

University of Groningen

Global change, een wereld van verandering

Mook, W. G.

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:

1997

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

Citation for published version (APA):

Mook, W. G. (1997). *Global change, een wereld van verandering*. Universiteitsdrukkerij Rijksuniversiteit Groningen.

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.

Global Change

een wereld van verandering

College

gegeven op 24 juni 1997
ter gelegenheid van het afscheid van

dr. Willem G. Mook

als hoogleraar in de Isotopenfysica
aan de RijksUniversiteit Groningen

GRONINGEN 1997

© W.G.Mook, Haren Gn, 1997
Universiteitsdrukkerij Groningen

Mijnheer de Rector Magnificus, Dames en Heren

In dit laatste college wil ik een tweetal onderwerpen behandelen die veel met elkaar te maken zullen blijken te hebben. En zo hoort dat ook. Vanzelfsprekend is één van de twee de *isotopologie*, een onderwerp dat ik -onder deze naam- bijna 20 jaar geleden -ook vanaf deze plaats- uitvoerig heb behandeld. Maar ik heb later gemerkt dat een aantal van U niet goed heeft opgelet, zodat ik niet anders kan dan een stukje herhalen. Dit is overigens de laatste keer, U zult mij in het vervolg voor een spreekbeurt bij U thuis moeten uitnodigen. Opgelet dus.

Het tweede onderwerp van vandaag betreft het milieu. Mocht U niet verrast zijn geworden door mijn keuze van het eerste, dit tweede zal U misschien verbazen, want ik meen dat het image van de "milieurakker" niet mijn sterkste karakteristiek is. Maar toch.

Essentieel voor het eerste deel van mijn verhaal zijn eigenschappen van atomen en wel in het bijzonder het gewicht of beter gezegd de massa van atomen.

Bijna alle atoommassa is geconcentreerd in de atoomkern. Daaromheen cirkelen een aantal lichte electronen die allemaal eenzelfde, kleine, negatief-electrische lading hebben. Deze lading bepaalt de chemische eigenschappen van het element waar dat atoom deel van uitmaakt.

De kern is niet een massief bolletje, maar bestaat op zijn beurt uit deeltjes, in de eerste plaats een aantal even sterk, maar nu positief-electrisch geladen protonen -evenveel als er electronen om de kern cirkelen zodat het totale atoom electrisch neutraal is- en daarnaast nog een aantal deeltjes die dezelfde massa hebben als de protonen maar geen electrische lading en daarom neutronen heten. Als de kernen niet te zwaar zijn, zoals het geval is bij de elementen waarmee ik U vanmiddag amuseer -waterstof, koolstof, zuurstof- bevat de atoomkern ongeveer evenveel protonen als neutronen. Bij een zware kern als van goud of uranium zijn deze aantallen verre van gelijk.

Zo bevat ieder element voor die stof karakteristieke atomen en kernen. Nogmaals, de chemische eigenschappen -dus om welk element het gaat- worden bepaald door het aantal electronen en dus de

electrische lading van de atoomkern. Wat dat betreft kan een kern best een extra neutron bevatten zonder dat de chemische eigenschappen van de stof veranderen. Dat kan de mens in een kernreactor bewerkstelligen, maar ook de natuur heeft dat verkozen te doen.

Van koolstof bijvoorbeeld komen er in de natuur twee kernsoorten voor: één met 6 protonen en 6 neutronen, 12 deeltjes dus, en daarom heet het koolstof-12 (^{12}C) en één met ook 6 protonen -natuurlijk, want anders was het geen koolstof- maar met 7 neutronen, dus 13 deeltjes en daarom genaamd koolstof-13 (^{13}C).

Er komt zelfs koolstof voor met in de kern nóg een neutron extra waardoor het koolstof-14 (^{14}C) gaat heten. Maar dit is niet meer stabiel en verandert na enige tijd spontaan, onder uitzending van een electron: koolstof-14 heet daarom radioactief.

De drie vormen van koolstofkernen die ik nu genoemd heb heten drie *isotopen* van koolstof, isotopen omdat ze in het periodiek systeem van de elementen op dezelfde plaats thuis horen, die van koolstof. De klassiek opgeleiden onder U hadden dat al begrepen. Ik hoop dat ik U nu meteen van het idee afgebracht heb dat isotopen per sé radioactief zijn. In de natuur komen er meer stabiele kernsoorten voor dan radioactieve. In principe houdt ons laboratorium zich met die natuurlijke isotopen bezig.

Maar let U op: niet alle isotopen van één element komen even veel voor. Een voorbeeld: 99% van alle koolstof is ^{12}C , slechts 1% is ^{13}C , terwijl de concentratie van ^{14}C 10^{-12} is. De oorzaak hiervan is dat bij de oorspronkelijke productie van de atomen, bij de Big Bang, de vormingskans voor de verschillende isotopen niet gelijk was.

Wat is er nu voor aardigheid aan isotopen. Kort samengevat zijn dat twee totaal verschillende verschijnselen. De ene is inherent aan de instabiliteit van sommige kernen, of wel aan de radioactiviteit van de stof die dergelijke atomen bevat. Even een voorbeeld en *wat anders dan koolstof-14*, waarover de vorige week in Groningen, als gast van ons laboratorium, het om de drie jaar plaats vindende internationale C14-congres is gehouden, een frappante melange van meer dan 200 natuurwetenschappers van velerlei pluimage, uit bijna 40 landen.

Terug naar onze koolstof-14. ^{14}C komt in de natuur voor, omdat die het voortdurend nieuw bijmaakt. Anders was het door radioactief verval al lang verdwenen. ^{14}C wordt onder invloed van straling uit de

ruimte gevormd in de atmosfeer, zodat het een deel wordt van het atmosferische kooldioxide, en zodat alle koolstof die daarvan afhankelijk is, planten en vervolgens dieren, en ook de paar kilo koolstof die U vanmiddag op Uw stoel heeft doen plaats nemen, radioactief is, overigens in een mate die we goed kennen en U niet behoeft te verontrusten.

Laat ik het beeld dat ik verder wil hanteren niet te sinister maken en, in plaats van Uw lichaam, de plant als voorbeeld nemen. Op het moment dat de plant sterft bevat het nog die bekende ^{14}C -concentratie. Daarna neemt deze af door het radioactieve verval en we weten ook daarvan precies hoe snel dat gaat, namelijk in een zodanig tempo dat na 5730 jaar nog de helft over is van wat er oorspronkelijk aanwezig was. Daarom kunnen we, na meting van het ^{14}C -gehalte, terugrekenend, concluderen hoe lang het radioactieve vervalproces in een fossiel al heeft geduurd, m.a.w. hoe lang het geleden is dat de plant stierf. Datzelfde geldt voor Uw botten, en ook voor die van Uw voorvaderen.

Van deze ^{14}C -methode tot ouderdomsbepaling wordt op grote schaal gebruik gemaakt. Onze mogelijkheden in Groningen zijn, zoals nu in een paar laboratoria ter wereld, de laatste jaren enorm toegenomen door de ingebruikneming van een grote versneller, eigenlijk een grote massaspectrometer waarmee het na lange tijd nog resterende ^{14}C in een fossiel nog is vast te stellen, nu echter niet meer zoals voorheen in grammen materiaal, hout of houtskool, veen, botten of schelpen, maar in milligrammen. Zo hebben we niet meer 90 liter zeewater of grondwater nodig voor één ^{14}C -bepaling maar 100 ml, niet meer 5 kubieke meter lucht voor meting aan het daarin voorkomende kooldioxide maar 5 liter, terwijl we voor datering van een boorkern uit de bodem van de diepzee kunnen volstaan met het meten van slechts enkele minuscule schelpjes in plaats van centimeters van die kern waarin enkele duizenden jaren zijn vertegenwoordigd met als consequentie daarvan een groot verlies aan detail. En we kunnen het ons nu permitteren om niet langer bulk materiaal te analyseren, maar bijvoorbeeld een specifiek en authentiek, daaruit geselecteerde organische fractie. De analyses gaan bovendien sneller en de meetcapaciteit is groter. Maar goed, hoe belangrijk deze ontwikkeling ook is, ik kan er nu niet uitvoerig bij stilstaan..

Samengevat komt het voorgaande er op neer dat we met behulp van de ^{14}C -methodiek in het algemeen ouderdommen kunnen bepalen, zoals bijvoorbeeld van archeologische vondsten, geologische afzettingen, van grondwater sinds het als regenwater in de bodem infiltreerde, van zeewater sinds het vanuit de oppervlakte van de oceaan naar grotere diepte zakte, enzovoort, alles tot een ouderdom van 50 000 jaar. Ik kom daar straks nog weer op terug.

Het tweede verschijnsel dat de isotopen ons te bieden hebben is iets minder voor de hand liggend, wat moeilijker uit te leggen, maar niet minder spectaculair.

Ik heb U zojuist verteld dat de isotopen van één element dezelfde kernlading en hetzelfde aantal elektronen bevatten, zodat ook de chemische eigenschappen van isotopen gelijk zijn. Op grond hiervan zouden we moeten verwachten dat de concentraties van de verschillende isotopen van één element in verschillende stoffen gelijk zijn. Bijvoorbeeld: in alle stoffen die koolstof bevatten is de $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -concentratieverhouding 1 %.

Nou is dat bij benadering wel waar, maar niet exact. Bijvoorbeeld bevat de koolstof in de kalk van Uw marmeren tuinkabouter 1,12 % ^{13}C , de paar kg koolstof op Uw stoel 1,10 %. Dat lijkt maar een klein verschil, maar dit is wel 1000 maal zo groot als de meetnauwkeurigheid van onze tegenwoordige massaspectrometers. De conclusie is daarom gerechtvaardigd dat de chemische eigenschappen van de isotopen van één element toch niet gelijk zijn.

En dat is ook logisch. Immers, de atoommassa's van de isotopen van één element zijn niet gelijk, waardoor de beweeglijkheden van de atomen verschillend zijn en daarmee de snelheden van fysische en chemische processen. Ook zijn in chemische verbindingen de vibratie- en rotatie-energieën voor isotope atomen verschillend en dus ook de chemische bindingssterktes en -waarschijnlijkheden. Bij voorbeeld: de concentratieverhouding $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ in een koolzuuroplossing is in de bicarbonaatfractie groter dan in de opgeloste CO_2 . Ook zijn de verschillende aggregatietoestanden (gas, vloeistof, vaste-stof) van één verbinding niet voor alle isotopen even waarschijnlijk. Hierbij deze keer een voorbeeld met de stabiele isotopen van zuurstof ^{16}O en ^{18}O , waarvan het relatieve voorkomen van de laatste ongeveer 0,2 % is. De concentratieverhouding $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ is in ijs iets groter dan in het

bijbehorende water en in water groter dan in de waterdamp daaruit, alle waarden afhankelijk van de temperatuur.

Zo is de isotopensamenstelling van een stof een extra kenmerk van die stof, zoals de kleur, geur of smaak. En dat geeft extra mogelijkheden. Met behulp van de koolstofisotopen is nu onderscheid te maken tussen suiker afkomstig van suikerbieten en het chemisch en qua kleur en smaak volstrekt identieke rietsuiker, en ook is er verschil tussen CO₂ van de ene en de andere oorsprong.

Wat heeft dat tot gevolg. Ik zal dat illustreren aan de hand van een paar voorbeelden uit het functioneren van het aardse milieu. En zo betreden wij het terrein van het tweede deel van mijn college.

Wat 200 jaar geleden nog vaak met het begrip *natuurkunde* werd aangeduid is nu opgedeeld in astronomie, fysica, chemie, biologie, - tegenwoordig ook wel ruimer levenswetenschappen genoemd- en aardwetenschappen -inclusief de geologie. Natuurwetenschappen heet het grote gebied tegenwoordig. Er heeft, zoals ook elders, een verregaande specialisatie plaats gevonden, zelfs binnen één discipline. De onderzoekers zijn uit elkaar gegroeid.

Waarvan ik U vandaag gaat gepaard aan een tegenstelde ontwikkeling. De onderzoekers en hun vakgebieden verenigen zich in toenemende mate omdat ze elkaar nodig hebben bij de oplossing van hun problematiek.

Het oorspronkelijke wetenschappelijk onderzoek werd uitsluitend gevoed door menselijke nieuwsgierigheid. Dit *zuiver wetenschappelijke* of *fundamentele* onderzoek wordt meer en meer verdrongen -helaas niet aangevuld- door een andere categorie, het *toegepaste onderzoek* dat in mindere mate tot doel heeft het inzicht in eigenschappen en verschijnselen te verdiepen, maar dat eerder een nuttig antwoord zoekt op praktische vragen, van bijvoorbeeld industriële, medische of zelfs militaire aard. Overigens is de inhoud van de dagelijkse werkzaamheden voor de onderzoekers zelf vaak niet wezenlijk anders; het grootste verschil zit hem in de vraagstelling en in het feit dat de onderzoeker meer vooraf zijn werk dient te plannen en zich daarop moet concentreren.

Dan is daar de categorie van het *strategische* onderzoek, een tussenvorm, het gevolg van een sturing van onderzoek in een bepaalde

richting omdat om uiteenlopende redenen de maatschappij daar om vraagt. De vraagstelling is breed geformuleerd, minder concreet, de wegen naar de antwoorden worden grotendeels door de onderzoeker gekozen. De overheid stuurt het onderzoek door extra gelden beschikbaar te stellen en ziet met meer aandacht toe dan bij fundamenteel onderzoek gebruikelijk is. We kennen dit verschijnsel bijvoorbeeld van de kernfysica na de 2de wereldoorlog en veel recenter van de micro-electronica en de biotechnologie. Over een dergelijke categorie van onderzoek spreek ik vandaag.

Het is ongeveer 25 jaar geleden dat enkele wetenschappers zich begonnen te realiseren dat "de mens doende is met onze aarde een experiment uit te voeren dat onomkeerbaar is en ernstige gevolgen kan hebben". U weet waar ik op doel en zo niet, dan hoef ik maar het woord *broeikas* te noemen en U bent bij de les.

Even een heel korte uitleg van het verschijnsel. Wij leven op aarde als het ware in een broeikas: licht van de zon dringt zonder veel moeite door de atmosfeer binnen, verwarmt het aardoppervlak, waarna de dan ontstane warmtestraling niet zo gemakkelijk de atmosfeer weer kan verlaten. Voor het tegenhouden, de absorptie van die warmtestraling levert het koolzuurgas, kooldioxide of kortweg CO₂ in de lucht een overwegende bijdrage. Het gevolg is dat de warmte zich in de ons omringende lucht ophoopt en de temperatuur dus stijgt. Aan dit broeikas effect danken wij het feit dat de gemiddelde temperatuur op aarde 15°C boven nul is in plaats van 15°C eronder ingeval er geen atmosfeer geweest zou zijn. Meer CO₂ in de lucht betekent meer absorptie van warmte en dus een hogere temperatuur. Een versterkt broeikas effect kan op deze manier direct en indirect grote gevolgen hebben voor de condities zoals temperatuur, neerslag en zeespiegelstand waaraan wij nu op aarde gewend zijn. *Let wel, niet het bestaan van het broeikas effect is zorgelijk -integendeel zelfs- maar een mogelijke versterking ervan.*

Deze mondiale problematiek wordt in een iets wijdere context aangeduid met *Global Change*. Zoals zoveel Engelse termen laat ook deze zich niet eenvoudig vertalen. "Global" vertalen door "globale", zoals tegenwoordig veelvuldig gebeurt, is natuurlijk fout. Maar "mondiale verandering" klinkt niet goed. Daarom voorlopig toch maar "global change".

Met de problematiek van het broeikaseffect is het wonderlijk gesteld. Immers, hoewel het een fatsoenlijk, wetenschappelijk verschijnsel betreft, kent het niet alleen insiders en outsiders, maar ook vóórstanders, tegenstanders en sceptici. In kolommen en rijen gerangschikt ontstaat een matrix, waarbij in de eerste plaats opvalt dat het vakje "outsider, geen mening" niet druk bezet is. De invulling van de matrix is op zich al een subjectieve onderneming. Maar toch: de discussie hierover vermengt zich niet zelden met de wetenschappelijke discussie. De situatie wordt er niet overzichtelijker op nu ook "de politiek", vanwege de maatschappelijke aspecten van de problematiek, gedwongen is geworden zich in de discussie te mengen.

De onderzoekers zelf profiteren op uiteenlopende wijze. Voor het merendeel van hen betekenen de extra gelden die sedert 1990 door NWO, universiteiten, en enkele vakdepartementen voor het Global Change-onderzoek beschikbaar zijn gekomen een stimulans het onderzoek waarmee zij al doende waren te intensiveren. De sterk toegenomen internationale activiteiten en intensieve vormen van samenwerking op Europees niveau en daarbuiten maakt het werk nogmaals zo aantrekkelijk.

Ik zal nu deze socio-wetenschappelijke verschijnselen laten voor wat zij zijn en mij concentreren op de belangrijkste aspecten, de natuurwetenschappelijke. Immers wij weten nog niet genoeg en dat zal U niet verbazen.

Ik merkte eerder op dat de mens in staat is gebleken om het functioneren van de aarde als geheel, in ieder geval het functioneren van zeer grote gebieden op aarde, te beïnvloeden, te verstoren. Inderdaad een maatschappelijk probleem, maar een niet minder interessant natuurwetenschappelijk probleem of liever, een veelheid aan problemen. Want:

in hoeverre is de mens in staat het functioneren van het *systeem aarde* te beïnvloeden?

hoe functioneert het *systeem aarde* eigenlijk zonder menselijke beïnvloeding?

waaruit bestaat het *systeem aarde* eigenlijk, welke deelsystemen? en hoe beïnvloeden die elkaar?

hoe functioneert één deelsysteem eigenlijk?

en zo voort.

U heeft ongetwijfeld inmiddels begrepen dat ik het vanmiddag heb over de bijdrage die het isotopenonderzoek, de eerder genoemde isotopologie, levert juist aan de bestudering van *Global Change*.

Hoewel dit begrip, zoals ik eerder zei, breder is dan alleen het broeikas-effect met zijn gevolgen, wil ik me toch daartoe beperken, temeer omdat daarin de belangrijkste bijdrage van de isotopen ligt. Verder wilt U mij wel vergeven dat ik niet uitputtend ben; ik verkies de illustratie boven de opsomming.

De oorsprong van het broeikas-effect ligt in de atmosfeer. Meer CO₂ in de lucht -door verbranding van aardolie, aardgas en steenkool- betekent immers een grotere ondoorlatendheid van de lucht voor warmtestraling en daarom een nog hogere luchttemperatuur.

De cruciale vraag is natuurlijk: hoe sterk zal een stijging van het CO₂-gehalte zijn als we een bepaalde hoeveelheid fossiele brandstof gebruiken of, zoals dat tegenwoordig in stuitend Nederlands heet, bij een bepaalde CO₂-uitstoot. We moeten daarbij bedenken dat niet alleen de mens in de weer is met CO₂, de oceanen en het plantenrijk zijn dat in aanzienlijk grotere mate: jaarlijks wordt door deze beide mondiale koolstofreservoirs CO₂ uit de lucht gehaald en daarin weer teruggevoerd, in hoeveelheden die wel het 20-voudige bedragen van de ruim 5 miljard ton koolstof die de mens per jaar aan de atmosfeer toevoegt. Hierdoor is het weliswaar moeilijk om een relatief kleine activiteit van de mens te onderkennen maar dat is wel degelijk gelukt.

Aan de serie metingen van CO₂-concentraties in het gebied van de Stille Oceaan sedert het einde van de vijftiger jaren verricht door Keeling hebben wij sinds 20 jaar geleden de analyses van de koolstofisotopen toegevoegd. Aangezien ¹³C/¹²C voor iedere component van de koolstofkringloop weer anders is, kunnen we achterhalen hoe actief de verschillende componenten van de koolstofkringloop en van de mens zijn. Inmiddels is dat voor een aantal laboratoria een grootschalige routine-activiteit geworden, maar de beginperiode waarin wij in Groningen met onze Amerikaanse collega de enigen waren, was natuurlijk het leukst.

Inmiddels heeft de mens ongeveer evenveel CO₂ in de atmosfeer gebracht als er van nature aanwezig was. Dat het CO₂-gehalte daardoor niet is verdubbeld komt doordat de oceanen een groot deel - we weten inmiddels dat dit waarschijnlijk ongeveer 30 tot 40% is - binnen een periode van enige jaren opnemen. Dat CO₂ in water oplost is niets nieuws, ook voor U niet. U kent dat verschijnsel goed van de limonade gaseuze. Het merkwaardige is nu dat zeewater dat niet zo goed kan als het water van Uw frisdrank. De redenen hiervoor zijn van aard zowel chemisch -zeewater is een chemische bufferoplossing die zich tegen de verzuring door de CO₂-opname verzet- als oceanografisch -alleen de bovenste dunne laag van de oceaan doet op korte termijn mee aan de CO₂-opname, voldoende stof voor een aparte spreekbeurt.

Dit type onderzoek past tegenwoordig in het internationale Global Change programma, genaamd IGBP voor *International Geosphere-Biosphere Programme*. Het atmosferische onderzoek is daarbij ondergebracht in een apart project, IGAC voor *International Global Atmospheric Chemistry*. Het krioelt, zoals U zult merken ook bij ons van de acronyemen. Mijn excuses voor de outsiders onder U maar, hoezeer deze gewoonte de taalgevoeligen onder ons ook tegenstaat, het is onvermijdelijk. Dus doen wij mee en het went.

In zee voortgezet vindt het onderzoek naar koolstofisotopen plaats in het kader van een ander IGBP-project: JGOFS, *Joint Global Ocean Flux Study*. Hierin speelt, naast de chemie en fysica, ook de oceanische biologie een belangrijke rol. Doel is een balans op te stellen van de koolstof in primair dat deel van de zee dat belangrijk is voor de opname van CO₂ uit de lucht, de bovenste 50 tot 200 meter. Hierin vindt bovendien de grootste biologische activiteit plaats, die indirect de CO₂-opname stimuleert.

Het vooral zeegaande onderzoek dat in dit kader plaats vindt leunt sterk aan tegen een typisch fysisch-oceanografisch programma, WOCE voor *World Ocean Circulation Experiment*, niet een onderdeel van IGBP maar van het *World Climate Research Programme* van WMO, de *World Meteorological Organization*. Nogmaals mijn excuses.

In dit programma speelt ^{14}C een grote rol, en wel bij twee belangrijke verschijnselen. In de eerste plaats laat ^{14}C zien hoe ver de toename van het atmosferische CO_2 -gehalte in de zee is doorgedrongen, m.a.w. hoe dik de oppervlaktelaag van de zee is die aan het opnameproces van CO_2 meedoet, of wel hoe groot de opnamecapaciteit van de zee eigenlijk is. Het is namelijk zo dat ook de concentratie van ^{14}C in de atmosfeer is door toedoen van de mens is verstoord en wel door de proefnemingen met kernwapens. De explosies hiervan zijn gepaard gegaan met een grote productie van ^{14}C , zo sterk zelfs dat in 1963 de atmosferische ^{14}C -concentratie tweemaal zo groot was als van nature. Omdat ^{14}C in de lucht voorkomt in de vorm van CO_2 wordt het óók door de oceanen opgenomen. De anthropogene verstoringen van zowel de ^{14}C -concentratie als de CO_2 -concentratie in de lucht en vervolgens in de zee lijken daardoor sterk op elkaar. Door de één te meten leren wij de andere kennen. In feite worden de modellen van de mondiale koolstofkringloop geïjkt met behulp van het gemeten ^{14}C -verloop in lucht en oceaan sinds 1963.

De tweede toepassing van ^{14}C die dateert uit het begin van de zeventiger jaren is spectaculair. Nadat zeewater in contact met de lucht ^{14}C heeft opgenomen, wordt het vervolgens hiervan geïsoleerd doordat het naar grotere diepte zakt. Het ^{14}C -gehalte neemt daarna in de loop van de tijd af door radioactief verval. ^{14}C -metingen tonen op die manier ouderdomsverschillen tussen watermassa's en duiden daarmee op de stromingsrichting van het water. Uit de mondiale distributie van ^{14}C over de oceanen is het volgende beeld ontstaan. In de Noordelijke Atlantische Oceaan zakt zeewater, dat door afkoeling en een relatief hoog zoutgehalte een grote dichtheid heeft gekregen, naar grote diepte. Daarna begint het zijn weg naar het Zuiden, stroomt via de Zuidelijke Atlantische Oceaan langs Antarctica, en circuleert vervolgens door de Indische of de Stille Oceaan. Door windgedreven opwelling, ergens, in het algemeen langs de continentale kusten, stijgt het water naar de oppervlakte om tenslotte na 1500 jaar als ondiepe stroming terug te keren naar de Noord Atlantische Oceaan. Aldus vormt het water in de wereldzeeën een mondiale *transportband*, waarvan de motor in de Noord Atlantische Oceaan ligt. De ons zo bekende *Golfstroom*, verantwoordelijk voor het relatief milde klimaat in Noordwest Europa, is er een onderdeel van. En dat geeft meteen het

grote belang aan van dit verschijnsel. Het is niet ondenkbaar -en nu moet ik mij voorzichtig uitdrukken- dat de motor van de *transportband* een subtiel verschijnsel is waarvan de vertraging en versnelling aan de wieg heeft gestaan -of nog staat?- van de afwisseling der ijstijden.

Ter bestudering van klimaatveranderingen behoeven we ons niet uitsluitend tot de huidige omstandigheden en verschijnselen, niet alleen tot *actuo-processen* te beperken. Ook de bestudering van het klimaat in het verleden, de *paleo-klimatologie*, vertelt ons over het gedrag van het klimaat. Ook in het verleden zijn sterke temperatuurvariaties opgetreden, immers gepaard aan de ijstijden.

Hoe kennen wij trouwens die klimaatveranderingen in het verleden, en nu denk ik in termen van tien- en honderdduizenden jaren. Dit brengt mij bij de laatste twee fenomenen die ik U vanmiddag wil voorleggen. Het isotopenonderzoek speelt bij beide een werkelijk cruciale rol. Dit paleo-onderzoek behoort ook tot het IGBP-programma en vormt een belangrijk onderdeel van het project genaamd PAGES voor *Past Global Changes*. Voor een goed begrip hiervan moet ik een eind terug in mijn redenering over de isotopen.

Kijken we nu naar het gedrag van de stabiele zuurstofisotopen. Wanneer water en waterdamp met elkaar in contact zijn -in de natuur is dat gebruikelijk want per slot is het vocht in de lucht afkomstig van verdamping vnl. van zeewater en ontstaat omgekeerd regen door condensatie van dit zelfde vocht- prefereert het zware isotoop ^{18}O de vloeistoffase. Het gevolg is dat de concentratieverhouding $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ in de damp kleiner is dan die in het oorspronkelijke zeewater. Dit verdampingsproces vindt overwegend daar plaats waar de zeewatertemperatuur het hoogst is, in het tropische zeegebied. De luchtmasse die deze damp bevat verplaatst zich naar hogere breedtegraden, koelt daarbij af en verliest langzamerhand door uitregenen z'n damp. Omdat ^{18}O de waterfase prefereert bevat de neerslag voortdurend een hogere ^{18}O -concentratie dan de damp waaruit zij voortkomt. Wanneer je nu verhoudingsgewijs steeds meer ^{18}O dan ^{16}O uit de damp verwijdert zal in de loop van de tijd $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ van de damp steeds kleiner worden en dus ook de regen die hieruit condenseert. In andere woorden, op hogere breedtegraden bevat de

neerslag steeds minder ^{18}O , het minste natuurlijk in de gebieden die het verst van de tropen verwijderd zijn, de polen. Poolijs heeft dus een relatief lage $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -concentratieverhouding. Het hier beschreven Rayleigh-proces is te vergelijken met de destillatie van aardolie, waaruit eerst het meest vluchtige bestanddeel wordt gewonnen en tenslotte het residu de minst vluchtige componenten overhoudt. Dit proces laat zich uitstekend kwantitatief berekenen.

Nu de paleotemperatuur-variaties die ik toezegde. Beide vinden hun oorsprong in dit zojuist zo helder uiteengezette verschijnsel van de lage $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -waarden aan de polen.

Gedurende een ijstijd waren de poolkappen van Noord America en Scandinavië bedekt met enorme hoeveelheden ijs, lagen van kilometers dik. Al dit water is aan de zeeën onttrokken geweest. Omdat dit ijs een lagere $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -waarde heeft dan het zeewater, wordt door die onttrekking $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ van het overblijvende zeewater juist groter.

De $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -veranderingen blijven niet beperkt tot het water, maar zetten zich voort in alle stoffen die daarin hun oorsprong vinden, zoals bijvoorbeeld in de kalk van schelpen. De schelpjes verzamelen zich uiteindelijk op de bodem, zodat een boring in de bodemlagen welke in de loop van tienduizenden jaren zijn gevormd een boorkern oplevert waarin met toenemende diepte het steeds oudere materiaal bewaard is gebleven. $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -analyses leveren dan de opeenvolging van de hoge, respectievelijk lage $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -waarden in de zee, of wel een afwisseling van grote en kleine polaire ijskappen, m.a.w. lage en hoge mondiale temperaturen.

Het tweede verschijnsel dat ik toezegde ligt in het ijs zelf opgeslagen. Het is te begrijpen -maar ik zal dat vanmiddag van U niet vergen- dat neerslag bij lage temperaturen als ijs afgezet relatief lage $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -waarden heeft, en andersom hoge $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -waarden gedurende warme periodes. Hetzelfde kan overigens gezegd worden van de stabiele waterstofisotopen in het watermolekuul, ^2H en ^1H . Het is waarschijnlijk dat juist de combinatie van zuurstof- en waterstofisotopen extra informatie geeft over het proces van klimaatverandering. Op het ogenblik is op ons laboratorium apparatuur in ontwikkeling om, in plaats van d.m.v. de gebruikelijke

massaspectrometrie, de concentraties van stabiele isotopen te meten d.m.v. laserabsorptie-spectrometrie en dat heeft grote voordelen.

Het uiteindelijke doel is natuurlijk om de beide klimaatcurven, de ene uit diepzeekalk en de andere uit ijskernen, met elkaar te correleren, en eveneens met de klimaatvariatiën op het land zoals we die kennen van de stuifmeelvoorkomens in veenafzettingen. Voor die vergelijking is het nodig om de curven te voorzien van een tijdschaal, bij de eerste twee vooralsnog een moeilijke opgave, althans bij de hogere leeftijden.

Als resultaat van dit onderzoek blijkt hoe frappant snel de natuur ongeveer 10.000 jaar geleden de laatste ijstijd heeft omgezet in het *Holoceen*, het relatief warme interglaciaal waarin wij nu leven. Daarnaast is het voor het begrijpen van het mondiale klimaatsysteem een belangrijke vraag of de afwisseling van relatief koude en warme perioden, van glacialen en interglacialen, overal op aarde gelijktijdig plaats vond. De datering is dus van cruciaal belang, o.a. een taak voor ^{14}C .

Met de enkele voorbeelden ter illustratie van de functie van de *environmental isotopes* bij de bestudering van het mondiale milieu hoop ik een goede indruk te hebben gegeven en gemaakt. Voor de betrokken onderzoekgebieden en hun beoefenaren, voor de scientific steering committees, de core project offices, de nationale en internationale evaluation committees en de scientific plan en implementation plans betekent het onderzoek naar Global Change -de wereld in verandering- een wereld van verandering.

Mijnheer de Rector, ik zie niet graag om, hoewel dat van iemand die beroepshalve gewend is geweest om tienduizenden jaren om te zien verrassend mag heten. Toch kan ik niet anders dan kort stil staan bij mijn langdurige verblijf aan deze interessante organisatie met al zijn besturen, raden, commissies en wat al niet de universiteit zo uniek maakt. Op deze plaats wil ik met nadruk memoreren hoezeer de blijken van belangstelling en steun, ook de stoffelijke, soms zelfs grofstoffelijke, niet in de laatste plaats van de zijde van het vroegere College van Curatoren en van het huidige College van Bestuur en de Faculteit der Wiskunde en Natuurwetenschappen ons onderzoek zo levend hebben gehouden.

Naast enkele incidentele afwezigheden, een militaire dienstitijd en een verblijf aan het toenmalige Instituut voor Kernfysisch Onderzoek in Amsterdam voor mijn kennismaking met de radiochemie, en een verblijf bij het NIOZ op Texel, alles bij elkaar een periode van ruim 8 jaren, ben ik de resterende 32 jaren belijdend lidmaat geweest van de Groninger universitaire gemeenschap, waarvan ik nu met schroom afscheid neem. Destijds was ik betrekkelijk intensief betrokken bij de democratisering met zijn vreemde uitwassen maar ook vele goede impulsen. Als promovendus werd ik ruim 30 jaar geleden getolereerd als eerste laag-ingeschaalde secretaris van de Vakgroep Natuurkunde, terwijl ik later als wetenschappelijk medewerker der eerste klasse zitting mocht hebben in de Eerste Universiteitsraad, in het jaar overigens waarin de rectoraatsoverdracht zodanig verstoord werd dat zij voortijdig moest worden beëindigd, en dat nog wel door toedoen van één van mijn eigen studenten. Dat waren nog eens tijden.

Terugdenkend aan de Westersingel gaan mijn gedachten eerst naar John Vogel, mijn leermeester en promotor, die de basis legde voor ons moderne laboratorium en zo sfeerbepalend was, dat ik geneigd ben te denken, dat hij dat ook bleef nadat hij ons definitief verliet. Wij zijn geweldig ingenomen met zijn aanwezigheid hier, maar ook droevig dat het noodlot hem de verre reis naar Groningen alleen liet maken.

Aan mijn jonge jaren aan de Westersingel, aan de intensieve samenwerking met hen die ik later mijn collega's mocht noemen, De Waard -wiens houding als onderzoeker jegens de wetenschapsbeoefening mij tot voorbeeld was-, Smith en Kuiper bewaar ik goede en bijzondere herinneringen, en daarnaast ook aan de

technische en administratieve medewerkers en aan de andere collegae fysici. Die tijd is niet meer, de bulldozers hebben onlangs de laatste sporen rigoreus gewist.

Ik zit daar niet zo mee. *Mijn laboratorium* -mag ik dat nog één keer zeggen- is vrijwel tegelijkertijd aanzienlijk verjongd en van nieuw elan voorzien. Ik ben er zeker van dat met de huidige medewerkers het isotonenonderzoek in goede handen is, en met de onmisbare steun van hen die boven ons geplaatst zijn, op internationaal competitief niveau zal worden voortgezet.

Onderzoekers die zich veelzijdig door het onderzoeklandschap voortbewegen hebben het wel leuk maar niet altijd gemakkelijk. Enerzijds wordt de noodzaak tot *multidisciplinair onderzoek* erkend. Echter, als het op het scheppen of zelfs instandhouden van een goede onderzoekstructuur aankomt, overwint de vrees voor branchevervuiling. Daarentegen heb ik altijd staande gehouden dat het leveren van een hoogwaardige fysische component aan een breder geörienteerd onderzoek evenzeer een verantwoordelijkheid van de natuurkunde is, of althans mag zijn.

Tot mijn Nederlandse collega's -archeologen of hydrologen, geologen of oceanografen, de commissies of de besturen, NWO of de KNAW- wil ik hierbij zeggen dat ik met onze samenwerking enorm bevoorrecht ben geweest. Ik prijs mij gelukkig dat we nog niet van elkaar verlost zijn.

Mijn voorliefde voor water is op een bijzondere manier tot uitdrukking gekomen, ten eerste in mijn colleges in de Isotopenhydrologie aan de Vrije Universiteit in Amsterdam, later geformaliseerd tot mijn hoogleraarschap in de Toepassing van Isotopen in de Exogene Aardwetenschappen aan de VU, waaraan met mijn afscheid in Groningen ook een einde komt. Op de tweede plaats - in chronologische zin dan- mijn directeurschap van het Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee op Texel. Die periode was de climax in mijn wetenschappelijke bestaan.

Tenslotte mijn vrouw en kinders. Wat moet ik zeggen. De overmatige tijd en aandacht en afwezigheid die mijn werk heeft gevergd zijn evenzeer een noodzaak geweest als een bewuste wens.

Daardoor heb ik jullie en mijzelf tekort gedaan. Ik kan dat nu allemaal gaan inhalen, maar of dat nou de bedoeling is.....

Ik dank U voor Uw aandacht.