



# 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, TPA & 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

Curriculum.....	5
De opdracht .....	6
De opbouw van de module .....	6
Startopdracht.....	7
Hoofdstuk 1: De geologische tijdschaal .....	8
Hoofdstuk 2: De koolstofkringloop en het broeikaseffect .....	16
Hoofdstuk 3: De diepzee als klimaatarchief .....	24
Hoofdstuk 4: klimaatverandering in het verleden .....	28
Hoofdstuk 5: de eindopdracht.....	40
Beoordeling.....	42

## 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>
	Koolstofkringloop	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reservoirs</li> <li>▪ Fluxen</li> <li>▪ Methaanhydraat</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
<b>go – no go: de startopdracht moet goedgekeurd worden door de docent</b>		
3 4	De geologische tijdschaal	Hoofdstuk 1 College over de geologische tijdschaal  ▶ Verwerkingsopdrachten + stamboomopdracht met Prezi
<b>go – no go: de stamboom moet goedgekeurd worden door de docent</b>		
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 + onderzoeksopdracht dinoflagellaten
<b>go – no go: de onderzoeksopdracht moet goedgekeurd worden door de docent</b>		
11 12 13 14	Eindopdracht	Scenario schrijven voor de documentaire Documentaire opnemen en bewerken.  ▶ Eindopdracht: documentaire + scenario
<b>Presentatie van de documentaires</b>		

## 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.

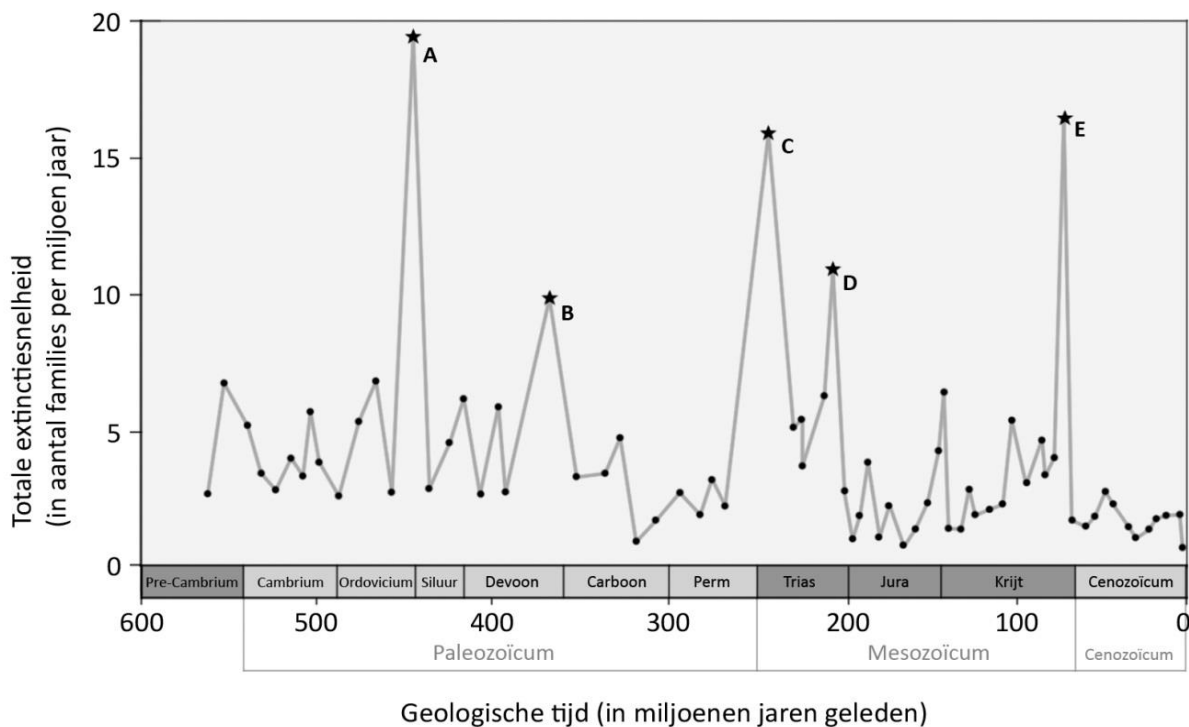
De koppeling van geologische tijdschaal, continentverschuiving en paleoklimaat vertelt samen een lang verhaal over de aarde. In het hele Mesozoïcum en het Paleogeen lagen de concentratie van CO<sub>2</sub> in de atmosfeer en de gemiddelde mondiale temperatuur ver boven de huidige waarden. Je zou die 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

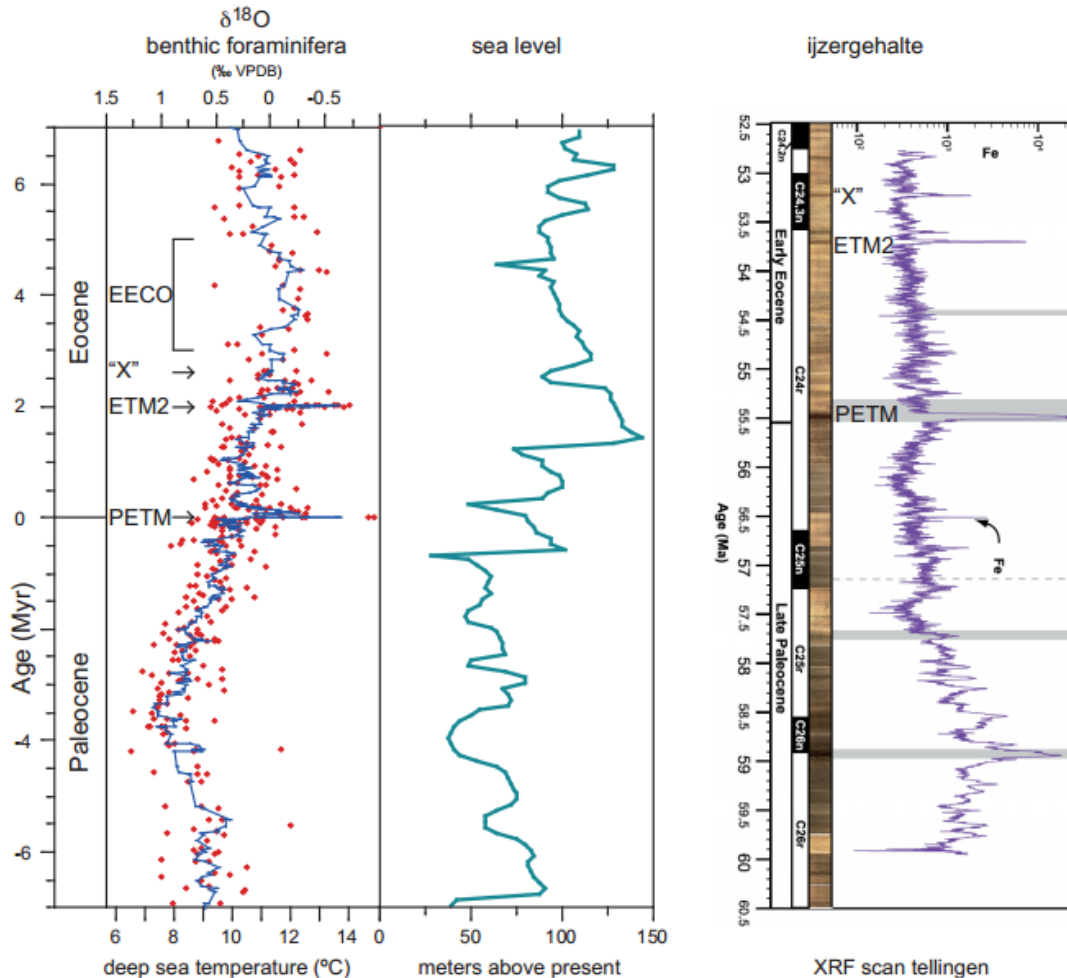
De laatste massa extinctie vond plaats aan het eind van het Krijt, zo'n 66 miljoen jaar geleden. Toen stierven bijvoorbeeld dinosauriërs en ammonieten (een bepaalde groep schelpdieren) plotseling uit.

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 linkerzijde 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.

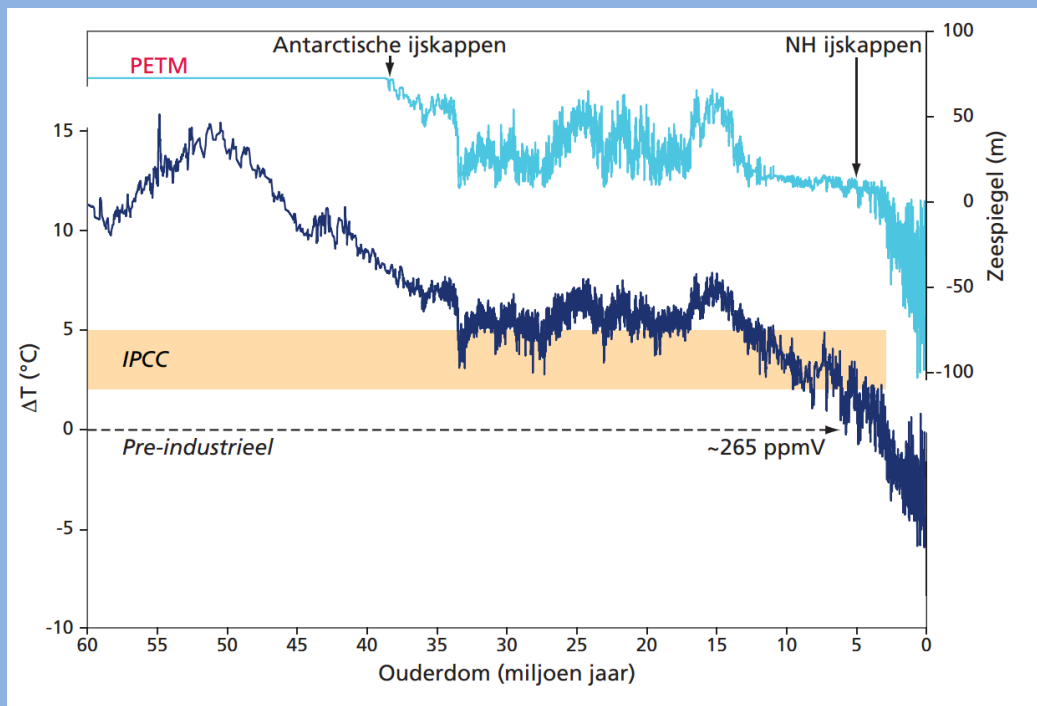
Je stamboom moet goedgekeurd zijn door je docent voordat je verder kunt werken in de module.

## 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.

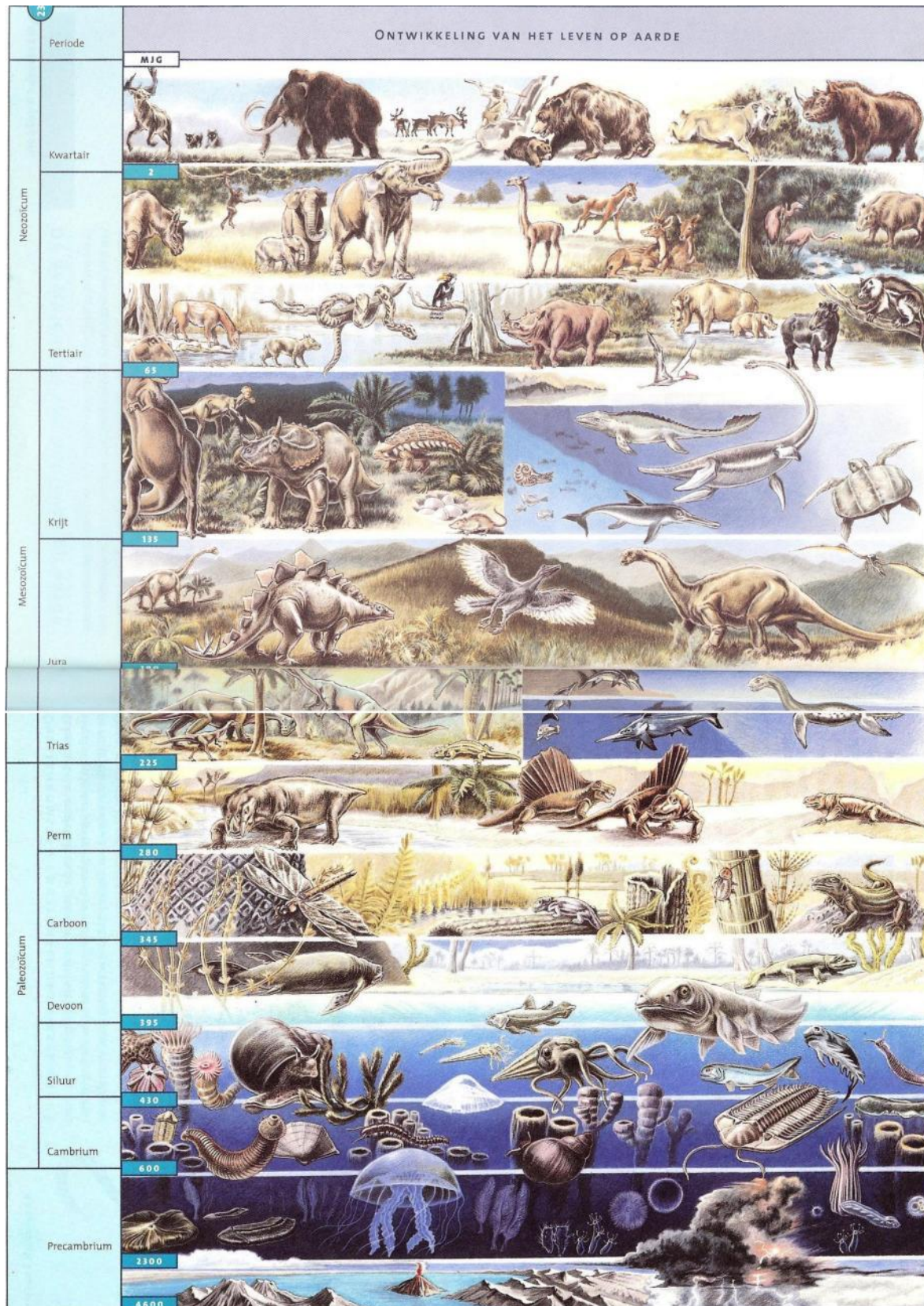
Op basis van deze grafiek zou je je kunnen afvragen waarom de huidige opwarming tot zorgen leidt. In het geologische verleden is de temperatuur immers vele malen hoger geweest dan nu. Dit was zeker het geval in de korte tijdspanne die wordt aangeduid als PETM (daarover lees je meer in hoofdstuk 4).

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





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>