

University of Groningen

Isotopen schrijven geschiedenis

Meijer, Harro A.J.

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version

Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:

2000

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):

Meijer, H. A. J. (2000). *Isotopen schrijven geschiedenis: de kunst van het lezen*. s.n.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

Isotopen schrijven geschiedenis

De kunst van het lezen

Rede uitgesproken ter gelegenheid van de aanvaarding
van het ambt van hoogleraar in de Isotopenfysica aan de
Rijksuniversiteit Groningen op dinsdag 18 januari 2000

door

Dr. Harro A.J. Meijer

Druk: Universiteitsdrukkerij Groningen

Mijnheer de Rector Magnificus, Dames en Heren,

Aan het begin van dit nieuwe millennium neem ik U mee terug in de tijd, om te beginnen naar 1893, naar een studie van de Zweed Svante Arrhenius betreffende het aardse klimaat. Men was in 1893 al op de hoogte van het feit dat het verleden zeer koude perioden, zogenaamde ijstijden, heeft gekend, afgewisseld door warmere perioden, de tussen-ijstijden. Arrhenius deed een poging deze grote variaties in het aardse klimaat te verklaren.

Hij zocht een mogelijke verklaring in de concentratie van stralings-absorberende gassen in de atmosfeer, de gassen die tegenwoordig algemeen bekend staan onder de naam "broeikasgassen". Hij concentreerde zich op koolstofdioxide, afgekort CO₂. Hij berekende dat 50% verlaging of verhoging van de CO₂-concentratie afkoeling respectievelijk opwarming van ruim 3 °C teweeg zou brengen. Naar de huidige inzichten is dit getal duidelijk te hoog, maar gezien de summiere gegevens die Arrhenius tot zijn beschikking had, is zijn resultaat toch een formidabele prestatie te noemen.

Nog vermeldenswaardiger is zijn nevenresultaat: Arrhenius noemde als eerste de mogelijkheid van menselijke beïnvloeding van de CO₂-concentratie in de atmosfeer, en daarmee van het klimaat van deze aarde. Deze vermelding is echt opmerkelijk: het verbruik van fossiele brandstoffen, eigenlijk nog uitsluitend steenkool, was in Arrhenius' tijd vergeleken met het huidige verbruik bijna verwaarloosbaar. En toch had hij al oog voor de gevolgen van deze massale verbranding op de concentratie van CO₂ in onze aardse atmosfeer, en de mogelijke gevolgen daarvan. Dit maakt Arrhenius tot de geestelijke vader van alle broeikas-effect-studies. De term "broeikas-effect" werd overigens al in 1827 gelanceerd, door Fourier.

De laatste decennia van de afgelopen eeuw is onze kennis op het gebied van klimaatgeschiedenis, klimaatbeïnvloeding en broeikas-effect enorm vooruit gegaan, hoewel het niveau nog steeds niet tevredenstellend is. Ik hoop U in deze openbare les duidelijk te maken hoe het Centrum voor IsotopenOnderzoek aan dit soort studies heeft bijgedragen, en hoe ik van plan ben deze bijdragen voort te zetten.

Dit alles vergt in de eerste plaats een uitleg over het verschijnsel "isotopen". Velen van U hebben geen natuurwetenschappelijke achtergrond. Ik houd de uitleg daarom simpel.

Alle materie om ons heen is opgebouwd uit atomen. Deze atomen bestaan op hun beurt uit een zware kern met daarom heen cirkelend een aantal elektronen. In die atoomkern zitten twee verschillende soorten deeltjes, protonen en neutronen. Het aantal protonen bepaalt met welke stof we te maken hebben: zijn het er acht, dan hebben we te maken met zuurstof, koolstof heeft er 6, en lood, bijvoorbeeld, heeft maar liefst 82 protonen.

De neutronen in de kern doen er als het ware niet zo toe. Hun rol is om de kern van het atoom bij elkaar te houden, oneerbiedig gezegd: de neutronen zijn het plaksel van de atoomkern. En de hoeveelheid plaksel komt er niet precies op aan. Zo treffen we hier op aarde voornamelijk zuurstof aan met 8 neutronen, net zoveel als protonen. Deze kern heeft dan, zeggen we simpelweg, massa 16. Maar, zuurstof met 9 en zelfs met 10 neutronen komt ook voor. Deze varianten gedragen zich chemisch hetzelfde, ze zijn alleen zwaarder: we spreken van zuurstof-17 en zuurstof-18, en de serie zuurstof-16, zuurstof-17 en zuurstof-18 heten isotopen van zuurstof.

De drie genoemde varianten van zuurstof komen van nature overal op aarde voor. Het meest voorkomende, zuurstof-16, neemt wel bijna 99,8% van alle zuurstof voor z'n rekening, het restant bestaat voornamelijk uit zuurstof-18; zuurstof-17 is nog zeldzamer. Ook andere elementen kennen een scheve verdeling: bijvoorbeeld van de koolstof hier op aarde is bijna 99% koolstof-12, slechts 1 procent is koolstof-13. Ook van koolstof komt nog een derde isotoop op aarde voor, koolstof-14, maar dit isotoop bewaar ik even voor verderop.

De naam van mijn instituut, het Centrum voor IsotopenOnderzoek (of afgekort CIO), doet U vermoeden dat deze isotopen zoiets bijzonders in zich dragen, dat het de voortdurende inspanningen van een gespecialiseerde onderzoeksgroep rechtvaardigt. Welnu, Uw vermoeden is meer dan juist. Het gebruik van isotopen, in de samenstelling zoals ze van nature op aarde voorkomen, maar ook in kunstmatig sterk veranderde samenstellingen, strekt zich uit over vrijwel alle exacte wetenschapsgebieden, en zelfs ook daarbuiten. Ik zal mij hier dan ook sterk moeten beperken tot die drie toepassingen, die steeds meer de kernactiviteiten van het CIO zijn gaan vormen - zonder overigens onze grote breedgang, van archeologie, geologie, hydrologie, bio-medische toepassingen, bodemvervuilingsstudies, voedingsleer en ga zo maar door te kort te doen, laten vertegenwoordigers van deze vakgebieden hier aanwezig zich daar vooral niet ongerust over maken.

Maar goed, vanmiddag zal ik de cruciale rol van isotopen beschrijven bij de bestudering van de klimaatgeschiedenis van onze aarde, en nauw daarmee samenhangend de huidige menselijke versterking van het broeikaseffect en

mogelijke invloed daarvan op ons huidige klimaat.

Ik begin mijn beschrijving met water. Een molecuul water, H_2O , is opgebouwd uit twee waterstofatomen (H) en één zuurstofatoom (O). Zoals net geconstateerd komt zuurstof in verschillende isotopen voor (waterstof ook trouwens). Al deze isotopen kunnen water vormen, en al dat water gedraagt zich chemisch identiek. Toch is er een gering verschil, dat veroorzaakt wordt door het feit dat bijvoorbeeld een zuurstof-18 bevattend watermolecuul zwaarder is. Dat leidt ertoe dat zuurstof-18 bevattende watermoleculen langzamer zijn. En dat heeft weer tot gevolg dat zuurstof-18 water net ietsje makkelijker condenseert dan zuurstof-16 water. Die verschillen zijn klein. In de waterdamp in de lucht in dit vertrek zit een percentage van 0,200% zuurstof-18 houdend water, in het water dat hier op de ramen condenseert, is dat percentage opgelopen tot ongeveer 0,202%. Een dergelijk verschil wordt overigens in mijn tak van wetenschap als groot beschouwd, met onze moderne meetapparatuur kunnen we een honderdste van dit verschil nog goed onderscheiden.

Alle neerslag op aarde is welbeschouwd afkomstig van verdampend oceaانwater. Het grootste deel van deze verdamping vindt plaats in de tropen, daar is een groot oceaانoppervlak, en het is er warm. Laten we nu eens een pakket lucht met waterdamp erin volgen op zijn reis vanaf die tropische oceaان over de aarde tot op één van de polen. Op deze reis zal het luchtpakket geleidelijk afkoelen. Aangezien koudere lucht minder waterdamp kan bevatten zal een gedeelte van de waterdamp condenseren: er valt regen. Die regen bevat relatief iets meer zuurstof-18 water, zodat wat aan waterdamp overblijft minder zuurstof-18 water bevat dan voor de regenbui, ofwel, zeggen we kortweg: de waterdamp is lichter geworden.

Op zijn weg naar de polen zal dit proces zich voortdurend herhalen. Bij iedere regenbui verliest de achterblijvende waterdamp weer een beetje meer zuurstof-18. Uiteindelijk valt het laatste restje waterdamp, nu relatief erg licht geworden, als sneeuw neer op de polen, of op Groenland. Ik herhaal nog maar eens dat de effecten slechts zeer gering zijn; voor meting ervan is gespecialiseerde apparatuur noodzakelijk.

Twee facetten maken dit proces geweldig goed bruikbaar voor de bestudering van de klimaatgeschiedenis van onze aarde. Ten eerste hangt de mate van het zuurstof-18 verlies op de weg van evenaar naar pool af van het temperatuurverschil tussen die plekken: in de winter is het zuurstof-18 verlies groter dan in de zomer. Dat is trouwens ook zo bij bijvoorbeeld Groningse regen: in de winter is deze duidelijk "lichter" dan in de zomer, hoewel U dat

verschil vast nog nooit gemerkt hebt.

Verschillen treden niet alleen op als gevolg van seizoenswisselingen. In koudere jaren is het zuurstof-18 verlies in z'n geheel ook groter dan in warmere. Kortom: de zuurstof-18 inhoud van neerslag, op de polen maar ook elders, is een directe maat voor het heersend klimaat! En dan komt het tweede belangrijke facet: de grote ijskappen op Antarctica en Groenland vormen door hun dikte en het feit dat het er altijd vriest, een gigantische opeenstapeling van de sneeuw van de afgelopen tienduizenden jaren. In dit natuurlijk archief hebben de isotopen van water als het ware de klimaatgeschiedenis van de aarde geschreven.

Inmiddels is een aantal van dit soort archieven open geboord en "gelezen". Grafieken met de resultaten hiervan zijn adembenemend mooi. In vogelvlucht: 130.000 jaar geleden was het klimaat vergelijkbaar met nu, 120.000 jaar geleden werd het veel kouder: de laatste ijstijd begon. Deze duurde ruim 100.000 jaar. 15.000 jaar geleden werd het schoksgewijs weer veel warmer, en deze warme periode houdt nu nog steeds aan. Behalve deze grote klimaatveranderingen is ook een veelheid aan kleinere schommelingen te zien.

De kunst van het lezen van dit klimaatarchief zijn wetenschappers niet zomaar machtig geworden. De technologische moeilijkheden bij het opgraven van zo'n archief zijn enorm: uit de ijskappen, die een dikte van ruim 3 kilometer kunnen bereiken - dat is vanaf hier tot mijn werkkamer op het Zernikecomplex -, moet een zuil van ijs worden geboord, zonder dat de holle boor klem komt te zitten in de steeds dieper wordende boorschacht, en vooral zonder dat er smelt optreedt of de ijslaagjes op een andere manier versmeren. En dit alles natuurlijk onder barre weersomstandigheden. Het boren van zo'n diepe ijskern is daardoor een kostbare, jaren durende onderneming.

Maar, als de hele kern dan, in drieduizend stukjes van ieder een meter, naar de bewoonde wereld is overgebracht begint het eigenlijke "lezen": de isotopeninhoud van het ijs moet worden gemeten als functie van de diepte in het ijs, en dan wel liefst zo gedetailleerd dat men jaar voor jaar de heersende zomer-winterverschillen kan herkennen en tellen. Voor zo'n diepe ijskern betekent dat zeker honderdduizend dunne schijfjes ijs. Van ieder van deze monsters moet de zuurstof-18 concentratie nauwkeurig bepaald worden, en liefst ook de concentratie van de zware waterstofisotoop waterstof-2, beter bekend onder de naam deuterium. Voor dit deuterium geldt een soortgelijk verhaal als voor zuurstof-18, maar wel met enige markante verschillen. De resultaten voor de zuurstof-18- én de deuterium-concentratie samen geven daardoor een nog vollediger beeld van de in de ijskap opgeslagen sneeuw, en

daarmee van de klimaatgeschiedenis.

Het meten van zuurstof-18 in water kan met behulp van speciale massaspectrometers in een behoorlijke mate geautomatiseerd worden. Op die manier kan een gespecialiseerd laboratorium zeker 200 analyses per etmaal verrichten. Nog steeds duurt het volledig doormeten van zo'n diepe ijskern bijna twee volle jaren, maar het laboratorium kan op zo'n manier de booractiviteiten bijhouden. Voor deuterium is dat allemaal veel lastiger.

Het was op dit terrein, de isotopenanalyse van grote aantallen watermonsters uit ijskernen, dat wij binnen het CIO grote nieuwe mogelijkheden zagen. De plaats van het CIO binnen een bij uitstek fysische omgeving, gecombineerd met mijn achtergrond vanuit de atoom- en molecuulfysica, hebben geleid tot het uitvoeren van een ambitieus plan om met behulp van optische methoden in één klap de zuurstof-18 én de deuterium concentraties in water te meten.

We maken dan gebruik van nog een opvallend verschil tussen water met de verschillende isotopen, namelijk de optische eigenschappen. Watermoleculen kunnen licht van een heel specifieke golflengte absorberen. Welke golflengte dat precies is, hangt af van welke isotopen het watermolecuul vormen: water met een zuurstof-18 atoom absorbeert bij een andere golflengte dan gewoon water, en met een deuterium atoom weer ergens anders.

Met behulp van licht uit een zeer stabiele bron, een laser, kunnen we deze golflengten aftasten. Aan de reactie van de waterdamp die we belichten, dus hoeveel licht er bij welke golflengte geabsorbeerd wordt, kunnen we de concentraties zuurstof-18 en deuterium isotopen meten.

Het project om deze nieuwe laser-meetmethode te ontwikkelen is voorbereid in nauwe samenwerking met de Molecuulfysicagroep van Prof. Jörg Reuss in Nijmegen, in het bijzonder met Nico Dam. Bij het CIO is het project in handen van Erik Kerstel. Het werk heeft inmiddels een unieke methode opgeleverd, en de eerste toepassingen worden komend jaar verwacht. Vanaf nu ligt er voor jaren werk.

Het project is duidelijk opgezet met het oog op het sneller volledig analyseren van de enorme massa monsters uit ijskernonderzoek. Maar natuurlijk kan de apparatuur in principe overal daar worden ingezet, waar nauwkeurige en volledige isotoopanalyse van water verlangd wordt. Twee andere isotopenprojecten met behulp van de laseranalyse die nu "onderweg" zijn, hebben respectievelijk te doen met waterdamp uit de hogere atmosfeer, en met biologisch onderzoek naar gedrag van vrij levende dieren. Dit laatste werk wordt uitgevoerd met en door Henk Visser, die voor de helft van zijn tijd aan het CIO is verbonden, en de andere helft aan de biologische

laboratoria van onze universiteit te Haren.

Maar, laat ik terugkeren tot de ijskernen. Zeer veel ijskernmateriaal, opgeslagen in vrieskelders, is nog slechts gedeeltelijk op isotopen geanalyseerd. Vrijwel overal is alleen zuurstof-18 gemeten, en ontbreken de deuteriummetingen jammer genoeg. Ons eerste actiepunt wordt dan ook, de klimatologisch meest interessante gedeelten van een aantal ijskernen met deuteriummetingen te gaan aanvullen. Onze samenwerking met de glaciologen uit Kopenhagen verschaft ons toegang tot het kostbare ijskernmateriaal. Verder staat er, in samenwerking met het Instituut voor Marien en Atmosferisch onderzoek van de Universiteit Utrecht, werk aan nieuwe Antarctische ijskernen op het programma.

IJskappen zijn prachtige klimaatarchieven, maar geen perfecte. Allerlei zaken kunnen het netjes laagje voor laagje opslaan van neerslag in de ijskap verstoren. Verder heeft de isotopesignatuur van neerslag altijd zijn lokale eigenaardigheden. Hoogtevariatie van de ijskap over de duizenden jaren, bijvoorbeeld, leidt tot isotoopvariaties die niet direct met het klimaat samenhangen. Tot slot is het logisch, maar nadelig, dat ijskernen alleen de klimaatgeschiedenis vasthouden in polaire gebieden. Ook dat geeft een eenzijdig beeld.

Houd mij ten goede: ik bedoel allermindst het belang en de schoonheid van de ijskern-klimaatarchieven onderuit te halen, ik probeer alleen maar aan te geven dat geen archief perfect is, zelfs geen natuurlijk archief, geschreven door natuurlijke isotoopeffecten. U zou de situatie kunnen vergelijken met een buitenaards wezen dat door archiefonderzoek de Nederlandse geschiedenis wil leren kennen. Hij leert daartoe onze taal lezen, en vindt op zijn zoektocht als eerste het complete archief van laten we zeggen het Groninger Kerkblad. Dat is geen slechte vondst, want dit bescheiden blad is de oudste nog steeds verschijnende periodiek in Nederland, onafgebroken teruggaand tot 1725. Onze buitenaardling is geweldig enthousiast over zijn vondst, maar krijgt natuurlijk een sterk lokaal gekleurd en maatschappelijk eenzijdig beeld van de totale Nederlandse samenleving. Hij heeft geen mogelijkheid de grote gebeurtenissen in de geschiedenis te scheiden van die gebeurtenissen die voor het publiek van het Groninger Kerkblad weliswaar belangrijk waren, maar op een grotere schaal niet veel betekenden. Dit laatste is de analogie met de lokale effecten in onze ijskernen.

De buitenaardling heeft andere archieven nodig om te vergelijken met zijn Groninger Kerkblad reeks. Zijn tweede vondst is bijvoorbeeld het archief van het personeelsblad van Philips, tot voor enkele jaren de Philips Koerier geheten. Dat blad is, op zijn eigen manier, eveneens eenzijdig.

Pas nu onze buitenaardse bezoeker over twee onafhankelijke archieven beschikt, ieder met z'n eigen eigenaardigheden, kan hij gaan onderzoeken welke gebeurtenissen van algemeen belang zijn, en welke slechts van lokaal of van deelbelang. Om nog even bij ons voorbeeld te blijven: het zal hem snel opvallen dat de Tweede Wereldoorlog een gebeurtenis van algemeen belang is, in beide archieven wordt er uitgebreid gewag van gemaakt. Evenzo zal hij bijvoorbeeld in beide bladen, indirect, de geldontwaarding van de jaren zeventig aantreffen, maar de komst van een nieuwe predikant naar Groningen-Zuid, en de viering van het vijfentwintig jarig Philips-jubileum van een zekere B. Meijer uit Soest in 1971, blijken slechts van lokaal belang.

Het zou amusant zijn om het voorbeeld nog verder uit te spitten, maar ik keer toch terug naar de soort archieven waar ik het werkelijk over wil hebben. Behalve de ijskernen zijn er gelukkig nog andersoortige natuurlijke klimaatarchieven op aarde bewaard. Met een tweede soort klimaatarchief houdt het CIO zich eveneens bezig, namelijk veenafzettingen. Veenlagen zijn in feite niets anders dan de opeenstapeling van plantenresten, vaak gedurende vele duizenden jaren. Plantenresten uit een verder verleden liggen uiteraard dieper dan de meer recente resten. Een veenlaag is dus welbeschouwd een plantengroei-archief. Het is vooral het minst vergankelijke plantaardige materiaal, het stuifmeel, dat de geschiedenis, de begroeiingsgeschiedenis in dit geval, in detail vasthoudt. Het lezen van een dergelijk archief komt neer op het determineren en tellen van de in het veen opgeslagen stuifmeelkorrels. Wanneer men nu bijvoorbeeld constateert, dat op een diepte van 2 meter voornamelijk stuifmeel van grassen en kruiden voorkomt, terwijl een halve meter minder diep veelal stuifmeel van eikenbomen wordt aangetroffen, kan men daaruit belangrijke conclusies trekken over het klimaat in die verschillende tijden. Immers, een begroeiing van grassen en kruiden, dus toendra-achtig, duidt op koudere omstandigheden, terwijl loofbomen wijzen op klimatologische omstandigheden zoals tegenwoordig in Nederland. Het was dus in de tijd van die 2 meter diep aanzienlijk kouder dan een halve meter hoger. Men kan op deze manier eveneens een prachtige, gedetailleerde klimaatgeschiedenis reconstrueren.

In een veenarchief wordt het klimaat op een geheel andere wijze vastgelegd dan in een ijskern, en op andere plaatsen op aarde. Als men in beide archieven dezelfde klimaatvariaties ziet, kan men er gerust van uit gaan dat het hier een wereldwijd klimaatfenomeen betreft.

Er is wel een probleem: in tegenstelling tot het ijsarchief is er in het veenarchief niet zomaar een indicatie van ouderdom aanwezig. Het is op dit punt dat de isotopen te hulp komen. Ik kom daartoe terug, zoals beloofd, op het al even genoemde koolstof-14 isotoop. Ook dit is een vorm van koolstof,

maar in tegenstelling tot de andere twee isotopen van koolstof die ik al genoemd heb is dit koolstof-14 niet stabiel: de kern valt na verloop van tijd spontaan uit elkaar. Koolstof-14 heet daarom radioactief.

Koolstof-14, afgekort als ^{14}C , wordt voortdurend aangemaakt hoog in de atmosfeer, onder invloed van straling uit de ruimte. Samen met de gewone koolstof komt koolstof-14 dan via de atmosferische CO_2 terecht in alle planten, en vervolgens weer in de dieren, en dus ook in ons.

Bij levende organismen is er sprake van een constante wedloop tussen het uit elkaar vallen van ^{14}C , en de aanvulling ervan, door de CO_2 uit de lucht, direct of via voedsel. Zodra het organisme echter sterft, houdt de aanvulling op. De hoeveelheid ^{14}C in dat organisme zal vanaf dat moment langzaam teruglopen. We weten precies hoe snel dat gaat: na 5730 jaar is de oorspronkelijke hoeveelheid ^{14}C gehalveerd. Omdat we dat weten, en omdat deze zogenaamde halveringstijd zich door niets en niemand laat beïnvloeden, kunnen we door meting van de ^{14}C -concentratie vaststellen hoelang geleden een zeker organisme stierf. We zouden bijvoorbeeld kunnen vaststellen hoe lang geleden het hout gekapt werd voor de stoelen waar U nu op zit, en we kunnen ook meten hoe lang geleden de plantjes stierven, waarvan we de resten in de zojuist genoemde veenlagen aantreffen. Ziedaar de door isotopen geschreven ouderdomsinformatie in dit natuurlijke archief!

Met behulp van de kennis en vaardigheid van stuifmeeldeskundigen, én met behulp van de ^{14}C -ouderdomsmeting ("datering" zeggen we meestal) hebben we zo een klimaatgeschiedenis in handen, die in gedetailleerdheid kan wedijveren met de ijskernen. We hebben zogezegd onze Philips Koerier gevonden, en kunnen gaan vergelijken met het Groninger Kerkblad van de ijskernen.

Hoe interessant deze vergelijking op zich ook is, ik wil er hier niet verder op in gaan. In plaats daarvan besteed ik aandacht aan een ander effect, dat bij het nauwkeurig ^{14}C dateren van de veenpakketten aan het licht is gekomen.

Het is al ruim veertig jaar bekend, dat de concentratie ^{14}C in de aardse atmosfeer niet altijd in de geschiedenis precies gelijk is geweest, maar om de één of andere reden een beetje heeft gevarieerd. Als een plant in een tijd geleefd heeft dat de ^{14}C -concentratie in de lucht net een beetje hoger was dan gemiddeld heeft deze plant na een flinke tijd nog steeds dat beetje meer ^{14}C in zich. Als we deze plant dan dateren lijkt hij korter geleden gestorven dan hij in werkelijkheid is: hij lijkt "te jong". Omgekeerd, planten afkomstig uit tijden met een beetje minder ^{14}C in de lucht lijken "te oud". Al met al

leidt dit ertoe dat de ^{14}C -klok niet precies regelmatig loopt, maar af en toe "hapt".

Dankzij het werk van deskundigen op het gebied van boomringen hebben we deze haperingen precies in kaart kunnen brengen, en we hebben de ^{14}C -klok er precies voor kunnen corrigeren, ofwel "ijken". Dat dit ijken voornamelijk gedaan wordt met behulp van eiken, bracht onze ^{14}C -specialist Hans van der Plicht er toe om een tijd geleden een voordracht te geven over dit onderwerp met de formidabele titel "eiken, ijken en eikels". Gelukkig gebeurde dit slechts in kleine kring, en wie de "eikels" van dat verhaal waren zult U van mij hier niet vernemen.

Eikels zijn er genoeg, daar niet van. Regelmatig treden er dubieuze figuren op die op allerlei manieren proberen de ^{14}C -methode als onbetrouwbaar af te schilderen. Dit soort geluiden weet soms zelfs tot de serieuze media door te dringen. Deze lieden hebben misschien de ^{14}C -klok horen luiden, maar ze weten in de verste verte de klepel niet te hangen. De ^{14}C -methode is een zeer betrouwbare, goed begrepen dateringsmethode, bruikbaar voor ouderdommen tot zo'n vijftigduizend jaar. De haperingen waarover ik het hier heb bedragen typisch tientallen jaren tot hoogstens tweehonderd jaar, en zijn goed bekend, in feite eens te meer een bewijs hoe nauwkeurig en betrouwbaar de ^{14}C -methode inmiddels werkt.

De ^{14}C -klokhaperingen zijn inmiddels zelfs nuttig gebleken, bij het hoognauwkeurig dateren van veenlagen. Immers, als met een ^{14}C -datering een veenlaagje dicht bij het oppervlak (dus minder oud) schijnbaar ouder is dan het laagje eronder, dan weten we dat we ons in een " ^{14}C -haperingsgebied" bevinden. Met die informatie kunnen wij zo'n setje laagjes haarscherp passen op het precieze deel van onze ijkcurve, en daarmee een zeer nauwkeurige datering verrichten, nauwkeuriger dan zonder hapering mogelijk was geweest. Ik zeg hier "we", maar binnen het CIO wordt dit werk met name uitgevoerd door Hans van der Plicht, die op dit gebied wereldvermaard is. In innige samenwerking met onze "stuifmeelcollega's" van de Universiteit van Amsterdam is er met behulp van deze ^{14}C -haperingen en stuifmeelonderzoek aan veenpakketten prachtig, wereldklasse werk verricht, en er zal nog meer volgen.

Ik vind zelf de onderlinge samenhang van ^{14}C -haperingen en stuifmeelsamenstelling van veenlagen wel het meest fascinerend. Precies op plekken waar uit de stuifmeelgegevens blijkt dat er een ingrijpende klimaatverandering heeft plaatsgehad, hapt de ^{14}C -klok! Dat betekent dus dat de

^{14}C concentratie in de lucht destijds moet zijn veranderd. Er zijn twee, essentieel verschillende, hypothesen die een verklaring geven voor het tegelijkertijd optreden van een variatie van de ^{14}C -concentratie in de lucht, en een klimaatverandering.

De eerste hypothese redeneert als volgt: door een klimaatverandering (de oorzaak daarvan laten we in het midden) verandert overal op aarde de landbegroeiing en ook de oceaanstrooming. Op het land, en in de oceanen bevinden zich grote hoeveelheden koolstof, in verschillende vormen daarin vastgehouden en opgeslagen. Wanneer dit hele systeem een verandering doormaakt, verandert ook de wisselwerking met de atmosfeer, en daardoor de ^{14}C -concentratie in de atmosferische CO_2 . Kortom, duidelijk oorzaak en gevolg: eerst klimaatverandering, daardoor een ^{14}C -klokhapering.

De tweede hypothese wijst de zon aan als de veroorzaker. De aanmaak van ^{14}C onder invloed van straling uit de ruimte wordt beïnvloed door de zonne-activiteit. Als de zonne-activiteit varieert wordt ons klimaat beïnvloed, maar bovendien dus de ^{14}C -concentratie. Bij deze hypothese is er dus sprake van een tegelijkertijd veranderen van klimaat én haperen van de ^{14}C -klok. Hoe logisch voor U hypothese 2, de zonne-activiteit, misschien ook klinkt, er is een groot probleem bij: de zon is een uiterst constante stralingsbron. De variaties erin zijn weliswaar groot genoeg om de geringe verandering van de ^{14}C -aanmaak te verklaren, maar veel te klein om een merkbaar gevolg op ons klimaat te hebben. Anders gezegd: het mechanisme waarmee de petieterige variaties in de zonnestraling toch het aardse klimaat zouden beïnvloeden is niet bekend.

Om die reden neigen de meeste deskundigen op dit gebied naar hypothese 1. Dat is echter al evenmin een "oplossing". Immers, we verklaren wel de ^{14}C -haperingen als gevolg van de klimaatverandering, maar geven niet de oorzaak van de klimaatverandering zelf.

Op dit moment is de strijd nog lang niet gestreden, integendeel, het veld is de laatste jaren weer enorm in beroering, na een publikatie van Deense onderzoekers met een nieuwe, speculatieve verklaring hoe de geringe zonnefluctuaties toch belangrijke klimaateffecten zouden kunnen hebben.

Voor het CIO is, in nauwe samenwerking met onze collega's uit Amsterdam, bij het beantwoorden van deze vraag een mooie rol weggelegd. Wij zullen in de komende jaren proberen bij te dragen aan het oplossen van dit vraagstuk door in de eerste plaats dat te doen wat wij geweldig goed kunnen: hoognauwkeurig de ^{14}C -concentratie bepalen aan kleine monsters.

We zullen dit doen voor een aantal van de "haperingsgebieden", en op die manier zo nauwkeurig mogelijk vaststellen in hoeverre klimaatverandering en ^{14}C -hapering werkelijk gelijktijdig zijn. In het precies vaststellen van dit feit ligt namelijk informatie besloten over welke van de twee voorgestelde verklaringen de juiste is.

Ik duidde net al op de reservoirs van koolstof op de wereld. In de atmosfeer bevindt zich slechts een klein deel van alle koolstof op aarde, vrijwel uitsluitend in de vorm van het gas CO_2 . In de oceanen en op het land bevinden zich veel grotere hoeveelheden. Deze reservoirs van koolstof zijn wel voortdurend in beweging. Van de plantenwereld weet U dat natuurlijk: in voorjaar en zomer vindt er groei plaats, dat wil zeggen opname van koolstof uit de lucht, terwijl in herfst en winter juist afbraak en rotting plaatsvindt. Door deze afbraak komt de koolstof weer, in de vorm van CO_2 , terug in de atmosfeer. Bij de opname en afgifte van koolstof door de oceanen geldt iets dergelijks. Het is een zeer dynamisch systeem: wel ongeveer een kwart van alle CO_2 in de lucht wordt per jaar uitgewisseld met oceanen of landplanten. Het gehele systeem wordt de wereldwijde koolstofcyclus genoemd. Wanneer er evenwicht heerst, zal het systeem weliswaar seizoensschommelingen, "cycli", ondergaan, maar door de jaren heen zal de hoeveelheid CO_2 in de atmosfeer gemiddeld gelijk blijven.

In de mogelijke verklaring van de ^{14}C -haperingen daarnet heb ik al verteld dat de koolstofcyclus beïnvloed kan worden door klimaatveranderingen. Voor landplanten kunt U zich daar vast wel iets bij voorstellen, voor de oceanen is één en ander minstens zo ingrijpend. Andersom beïnvloedt de koolstofcyclus op allerlei manieren het klimaat. Het belangrijkste mechanisme is de concentratie CO_2 in de atmosfeer. CO_2 is namelijk, ik vermeldde het al aan het begin van deze openbare les, een zogenaamd broeikasgas. Onze aarde ontvangt warmte van de zon, in de vorm van zichtbaar licht. Dit licht kan bijna ongestoord door de atmosfeer het aardoppervlak bereiken. De aarde zendt op haar beurt warmtestraling uit. Deze warmtestraling kan niet vrijelijk door de atmosfeer heen de ruimte in, maar wordt voor een belangrijk deel geabsorbeerd door sporengassen in de atmosfeer, van welke waterdamp en CO_2 de belangrijkste zijn. Dit zogenaamde broeikaseffect zorgt als het ware voor een goede isolatie van onze aarde. De gemiddelde temperatuur van het aardoppervlak is nu zo'n $+15\text{ }^\circ\text{C}$, terwijl het zonder broeikasgassen gemiddeld $-15\text{ }^\circ\text{C}$ zou zijn. Een prettig effect, dat broeikaseffect!

Wanneer door veranderingen in de wereldwijde koolstofcyclus een verandering van de concentratie van CO₂ in de atmosfeer optreedt, wordt het broeikas effect versterkt of juist verzwakt, al naar gelang er meer of minder CO₂ in de atmosfeer komt. Het broeikas effect is een groot effect, dus relatief kleine veranderingen in die CO₂-concentratie kunnen al een behoorlijke invloed op de temperatuur op aarde hebben. Tienduizenden jaren terug, in de laatste ijstijd, was de CO₂-concentratie in de lucht aanmerkelijk geringer dan tegenwoordig. Aan het eind van de ijstijd werd de CO₂-concentratie hoger, en het klimaat warmer. Maar, wat kwam eerst en wat veroorzaakte wat? Tot op de dag van vandaag kan deze vraag niet definitief beantwoord worden. Het behoeft geen betoog dat de genoemde klimaatarchieven, met hun door isotopen geschreven informatie, een sleutel zijn tot het antwoord.

We kunnen natuurlijk ook de hedendaagse wisselwerking klimaat-koolstofcyclus bestuderen. Om nog even op mijn buitenaardling terug te komen: hij probeert informatie over de Nederlandse samenleving te verzamelen door het gebruik van archieven, maar het meest zou hij toch gebaat zijn met het iedere dag lezen van de krant! Na verloop van tijd zou hij de samenleving zo goed leren kennen, dat hij daardoor zijn stapels Groninger Kerkblad en Philips Koerier aanzienlijk beter kan begrijpen. Bovendien kan hij omgekeerd veel van de achtergronden van hedendaagse gebeurtenissen in historisch perspectief plaatsen, en ook weer beter doorzien. Door de wisselwerking hedendaagse informatie - historisch archief verkrijgt hij werkelijk inzicht.

Zo is het ook bij het bestuderen van die wereldwijde koolstofcyclus, en de relatie met het klimaat. De "krant van de koolstofcyclus" bestaat uit het voortdurend "lezen", of in ons jargon, monitoren van de aardse atmosfeer.

Hoog nauwkeurige metingen van atmosferische CO₂, op verschillende plaatsen, en gedurende een langere periode, geven inzicht in die koolstofcyclus. Dit is het derde gebied waarop het CIO actief is en ook hier spelen isotopen een prominente rol. De isotopen van koolstof en van zuurstof in CO₂ schrijven als het ware op dit moment, "live", geschiedenis. Systematische, nauwkeurige metingen van de atmosferische CO₂-concentratie zijn begonnen in 1957, op de top van de Mauna Loa vulkaan op Hawaii. De grote man hierachter is Charles David Keeling. Het is de verdienste van mijn voorganger Mook geweest, om Keeling's meetprogramma uit te breiden met metingen van de isotopeninhoud van CO₂. Zij waren daarmee de eersten. Inmiddels bestaan er verschillende andere netwerken van atmosferische meetstations waarin dat ook gebeurt.

Overigens is er geen sprake meer van een natuurlijke koolstofcyclus. Immers, het menselijk handelen in de vorm van het verbranden van kolen, olie en gas, maar ook het ontbossen heeft geleid tot een aanzienlijke toename van de CO₂-concentratie in de atmosfeer. De toename boven het natuurlijke niveau bedraagt inmiddels bijna 40% en het einde is nog lang niet in zicht, integendeel. De stijging gaat steeds sneller, en bij gelijkblijvende groei van economie en brandstofgebruik zal er rond het jaar 2050 van een verdubbeling sprake zijn.

En dan mogen we nog niet mopperen: van alle CO₂ die we in de lucht brengen blijft slechts de helft daar hangen. De andere helft wordt vriendelijkerwijs opgenomen door de oceanen en de landplanten.

Van de landplanten weten we dat de groei bevordert wordt door de stijging van de CO₂-concentratie. De CO₂ die de planten uit de lucht moeten halen om te groeien wordt minder schaars, en dus eenvoudiger te "oogsten". Hierdoor kunnen planten sneller groeien, en kunnen ze ook met minder water toe. In de glastuinbouw gebruikt men dit gegeven allang, maar ook in de vrije natuur treedt deze zogenaamde "CO₂-bemesting" op. Maar hoeveel koolstof op deze manier extra wordt opgenomen door de landplanten en waar op aarde, welk deel de oceanen van de extra CO₂ opnemen en waar, hoe de opname-mechanismen precies werken, en of ze zo zullen blijven werken, geen van deze vragen is tot op dit moment bevredigend beantwoord. Het is bij dit soort kwesties dat de isotopen van CO₂ ons extra informatie geven. Met behulp van de koolstof-13, koolstof-14 en zuurstof-18 isotopensignatuur van CO₂ kunnen we onderscheid maken tussen CO₂ van uitademende planten, van rottende bodems, van opwellend oceanewater, en van het verbranden van steenkool, olie of gas.

De metingen van isotopen aan atmosferische CO₂ stellen extreem hoge eisen aan de meetnauwkeurigheid, en vooral aan de herhaalbaarheid van de metingen over lange tijd. Aan deze zeer hoge eisen heeft de isotopengemeenschap slechts langzaam maar leren voldoen. En nog steeds zou het eigenlijk beter moeten dan het gaat. Daaraan wordt voortdurend gewerkt, ook bij ons. Het CIO heeft ten slotte op dit gebied zo ongeveer de langste ervaring.

De laatste jaren zijn wij bezig fors uit te breiden op het gebied van atmosferische metingen. Verantwoordelijk man op dit gebied is Rolf Neubert. De meettechnieken in het lab zijn volledig gemoderniseerd, en aanzienlijk uitgebreid, en we krijgen inmiddels regelmatig luchtmonsters van een zich nog uitbreidend aantal Europese stations. Wij hebben sinds kort ook

ons eigen meetstation "Lutjewad", gelegen aan de Waddenzeedijk in Noord-West-Groningen. Dit station gaat vanaf komend jaar een rol spelen in het Europees netwerk van atmosferische monitoring stations, en het is voor het CIO bovendien onmisbaar voor het doen van processtudies, en voor het testen van materiaal. De mogelijkheid die wij hebben om in atmosferische CO₂ ¹⁴C te meten, en bovendien de nog maar door enkelen gerealiseerde metingen van de atmosferische zuurstofconcentratie, maakt dat het CIO originele bijdragen aan de koolstofcyclus-studies zal kunnen blijven leveren.

Veel van het werk wordt door de Europese Unie gefinancierd, en dan niet in de eerste plaats vanwege de wetenschappelijke kwaliteiten. U voelt inmiddels wel dat wij ons met dit type onderzoek bewegen op een gebied van groot maatschappelijk belang: de broeikasproblematiek! Ik noemde Arrhenius al even, die een mogelijke menselijke beïnvloeding van ons klimaat door verhoging van de concentratie CO₂ in de atmosfeer als eerste signaleerde. Hij schatte dat de CO₂-toename in de atmosfeer in driehonderd jaar tijd significant kon worden. Van die driehonderd jaar zijn er inmiddels honderd om, maar significant is de stijging allang, en inmiddels zijn de mogelijke gevolgen ervan tot de maatschappij, en in het bijzonder tot de internationale politiek doorgedrongen. U herinnert zich vast nog wel de grote klimaatconferenties in Rio de Janeiro en Kyoto. De situatie wordt er hierdoor overigens niet overzichtelijker op. Het wereldje van internationale politieke conferenties met daaromheen allerlei belangenorganisaties staat garant voor vertroebeling, mistverspreiding, en desinformatie. Enerzijds roepen actiegroepen als Greenpeace bij allerlei verschijnselen wel erg gretig "broeikas-effect", anderzijds is er een grote maatschappelijke stroming, die om de één of andere reden de mogelijke klimaatverandering niet waar wil hebben. In Nederland heeft deze stroming het opinieweekblad Elsevier als spreekbuis. Als argumenten komen eigenlijk vooral niet ter zake doende dingen als "Dat met die overbevolking, zure regen, en smogvorming is toch allemaal achteraf ook meegevallen". Dat is trouwens nog maar de vraag, en het valt op dat zaken als het ozongat, en zorg om wereldwijde waterkwaliteit, níet als voorbeeld worden genoemd.

Maar in plaats van mij hier verder over op te winden, wil ik deze gelegenheid gebruiken om U, kort samengevat, de stand van zaken met betrekking tot de CO₂-toename in de atmosfeer, en de mogelijke gevolgen, voor ons klimaat en anderszins, mede te delen.

(1) De hoeveelheid CO₂ in onze atmosfeer is een belangrijk gegeven voor het aardse klimaat. Het beïnvloedt het stralingsevenwicht tussen zon, aarde en kosmos op een eenduidig begrijpelijke wijze.

(2) De stijging van de CO₂-concentratie in de aardse atmosfeer van de laatste twee eeuwen en vooral van de laatste vijftig jaar, bedraagt tot nu toe bijna 40%. Deze stijging is met absolute zekerheid toe te schrijven aan menselijk handelen. Het op grote schaal verbranden van fossiele brandstoffen is hiervan de oorzaak, in mindere mate ook de wereldwijde ontbossing.

(3) De toename van de CO₂-concentratie in de atmosfeer bevordert de plantengroei. Voor de voedselproductie is dit waarschijnlijk gunstig, maar het effect grijpt ook in in de verspreiding van plantensoorten over de wereld, en beïnvloedt hun onderlinge concurrentie.

(4) In eerste aanzet leidt toename van de CO₂-concentratie in de atmosfeer beslist tot opwarming van de aarde. Wanneer men vervolgens allerlei reacties van het systeem aarde op die opwarmingstendens mee in de beschouwing betreft, zoals wolkenvorming, veranderende vegetatie, smelten van ijskappen, wordt het beeld ingewikkelder, en minder eenduidig. Jarenlang werk van een groot aantal klimatologische groepen toont echter langzamerhand een duidelijke consensus in de richting van een warmer wordende aarde. Het is zelfs waarschijnlijk, dat de reactie van het systeem aarde de opwarming per saldo nog versterkt.

(5) De mate van opwarming waaraan U moet denken, bedraagt 1,5 tot 4,5 °C aan het einde van deze eeuw, bij voortgezette groei van economie en brandstofgebruik. Opwarming van klimaat is op zichzelf niet per se slecht. Het verontrustende zit hem vooral in het tempo waarmee deze opwarming zich zal voltrekken. De natuur is op dergelijke snelle veranderingen niet goed berekend, en de menselijke samenleving krijgt er helemaal een harde dobber aan.

(6) Er zijn beslist ook andere, natuurlijke zowel als menselijk veroorzaakte, effecten die het klimaat beïnvloeden. Natuurlijke processen kunnen het klimaat soms zelfs zeer sterk en snel veranderen. Dat weten we uit de klimaatarchieven.

Op dit punt wil ik nog even terugkomen op de desinformatie die verspreid wordt. Ik noemde al kort dat een paar jaar geleden Deense onderzoekers met de nog speculatieve theorie kwamen dat zonnefluctuaties toch wel eens een grotere invloed kunnen hebben op het aardse klimaatsysteem dan gedacht. Het was een prima bijdrage aan de wetenschappelijke discussie. Echter, in sommige maatschappelijke kringen is deze theorie met grote gretigheid

aangepakt om te argumenteren dat "dus" de versterking van het broeikaseffect wel niet zou bestaan! Dat is echt waanzin ten top. Het is alsof roken opeens geen longkanker meer veroorzaakt omdat asbest dat ook blijkt te doen.

Deze "kop-in-het-zand" mentaliteit wordt, denk ik, uiteindelijk veroorzaakt doordat het moeilijk is te wennen aan het idee dat menselijke activiteiten op velerlei gebied inmiddels de schaal van onze planeet hebben bereikt, en daarmee dus in principe allerlei processen op die planeet ingrijpend kunnen beïnvloeden. Dat geldt voor woudkap, het uitsterven van diersoorten, en ook voor atmosferische processen.

Laat me besluiten met de volgende treffende, maar niet originele samenvatting: de mensheid is bezig met een eenmalig, wereldwijd experiment om de volgende vraag te beantwoorden: "Zal het aanmerkelijk verhogen van de concentratie van CO₂ in de atmosfeer het klimaat op aarde veranderen?" Ik verwacht dat tegen de tijd dat ik aan mijn afscheidsrede toe ben, wij al een eind gevorderd zijn met de beantwoording van deze vraag. Of we het antwoord ook leuk vinden, is wat anders...

Staat U mij toe tot slot enige woorden van dank uit te spreken aan een aantal mensen dat in mijn wetenschappelijke carrière, en in mijn persoonlijk leven, van grote betekenis is of is geweest.

Allereerst denk ik nog vaak terug aan de hoogleraar bij mijn eerste onderzoekswerk als student, wijlen Prof. Alkemade uit Utrecht. Zijn liefde voor zijn vak, en de integere wijze waarop hij wetenschapper was, hebben indruk op mij gemaakt.

Vervolgens mijn dank aan mijn twee promotores, Heideman en Morgenstern, voor de begeleiding van mijn eerste zelfstandige schreden op het pad van de wetenschap. Dat ik Reinhard nu mijn collega weet vind ik bijzonder plezierig.

Dank ben ik vanuit mijn huidige positie verschuldigd aan mijn voorganger Mook, en aan zijn jarenlange plaatsvervanger v.d Plicht, voor de groep die ik van hen mocht overnemen. Het CIO is een groep om enthousiast voor te zijn, om van te houden zelfs. En dat ligt vooral aan de 25 mensen die het vorm geven.

Met deze uiterst korte opsomming doe ik onvermijdelijk velen, binnen en buiten deze universiteit te kort. Dank aan U allen voor een goede samenwerking op velerlei gebied.

Dan wil ik mijn dank uitspreken aan mijn ouders, die mij destijds hebben

laten gaan op het voor hen volslagen onbekende pad der universitaire wetenschap.

Bovenal, het is een cliché, maar daarom niet minder waar, dank aan mijn echtgenote, en mijn zoons, voor de fijne thuisbasis in al zijn facetten. Ellen, jij hebt zelf ook een werkkring, en we rooien het goed samen, al moet ik enigszins beschaamd erkennen dat het regel- en organisatiewerk daarvoor nodig toch wel vaak door jou wordt verricht.

Nog een persoon maakt min of meer deel uit van ons gezin, en dat is onze oppas mw. Bosveld. Ik vind het leuk nu een keer in het openbaar te zeggen hoe blij we zijn met Uw aanwezigheid.

Tot slot wil ik graag de laatste zin uit het dankwoord dat ik destijds in mijn dissertatie schreef herhalen:

"...ik had vooral de nachtelijke metingen, waarin vaak een gevoel van Verwondering over de natuur bij mij opkwam, niet willen missen."

Er is nogal wat veranderd. Nachtelijke metingen door mij uitgevoerd komen niet vaak meer voor, trouwens überhaupt het zelf meten is er een beetje af. Wat gebleven is, is dat gevoel van Verwondering. Ik hoop dat dat gevoel, wanneer ik hier ooit nog mijn afscheidsrede mag uitspreken, nog steeds bij mij zal zijn.

Ik dank U voor Uw aandacht.