



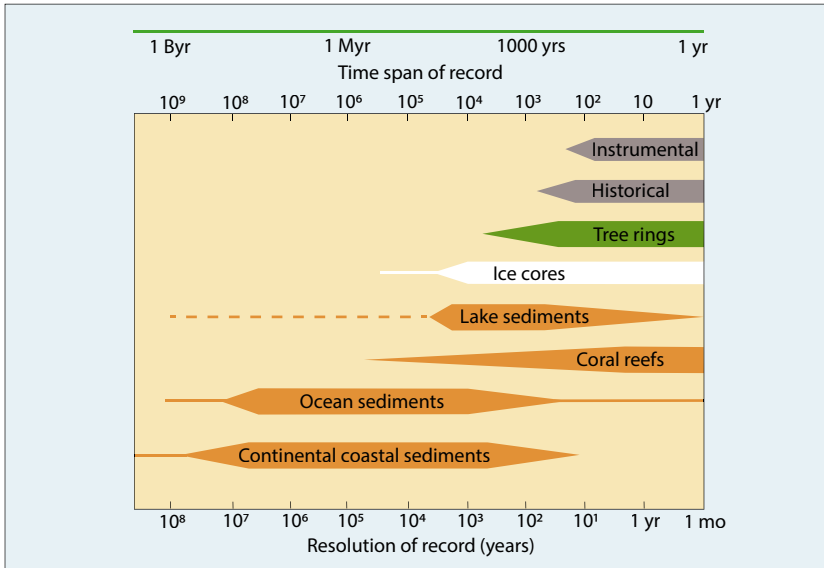
| AFBEEELDING. | Pixabay.com

Fossielen als klimaat-archieven

NIELS J. DE WINTER
VU AMSTERDAM
N.J.DE.WINTER@VU.NL

Om beter te kunnen voorspellen hoe menselijk handelen het klimaat op aarde beïnvloedt zijn nauwkeurige, waarheidsgetrouwe modellen nodig. De paleoklimatologie levert informatie over klimaatsituaties uit het verleden die niet voorkomen in historische meetreeksen. Fossielen, van kleine microskeletjes tot dinosaurustanden, spelen een belangrijke rol als dragers van die informatie over het klimaat. Dit artikel behandelt de gedetailleerde en soms verrassende lessen die we uit deze bijzondere klimaatarchieven kunnen leren.





AFBEELDING 1. | *Overzicht van enkele soorten klimaatarchieven en de tijdschaal waarop ze reconstructies mogelijk maken (uit: Ruddiman, 2001, "Earth's Climate: past and future")*

Klimaatmodellen testen

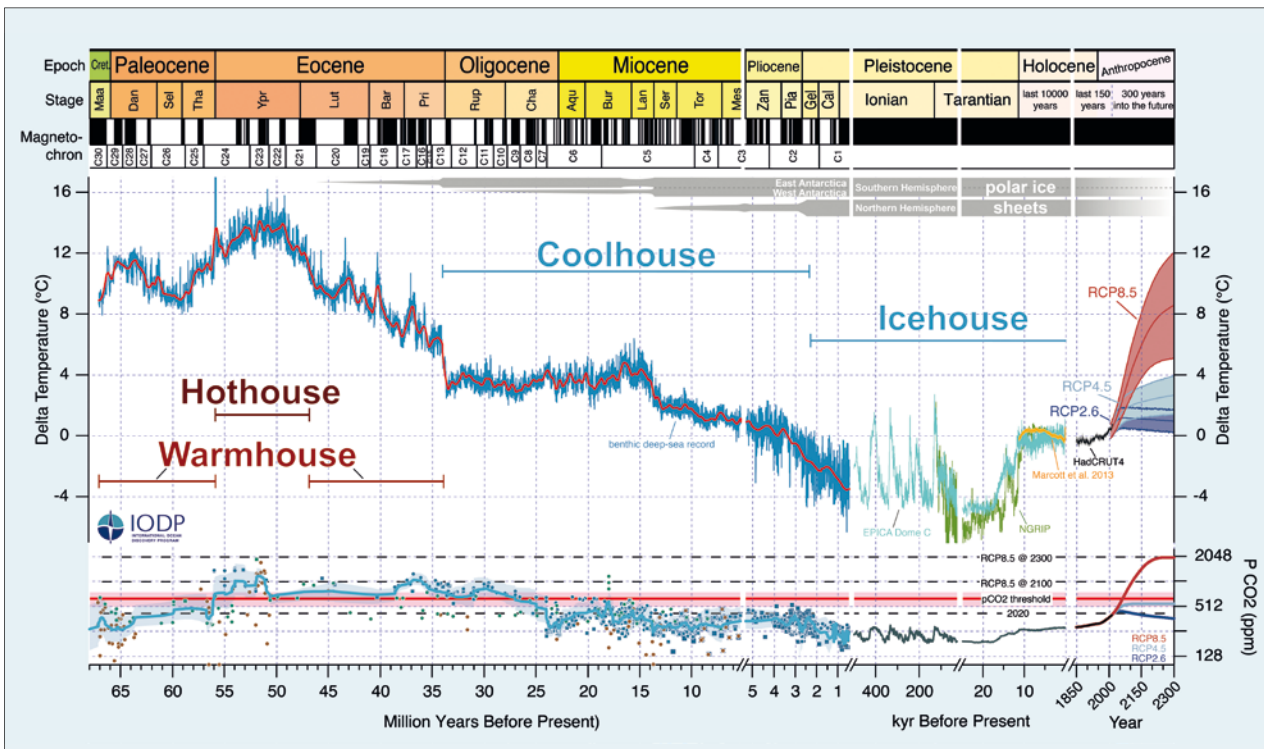
We leven in een klimaatcrisis, en aardwetenschappen zijn onmisbaar voor zowel het begrijpen van de impact van klimaatverandering als het vinden van oplossingen. Een belangrijke bron van informatie voor het maken van beslissingen over het tegengaan van (mitigatie) of aanpassen aan (adaptatie) klimaatverandering zijn de rapporten van het "Intergovernmental Panel on Climate Change" (IPCC), waaraan veel klimaatwetenschappers meewerken. In deze rapporten worden aan de hand van modellen verschillende mogelijke klimaatscenario's uitgerekend. Om te testen of die modellen het goed doen worden ze vaak ingezet om het klimaat van het verleden te "voorspellen". De uitkomst van die "omge-

keerde voorspellingen" worden vervolgens vergeleken met meetgegevens over het klimaat uit die tijd.

Klimaatreconstructies

Hier komen we in de problemen, want onze weermetingen reiken maximaal enkele honderden jaren terug. In Nederland houden we pas bruikbare, dagelijkse weergegevens bij sinds de 18e eeuw. Omdat het klimaat van nu al warmer is dan dat uit die meetreeksen, moeten we de gegevens aanvullen zodat modellen ook voor warmere klimaten getest kunnen worden. Het is in het (verre) verleden vaak nog veel warmer geweest dan nu, en reconstructies van het klimaat uit die tijd zijn een nodige aanvulling op onze data.

Veel van die reconstructies worden gedaan aan de hand van metingen van de chemie of fossieleninhoud van sedimenten. Vooral uit oceaansedimenten is de laatste decennia een schat aan informatie verzameld over het klimaat van de laatste 100 miljoen jaar¹ (zie Afb. 2). Het International Ocean Discovery Program (IODP) is een internationale samenwerking van klimaat- en oceaandeskundigen die met boorschepen sedimentkernen uit de zeebodem steken. Daarmee kunnen sedimenten die laagje voor laagje op



AFBEELDING 2. | *Een compilatie van temperatuur- en CO₂-reconstructies over het Cenozoïcum (66-0 miljoen jaar geleden) vergeleken met projecties van klimaat voor 2300 CE volgens verschillende IPCC scenario's (uit Westerhold et al., 2020, Science¹).*



de bodem “neersneeuwen” bestudeerd worden. De fossielen in deze sedimenten, vooral microscopische algjes, geven veel inzicht in de temperatuur op de zeebodem en aan het zeeoppervlak (afhankelijk van waar ze leefden). Zo zijn we veel te weten gekomen over de samenhang van oceaanstromingen en klimaat op de geologische tijdschaal (duizenden tot miljoenen jaren).

Echter, ons klimaat verandert nu veel sneller, en sedimenten accumuleren zelden snel genoeg om klimaatverandering op de schaal van dagen tot eeuwen vast te leggen. Voor dit soort informatie worden vaak ijskernen, boomringen en stalagmieten bekeken. Het nadeel van die archieven is dan weer dat ze niet lang genoeg bewaard blijven om echt ver terug in het verleden te kijken. Om dit “gat” in onze datareksen op te vullen hebben we klimaatarchieven nodig die veranderingen op korte tijdschaal vastleggen en voor lange tijd (miljoenen jaren) bewaren.

Wat maakt een fossiel een goede weerman?

Sommige “macrofossielen”, oftewel overblijfselen van organismen die met het blote oog te zien zijn, lenen zich hier



AFBEELDING 3. | Een voorbeeld van een oester met groeilaagjes (©Jim Vandiver).

goed voor, vooral harde skeletonderdelen zoals tanden en schelpen. Deze materialen groeien incrementeel (laagje voor laagje) en leggen zo op heel korte tijdschaal informatie vast over de omgeving en het klimaat van het organisme. Harde onderdelen hebben bovendien een veel grotere kans om als fossiel bewaard te worden dan, bijvoorbeeld, een boom of een ijslaag. Zo fungeren deze fossielen als een soort tijdschapsules waarin een korte, maar heel gedetailleerde tijdreeks van het klimaat tijdens het leven van het organisme is vastgelegd: Een “snapshot” van het klimaat.

Klimaatproxies

Natuurlijk kunnen we in zo’n fossiel geen thermometer steken om de temperatuur uit het verleden te meten. In plaats daarvan meten we de eigenschappen



AFBEELDING 4. | Foto van de haven van het NIOZ waar kokkels en andere schelpdieren experimenteel gekweekt worden (in bakjes met zand).



van het materiaal (samenstelling en structuur) die samenhangen met het milieu of het klimaat. Zo'n eigenschap noemen we een "proxy". Om die proxies te ontwikkelen experimenteren we met het groeien van organismen onder verschillende omstandigheden. Zo kweken we op het Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee (NIOZ) op Texel bijvoorbeeld kokkels bij verschillende temperaturen zodat we het effect van de watertemperatuur op de samenstelling en groei van de schelp kunnen meten (Afb. 4). We kunnen ook schelpen, tanden en skeletjes bestuderen van organismen die "wild" voorkomen in verschillende klimaten op Aarde. Die kennis kunnen we vervolgens op fossielen toepassen om nauwkeurige klimaatreconstructies te doen. Een bekende proxy die op deze manier ontwikkeld is is de verhouding van zuurstofisotopen (zuurstof-16 en zuurstof-18) in kalkskeletten. Deze wordt bepaald door de temperatuur van het zeewater en de isotopensamenstelling van dat water, en kan heel precies gemeten worden in geochemische laboratoria. Daarnaast gebruiken we ook verhoudingen tussen elementen in fossielen (bijvoorbeeld magnesium/calcium) of isotopen van andere elementen (zoals koolstof, stikstof en boor).

Om te illustreren wat reconstructies uit fossielen opleveren focussen we hieronder op drie voorbeelden van veelgebruikte klimaatarchieven voor reconstructies op een korte tijdschaal: koralen, tanden en schelpen.

Koralen

De meeste koralen zijn koloniën van kleine (1-10 millimeter) poliepen die verwant zijn aan kwallen en samen een uitwendig skelet bouwen in tropische zeeën. Veel koralen zijn een symbiose aangegaan met eencelligen die aan fotosynthese doen (dinoflagellaten) en leven deels van de producten van fotosynthese. Om die reden leven deze koloniën in ondiep water en leggen ze variaties in temperatuur en de chemie van het zeewater vast in hun skelet. Er zijn echter ook diepzee koralen die op de oceanbodembodem leven en ook buiten de tropen voorkomen.

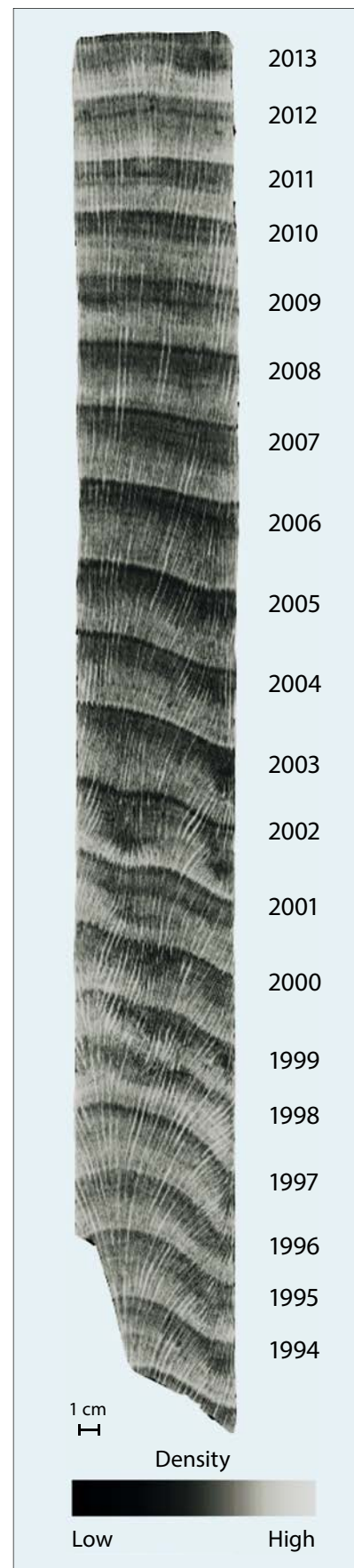
Aan koralen wordt al decennia gewerkt. Ze bouwen een van de weinige archieven van tropisch klimaat op de schaal van seizoenen, en zijn daarom een nuttige tegenhanger van reconstructies uit boomringen. De seizoenale laagjes in koralen worden prachtig duidelijk uit CT scans (Afb. 5). De veranderingen uit die groeilaagjes kunnen vervolgens precies bemonsterd worden met tandartsboortjes en proxies zoals de strontium/calcium-ratio en zuurstofisotopen worden gebruikt om verschillen tussen de seizoenen in de tropen te reconstrueren.

Een van de belangrijkste verdiensten van koraal-reconstructies is het in kaart brengen van het klimaatfenomeen El Niño Southern Oscillation (ENSO). Dit is een schommeling in de luchtdruk en oceaanstroming in de tropische Grote Oceaan die een soort wip-wap effect teweeg brengt tussen perioden waarin het water voor de kust van Peru warmer is dan gemiddeld (El Niño) en perioden waarin het kouder is (La Niña) met daartussen periodes met gemiddelde condities. De (vaak rampzalige) gevolgen van deze schommelingen worden wereldwijd gevoeld, voornamelijk door het voorkomen van overstromingen en droogte. El Niño's komen ongeveer eens in de 2 tot 8 jaar voor en zijn lastig te voorspellen. Tropische koralen zijn extreem gevoelig voor de temperatuurveranderingen veroorzaakt door ENSO en worden dus succesvol ingezet om het fenomeen over de laatste eeuwen te bestuderen.

Koralen komen al voor sinds het Cambrium (~535 miljoen jaar geleden) maar waren niet altijd de dominante rif-bouwers die ze tegenwoordig zijn. De moderne koralen bestaan bovendien uit het mineraal aragoniet, wat niet goed bewaard blijft op een schaal van miljoenen jaren. Vandaar dat reconstructies van echt oud klimaat met koralen zeldzaam zijn. Aangezien uitgestorven groepen koralen (bijvoorbeeld Tabulata of Rugose koralen) veel voorkomen als fossielen uit het Paleozoïcum (539-252 miljoen jaar geleden) liggen hier wellicht kansen voor de toekomst. Ook diepzee koralen bieden veel perspectief voor toekomstige reconstructies.

Tanden

De harde delen van tanden en botten bestaan uit bioapatiet, een mineraal wat voornamelijk is opgebouwd uit calcium en fosfaat maar waar ook vele andere



AFBEELDING 5. | Voorbeeld van een CT-scan waarop jaarlijkse groeilijnen in een koraalkolonie te zien zijn (uit DeCarlo & Cohen, 2017).



elementen in verwerkt kunnen worden; denk maar aan de fluor in tandpasta die het tandglazuur verstevigt. Bioapatiet is een van de hardste materialen in de biologie, vandaar dat het gebruikt wordt in delen van het skelet die veel kracht moeten weerstaan, zoals botten, tanden en schubben. Dezelfde eigenschap maakt dat het goed bewaart in fossielen. Het is dan ook een gewild materiaal voor reconstructies van klimaat en ecologie, vooral in landdieren. De veelzijdigheid van bioapatiet zorgt er onder andere voor dat botten als opslagplaats fungeren van fosfor en calcium. Dit zorgt ervoor dat de samenstelling van bot over de levensduur van gewervelde dieren constant verandert, en dat maakt het een minder ideaal klimaatarchief. Tandglazuur, aan de andere kant, is biologisch “dood” materiaal. Oftewel, het wordt eenmalig gevormd en daarna niet meer aangepast. Ook heeft het een veel dichtere structuur dan bot en het dentine in tanden, wat ervoor zorgt dat het zijn originele chemische samenstelling beter behoudt, zowel tijdens het leven als na de dood van het organisme. Voor gedetailleerde reconstructies van het landklimaat in het geologisch verleden is tandglazuur daarom meestal de beste keuze.

Er zijn twee grote nadelen aan het gebruik van fossiel tandmateriaal voor klimaatreconstructies. Ten eerste moet er meestal in fossielen geboord worden

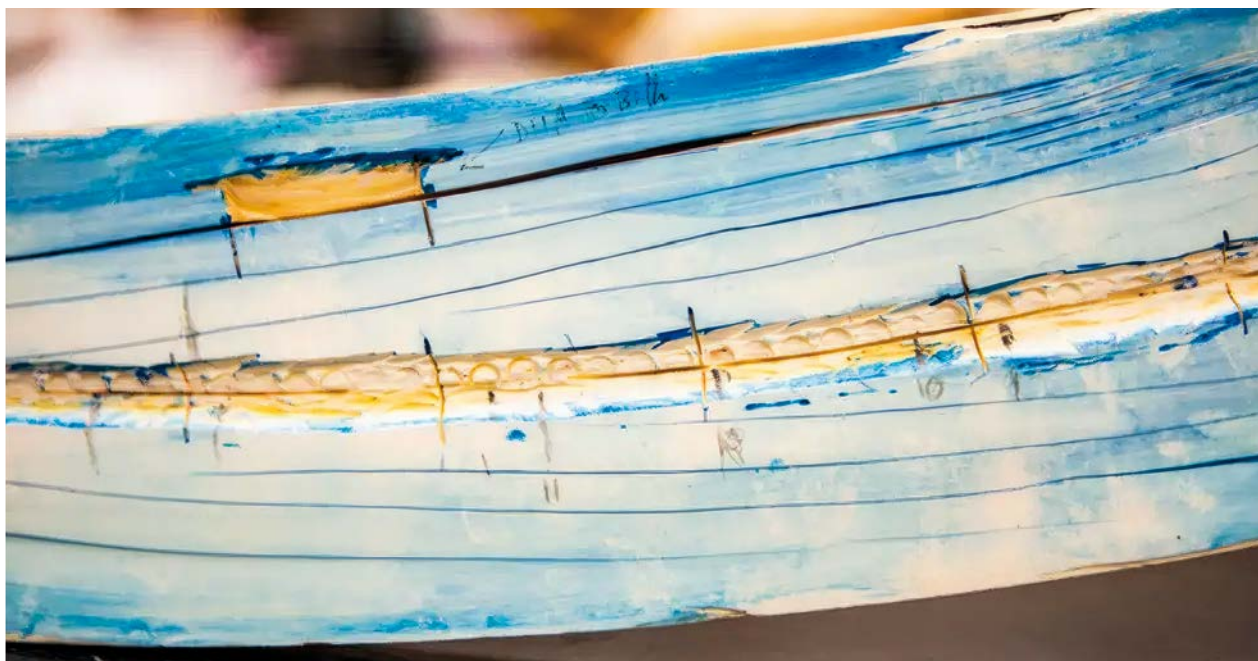
voor chemische analyses. Musea staan hier niet om te springen omdat mammoet- en dinosaurustanden vaak gewilde objecten zijn in de etalages en er minder specimens van zijn dan van, bijvoorbeeld, schelpfossielen. Ten tweede is een landgewervelde een veel complexer organisme dan een koraalpoliep. De metingen die we aan tanden doen staan dus minder direct in verbinding met het klimaat buiten het dier, en bevatten vaak een ecologische of biologische component. Eigenschappen zoals dieet, lichaamstemperatuur en gedrag spelen een belangrijke rol. Het scheiden van die biologische en klimaatinformatie in reconstructies kan lastig zijn, zeker ook omdat het veel moeilijker is (zowel technisch als ethisch) om gecontroleerde groeiexperimenten te doen met gewervelden om proxies te ontwikkelen. Desalniettemin kunnen variaties binnen tanden van dezelfde soort of van soorten met nog levende nabije verwanten zeer interessante informatie opleveren over variaties in landklimaat gedurende perioden met klimaten die anders zijn dan nu.

Mammoetslagtanden (Afb. 6) groeien continu door tijdens het leven van het dier, wat tot wel 60 jaar oud kon worden. Zo'n lange tijdserie geeft veel informatie over variabiliteit in het klimaat tijdens de ijstijden op korte tijdschaal. Een recent onderzoek toonde aan dat met metingen van verschillende isotopenratios in mammoettanden zelfs de migratieroutes kunnen worden gereconstrueerd van individuele mammoeten in Alaska tijdens de laatste IJstijd². Ook verschillen tussen seizoenen kunnen op deze manier gereconstrueerd worden.

Een ander voorbeeld uit juist een veel warmer klimaat komt uit het vroege Eoceen van Noord Amerika. Deze periode werd gekenmerkt door bijna tropische warmte tot op de Noordpool en Antarctica met daar bovenop perioden van korte, hevige opwarming (“hyperthermals”). Gedurende deze extreme perioden was het klimaat op land waarschijnlijk erg stressvol voor landdieren. Fossiele tanden laten zien dat dit in continentaal Noord Amerika zorgde voor een krimp in lichaamsgrootte in vroege zoogdieren en een grote omslag in de zoogdierevolutie, waarbij onder andere de voorouders van moderne paarden (onevenhoevigen), grazers (evenhoevigen) en primaten ontstonden. Isotopenmetingen aan tanden uit hetzelfde gebied laten zien dat er in zo'n klimaat nog altijd seizoenen bestaan en dat de zomers dus erg heet konden worden, een duidelijke waarschuwing voor de toekomst!

Schelpen

Schelpen zijn er in vele soorten en maten. De bekende schelpen die we op het strand vinden komen bijna zonder uitzondering van tweekleppigen (bivalven),



AFBEELDING 6. | Doorsnede door een mammoet slagtang met zichtbare jaarlijkse groeilijnen (dunne zwarte lijnen) en positie van samples die genomen zijn voor klimaatreconstructies (credit: J.R. Ancheta, University of Alaska Fairbanks).



een groep binnen de mollusken, waar ook de slakken en cephalopoden (intvissen en octopussen) onder vallen. Brachiopoden (armpotigen) is een groep die maar heel ver verwant is met de mollusken, maar die ook schelpjes produceert. In het geologisch verleden, vooral tijdens het Paleozoïcum (539–252 miljoen jaar geleden), was deze groep veel rijker en liet enorme aantallen fossielen achter.

De groep Mollusken is extreem succesvol en komt bijna wereldwijd voor. Ze zijn ook relatief gemakkelijk te kweken. Ik noemde eerder al de groeiexperimenten die we op het NIOZ doen om proxies te ontwikkelen. Dat maakt ze zeer geschikt voor reconstructies van klimaat op hoge resolutie. Wat veel mensen niet weten is dat sommige soorten mollusken erg oud kunnen worden. Het record staat momenteel op de noordkromp (*Arctica islandica*) waarvan een specimen genaamd “Ming” 507 jaar oud is geworden (Afb. 7). Ming, overigens zo genoemd omdat die geboren werd ten tijde van de Ming dynastie, maakt daarmee aanspraak op de titel van langstlevende individuele dier waarvan we de ouderdom precies kunnen bepalen. Die ouderdomsbepaling is zo nauwkeurig omdat bivalven jaarringen vastleggen in hun schelp. Ming werd levend opgevoerd voor de kust van IJsland en gebruikt als onderdeel van een 1357-jaar lange reconstructie van klimaat in de Noord-Atlantische Oceaan³. Hoewel Ming het onderzoek niet kon navertellen, hield de bivalve er wel een mooie Wikipedia pagina aan over.

De grootste bivalven zijn doopvontschelpen (geslacht *Tridacna*), die in de tropen voorkomen en daar gebruikt worden voor klimaatreconstructies. Doopvontschelpen groeien zo snel dat ze duidelijk meetbare dagelijkse groeihoogtes in hun schelp bouwen. Dit maakt het dateren van klimaatreconstructies tot op de dag mogelijk, een zeldzaamheid in de geologie! De reden voor het dagelijkse groeiritme in doopvontschelpen is waarschijnlijk omdat ze met symbionten leven, net als koralen, en zo afhankelijk zijn van licht voor hun voedsel. In doopvontschelpen is vastgesteld dat ze zelfs weersveranderingen kunnen vastleggen: Pieken in de ijzerconcentratie van de schelp kunnen namelijk precies gekoppeld worden aan stormen die het dier doormaakte⁴. Dit biedt ongekende mogelijkheden voor reconstructies, want het is waarschijnlijk dat dat soort weerarchieven ook in fossiele schelpen terug te vinden zijn. Als we dit hard kunnen maken hebben we voor het eerst een directe proxy voor extreem weer in het geologisch verleden.

Zelf doe ik veel onderzoek naar fossiele schelpen. Zo deed ik bijvoorbeeld tijdens mijn PhD klimaatreconstructies met behulp van rudisten, een uitgestorven groep bivalven die een soort riffen bouwden. Deze kwamen onder andere voor tijdens het Krijt tijdperk (145 tot 66 miljoen jaar geleden), de periode waarin T-rex op aarde rondliep. Samen met collega's lieten we zien dat die schelpen ook dagelijkse laagjes hadden en creëerden we met heel precieze chemische metingen een klimaatreconstructie op de schaal van uren in het Krijt⁵. Dit laat zien dat rudisten waarschijnlijk ook symbionten hadden en levert verrassend genoeg bewijs dat de Aarde sinds het Krijt langzamer om zijn as is gaan draaien: We telden namelijk 372 dagen in het jaar in de rudist. Bovendien lenen rudisten zich uitermate goed voor reconstructies van seizoenale temperatuursverschillen.

Als we nog verder terug in de tijd willen kijken dan komen we al snel uit in periodes waar bivalven fossielen zeldzamer worden. In het Paleozoïcum (539–252 miljoen jaar geleden) kunnen we mogelijk dezelfde technieken gebruiken om uit brachiopoden ook hele precieze klimaatreconstructies te doen. Enkele eerste studies tonen aan dat het mogelijk is seizoenale verschillen te bepalen uit fossiele brachiopoden uit het Karboon (ongeveer 335 miljoen jaar geleden). In samenwerking met Belgische universiteiten en musea hopen we hier ook mee aan de slag te kunnen.

Conclusie

Het doel van dit artikel is om een inkijkje te geven van wat er allemaal mogelijk is als we uit fossielen klimaatreconstructies willen doen. Deze reconstructies vullen een gat in onze kennis over klimaatverandering op korte termijn, en helpen ons om de invloed van klimaatprocessen op lange termijn op de korte



AFBEELDING 7. | Foto van “Ming” de noordkromp (© Alan Wanamaker).

tijdschaal beter te begrijpen. De technieken om dit soort hele precieze reconstructies te doen worden steeds beter, en musea hebben letterlijk kasten vol geschikte fossielen liggen. De tijd is dus rijp om hiermee aan de slag te gaan!

REFERENTIES

- Westerhold, T. *et al.* An astronomically dated record of Earth's climate and its predictability over the last 66 million years. *Science* 369, 1383–1387 (2020).
- Wooller, M.J. *et al.* Lifetime mobility of an Arctic woolly mammoth. *Science* 373, 806–808 (2021).
- Butler, P.G., Wanamaker Jr, A. D., Scourse, J.D., Richardson, C.A. & Reynolds, D.J. Variability of marine climate on the North Icelandic Shelf in a 1357-year proxy archive based on growth increments in the bivalve *Arctica islandica*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 373, 141–151 (2013).
- Yan, H. *et al.* Extreme weather events recorded by daily to hourly resolution biogeochemical proxies of marine giant clam shells. *Proceedings of the National Academy of Sciences* (2020).
- de Winter, N.J. *et al.* Subdaily-scale Chemical Variability in a *Torreites Sanchezii* Rudist Shell: Implications for Rudist Paleobiology and the Cretaceous Day-Night Cycle. *Paleoceanography and Paleoclimatology* 35, e2019PA003723 (2020).

