimenten geeft een indruk van het klimaat tot nog veel verder terug. De diepzeesedimenten zijn daarmee één van de belangrijkste klimaatarchieven van de aarde (zie Bron 11).



Bron 11: Een overzicht van de verschillende klimaatarchieven en de tijdschalen waarop ze gebruikt kunnen worden om klimaatverandering te reconstrueren. Bron W.F. Ruddiman, *Earth's climate, past and future* (2001).



Op de bodem van de diepzee stapelen modder en restanten van organismen zich op. Daaronder bevinden zich veel schaaltsjes gemaakt van kalk. In de diepzee zijn de omstandigheden relatief stabiel. Stormen doen zich bijvoorbeeld vooral aan het oceaanooppervlak voor, maar zorgen in de diepzee voor weinig verstoring. In de diepzee heeft dan ook over een lange periode een continue accumulatie van sedimenten plaatsgevonden én er bevinden zich talloze fossiele schaaltsjes in. Als er een boring geplaatst wordt in de sedimentlagen kan aan de hand van de fossielen niet alleen een analyse gemaakt worden van het zeeleven ten tijde van de vorming van de betreffende sedimentlagen, maar ook van de temperatuur van het oceaانwater op dat moment én de samenstelling van de atmosfeer.



*Bron 12: kalksteen met fossiele foraminiferen. De foto is in werkelijkheid slechts 3,9 centimeter breed.  
Bron: J. St. John, 2014.*

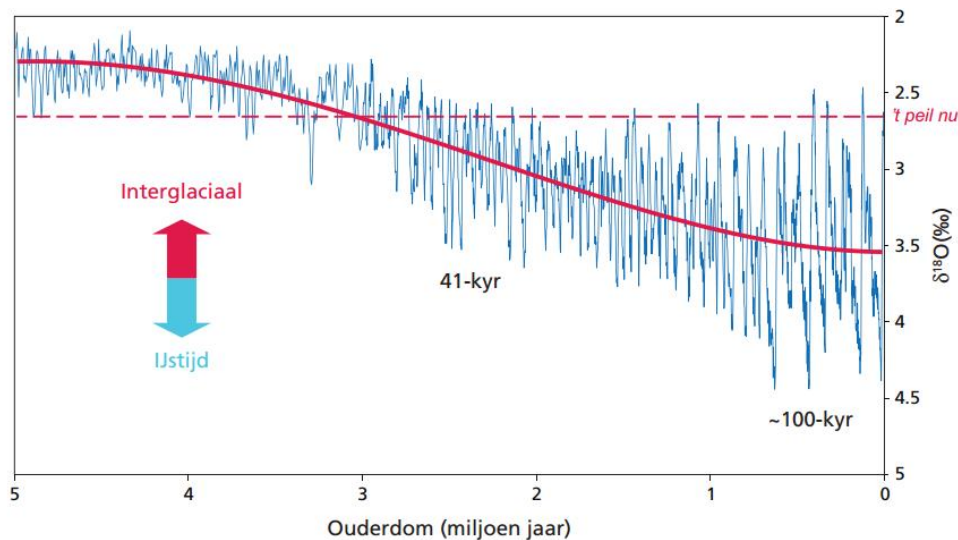
Belangrijke fossielen in het diepzeesediment zijn **foraminiferen**, kleine kalkhoudende organismen die schaaltsjes aanmaken. Foraminiferen nemen koolstof en zuurstof op uit de oceaan. Van zowel koolstof als zuurstof bestaan verschillende isotopen. Zo bestaat er  $^{16}\text{O}$  en  $^{18}\text{O}$ . De atoomkern van beide isotopen bevat een gelijk aantal protonen (8) maar het aantal neutronen verschilt (8 of 10). Het isotoop  $^{18}\text{O}$  bevat meer neutronen en heeft daardoor een wat grotere massa. Dit gegeven wordt gebruikt door paleoklimatologen. Zij kunnen de verhouding tussen  $^{18}\text{O}$  en  $^{16}\text{O}$ , ook wel uitgedrukt in de  **$\delta^{18}\text{O}$ -waarde**, meten die is vastgelegd in de schaaltsjes van de foraminiferen.

In koude periodes bevindt zich meer van het zware  $^{18}\text{O}$  in de schaaltsjes. Het lichtere  $^{16}\text{O}$  verdampt dan namelijk makkelijker uit zeewater. Ook regen en sneeuw bevatten daarom relatief veel  $^{16}\text{O}$ . De ijskappen die in zo'n koude periode worden gevormd bevatten hierdoor relatief veel  $^{16}\text{O}$ . Het zwaardere  $^{18}\text{O}$  blijft achter in de oceanen. De foraminiferen slaan hierdoor relatief veel  $^{18}\text{O}$  op in hun schaaltsjes. Dit wordt nog versterkt doordat foraminiferen in koud zeewater relatief weinig  $^{16}\text{O}$  inbouwen in hun

kalkskelet. Als de temperatuur van het zeewater toeneemt, wordt juist steeds meer  $^{16}\text{O}$  ingebouwd in het kalkskelet.

Het meten van de  $\delta^{18}\text{O}$ -waarde kan zo nauwkeurig plaatsvinden dat ook de oceaantemperatuur ten tijde van het vastleggen van de isotopen in de foraminiferen vrij nauwkeurig kan worden bepaald.

Veel soorten foraminiferen blijken zeer geschikt te zijn als gidsfossiel. Op die manier kan de temperatuurwaarde die met de  $\delta^{18}\text{O}$ -waarde bepaald wordt, gekoppeld worden aan de geologische tijdschaal.



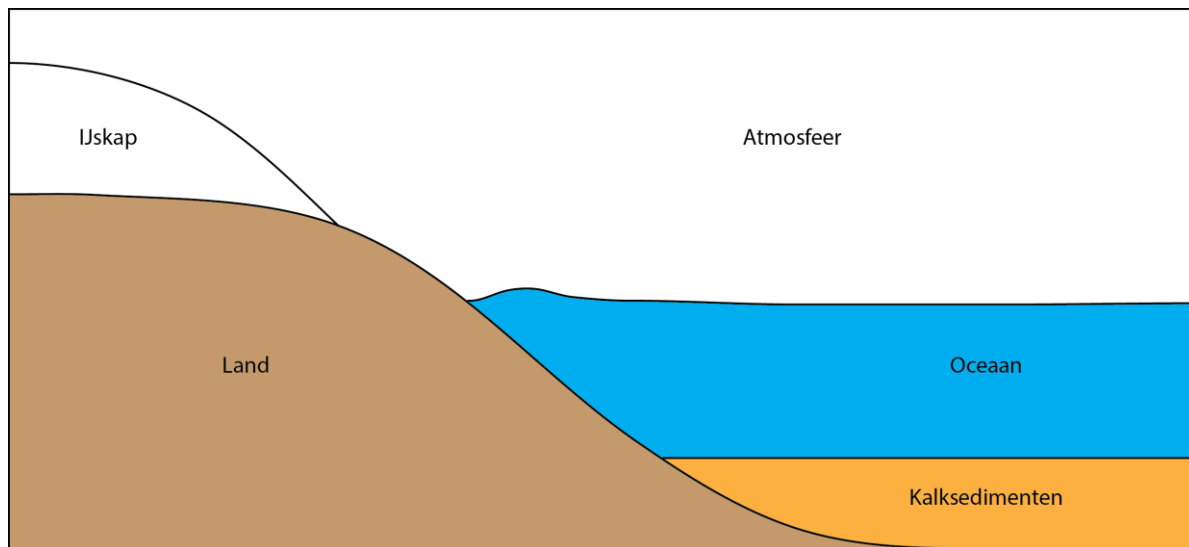
Bron 13: reconstructie van het verloop van  $\delta^{18}\text{O}$  in diepzeeboringen van de afgelopen 5 miljoen jaar.

De blauwe lijn geeft de gemeten verhouding met daarin de vele fluctuaties zoals de ijstijden en tussenijstijden van de laatste 2,6 miljoen jaar, de rode lijn geeft de trend. Bron Lisiecki en Raymo, 2005.

## Opdrachten

In de tekst van dit hoofdstuk heb je kunnen lezen dat de  $\delta^{18}\text{O}$  waarde een maat is voor de verhouding tussen de hoeveelheid  $^{18}\text{O}$  en  $^{16}\text{O}$ . Bij deze opdracht ga je de effecten van veranderingen in het klimaatsysteem op de  $\delta^{18}\text{O}$  waarde van water, ijs en sediment schematisch weergeven in een aantal tekeningen. De basis die je hiervoor kunt gebruiken is onderstaande, denkbeeldige, dwarsdoorsnede van de oceaan naar het land.

Bekijk hiervoor eerst het 5-minutendurende filmpje 'Hoe zout is de zee geweest?' van Tipping Point Ahead. Wat onderzoekt Esmee? En waarom?



### Opdracht 1

De  $\delta^{18}\text{O}$  waarde van zeewater is afhankelijk van de hoeveelheid ijs die is opgeslagen in ijskappen op het land. Geef schematisch in een tekening aan hoe de  $\delta^{18}\text{O}$  waarden van zeewater en ijs op het land samenhangen en hoe deze veranderen als ijskappen groeien of smelten.

### Opdracht 2

De  $\delta^{18}\text{O}$  waarde van zeewater wordt vastgelegd in kalkskeletjes in sedimenten. Geef schematisch in een tekening aan hoe de  $\delta^{18}\text{O}$  waarde van kalkskeletjes in sedimenten samenhangt met de  $\delta^{18}\text{O}$  waarde van zeewater.

### Opdracht 3

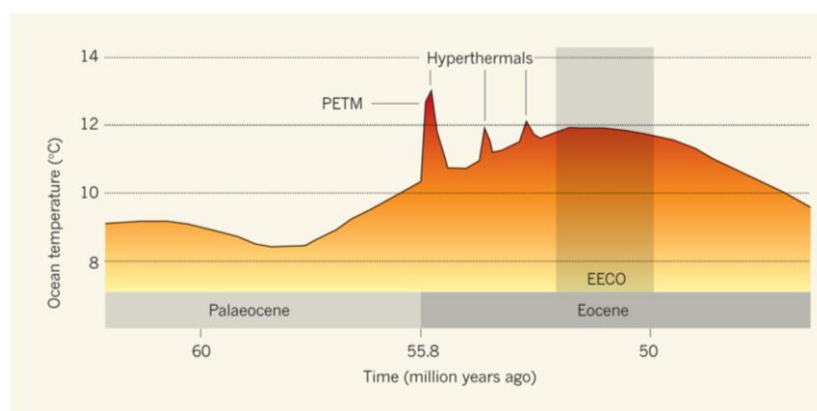
De  $\delta^{18}\text{O}$  waarde van kalkskeletjes in sedimenten is ook afhankelijk van de temperatuur van het zeewater waarin ze worden gevormd. Geef schematisch in een tekening aan hoe de  $\delta^{18}\text{O}$  waarde van kalkskeletjes in sedimenten verandert als de temperatuur van zeewater stijgt of daalt (onafhankelijk van de hoeveelheid ijs op land).

## Hoofdstuk 4: Klimaatverandering in het verleden

In de loop van de geologische tijdschaal hebben er op tal van momenten grote klimaatveranderingen plaatsgevonden. De grenzen tussen de geologische periodes worden vrijwel allemaal gekenmerkt door abrupte klimaatveranderingen en ook tijdens deze periodes was het klimaat lang niet altijd stabiel. In deze module zijn we op zoek naar veranderingen die bruikbaar zijn om mogelijke toekomstbeelden te schetsen voor de klimaatverandering zoals die de afgelopen 150 jaar plaatsvindt. Twee momenten lijken daarvoor bijzonder geschikt. Het eerste vond 56 miljoen jaar geleden plaats op de overgang van het Paleoceen naar het Eoceen. Er was toen sprake van een opwarming die zich op geologische tijdschaal zeer snel voltrok. Door nauwgezet onderzoek naar diepzeesedimenten is er relatief veel over deze tijdspanne bekend. Het tweede moment betreft de overgang van de laatste ijstijd naar het Holoceen, de periode waarin we ons momenteel bevinden. Dit is mogelijk een inspiratie geweest voor de makers van *The day after tomorrow*.

### Het Paleoceen-Eoceen Thermisch Maximum (PETM)

Het Paleoceen en het Eoceen waren zeer warme periodes in de geologische geschiedenis van de aarde. Gedurende deze warme periodes waren er enkele opvallende uitschieters. De grootste uitschieter vond 56 miljoen jaar geleden plaats op de overgang van het Paleoceen en het Eoceen en wordt het Paleoceen-Eoceen Thermisch Maximum genoemd, meestal afgekort als PETM. In enkele duizenden jaren steeg de – toch al hoge temperatuur – met nog eens 5 graden. Op de Noordpool bedroeg de jaargemiddelde temperatuur ongeveer 23 °C. Op Groenland lag geen ijs, maar groeiden palmbomen en leefden krokodillen. Rond de evenaar bedroeg de gemiddelde temperatuur ongeveer 37 °C, even warm als een jacuzzi! Het PETM duurde ongeveer 150.000 jaar. Een andere warme uitschieter uit het Eoceen is het Elmo-event, genoemd naar het Sesamstraatfiguurtje vanwege de rode kleur van de diepzeesedimenten.



Bron 14: Gemiddelde oceaantemperatuur tijdens het Paleoceen en het Eoceen. Naast het PETM vonden er nog enkele snelle en, op geologische tijdschaal, kortstondige temperatuurverhogingen plaats. Bron: Svensen (2012), *Nature*, 483.

Om te begrijpen wat er tijdens het PETM gebeurde, moeten we eerst weten wat de voorgeschiedenis was. De periode die vooraf ging aan het Paleoceen, het Krijt, was al warm. Ook het Paleoceen en het Eoceen waren zeer warme episodes in de geschiedenis van de aarde. Dat deze periodes zo warm waren wordt afgeleid uit de  $\delta^{18}\text{O}$ -waardes die gemeten zijn in kalkschaaltjes in de diepzeesedimenten.

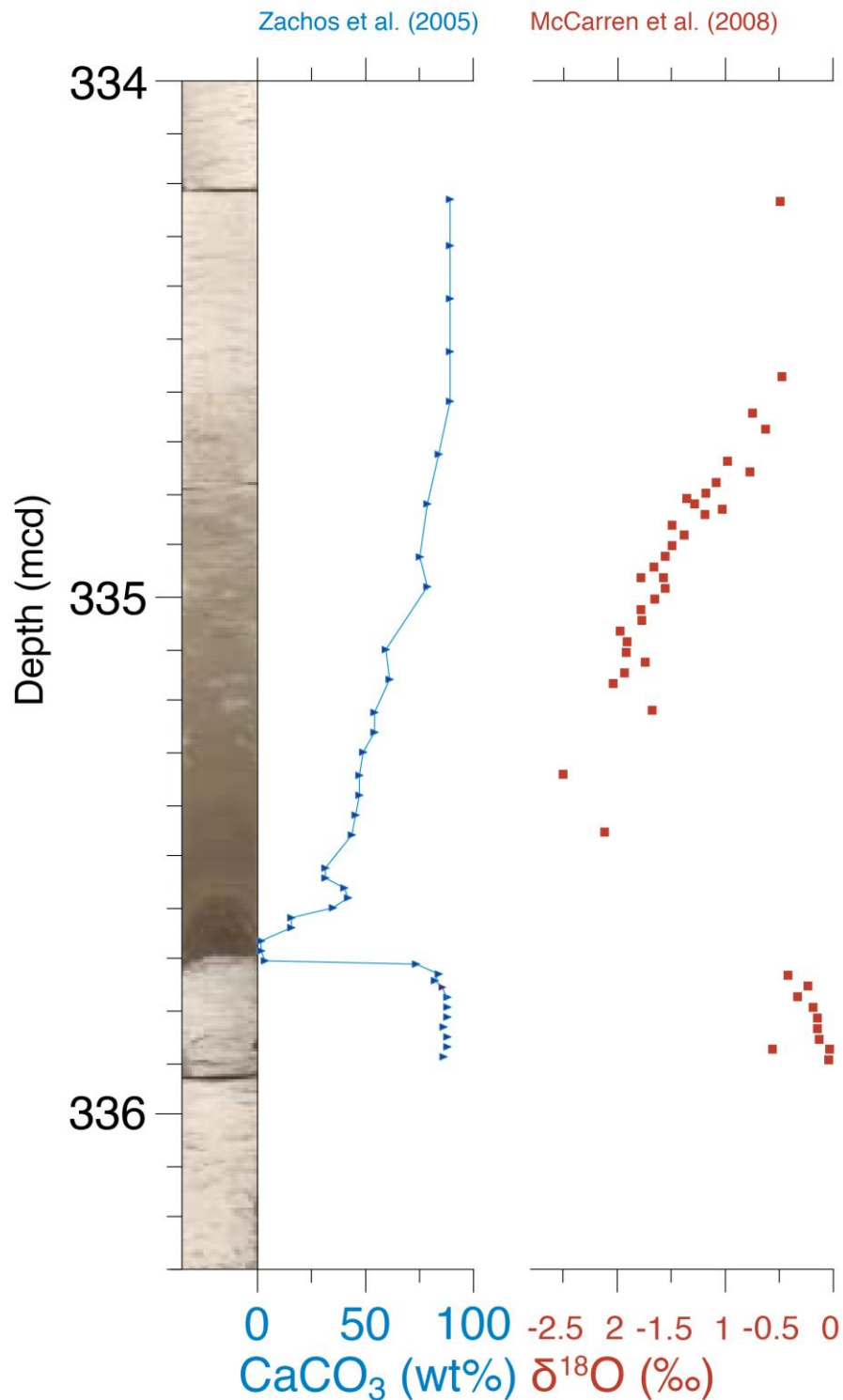
Op de grens van Krijt en Paleoceen vond de massa-extinctie plaats die het einde van de dinosauriërs, maar ook een groot deel van het mariene leven betekende. In het Paleoceen volgde het herstel en ontwikkelden zich allerlei soorten zoogdieren en vogels die de rollen van de dinosauriërs in de diverse ecosystemen gingen overnemen. Het  $\text{CO}_2$ -gehalte van de atmosfeer was gedurende het Paleoceen en het Eoceen hoog, meer dan 1000 ppmV en dit ging gepaard met hoge temperaturen. Er waren geen ijskappen en de zeespiegel stond vele tientallen meters hoger dan tegenwoordig. De diepzeesedimenten die in deze perioden zijn gevormd bestaan voornamelijk uit kleine kalkskeletten van micro-organismen en daarnaast een beetje klei, aangevoerd door wind en rivieren. In de diepzeesedimenten die gevormd zijn tijdens het PETM (ongeveer 56 miljoen jaar geleden) is dit anders, bijvoorbeeld op de Walvis Rug, een onderzeese bergketen in de Atlantische Oceaan.

Deze PETM sedimenten bestaan alleen uit klei en er bevinden zich vrijwel geen kalkskeletten in. Dit moet het gevolg zijn geweest van zeer hoge  $\text{CO}_2$  – gehalten (tot wel drie maal hoger dan in het Paleoceen). Deze hoge  $\text{CO}_2$  – gehalten leidden tot verzuring van de oceanen en het omhoog schuiven van de CCD. Kalkskeletten losten op in het zure oceaankwater en de diversiteit van verschillende groepen organismen, zoals foraminiferen, was sterk verminderd. Sommige andere soorten micro-organismen die alleen voorkomen bij hoge temperaturen gedijden juist goed tijdens het PETM. De resten van deze micro-organismen zijn gevonden in diepzeesedimenten in zeer noordelijke streken.

De oorzaak van de sterke  $\text{CO}_2$  toename moet zeer waarschijnlijk gezocht worden in het plotseling vrijkomen van grote hoeveelheden methaanhyaat op de zeebodem. Dit kon gebeuren toen de temperatuur zo hoog werd dat het methaanhyaat instabiel werd en  $\text{CO}_2$  ontsnapte naar de atmosfeer. Er is daarbij een zeker kantelpunt of **tipping point** gepasseerd. Gezien de toch al hoge temperaturen in het Paleoceen, is het vrijkomen van grote hoeveelheden methaanhyaat de meest plausibele verklaring voor de toename van het  $\text{CO}_2$  gehalte tijdens het PETM. Echter, er zijn nog geen gegevens over  $\text{CH}_4$  concentraties tijdens het Paleoceen en Eoceen. Andere mogelijke oorzaken voor het PETM, zoals het optreden van grootschalig vulkanisme, zijn onwaarschijnlijk omdat ze pas op langere tijdschalen een rol spelen.

Na de  $\text{CO}_2$  stijging tijdens het PETM nam de verwerking van oude gesteenten toe en werd het carbonaat evenwicht van de oceaan langzaam hersteld. In jongere sedimentenlagen verschijnen na ongeveer 20.000 jaar weer de eerste kalkskeletjes van micro-organismen die in ondiepe zeeën voorkomen. Het totale herstel duurde nog veel langer, tot wel 150.000 jaar.

# Walvis Ridge Site 1263C/D



Bron 15: het kalkgehalte en  $\delta^{18}\text{O}$  in een boorkern op de Walvis Rug in het zuiden van de Atlantische Oceaan. Het PETM is duidelijk herkenbaar omdat uit die periode kalk ontbreekt. Tijdens het PETM zijn de oceanen verzuurd, waardoor de kalkskeletjes oplossen. Bron: Zachos et al., 2005 en McCarren et al., 2008.



## Opdrachten

### Opdracht 1

In diepzeesedimenten die dateren uit het PETM ontbreken kalkskeletten.  
Leg dit uit door gebruik te maken van het begrip CCD.

### Opdracht 2

Leg uit

- waarom het PETM vaak wordt gezien als de situatie uit het geologische verleden die het meest lijkt op de huidige klimaatverandering;
- op welke wijze de abrupte klimaatverandering in het PETM tot stand kwam;
- op welke manier hierbij sprake was van een *tipping point*.

### Opdracht 3

Geef een verschil tussen de situatie uit het PETM en de huidige klimaatverandering.

## Onderzoeksopdracht dinoflagellaten

Go – no go

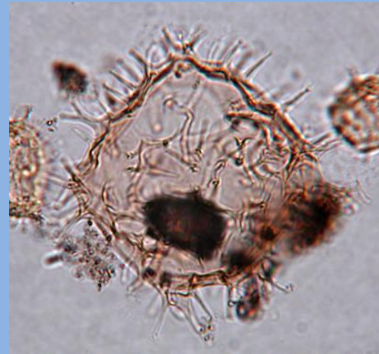
Bekijk ter voorbereiding van deze opdracht het 4-minutendurende filmpje 'Hoe warm wordt de zee?' van Tipping Point Ahead. Wat onderzoekt Margot? En waarom?

Bij deze opdracht hoort een Excel-spreadsheet met daarin data van een boorkern genomen ongeveer 100 kilometer ten zuiden van New York. Tijdens het PETM bevond zich daar een ondiepe zee waar dinoflagellaten leefden. Deze speciale algen maken een omhulsel van een soort bioplastic, dat heel goed bewaard blijft in sedimenten.

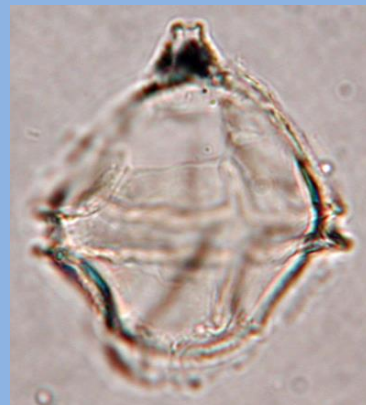
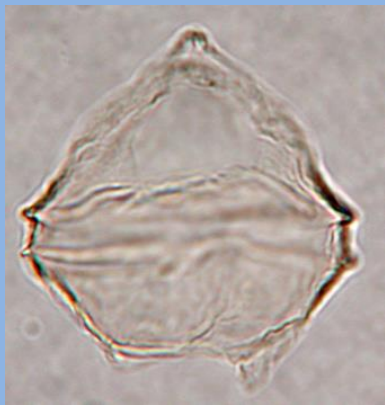
Uit de boorkern zijn op verschillende dieptes sedimentmonsters genomen. In die sedimentmonsters is de  $\delta^{18}\text{O}$  van foraminiferen gemeten (zie hoofdstuk 3). Tijdens het PETM waren er nog geen ijskappen, dus de variaties in  $\delta^{18}\text{O}$  in deze boorkern zijn een maat voor veranderingen in temperatuur. Ook is er in de sedimentmonsters geteld welke verschillende soorten dinoflagellaten er tijdens het PETM voor de kust van New York leefden. Er zijn meer monsters genomen voor het tellen van dinoflagellaten dan voor  $\delta^{18}\text{O}$ , daarom zijn er in het onderste deel van de boorkern geen  $\delta^{18}\text{O}$  data bij alle dieptes.

Net als organismen in ecosystemen op land, zijn dinoflagellaten in de oceaan aangepast aan een specifieke leefomgeving. *Apectodinium* was een tropische soort en was aangepast aan warm water. *Senegalinium* en *Phthanoperidinium* waren soorten die in zee leefden maar goed bestand waren tegen zoetwater dat bij riviermondingen de zee in stroomde. *Spiniferites* leefde ver van de kust in diepere delen van de zee, terwijl *Areoligera* dicht bij de kust leefde. Door te bepalen welke soorten op een bepaalde diepte in de boorkern voorkomen, kan een indruk worden verkregen van het leefmilieu in de tijd dat de algen leefden.

Zie hieronder foto's van de omhulsels van deze soorten; ze zijn kleiner dan 0,01 mm!



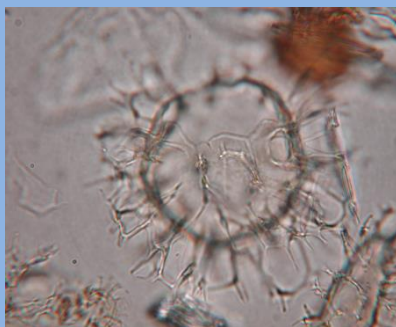
Twee foto's van ***Apectodinium*** (boven)



***Senegalinium*** (linksboven) en ***Phthanoperidium*** (rechtsboven)



Twee foto's van ***Spiniferites*** (boven)

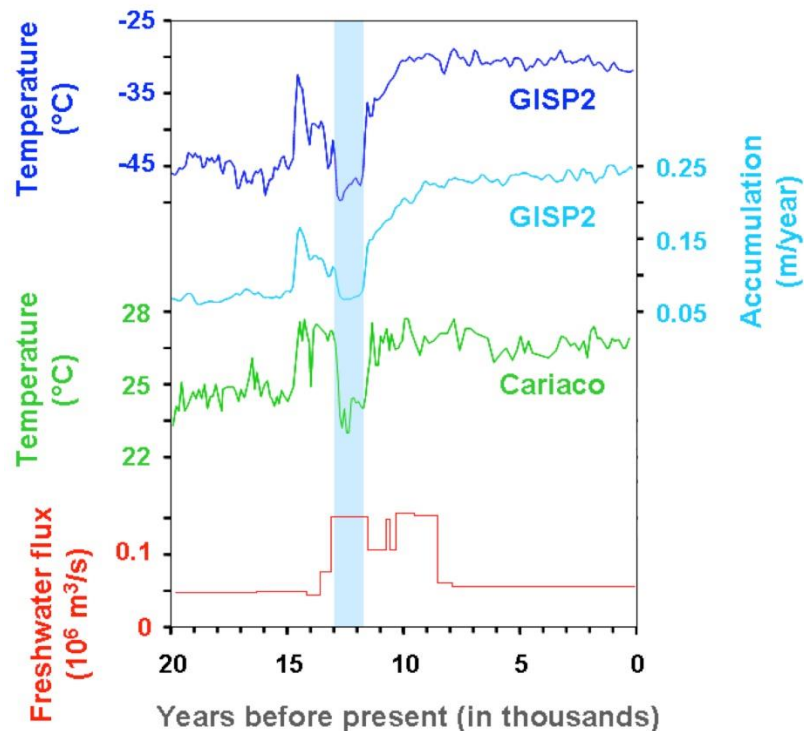


Twee foto's van ***Areoligera*** (boven)

- Maak in Excel een grafiek van  $\delta^{18}\text{O}$  uitgezet tegen de diepte in de boorkern.
- Op welke diepte bevindt zich de sterke opwarming aan het begin van het PETM? Bedenk hierbij: de diepere sedimentlagen zijn ouder, de ondiepere sedimentlagen zijn jonger.
- Maak nu naast de  $\delta^{18}\text{O}$  grafiek ook grafieken waarin de informatie van de verschillende soorten dinoflagellaten uitgezet is tegen diepte.
- Beschrijf welke conclusies je kunt trekken over het zeeniveau in het verleden op basis van de verhouding tussen *Spiniferites* en *Areoligera* in een sedimentmonster.
- Beschrijf wat er in de grafieken die je hebt gemaakt door de tijd heen gebeurt en maak hiermee een reconstructie van wat er in deze ondiepe zee gebeurde tijdens het PETM. (Wat gebeurt er bijvoorbeeld met de temperatuur en hoe reageren de algen hierop? Welke conclusies kun je verder trekken over zeeniveau en zoutgehalte tijdens het PETM?)

## Het jonge Dryas en de start van het Holocene

De tweede periode die in het bijzonder interessant is als analoog voor de huidige veranderingen in het klimaat is de overgang van de laatste ijstijd (het Weichselien) naar het Holocene. Op deze overgang traden grote temperatuurvariaties op in de loop van enkele duizenden jaren. Vooral de periode tussen 12.900 en 11.500 jaar geleden is bijzonder. Deze periode wordt het **Jonge Dryas** genoemd (*Dryas* is een toendraplantje waarvan in die periode veel resten zijn gevonden in boorkernen op land). Nadat de opwarming aan het einde van de ijstijd leek te zijn ingezet, daalde de temperatuur in het Jonge Dryas in korte tijd weer flink. Er volgde in de gebieden rondom de Noordelijke Atlantische Oceaan, nog eens 1.400 jaar ijstijd. Het Jonge Dryas was zelfs de koudste periode van de laatste ijstijd. 11.500 jaar geleden komt het Jonge Dryas zeer abrupt tot een einde. De temperaturen stegen toen in een razendsnel tempo tot waarden die veel lijken op de huidige waarden. Na deze opwarming is het klimaat opmerkelijk stabiel geweest in het Holocene. De opwarming aan het einde van het Jonge Dryas kan gezien worden als een mogelijk voorbeeld van wat er kan gebeuren als de temperatuur in relatief korte tijd sterk stijgt. Sindsdien heeft zich geen grotere opwarming meer voorgedaan. Alleen daarom al is het interessant om deze periode nader te onderzoeken.



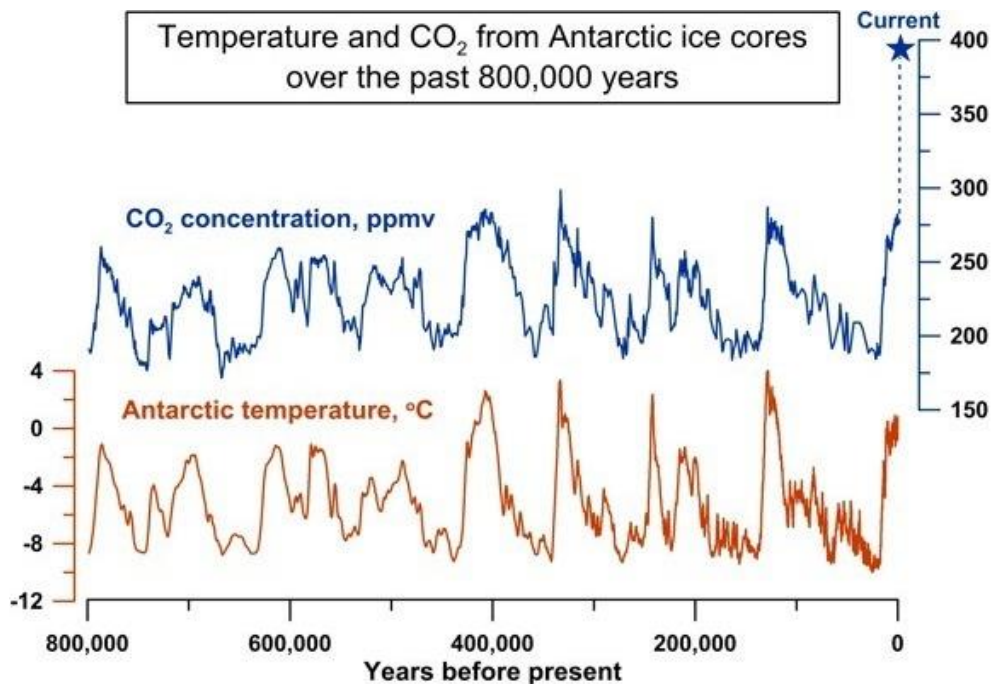
Bron 16: Veranderingen in de laatste twintig duizend jaar gemeten in Groenland (GISP2-ijskern – temperatuur en accumulatie van sneeuw) en Venezuela (Cariaco). De zoetwaterstroom is die aan de rand van de ijskap die Noord-Amerika bedekte in het Weichselien. De lichtblauwe band markeert de periode die het Jonge Dryas wordt genoemd. Bron: <http://www.ncdc.noaa.gov/>

Om de veranderingen in het Jonge Dryas goed te begrijpen moeten we wat meer weten van de voorgeschiedenis. Sinds het warme Paleoceen en Eoceen is de gemiddelde temperatuur op aarde gedaald. De koolstofkringloop deed haar werk: het CO<sub>2</sub> – gehalte in de atmosfeer nam langzaam af doordat koolstof werd opgenomen in de oceanen en werd vastgelegd in kalksteen, steenkool, aardolie en aardgas. Hier gingen miljoenen jaren overheen. Waar in het Paleoceen en het Eoceen een aantal continenten nog aan elkaar vastzaten, dreven ze daarna uit elkaar. Zo'n 38 miljoen jaar geleden kwam Antarctica geïsoleerd op de zuidpool te liggen. Dit was, in combinatie met dalende CO<sub>2</sub>-concentraties, het startsein voor de groei van de Antarctische ijskappen. Op het noordelijk halfrond kwamen de grote landmassa's van Eurazië en Noord-Amerika steeds dichterbij de noordpool te liggen. Zo'n 2,6 miljoen jaar geleden breekt het Pleistoceen aan, een periode van zo'n 50 ijsstijden waarvan het eerder genoemde Weichselien (voorlopig) de laatste is geweest.

Bij het ontstaan van de ijsstijden hebben de zogenaamde **Milankovitch-variabelen** waarschijnlijk een belangrijke rol gespeeld. De Milankovitch-variabelen beschrijven variaties in de vorm van de baan van de aarde rond de zon, de stand van de aardas en de tollende beweging die de aardas maakt (zie kader). Door het relatief lage CO<sub>2</sub> – gehalte en de verdeling van de continenten over het aardoppervlak kon in het Pleistoceen het samenvallen van de Milankovitch-variabelen een ijsstijd in gang zetten: ijs kon gaan accumuleren en over de landmassa's van Groenland,



Scandinavië en Canada naar het zuiden schuiven. Bij een andere stand van de Milankovitch-variabelen kon een ijstijd weer eindigen. Daarna brak een warme periode – een tussenijstijd of interglaciaal – aan. Het huidige Holoceen is zeer waarschijnlijk ook zo'n tussenijstijd.



Bron 17: reconstructie van temperatuur en CO<sub>2</sub> – gehalte in de afgelopen 800.000 jaar op basis van de Vostok-ijskern op Antarctica. De grafiek toont een duidelijk verband tussen temperatuur en CO<sub>2</sub> – gehalte. In de grafiek zijn verschillende ijstijden te herkennen die van elkaar gescheiden worden door tussen-ijstijden. Ook binnen ijstijden fluctueerde de temperatuur flink. Bron: Jouzel et al, 2007 en Lüthi et al 2008 in nature.com en Jeremy D. Shakun et al, 2012.

## Opdrachten

### Opdracht 4

Gebruik de tekst op de volgende bladzijde.

Beschrijf de theorie waarmee Milankovitch het ontstaan van ijstijden verklaarde.

### Opdracht 5

Ook langer geleden dan het Pleistoceen moeten de variabelen die Milankovitch beschreef aanwezig zijn geweest.

Leg uit dat er toen toch geen ijstijden en tussenijstijden waren.



## De Milankovitch-variabelen

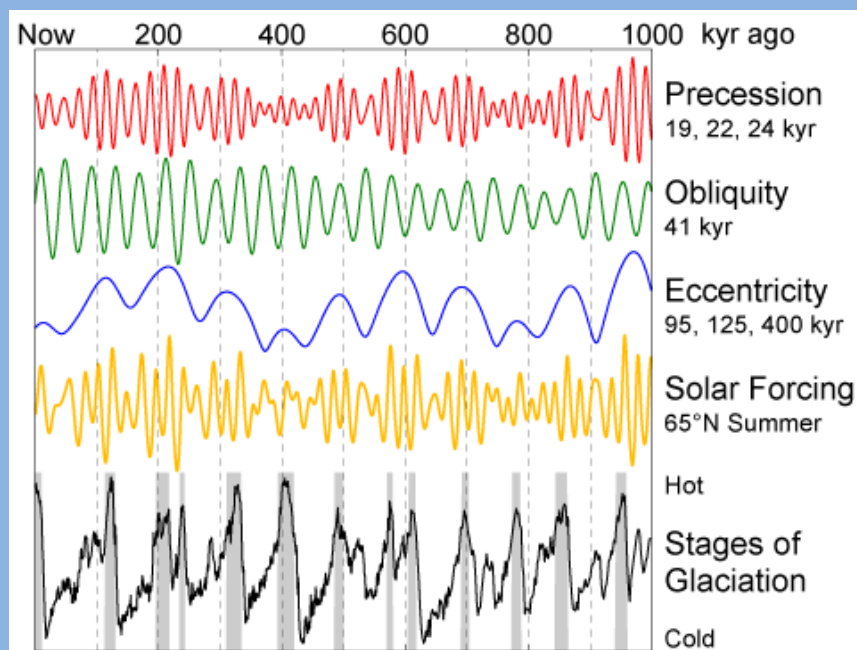
De Milankovitch-variabelen zijn drie astronomische periodieke veranderingen die bepalend zijn voor de hoeveelheid zonne-energie die de aarde ontvangt. Het komt er op neer dat als gevolg van zwaartekracht en interacties met andere planeten in het zonnestelsel de baan van de aarde niet altijd dezelfde vorm heeft en de aardas in de loop van de tijd 'schuift' en 'tolt'. De drie variabelen en belangrijkste periodes zijn:

- de vorm van de baan van de aarde rondom de zon verandert met een periode van 100.000 jaar (excentriciteit)
- de hoek die de aardas maakt met de denkbeeldige lijn van het middelpunt van de aarde naar de zon verandert met een periode van 41.000 jaar (obliquiteit)
- de aardas maakt een tollende beweging met een periode van 23.000 jaar (precessie)

Het filmpje in de volgende link geeft een uitgebreide uitleg over astronomische variabelen: <https://www.youtube.com/watch?v=82p-DYgGFjI>

De Milankovitch-variabelen kunnen er samen voor zorgen dat (een deel van) de aarde op sommige momenten minder en op andere momenten meer zonne-energie ontvangt. Op die momenten kan een ijstijd of juist een tussenijstijd *getriggerd* worden.

Onderstaande afbeelding laat zien dat als de variatie in de instraling als gevolg van de drie variabelen bij elkaar opgeteld wordt, er op sommige momenten grote variaties in zonne-straling ontstaan. Deze variaties zijn afgezet tegen de temperatuurfluctuaties in de ijstijden zoals die bekend zijn uit ijskernen en diepzeesedimenten.



Bron afbeelding: D. Legrand, 2006

Er zijn verschillende theorieën ontwikkeld om de temperatuurveranderingen in het Jonge Dryas te verklaren. Eén van deze theorieën gaat in op een verstoring van de oceaancirculatie (de **thermohaliene circulatie**). Aan het eind van het Weichselien smolten de ijskappen af en ten zuiden van de ijskap die Canada bedekte ontstond een enorm smeltwatermeer. De huidige Grote Meren zijn ter vergelijking slechts kleine overblijfselen van dat smeltwatermeer. De theorie stelt dat via de St. Lawrence-rivier het smeltwatermeer is leeggelopen in de noordelijke Atlantische Oceaan. De toevoeging van de grote hoeveelheid zoet water zou daar de thermohaliene circulatie verstoord hebben, waardoor de Golfstroom niet meer in staat was om warmte ver naar het noorden te voeren. Het gebied rondom de Noordelijke Atlantische Oceaan ondervond daardoor in slechts enkele jaren tijd een sterke afkoeling. In ijskernen op Antarctica is het Jonge Dryas niet gevonden als koude periode. Dit zou kunnen betekenen dat de circulatie zo wijzigde dat er meer warmte werd afgegeven op het zuidelijk halfrond, in plaats van op het noordelijk halfrond. In de hierboven genoemde theorie speelt weer een *tipping point*. De toevoer van smeltwater kan op een gegeven moment een kantelpunt gepasseerd zijn, waardoor de 'normale' oceaancirculatie werd verstoord.

Een andere theorie gaat uit van een meteorietinslag die de koude golf van het Jonge Dryas zou kunnen hebben veroorzaakt en weer een andere theorie stelt dat niet het leeglopen van een zoetwatermeer, maar een neerslagtoename (en een grote toename van het aantal ijsbergen) de thermohaliene circulatie deed haperen. Er zal nog veel meer onderzoek worden gedaan naar het Jonge Dryas.

Het einde van het Jonge Dryas en het begin van het Holoceen wordt gekenmerkt door een zeer snelle opwarming die in enkele stappen plaatsvond. Op Groenland steeg de gemiddelde jaartemperatuur in 50 jaar met ongeveer 7° C. Wellicht vond deze stijging plaats in een nog korter tijdsbestek. Ook van deze abrupte overgang is niet precies bekend hoe deze is verlopen. Het doorzetten van de opwarming gebeurde als gevolg van positieve terugkoppelingen. Een voorbeeld hiervan is de afname van de hoeveelheid ijs op aarde. Hierdoor vindt minder reflectie van zonnestraling plaats. De aarde neemt daardoor meer energie op, waardoor de opwarming weer verder wordt versterkt.

## Opdrachten

### Opdracht 6

Geef twee redenen waarom het einde van het Jonge Dryas zo'n interessante periode is om te onderzoeken wat de gevolgen kunnen zijn van klimaatverandering door de mens.

### Opdracht 7

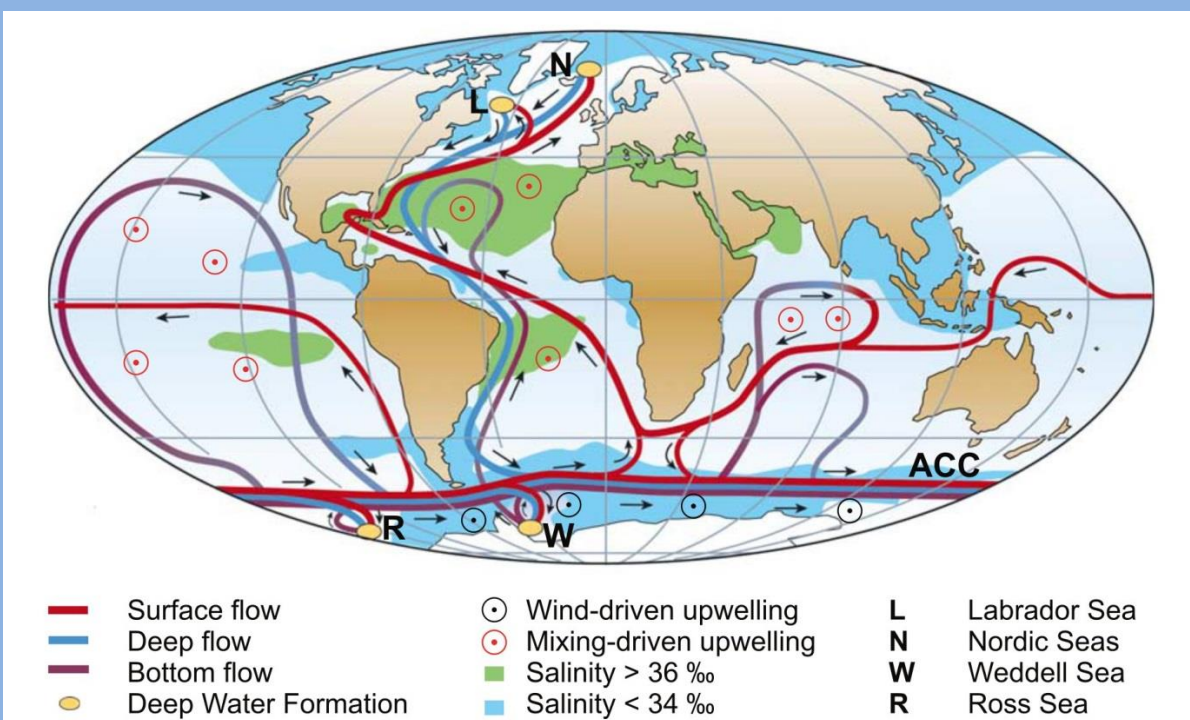
Gebruik bron 16.

Beredeneer het verband tussen temperatuur en zoetwaterstroom gedurende het Jonge Dryas.

## De thermohaliene circulatie

Het oceaanwater is voortdurend in beweging. Aan het oppervlak worden de stromingen vooral aangedreven door de wind, maar er is ook een grotere circulatie die wordt aangedreven door verschillen in dichtheid. Zout water heeft een grotere dichtheid dan zoet water en koud water heeft een grotere dichtheid dan warm water. In de Atlantische Oceaan stroomt warm water van de Golf van Mexico richting Noordwest-Europa als de Golfstroom. Deze warme zeestroom geeft in Noordwest-Europa veel warmte af. Tot voorbij de Noordkaap is de zee in zomer en winter ijsvrij. Onderweg naar het noorden heeft veel verdamping plaatsgevonden. Het water is zouter, kouder én dus ook zwaarder geworden. In de buurt van IJsland zakt het water af naar de oceaانبodem om op grote diepte richting het zuidelijk halfrond te stromen. Er zijn een aantal afzinkgebieden, zoals die in de buurt van IJsland bekend. De thermohaliene circulatie heeft grote invloed op het klimaat op aarde.

Zie ook het filmpje via de volgende link: <http://www.schooltv.nl/video/de-oceanische-circulatie-hoe-stromen-de-zeeen-op-aarde/>



Bron afbeelding: A. Cimadoribus, Kuhlbrodt et al.

## Opdrachten

### Opdracht 8

Bekijk het volgende filmpje <https://www.youtube.com/watch?v=6dMHjTa7IR4>  
Maak een oorzaak-gevolg keten waarin je in stappen weergeeft hoe de opwarming aan het einde van de laatste ijstijd mogelijk heeft kunnen leiden tot het koude Jonge Dryas.

### Opdracht 9

Leg met behulp van het voorbeeld van het Jonge Dryas uit dat klimaatverandering in West-Europa op een tijdschaal van enkele honderden tot duizenden jaren sterk kan afwijken van de wereldwijde klimaatverandering.

### Opdracht 10

Beredeneer welk voorbeeld jij het meest toepasbaar vindt om verwachtingen op te stellen voor de huidige klimaatverandering. Het voorbeeld van het PETM of dat van het Jonge Dryas?

## Hoofdstuk 5: De eindopdracht

De eindopdracht van deze module luidt als volgt:

Maak een korte documentaire over klimaatveranderingen in het verleden en wat deze ons kunnen vertellen over de huidige klimaatverandering. Maak in je documentaire gebruik van wat je in deze module hebt geleerd.

Een goede documentaire maak je natuurlijk niet zo maar. Daar komt heel wat bij kijken. Allereerst moet je je natuurlijk goed verdiept hebben in het onderwerp. Als je deze module tot zover hebt doorgewerkt, weet je waarschijnlijk al heel wat van klimaatveranderingen in het verleden. Voor deze opdracht kun je nog meer bronnen raadplegen. Het is mogelijk om een vraag te stellen aan één van de onderzoekers die voor NESSC onderzoek doen naar de *tipping points* in het klimaatstelsel. Gebruik daarvoor [www.tippingpointahead.nl](http://www.tippingpointahead.nl)

Een goede documentaire heeft naast een goede inhoud ook een goede opbouw. Je moet dan ook niet zo maar beginnen met filmen, maar eerst een scenario schrijven. Dit scenario is zo'n belangrijk onderdeel in het maken van een documentaire dat je het samen met de eindopdracht moet inleveren.

Hieronder worden een aantal tips gegeven voor het schrijven van een scenario en het maken van een film.

- Stel vast welke doelgroep je voor ogen hebt. Dit bepaalt in belangrijke mate ook de toon van de film (serieus, grappig, emotioneel).
- Bedenk de manier waarop je de film wil laten vertellen. Is er een presentator/verteller, maak je gebruik van een voice-over, gebruik je (compilaties van) interviews of toon je alleen tekst in beeld.
- Maak een opbouw in je verhaal. Je hebt doorgaans een inleiding, een verdiepend middendeel en een meer beschouwend afsluitend deel nodig. Probeer daarbij zoveel mogelijk visueel te denken. Vraag jezelf steeds af hoe het er op een televisiescherm uit komt te zien. Je verhaal wint aan kracht als er bijvoorbeeld een duidelijke centrale boodschap in naar voren komt of als er meerdere verhaallijnen elkaar 'kruisen'.
- Zorg daarna voor een opbouw van de film. Een film bestaat uit meerdere scènes. Een scène is een stukje van een film dat op één plaats en op één moment plaatsvindt en in principe met één camera opgenomen kan worden. Een aantal scènes die samen een afgebakend deel van het verhaal vertellen vormen samen een sequentie.
- Bedenk waar en hoe je de scènes wil filmen. Je kunt locaties bezoeken, maar het is natuurlijk ook mogelijk om een deel van een film vanaf een computerscherm te maken. Filmen op de oceaanbodem behoort niet tot je mogelijkheden. Wees dus creatief in de keuze van je locaties.



- Je doet deze opdracht samen met twee of drie mede-leerlingen. Werk goed samen en benut elkaars sterke punten. Durf in het proces ook kritisch naar elkaar te zijn. Accepteer feedback op je eigen werk en geef het ook zo goed mogelijk onderbouwd aan de anderen. Dat levert vaak het beste eindresultaat op

## Beoordeling

Beoordelings model	Module:	Namen:					
Onderdeel	Te denken valt aan	score					
Het proces richting het eindproduct	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zijn de opdrachten gemaakt?</li> <li>▪ Is er geconcentreerd gewerkt?</li> <li>▪ Is er goed samengewerkt?</li> <li>▪ In welke mate kon de leerling de opdrachten zelfstandig uitvoeren?</li> </ul>	2	4	8	12	16	20
Go – no go opdrachten	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zijn de grafieken in de startopdracht goed gemaakt?</li> <li>▪ Zijn de gebeurtenissen in de startopdracht goed weergegeven?</li> <li>▪ Is de stamboom inhoudelijk goed?</li> <li>▪ Zijn de goede dwarsverbanden in de stamboom aangegeven?</li> <li>▪ Is de stamboom duidelijk en visueel aantrekkelijk weergegeven?</li> </ul>	2	4	8	12	16	20
Onderzoeks-opdracht	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Wat is de kwaliteit van de grafieken in Excel?</li> <li>▪ Zijn de conclusies juist?</li> </ul>	2	4	8	12	16	20
Eindproduct	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Is er een scenario opgesteld met scènes en sequenties?</li> <li>▪ Vertelt de documentaire een duidelijk verhaal met opbouw?</li> <li>▪ Is er voldoende research gedaan? (uit de modules en uit andere bronnen)</li> <li>▪ Is de documentaire inhoudelijk juist?</li> <li>▪ Sluit de documentaire aan bij de doelgroep?</li> <li>▪ Is de documentaire aansprekend?</li> </ul>	4	8	16	24	32	40
<b>TOTAALSCORE</b>							
Feedback beoordelaar	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪</li> <li>▪</li> </ul>						
Feedback peer-beoordelaar	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪</li> <li>▪</li> </ul>						
Leerpunten van de leerling zelf	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪</li> <li>▪</li> </ul>						

