

Toekomstige opwarming van de aarde en een bijgewerkte CO₂-curve voor de afgelopen 460 miljoen jaar

door prof.dr. Christopher R. Scotese

Department of Earth & Planetary Sciences, Northwestern University, Illinois, VS

cscotese@gmail.com

Vertaling: Hans Sanders, hansanders45@gmail.com

Dit artikel van C.R. Scotese is oorspronkelijk verschenen (18 januari 2022) onder de titel 'Future Global Warming and an Updated CO₂ Curve for the last 460 million years' en eerder gepubliceerd op de website www.academia.edu. Hans Sanders (redacteur iBooks en voorzitter GEA) heeft het speciaal vertaald voor herpublicatie in Gea.

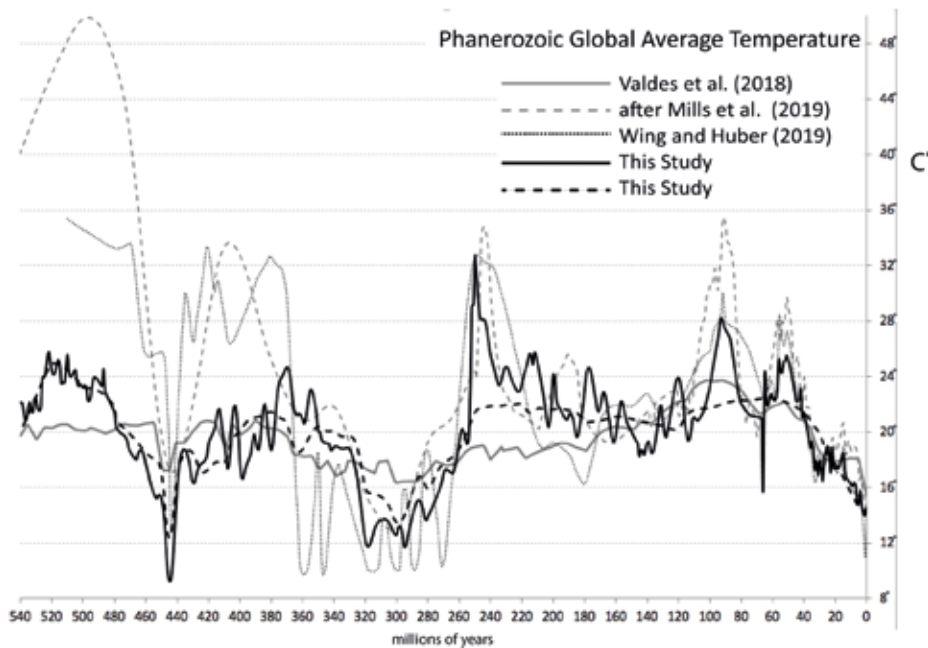
Wereldwijde temperatuurverandering in het geologisch verleden

Verschillende recente studies hebben schattingen laten zien die beschrijven hoe de temperatuur op aarde de afgelopen 540 miljoen jaar is veranderd (afb. 1). Deze temperatuurcurves laten de periodes zien waarin de wereldwijde gemiddelde temperatuur op de aarde veel

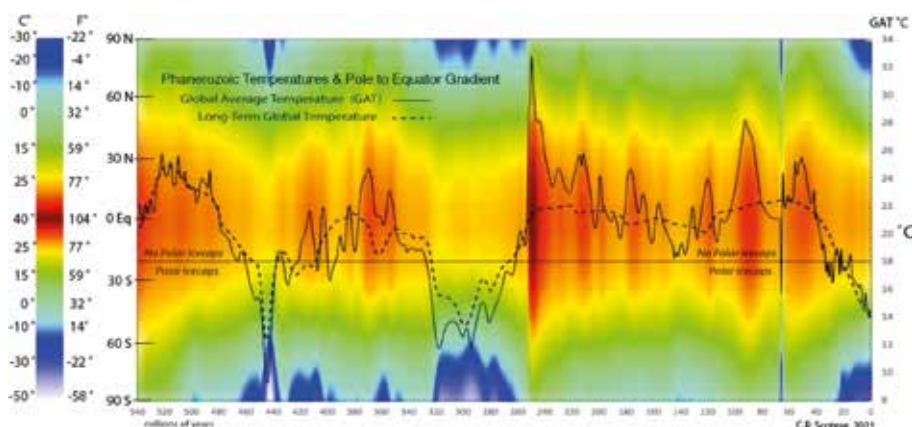
warmer was dan nu (de broeikasintervallen) en ook de tijdsintervallen waarin de aarde, net als tegenwoordig, is opgesloten in een koude "ijskapwereld". Afb. 2 is een "warmtekaart" die deze broeikas- en ijskapintervallen belicht (Scotese et al., 2021).

Ijskapperiodes, zoals de huidige periode, zijn tijden waarin permanente ijskappen de Noord- of Zuidpool (of beide) bedekken. Tijdens ijskapintervallen is de gemiddelde temperatuur op aarde lager dan 18°C en de temperaturen in de poolgebieden zijn ver beneden het vriespunt (-18°C). Tijdens ijskapintervallen is de gemiddelde temperatuur in de tropen zelden hoger dan 26°C. Gedurende de laatste 540 miljoen jaar werd de aarde ongeveer 25% van de tijd gekenmerkt door ijskapomstandigheden. De meest koude ijskapperioden deden zich voor tijdens het Laat-Ordovicium (450 Ma-440 Ma), het Carboon-Perm (355 Ma-270 Ma) en het late Kenozoïcum (35 Ma-0 Ma). We leven momenteel in een extreme ijskapperiode (afb. 3).

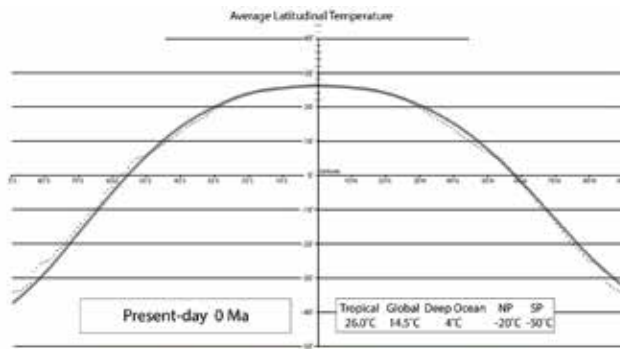
Tijdens de broeikasintervallen is de gemiddelde wereldtemperatuur ongeveer 10°C warmer dan de wereld van tegenwoordig en de temperaturen



▲ Afb.1. Schattingen van de gemiddelde wereldtemperatuur tijdens het Fanerozoïcum. Bron: Scotese et al., 2021.



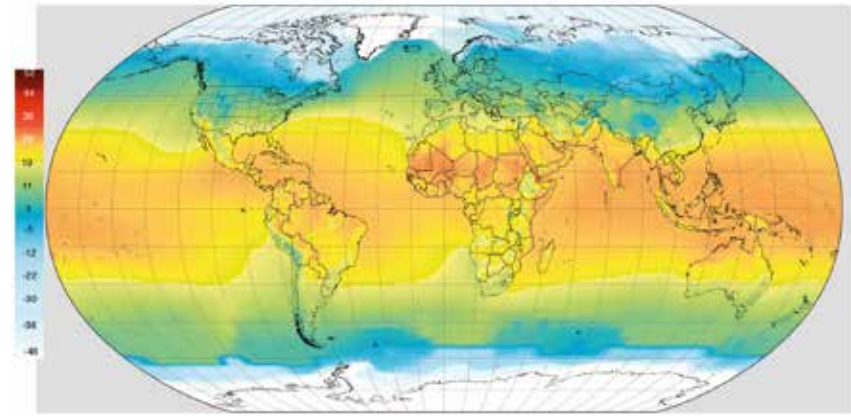
▲ Afb. 2. Een geologische 'warmtekaart' die de wisselende temperatuur van de polen tot de evenaar laat zien vanaf het Cambrium tot nu. Bron: Scotese et al., 2021.



◀ Afb. 3. Huidige temperatuurcurve per breedtegraad met rechts het noordelijk en links het zuidelijk halfmond (boven); daaronder de kaart met de temperatuur op het aardoppervlak. NP=Noordpool, SP=Zuidpool. Bron: Legates & Wilmott, 1990.

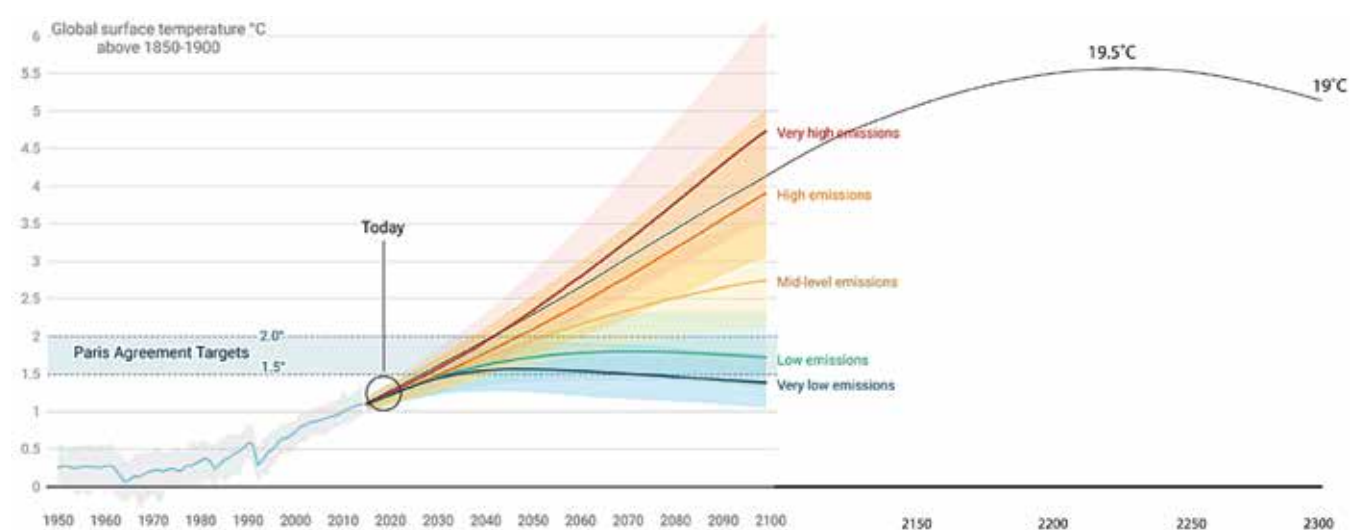
Toekomstige opwarming van de aarde: de overgang van een ijskaperiode naar een broeikasperiode

Ongeveer 15% van de geologische tijd is de aarde in een overgang tussen een broeikas- en ijskaperiode of andersom. Gedurende deze periodes kunnen positieve feedbackmechanismen, zoals veranderingen in de weerkaatsing van het aardoppervlak (albedo) als gevolg van het toenemen of afnemen van poolijskappen over een periode van 10.000-100.000 jaar, de gemiddelde temperatuur op aarde snel doen veranderen. De aarde maakt momenteel een snelle, door de mens veroorzaakte overgang door van een ijskap- naar

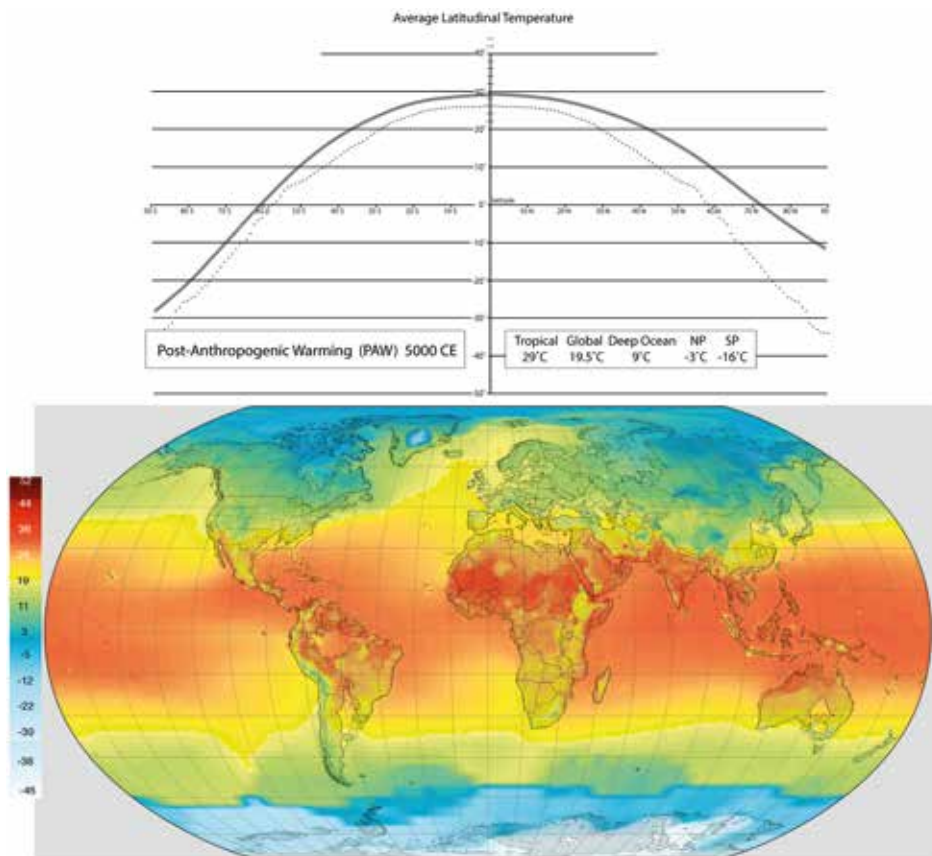


boven de poolcirkel zijn relatief warm (8°C). Tijdens de broeikasintervallen zijn de polen niet bedekt met ijskappen en is er een warme, tropische fauna en flora in de poolgebieden (Huber, 1998; Huber et al. 2000). Tijdens deze broeikasintervallen is ook de gemiddelde jaartemperatuur in de tropen (tussen 20° noorder- en 20° zuiderbreedte) vaak hoger dan 30°C. Gedurende de laatste 540 miljoen jaar komen broeikasintervallen ongeveer 60% van de tijd voor. De broeikasperiodes met de hoogste temperaturen kwamen voor in het vroege Paleozoïcum (540 Ma-460 Ma), het Devoon (415 Ma-360 Ma), het Trias-Jura (250 Ma-160 Ma), het midden Krijt (110 Ma-70 Ma), en het Paleoceen tot het Eoceen (65 Ma-40 Ma). De meest recente broeikasperiode was tijdens het Laat-Eoceen, 40 miljoen jaar geleden.

een broeikasperiode. Het is zeer waarschijnlijk dat de temperatuur op aarde de komende +/-150 jaar met ong. 4,5°C zal stijgen (afb. 4; Scotese, 2020; Scotese et al., 2021). In de komende 5.000-10.000 duizend jaar (Archer 2009, Archer et al., 2009) zal een nieuwe evenwichtstemperatuur van 19°C worden bereikt. Na deze snelle opwarming van de aarde zullen de Noordpool en de Groenlandse ijskappen zijn gesmolten en zal de Antarctica ijskap veel kleiner zijn. De zeespiegel zal dan ongeveer 100 meter zijn gestegen en 10% van de laaggelegen gebieden van de continenten zal onder water verdwijnen (afb. 5). Vergelijk afb. 5 met afb. 3. Merk op dat de temperaturen aan de evenaar met ongeveer 3°C zullen zijn gestegen. In de toekomst zullen temperaturen nog dramatischer



▲ Afb. 4. Projectie van de toekomstige opwarming van de aarde (2020-2100, IPCC (2021); 2100-2300, Scotese (2020), Scotese et al. (2021)). De opwarming van de aarde vult af bij 19,5°C in het begin van de jaren 2200 als gevolg van de uitputting van fossiele brandstoffen (BP (2019), Shell (2018), zie de literatuurlijst op het eind). Het grijze gedeelte is wat het verdrag van Parijs wil bewerkstelligen, gerelateerd aan de huidige projecties met de jaartallen.



▲ Afb. 5. Na de door de mens veroorzaakte opwarming van de aarde (ong. 5000 CE [Common Era A.D.]), breedtegraad temperatuurcurve (boven) en globale temperatuurkaart (onder). Wereldwijde temperaturen stabiliseren op 19°C. De stippellijn is de huidige temperatuurcurve. De zwarte lijn, landwaarts van de moderne kustlijnen geeft aan dat delen van de continenten zullen worden overspoeld door de oceaan en onder water verdwijnen^{VI}. Bron: Scotese, 2019; Scotese et al., 2021.

stijgen, met name in de poolgebieden. De temperatuur op 60°noorderbreedte zal 10°C hoger zijn dan nu. De laatste keer dat de wereld zo warm was, was tijdens het late Eoceen, 40–35 miljoen jaar geleden, toen de gletsjers die uit de uitdijende Antarctische ijskap stroomden net de zee begonnen te bereiken (Koeberl & Montanari, 2009; Ruddiman, 2001; p. 148).

Wereldwijde klimaatmodellen vertrouwen op CO₂-schattingen om de paleotemperatuur te modelleren

Om een paleotemperatuurkaart van de aarde te maken, is het nodig om een model te kunnen maken van hoe atmosferische circulatie, oceaancirculatie en bergen de regionale temperatuur beïnvloeden. Tientallen jaren ervaring met modellering heeft geleid tot de Global Climate Models (GCM's)^I, die zeer nauwkeurig de bewegingen van de atmosfeer en oceanen simuleren. De dagelijkse dynamiek van de atmosfeer en de oceanen zegt ons echter heel weinig over de veranderingen van de mondiale temperatuur die zich gedurende honderduizenden of miljoenen jaren voordoen. Om de mondiale temperatuur te kunnen modelleren, vertrouwen GCM's op schattingen van het oude niveau van atmosferisch CO₂. Heel simpel gezegd: hogere concentraties CO₂ leiden tot hogere mondiale temperaturen; lagere concentraties CO₂ tot lagere temperaturen op aarde. CO₂ is een broeikasgas dat een belangrijke, zo niet de overheersende rol heeft gespeeld bij het reguleren van de temperatuur op aarde door de tijd heen. Globale klimaatmodellen, zoals CESM^{II} (Community Earth System Model) en het Hadley Center coupled Model versie^{III},

vereisen schattingen van atmosferisch CO₂ om de temperaturen die door deze simulaties worden geproduceerd, te modelleren. Daarom is een nauwkeurige schatting van de oude concentratie van atmosferisch CO₂ essentieel als we met succes vroegere klimaten willen modelleren.

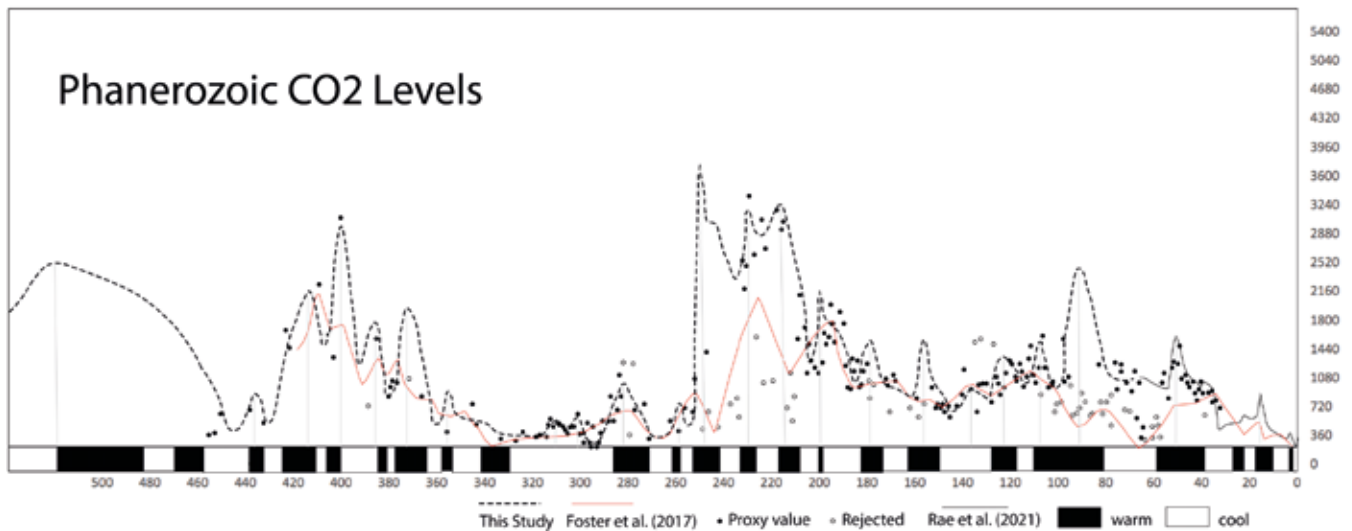
Er zijn slechts enkele onderzoeken geweest die hebben geprobeerd de variatie in atmosferische CO₂ in de afgelopen 540 miljoen jaar te beschrijven. Eén van de meer recente inspanningen van Foster et al. (2017) is gebaseerd op CO₂-proxygegevens (proxygegevens zijn iedere vorm van bewijsmateriaal dat informatie geeft over klimaat of milieu, bijv. type flora, type sediment etc., red.) door Dana Royer (Wesleyan University) om een curve te produceren die illustreert hoe de atmosferische concentratie van CO₂ de afgelopen 420 miljoen jaar heeft gefluctueerd (de rode lijn in

afb. 6). De Foster-curve heeft echter last van hiaten in de CO₂-data en tijdsintervallen waardoor het bereik van CO₂-schattingen sterk varieert.

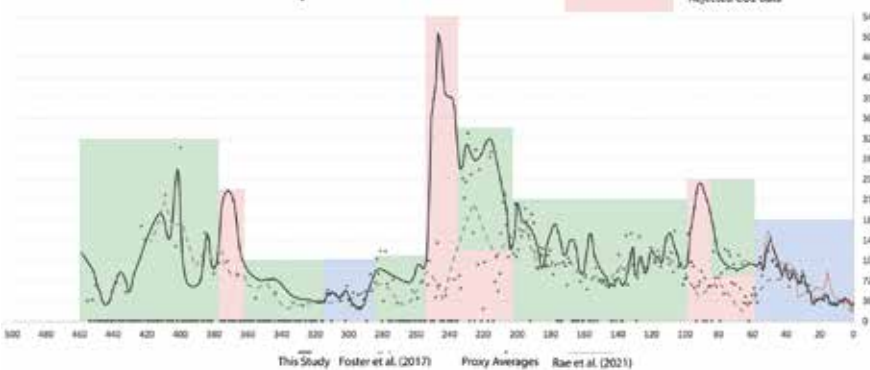
Deze hiaten in de data zijn vooral groot in het Vroeg- en Midden-Paleozoïcum (460 Ma–320 Ma), het Laat-Perm en het Vroeg Trias (270 Ma–230 Ma) en de Midden-Jura (180 Ma–150 Ma). Er zijn geen betrouwbare gegevens voor het Cambrium en het Vroeg-Ordovicium (540 Ma–460 Ma). De proxywaarden voor CO₂ zijn behoorlijk variabel tijdens het Vroeg-Perm (360–1440 ppm^{IV}), het Trias (400–3240 ppm) en het Paleoceen (360–1200 ppm).

Om de schattingen van CO₂ te verbeteren, hebben we ons groeiende begrip van de temperatuurgeschiedenis van het Fanerozoïcum^V (Scotese et al., 2021) gebruikt om de CO₂-curve van Foster te verfijnen en bij te werken. De opeenvolging van zwarte en witte intervallen langs de tijdassen (afb. 6) verwijzen naar tijden van opwarming van de aarde (zwart) en globale afkoeling (wit). Slechts 50% van de CO₂-pieken in de Foster-curve komen overeen met warme-intervallen. Ervan uitgaande dat CO₂ de belangrijkste oorzaak is van de opwarming van de aarde, is het redelijk om de CO₂-curve opnieuw te tekenen, zodat pieken in de CO₂-curve overeenkomen met tijden van maximale opwarming.

Door een onafhankelijke schatting van de temperatuur te overwegen, kunnen we nu “de gaten opvullen” en tegenstrijdige CO₂-gegevens verwijderen. Tijdens het Trias en het Laat-Krijt werden bijvoorbeeld de CO₂-schattingen



Phanerozoic CO2 Levels Estimated from Paleotemperature Curve



◀ Afb. 6. Boven: CO₂-niveaus geschat op basis van paleotemperaturen. Zwarte stippen - Gemiddelde CO₂ die wordt samengevat met intervallen van één miljoen jaar. Zwarte blokken langs de as van de tijdschaal (X-as) geven aan dat er geen CO₂-gegevens zijn voor dat tijds-interval. De Y-as geeft de CO₂-concentratie in ppm aan. Links: Blauwe schaduw: overvloedige en goed bekende CO₂-informatie. Groene arcering: het relatieve bereik in CO₂-waarden is bekend, maar de vorm van de CO₂-curve is afgeleid van paleotemperatuurschattingen. Rode arcering: schaarse of tegenstrijdige CO₂-schattingen worden verworpen en vervangen door schattingen die uitsluitend zijn afgeleid van paleotemperatuur. Gestippelde grijze curve: CO₂-schattingen van Foster et al., 2017. De dunne rode lijn geeft de CO₂-schattingen van Rae et al. (2021) weer.

van minder dan ~1080 ppm verworpen (open cirkels). In eerste instantie lijkt dit misschien een cirkelredenering. Er werden echter geen CO₂-proxygegevens gebruikt om de koele en warme intervallen te bepalen (Scotese et al., 2021). We hertekenen gewoon de CO₂-curve zodat deze overeenkomt met wat we onafhankelijk weten over de wereldwijde temperatuurverandering. De kwaliteit van de aanpassing tussen de herziene CO₂-curve en de CO₂-proxygegevens verbetert juist door de afwijzing van twijfelachtige CO₂-waarden. Dit is geen definitief antwoord. Er zijn nog steeds grote hiaten in het CO₂-proxyrecord en de schatting van sommige van de CO₂-pieken, waarvoor geen gegevens zijn (d.w.z. Cambrium, Vroeg-Trias, Cenomanien-Turonien (de onderste twee etages van het Boven-Krijt, red.)), is speculatief. Deze curve vertegenwoordigt echter een toetsbare hypothese die wacht op bevestiging of afwijzing met aanvullende gegevens.

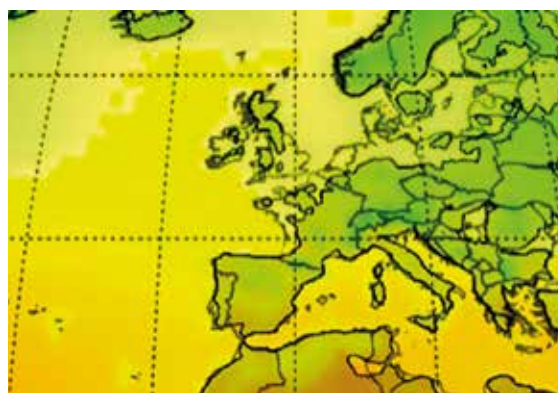
Referenties

- Archer, D., 2009. *The Long Thaw, How Humans Are Changing the Next 100,000 years of Earth's Climate*, Princeton University Press, Princeton, 180 pp.
- Archer, D., Eby, M., Brovkin, V., Ridgwell, A., Cao, I., Mikolajewicz, U., Caldiera, K., Matsumoto, K., Munhoven, G., Montenegro, A., and Tokos, K., 2009. Atmospheric lifetime of fossil fuel carbon dioxide. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 37, pp. 117-134.

- British Petroleum (BP), 2019, "BP Energy Outlook, 2019". <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2019.pdf>
- Foster, G.L., Royer, D.L., and Lunt, D.J., 2017. Future Climate Forcing Potentially without precedent in the last 420 million years, *Nature Communications*, v. 8, 14845, doi:10.1038/ncomms14845.
- Huber, B.T., 1998. Tropical paradise at the Cretaceous poles?, *Science*, v. 282, p. 2199-2200.
- Huber, B.T., MacLeod, K.G., and Wing, S.L., 2000. *Warm Climates in Earth History*, Cambridge University Press, 462 pp.
- IPCC, 2021. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press.
- Koeberl, C., and Montanari, A., 2009. *The Late Eocene Earth: Hot House, Ice House, and Impacts*, Geol. Soc. America, Special Paper 452, Boulder, Colorado, 322 pp.
- Mills, B.J.W., Krause, A.J., Scotese, C.R., Hill, D.J., Shields, G.A., and Lenton, T.M., 2019. Modelling the long-term carbon cycle, atmospheric CO₂, and Earth surface temperature from late Neoproterozoic to present-day, *Gondwana Research*, v. 67, p. 172-186, doi: 10.1016/j.gr.2018.12.001 1342-937.
- Rae, J.W.B., Zhang, Y.G., Liu, X., Foster, G.L., Stoll, H.M., and Whiteford, 2021. Atmospheric CO₂ over the Past 66 Million Years from Marine Archives, *Annual Review of Earth and*

- Planetary Sciences, 49: 609-41.
- Ruddiman, W.F., 2001. Earth's Climate: Past and Future, W.H. Freeman and Company, New York, NY, 465 pp.
 - Scotese, C.R., 2020. Global Warming during the next 300 years, A Global Warming Calculator (student exercise with Excel spreadsheet), PALEOMAP Project, Evanston, IL. 49 pp.
 - Scotese, C.R., Song, H., Mills, B.J.W., and van der Meer, D., 2021. Phanerozoic Paleotemperatures: The Earth's Changing Climate during the last 540 million years, Earth-Science Reviews. doi: [org/10.1016/j.earscirev.2021.103503](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103503).
 - Shell (2018), Shell Scenarios: SKY, Meeting the Goals of the Paris Agreement, <https://go.shell.com/3DFztAH>
 - Valdes, P.J., Scotese, C.R., and Lunt, D.J., 2021. Deep Ocean Temperatures Through Time, Climate of the Past, v. 17, p. 1483-1506, <https://doi.org/10.5194/cp-17-1483-2021>
 - Wing, S., and Huber, B., 2019. Earth's Temperature History Workshop, Smithsonian Institution, National Museum of Natural History, March 30-31, 2018, Washington, D.C.

- I Global Climate Model (GCM) is een wereldklimaatmodel. Het is een complexe wiskundige weergave van de belangrijkste componenten van het klimaatstelsel (atmosfeer, landoppervlak, oceanen en zee-ijs) en hun interacties. De energiebalans van de aarde tussen de vier componenten is de sleutel tot klimaatvoorspelling op lange termijn. Zie ook: www.carbonbrief.org/qa-how-do-climate-models-work.
- II Het Community Earth System Model (CESM) is een volledig gekoppelde numerieke simulatie van het aardsysteem, bestaande uit atmosferische, oceanen-, ijs-, landoppervlak-, koolstofcyclus en andere componenten. Het CESM bevat een klimaatmodel dat state-of-art simulaties biedt van het verleden, heden en toekomst van de aarde. Zie ook: www.cesm.ucar.edu/models.
- III HadCM3 is een gekoppeld circulatiemodel voor atmosfeer en oceaan, ontwikkeld in het Hadley Centre in het Verenigd Koninkrijk. Het was een van de belangrijkste modellen die in het IPCC Third Assessment Report in 2001 werden gebruikt. Zie ook: www.metoffice.gov.uk/weather/climate/met-office-hadley-centre/index.
- IV 1 ppm CO₂ betekent dat een miljoenste van de luchtmoleculen bestaat uit CO₂; ppm is een afkorting van parts per million. De huidige concentratie ligt rond 400 ppm (ofwel 0,04%). Dit klinkt als een verwaarloosbare hoeveelheid, maar CO₂ is een belangrijk broeikasgas en zorgt voor een snelle opwarming van de aarde. Het meten gebeurt op grote hoogte, o.a. op de vulkaan Mauna Loa (Hawaii).
- V Het geologische tijdvak Fanerozoïcum (ook gespeld als Phanerozoïcum) is een eon uit de geologische geschiedenis van de aarde (541 Ma-heden) waarin bewezen leven voorkomt. Het wordt onderverdeeld in de era's: Paleozoïcum (541-252 Ma); Mesozoïcum (252-66 Ma) en Kenozoïcum (66 Ma-heden). (Kijk voor meer informatie in het iBook 'Geologie van Nederland', deel 0, Inleiding).
- VI Post-antropogene opwarming van de aarde (~ 5000 CE). Deze afbeelding geeft een verduidelijking.



▲ Deze afb. hoort bij noot VI in het bijschrift van afb. 5. De zwarte lijnen markeren het deel van de kaart dat boven water zal blijven, ondanks de mogelijke stijging van de zeespiegel; de lichtere delen zullen dan onder water verdwijnen.

Rekenmodel uitgelegd

Er zijn op de website van GEA (gea-geologie.nl/tijdschrift-gea/ibooks) onder de titel 'Aanvullende materialen' twee stukken geplaatst. Deze twee stukken laten zien hoe de berekeningen van Scotese plaatsvinden met betrekking tot de wereldwijde opwarming en geven je persoonlijk inzicht in de variabelen die hierbij worden gebruikt en hoe de resultaten bepaald worden door de keuzes die je bij die variabelen maakt. Het ene stuk is een Excel-spreadsheet ('Toekomst Global Warming Calculator'), met een eenvoudig koolstofbudgetmodel waarmee je kunt voorspellen hoe snel de opwarming van de aarde zal plaatsvinden en hoe warm het de komende driehonderd jaar op aarde zal worden. De aanvullende tekst in de vorm van het iBook/pdf (onder de titel: 'De mondiale opwarming van de aarde, een calculatiemodel uitgelegd') helpt je bij het voorbereiden van de informatie die nodig is voor het werken met de spreadsheet. Deze informatie omvat:

- 1) toekomstige trends in de groei van de wereldbevolking;
- 2) de "energievoetafdruk" die dat achterlaat per persoon;
- 3) de toekomstige mix van energiebronnen om aan de vraag tegemoet te komen.

Je schattingen kunnen worden ingevoerd in de spreadsheet en laten de gevolgen ervan zien. Voor degenen onder u die dieper willen graven, zijn er uitgebreide voetnoten in het iBook/de pdf. Alle relevante informatie en literatuurverwijzingen staan in de voetnoten. Als u de voetnoten leest, krijgt u een duidelijk beeld van de denkprocessen van dr. C. Scotese en de procedures die hij heeft gebruikt om de toekomstige opwarming van de aarde in te schatten. Om de omvang van de toekomstige opwarming van de aarde te kunnen berekenen in het spreadsheet, moeten we deze vier vragen beantwoorden:

- 1) Hoeveel energie hebben we in de toekomst nodig?
- 2) Wat worden de toekomstige energiebronnen?
- 3) Hoeveel van de CO₂ die in de atmosfeer wordt uitgestoten, blijft daar?
- 4) Hoeveel zal deze extra atmosferische CO₂ de aarde opwarmen?

Besef dat het maken van dit soort voorspellingen een hele opgave is, maar als we het stap voor stap doen, denk ik dat het mogelijk is om een redelijke schatting te maken van de timing en hoeveelheid toekomstige mondiale opwarming volgens dit rekenmodel.

Hans Sanders