

Klimaatveranderingen in het verleden een boodschap voor de toekomst

De mogelijkheid dat door de mens veranderingen optreden in het klimaat houdt wetenschappers al decennia lang bezig. Velen verwachten dat in de komende eeuw de temperatuur op Aarde zal toenemen met enkele graden Celsius. Dit wordt toegewezen aan de toename van het gehalte aan kooldioxide en andere gassen in de atmosfeer: het versterkte broeikas-effect. Naast deze broeikasgassen zijn er echter andere factoren die een rol spelen in het klimaat. Welke zijn dan deze drijvende krachten? Welke rol spelen zij in klimaatveranderingen? Hoe snel voltrekken zich de veranderingen en wat kan dit alles betekenen voor de toekomst?



Verleden: toekomst?

Ren Isarin,
Hans Renssen
en Jef Vandenberghe

Een manier om deze en andere vragen te kunnen beantwoorden, is het maken van zogenaamde klimaatreconstructies. Reconstructies van vroegere klimaten, paleoklimaten, zijn gebaseerd op allerlei geologische verschijnselen (rivieren, zandduinen, gletsjers) en ecologische gegevens (fossiele resten van insecten, stuifmeelkorrels en fossiele bladeren van planten en bomen). Ook experimenten met behulp van computermodellen geven veel onontbeerlijke informatie over het paleoklimaat. Door de modeluitkomsten te vergelijken met de resultaten van de reconstructies is het mogelijk de veranderingen in temperatuur, neerslag en windrichting te bepalen. Niet zo heel lang geleden ging in Nederland de gemiddelde winter temperatuur van -20 graden Celcius (Siberische temperaturen!) naar ongeveer 0 graden C (Nederlandse temperaturen), en dat in ongeveer tien jaar! Reden genoeg om eens te

gaan kijken naar die periode uit het geologisch verleden van Europa waarin dergelijke veranderingen in de temperatuur plaatsvonden. Maar eerst bekijken we hoe klimaatreconstructies tot stand komen en hoe het modelleren van het klimaat in zijn werk gaat. We beperken ons hierbij tot de temperatuurveranderingen en laten de veranderingen in neerslag en windrichtingen buiten beschouwing.

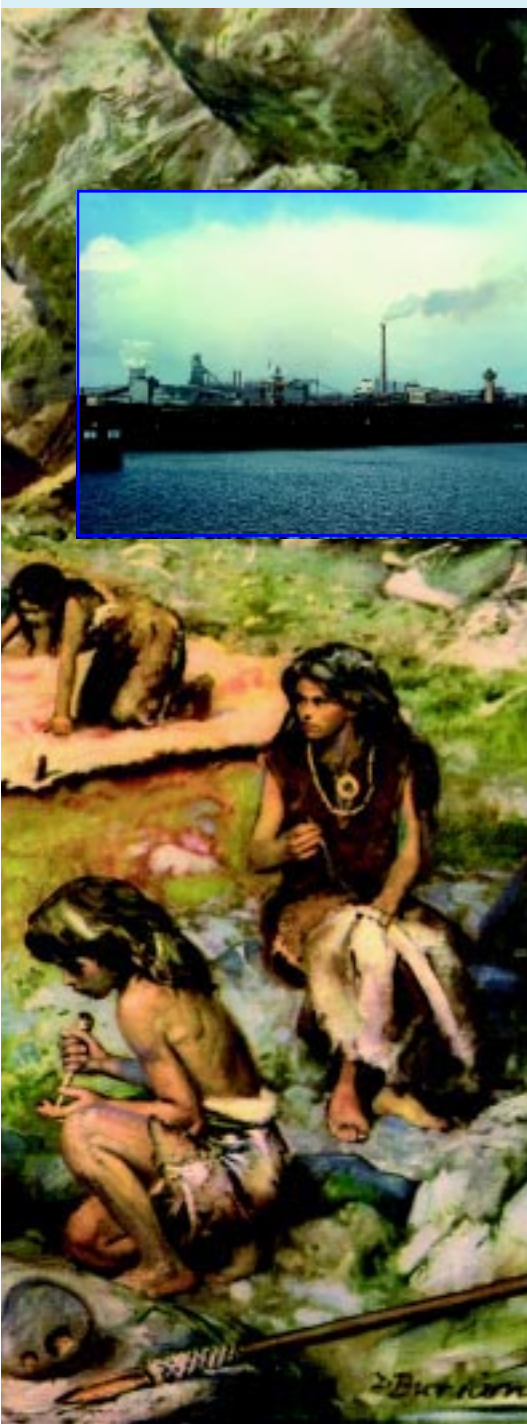
Klimaatreconstructies

Het principe achter klimaatreconstructies is dat het verleden de sleutel kan zijn tot de toekomst. Als we iets willen weten over het weer of het klimaat van, laten we zeggen, de eerste dertig jaar van de vorige eeuw, kunnen meetreeksen van het KNMI in De Bilt ons de gewilde informatie verschaffen. We zoeken dus gewoon op hoe koud, warm, nat of droog het was. Echter hoe verder we teruggaan in de tijd des te moeilijker wordt het gegevens over het klimaat te vinden. Reconstructies zijn gebaseerd op gegevens die ons indirect iets vertellen over het klimaat van vroeger. Deze indirecte gegevens worden met de Engelse term proxies, enkelvoud proxy aangeduid. Van voor het begin van de 18e eeuw bestaan er eigenlijk geen systematische waarnemingen. Voor de middeleeuwen kunnen we informatie halen uit oude bronnen van bijvoorbeeld wijn-oogsten of journalen van dijkgraven, waarin hoge waterstanden of ijsgang in de rivieren zijn beschreven. Uit de schilderijen van de oude Hollandse meesters zou je kunnen opmaken dat de winters strenger waren dan nu! Ook een bron van informatie. Al deze waarnemingen geven echter eerder extreme situaties aan dan dat we een beeld krijgen van de gemiddelde situatie. Als we nog verder terug gaan, naar perioden voordat er geschreven werd, zullen we de

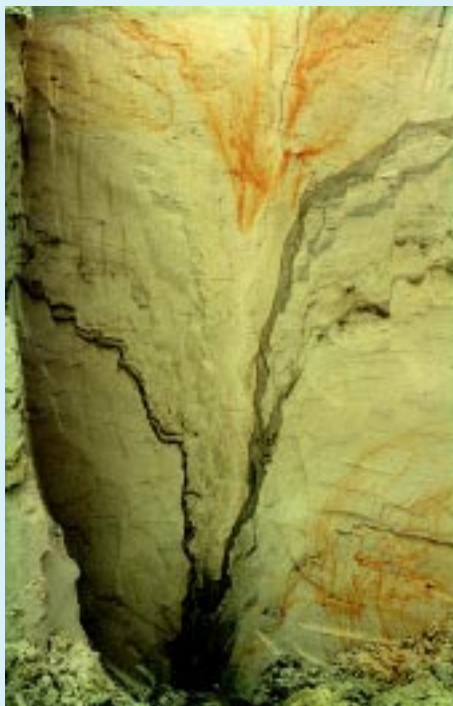
Bij het reconstrueren van klimaten uit vroegere periodes hoeven we geen rekening te houden met -negatieve-menselijke invloeden, maar des te meer met die van de moderne mens zoals de inzetfoto laat zien. Illustr./foto arch.ACS

Dit artikel is het derde deel in een serie van tien artikelen, waarin in de komende nummers van Mens & Wetenschap verschillende aspecten van het klimaatprobleem aan de orde komen. Voor meer informatie kunt u contact opnemen met het ProgrammaBureau NOP, postbus 1, (pb59), 3720 BA Bilthoven. Tel.030-2743211, fax 030-2744436, www.nop.nl

Het in dit artikel beschreven onderzoek is gefinancierd door het Nationaal Onderzoek Programma Mondiale Luchtverontreiniging en Klimaatverandering (NOP). Ren Isarin werkt thans bij de Projectgroep Archeologie Betuweroute en HSL-Zuid. Hans Renssen is verbonden aan de Universiteit Catholique de Louvain in België en Jef Vandenberghe is werkzaam bij de Faculteit der Aardwetenschappen van de Vrije Universiteit Amsterdam.



informatie moeten halen uit geheel andere bronnen. We komen dan op het werkterrein van kwartairgeologen, fysisch geografen en paleoecologen. Kwartairgeologen en fysisch-geografen houden zich met name bezig met het levenloze, ofwel abiotische deel van de Aarde: de bodem, rivieren, sedimenten. Het gaat daarbij vooral om wat er gebeurd is in de afgelopen 1,6 miljoen jaar: het Kwartair. In deze periode wisselden koude ijstijden en warme tussenijstijden zich af. Een belangrijke geologische klimaatproxy zijn bijvoorbeeld periglaciaire verschijnselen, welke zijn ontstaan als gevolg van het bevroren en weer dooien van de bodem. Je kunt deze als een fossiel in de bodem aantreffen. In Figuur 1a zie je zo'n periglaciaal verschijnsel, een fossiele ijswig gevonden in Twente. Een ijswig ontstaat doordat in de winter door strenge vorst de bodem openscheurt. Vervolgens komt er water in de scheur terecht in de zomer, dat direct bevroert doordat de ondergrond het gehele jaar door bevroren is (permafrost). Dit proces herhaalt zich waardoor de ijswig almaar breder wordt (Figuur 1b). Het mooie is dat zo'n ijswig alleen kan ontstaan als de gemiddelde jaartemperatuur beneden de -8 graden Celcius komt. In de winter moet de temperatuur onder de -20 graden C komen om de bodem te laten openscheuren. Vinden we een fossiele ijswig in de bodem dan weten we dat vroeger de klimaatomstandigheden waren zoals nu in Alaska en Siberië. Naast de ijswigen zijn er andere periglaciaire verschijnselen die goed als een temperatuurindicator kunnen worden gebruikt. Paleoecologen gebruiken voor hun reconstructie juist het vroegere leven aan het aardoppervlak. Sommige planten en insecten hebben een bepaalde temperatuur nodig in de zomer/voorjaar om te kunnen voortplanten. Je kunt ze dus als een soort biologische thermometer zien. Een goed voorbeeld is de grote lisdodde (*Typha latifolia*), een waterplant die zomertemperatuur nodig heeft van 13 graden C. De relatie tussen temperatuur en aanwezigheid van een soort geldt voor de huidige situatie en we gaan ervan uit dat dit vroeger ook zo was. Wanneer de paleoecologen in oude afzettingen de zaden of stuifmeelkorrels (Figuur 2) vinden van deze plant dan weten ze dat het in de zomer in ieder geval 13 graden C was. Andere plantensoorten die gebruikt worden zijn de jeneverbes (*Juniperus communis*), duindoorn (*Hippophae rhamnoides*), witte waterlelie (*Nymphaea alba*), en hazelaar (*Corylus avellana*). Je ziet dus dat het heden gebruikt wordt bij de reconstructie van het verleden. Tabel 1 laat de verschillende bronnen, of proxies zien en de klimaatparameters die je ermee kunt reconstrueren. Juist een combinatie van al deze bronnen levert een betrouwbare



Figuur 1a: fossiele ijswig van ongeveer 18.000 jaar oud, gevonden in Twente. Als het ijs uiteindelijk gesmolten is zijn de zandlagen ingezakt.

reconstructie op. Voorwaarde daarbij is wel dat we kunnen achterhalen hoe oud de ijswigen, duinen, kevers en stuifmeelkorrels zijn.

Klimaatmodellen

Een andere methode is het nabootsen (of simuleren) van klimaatverandering in een



Figuur 1b: actieve ijswig uit Canada: de wigvorm en het ijs in de bodem zijn duidelijk te zien.

computermodel. In dergelijke computermodellen wordt het klimaat berekend met behulp van een groot aantal natuurkundige wetten. Vergelijkbare modellen worden door het KNMI gebruikt om de weersverwachting voor de komende dagen samen te stellen. In een dergelijk klimaatmodel wordt ook beschreven hoe het aardoppervlak er uit ziet,



Een voorbeeld van een biologische thermometer is de lisdodde. Ook de hazelaar is een bruikbare indicator voor temperaturen uit het verleden. Foto's ACS

*Figuur 2: stuifmeelkorrel van de grote lisdodde (*Typha latifolia*).*

Rechts, fig.3: schematische weergave van de werking van een atmosferisch klimaatmodel.

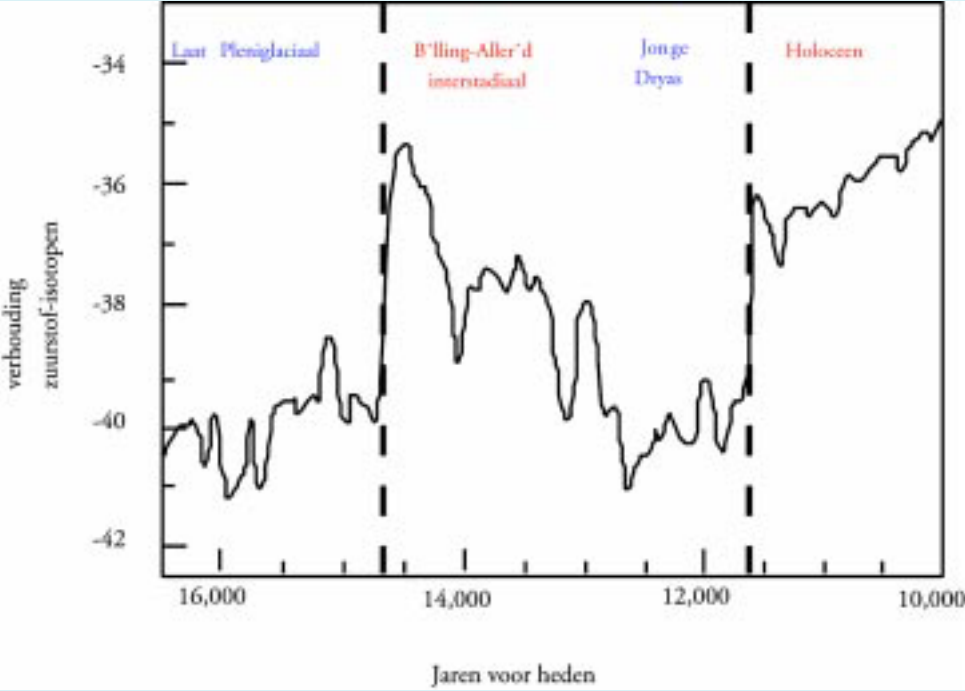
bijvoorbeeld wat de hoogte van gebergten is, waar eeuwige sneeuw ligt en hoe koud de oceaan is (Figuur 3). Dit is noodzakelijk omdat het aardoppervlak het klimaat direct beïnvloedt. Boven een koude zeestroming zal de lucht bijvoorbeeld afkoelen. Nu zag het aardoppervlak er tijdens de laatste ijstijd geheel anders uit. Zo bestonden er grote ijskappen in Noord-Amerika en Scandinavië, en was ook de oceaan veel kouder dan nu. Dergelijke veranderingen aan het aardoppervlak zijn te beschouwen als de sturende factoren van het klimaat tijdens de laatste ijstijd. Daarnaast speelden de omstandigheden in de atmosfeer een belangrijke rol, zoals de hoeveelheid inkomende zonnestraling en het gehalte aan broeikasgassen. Door nu alle sturende factoren aan een klimaatmodel op te geven, is het mogelijk om het klimaat van, bijvoorbeeld, de laatste ijstijd te berekenen.

Het einde van de laatste IJstijd

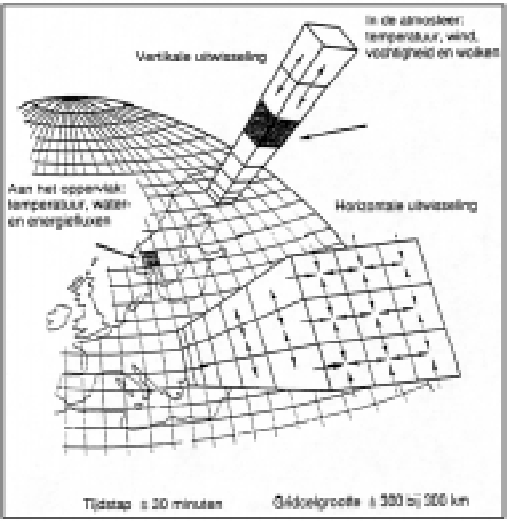
Een voor paleoklimatologen interessante periode is de overgang van de laatste ijstijd, het Weichselien genoemd, naar de warme tijd waarin we nu leven, het Holoceen. Deze overgangperiode duurde van 15.000 tot ongeveer 11.000 jaar geleden. Wat maakt deze periode nu zo interessant? Allereerst wordt deze zogenaamde Laat-glaciale periode gekenmerkt door het optreden van een aantal snelle klimaatveranderingen (Figuur 4). Hoewel er zeker moderne mensen leefden in Europa was hun invloed op het klimaat en natuurlijke omgeving gering: veranderingen die we kunnen waarnemen sluiten dus de bemoeienis van de mens uit. Sedimenten en fenomenen uit deze periode zijn veelal nog zichtbaar in het veld en liggen nog niet diep begraven onder jongere afzettingen. Als gevolg daarvan is er veel bekend en zijn voldoende gegevens beschikbaar. Als laatste is het van belang dat deze

Bron van informatie ('proxy')	Klimaatparameter
Stuifmeelkorrels / fossiele plantenresten	Zomer- en wintertemperatuur
Insekten (b.v. kevers)	Zomertemperatuur
Periglaciale verschijnselen (b.v ijswiggen)	Jaarlijkse en wintertemperatuur
Chemische indicatoren (b.v. zuurstof isotopen)	Jaarlijkse temperatuur, neerslag (sneeuw)
Veranderingen in positie van gletsjers	Temperatuur smeltseizoen (mei – september), neerslag
Land- en rivierduinen	Richting van sterkste winden (meestal tijdens depressies)
Meren	Neerslag
Rivieren	Neerslag

Tabel 1: overzicht van de bronnen van informatie of 'proxies' die gebruikt kunnen worden bij reconstructies van vroegere, prehistorische klimaten.



Figuur 4: overzicht van veranderingen in het klimaat tussen 16.000 en 10.000 jaar geleden op basis van veranderingen in de verhouding tussen de zuurstof isotopen 18O en 16O. De waarden zijn gemeten in een ijskern, verkregen met behulp van een boring in de drie kilometer dikke ijskap van Groenland.

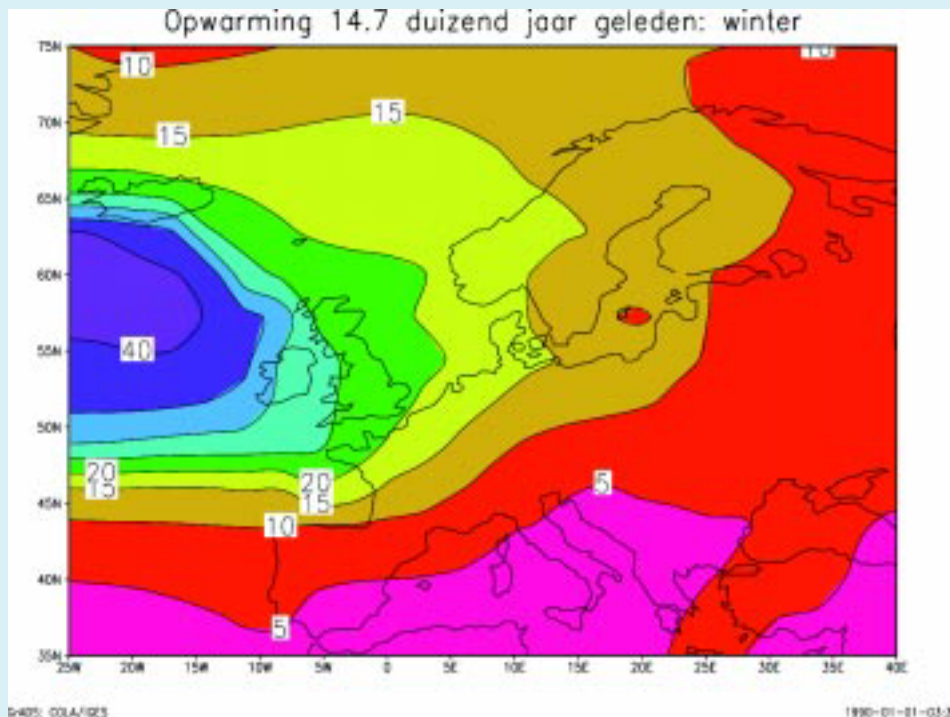


periode geologisch gezien kort geleden is en dat daardoor de koolstof-14 dateringsmethode goed werkt: we weten dus heel goed hoe oud de klimaatsindicatoren (de periglaciale verschijnselen, de planten en insecten) zijn die we nodig hebben voor de klimaatreconstructie. In Figuur 4 zie je de klimaatveranderingen weerspiegeld in een zogenaamde isotopencurve. Hierin staan de verhoudingen

tussen de zuurstof-isotopen 18O en 16O, zoals gemeten in het landijs van Groenland. Een dergelijke curve kan je beschouwen als een soort thermometer. Twee delen van de curve springen eruit, te weten rond 14.700 en 11.500 jaar geleden. Rond deze tijdstippen vonden plotselinge overgangen plaats van een koude naar een warme periode. We zullen deze twee overgangen eens nader bekijken.

Stijgende temperaturen

In het Laat Pleniglaciaal, de koude periode juist voor de eerste grote overgang, heerste er in Europa een klimaat dat lijkt op dat van West-Siberië nu. Hoewel ze op de weg terug waren, bedekten enorme ijskappen nog grote delen van noordelijk Europa. De wintertemperaturen varieerden van ca. -25 graden C aan de randen van die ijskappen, bijvoorbeeld in Noord-Engeland, Schotland en Noord-Polen, tot zeker -15 graden C in Midden-Frankrijk. Voor Nederland waren gemiddelde wintertemperaturen van ca. -20 graden C zeker geen uitzondering, terwijl we nu een waarde van ongeveer +3 graden C hebben. Het zijn met name de eerder genoemde periglaciale verschijnselen die wijzen op deze lage temperaturen. De zomertemperaturen in Europa waren minder extreem met waarden tussen noordelijk en Midden-Europa van 10 tot 15 graden C. Toch gauw zo'n 3 tot 6 graden C onder de huidige waarden! In Nederland bijvoorbeeld hebben we nu een gemiddelde zomertemperatuur van ongeveer 17 graden C. De gereconstrueerde zomertemperaturen zijn gebaseerd op het voorkomen van temperatuurgevoelige planten en bomen. Rond 14.700 jaar geleden nam de temperatuur plotseling toe. De modelexperimenten en de reconstructies laten zien dat met name de wintertemperatuur enorm toenam: zeker 15 tot 20 graden C in Noordwest-Europa (Figuur 5). Uit deze warme fase, het Blling-Allerd interstadiaal zijn vrijwel geen periglaciale verschijnselen bekend, wat erop duidt dat de gemiddelde wintertemperatuur boven of in de buurt van de -1 graad C uitkwam. De aanwezigheid van bepaalde 'warme' eikensoorten in Spanje wijst op temperaturen ruim boven het vriespunt. De stijging van de zomertemperatuur mocht er ook zijn, maar was duidelijk minder spectaculair. Planten en bomen wijzen op een toename van zo'n 5 graden naar waarden variërend van tenminste 13 graden C in noordelijk Europa, 15 graden C in Nederland tot meer dan 20 graden C in Spanje (Figuur 6). De analyse van fossiele resten van insecten (bijvoorbeeld dekschildjes) laat zelfs nog hogere temperaturen zien voor deze warme periode! Met name kevers kunnen goed gebruikt worden voor reconstructies omdat deze dieren heel gevoelig zijn voor temperatuurveranderingen. De reconstructie met behulp van de kevers komt heel goed overeen met wat de klimaatmodellen ons vertellen. Als deze kloppen dan waren in Europa de toenmalige temperaturen vergelijkbaar met die van nu. Je ziet hier overigens dat niet alle proxies hetzelfde vertellen! De tweede overgang, van de koude Jonge Dryas naar het warme Preboreaal rond 11.500 jaar geleden, laat in grote lijnen dezelfde temperatuurveranderingen zien. Deze Jonge Dryas,



Figuur 5: toename van de wintertemperatuur in Europa ongeveer 14.700 jaar geleden, nagebootst door een klimaatmodel.



Een belangrijke sturende factor in het klimaat is de Atlantische Oceaan. Foto ACS

genoemd naar het plantje Achtster (*Dryas octopetala*), dat nu nog hoog in de bergen en ver noordelijk voorkomt maar toen in Nederland heel algemeen was, wordt beschouwd als de allerlaatste fase van de laatste IJstijd. In Nederland was de bodem over grote oppervlakken permanent bevroren. Fossiele periglaciale verschijnselen die hiervan getuigen kun je soms in zandgroeven vinden. Sedimenten uit het duizend jaar durende staartje van de laatste IJstijd zijn op vele plaatsen in Nederland aangetroffen. Blijft natuurlijk de brandende vraag hoe snel de veranderingen zich voltrokken. Onderzoek aan ijskernen, sedimenten in meertjes en aan boomringen wijst erop dat de

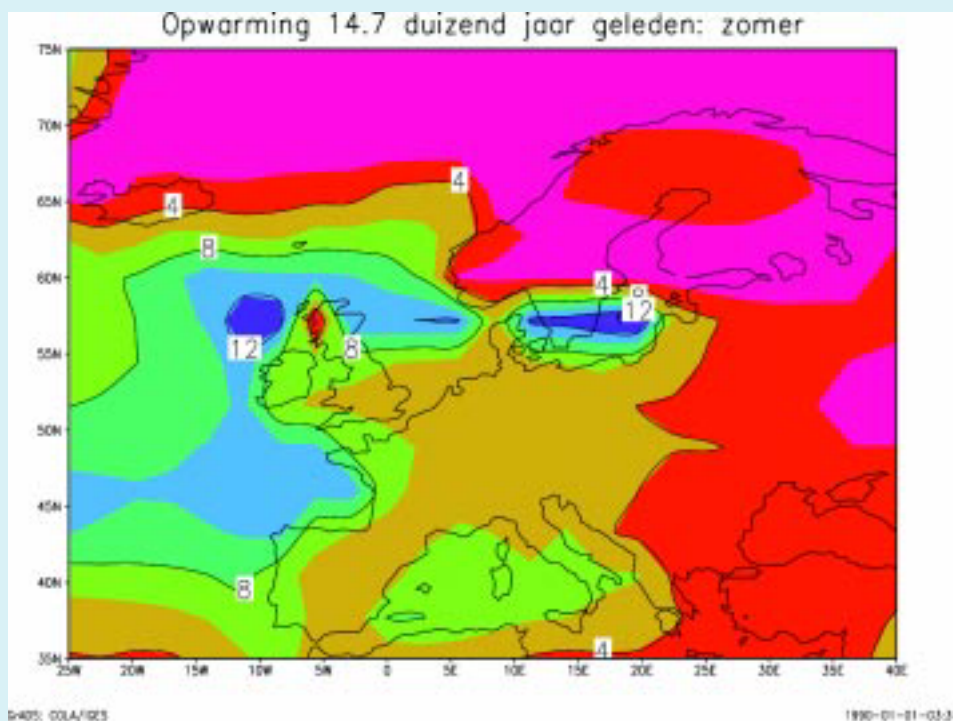
veranderingen zich binnen tien tot twintig jaar voltrokken. Deze veel gebruikte klimaatsarchieven kenmerken zich door jaargelaagdheid net als bij boomringen. Door simpelweg te tellen kon heel gedetailleerd bestudeerd worden hoe snel veranderingen in de milieus plaatsvonden.

Oorzaken voor de waargenomen klimaatveranderingen

Zoals al eerder verteld, zijn er verscheidene natuurlijke factoren of omstandigheden die het klimaat in Europa sturen. Dat is nu zo, maar dat was vroeger ook het geval. Een zeer belangrijke sturende factor is de Atlantische Oceaan en dan met name de temperatuur

Ook de hoeveelheid ijs dat in de oceanen terechtkomt als gevolg van het afkalven van ijsbergen is een sturende factor van belang. Foto Landsat USGS





Figuur 6: toename van de zomertemperatuur in Europa ongeveer 14.700 jaar geleden, nagebootst door een klimaatmodel.

van het zeewateroppervlak en de hoeveelheid zeeijs (ijsschotsen, ijsbergen) die in het noordelijk deel van de oceaan aanwezig is. In de laatste ijstijd was ook de aanwezigheid van ijskappen in Noord-Amerika en Noord-Europa een belangrijke sturende factor. Tegenwoordig vinden we deze aaneengesloten velden van eeuwig ijs nog slechts op heel kleine schaal terug in Noorwegen en IJsland. In de Atlantische Oceaan blijken zich grote, en ook zeer snelle, veranderingen te hebben voorgedaan. Tijdens de beschreven klimaatsovergangen schoof de zeeijsgrens plotseling naar het noorden op, van 50 NB (bij Ierland) naar 65 NB (bij IJsland). Deze plotselinge verschuivingen zijn waarschijnlijk veroorzaakt door abrupte fluctuaties in de sterkte van de golfstroom. Een sterke golfstroom zorgt voor de aanvoer van veel warmte, wat een relatief mild klimaat in Noordwest-Europa mogelijk maakt. Een zwakke golfstroom daarentegen, heeft een zeer koude Atlantische Oceaan tot gevolg met een veel zuidelijkere zeeijsgrens dan nu. Boven zeeijs kan de wintertemperatuur tot onder de -30 graden C dalen, terwijl boven open zee de waarde niet veel lager dan -1 graad C zal zijn.



Kevers zijn heel gevoelig voor temperatuursveranderingen en daarom goed bruikbaar voor klimaatreconstructies. Foto ACS

Het gevolg van het noordwaarts opschuiven van het zeeijs was dan ook de eerder beschreven enorme opwarming van 15 tot 20 graden C in de winter in West-Europa. In de zomer lag het zeeijs verder naar het

noorden, en kon daardoor geen dominante rol spelen. De temperatuurstoename in de zomer werd gestuurd door een aantal factoren tezamen: de hoeveelheid zonnestraling nam toe, de oceaan werd warmer en de ijskappen smolten gedeeltelijk af.

Wat leert dit onderzoek ons?

We hebben maar een deel van de resultaten kunnen laten zien, maar een paar dingen kunnen we al wel concluderen. Met behulp van verschillende bronnen of proxies kunnen paleoklimaten worden gereconstrueerd. De vergelijking hiervan met de uitkomsten van modelexperimenten maakt het mogelijk de mechanismen achter klimaatveranderingen in het verleden te bestuderen. Er zijn duidelijk veel factoren die het klimaat beïnvloeden, waarbij de Atlantische Oceaan een hoofdrol speelt. Het klimaat is het gevolg van een samenspel van deze factoren. Een verandering in „n van deze sturende factoren heeft weer gevolgen voor andere factoren. Het klimaat houdt daarbij meestal geen gelijke tred bij de veranderingen, maar kan plotseling omslaan en in een andere situatie of modus terechtkomen; zogenaamde niet-lineaire veranderingen. Zo'n nieuwe modus kan honderden jaren duren maar ook snel en abrupt tot een einde komen. Het is dus belangrijk nauwkeurig te weten hoe het klimaatsysteem werkt en onder welke omstandigheden het uit zijn evenwicht wordt gebracht.

Wat kunnen we verwachten in de toekomst?

Is het verleden een model voor de toekomst? Waarschijnlijk niet. De situatie aan het einde van de laatste IJstijd verschilt zeer van de huidige situatie: de ijskappen zijn al vrijwel gesmolten en grote uitbreidingen van het zeeijs hoeven we niet direct te verwachten. Maar, de bestudeerde periode toont wel aan dat oceaanstromingen niet-lineair gedrag kunnen vertonen. Bovendien suggereren modelstudies van andere onderzoekers dat het versterkte broeikaseffect de Golfstroom kan verzwakken, wat ons een aanzienlijk kouder klimaat zou opleveren. Verder onderzoek is echter noodzakelijk om meer zekerheid te krijgen over wat ons te wachten staat.

Klimaatveranderingen