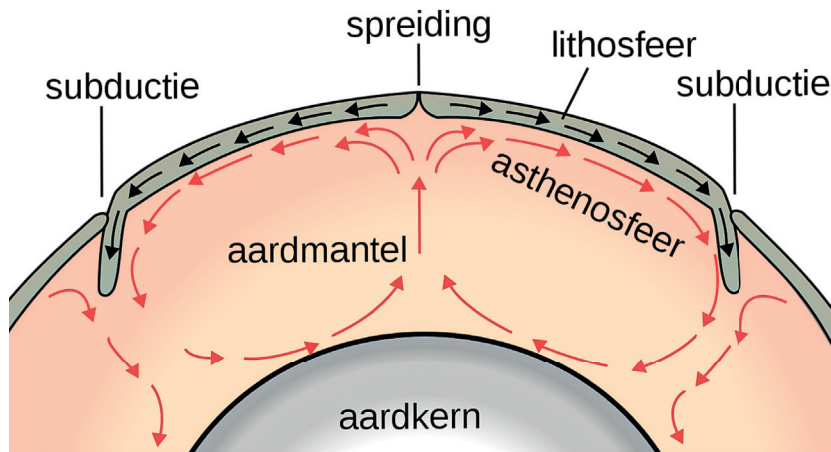


Plaattektoniek, een reis door de tijd

door Josje Kriest

redactie.kriest@gea-geologie.nl

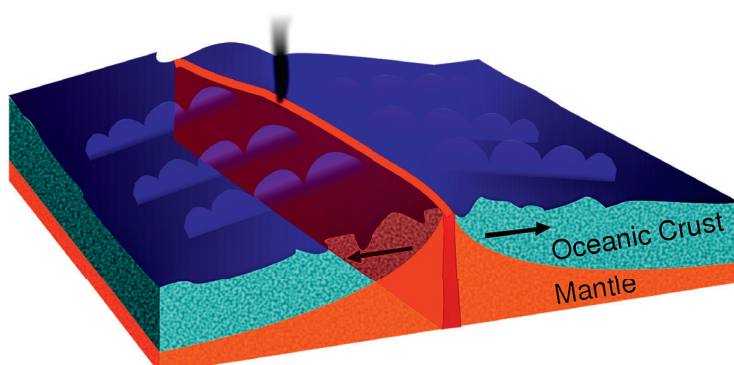


▲ Afb. 1. Convectiestromen in de mantel (asthenosfeer) nemen de lithosfeer (korst en bovenmantel) op sleeptouw. Waar de convectie omhoog is gericht ontstaat 'spreading' en de aanmaak van nieuw korstmateriaal. Waar de convectie omlaag is gericht, treedt subductie op: de lithosfeer duikt onder een ander deel van de lithosfeer. Bron: Woudloper via Wikimedia Commons CC BY-SA 3.0.

Plaattektoniek: u hebt er vast wel het nodige over gehoord of gelezen. Maar realiseert u zich ook wat dat geschuif van continenten over de aardbol allemaal teweeg heeft gebracht en hoe de Aarde er in de verschillende tijden uitzag? Na een korte inleiding over het mechanisme achter de bewegingen, neem ik u mee op een reis door de tijd.

Al lang geleden kwam het idee op dat continenten lijken te zijn verplaatst. Rond 1600 realiseerde men zich dat westelijk Afrika en oostelijk Zuid-Amerika qua kustlijn wel erg op elkaar lijken; zaten die twee ooit aan elkaar vast? Vondsten van gelijksoortige fossielen en gesteenten aan beide kanten van de Atlantische Oceaan versterkten dat idee. Maar hoe kon dat?

Halverwege de vorige eeuw begon men enig idee te krijgen over een mogelijk mechanisme: convectie (stroming) binnen de enigszins beweeglijke aardmantel die de aardkorst "op haar rug" meenam. En toen kwam begin



▲ Afb. 2. Model van een mid-oceanische rug. Bron: NASA.

zestiger jaren de ontdekking van 'magnetische anomalieën'; het aardmagnetisch veld leerde ons hoe alles in zijn werk ging. Hieronder volgt een korte uitleg. Een veel uitgebreider en vollediger verhaal is verschenen in Gea, juni 2000 (zie referenties).

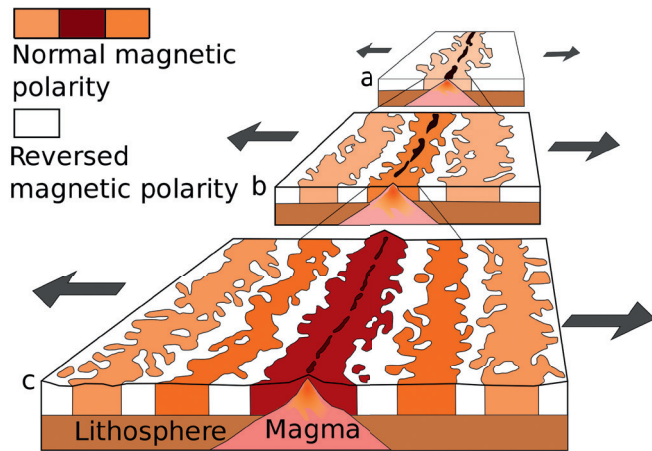
Wat de continenten beweegt

De Aarde bestaat uit een kern (waarvan de binnenkern vast en de buitenkern vloeibaar is), een plastische – maar niet echt vloeibare – mantel en een relatief dunne vaste aardkorst. Die aardkorst is 40-70 km dik, de mantel daaronder zo'n 2900 km. De Aarde produceert heel veel warmte, afkomstig van het ontstaan van de Aarde en van nog steeds voortdurend verval van radioactieve elementen in de mantel en kern. De warmte van de

kern wordt via de mantel naar het oppervlak afgevoerd. De hoge temperatuur zorgt ervoor dat de mantel plastisch kan vervormen, en dat veroorzaakt een stroming van vast gesteente van enkele cm per jaar. Die stroming richt zich naar boven. Vervolgens bereikt ze bijna het aardoppervlak en beweegt ze zijwaarts, waarna het mantelmateriaal iets afkoelt, en weer begint te dalen (afb. 1). De stroming evenwijdig aan het aardoppervlak neemt de bovenliggende aardkorst (plus de bovenste 40 km van de mantel, samen de 'lithosfeer') met zich mee, waardoor die schuift langs het oppervlak met een paar cm per jaar. Men spreekt van bewegende 'platen' van korst/lithosfeer en men noemt dit proces daarom plaattektoniek of platentektoniek.



▲ Afb. 3. Thingvellir Breuk, IJsland. Dit ravijn in IJsland vormt een deel van de Mid-Atlantic Ridge, de mid-oceanische rug in de Atlantische Oceaan. Bron: Laurent Deschodt via Wikimedia Commons. CC-BY-1.0.

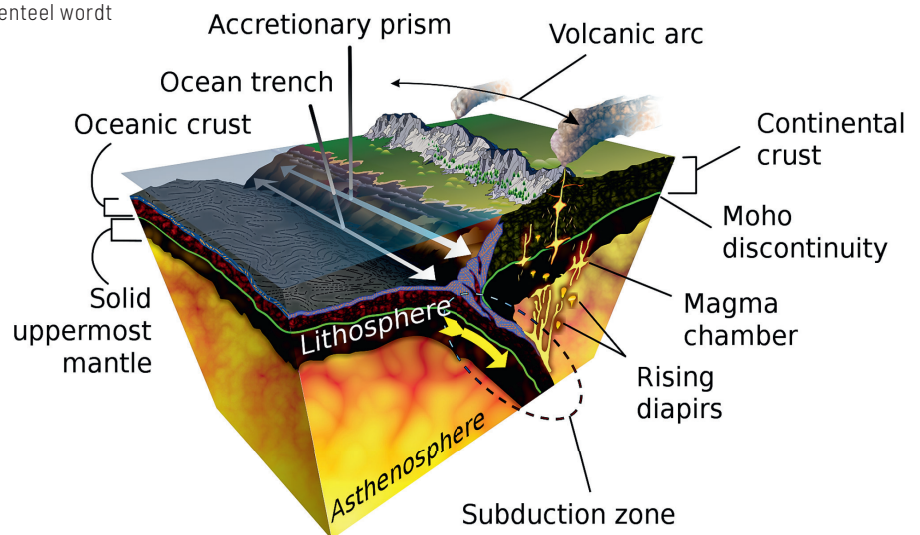


▲ Afb. 4. Model van de magnetische anomalieën in de oceanische korst. Voortdurend wordt nieuwe oceanische korst gevormd bij een mid-oceanische rug, en het dan heersende aardmagnetische veld wordt in de stollende gesteenten vastgelegd. Dat veld wisselt nu en dan van polariteit (noord-zuid - normaal - wordt zuid-noord - omgekeerd/reverse -). Als de korst opzij beweegt om plaats te maken voor nieuw te vormen korst ontstaat deze 'streping' van gesteenten met normaal en omgekeerd magnetisme. De korst is ouder naarmate ze verder van de rug af ligt. A. de korst van 5 miljoen jaar geleden. B. de korst van 2-3 miljoen jaar geleden. C. de korst die momenteel wordt aangemaakt. Bron: USGS/ publiek domein.

Mid-oceanische rug

Daar waar de mantelstroom het oppervlak bereikt, wordt de lithosfeer uit elkaar gedreven en ontstaat - door het stollen van het deels gesmolten mantelmateriaal - nieuwe (oceanische) korst. Men noemt deze gebieden mid-oceanische ruggen (afb. 2). Hoe verder weg van de rug, hoe ouder het gesteente van de aardkorst. Heel soms komt de mid-oceanische rug boven zeeniveau uit, zoals het geval is in IJsland. Het zijn meestal gebieden met veel vulkanisme, zoals IJsland, waar de Mid-Atlantische Rug zichtbaar is en een interessante toeristische attractie vormt (afb. 3). Al kan het bijbehorende vulkanisme het Europese vliegverkeer behoorlijk in de war sturen, zoals bleek in 2010.

Oceanische korst bestaat uit mantelmateriaal, en is daarom vooral rijk aan ijzer en magnesium (vooral basalt met bijv. het mineraal olivijn $(Mg,Fe)_2SiO_4$). Continentale korst heeft een andere samenstelling dan oceanische korst: het bevat meer silicium (kwarts). Tijdens het stollen van het mantelmateriaal richten de ijzerhoudende mineralen zich naar het dan heersende aardmagnetische veld. Dat veld verandert onregelmatig van polariteit (de magnetische noordpool wordt magnetische zuidpool en omgekeerd en valt min of meer samen met de geografische noord- of zuidpool), wat een precies instrument voor datering biedt. De omkeringen gebeuren om de paar honderdduizend jaren. Die veranderingen van het aardmagnetisch veld zijn o.a. te meten aan de gesteenten langs de mid-oceanische rug. Aan beide kanten van de rug zijn dezelfde patronen te zien van dit 'versteende' aardmagnetisme: 'magnetische anomalieën' (afb. 4). Het gesteente vlak bij de mid-oceanische rug vertoont het huidige magnetische veld, verder weg zijn dat de vroegere velden, soms noord/zuid, soms zuid/noord.



▲ Afb. 5. Subductiezone. De oceanische lithosfeer schuift onder continentale lithosfeer. In zee ontstaat een diepe trog (trench). Op land ontstaat vulkanisme, omdat de neerduikende lithosfeer warmer wordt en deels opsmelt, waarna de smelt naar het aardoppervlak stijgt. De Moho vormt de scheiding tussen mantel en korst, en die ligt binnen de 'lithosfeer'. Bron: K.D. Schroeder via Wikimedia Commons CC BY-SA 4.0.

Bij het maken van plaattektonische reconstructies worden verschillende soorten gegevens gebruikt, bijv.:

- Magnetische anomalieën langs mid-oceanische ruggen zijn heel belangrijk voor deze reconstructies, maar die zijn niet ouder dan de Jura-tijd, omdat oceanische korst van vóór die tijd allemaal praktisch verdwenen is door subductie.
- Aardmagnetisme, gemeten aan continentale stollingsgesteenten, kan aantonen dat gebieden - toen de daar aanwezige gesteenten gevormd werden - een andere locatie hadden dan tegenwoordig. Met name de breedtegraad (noordelijk/zuidelijk) kan bepaald worden.
- Een periode van gebergtevorming zegt iets over wanneer verschillende continenten in elkaars vaarwater kwamen te liggen.
- Als fossielen van thans veraf gelegen gebieden identiek zijn, betekent dat hoogstwaarschijnlijk dat die gebieden in een bepaalde tijd heel nabij waren, of grensden aan dezelfde oceaan.

- Een sterke verandering van sedimentatie kan wijzen op (plaat)tektonische activiteit.
- Heel specifieke gesteenten - eventueel met heel gelijksoortige plooiing - die in de korst van verschillende continenten gevonden worden, betekenen mogelijk dat die gebieden eens aan elkaar grensden. De groensteengordels van Suriname en West-Afrika zijn er een voorbeeld van (zie het artikel over het Bakhuisgebergte in Suriname, van Beunk en De Roever in Gea sept. 2020).

De huidige modellen zijn sinds de zestiger jaren van de vorige eeuw ontwikkeld door vele wetenschappers van zowel universiteiten als bedrijfsleven over de hele wereld. Zelf heb ik er ook jaren aan gewerkt, tijdens mijn werkzaamheden voor een grote oliemaatschappij. In grote lijnen zijn de getoonde reconstructies algemeen aanvaard, maar zeker de details van bepaalde complexe gebieden zullen nog veranderen naarmate er meer gegevens worden gevonden.

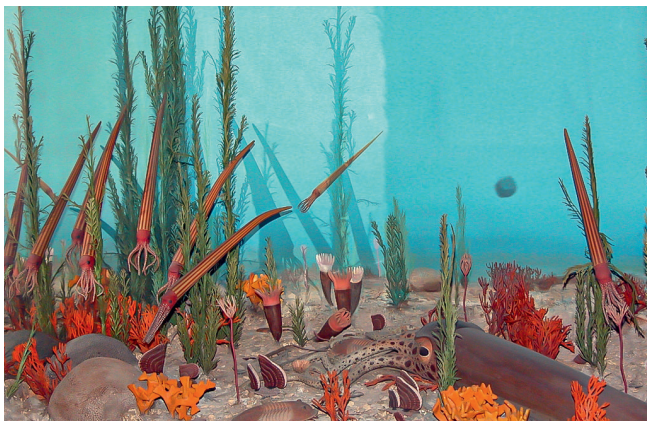


▲ Afb. 6. Stromatolieten in Shark Bay, West-Australië. De organismen die deze stromatolieten vormen, zijn familie van de algen die tijdens het Precambrium zorgden voor aanmaak van de voor leven heel noodzakelijke zuurstof in de atmosfeer. Foto A. Groenendijk.

Dit patroon leerde ons in de zestiger jaren van de 20^e eeuw dat er bij mid-oceanische ruggen nieuwe korst gevormd wordt en dat de korst zich naar beide zijden spreidt ('seafloor spreading'). Door die spreiding bewegen de oceanische platen en daar aan verbonden continentale platen over de aardbol, weg van de mid-oceanische ruggen. Zo bewegen bijv. Amerika en Europa/Afrika uit elkaar.

Subductiezones en gebergtevorming

Daar waar de mantelstroom – die langzaam afkoelt en daarom zwaarder wordt – daalt, wordt de lithosfeer mee naar beneden getrokken, onder andere delen van de lithosfeer. Dit noemt men subductie (afb. 1). In de oceaan ontstaan door deze neerwaartse beweging van de lithosfeer troggen: gebieden van grote diepte. Het bekendste voorbeeld is de 11 km diepe Marianentrog aan de westzijde van de Grote Oceaan. Subductie van de lithosfeer kan onder oceanische of continentale korst plaatsvinden (afb. 5). Bij een subductiezone begint de neerdalende lithosfeer, die een steeds hogere temperatuur tegenkomt, deels te smelten. Die smelt stijgt vervolgens weer op, richting aardoppervlak en dat is de reden dat er in dat soort gebieden vaak vulkanisme optreedt. De Andes, waar een oceanische plaat van de



▲ Afb. 7. Een diorama van het leven in zee tijdens het Ordoviciem. Fritz Geller-Grimm via Wikimedia Commons CC BY-SA 2.5.

Grote Oceaan onder het Zuid-Amerikaanse continent duikt, en waar veel vulkanisme optreedt, is daar een bekend voorbeeld van.

Daar waar verschillende continentale platen elkaar naderen (convergentie), volgt een botsing met als gevolg gebergtevorming. Het is een proces dat tientallen miljoenen jaren duurt.

Reis door de tijd

Door het verplaatsen van continenten over de aardbol en het ontstaan en verdwijnen van oceanen, is het uiterlijk van onze Aarde in de loop der tijden drastisch gewijzigd. Maar niet alleen het uiterlijk. Ook klimaat, zeestromingen en het leven zelf worden voortdurend beïnvloed door de veranderde ligging van continenten. Niets blijft hetzelfde! Hieronder volgt het verhaal van de Aarde, vanaf het Precambrium tot nu; een reis van een miljard jaar. De kaartjes tonen waar de verschillende continenten zich indertijd bevonden. Een prachtige animatie van de bewegingen van continenten over de aardbol, van professor Chris Scotese, een autoriteit op dit gebied, is te zien op www.youtube.com/watch?v=g_iEWvtKcuQ.

Precambrium

Het Precambrium is een erg lang tijdvak. Het loopt van het ontstaan van de Aarde, zo'n 4,5 miljard jaar geleden, tot het begin van het Cambrium rond 550 miljoen jaar (Ma) geleden.

Het is een tijd waarin aanvankelijk nog nauwelijks land te bespeuren viel. Wel oceanen, met heel sterke eb- en vloedbewegingen, omdat de Ma indertijd veel dichterbij de Aarde stond. De atmosfeer had een andere samenstelling dan nu, met veel minder zuurstof. Na verloop van tijd ontstond er hier en daar land, wat uiteindelijk aangroeide tot continenten. Leven was er vanaf zo'n 3,5 miljard jaar geleden, in zee. Heel primitief leven natuurlijk (eencelligen), dat geen echte fossielen naliet. Voor het leven op Aarde zijn met name de algenkolonies ('stromatolieten') heel belangrijk geweest. De algen maakten zuurstof aan, waardoor de atmosfeer veranderde en uiteindelijk 'leefbaar' zou worden. Nazaten van die zuurstofproducerende organismen, de cyanobacteriën, bestaan nog steeds, bijv. in Shark Bay, West-Australië (afb. 6).

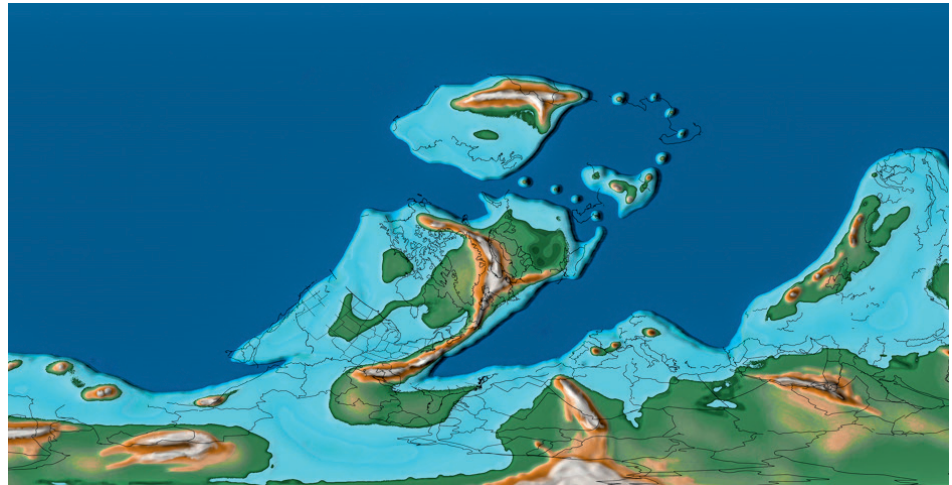
Cambrium-Ordoviciem (541-443 Ma)

Tijdens het Cambrium ontstonden er veel nieuwe levensvormen, die complexer waren dan voorheen: de 'Cambriëse explosie'. Dit nieuwe, meercellige leven bracht ook fossielen voort, waardoor we veel meer te



◀ Afb. 8. Een primitieve plant uit het Siluriem: Cooksonia. Bron: Matteo De Stefano/MUSE via Wikimedia Commons CC BY-SA 3.0.

► Afb. 9. De Aarde tijdens het Vroeg-Devoon (402 Ma). Donker blauw = oceaan; lichtblauw = continentaal plat (ondiepe 'zee'); groen = land; bruin = gebergte; wit = ijskappen, sneeuw; zwarte lijntjes geven de huidige kustlijnen en landgrenzen aan, ter herkenning. De reconstructie is gemaakt door Christopher Scotese. Er is een lange gebergteketen met sneeuw te zien, die is ontstaan door het botsen van Europa met Noord-Amerika: de Caledoniden. Europa en Noord-Amerika worden één continent: Laurussia. In het zuiden ligt het grote continent Gondwana. Bron en copyright: Chr. Scotese, Paleomap project (met toestemming).

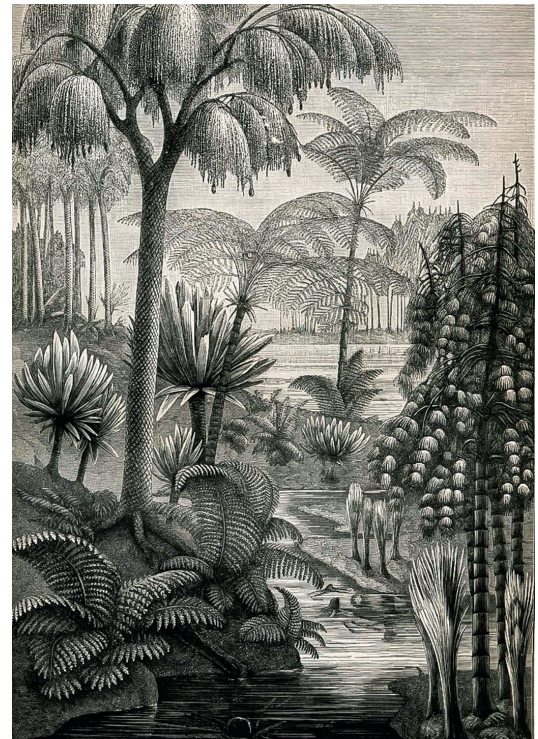


▲ Afb. 10. Eén van de resten van de Caledoniden: Mount Akka, gezien vanaf de hoogvlakte van Maukojaureh in Zweden. De berg in de verte, links, is Kisuris (1664 m). Foto: Tobias Radeskog. CC BY-SA 3.0.

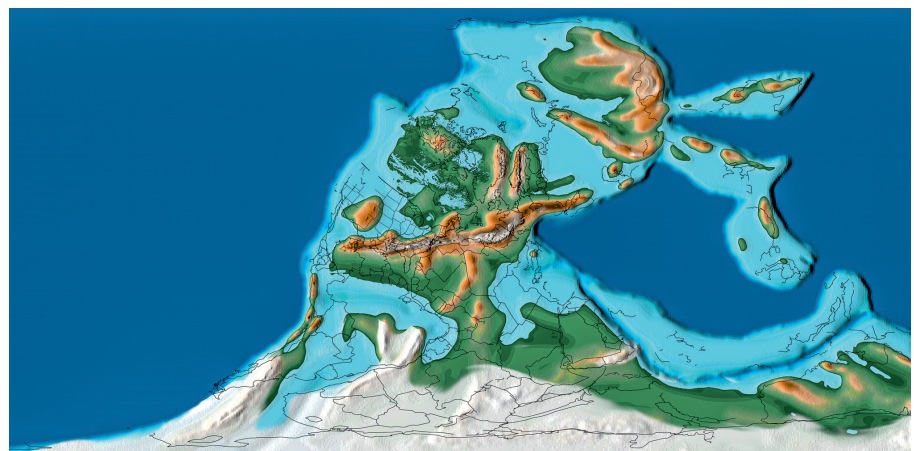
weten konden komen over het Leven. Dat bevond zich voorlopig nog alleen in zee (afb. 7), omdat bij gebrek aan ozon (zuurstof O_3) de gevaarlijke ultraviolette straling van de zon nog ongehinderd het aardoppervlak bereikte, wat landleven onmogelijk maakte. De continenten lagen vooral op het zuidelijk halfrond. Tijdens het Ordovicium begonnen de continentale kernen van Europa (het 'Baltische schild') en van Noord-Amerika ('Laurentia') elkaar te naderen.

Siluur-Devoon (443-359 Ma)

Tijdens het Siluur was de atmosfeer dermate verrijkt met zuurstof (en ozon in de hogere luchtlagen), dat leven op het land mogelijk werd (afb. 8). Het begon met planten, maar dierlijk leven volgde: insecten en geleedpotigen, zoals schorpioenen. Europa en Noord-Amerika botsten met elkaar, en een lange gebergterug ontstond: de Caledoniden (afb. 9). De Caledoniden vormden ongetwijfeld



▲ Afb. 11. Een typisch oerwoud uit het Carboon met veel varens en bomen met 'geschubde' boombast. Publiek domein.



▲ Afb. 12. De wereld tijdens het Laat-Carboon (306 Ma). Voor de legenda, zie afb. 9. De lange gebergteketen (de Hercyniden) is het resultaat van de botsing van delen van het zuidelijk gelegen grote continent Gondwana met Laurussia. Siberië botst met Europa en de Oeral wordt gevormd. Gondwana ligt grotendeels onder het ijs. Bron en copyright: Chr. Scotese, Paleomap project (met toestemming).



▲ Afb. 13. Gletsjerkrassen, ontstaan tijdens de grote ijstijden van het Carboon. Het gekraaste gesteente is zandsteen van de Table Mountain Group, Cambro-Ordovicium. De krassen zijn te zien bij Nieuwoudtville, Zuid-Afrika. Foto A. Groenendijk.

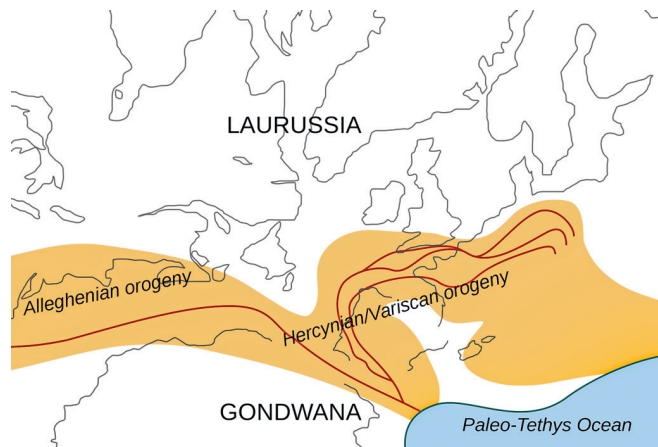
een gebergte zoals thans de Alpen of Himalaya, maar de miljoenen jaren van erosie hebben het bergland afgevlakt tot het huidige middelgebergte. Hiervan zijn tegenwoordig de Appalachen in Noord-Amerika nog zichtbaar. Ook het hooggelegen land van Scandinavië en Schotland is Caledonisch van oorsprong (afb. 10). Beide continenten gingen vanaf dit moment door als één continent: Laurussia.

'Nederland' bestond – waarschijnlijk – voornamelijk uit een ondiep zeegebied met enkele koraalriffen. Gesteenten uit deze tijd liggen in Nederland niet aan het oppervlak, in België overigens wel.

Carboon (359-299 Ma)

Het landleven was nu zeer rijk, met weelderige vegetatie, insecten en amfibieën. 'Nederland' lag bij de evenaar, ergens in de tropen, en was in het late Carboon bedekt met oerwoud (afb.11). De resten van deze vegetatie zijn thans nog te vinden als steenkolen in de ondergrond van Nederland. Ons aardgas komt trouwens ook uit die steenkool, dat in een groot deel van Nederland in de diepe ondergrond aanwezig is.

In deze periode lag het supercontinent Gondwana, bestaande uit o.a. Afrika, Zuid-Amerika, Antarctica, Australië en India, op de Zuidpool (afb. 12). Dit enorme landgebied boven op de geografische zuidpool, veroorzaakte daar een ijstijd. Dit komt, omdat warme equatoriale zeestromen



▲ Afb. 14. De Hercynische orogenese (gebergtevorming) in Europa, zoals te zien tijdens het Perm. De gekleurde gebieden zijn regio's waar Hercynische gesteenten en structuren aan het aardoppervlak te vinden zijn. Bron: Woudloper via Wikimedia Commons CC BY-SA 3.0.

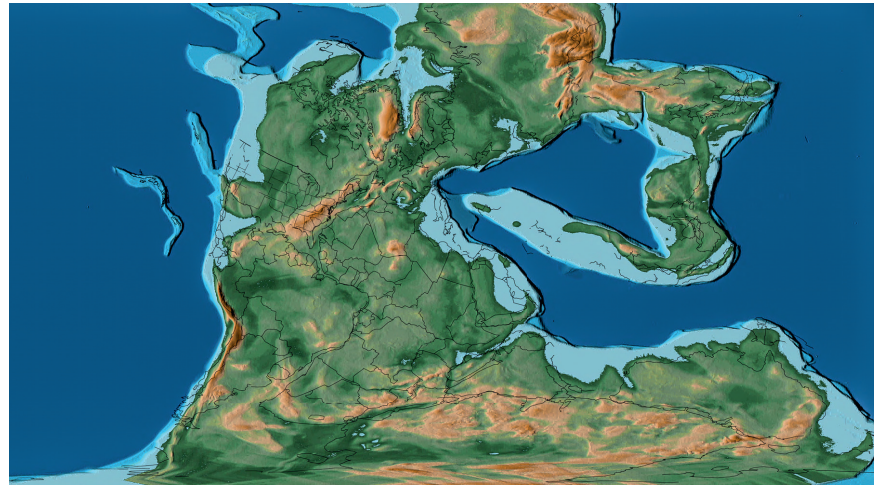


▲ Afb. 15. Een syncline (plooi) in Profondeville, Belgische Ardennen. De gesteentes bestaan uit Boven-Devonische zandstenen en kalken, die zijn geplooid tijdens de laatste fase van de Hercynische orogenese. Bron: Tim Bekaert via Wikimedia Commons CC BY-SA 3.0.

werden geblokkeerd door dat megacontinent, en omdat regen die op het gigantische continent viel, accumuleerde als sneeuw. Die witte massa ketste zonlicht terug en daarvoor werd de afkoeling versterkt. Een groot deel van o.a. Afrika was bedekt door ijskappen. Iets wat we weten, omdat er door gletsjers veroorzaakte krassen gevonden zijn in Afrika (afb. 13) en het Midden-Oosten. Gondwana bewoog langzaam naar het noorden. Echter, aan de noord-rand van Gondwana (ongeveer Noord-Afrika), ontstond rek in de aardkorst, wat leidde tot de opening van een smalle oceaan met een mid-oceanische rug. Die opening veroorzaakte een versnelling van de noordwaartse beweging van de noord-rand. Die delen schoven richting Laurussia en kwamen daar in botsing met dat grote continent. Het leverde een nieuwe fase van gebergtevorming op: de Hercynische orogenese (afb. 14), die in heel Europa haar sporen heeft achtergelaten. Het huidige middelgebergte van Harz, Ardennen (afb. 15), Bretagne, Massif Central en Galicië stamt uit die tijd. Het grote Gondwana volgde op afstand, en draaide daarbij enigszins met de klok mee. Ondertussen botsten ook Europa (deel van Laurussia) en Azië met elkaar, wat het Oeralgebergte opleverde, en beide continenten aan elkaar smeedde tot Eurazië.

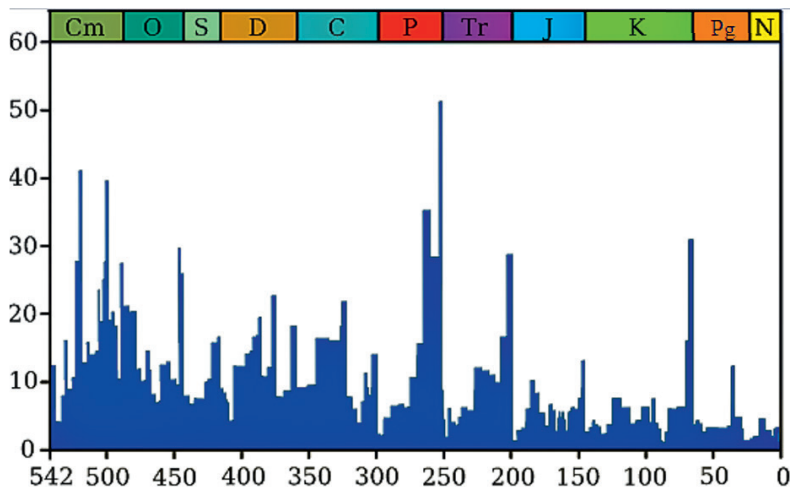
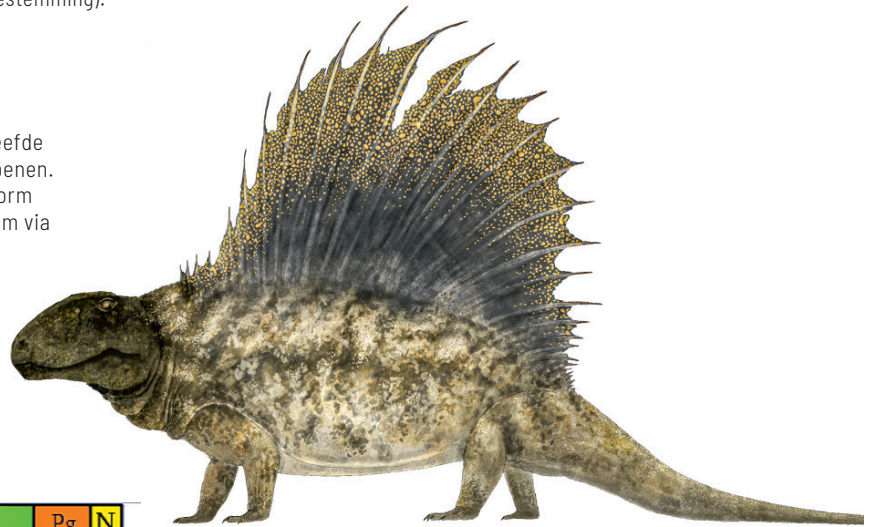


▲ Afb. 16. Pangea: het mega-continent dat alle grote continenten omvat. In het oosten ligt de Tethys Oceaan (Oceano Tetide). Via Wikimedia Commons CC BY-SA 3.0.



▲ Afb. 17. De Aarde tijdens het Laat-Perm (255 Ma). Voor de legenda, zie afb. 9. Europa en Azië gaan samen verder onder de naam Eurazië. Alle continenten zitten nu aan elkaar vast, terwijl aan de oostkant een grote binnen-oceaan ligt: Tethys. Bron en copyright: Chr. Scotese, Paleomap project (met toestemming).

► Afb. 18. Het reptiel *Dimetrodon* uit het Vroeg-Perm. Dit roofdier leefde in natte gebieden (wetlands), met afwisselend natte en droge seizoenen. Het zeil op de rug toont de karakteristieke pennen die in fossiele vorm gevonden zijn. Het dier werd 2-3 meter lang. Bron: PrehistoryByLiam via Wikimedia Commons CC BY-SA 4.0.



◄ Afb. 19. Grote uitstervingsgolven in de loop der tijden. De tijd loopt van links naar rechts (in miljoenen jaren) en de verticale as geeft het percentage van soorten dat verloren is gegaan. De grote uitstervingen op de grens van Perm en Trias (~250 Ma), en die van Krijt en Tertiair (~66 Ma) vallen meteen op. Wikimedia Commons CC BY-SA 3.0.

Perm (299-252 Ma)

Bijna alle continenten (Gondwana én Eurazië/Noord Amerika) zaten in deze periode aan elkaar vast, wat het megacontinent Pangea opleverde (afb. 16). De oceaan aan de oostkant van Pangea, wordt Tethys genoemd. Nederland lag in de subtropen (afb. 17) en was een woestijngebied. Het Groninger gas, afkomstig uit de onderliggende steenkool van het Carboon, bevindt zich in de poriën van de zandstenen die zijn afgezet in die woestijn. Het leven ontwikkelde zich steeds verder. Ook reptielen bevolkten nu het land, zij het 'kleintjes' (afb. 18).

Aan het eind van het Perm trad er in Siberië op heel grote schaal vulkanisme op. Er zijn basalten uitgevloeid over een gebied van meer dan 2.000.000 km². Het beïnvloedde de atmosfeer en daarmee het klimaat dermate, dat een groot deel van het leven op Aarde het niet overleefde. Het werd de grootste uitsterving tot nu toe (afb. 19): 95% van alle in zee levende soorten en ongeveer 70% van de gewervelde landdieren stierf uit bij de Perm/Trias-overgang. Zo stierven trilobieten volledig uit. Maar ook veel koraalvormende organismen (rugosa en tabulata) verdwenen.

Trias (252-201 Ma)

Tijdens het Trias herstelde het leven zich weer, al duurde het enkele miljoenen jaren en kwamen vele soorten niet meer terug. De eerste (kleine) zoogdieren en vliegende reptielen (pterosauriërs) bevolkten de wereld. Het klimaat op Aarde was warm en droog en wereldwijd werden er veel 'red bed' zandstenen en evaporieten (zouten) afgezet: de Buntsandstein.

In Nederland ontstond als gevolg van een doorbraak vanuit de Tethys Oceaan een ondiepe tropische zee, waarin de kalken van de Muschelkalk werden afgezet die bij Winterswijk aan het oppervlak te zien zijn.

Aan het eind van het Trias trad er (op sommige plaatsen) in Pangea 'rek' (tension) op, waardoor het continent langzamerhand uit elkaar getrokken werd en sommige lager gelegen gebieden liepen onder water, zoals tussen Europa en Noord-Amerika/Groenland.

Jura (201-145 Ma)

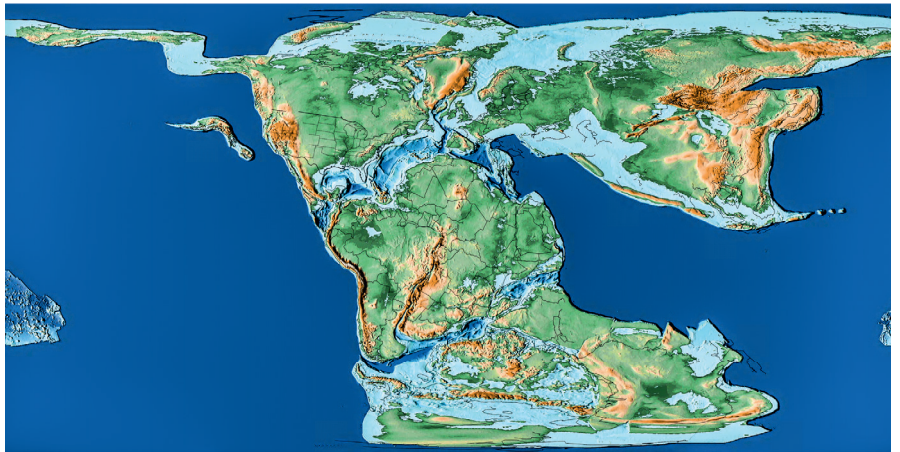
Pangea rekte steeds verder uit en begon tijdens de Jura op te breken (afb. 20). In de centrale Atlantische Oceaan ontstond de eerste 'moderne' oceanische korst (en mid-oceanische rug), die ons de oudste magnetische anomalieën heeft verschaft, waarmee we plaattektonische modellen hebben kunnen maken. Ook tussen Oost-Afrika en India/Antarctica begon rek te ontstaan, wat aanvankelijk leidde tot een binnenzee, maar al snel ook tot enige oceanische korst. In sommige binnenzeeën, waar stroming tot een halt kwam, ontstonden zuurstofarme of -loze gebieden. Het sediment dat daarin afgezet werd, bevatte organisch materiaal dat niet door bacteriën verteerd werd. Het leverde later de olie-moedergesteenten op van grote olie-regio's, zoals het Midden-Oosten en de Noordzee.

In Nederland ontstond door het opbreken van de noordelijke Atlantische Oceaan, ook enig vulkanisme: de Zuidwalvulkaan, ten zuiden van Vlieland. Deze vulkaan is tegenwoordig (alleen) in de ondergrond te zien op seismiek en in boringen.

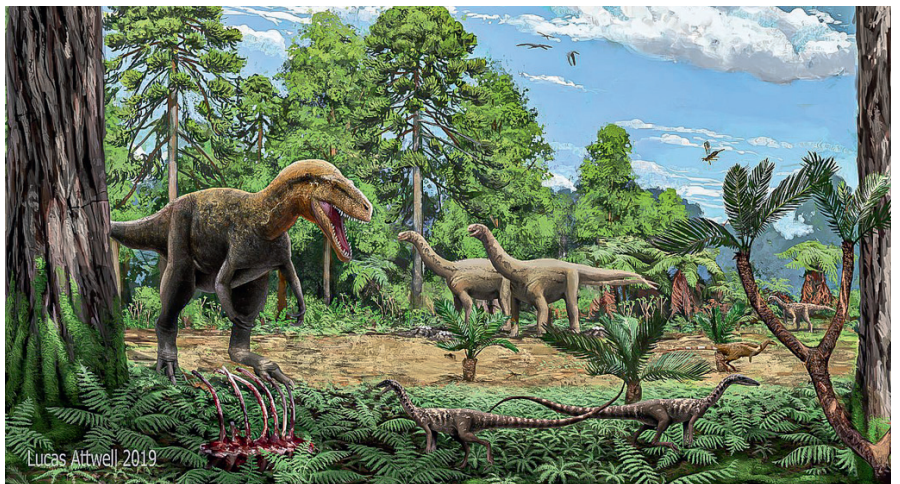
De vele zeeën en nieuwe oceanen zorgden voor een natter klimaat. In de vele ondiepe zeeën werden dikke pakketten fossielrijke kalk afgezet. Op het land werden de dinosauriërs de dominante groep (afb. 21).

Krijt (145-66 Ma)

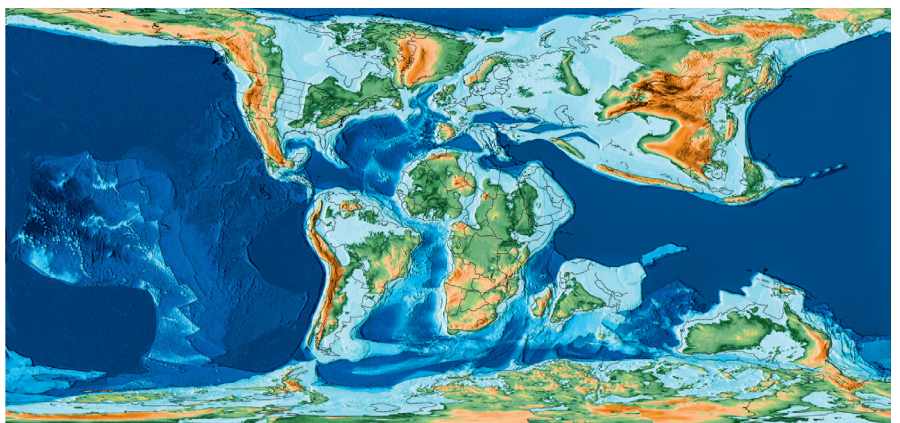
Het klimaat tijdens het Krijt was warm en er zijn nergens op Aarde tekenen gevonden van ijskappen; het lijkt een volkomen ijsvrije periode te zijn geweest. Het zeeniveau was hoog en grote delen van de continenten stonden onder water. Ook nu werden er



▲ Afb. 20. De Aarde tijdens de Laat-Jura (152 Ma). Voor de legenda, zie afb. 9. In het mega-continent Pangea ontstaat rek rond de toekomstige noordelijke Atlantische Oceaan, wat leidt tot dalen die vollopen met water: ondiepe zeeën. Afrika en Zuid-Amerika zitten nog stevig aan elkaar vast, maar aan de oostkant van Afrika begint ook rek te ontstaan waardoor er een zee wordt gevormd en Antarctica/India/Australië 'los komen'. Zowel in de centrale Atlantische Oceaan (bij Noord-Afrika) als ten oosten van Afrika wordt al de eerste oceanische korst gevormd. Bron en copyright: Chr. Scotese, Paleomap project (met toestemming).



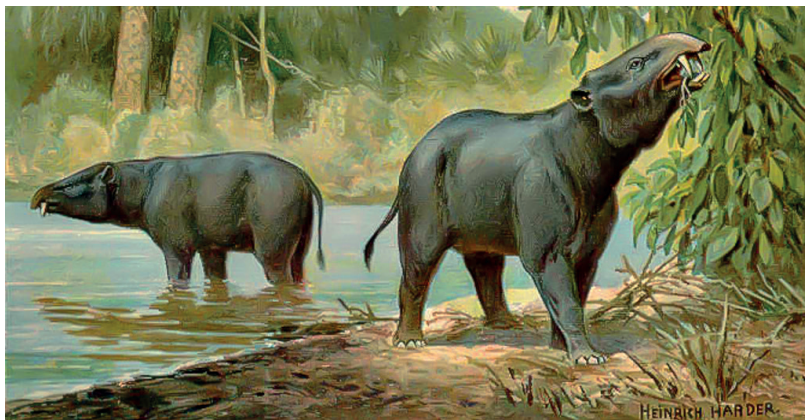
▲ Afb. 21. Het leven in een kustgebied tijdens Vroeg-Jura (Toarcian). Deze prent is gebaseerd op flora gevonden in de Bogdanka Koolmijn in Polen en op dinosauriër botten gevonden in de Ciechocinek formatie. Bron: Lucas Attwell via Wikimedia Commons CC BY-SA 3.0.



▲ Afb. 22 De Aarde tijdens het Laat-Krijt (94 Ma). Voor de legenda, zie afb. 9. Pangea breekt verder open. De centrale Atlantische Oceaan is nu volkomen open, met de vorming van oceanische korst. Ook de zuidelijke Atlantische Oceaan breekt open. Antarctica/Australië drijven af, net als India. Afrika draait enigszins tegen de klok in en de oceaan Tethys begint dicht te schuiven; aan de noordzijde van Tethys ontstaat subductie. Grote delen van de continenten liggen onder water. Bron en copyright: Chr. Scotese, Paleomap project (met toestemming).



▲ Afb. 23 Deccan Traps, Western Ghats Hills, India. Een kilometers dik pakket vulkanische afzettingen uit het Laat-Krijt. Foto: Nicholas via Wikimedia Commons CC BY-SA 2.5.



▲ Afb. 24. Een voorbeeld van dierenleven tijdens het Eoceen: *Moeritherium*. Het dier leefde in mangrovebossen, en had de grootte van een varken. Bron: Heinrich Harder. Publiek domein.

weer enorme pakketten kalksteen afgezet, zoals het krijt van de White Cliffs of Dover en de krijtrotsen in Normandië. Nederland kwam steeds verder onder water te liggen. De afzettingen uit het Laat-Krijt bestaan vooral uit kalken ('mergels'), zoals die in Zuid-Limburg te zien zijn. Pangea brak verder open. Ook Afrika en Zuid-Amerika begonnen uit elkaar te bewegen (afb. 22) en Afrika bewoog steeds meer richting Eurazië, waarbij – net als tijdens de Hercynische gebergtevorming – enkele kleinere continentale platen 'vooruit liepen'. Tegen het einde van het Krijt botsten die platen met Europa en begon de eerste Alpiene gebergtevorming.

Aan het eind van het Krijt schoof het subcontinent India, dat van Gondwana was afgescheiden en naar het noorden bewoog, over een hotspot (een gebied van opwaartse stroom in de mantel) heen, waardoor er uitgebreid vulkanisme optrad en een gebied van 500.000 km² bedekt werd met een 2 km dik pakket basalt: de Deccan Traps (afb. 23). Ongetwijfeld had dit, net als tijdens de Perm-Trias ramp, een negatief effect op de atmosfeer, wat het leven niet gemakkelijk zal hebben gemaakt. En toen viel de bekende meteoriet bij Yucatán op Aarde. Een nieuwe grote uitstervingsgolf was een feit. Meer dan de helft van al het leven op Aarde verdween, en dan met name de grotere organismen. Het betekende het eind van de dinosauriërs.

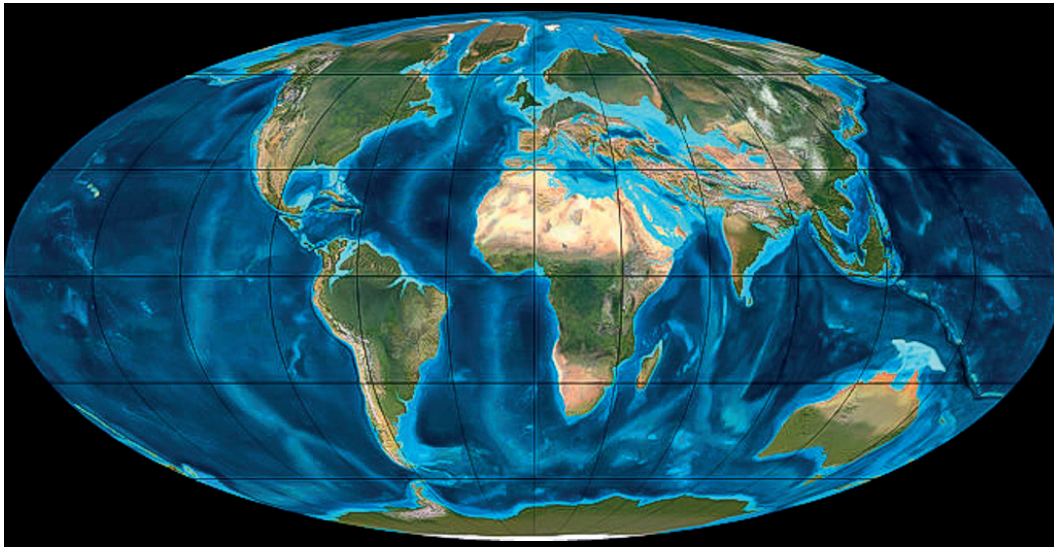
Paleoceen- Eoceen (66-34 Ma)

Ook nu ontwikkelde het leven zich na verloop van tijd opnieuw. Met name de zoogdieren deden het goed (afb. 24). Ze zouden tot op de dag van vandaag de dominante groep worden.

Het zeeniveau was lager, maar het klimaat bleef vrij warm. Een groot deel van de Aarde was bedekt met (regen)woud. Nederland lag echter nog grotendeels onder water. De Atlantische Oceaan werd verder opengeboken: het centrale en het zuidelijke deel werden volledig oceaans, het noordelijke deel bleef vooralsnog een continentaal plat, zonder echte oceanische korst. Afrika bewoog verder richting



▲ Afb. 25. De Alpine orogenese (de grijze markeringen): gebergtevorming als gevolg van het botsen van vroegere gebieden van Gondwana met Eurazië. De gebergtevorming gebeurt niet overal op het zelfde moment. De vorming van de Himalaya, door de botsing van India met Eurazië vormt het sluitstuk. Bron Jo Weber. Publiek domein.



◀ Afb. 26. De Aarde tijdens het Oligoceen (35 Ma). Nu breekt ook de noordelijke Atlantische Oceaan open. Tethys sluit zich steeds verder. Aan de westkant van de beide Amerika's heeft subductie van oceanische korst voor gebergtevorming gezorgd met veel vulkanisme.
Bron: Corentin Barbu via Wikimedia Commons CC BY-SA 4.0.

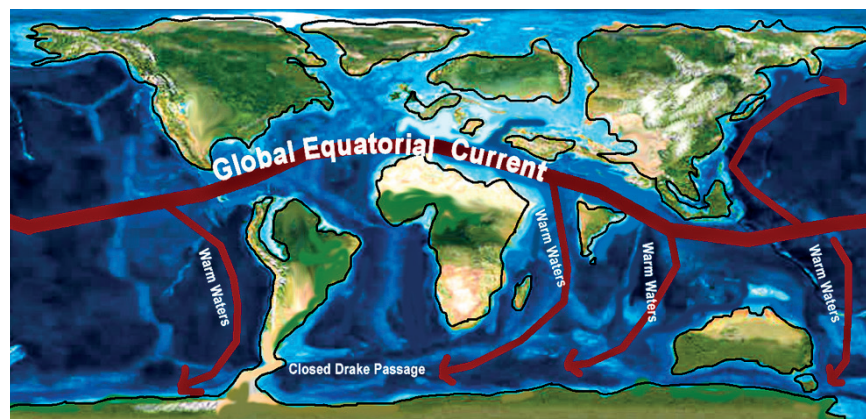
Eurazië, waarbij de Tethys Oceaan langzamerhand gesloten werd. De oceanische korst van de Tethys schoof hier en daar over delen van Europa; tegenwoordig vinden we nog 'ofiolieten' (resten van oceanische korst) in bijv. de Apennijnen en op Cyprus. Het grootste deel van de Tethys verdween, doordat de twee er aan gekoppelde continenten botsten en grootschalige gebergtevorming begon: de vorming van de Alpen. Een restant van Tethys vinden we nog terug in het oostelijk deel van de Middellandse Zee. Tijdens het Eoceen naderde ook India het continent Eurazië, waardoor een nieuwe fase van gebergtevorming startte: die van de Himalaya (afb. 25). De hele gordel van bergen van Spanje, via de Alpen, Karpaten, en Kaukasus naar de Himalaya was het resultaat van de noordwaartse beweging van de verschillende onderdelen van het vroegere Gondwana.

Oligoceen-Mioceen (34-5 Ma)

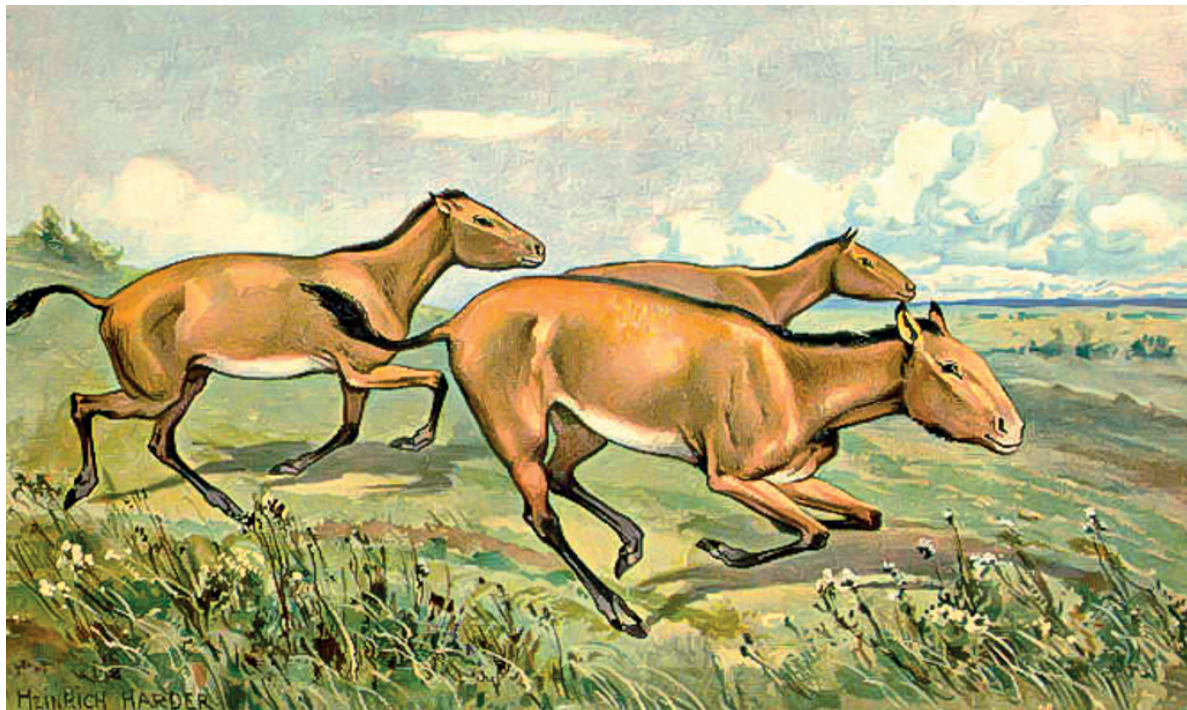
De noordelijke Atlantische Oceaan brak nu ook open en ook hier werd oceanische korst gevormd, (afb. 26). De Alpine orogenese duurde voort. In het westen van de beide Amerika's trad subductie van oceanische korst op, wat leidde tot gebergtevorming met veel vulkanisme (Rocky Mountains en Andes, afb. 27). Het sluiten van de Tethys, het aansluiten van India met Eurazië en het aansluiten van Zuid-Amerika aan Noord-Amerika zorgde voor een grote verandering in globale zeestromingen. Tot die tijd waren zeestromen vooral oost-west gericht, evenwijdig aan de draaiing van de Aarde: equatoriale stroming. Het zorgde voor warme



▲ Afb. 27. Mount St. Helens, 50 mijl ten noorden van Portland in Oregon, VS. Een vulkaan, ontstaan door subductie van oceanische korst onder het Noord-Amerikaanse continent. In 1980 barstte ze uit met verwoestende kracht. In de jaren erna bleef ze stoom, gas en as uit spuwen. De rookwolk op de foto stijgt meer dan 900 m boven de vulkaan uit. Deze foto is genomen vanaf Harry's Ridge, 5 mijl ten noorden van de berg, in 1982.
Foto: Lyn Topinka. Foto: USGS. Publiek domein.



▲ Afb. 28. Zeestromingen tijdens het Eoceen. In deze tijd lagen de continenten nog zodanig dat er een globale equatoriale zeestroming mogelijk was. Warm water bewoog ook richting polen en het zorgde voor een warm klimaat op Aarde. Later zou de situatie drastisch veranderen met afkoeling tot gevolg. Bron: Benjamin J. Burger via Wikimedia Commons CC BY-SA 4.0.



▲ Afb. 29. Leven in het Mioceen. *Hipparion* was één van de vele grazers in deze tijd. Het dier leefde rond 10 miljoen jaar geleden. Bron: Heinrich Harder. Publiek domein.

wateren in een groot deel van de oceanen, ook in de buurt van de polen (afb. 28). Die equatoriale stroming werd gaandeweg afgesneden, en uiteindelijk zou het huidige stromingspatroon (zuid-noord gericht) gevormd worden. Het had een groot effect op de temperaturen van oceanen. Rond de Zuidpool – die bedekt was met ijs – ontstond de circumpolaire stroming, die koud water genereerde en het klimaat op Aarde beïnvloedde. Er ontstond ook een groot temperatuurverschil tussen de diepzee (koud) en het ‘opervlaktewater’ (warm).

Het algehele klimaat werd in het Oligoceen koeler. De vegetatie veranderde: gematigde loof- en naaldbossen en grasland bedekte de Aarde. Er kwamen steeds meer grote grazers (afb. 29) en de eerste primaten verschenen. Het grootste deel van Nederland bestond uit een kustgebied met kustmoerassen.

Pliocene-Pleistoceen-Holoceen (5-0 Ma)

De Aarde zag er nu erg herkenbaar uit. Noord- en Zuid-Amerika werden volledig verbonden door de landengte van Panama, en de Atlantische Oceaan en Grote Oceaan werden van elkaar gescheiden, op de regio's bij de polen na. De zeestromen in de Atlantische Oceaan werden definitief zuid-noord gericht, en de ons bekende Golfstroom ontstond, die tegenwoordig warmte brengt naar West-Europa. Het nieuwe patroon van oceaanstromingen versterkte de temperatuurwisselingen veroorzaakt door schommelingen in zonnestraling, wat leidde tot een afwisseling van ijstijden en warmere periodes. Over het algemeen koelde het klimaat echter af en ijskappen ontstonden nu ook rond de Noordpool. Het zeeniveau daalde. De eerste mensachtigen verschenen in het Pliocene. Uiteindelijk leidde de afkoeling tot de vele ijstijden van het Pleistoceen. In die periodes lag er ook landijs buiten de poolgebieden. Door het vele ijs was de zeespiegel

wereldwijd zo'n 200 m lager dan nu. Hierdoor werden in die tijd veel – normaal door water gescheiden gebieden – met elkaar verbonden, zoals Java, Sumatra en Borneo die verbonden raakten met het vasteland van Azië (Maleisië). Het zorgde voor migratie en ‘uitwisseling’ van dieren en mensen. De ijstijden werden afgewisseld met warmere periodes, wat het leven voor sommige soorten bemoeilijkte. Veel plant- en diersoorten overleefden deze snelle afwisselingen niet. De mens deed het echter steeds beter. *Homo erectus* migreerde tijdens het Pleistoceen van Afrika – misschien via Azië – naar Europa. En van Azië, via de Beringstraat – naar Noord Amerika.

De laatste 12.000 jaar van de Aardgeschiedenis, het Holoceen, is een warme periode, waarin de zeespiegel stijgt en het Nederlandse landschap is gevormd in de delta van de grote rivieren, zoals de Rijn. Met duinen, veen en zee-kleigebieden. Voor de mens in Nederland begon met het Holoceen de Midden-Steen Tijd. Men was in die tijd nog steeds jager-verzamelaar, maar verfijnde zijn steenbewerkingstechnieken. En men ging al snel over op landbouw en veeteelt, wat het landschap en de samenleving drastisch zou veranderen.

Referenties

- www.scotese.com (Paleomap Project).
- Ziegler, P.A. Evolution of Laurussia. 1989, Kluwer Academic Publishers.
- F. Beunk, & W. de Vries. (2000). Plaattektoniek: motor van het 'systeem aarde'. *Gea*, 33(2), 35–47. Lees online via natuurtijdschriften.nl/pub/415178.
- <https://blogs.agu.org/georneys/2018/02/09/oorlogskloof-glacial-pavement>.
- J. de Jager. (2012). Nederland door de geologische tijd. 600 miljoen jaar verandering van plaats en klimaat. *Gea*, 45(4), 96–103. Lees online via <https://natuurtijdschriften.nl/pub/568787>.