

*Bron van leven, energie en zorg*

# De zon

BIOWETENSCHAPPEN EN MAATSCHAPPIJ  
KWARTAAL 2 2021



# De zon

Dit cahier is een uitgave van Stichting Biowetenschappen en Maatschappij (BWM) en verschijnt twee maal per jaar. Elk nummer is geheel gewijd aan een thema uit de levenswetenschappen, speciaal met het oog op de maatschappelijke gevolgen ervan.

Stichting BWM is ondergebracht bij ZonMw.

## BESTUUR

Dr. J.J.E. van Everdingen  
(voorzitter)  
Prof. dr. J.W.F. Reumer  
(penningmeester)  
Dr. M. Bosse  
Prof. dr. E. van Donk  
Dr. R.H.J. Erkens  
Prof. dr. W.A. van Gool  
Dr. R. Grootens-Wiegers  
Prof. dr. B.C.J. Hamel  
Dr. E.J.O. Kompanje  
Prof. dr. C.L. Mummery  
Dr. S.M. Chuva de Sousa Lopes  
Dr. J.E. van Steenbergen

## RAAD VAN ADVIES

Prof. dr. J.M. van den Broek  
Dr. L.H.K. Defize  
Prof. dr. J.T. van Dissel  
Prof. dr. J.P.M. Geraedts  
Prof. F.P.M. Govers  
Prof. dr. W.P.M. Hoekstra  
Prof. dr. J.A. Knottnerus  
Prof. dr. E. Schroten

## REDACTIECOMMISSIE

Prof. dr. Jos van den Broek  
Dr. Jannes van Everdingen  
Dr. Rob van Dorland  
Dr. ir. Astrid van de Graaf

## BUREAU

Joy Kerklaan  
Monique Verheij

## BEELDEDIRECTIE

B en U international picture  
service, Amsterdam

## INFOGRAPHICS

Prof. dr. Jos van den Broek

## VORMGEVING

Studio Bassa, Culemborg

## DRUK

Drukkerij Tesink, Zutphen

## INFORMATIE,

## ABONNEMENTEN EN

## BESTELLEN LOSSE NUMMERS

Stichting Biowetenschappen  
en Maatschappij  
Laan van Nieuw  
Oost-Indië 334  
2593 CE Den Haag  
telefoon: 070-34 95 402  
e-mail:  
info@biomaatschappij.nl  
www.biomaatschappij.nl

© Stichting BWM

ISBN/EAN 978-94-93232-03-7

Stichting BWM heeft zich  
ingespannen om alle  
rechthebbenden van de  
illustraties in deze uitgave  
te achterhalen. Mocht u  
desondanks menen rechten  
te kunnen laten gelden, dan  
verzoeken wij u vriendelijk  
om contact met ons op te  
nemen.



# Inhoud

Inhoud 1

Voorwoord: Alledaagse ster 2

## 1 Blik op de zon 4

De geboorte en het leven van een ster 5

**KADER** Baan rond de zon 6

**KADER** Kosmisch vuurwerk 6

**INTERMEZZO** 'De zon is nu halverwege zijn leven' 10

## 2 Zon doet leven 14

De zon als evolutionaire kracht 15

**KADER** Water en koolstofketens 17

**KADER** Hoe komen organismen aan bouwstoffen en energie? 18

**KADER** Fotosynthese bij dieren 21

Is er leven op planeet X? 22

**BOX** Wat als de zon maandenlang niet meer 'schijnt' 27

## 3 Zon geeft energie 28

Zonne-energie en de energietransitie 29

**KADER** Over planten en panelen 30

Kernfusie: de zon op aarde 37

**INTERMEZZO** Naar nul-op-de-meter met zonnepaneeleigenaar Anne Schulp 43

**BOX** Koken op zon 45

## 4 Zon en gezondheid 46

Het ontstaan van verschillende huidskleuren 47

Maakt de zon ons gelukkig? 49

**KADER** Leven zonder zon 50

Vitamine D en zonlicht 51

Veroudering van de huid 53

Huidkanker 57

**KADER** Toename van huidkanker onder zonaanbidders 58

**BOX** Zonne(god)aanbidders 60

Bescherming tegen zonlicht 62

**KADER** Zonnebanken geven verhoogd risico op huidkanker 62

**BOX** Ziekten die door zonlicht verbeteren of verergeren 66

## 5 Zon en klimaatverandering 68

De zon als de motor van het klimaat op aarde 69

**KADER** Broeikasgassen: absorptie van warmtestraling door gas 73

**INTERMEZZO** In actie komen met

klimaatambassadeur Helga van Leur 78

De 11-jarige zonnevlekkencyclus en mogelijke klimateffecten 80

De rol van de zon in het verleden 83

Epiloog: De invloed van de mens 88

Meer informatie 94

Auteurs 95

Illustratieverantwoording 96

# Voorwoord: Alledaagse ster

**H**ET WAS tijdens een bijeenkomst van de Nederlandse Astronomen Club, inmiddels jaren geleden. Na een paar pittige theoretische praatjes over het magnetisme van de zon werd de lunch geserveerd op het terras van het conferentiecentrum in Lunteren, want het was heerlijk weer. 'Realiseren jullie je eigenlijk wel,' vroeg ik nieuwsgierig, 'dat je nu van dezelfde zon zit te genieten als waar je sterrenkundig onderzoek zich mee bezighoudt?' Nee dus, dat was nog bij niemand opgekomen.

## Astrofysische heksenketel

De zon is de bron van al het leven op aarde, en ligt aan de basis van onze klok en kalender. Hij vormt zo'n onlosmakelijk onderdeel van ons bestaan dat zelfs een astronoom er meestal niet bij stilstaat dat die alledaagse zon eigenlijk een astrofysische heksenketel is van fuserende protonen, ongrijpbare neutrino's, grootschalige convectie, verstrengelde magneetvelden, borrelend plasma en uitbarstingen van röntgenstraling.

Die wetenschappelijke kijk op de zon begon pas aan het begin van de zeventiende eeuw, toen Christoph Scheiner in Duitsland en Galileo Galilei in Italië merkwaaardige donkere vlekken op het oogverblindende 'oppervlak' ontdekten. Ruim vierhonderd jaar later wordt de zon nauwlettend bestudeerd door ruimtesondes, speciale zonnetelescopen, radio-experimenten en neutrino-detectoren. Er is veel ontdekt, maar onopgeloste raadsels zijn er nog volop.

Terwijl de bestudering van het heelal meestal geen direct praktisch doel dient, is het onderzoek

aan de zon meer dan louter fundamentele wetenschap. De zon is de motor van het klimaat, en uitbarstingen op het oppervlak kunnen onze kwetsbare technologische samenleving ontwrichten. Als een kosmische Shiva schept de zon enerzijds de voorwaarden voor ons bestaan, maar zijn we tegelijkertijd overgeleverd aan zijn desastreuze grillen.

## Leven onder de zon

Bestaat er eigenlijk een aspect van het leven waarin de zon géén rol speelt? Ons slaap- en waakritme, de seizoenen, weer en klimaat, plantengroei en vogeltrek, landbouw en veeteelt, ziekte en gezondheid, voedselvoorziening en energiehuishouding, economie en vrije tijd – werkelijk alles is op de een of andere manier verweven met die kolossale gloeiende bol van waterstof- en heliumgas op 150 miljoen kilometer afstand.

De enorme invloed en betekenis van de zon dringt zich soms aan me op als ik op een heldere nacht naar de sterrenhemel kijk. Het is ook nog maar een dikke vierhonderd jaar geleden dat we ons voor het eerst realiseerden dat die nachtelijke speldenprikjes van licht stuk voor stuk andere zonnen zijn, op onvoorstelbare afstanden, en in alle denkbare soorten, maten en kleuren.

We denken die andere zonnen tegenwoordig redelijk te begrijpen. Temperatuur, massa, lichtkracht, samenstelling – van de meeste sterren kennen we de belangrijkste 'karaktereigenschappen'. We weten dat veel sterren met z'n tweeën of drieën door het leven gaan, en dat sommige met de regelmaat van de klok van helderheid veranderen. Het is



astronomen zelfs gelukt om trillingen, vlekken en vlammen op andere sterren te registreren.

### Een ster met vele karakters

Maar de manier waarop we de sterren beschrijven is vergelijkbaar met de manier waarop de sprekers op die Lunterse astronomenconferentie het over de zon hadden. Cijfers, formules en grafieken. Terwijl bijna elke ster aan het firmament vergezeld wordt door planeten, en in potentie ook al die andere aspecten van het zon-zijn in zich herbergt: seizoensmeester, weerbrenger en klimaatzwengelaar, generator en voedselverstrekker, beschermheer en potentaat, ontzagfdwinger, schepper en vernietiger. Wie met die wetenschap naar de

nachtelijke hemel kijkt, moet wel onder de indruk raken van de overweldigende grootsheid van de kosmos.

Dit cahier schetst een veelzijdig portret van onze zon, en van de sterke mate waarin wij aardbewoners afhankelijk zijn van deze *middle-of-the-road*-ster in een buitenwijk van het Melkwegstelsel. Het zijn de 'gelaatstreken' waarvan we ons doorgaans niet zo bewust zijn – zelf ervaar ik de zon meestal ook gewoon als die aangename warmtebrengende gouden schijf aan de blauwe hemel. Misschien is een zomers terras daarom wel de uitgelezen plek om de bijdragen op de volgende pagina's tot je te nemen.

Veel zonnig leesplezier gewenst!

Govert Schilling

# 1 Blik op de zon



# De geboorte en het leven van een ster

Die ogenschijnlijke rustige kosmische buurman is eigenlijk een enorme gloeiende gasbol vol straling, magnetisme en kernfusie. Ooit zal die voorraad waterstofgas opraken.

ANS HEKKENBERG

We weten al veel over onze ster, en er is ook nog veel te leren. Met de Europese observatorstateliet Solar Orbiter die in een baan om de zon cirkelt, krijgen we de meest recente blik op onze ster en haar invloed op de aarde.

**N**A DE zestiende eeuw stond de aarde niet langer in het middelpunt van het universum. Wetenschappers hadden bewezen dat de zon niet om de aarde draait, maar de aarde om de zon. De mensheid moest de bijzondere positie die zij haar planeet had toegekend opgeven. Zo'n twee eeuwen later waren astronomen het er bovendien over eens dat onze zon niet uniek is. De zon bleek een ster, net als alle andere sterren in het universum – hij staat alleen een stuk dichterbij. En net als alle andere sterren heeft de zon een levensloop: een geboorte, een reeks gezonde jaren en uiteindelijk een onvermijdelijke dood.

## De vroege jaren

Laten we beginnen bij de geboorte. We danken het bestaan van de zon, en daarmee ook óns bestaan, aan een grote wolk van stof en voornamelijk waterstofgas die 4,6 miljard jaar geleden onder zijn eigen zwaartekracht in elkaar begon te vallen. Door die ineenstorting begon in het midden van de wolk materie aan elkaar te plakken. En dankzij de zwaartekracht die de vormende klont uitoefende, trok het vervolgens nog méér materie naar zich toe. Zo vormde zich in het midden een grote gloeiende bol. Onze zon was geboren.

Om de jonge zon heen draaiden de resten van de gas- en stofwolk. Dat alles vormde een schijf van stofdeeltjes, rotsen en puin die langs elkaar heen schuurden. Op verschillende plekken in de schijf klonterde weer wat materie samen tot objecten: de planeten van ons zonnestelsel. Een van de hete bollen die om de zon heen draaide, koelde af en

## Baan rond de zon

Toen ons zonnestelsel zich vormde, bleven alle kersverse planeten netjes om de zon heen draaien. Waarom vielen deze rotsblokken niet zonder pardon naar dat enorme object in het midden? De zon trekt aan de aarde en aan alle andere planeten. Maar elke planeet vliegt ook met een eigen, behoorlijk grote snelheid door de ruimte, een

snelheid die ze bij de vorming van het zonnestelsel hebben meegekregen. De snelheid waarmee de aarde naar de zon toe valt, concurreert met de snelheid waarmee de aarde langs de zon vliegt. De zon trekt de planeet in feite steeds de hoek om, maar door zijn snelheid blijft de aarde netjes rondjes vliegen – als een stoel in een zweefmolen.

vormde het rotsblok aarde waar veel later de mens zou evolueren.

### Energiecentrale

Wat zorgde ervoor dat de bol in het midden van ons planetenstelsel ging gloeien, terwijl de planeten dat niet deden? Het korte antwoord is: *size matters*. Met elk stukje extra materiaal dat op de centrale bol belandde, groeide ook de druk en de temperatuur ter plekke. Zodra de druk en temperatuur hoog genoeg waren, ontvlamde het binnenste van de bol tot een ware energiecentrale. Daardoor begon de bol, die vanaf dat moment de naam ster mocht dragen, licht te geven.

Wat de kern van de zon deed ontvlammen is kernfusie (zie ook hoofdstuk 3 Kernfusie: de zon op aarde). Het is een proces waarbij atomen onder hoge druk samensmelten en een groter, zwaarder atoom vormen. In de zon smelt waterstof samen tot helium. Niet alle massa van de oorspronkelijke waterstofatomen belandt in het heliumexemplaar. Een gedeelte van de massa verandert in energie die ontsnapt in de vorm van licht.

In zijn vroege jaren was de zon een erg actieve ster die regelmatig vernietigende ladingen straling op de aarde afvuurde – niet alleen licht, maar ook andere stralingsoorten zoals röntgen- en gammastraling. Het duurde een paar miljoen jaar voordat

de jonge ster wat bedaarde en veranderde in de rustige kosmische buurman zoals wij hem vandaag de dag kennen.

### Explosief karakter

Het gemiddelijke voorkomen van de zon is vooral schone schijn. Natuurlijk hebben we veel aan onze zonnige buur te danken. Het zonlicht dat de aarde bereikt zorgt ervoor dat het hier aangenaam warm is en dat het water door onze beken kabbelt. Het zorgt er ook voor dat planten groeien en de planeet krioelt van het leven. Toch is de zon niet altijd alleen maar goed voor het aardse leven.

De zon bestaat uit plasma: een heel hete soep van positief geladen moleculen en negatief geladen elektronen. Omdat op de zon complexe magneetvelden rondkolken, wordt er voortdurend aan deze geladen, hete deeltjesbrij getrokken. De magneetvelden zorgen er in feite voor dat de zon geen gladde plasmavijver is, maar een kolkende oceaan. Doordat het plasma beweegt, ontstaan er hetere en koelere plekken op de zon. Koele plekken zijn wat donkerder dan hun omgeving. Ze staan daarom bekend als zonnevlekken.

### Kosmisch vuurwerk

Wie wel eens heeft gelezen over hoe sterren tot hun einde komen, zal misschien verbaasd zijn te horen dat de zon eindigt als witte dwerg. Gaat de dood van een ster niet gepaard met een enorme ontploffing, een supernova? Verandert een dode ster niet in een zwart gat: een supercompact object dat alle materie in zijn buurt naar zich toetrekt? Het antwoord is ja en nee. Sterren kunnen zeker zo'n spectaculaire dood ondergaan – maar dat geldt alleen voor hele zware sterren. De zon heeft niet genoeg massa om een supernova te ontketenen. Vergeleken met veel sterren in het heelal is de zon eigenlijk maar een lichtgewicht.

Aan het aantal zonnevlekken valt te zien hoe actief de zon is. De zonneactiviteit maakt een cyclus door van ongeveer elf jaar (varieert van 9 tot 14 jaar). In deze tijd wordt een roerige periode op het zonnoppervlak afgewisseld met een rustigere fase.

### Deeltjesstorm

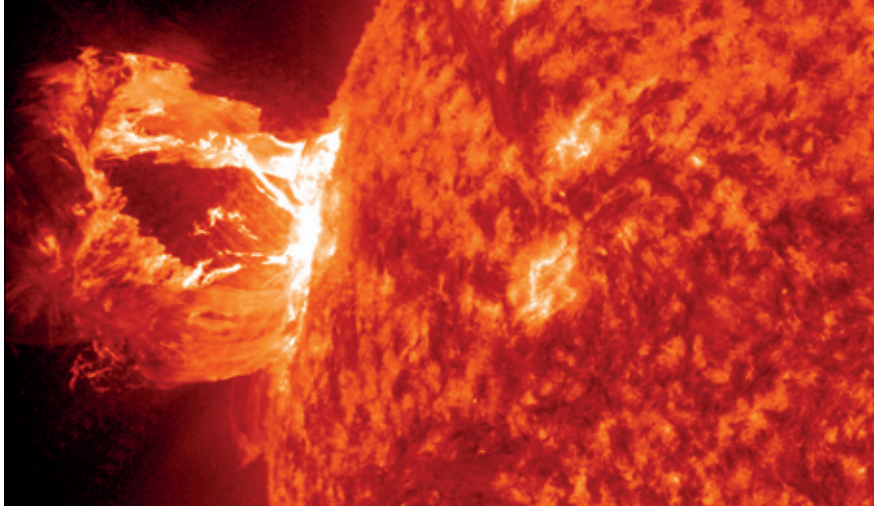
Het effect van de zon op aarde is het duidelijkst wanneer de magneetvelden op de zon een tijdlang een grote portie energie hebben vastgehouden. Als die energie plots vrijkomt, ontstaat er een explosie op het zonnoppervlak. Zo'n explosie slingert geladen deeltjes de ruimte in. Als we pech hebben, ligt de aarde op de route van zo'n deeltjesstorm.

Gewoonlijk beschermt het magneetveld van de aarde ons voor deze zogenoemde zonnwind. Maar als de geladen deeltjes in groten getale arriveren, kunnen ze het aardmagnetisch veld binnendringen. Dat kan leiden tot een prachtig noorderlichtspektakel. Maar de zonnwind kan ook negatieve gevolgen hebben. Een grote uitbarsting kan radioverbindingen verbreken, satellieten uitschakelen en zorgen voor verwoestende pulsen in elektriciteitsnetten. Ook kan zo'n zonnwind de ozonlaag beschadigen, waardoor schadelijke uv-straling het leven op aarde kan teisteren.

De aarde wordt regelmatig door kleine hoeveelheden zonnwind geraakt. Maar echt ernstige uitbarstingen die de aarde bereiken, komen ongeveer eens per eeuw voor. Het meest bekende voorbeeld van een zonne-uitbarsting die schade veroorzaakte, vond plaats in 1859. Deze zonnestorm legde toen telegraafsystemen in de Verenigde Staten plat. De gevolgen waren beperkt, maar tegenwoordig zou een vergelijkbare storm grote consequenties hebben. Het aantal elektrische netwerken dat we gebruiken is immers explosief gegroeid.

### Richting het einde

De zon zal ons nog een lange tijd vergezellen. Hij kachelt rustig voort op de grote hoeveelheid water-



stof in zijn kerncentrale. Het lijkt misschien alsof dat proces eindeloos kan doorgaan. Niets is minder waar.

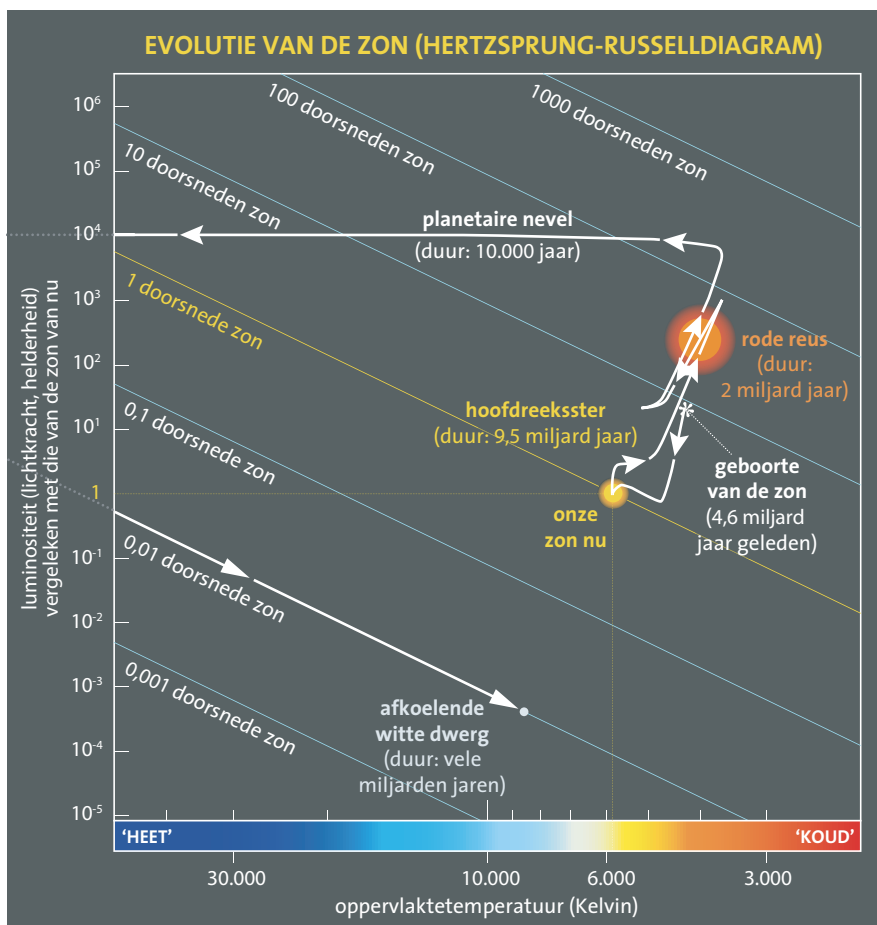
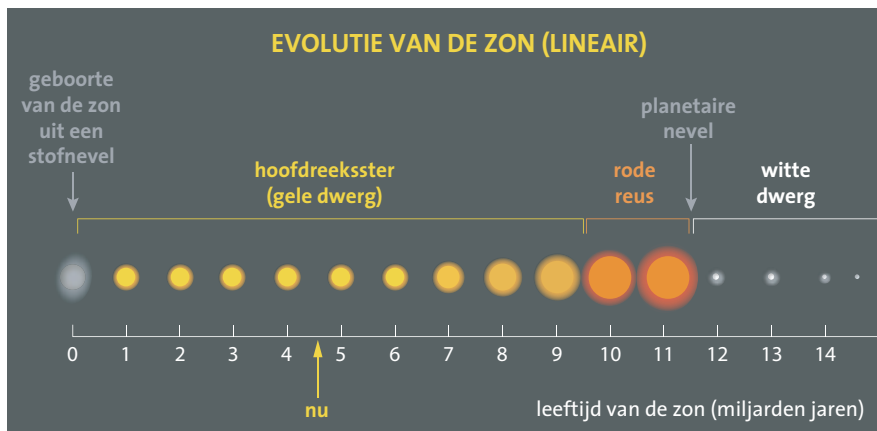
Momenteel, in de bloei van zijn leven, zet de zon elke seconde zo'n 700 miljoen ton waterstof om in helium. Op een gegeven moment zal die voorraad waterstof op zijn. Er vindt dan even geen kernfusie meer plaats die naar buiten duwt, waardoor de zwaartekracht vrij spel krijgt en de zon een stukje krimpt. Daardoor nemen de temperatuur en druk in de kern weer toe, waardoor de zon overschakelt op het samensmelten van de gemaakte heliumatomen tot nog zwaardere elementen zoals koolstof.

### Rode reus

Het is het begin van het einde. Deze nieuwe fase van kernfusie zorgt voor een nieuwe injectie van energie die ertoe leidt dat in de buitenste lagen van de ster, die eerst niet meededen met de kernfusie-reacties, nu plotseling waterstof gaat samensmelten. Door al die extra energieproductie zal de zon opzwellen tot gigantische proporties. Hij verandert in een type ster dat astronomen een rode reus noemen.

Er is een behoorlijke kans dat de zon dan zelfs zo enorm groeit dat hij voorbij de baan van de aarde reikt en onze thuisplaneet verzwelgt. Maar voordat dat gebeurt, zal de hitte van de rode reuzezon onze

**De zon stoot een zonnevlam uit op 16 april 2012. Deze spectaculaire explosie vond plaats op de noordoostelijke helft van de zon en was niet naar de aarde gericht.**



oceanen verdampen en het land verschrompelt. Terwijl het laatste uur voor het aardse leven slaat, slingert de buitenste gaslagen van de zon de ruimte in. Rondom de zon ontstaat daardoor een kleurrijke gaswolk, een zogenoemde planetaire nevel.

De kale kern van de gestorven zon die overblijft zal langzaam maar zeker afkoelen. Het is dan een witte dwerg: een dode ster waarin geen kernfusie meer plaatsvindt, maar die nog wel een beetje licht geeft omdat hij zo verschrikkelijk heet is (zie kader Kosmisch vuurwerk). De planetaire nevel die de dwerg versiert zal na tienduizenden jaren verdwijnen doordat hij verder wegdrijft en aan helderheid verliest. Maar de witte dwerg zal miljarden jaren blijven schijnen voordat zijn licht uitgaat.

Hoewel het 'zonlicht' nog miljarden jaren schijnt, zal de aarde daar niks van meemaken. Het is erg vroeg om ons daar nu al zorgen over te maken. De zon zit ongeveer op de helft van zijn leven en hij gaat nog zo'n 5 miljard jaar mee. Genoeg tijd om ervan te genieten, onze vingers te kruisen dat een zonnestorm ons bespaard blijft en alvast na te denken over een ontsnapplan voor wanneer de zon opzwellt tot rode reus.

Evolutie van onze zon, lineair uitgezet in de tijd (boven) en als Hertzsprung-Russell diagram (onder), vanaf het moment van geboorte tot en met het einde als afkoelende witte dwerg. Op de verticale as van het multidimensionale HR-diagram wordt de helderheid of lichtkracht van sterren (luminositeit) op een logaritmische schaal vergeleken met die van de huidige zon. Op de horizontale as de oppervlaktetemperatuur in Kelvin, ook op een logaritmische schaal. De situatie van de huidige zon als zogenoemde hoofdreksster staat in het diagram weergegeven. De blauwe scheve lijnen staan voor de doorsnede ten opzichte van die van de huidige zon. De evolutie van de zon is als een witte pijl te volgen. De tijdsaanduiding tussen haakjes geeft de tijd aan die een episode duurt. Als rode reus is de zon straks tot enorme proporties opgezwollen. Als snel krimpende planetaire nevel wordt de zon in korte tijd enorm heet, om in de vele miljarden jaren erna als een nietig wit dwergje (met een doorsnede van een honderdste van die van de huidige zon) af te koelen en steeds minder helder te worden.

## Doorsnede

1.392.684 km

ongeveer 109 x  
doorsnede van de aarde

## Massa

$1,9 \times 10^{30}$  kg

ongeveer 333.060 x  
massa van de aarde

## Volume

$1,4 \times 10^{27}$  m<sup>3</sup>

ongeveer 1,3 miljoen x  
volume van de aarde

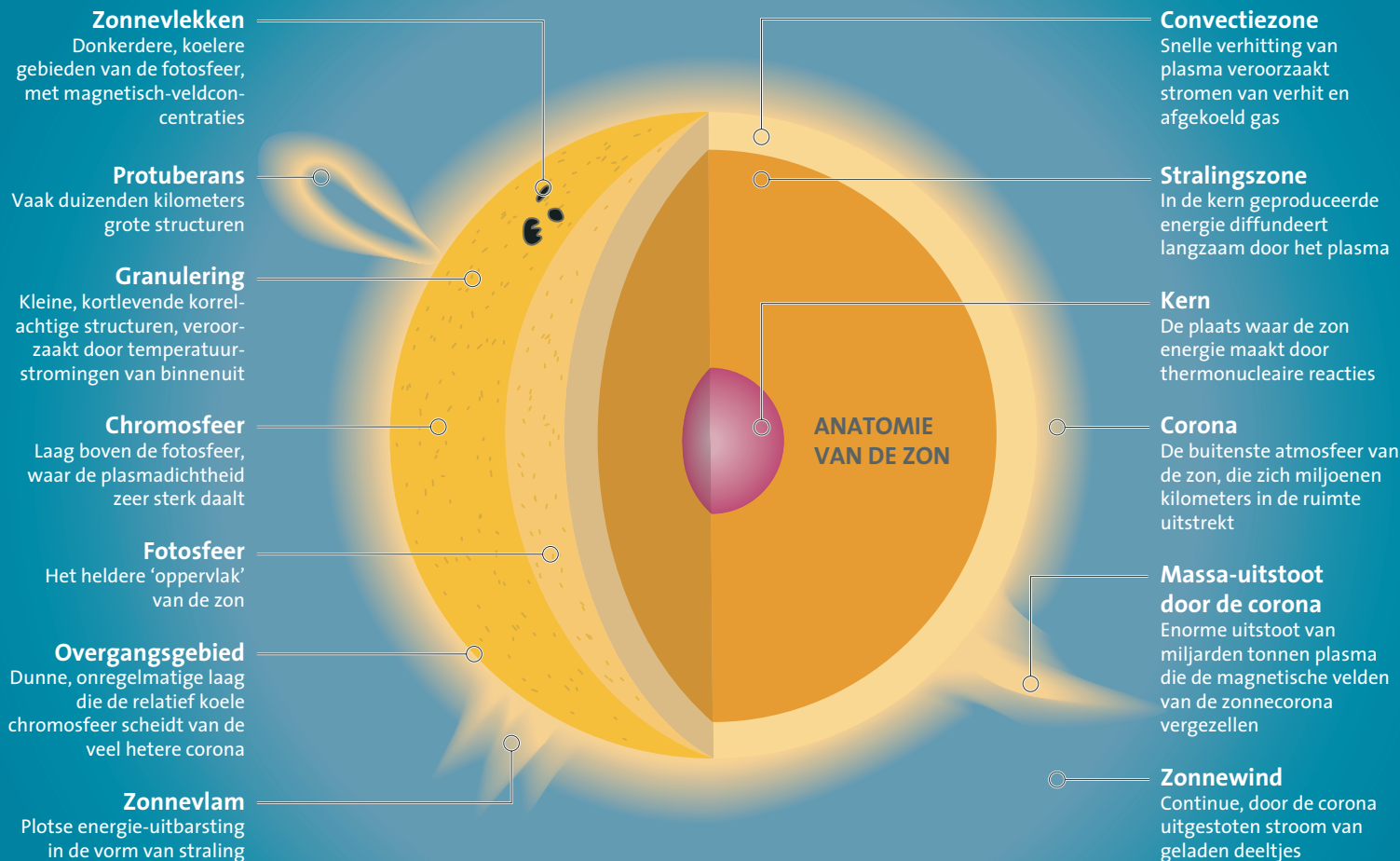
## Temperatuur

Kern: 15 miljoen °C  
Corona: 1 miljoen °C  
Oppervlak: 5500 °C

## Leeftijd

4,6 miljard jaar

(ongeveer op de helft  
van zijn 'werkzame' leven)



### Zonnevlekken

Donkerdere, koelere gebieden van de fotosfeer, met magnetisch-veldconcentraties

### Protuberans

Vaak duizenden kilometers grote structuren

### Granulering

Kleine, kortlevende korrelachtige structuren, veroorzaakt door temperatuurstromingen van binnenuit

### Chromosfeer

Laag boven de fotosfeer, waar de plasmadichtheid zeer sterk daalt

### Fotosfeer

Het heldere 'oppervlak' van de zon

### Overgangsgebied

Dunne, onregelmatige laag die de relatief koude chromosfeer scheidt van de veel hotere corona

### Zonnevlam

Plotse energie-uitbarsting in de vorm van straling

### Convectiezone

Snelle verhitting van plasma veroorzaakt stromen van verhit en afgekoeld gas

### Stralingszone

In de kern geproduceerde energie diffundeert langzaam door het plasma

### Kern

De plaats waar de zon energie maakt door thermonucleaire reacties

### Corona

De buitenste atmosfeer van de zon, die zich miljoenen kilometers in de ruimte uitstrekt

### Massa-uitstoot door de corona

Enorme uitstoot van miljarden tonnen plasma die de magnetische velden van de zonnecorona vergezellen

### Zonnewind

Continue, door de corona uitgestoten stroom van geladen deeltjes

## Rotatie om de as

36 dagen aan de polen

25 dagen aan de evenaar

## Relatieve snelheid

Met 220 km/s duurt een baan rond het centrum van de Melkweg liefst 250 miljoen jaar

## Magnetisch veld

Iedere 11 jaar klappt het magnetisch veld om

## Grootste zonnevlek

In 1947 werd een zonnevlek waargenomen ter grootte van Jupiter (doorsnede 139.820 km)

## Reistijd van zonlicht

Zonlicht doet 8 minuten over de gemiddeld  $\pm 150$  miljoen km van de zon naar de aarde

© jos van den broek • bron: esa

# ‘De zon is nu halverwege zijn leven’

ROB BUITER

**A**L MEER dan 95 jaar is emeritus-hoogleraar astrofysica Kees de Jager gefascineerd door de zon. ‘Het begon toen ik vijf jaar oud was en mijn vader mij het noorderlicht liet zien’, herinnert hij zich. ‘We woonden in De Cocksdorp, op het noordelijkste puntje van Texel. Mijn vader was leraar op het eiland en heel erg gefascineerd door alles wat met de ruimte te maken had. Toen hij mij op een avond het noorderlicht liet zien, kon hij mij dan ook precies vertellen hoe het zat, met deeltjes die van de zon afkwamen, die vervolgens in de dampkring stikstofatomen deden oplichten. Op dat moment is mijn fascinatie voor de zon en de andere sterren definitief aangewakkerd.’

Niet lang daarna verhuisde het gezin De Jager naar Nederlands-Indië. ‘We woonden daar op één graad noorderbreedte, op Sulawesi. Eén van de eerste dingen die mijn vader daar deed’, zo herinnert De Jager zich lachend, ‘was op een avond checken of hij de Poolster ook op één graad boven de horizon kon zien. Het lukte hem niet, zelfs niet vanaf een heuvel achter ons huis.’

‘Ook voor mij liep de sterrenhemel vervolgens als een rode draad door mijn tijd op Sulawesi, en later ook op Surabaya’, aldus De Jager. ‘Op een gegeven moment kwam er een vriendje naar mij toe, die blufte dat hij wist waar het centrum van het heelal was. We gingen er stiekem ’s avonds naar kijken. Toen mijn vader mij vervolgens boos op stond te wachten bij het tuinhok, omdat hij dacht dat ik met “slechte jongens of slechte meiden” op pad was geweest, ontdeedde hij meteen toen ik hem vertelde dat mijn vriendje mij het centrum

van het heelal had laten zien, in het sterrenbeeld Pleiaden. Het was, wist ik niet veel later, grote onzin, maar in 1850 had iemand dat praatje de wereld in geholpen, en dat ging nog steeds rond.’

## Droog brood

Toen de achttienjarige Kees vervolgens in zijn eentje terug naar Nederland verhuisde, om onder het waakzame oog van een oom in Utrecht te gaan studeren, kwam hij er al na één college van professor Marcel Minnaert achter dat hij geen natuurkunde wilde studeren, zoals aanvankelijk de bedoeling was, maar sterrenkunde! ‘Mijn ouders waren het er helemaal niet mee eens. “Daar viel geen droog brood in te verdienen”, schreven ze vanuit Indië. De geboren Vlaming Minnaert beaamde dat desgevraagd, maar toen ik als uitvlucht verzoon dat ik in geval van nood als sterrenkundige altijd nog natuurkunde zou kunnen doceren op een middelbare school, gingen mijn ouders toch akkoord.’

In de decennia na zijn afstuderen en promoveren, ontwikkelde De Jager zich tot een internationaal gerespecteerd zonne-onderzoeker. En ook op zijn 98ste [toen dit interview is afgenomen, red] kon De Jager nog steeds kraakhelder en pakkend over zijn werk vertellen. ‘De zon is maar een fractie ouder dan de aarde: 4,6 miljard jaar tegenover 4,5 miljard voor de aarde’, doceert hij. Die honderd miljoen jaar verschil zijn een peulenschilletje volgens De Jager, die sowieso met astronomische getallen strooit alsof het hagelslag is. ‘De zon is ooit ontstaan uit één van de vele miljoenen gaswolken in het heelal, die onder invloed van hun eigen zwaartekracht een bal gingen vormen.’



Emeritus-hoogleraar astrofysica professor Kees de Jager (1921) wordt nog steeds omarmd door het handjevol overgebleven ontkenners van het klimaateffect. 'Niet de mens, maar de zon verandert het klimaat', is hun stelling. Zelf blijft De Jager liever nuchter: 'De zon veroorzaakt inderdaad veel schommelingen in ons klimaat, maar de huidige opwarming kun je er echt niet meer mee verklaren.'

'De gaswolk werd dichter en dichter en daarmee warmer en warmer. Bij een bepaalde dichtheid begon kernenergie vrij te komen, toen waterstofatomen begonnen samen te smelten tot heliumatomen. Dat proces van kernenergie gaat tot op de dag van vandaag door. Alleen gaat dat proces van de kern van de zon langzaam naar buiten. Zodra de waterstofatomen in de kern allemaal zijn samengesmolten tot helium, verplaatst de kernreactie zich verder naar buiten, waar nieuwe waterstofatomen klaarliggen.'

'De zon is nu halverwege zijn leven', stelt De Jager. 'Over nog eens 4,5 miljard jaar is alle waterstof op. Maar tegen die tijd is het leven op aarde ook allang verdwenen. Omdat de kernreactie langzaam naar buiten verhuist en omdat de daarbij ontwikkelde hitte leidt tot uitdijning van de materie, wordt de zon steeds groter. Doordat de kernreactie steeds dichter bij de buitenkant komt, gaat de zon ook feller stralen. Over vijfhonderd miljoen jaar zal de gemiddelde temperatuur op aarde daardoor al zijn gestegen tot boven de vijftig graden Celsius. Over vier miljard jaar zal de uitdijende zon zelfs de binnenplaneten Mercurius en Venus hebben opgeslokt.'

Of de aarde eenzelfde lot beschoren zal zijn: opgeslokt worden door de zon, daar twijfelt de wetenschap nog over, aldus De Jager. 'Er zijn verschillende scenario's, waarbij de aarde net wel of net niet in de buitenste lagen van de zon zal verdwijnen. Maar het is zeker dat onze planeet tegen die tijd volstrekt onleefbaar zal zijn.'

## Klimaat

Sinds het jaar 1610 zijn de telescopen en zonnekijkers zo goed, dat mensen waarnemingen kunnen doen aan de zogeheten zonnevlekken. De Jager: 'Die zonnevlekken zijn relatief koele, donkere plekken op het oppervlak van de zon. Hoe meer van die vlekken, hoe "actiever" de zon is. En als je dan die activiteitspatronen van de zon, met een cyclus van een jaar of elf, naast een grafiek van de geregistreeerde temperatuur op het noordelijk halfrond van de aarde legt, dan blijken die lijnen elkaar keurig te volgen, met een vertraging van een jaar of zestien. Zie je meer zonnevlekken, dan weet je dat het zestien jaar later wat warmer zal zijn op aarde.'

Door deze relatie tussen de zonneactiviteit en de temperatuur op aarde, is De Jager lange tijd omarmd door het relatief kleine groepje min of meer serieuze mensen die 'de antropogene klimaatverandering', dus de invloed van menselijke activiteit op het klimaat, nog steeds ontkennen. 'Hoezo zorgen wij met onze CO<sub>2</sub>-uitstoot voor opwarming van de aarde?! De zon heeft het gedaan'.

'Tot 1920 hadden die lieden gelijk', beaamt De Jager. 'Maar vanaf dat moment komt er een extra component bij het zonne-effect. De gemiddelde temperatuur op aarde is nu een hele graad hoger dan je op basis van de zonneactiviteit mag verwachten. Een hele graad. Dat lijkt misschien niets, maar is als wereldwijd gemiddelde natuurlijk heel veel!' Over de oorzaak van die extra graad – niet toevallig dezelfde schatting als het IPCC, het klimaatpanel van de Verenigde Naties – blijft De Jager liefst op de vlakte. 'Het kan goed zijn dat die graad door de mens wordt veroorzaakt. Maar ik ben astrofysicus, geen meteoroloog, dus ik laat mij daar gewoon niet over uit.'

De Jager lijkt er in ieder geval niet mee zitten dat hij door sommigen in het kamp van de klimaatsceptici is gedrukt. 'Wetenschap bestaat bij de gratie

van scepticisme', benadrukt hij. 'Een goede wetenschapper vraagt zich continu af: "Is dat wel zo?" Maar een klimaatscepticus moet in ieder geval niet gaan roepen dat de opwarming er niet is. Bovenop de verwarming en ook de afkoeling door de schommelende zonneactiviteit, is er wel degelijk een hele graad bijgekomen!'

## Mijlpalen

De interesse van De Jager voor de relatie tussen de zon en het aardse klimaat is eigenlijk pas na zijn emeritaat ontstaan. 'Het grootste deel van mijn werkzame leven heb ik in de Sonneborgh gewoond, de sterrenwacht in Utrecht. Toen ik ruim na mijn emeritaat, vijftien jaar terug op mijn geboorte-eiland Texel kwam wonen, werd ik aangeschoten door de directeur van het instituut voor Zeeonderzoek, Jan de Leeuw. Die bood mij een werkplek op zijn instituut als ik mij wilde verdiepen in de relatie zon-klimaat. Uiteindelijk, na vijftien jaar werk, hoop ik samen met twee collega's nog een wetenschappelijk boek te publiceren over deze relatie. Ik ben De Leeuw nog steeds dankbaar dat hij mij de gelegenheid heeft geboden daar eens goed in te duiken.'

Ook in zijn tijd als onderzoeker in Utrecht, zette De Jager diverse mijlpalen in de boeken. 'Toen ik als jonge onderzoeker begon, liet professor Marcel Minnaert mij als één van de eersten naar het spectrum van het zonlicht kijken. Uit de details in dat spectrum kun je informatie halen over de fysische gegevens, zoals de samenstelling van de gassen in de zon en de andere sterren. Later voegden wij daar röntgenonderzoek aan toe. Dat onderzoek nam een echte vlucht toen wij een zelfbedacht, en samen met het Nederlands elektronicaconcern Philips gebouwd, instrument mee konden sturen met een satelliet van het Amerikaanse ruimteonderzoeksinstituut NASA. Daarmee konden we onder andere heel gedetailleerde opnames maken van zonnevlammen.'

Noorderlicht (*aurora borealis*) gezien vanuit het Abisko Mountain Station in Zweeds Lapland eind maart.



Het nieuwe instrument van De Jager en collega's ging op Valentijnsdag 1980 mee de ruimte in en leverde al op Koninginnedag de eerste gegevens. 'En die waren ronduit spectaculair', stelt De Jager met een dikke grijns. 'We vonden uiteindelijk zogenoemde stroombogen. Dat zijn een soort zonnevlammen waar maar liefst duizend miljard ampère aan elektrische stroom doorheen gaat. We konden zien hoe twee van die stroombogen aan het oppervlak van de zon kortsluiting maakten en daarbij heel kort een temperatuur van vijftig miljoen graden Celsius bereikten, terwijl de normale temperatuur aan het oppervlak "maar" vijftien-duizend graden Celsius is. Zoiets was nog nooit aangetoond!'

Op de vraag wat je met deze kennis kunt, in praktische zin, blijft De Jager weer kenmerkend nuchter. 'Niets, denk ik. Ik wil dit soort zaken gewoon begrijpen vanuit mijn fundamentele wetenschappelijke nieuwsgierigheid.'

### Oerknal

'Als mij nog eens 98 jaar gegeven zou zijn, dan zou ik bijvoorbeeld ook heel graag onderzoeken wat er nu voor de oerknal was, bijna veertien miljard jaar geleden.'

Die term 'oerknal', waarmee het moment wordt aangeduid dat alle materie uit één heet punt in het heelal is ontstaan, blijkt overigens ook op het conto van De Jager te kunnen worden geschreven. 'In de Engelse wetenschappelijke literatuur werd al langer over The Big Bang gesproken. Ik stelde op een gegeven moment voor om daar in het Nederlands "oerknal" van te maken. En zo is het gekomen.'

De vraag waar de mensheid wél veel mee kan – wat is de rol van de zon in de verandering van het aardse klimaat? – die beschouwt De Jager als afdoende beantwoord. 'De zon is niet de enige opwarmer van ons klimaat. En die hele graad die niet door de zon wordt verklaard, daar moeten meteorologen zich over buigen.'

# 2 Zon doet leven





## De zon als evolutionaire kracht

De grootste uitvinding in de evolutie was misschien wel het fotosysteem dat zonne-energie opvangt en omzet in nuttige stoffen. De fotosynthesereactie is vrijwel alleen weggelegd voor groene eencelligen en planten. Maar daar profiteren vrijwel alle andere organismen op aarde van.

HANS BREEUWER

**S**INDS HET ontstaan van de aarde is er veel veranderd in het aardse milieu, zowel in de aardlagen en de oceanen als in de atmosfeer. De enige constante factor gedurende het 4,5 miljard jarig bestaan van de aarde is de zon: de drijvende kracht voor het evolutionaire begin van het leven. En nog steeds speelt onze zon een sleutelrol bij het wisselen van de seizoenen, dag-nachtritme, gaten in de ozonlaag en klimaat.

### Hoe het leven is ontstaan

De situatie in het prille begin van planeet aarde, ten tijde van het Archaeïcum (4,5-2,5 miljard jaar geleden), is niet te vergelijken met de situatie van nu. Zo had de aarde in het begin nog geen atmosfeer. Door samenklontering van stofwolken en een bombardement van meteorieten was de aarde ontstaan. Bij de wrijving tussen de stofdeeltjes en de meteorietinslagen kwam veel thermische energie vrij waardoor de aarde toen vloeibaar was. Zwaardere elementen, zoals ijzer, konden door de zwaartekracht naar de beneden zakken en de kern van de aarde vormen, die nu nog steeds vloeibaar is.

Daarna is de aarde langzaam gaan afkoelen en kwamen gassen vrij tijdens het stollen van gesteente. Omdat de aarde niet gelijkmatig afkoelde, ontstonden er temperatuurstromen in de aardmantel, die weer leidden tot vulkanisme. De vrijkomende stollings- en vulkaangassen vulden geleidelijk een atmosfeer met methaan, ammoniak, CO<sub>2</sub> en waterdamp. Dit zijn bijna allemaal broeikasgassen die ten tijde van het ontstaan van leven ervoor zorgden dat de gemiddelde tempera-

Vanuit een oersoep aan moleculen en chemische reacties is ooit het leven ontstaan. Was de zon daarvoor noodzakelijk of niet? En hoe waarschijnlijk is het dat elders in de ruimte (primitief) leven te vinden is?

tuur van de eerste oceanen gemiddeld meer dan 10 graden hoger lag dan nu.

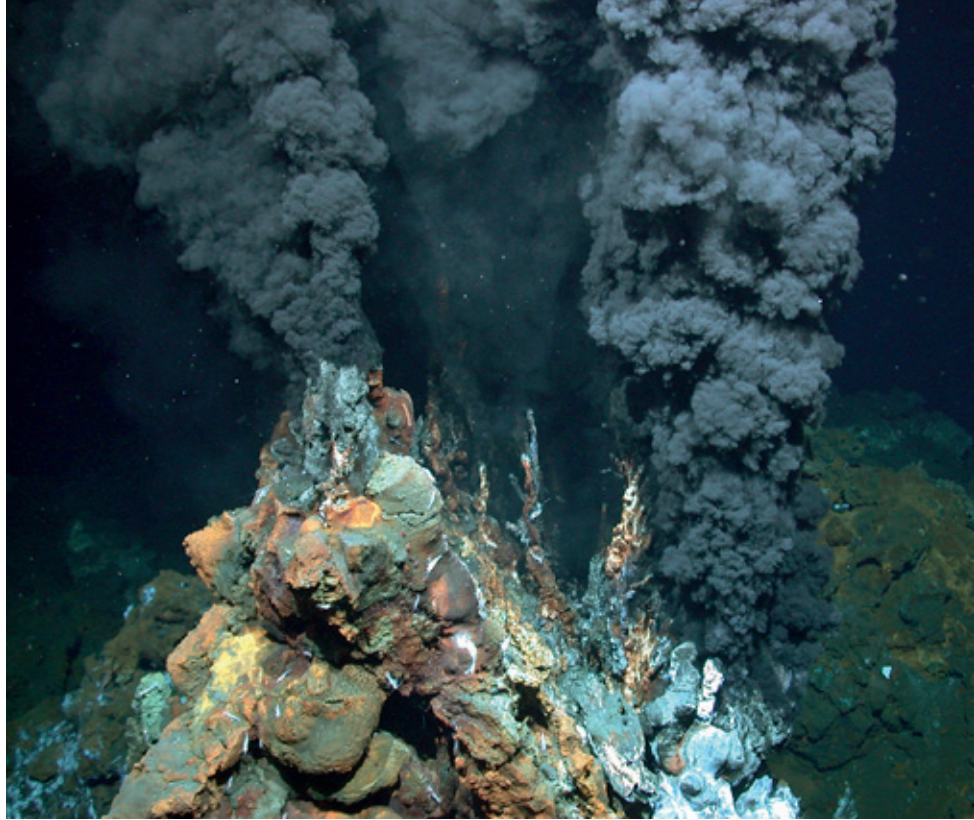
Het ammoniak werd onder invloed van zonlicht afgebroken, waarbij stikstof ontstond. Dit is waarschijnlijk de reden dat stikstof nu het hoofdbestanddeel vormt van onze atmosfeer. Door de hoge vulkanische activiteit en de samenstelling van de atmosfeer waren ook de chemische omstandigheden op aarde heel anders.

Verder zat er in deze 'prille' atmosfeer nog geen zuurstof. Daardoor ontbrak een beschermende ozonlaag en drong veel schadelijke uv-straling van de zon door tot op het aardoppervlak. Alhoewel uv-straling bepaalde chemische reacties aandrijft, kan het aan de andere kant grote organische moleculen weer afbreken, en veroorzaakt het mutaties in complexe moleculen als RNA en DNA. De zon lijkt dus al met al niet bevorderlijk te zijn voor het ontstaan van het eerste leven. Toch heeft dat zich onder die extreme omstandigheden kunnen voltrekken.

### Oersoep

Er is nog veel onbekend over hoe de overgang van die chemische soep met moleculen naar het eerste primitieve leven met micro-organismen precies is gegaan. Hoogstwaarschijnlijk gebeurde dat diep onder water, beschermd tegen de sterke uv-straling, op geologisch stabiele plekken op het grensvlak met de oceanbodem. Plekken zonder grote temperatuurschommelingen, hevige stroming en grote bodemactiviteit en waar het niet al te warm was. Waarschijnlijk begon daar het leven met chemische reacties tussen organische moleculen, waaruit later de eerste *chemotrofe* micro-organismen ontstonden. Deze organismen benutten de warmte uit de hete kern van de aarde als energiebron.

De meest waarschijnlijke plekken voor het ontstaan van het leven zijn de zogenoemde *black* en *white smokers*, een soort diepzeeschoorstenen rond



**Deze *black smoker* bevindt zich op 2980 meter diepte van de Mid-Atlantische Rug. *White smokers* zijn later ontdekt dan de *black smokers*. Omdat de *white smokers* veel ouder kunnen worden (stabiel zijn) en minder extreem is waarschijnlijk daar het leven ontstaan.**

hydrothermale bronnen. De smokers groeien langzaam omhoog door afzetting van opborrelende mineralen zoals ijzer en zwavel, afkomstig van vulkanische activiteit uit het binnenste van de aarde. De smokers zijn te vergelijken met reageerbuizen waarin – onder invloed van temperatuur, katalytische eigenschappen van de afgezette mineralen en constante toevoer van grondstoffen – allerlei complexe moleculen worden gevormd, die nu bekend zijn als bouwstenen van levende cellen.

Wetenschappers hebben dit in het laboratorium al vaak proberen na te bootsen. Beroemd zijn de experimenten van de Amerikaanse chemici Stanley Miller en Harold Urey. In de jaren vijftig van de vorige eeuw toonden ze aan dat onder bepaalde omstandigheden complexe aminozuren kunnen ontstaan uit een 'oersoep' van methaan, ammoniak, waterdamp en waterstof wanneer deze wordt



## Het eerste leven is al relatief snel ontstaan na de geboorte van de aarde

blootgesteld aan elektrische ontladingen (bliksem). Hoewel nu bekend is hoe individuele componenten van levende cellen – zoals bijvoorbeeld een primitief celmembraan, aminozuren en RNA – spontaan kunnen ontstaan uit losse onderdelen, is het nog steeds niet gelukt om een functionerende levende cel te maken.

### De eerste eencelligen

De hypothese is nu dat op enig moment rond deze smokers eencelligen archaea en bacteriën zijn ontstaan, de prokaryoten (eencelligen zonder celkern). Deze relatief eenvoudige zakjes vol moleculen, waren in staat allerlei stofwisselingsprocessen uit te voeren waarmee ze in de cel de condities constant konden houden, en ook konden groeien en delen. Omdat er geen zuurstof was in de atmosfeer, moeten de eerste levende organismen *anaeroob* zijn geweest, ze hadden geen zuurstof nodig voor de verbranding. In geologische afzettingen van smokers in Quebec in Canada zijn fossiele resten

van micro-organismen gevonden die terugdateren tot 3,7-4,28 miljard jaar geleden. Het eerste leven is dus al relatief snel ontstaan na de geboorte van de aarde.

De eerste cellen waren waarschijnlijk ook *heterotroof*. Ze waren niet in staat om zelf koolstof te fixeren en kwamen waarschijnlijk aan hun koolstof door simpelweg de organische stoffen uit de oersoep op te eten. Op een gegeven moment werd het moeilijker om deze organische stoffen te bemachtigen doordat ze geleidelijk oprakten, of door competitie met andere cellen. De volgende logische stap in de evolutie van het leven is het ontstaan van eencelligen die niet meer afhankelijk waren van een externe koolstofbron, maar zelf koolstof konden fixeren: de *autotrofen*. Dit levert een aantal selectievoordelen op ten opzichte van heterotrofe organismen:

- ze waren niet meer afhankelijk van de productie van organische stoffen rond smokers
- ze concurreerden niet meer met heterotrofen om schaarse grondstoffen
- ze konden reizen naar andere delen van de leefomgeving.

Zo ontstonden er waarschijnlijk cellen die door *chemo-autotrofie* energie opwekken om CO<sub>2</sub> vast te leggen (fixatie) en te gebruiken voor opbouw van celmateriaal en groei (assimilatie). Deze cellen gebruiken reductie-oxidatiereacties (uitwisselen van elektronen) om anorganische stoffen te ‘verbranden’ en bij die reacties komt energie vrij. Omdat deze reacties beter verlopen bij hoge temperaturen, waren deze organismen waarschijnlijk extreem thermofiel (warmte-minnend). Er zijn nu nog steeds eencelligen op aarde te vinden die op deze manier leven en bij temperaturen rond het kookpunt van water kunnen voortbestaan: de extremofiele archaea die zijn aangetroffen in hete bronnen.

## Water en koolstofketens

De aanwezigheid van water en het element koolstof waren waarschijnlijk noodzakelijk om het leven te laten ontstaan. Chemische reacties vinden verreweg het gemakkelijkst plaats in een vloeistof. Moleculen kunnen daarin vrij bewegen en in relatief hoge concentraties voorkomen. Vloeibaar water dat aan de ene kant positief en aan de andere kant negatief geladen (polariteit) is, speelt daarbij een belangrijke rol. Andere vloeistoffen zoals vloeibaar methaan of ammoniak, die bovendien veel minder voorkomen in het heelal, komen daar niet voor in aanmerking.

Iets soortgelijks geldt voor koolstof. Voor levende organismen zijn complexe moleculen nodig. Koolstof kan covalente bindingen aangaan met tot wel vier atomen. Daarom is een C-C-keten een veelzijdig molecuul dat kan dienen als geraamte voor allerlei lange molecuulketens. Silicium, dat net als koolstof vier bindingen kan aangaan met andere atomen, zou in principe ook een optie zijn. Maar siliciumoxide (vaste stof, SiO<sub>2</sub>) lost in tegenstelling tot koolstofdioxide (gas, CO<sub>2</sub>) niet op in water. Verder zijn C-C-bindingen sterker dan Si-Si-bindingen. Koolstof-koolstofverbindingen lossen daardoor minder makkelijk op en breken minder snel af in water dan Si-Si-verbindingen.

## Hulp van de zon

Op enig moment zijn er eencelligen ontstaan die in staat waren om energie uit zonlicht te halen en te gebruiken voor de fixatie van  $\text{CO}_2$  en de vorming van koolwaterstoffen. Dit proces heet fotosynthese. Het is een complex biologisch proces met een aaneenschakeling van strak gereguleerde biochemische reacties. Om globaal te begrijpen hoe fotosynthese is ontstaan en geëvolueerd, zijn een aantal onderdelen van de reactie van belang. De fotosynthese zoals die voorkomt in alle planten, algen, cyanobacteriën en sommige protisten zoals *Euglena* is de *oxygenogene fotosynthese* (zie figuur Fotosynthese). Bij deze reactie wordt zuurstof als afvalproduct geproduceerd. De reactie ziet er als volgt uit:  $\text{water (H}_2\text{O)} + \text{koolstofdioxide (CO}_2\text{)} \rightarrow \text{glucose (C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6\text{)} + \text{zuurstof (O}_2\text{)}$

Deze fotosynthesereactie vindt plaats in chloroplasten en bestaat uit twee componenten:

- de lichtreactie, waarbij lichtenergie van de zon wordt omgezet in chemische energie;
- de Calvencyclus, waarbij chemische energie wordt gebruikt voor de fixatie van  $\text{CO}_2$  om koolwaterstofmoleculen te vormen.

## Evolutie van fotosynthese

Het is moeilijk voor te stellen hoe een dergelijk complex systeem is geëvolueerd. Net als bij de evolutie van het oog is fotosynthese niet in een keer als kant-en-klaarpakket ontstaan. Het was een proces van kleine en grotere stappen waarbij genetische informatie werd uitgewisseld of samengevoegd (onder meer via endosymbiose, conjugatie en *horizontal gene transfer*). De onderdelen hiervan – de productie van lichtabsorberende pigmenten, de elektronentransportketens en de Calvencyclus – zijn stukje bij beetje bij elkaar gekomen en op elkaar afgesteld tot een werkend proces van koolstofassimilatie.

Fotosynthese van landplanten is ontstaan door een endosymbiose tussen een eukaryoot en een

## Hoe komen organismen aan bouwstoffen en energie?

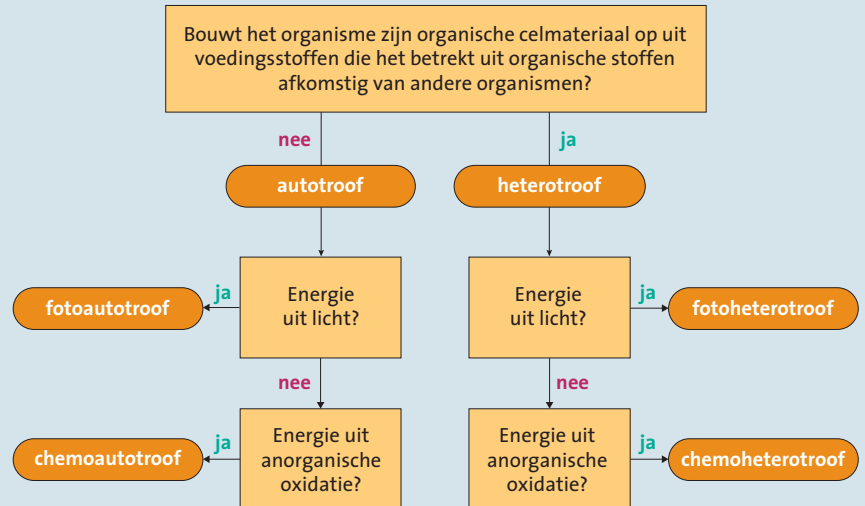
Om te kunnen leven en te groeien zijn naast energie ook bouwstoffen nodig. Er zijn grofweg twee manieren waarop een organisme aan dergelijke bouwstoffen kan komen: autotrofie en heterotrofie.

Autotrofe organismen, zoals algen en planten, zijn zelfvoorzienend en kunnen de benodigde koolstofmoleculen produceren uit  $\text{CO}_2$  in de lucht en anorganische stoffen in hun omgeving. Organismen die dit kunnen, zijn allemaal *primaire producenten*. Verreweg de meeste doen dit door middel van fotosynthese waarbij ze zonlicht als energiebron gebruiken. Er zijn ook nog steeds niet-fotosynthetiserende autotrofen: de chemo-auto-

trofen. Dit zijn de primaire producenten in ecosystemen zoals rond de *white* en *black smokers*. Zij fixeren ook  $\text{CO}_2$  en doen dat met energie die ze halen uit redoxreacties met bijvoorbeeld waterstofsulfide ( $\text{H}_2\text{S}$ ), ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), ijzeroxide ( $\text{Fe(II)O}$ ).

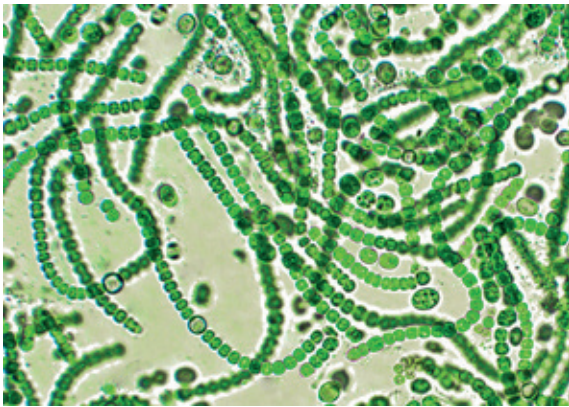
Heterotrofe organismen, zoals dieren, komen aan hun koolstof (hoogergetische) bouwstoffen door de primaire producenten of andere heterotrofe organismen te consumeren. Uiteindelijk zijn daardoor veel heterotrofe organismen direct of indirect afhankelijk van de primaire fotosynthetiserende producenten en daarmee indirect van de zon.

### INDELING VAN ORGANISMEN OP TROFISCH NIVEAU

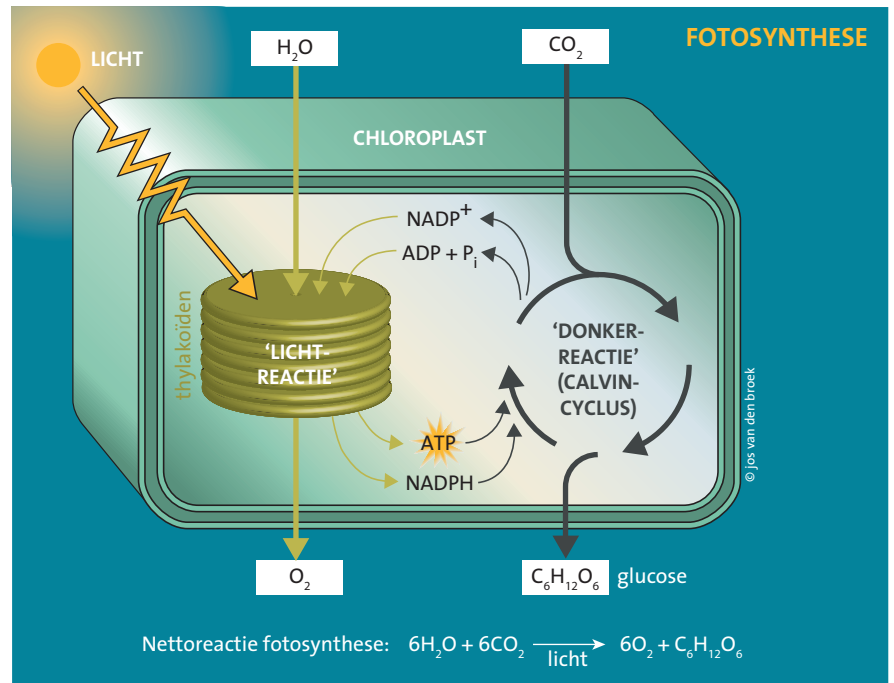


voorouder van de cyanobacteriën, een proces waarbij de eukaryoot de prokaryoot in zijn geheel heeft geïncorporeerd. Er zijn allerlei feiten die hierop wijzen. Het dubbele fotosysteem van chloroplasten is vrijwel dezelfde als dat van cyanobacteriën. Chloroplasten hebben hun eigen dubbelstrengs DNA dat qua genoom sterk overeenkomt met dat van vrij levende cyanobacteriën. Daarnaast hebben chloroplasten nog andere typische prokaryote kenmerken, zoals cirkelvormig DNA en binaire celdeling waarbij de cel zich in twee gelijkvormige dochtercellen splitst.

Waarschijnlijk heeft deze endosymbiose één keer plaatsgevonden en was meteen een doorslaand succes omdat alle 'groene' eukaryoten over hetzelfde type chloroplast beschikken. Fijne afstelling van de biochemische processen tussen eukaryoot en de opgenomen endosymbiont heeft uiteindelijk geleid tot een groene eukaryote ééncellige, die de voorouder is geworden van alle groene eukaryoten die nu aan oxygene fotoautotrofie doen. Dit is een grote transitie geweest in de evolutie van het leven, waardoor eukaryoten van heterotroof, autotroof werden en energie van de zon konden gebruiken voor koolstoffixatie.



De cyanobacterie *Nostoc* komt in verschillende milieus voor en vormt kolonies die bestaan uit filamenten van eencellige cellen.



### Andere vormen van fotosynthese

Er is echter weinig bekend hoe de cyanobacteriën aan hun fotosysteem kwamen en welke stappen daar aan vooraf gingen die leidden tot oxygene fotosynthese. In verschillende groepen prokaryoten, zoals groene zwavelbacteriën, *Chloroflexi*, purperbacteriën, *Acidobacteria* en *Heliobacteria*, komen andere vormen van fotosynthese voor. Deze prokaryoten gebruiken een ander type lichtgevoelig pigment: bacteriochlorofyl, en andere stoffen dan water om elektronen uit te verkrijgen. Verder hebben deze prokaryoten, in tegenstelling tot cyanobacteriën, maar één reactiecentrum zoals hun fotosysteem wordt genoemd.

Er zijn twee verschillende reactiecentra bekend die niet water als elektronendonor gebruiken, maar sulfiden ( $\text{H}_2\text{S}$ ), ijzer ( $\text{Fe}_2^+$ ) of zelfs waterstof ( $\text{H}_2$ ). Er komt bij deze vorm van fotosynthese dan ook geen zuurstof vrij: de *anoxygene fotosynthese*. Omdat deze reactiecentra anders werken, is het

Eenvoudige weergave van de oxygene fotosynthese in een chloroplast. Tijdens de lichtreactie wordt opgevangen zonne-energie omgezet in energiedragende moleculen ATP en NADPH (chemische energie) waarbij zuurstof vrijkomt. Tijdens de Calvincyclus (de 'donkerreactie') worden ATP en NADPH gebruikt om  $\text{CO}_2$  te binden en om te zetten naar suiker ( $\text{C}_6$ ): koolstoffixatie.

niet waarschijnlijk dat deze centra een voorloper zijn van het gecombineerde fotosysteem I en II in cyanobacteriën. Wat dit wel illustreert is dat verschillende enkelvoudige fotosystemen meer dan eens zijn geëvolueerd, omdat zij in veel verschillende, niet-verwante prokaryoten voorkomen en dat er twee type anoxygene fotosynthesesystemen zijn. Een mogelijkheid is dat prokaryoten met de voorlopers van fotosysteem I of II zijn uitgestorven.

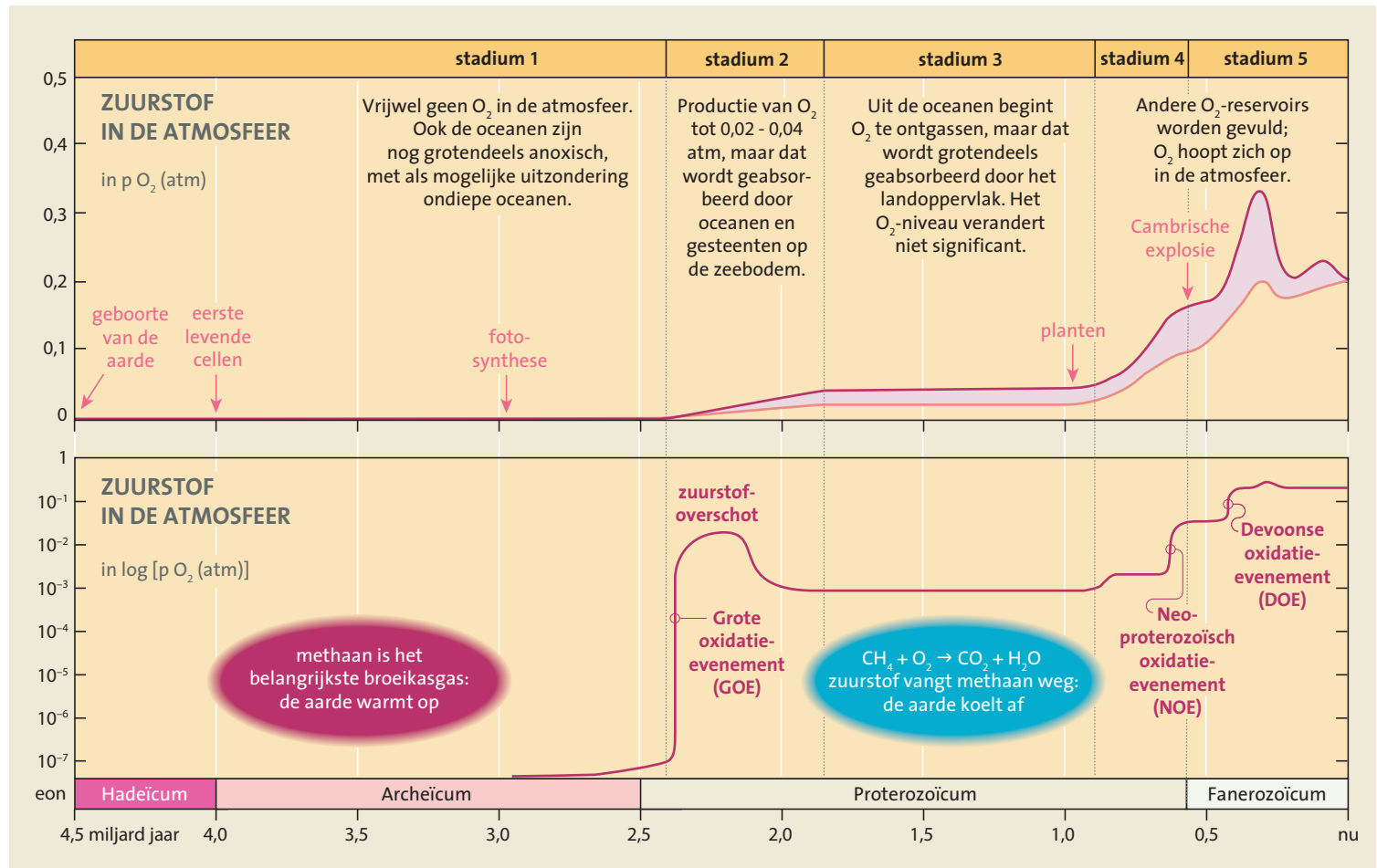
Sommige archaea zoals *Halobacterium*, gebruiken lichtenergie van de zon voor hun stofwisseling,

maar niet voor de fixatie van koolstof. Zij gebruiken het pigment halorhodopsine voor het vangen van lichtenergie voor de productie van ATP.

### Een atmosfeer vol zuurstof

Een belangrijke gebeurtenis in de geologische geschiedenis van de aarde is dat ongeveer 2,5 miljard jaar geleden de atmosfeer werd gevuld met zuurstof van vrijwel nul naar 30% in een relatief korte tijdsperiode van 0,5 miljard jaar. Deze gebeurtenis staat bekend als de *Great Oxidation Event*. Deze zuurstoftoename is volledig toe te schrijven aan de

De geschatte hoeveelheid zuurstof in de atmosfeer in de loop van de geschiedenis van de aarde.





Met zuurstof  
nam ook ozon in  
de atmosfeer toe  
dat uv-straling  
tegenhoudt

## Fotosynthese bij dieren

Een belangrijk onderscheid tussen hogere planten en dieren is dat planten bladgroenkorrels hebben en dieren niet. Toch zijn er dieren die gebruik maken van fotosynthese. De zeenaaktslak *Elysia chlorotica* spreekt het meest tot de verbeelding. Deze slak eet algen, maar in plaats van deze volledig te verteren, worden de chloroplasten in hun geheel opgenomen door de darmcellen. De chloroplasten blijven fotosynthetiseren. Slakken gebruiken de geproduceerde energie en gefixeerde koolwaterstoffen voor hun levensonderhoud. Ze kunnen zo hun hele leven – 10 maanden – zonder voedsel zolang er maar zonlicht en zuurstof is. Sterker, ze kunnen zonder chloroplasten hun ontwikkeling niet voltooien.

Sommige soorten koralen en schelpen, bijvoorbeeld de doopvontschelp, leven in symbiose met *Symbiodinium* protisten. Dit zijn eencellige eukaryote algen die behoren tot de dinoflagelaten. Deze vorm van fotosymbiose is vooral voordelig in voedsel-arme omgeving zoals tropische koraalriffen. Ook verschillende soorten sponzen leven in symbiose met cyanobacteriën; de 'kamerhuur' wordt door de cyanobacterie betaald in de vorm van energie en koolstofverbindingen.

Een zeenaaktslak (*Elysia chlorotica*) voedt zich met geelgroene algen en verzamelt de chloroplasten van de algen in gespecialiseerde cellen rond het spijsverteringskanaal. Deze chloroplasten blijven fotosynthetisch actief gedurende negen tot elf maanden.



oxygene fotosynthese-activiteiten van cyanobacteriën.

Het is aannemelijk dat oxygene fotosynthese in cyanobacteriën is ontstaan voordat de zuurstof in de atmosfeer toenam. De eerste zuurstof die uit het water diffundeerde, werd direct uit de atmosfeer gehaald door reactie met het gesteente aan het aardoppervlak. De aarde verroestte als het ware. Pas nadat de aardkorst geheel geoxideerd was, kwam er zuurstof in de atmosfeer. Op basis hiervan wordt geschat dat oxygene fotosynthese 3 miljard jaar geleden al is ontstaan.

De oxygene fotosynthese activiteit van cyanobacteriën had nog meer verstrekkende gevolgen. Door de toename van zuurstof in de atmosfeer werd ook ozon geproduceerd dat schadelijke uv-straling van de zon tegenhoudt. Tegelijkertijd werden hoeveelheden broeikasgassen minder, doordat cyanobacteriën CO<sub>2</sub> uit de atmosfeer fixeerden. De vrijkomende zuurstof reageerde met methaan, waardoor de aarde verder afkoelde.

Het idee dat zuurstof essentieel is voor het leven, gaat maar ten dele op. Wanneer een organisme biologische systemen heeft die zuurstof kunnen tolereren en gebruiken, is dit interessant voor het voortbestaan. Oxidatie van een organische stof (aerobe ademhaling) levert namelijk veel meer energie dan anaerobe ademhaling, en dat geeft een competitief voordeel. Maar zuurstof is ook een vrij giftig molecuul. Het is zeer reactief en omdat het makkelijk reageert met andere stoffen, kunnen er vrije zuurstofradicalen vrijkomen. Die radicalen kunnen mutaties veroorzaken aan het erfelijk materiaal – het DNA en RNA – of eiwitten veranderen door oxidatie.

In eukaryoten wordt dit risico gedeels ondervangen doordat deze oxidatiereacties beperkt zijn tot speciale organellen: de mitochondriën. Vrije zuurstofradicalen kunnen zo niet in de rest van de cel schade aanrichten. Mitochondriën die te veel beschadigd zijn en niet meer goed functioneren,

worden door de cel afgebroken. Uiteindelijk zal ook de cel zelf afsterven.

Omdat het eerste leven ontstond in een zuurstofloze omgeving, moet de vorming van zuurstof ook grote consequenties hebben gehad voor de prokaryoten en archaea. Hun stofwisseling was gebaseerd op anaerobe ademhaling. Deze soorten konden enkel overleven op plekken waar zuurstof niet kon komen.

### Was de zon noodzakelijk?

Misschien was de zon als externe energiebron niet het aandrijf wiel voor het ontstaan van het leven op aarde, maar wel de motor in de evolutie van de fotosynthese en autotroof leven.

De cyanobacteriën hebben vervolgens door de productie van zuurstof weer een enorm effect gehad op de zon als energiebron. De ozonlaag blokkeerde uv-straling en de broeikasgassen verdwenen waardoor de aarde afkoelde. Organismen stapten over van anaerobe ademhaling naar aerobe ademhaling, dat vele malen meer energie (ATP) oplevert per koolwaterstof.

Hoewel we in grote lijnen weten hoe het leven is ontstaan, ontbreekt er nog veel informatie over tussenstappen en overstappen. Om die informatie boven water te krijgen, is teamonderzoek nodig van biologen, geologen, scheikundigen, sterrenkundigen en natuurkundigen. Mogelijk komen we nooit achter het complete verhaal, maar misschien wel hoe de fotosynthese precies werkt en hoe dat is na te maken.

## Is er leven op planeet X?

**De ruimte afzoeken naar sporen van buitenaards leven doen sterrenkundigen al decennia. Maar ondanks de vele planetenstelsels om ons heen, is er nog niets gevonden. Is de aarde echt de enige planeet in het heelal waar leven is ontstaan? Wat zijn de voorwaarden voor het ontstaan van leven?**

JANNES VAN EVERDINGEN

*Bij dit hoofdstuk is dankbaar gebruik gemaakt van het Kennislink-artikel: Bewoonbare planeten binnen ons melkwegstelsel (22 april 2011).*

**W**AT LEVEN is, is moeilijk te definiëren. Dat geldt eigenlijk voor elke constructie die mensen onder woorden proberen te brengen en waarover zij het onderling niet eens zijn. Maar de meeste wetenschappers zien de mogelijkheid om zich voort te planten toch wel als essentie van leven. Of nog preciezer: een systeem 'leeft' als het zich – al dan niet zelfstandig – in stand kan houden en in staat is tot darwiniaanse evolutie op basis van mutatie en natuurlijke selectie. Of om in termen van evolutiebioloog Richard Dawkins te blijven: als het een replicator is.

Het feit dat er leven is, doet de vraag rijzen waarom de omstandigheden op aarde zo gunstig zijn dat het hier kon gebeuren. Niet minder belangrijk is de vraag of dit elders ook is opgetreden of nog staat te gebeuren. Wat maakt de zon en

**Ons beeld van buitenaards leven is redelijk gedefor-meerd door sciencefiction films.**



de aarde zo uniek en hoe waarschijnlijk is het dat er ook elders in het heelal op planeet X bij ster Y leven is ontstaan of gaat ontstaan?

### De zon, de aarde en het leven

De zon en de planeten in ons zonnestelsel zijn uit een gigantische ijskoude nevel gevormd, de restanten van eerder ontplofte sterren. Een dergelijke nevel kan door zijn eigen gewicht samenklonteren. De zon ontstond uit het middelste deel van de nevel en werd in deze fase protoster genoemd. Hoe meer massa in de kern samenbalde, hoe hoger de druk en daarmee de temperatuur, tot onze protoster zo heet werd dat kernfusie kon optreden. Dat gebeurde 4,6 miljard jaar geleden. Het is deze kernfusie die ons op dit moment levensenergie geeft.

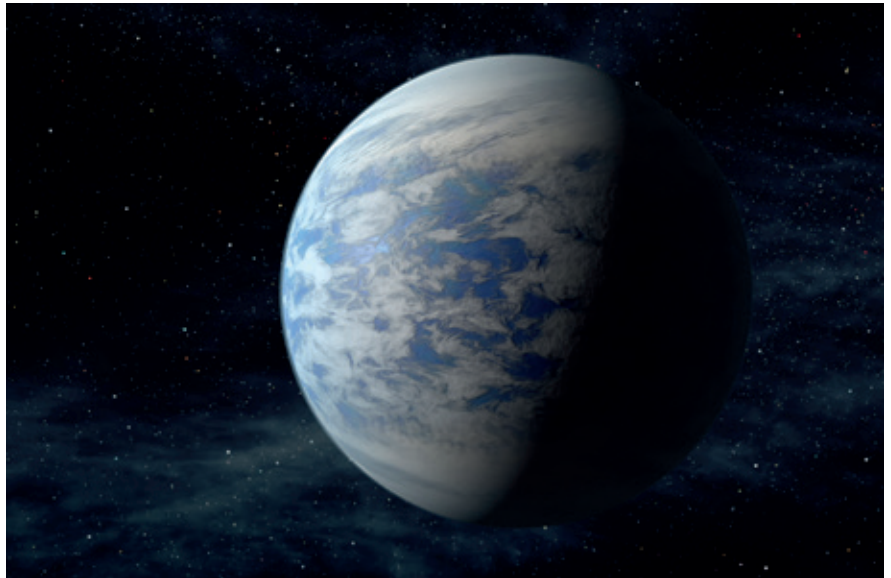
Een flink deel van de 'troep' die de ontplofte sterren hadden achtergelaten, kwam in een draaiende schijf rond de protoster terecht, de zogenoemde protoplanetaire schijf. Zo'n schijf wordt steeds platter door de middelpuntvliedende kracht. In de schijf ontstaan vervolgens planeten, die in de loop van de tijd als straatvegers hun baan schoonveegden. Een paar miljoen jaar na het ontstaan van de zon, kreeg ook de planeet aarde haar contouren.

Het eerste primitieve leven ontstond al vroeg, grofweg 300 miljoen jaar later, kort nadat de oceanen waren gevormd. Maar het duurde nog wel een kleine 4 miljard jaar voordat complexe levensvormen verschenen. De vroegste mensachtigen ontstonden waarschijnlijk zo'n zeven miljoen jaar geleden.

De aarde is misschien nog een miljard jaar bewoonbaar voor levende wezens. Daarna wordt de temperatuur vanwege de uitdijende zon te hoog en water zal dan niet meer in vloeibare vorm aanwezig zijn.

### Voorwaarden voor aarde 2.0

De bouwstenen voor het leven, organische moleculen, komen echter overal in het heelal voor.



**Artist impression van 'superaarde' Kepler-69c, één van de 24 kandidaten die leven zou kunnen herbergen. Deze in 2013 ontdekte rotsplaneet is ongeveer anderhalf keer groter dan de aarde en bevindt zich in de bewoonbare zone van een ster die iets kleiner is dan de zon. Op een afstand van meer dan 2.000 lichtjaar is het zoeken naar leven op deze planeet voorlopig onmogelijk.**

Waar moet een planeet aan voldoen om biologisch leven en evolutie mogelijk te maken. Hoe ziet een 'levensvatbare' planeet X eruit?

#### # Tijdsvenster voor evolutie

Meer dan 75% van de tijd dat er leven op aarde is, bestond dat uit primitieve en eencellige organismen. Zoiets als 'intelligentie' was er niet. Planeten die dus slechts kort in het bewoonbare tijdvenster verblijven, zullen dus waarschijnlijk niet bevolkt zijn door complexe organismen.

#### # Massa van planeet X

Het hebben van een atmosfeer (zie: De zon als evolutionaire kracht p. 13) is bevorderlijk voor het ontstaan van leven, maar geen absolute voorwaarde. Om een atmosfeer te kunnen maken en te behouden, moet planeet X een bepaalde massa hebben. Een te kleine massa heeft te weinig zwaartekracht om een atmosfeer vast te houden. Dit is ook de reden dat de maan en Mercurius het zonder atmosfeer moeten doen. Is de massa juist te groot, dan trekt planeet X te veel stoffen aan waardoor het



## Planeet X moet op een bepaalde afstand van haar 'zon' staan

een gasreus wordt, zoals Jupiter. Een goede massa ligt tussen 0,8 en 2,2 keer de massa van de aarde.

### # Water op planeet X

Vloeibaar water is aan de ene kant positief en aan de andere kant negatief geladen – en daardoor een uitstekend oplosmiddel voor complexe moleculen en daarmee cruciaal voor het ontstaan en bestaan van leven. Cellen bestaan grotendeels uit water waarin organische stoffen zoals DNA, RNA, eiwitten en nucleïnezuren drijven. Water is ook nodig om biochemische reacties als hydrolyse – de splitsing van een chemische verbinding onder opname van water – te laten verlopen.

### # Temperatuur op planeet X

De temperatuur op planeet X moet zodanig zijn dat water vloeibaar blijft: tussen de 0°C en 100°C. Kokend water verdampt en kan niet worden gebruikt door cellen. Bevroren water is ook onbruikbaar, want je kunt er niets in oplossen, maar onder het ijs kan het water wel vloeibaar zijn, zoals in geval van Europa, een van de manen van Jupiter, of Enceladus, een van de manen van Saturnus. Dit betekent dat planeet X op een bepaalde afstand van haar 'zon' (ster) moet staan, de zogenoemde *circumstellar habitable zone* of 'bewoonbare zone'.

### # Massa van ster Y

Een volgende voorwaarde is de juiste omvang van moederster Y. Dat de geschikte temperatuur behouden blijft op planeet X hangt niet alleen af van de afstand tot de ster, maar ook van de soort ster. Niet alle sterren zijn geschikt voor deze taak. Onze zon doet al miljarden jaren aan kernfusie. Per seconde wordt er zo'n 700 miljoen ton aan waterstof omgezet in helium. Bij dit proces versmelten twee atoomkernen bij zeer hoge druk en temperatuur, waarbij ze een nieuw element vormen (zie ook hoofdstuk 1). De daarbij vrijkomende straling vormt de basis voor het leven op de planeet. Als

ster Y te zwaar is, raakt de waterstof snel op. De ster wordt dan snel te heet, en laat het water op planeet X verdampen. Dit is het geval als de ster meer dan anderhalf keer zo zwaar is als onze zon.

Bij sterren lichter dan een halve zonsmassa treden andere problemen op: zonnevlammen en gebonden rotatie. Een planeet die dicht bij een lichtere ster staat kan overspoeld worden door röntgenstraling uit zonnevlammen. Bij gebonden rotatie staat de planeet altijd met dezelfde kant naar de ster toegekeerd, net als de maan ten opzichte van de aarde. Hierdoor verdampen alle gassen van de atmosfeer op de 'hete helft' van planeet X, om vervolgens op de 'koude helft' neer te slaan. Ofschoon dit niet per se betekent dat leven onmogelijk wordt, wordt het hierdoor wel een stuk moeilijker. Kortom: een geschikte moederster voor planeet X moet meer dan een halve maar minder dan anderhalve zonsmassa wegen.

### # De baan om de ster Y

Planeet X moet in een stabiele baan om moederster Y draaien. De baan van de planeet kan wel binnen de bewoonbare zone liggen, maar moet daar ook blijven. Hiervoor moet de baan van planeet X om haar ster stabiel zijn. In een systeem met één centrale ster is dit nagenoeg altijd het geval. In geval van de aarde zijn er nog andere stabiliserende factoren. Zo houdt Jupiter planetoïden bij de aarde weg en draagt onze maan bij aan de stabilisatie van de aardas. Een planeet kan in een stabiele baan geraken op een afstand tussen 3 tot 50 keer de afstand tussen de aarde en de zon.

### # Zware elementen

Tenslotte moet planeet X ook 'rotsachtig' zijn en bijvoorbeeld niet uit alleen maar bevroren stikstof en water bestaan. Men spreekt dan over de metalliciteit, de aanwezigheid van elementen die zwaarder zijn dan waterstof en helium. Hoe zwaarder de elementen (lithium, koolstof, zuurstof) hoe hoger

De Europese Extremely Large Telescope van ESP heeft als doel om de eigenschappen van atmosferen van aardachtige *planeten* te gaan meten. De ontdekking van gassen in een planeet atmosfeer die daar helemaal niet thuishoren, zoals zuurstof, maar ook ozon en methaangas, kunnen als indirect bewijs gelden voor het bestaan van buitenaards leven – zonder dat we de organismen die daarvoor verantwoordelijk zijn kunnen zien. Zuurstof is een zeer reactief gas, afkomstig van biologische processen en als zodanig een indicator voor leven.



de metalliciteit. In sterrenstelsels met een metalliciteit lager dan 60% van ons zonnestelsel worden bijna geen rotsachtige planeten gevonden.

De metalliciteit moet ook weer niet te hoog zijn, anders kunnen zich in het jonge planetenstelsel van de nieuwe ster grote gasreuzen vormen die de kleinere rotsplaneten opslokken. De metalliciteit hangt samen met de verdeling van stervormingswolken die gevoed zijn door historische supernovae. In het centrum is die hoog, omdat de zware metalen door de zwaartekracht naar het centrum worden getrokken.

De zone binnen onze eigen Melkweg waar de metalliciteit geschikt is voor het vormen en behouden van rotsplaneten, noemt men de *galactic habitable zone*. In deze zone ligt de metalliciteit tussen de 60% en 200% van die van ons zonnestelsel.

### Exoplaneten

Er zijn inmiddels een stuk of tien planeten buiten ons zonnestelsel bekend die zich bevinden in een

leefbare zone van een zonachtige ster. Er zouden oceanen vol water op hun oppervlak kunnen zijn. Een nieuwe generatie telescopen waaronder de Europese Extremely Large Telescope en NASA's James Webb ruimtetelescoop zullen straks exoplaneten gaan bestuderen. Bijvoorbeeld de zeven planeten ter grootte van de aarde die rondom Trappist-1 cirkelen, of Proxima Centauri b een planeet bij een rode dwergster bekend als Proxima Centauri, de meest nabije buur van de zon.

En dan te bedenken dat alleen het Melkwegstelsel waartoe ons zonnestelsel behoort, naar schatting al honderden miljarden sterren telt. Dat is maar een uit de vele sterrenstelsels in het heelal. Het voor de mens waarneembare heelal telt meer dan honderd miljard sterrenstelsels. Dat zijn bij elkaar wel tien triljard (10.000.000.000.000.000.000.000) sterren. Dat alleen op aarde de omstandigheden voor leven perfect zouden zijn, zou wel heel uniek zijn.

# Wat als de zon maandenlang niet m

JOS VAN DEN BROEK EN JELLE REUMER

**Zo'n 66 miljoen jaar geleden stierven de dinosauriërs en veel andere land- en zeediersoorten massaal uit door de inslag van een enorme meteoriet. Dit is niet langer 'slechts' een theorie; de bewijzen stapelen zich op.**

**E**IND 2019 gaf Robbert Dijkgraaf in De Wereld Draait Door University een jaaroverzicht van de belangrijkste ontdekkingen van het voorbije jaar. Volgens hem hadden we een topjaar achter de rug met drie grote ontdekkingen: de quantumcomputer, een foto van een zwart gat en sporen in Noord-Dakota die een bewijs vormden voor de grote meteorietinslag van 66 miljoen jaar geleden. Wat deze plek zo uniek maakt, is dat door de inslag een grote vloedgolf ontstond die op één moment een groot aantal slachtoffers maakte die perfect bewaard zijn gebleven. Paleontoloog Robert DePalma had in een kleilaag in Noord-Dakota fossiele vissen gevonden die neergedwarrelde glasbolletjes in hun kieuwen hadden zitten: de smoking gun van de meteorietinslag. Deze sporen vormde weer aanvullend bewijs voor een theorie die al sinds 1980 populair is. In dat jaar kwam een groep Amerikaanse wetenschappers onder leiding van vader en zoon Luis en Walter Alvarez tot het inzicht dat dinosauriërs die 160 miljoen jaar over de aarde hadden geheerst, 66 miljoen jaar geleden plotseling verdwenen. Slechts wat kleine, gevederde dinosauriërs overleefden en ontwikkelden zich tot de vogels die wij nu kennen.

## Flinterdun laagje iridium

Over de oorzaak van die massale extinctie is lang gediscussieerd. Tal van verklaringen circuleerden. In 1978 vonden vader en zoon Alvarez op de grens van Krijt en Paleogeen echter ongewoon veel iridium in een kleilaagje in Italië. Dat element is erg zeldzaam op aarde, maar niet in bepaalde meteorieten. Tijdens hun verdere zoektochten troffen ze wederom veel iridium aan in even oude aardlagen in Nieuw-Zeeland en Denemarken. Hoewel ze er niet naar op zoek waren geweest, werd opeens duidelijk dat ze een verklaring hadden gevonden voor het uitsterven van de dinosauriërs: de inslag van een enorme meteoriet die zijn sporen had achtergelaten over de gehele aarde.

In diezelfde jaren deed de Nederlandse geoloog Jan Smit in Spaanse aardlagen ook onderzoek naar het uitsterven van dinosauriërs op de overgang van Krijt naar Paleogeen. Hij kwam tot een soortgelijke conclusie, maar op andere gronden. Smit vond niet een geleidelijke, maar een haarscherpe grens tussen beide tijdperken en het plotselinge uitsterven van veel dier- en plantensoorten. Ofschoon hij zijn bevindingen twee weken eerder publiceerde dan vader en zoon Alvarez, ging de eer van de ontdekking toch naar de Amerikanen. Zij hadden hun bevindingen al het jaar daarvoor bekend gemaakt op een geologencongres.

Ook elders heeft Smit dat flinterdunne iridiumlaagje aangetroffen. Hij zocht er ook naar in de Curfsgroeve in Zuid-Limburg. Daar vond hij geen iridiumlaagje, maar wel de kleilaag die volgde op de iridiumlaagje, een teken dat het leven op een heel laag pitje doordraaide (zie foto).

# eer 'schijnt'

Jan Smit wijst naar de K/Pg grens in de Geulhemmergroeve in Limburg, een scherpe begrenzing tussen de tijdperken die wordt bepaald door de meteoriet-inslag. De K/Pg grens is de grens tussen het Krijt (145 tot 66 miljoen jaar geleden) en het Paleogeen, een onderdeel van het Tertiair, 66 tot 23 miljoen jaar geleden. De kleilagen van de gevolgen van de meteorietinslag zijn duidelijk te zien.

## Glasbolletjes

Dat een meteorietinslag verantwoordelijk was voor het massale uitsterven van dinosauriërs bleef voornamelijk lang een theorie. Men had berekend dat de meteoriet zo'n 12 kilometer in doorsnee moest zijn geweest, dat geeft een inslagkrater van ongeveer 180 kilometer. Nergens op aarde was een krater te vinden die daarmee overeenstemde. Niettemin stapelden de bewijzen voor een inslag zich op, onder andere door de vondst van glasbolletjes in het met iridium verrijkte laagje.

Het gesteente het dichtst bij de plaats van meteorietinslag werd zó heet dat het deels smolt en deels verdampte, inclusief de meteoriet zelf. De damp en het gesmolten gesteente werden omhoog geschoten buiten de atmosfeer. De smelt stolde tot kleine glasbolletjes en viel uiteindelijk over een groot gebied weer terug. Iridiumdeeltjes in de stof en damp kregen een grotere snelheid mee en stonden voor een deel ook tot kleine bolletjes. De bolletjes en stof vielen verspreid over de hele aarde bovenop de atmosfeer en zorgden aldus voor langdurige duisternis. Verspreid over de aardbol zou er zo'n 800 kubieke kilometer aan glasbolletjes liggen.

De glasbolletjes, ook wel microtekieten genoemd, waren in Noord-Amerika en Mexico groter dan elders, wat er op wees dat de inslagkrater in die buurt moest worden gezocht. Daar werd hij tien jaar later dan ook gevonden in boorkernen die voor een oliemaatschappij waren gemaakt, in het noorden van Yucatan in Mexico. Het centrum van de krater lag bij het plaatsje Chicxulub. Dat men deze krater over het hoofd had gezien, kwam door koraalvorming. Koraal groeit weliswaar maar één à



twee centimeter per jaar, maar dat is voldoende om in 66 miljoen jaar een gat van enkele kilometers diepte te vullen.

Begin 2021 vonden Smit, paleoklimatoloog Niels de Winter samen met andere wetenschappers het sluitstuk voor het bewijs van de theorie: de vondst van abnormaal veel iridium in een kleilaag in een boorkern van ruim 800 meter lang, genomen in de Chicxulub-inslagkrater zelf.

## Zonsverduistering

De grote hoeveelheid as, stof en gasen zoals zwaveldioxide die in de atmosfeer terecht kwam, zorgde voor een langdurige verduistering van zonlicht. Dit leidde tot afsterven van de vegetatie en het daaropvolgende uitsterven van vele diersoorten. Plantenetters, vooral de grote soorten, legden het loodje door gebrek aan voedsel, evenals vervolgens hun predatoren. Kleine meestal insectenetende zoogdiertjes slaagden er nog wel in hun maaltijd bij elkaar te scharrelen. Uiteindelijk zijn wij mensen uit die zoogdiertjes geëvolueerd. We kunnen gevoeglijk stellen dat we er zonder de meteorietinslag niet waren geweest.

# 3 Zon geeft energie





## Zonne-energie en de energietransitie

Hernieuwbare elektriciteit uit zon en wind zou in de toekomst wel eens de rol van fossiele brandstoffen kunnen overnemen. Zonnepanelen worden steeds efficiënter. En met een dun laagje perovskiet op het silicium zijn er zelfs nog flinke stappen te maken.

WIM SINKE

**Zonne-energie is op weg de belangrijkste hernieuwbare energiebron op aarde te worden. De zon is een kernfusiereactor op grote afstand, waarvan we het licht gebruiken. Of het ooit lukt een fusiereactor op aarde te bouwen blijft voorlopig de vraag.**

**O**NS GROOTSCHALIGE gebruik van fossiele brandstoffen en de bijbehorende uitstoot van het broeikasgas CO<sub>2</sub> is de belangrijkste oorzaak van klimaatverandering. De wereldwijde gevolgen hiervan ervaren we steeds indringender, bijvoorbeeld door extreme weersomstandigheden en veranderingen in flora en fauna. Daarom is in 2015 in het Akkoord van Parijs afgesproken om de emissies van broeikasgassen snel en drastisch te verminderen, en daarmee de temperatuurstijging te beperken tot minder dan 2°C, en liefst niet meer dan 1,5°C. Nederland heeft hiervoor een eigen Klimaatakkoord opgesteld.

### Elektrificatie

De overgang van een systeem gebaseerd op olie, gas en kolen naar een vrijwel emissievrij energiesysteem is een enorme uitdaging. Het is de verwachting dat het aandeel van hernieuwbare elektriciteit in de energiemix sterk zal toenemen. In een van de scenario's tot zelfs 90% van het totale energiegebruik in 2050. Elektriciteit, vooral uit zon en wind, zal zo de rol van fossiele energie uit kolen, olie en aardgas als universele 'primaire brandstof' kunnen overnemen. Er wordt dan ook gesproken van 'elektrificatie' van sectoren in de samenleving.

Elektriciteit is uiteraard in te zetten voor toepassingen die nu al van deze energiebron gebruik maken. Maar elektriciteit kan ook fossiel vervangen daar waar deze brandstof direct wordt gebruikt, zoals voor verwarming en vervoer. Ook de elektrische auto is in opmars.

Verder zal het bedrijfsleven steeds vaker elektriciteit gaan gebruiken, bijvoorbeeld voor het aandrijven van chemische processen. Wanneer er toch brandstof nodig is, zoals voor vliegtuigen en vrachtwagens die lange afstanden afleggen, of als grondstof voor de industrie, dan kunnen vaak ook die met elektriciteit worden gemaakt, al dan niet gebruikmakend van koolstof uit hernieuwbare bronnen. Een bekend voorbeeld is de productie van waterstof uit water door elektrolyse.

### Zonne-energie

Zonne-energie is een verzamelterm voor een paar verschillende manieren om de energie in zonlicht om te zetten in bruikbare vormen van energie. Met zonnecellen wordt zonlicht *direct* omgezet in elektriciteit, de zogenoemde 'zonnestroom'. Panelen met zonnecellen zijn modulair, hebben geen bewegende delen en zijn daarom bij uitstek geschikt om te integreren en te combineren met andere functies.

Zonnecellen kunnen bovendien een zeer hoog rendement halen voor de omzetting van zonlicht naar elektriciteit. Commercieel verkrijgbare zonnepanelen halen tegenwoordig een rendement van ruim 20% en in het laboratorium halen wetenschappers al meer dan 30% voor zonnecellen die de volgende generatie panelen kunnen gaan vormen. Zonnepanelen zijn overigens iets anders dan zonnecollectoren die zonlicht omzet-

ten in warmte en niet in elektriciteit. Zonnecollectoren worden bijvoorbeeld gebruikt in zonneboilersystemen.

Behalve via zonnecellen kan zonlicht ook *indirect* met *concentrating solar power* (CSP) worden omgezet in elektriciteit. Met spiegels of lenzen wordt zonlicht sterk geconcentreerd op een ontvanger (meestal een buis of 'vat') waarmee warmte wordt geproduceerd met een hogere temperatuur dan gewone zonnecollectoren. Die warmte wordt bijvoorbeeld gebruikt om stoom te produceren die vervolgens een stoomturbine aandrijft en elektriciteit opwekt. Dit proces is vergelijkbaar met de processen die in fossiel gestookte elektriciteitscentrales of kerncentrales voor elektriciteit zorgen. CSP is niet geschikt om toe te passen in Nederland omdat hier ruim de helft van alle zonnestraling diffuus is, onder andere door wolken en daarom niet geconcentreerd kan worden. CSP-centrales staan in gebieden met veel zon, zoals in Marokko, Israël en het zuidwesten van de Verenigde Staten.

### Zonnestroom voor impact

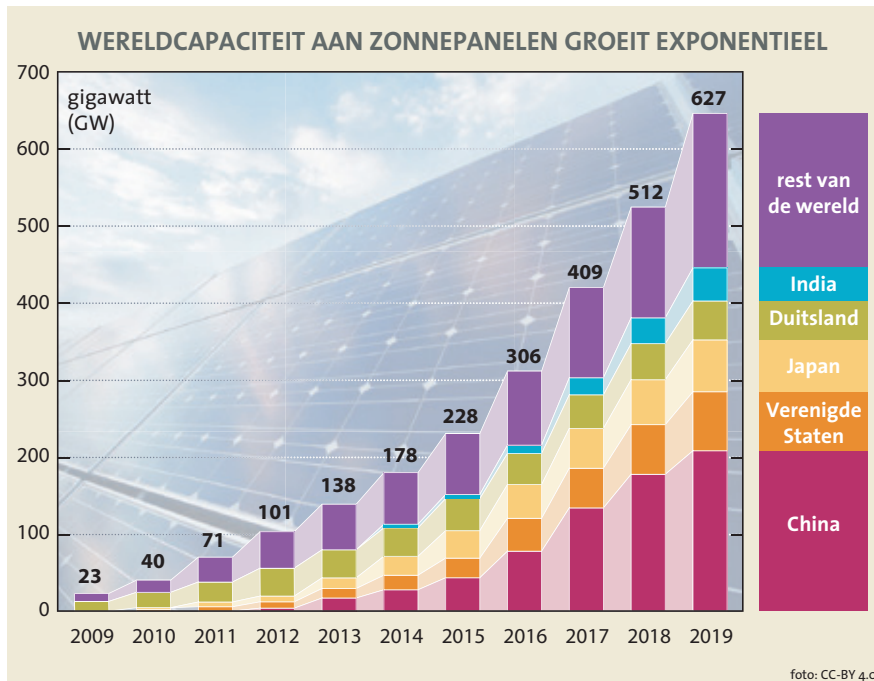
De ontwikkelingen op het gebied van zonnestroom zijn in de afgelopen decennia systematisch en sterk onderschat, zowel door optimisten als sceptici. Dat geldt in het bijzonder voor de spectaculaire kostendalingen die zijn behaald en de enorme toename in geplaatste zonnepanelen. Elke drie seconden wordt er in Nederland een zonnepaneel geïnstalleerd. Maar ook de technologieontwikkeling en manieren om zonnepanelen toe te passen zijn in sneltreinvaart doorgegaan. Denk aan zonnecellen in daken, gevels, geluidschermen en wegdek, aan drijvende systemen en aan zonnecellen in de carrosserie van auto's.

Zonne-energie is de hernieuwbare energiebron met het grootste mondiale potentieel, met windenergie als goede tweede. Samen kunnen ze in principe een veelvoud van het totale huidige energiegebruik dekken. Regionaal zijn er wel aan-

## Over planten en panelen

Planten die met fotosynthese zonne-energie vastleggen in chemische energie komen niet in de buurt van de rendementen die zonnepanelen tegenwoordig halen. Het gangbare zonlicht-naar-biomassarendement ligt in de ordegrootte van 1%. Maar dit is appels

met peren vergelijken. De ontwikkeling van kunstmatige fotosynthese, waarbij de technologie geïnspireerd is op de biologische routes, biedt bijvoorbeeld wel perspectief op hogere rendementen, op termijn tot 10% of zelfs meer.



**De groei aan totaal geïnstalleerde zonnepanelen wereldwijd.**

zienlijke verschillen in het potentieel, bijvoorbeeld door verschillen in windsnelheid en instraling, de hoeveelheid zonne-energie die per vierkante meter ( $m^2$ ) per jaar binnenkomt.

Deze verschillen vertalen zich ook in verschillen in kosten voor het opwekken van elektriciteit en in de optimale mix van bronnen in energiescenario's. Zo laat het mondiale 100%-duurzame-energiescenario voor alle sectoren van de technische universiteit LUT in Finland zien dat zonne-energie wereldwijd op termijn bijna 70% van alle energie kan leveren, gevolgd door windenergie met bijna 20%. De bijdrage van zonne-energie in noordwest Europa is in dit scenario echter kleiner dan die van windenergie (met name offshore), hoewel nog steeds fors. Dat laatste beeld komt ook naar voren in de scenario's voor een klimaatneutraal energiesysteem die TNO in 2020 heeft opgesteld als input voor de discussies over de energietransitie in Nederland.

Begin 2021 staat wereldwijd staat ruim 750 gigawatt-piek aan zonnestroomsystemen opgesteld, die samen ongeveer 3,5% van alle elektriciteit leveren. Het afgelopen decennium was de groei 40% per jaar. Dit kan volgens verschillende scenario's groeien naar 30 tot 70 terawatt-piek (1 terawatt = 1000 gigawatt) in 2050. In Nederland staat nu ongeveer 10 gigawatt, goed voor ongeveer 7% van het totale elektriciteitsverbruik. Dit kan naar verwachting de komende decennia doorgroeien naar 100 tot 200 gigawatt-piek.

### Hoe maakt een zonnecel elektriciteit?

Alle zonnecellen werken in de basis hetzelfde: ze absorberen zonlicht en zetten de lichtenergie direct om in elektrische energie (zie afbeelding Silicium zonnecel). Hiervoor bestaan de meeste zonnecellen uit twee dunne lagen halfgeleidermateriaal (zoals silicium) met iets verschillende elektrische eigenschappen. Op het grensvlak van die lagen bevindt zich een soort ladingsfilter. De lichtdeeltjes (fotonen) uit het zonlicht zorgen bij absorptie in de laagjes voor beweging van negatief geladen elektronen en hun positief geladen 'tegenpolen' (de gaten). Op het grensvlak worden die twee door het filter van elkaar gescheiden, waardoor er een opbouw van negatieve lading aan de ene kant en van positieve lading aan de andere kant plaatsvindt en er een elektrische spanning tussen de lagen ontstaat. Wanneer de twee lagen (meestal zijn dat de voor- en achterkant van de cel) extern met elkaar worden verbonden kan er net als bij een batterij een elektrische stroom gaan lopen. De eerste zonnecellen in de jaren vijftig van de vorige eeuw werden daarom *solar batteries* genoemd.

Zonnecellen kunnen van verschillende halfgeleidermaterialen worden gemaakt en hebben verschillende ontwerpen van de lagen en de elektrische contacten. Wanneer beide lagen ultradun zijn – denk aan 0,001 millimeter dikte – en op een

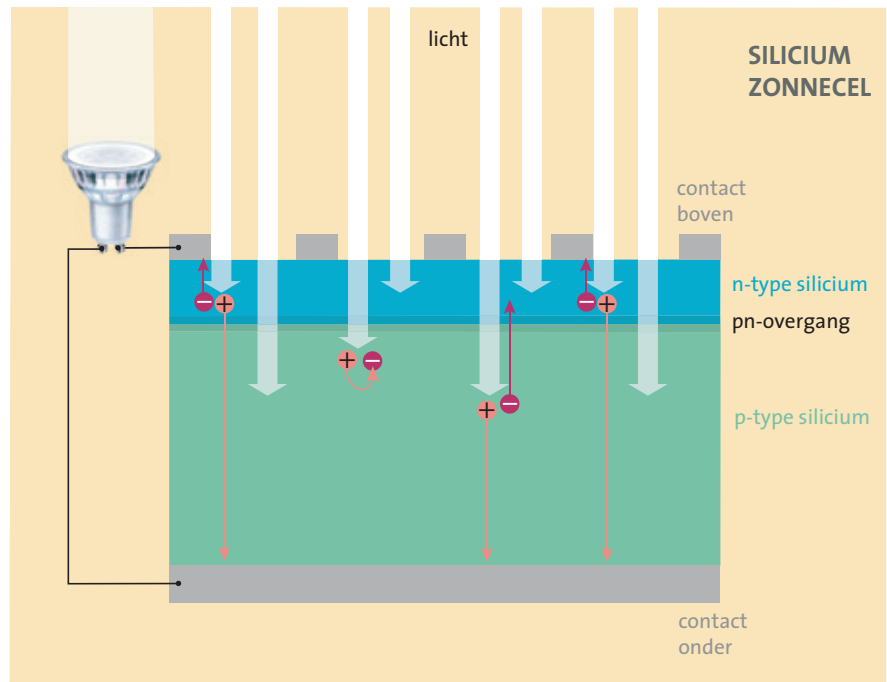
buigbare drager zijn aangebracht kunnen flexibele zonnecellen worden gemaakt. Hoe dun de lagen kunnen zijn hangt ervan af hoe sterk de gebruikte materialen licht absorberen.

### Van cel naar paneel naar systeem

Individuele zonnecellen worden voor gebruik onderling elektrisch verbonden en ingepakt. Bij siliciumpanelen gaat het daarbij vaak om 60 of 72 cellen. Daarmee ontstaat een hogere, beter bruikbare spanning en worden de zonnecellen beschermd tegen invloeden van buitenaf. Die ingepakte zonnecellen noemen we een zonnepaneel of bij een flexibele uitvoering, een zonnefolie.

Panelen worden op hun beurt onderling elektrisch verbonden om een systeem te bouwen. Ze kunnen bijvoorbeeld op een draagconstructie worden geplaatst, op een dak worden gemonteerd of geïntegreerd in een compleet geprefabriceerd zonnedak. Vooral in delen van de wereld waar ruimte een schaars of kostbaar goed is en waar het uiterlijk van panelen en systemen belangrijk is, staat integratie van zonne-energie hoog op de agenda, zo ook in Nederland. De opkomst van egaal zwarte panelen past in deze trend. Ook het combineren van functies, bijvoorbeeld het opwekken van zonnestroom en natuurbeheer of land- en tuinbouw is een veelbelovende mogelijkheid voor grootschalige toepassing van zonne-energie.

In spreektaal hebben we het vaak over ‘zon-necellen’ als een beschrijving van alles wat met zonnestroom te maken heeft. Om de ontwikkelingen op het gebied van zonnestroom te kunnen beschrijven is het echter nodig om onderscheid te maken tussen zonnecellen, zonnepanelen of -folies, andere systeemcomponenten (de zogenaamde Balance-of-System; BoS) en complete zonnestroomsystemen. Daarnaast zijn bij zonnestroomsystemen de gebruikte materialen, productieprocessen, installatie, onderhoud en beheer, en recycling belangrijk. De energieopbrengst, maar



**Schematische doorsnede van een silicium zonnecel.**

ook zaken als de kosten, levensduur, betrouwbaarheid en milieueffect worden namelijk bepaald door een veelheid aan factoren.

### **Rendement en energieopbrengst**

Een belangrijk begrip bij zonnecellen is het rendement. Dat is de verhouding tussen het elektrisch vermogen dat de zonnecel levert en het vermogen in de vorm van licht dat op de zonnecel valt. Een hoog rendement is belangrijk om bij een beperkt oppervlak toch veel energie op te wekken, maar ook om de kosten te verlagen. Voor dezelfde opbrengst aan elektriciteit is dan immers een kleiner systeemoppervlak nodig. Rendement wordt meestal uitgedrukt als een percentage. Industrieel vervaardigde, commercieel verkrijgbare zonnepanelen halen tegenwoordig maximaal zo'n 22% rendement.

De jaarlijkse energieopbrengst per vierkante meter zonnestroomsysteem wordt bepaald door het rendement van de panelen, de instraling op de panelen en de zogenaamde opbrengstfactor. In de opbrengstfactor worden verliezen samengenomen die te maken hebben met bijvoorbeeld verschillende belichtingscondities, werktemperaturen en het omzetten van gelijk- in wisselstroom.

Een rekenvoorbeeld: een zonnestroomsysteem met een oppervlak van 20 vierkante meter (ongeveer 12 panelen) op een dak in Nederland met een instraling van 1100 kilowattuurlicht per vierkante meter per jaar, opgebouwd uit panelen met een rendement van 20% en met een opbrengstfactor van 85% levert  $20 \text{ m}^2 \times 1100 \text{ kWh/m}^2/\text{jaar} \times 20\% \times 85\% = 3740$  kilowattuur aan elektriciteit in de vorm van 230 volt wisselstroom per jaar; iets meer dan een gemiddeld huishouden in Nederland gebruikt.

Overigens wordt het rendement bij commerciële zonnepanelen zelden direct vermeld. Meestal wordt het piekvermogen (watt-piek, Wp) aangegeven, dat is het vermogen dat wordt geleverd bij volle zon, gedefinieerd als  $1000 \text{ W/m}^2$  lichtinten-

siteit. Een paneel met een oppervlak van  $1,5 \text{ m}^2$  en piekvermogen van 330 Wp, heeft een rendement van  $330 / (1,5 \times 1000) \times 100\% = 22\%$ . Tegenwoordig bestaan ook tweezijdig werkende panelen, die wanneer ze min of meer vrij worden opgesteld 10 tot 20% extra elektriciteit leveren.

### **De race naar hogere rendementen**

Zonnecellen kunnen worden gemaakt van allerlei halfgeleidermaterialen. Elk materiaal heeft zo zijn specifieke voor- en nadelen. Op dit moment bestaat 95% van de mondiale markt uit siliciumpanelen. De overige 5% is voor dunnefilmpanelen, met de belangrijkste rol voor de materialen cadmiumtelluride (CdTe) en koper-indium/galliumdiselenide (CIGS).

Industrieel geproduceerde panelen hebben een rendement van ongeveer 16 tot 22%, afhankelijk van soort en fabrikant. Dat is een iets lager rendement dan de beste laboratoriumcellen van vergelijkbare materialen omdat bij panelen een optimum tussen rendement en kosten wordt gezocht. Recordcellen in het laboratorium hebben meestal ook een klein oppervlak van enkele  $\text{mm}^2$  of  $\text{cm}^2$ .

Het hoogst behaalde (wereldrecord)rendement voor een zonnecel is ruim 47%. Dat betreft een heel bijzondere cel bestaande uit een stapeling van maar liefst zes verschillende materialen, gemeten onder geconcentreerd zonlicht. Alle hightech is ervoor uit de kast gehaald en kosten noch moeite zijn gespaard. Dit type cel wordt nog niet toegepast, maar geeft wel aan waartoe zonnestroomtechnologie in staat is. Iets vereenvoudigde versies worden wel gebruikt, in de ruimtevaart en in concentratorsystemen.

### **Perovskieten en stapeling van zonnecellen**

De opvallendste ontwikkeling in zonne-energie-land is waarschijnlijk wel de snelle opkomst van zogenoemde perovskieten. Deze familie van dunnefilmmaterialen kan zowel als zelfstandige zon-

**Schematische doorsnede van een tweezijdig werkende tandemzonnecel met vier elektrische aansluitingen. De stapeling van een perovskietcel en een siliciumcel zorgt voor een hoger rendement dan mogelijk is met perovskiet of silicium alleen; de tweezijdige werking verhoogt de energieopbrengst verder met 10 tot 20%.**

Zonnecellen kunnen verschillende gebruiksvormen hebben, zoals een zonnepaneel (boven) of een zonnefolie (onder).



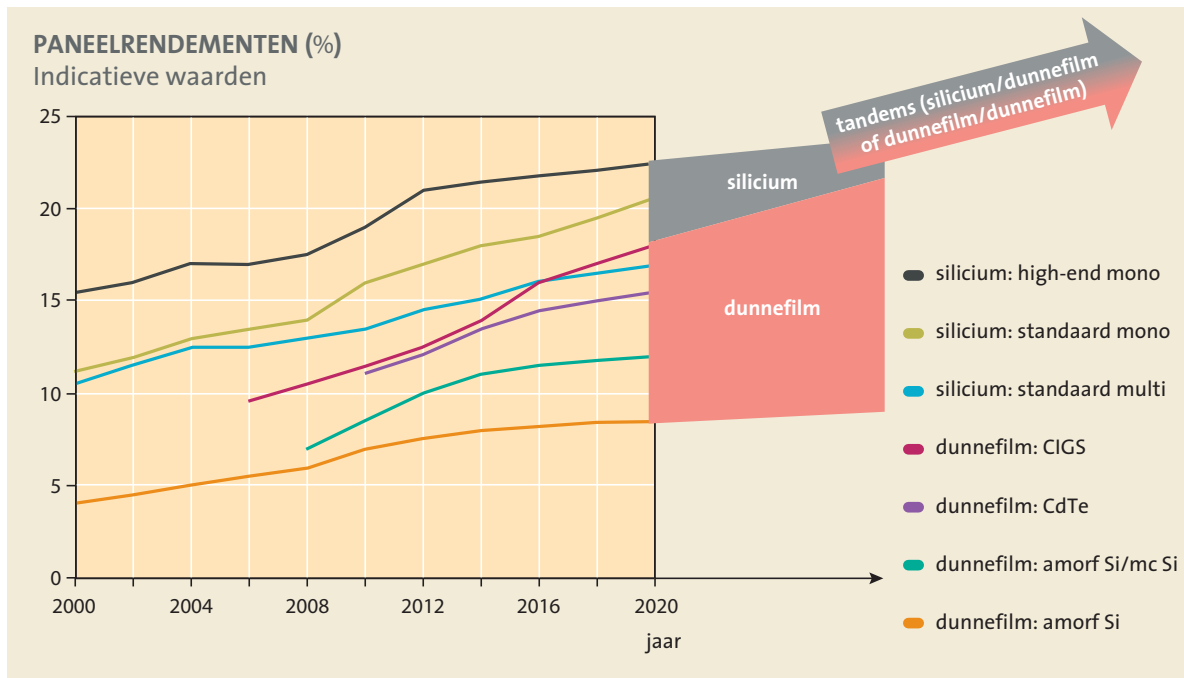
necel als in combinatie met silicium of een andere dunne film (eventueel een andere perovskiet) in een gestapelde cel worden gebruikt. Zo'n stapeling van twee materialen wordt een tandem genoemd (de hiervoor beschreven exclusieve 47%-cel had 6 lagen). Door het gebruik van gestapelde cellen kan de rendementslimiet van ongeveer 25% voor panelen gemaakt van een enkel materiaal (silicium of een dunne film) worden doorbroken. Op termijn zullen hierdoor goedkope panelen met een rendement van 30% of zelfs 40% beschikbaar komen.

Perovskieten hebben een groot deel van de aandacht en onderzoeksinspanning overgenomen die daarvoor was gericht op organische zonnecellen en kleurstofgesensibiliseerde zonnecellen. Belangrijke redenen daarvoor zijn de zeer snelle ontwikkeling van perovskieten en het hoge rendement dat al snel in het laboratorium werd gehaald, maar ook de nieuwe mogelijkheden die ze bieden. Denk daarbij bijvoorbeeld aan het maken van de eerdergenoemde tandems, die in het laboratorium al een rendement van ruim 30% hebben laten zien en aan de belofte om tegen zeer lage kosten zonnefolies 'aan de rol' te produceren.

### Spectaculaire kostendaling

De prijzen van zonnepanelen en complete systemen en daarmee van zonnestroom zijn de afgelopen decennia spectaculair gedaald, met name door een combinatie van opschaling in productie en installatie en innovaties. Voor elke verdubbeling van het totaal geproduceerde volume aan panelen zijn de prijzen gedaald met meer dan 20% en de laatste 15 jaar zelfs met 40%. De afgelopen 20 jaar is de prijs daardoor met maar liefst een factor 20 gedaald. In diezelfde periode is het rendement van panelen bijna verdubbeld. De laagste opwekkosten voor grote zonnestroomssystemen in zonnige landen liggen nu onder 2 eurocent per kilowattuur. Dat brengt de aansprekende grens van 1 eurocent per kilowattuur in zicht.

Historische en verwachte toekomstige rendementen van industrieel vervaardigde zonnepanelen en zonnefolies. Door silicium te combineren met dunnefilm perovskiet of door twee dunnefilms te combineren kan de trend van toenemend rendement nog lange tijd voortzetten.



**Zonne-energie is hernieuwbaar, maar niet automatisch duurzaam en circulair**

In Nederland, met een lagere instraling en andere financieringscondities liggen de kosten hoger, maar ook hier is de kostendaling groot geweest en is 2 tot 3 eurocent per kilowattuur het perspectief op langere termijn. Zulke zeer lage opwekkosten zijn onder meer belangrijk om ook inclusief de eventuele extra kosten voor integratie in het energiesysteem en in de leefomgeving een betaalbare oplossing te geven. Denk bij die extra kosten bijvoorbeeld aan opslag in batterijen en aan omzetting naar andere energiedragers zoals waterstof, ammoniak of methaan. Of aan esthetische en functionele integratie in gebouwde omgeving en aan landschappelijke en ecologische integratie in het buitengebied.

#### Duurzaam ontwerpen en toepassen

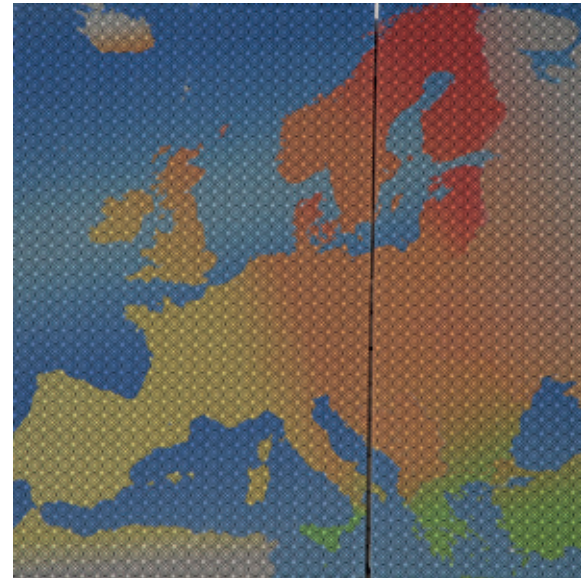
Zonne-energie is hernieuwbaar, maar niet automatisch volledig duurzaam en circulair. Wanneer zonne-energie op zeer grote schaal gaat worden

toegepast, is het belangrijk om ervoor te zorgen dat er geen afvalberg ontstaat en dat de gebruikte materialen opnieuw kunnen worden gebruikt; bij voorkeur weer voor zonne-energie of een andere hoogwaardige toepassing.

Daarnaast is het belangrijk om het gebruik van schaarse of schadelijke materialen te minimaliseren en liefst helemaal te vermijden. Hoewel veel materialen in zonnepanelen nu al worden hergebruikt valt er nog veel te verbeteren. Daarom staat 'eco-design' ofwel ontwerp voor duurzaamheid hoog op de agenda van onderzoekers en bedrijven.

Tot slot is er energie nodig om zonne-energiesystemen te produceren en te installeren. Die energie moet worden 'terugverdiend' voordat een systeem netto hernieuwbare energie kan gaan leveren. De 'energieterugverdiëntijd' moet liefst zo kort mogelijk zijn en het 'energierendement op investering' zo hoog mogelijk. Op dit moment is de energierterugverdiëntijd van complete systemen

Voorbeeld van design-panels met geïntegreerde print. Opbrengstvermindering ten opzichte van zwarte panelen is veelal 10-20%.



in ons deel van de wereld een tot enkele jaren op een levensduur van 25 tot 30 jaar. Door verdere verbeteringen in de technologie en door zeer snelle, efficiënte productieprocessen kan die energietegrugverdiensduur verder worden verkort tot minder dan een jaar of misschien zelfs een half jaar.

Duurzaamheid is ook belangrijk in de toepassingsfase van zonne-energie. Zo kunnen goed ontworpen zonne-energiesystemen naar verwachting een positieve bijdrage leveren aan de ecologische kwaliteit en de biodiversiteit, kunnen systemen worden gecombineerd met circulaire landbouw en kunnen drijvende systemen ongewenste verdamping van water verminderen.

### De toekomst in vogelvlucht

Zonne-energie heeft zich in de afgelopen vier decennia ontwikkeld van een nichetechnologie tot een belangrijke bouwsteen voor het toekomstige mondiale duurzame energiesysteem. Kosten zijn ongeveer een factor 100 gedaald, rendementen zijn meer dan verdubbeld en het marktvolume is met een factor 10.000 toegenomen.

De komende decennia zullen naar verwachting in het teken staan van marktgroei naar een niveau van tientallen terawatts-piek (tienduizenden gigawatts-piek; tot een factor 100 meer dan vandaag) aan zonnestroomvermogen en een diversificatie van toepassingen. Ook zullen de kosten nog verder dalen, zeker met een factor drie, en het rendement zal verhogen naar 30-40% voor commerciële producten, met focus op duurzaamheid en circulariteit. Het wordt een tijdperk van de zon.

# Kernfusie: de zon op aarde

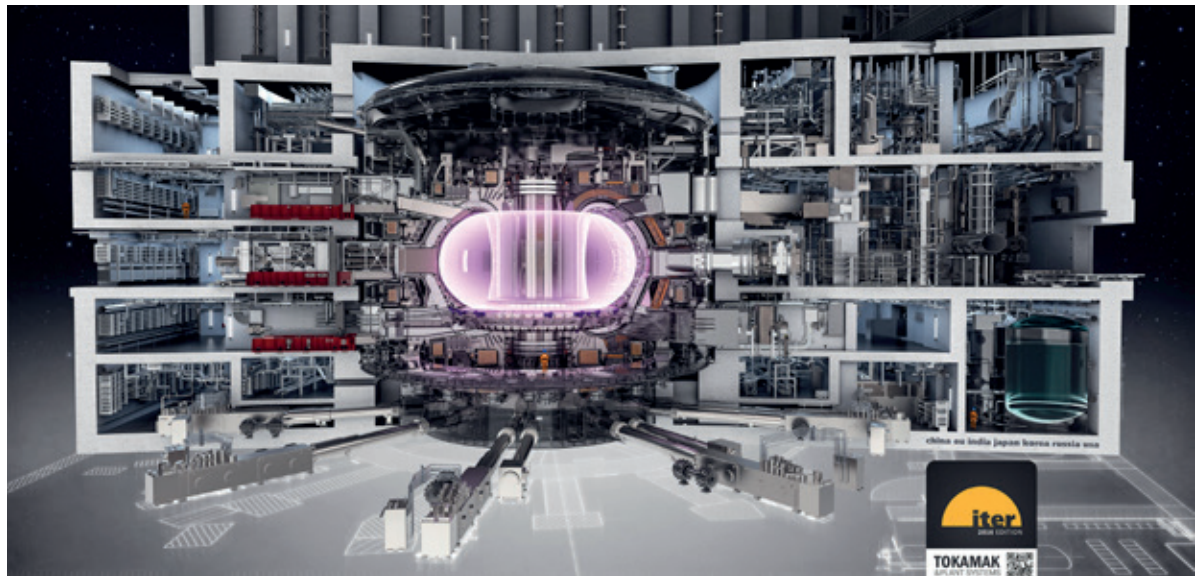
**Kernfusie is een mooie belofte van eindeloze, schone en veilige energie. Maar het fusieproces dat zich continu in de gloeiend hete kern van de zon afspeelt op aarde nabootsen, is niet eenvoudig. Hoe ver zijn we? En gaat het ooit lukken?**

NIEK LOPES CARDOZO

**I**N CADARACHE, een plaats in Zuid-Frankrijk niet ver van Aix-en-Provence, wordt hard gewerkt aan de constructie van de grootste en meeste geavanceerde kernfusiereactor ter wereld: ITER. Dit is een project waarin de Europese Unie samenwerkt met de Verenigde Staten, Rusland, China, Japan, India, en Zuid-Korea. Deze wereldwijde samenwerking wordt gedreven door de gedeelde wens om kernfusie als energiebron beschikbaar te maken voor de mensheid.

ITER zal naar verwachting over enkele jaren in bedrijf komen en heeft uiteindelijk tot doel om aan te tonen dat het 500 megawatt aan fusievermogen kan opwekken. Dit is te vergelijken met het thermische vermogen van een kleine kolencentrale.

De *tokamak*, het hart van de testkernfusiereactor van ITER, en de fabriekshallen daaromheen. In het donutvormige vat (roze) moet straks de kernfusiereactie gaan plaatsvinden.



Dit betekent nog niet dat ITER zelf daadwerkelijk energie gaat leveren, daarvoor gebruikt de machine zelf te veel stroom. Maar het is wel voldoende om aan te tonen dat het in principe mogelijk is om een energieleverende fusiecentrale te bouwen. En daarmee zou een geweldige mijlpaal zijn bereikt. ITER is in de eerste plaats een fantastisch – en kostbaar – *big science*-experiment. De uitkomst van dit experiment is onzeker – anders zou het geen experiment zijn – maar als alles lukt zoals voorzien, is ITER een beslissende stap in de richting van brede toepassing van fusie-energie.

## Kernfusie-energie

Maar wat is fusie-energie eigenlijk? En waarom wachten we er al zo lang op? Kernfusie is een proces waarin twee lichte kernen versmelten tot één zwaardere waarbij heel veel energie vrijkomt. Dit proces is de energiebron van de zon en van alle sterren in het heelal. Alle atomen die groter zijn dan waterstof – het atoom waarvan de kern uit een enkel proton bestaat – zijn ooit door kernfusie tot stand gekomen. Kernfusie is dus de bron van alle

materie: de aarde en de atmosfeer, de olifant en de mug, het virus en het vaccin.

Bij het versmelten van twee kernen komt 'heel veel' energie vrij; per gram brandstof zo'n tien miljoen keer meer dan bij de verbranding van aardgas. Er is dus maar heel weinig brandstof nodig om de wereld van energie te voorzien. Een kernfusiecentrale die net zoveel elektriciteit levert als een gemiddelde kolencentrale zou maar een paar honderd kilo brandstof per jaar gebruiken. En zo'n reactor zou veilig zijn, geen CO<sub>2</sub> uitstoten en nauwelijks langlevend radioactief afval produceren.

Kortom, in theorie ziet kernfusie er prachtig uit. Maar ondertussen moet de eerste daadwerkelijk energieproducerende reactor het licht nog zien. Dat er nog geen 'zon op aarde' is, komt doordat het bouwen van zo'n reactor extreem moeilijk is gebleken. In feite weten wetenschappers en ingenieurs nog steeds niet of dat ooit gaat lukken. De enige

manier om daar achter te komen is onderzoek doen met proefreactoren zoals ITER.

Er zijn twee heel fundamentele redenen waarom energieopwekking met kernfusie zo moeilijk is. Ten eerste, om twee positief geladen kernen met elkaar te laten fuseren moet de afstotende Coulomb-kracht worden overwonnen. Dat betekent in de praktijk dat de temperatuur die nodig is voor zelfs de makkelijkst verlopende fusiereactie – die tussen de waterstofisotopen deuterium en tritium – circa 150 miljoen graden Celsius bedraagt! Ten tweede, zelfs bij die extreme temperatuur is de kans dat deeltjes die botsen daadwerkelijk fuseren en energie produceren maar heel klein. Veel kleiner dan de kans dat ze 'gewoon' botsen waarbij hun energie in warmte wordt omgezet. Er is dus altijd een balans tussen energiewinst uit fusie en energieverlies door warmteafgifte.

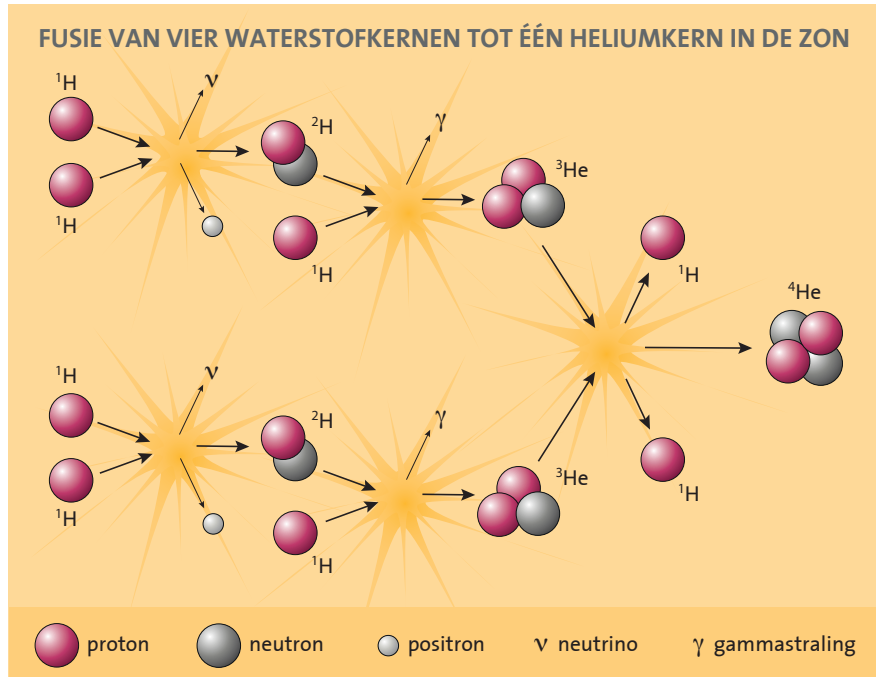
Deze twee eigenschappen van de fusiereactie zijn door natuurwetten bepaald. Daar kan niemand iets aan veranderen. Alle moeilijkheden die fusie-onderzoekers tegenkomen bij de realisatie van een fusiereactor zijn hier een direct gevolg van.

### Zwaar water

Onderzoekers kiezen voor deuterium en tritium als brandstof omdat alle andere opties nog veel moeilijker zijn. Deuterium – zwaar waterstof, waarvan de kern bestaat uit een proton en een neutron – is volop voorhanden in de natuur. Tritium – twee neutronen en een proton – bestaat niet in de natuur maar kan in de reactor zelf gemaakt worden uit lithium.

De deuterium-tritium-fusiereactie is dan wel de reactie die veruit het gemakkelijkst tot stand te brengen is, maar deze heeft ook een belangrijk nadeel: een van de reactieproducten is een hoog-energetisch neutron. Dat betekent dat materialen aan de binnenkant van de reactor worden blootgesteld aan een intens neutronenbombardement en daartegen bestand moeten zijn. Dit beperkt de

Schematische voorstelling van de kernfusiereactie.



De legendarische 'peace talks' van Gorbatsjov en Reagan in Genève in 1985.



Sinds de jaren vijftig wordt er wereldwijd samengewerkt aan kernfusie



keuze van materialen tot maar enkele elementen uit het periodieke systeem, zoals ijzer, chroom en wolfram.

Ook het feit dat botsingen meer warmte dan fusie-energie produceren heeft grote consequenties. Het betekent dat die warmte in het systeem moet blijven. Wanneer een brandstof op een temperatuur van 150 miljoen graden Celsius moet blijven, dan is maximale isolatie van de buitenwereld noodzakelijk. De truc die hiervoor wordt toegepast is de zogenoemde 'magnetische opsluiting': de hete brandstof (plasma) wordt gevangen in een magneetveld, zodat het warmteverlies naar de omgeving sterk wordt gereduceerd. Dat werkt buitengewoon goed. Door het magneetveld veran-

dert het plasma van een extreem goede warmtegeleider (veel beter dan koper) in een extreem goede isolator (veel beter dan piepschuim). Datzelfde magneetveld zorgt er echter voor dat de warmte die uiteindelijk op de wand van de reactor komt, een heel hoge warmtestroomdichtheid heeft, vergelijkbaar met die van een thermische lans, het gereedschap waarmee bankrovers een gat in de brandkast maken. De wand moet dus zo ontworpen zijn dat een straal van een lasbrander daar geen effect op heeft. Niet eventjes, maar 24/7, het hele jaar lang.

### Vredesproject

Al sinds de jaren vijftig van de vorige eeuw wordt er wereldwijd samengewerkt om het proces van kernfusie op een zodanig gecontroleerde manier tot stand te brengen dat het een bruikbare energiebron is. Die wereldwijde samenwerking kon tot stand komen omdat de uitdaging zo enorm groot is. Het waren de Russen die in 1958 als eersten volledige openheid gaven over hun tot op dat moment geheime fusie-onderzoek met als reden: 'dit is zo moeilijk, laten we het maar samen doen'.

Sindsdien is kernfusie-onderzoek een soort 'vredesprogramma' dat ook tijdens de koude oorlog een totaal vrije uitwisseling van ideeën en resultaten mogelijk maakte. Het ITER-project is geboren tijdens de zogenoemde *peace talks* in 1985 tussen de Amerikaanse president Ronald Reagan en Michail Gorbatsjov, de laatste leider van de Sovjet-Unie. Het diplomatieke belang van dit soort internationale *big science*-samenwerkingsverbanden moet niet onderschat worden. Er wordt wel gezegd dat ITER, een van de duurste wetenschappelijke experimenten met een prijskaartje van circa 20 miljard euro aan constructiekosten, voor een vredesproject heel goedkoop is.

In de afgelopen halve eeuw is onvoorstelbaar veel vooruitgang geboekt. Maar het antwoord op de vraag of kernfusie een bruikbare energiebron



## De ontwikkeling van kernfusie loopt ongeveer 70 jaar achter op zonnestroom

kan zijn, is nog steeds niet gegeven. Dat blijft voorslagnog de onderzoeksvraag voor ITER. Wel is het een razend interessante vraag die onderzoekers en ingenieurs naar de grenzen van het mogelijke voert. Temperaturen van honderden miljoenen graden Celsius, materialen die zo hittebestendig zijn dat je ze op de zon zou kunnen leggen (bij wijze van spreken), gigantische, extreem sterke supergeleidende magneten, machines met een graad van complexiteit die nooit eerder is vertoond. Eigenlijk is alles rond kernfusie extreem.

### Drie misverstanden

Er bestaan nogal wat misverstanden over kernfusie. Zo zou het niet zeker zijn of het kernfusieproces wel werkt, zou het heel moeilijk zijn om fusiereactie op te wekken en zou kernfusie ons helpen om de klimaatdoelen voor 2050 te behalen.

Het eerste misverstand is snel uit de weggeholpen: kernfusie – het proces – werkt. Daarover is geen discussie. Kernfusie zien we dagelijks in actie als we het licht van de zon of de sterren waarnemen. Het tweede misverstand eveneens: het opwekken van fusiereacties is *niet* moeilijk. Talloze middelbare scholieren hebben thuis een ‘fusiereactor’ gebouwd. Het gaat dan om een zogenoemde *fusor*. Op internet staan hier bouwaanwijzingen voor. Het belangrijkste onderdeel is een bolvormige vacuümkamer die wordt gemaakt van twee roestvrijstalen slakommen van de IKEA. Daarbinnen is een bolvormig rooster opgehangen. Door een spanning van een paar kilovolt aan te leggen tussen de slakommen en het rooster worden ionen voldoende versneld om fusiereacties plaats te laten vinden. Ook op de Technische Universiteit Eindhoven is in de onderzoeksgroep die aan kernfusie werkt een fusor gebouwd (zie afbeelding). En hij doet het prima; de fusor produceert meer dan een miljoen fusiereacties per seconde. Dit geeft zoveel straling dat de ingenieurs serieuze maatregelen moesten nemen om de neutronenstraling af te

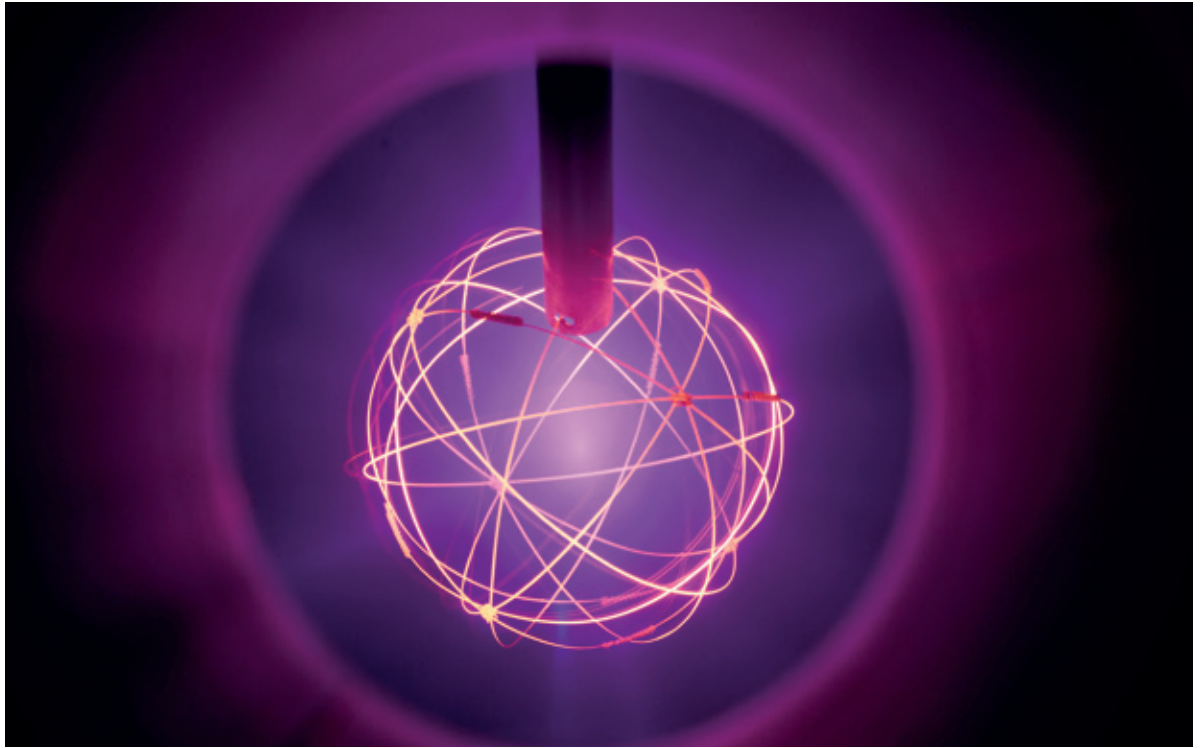
schermen. Maar netto energie zal deze fusor – of enige andere fusor – nooit produceren. Er gaat gewoon veel meer energie verloren in de vorm van warmte dan dat er vrij komt door de fusiereacties. Een miljoen fusiereacties per seconde klinkt misschien indrukwekkend, maar uitgedrukt als opgewekt vermogen is dit nog geen microwatt. Bijna niks. Dus ook al zijn kernfusiereacties bekend, werken ze, en zijn ze gemakkelijk op te wekken in het laboratorium, voorlopig kosten ze meer energie dan ze opleveren. Dat maakt het heel erg moeilijk.

Een derde misverstand is dat kernfusie ons gaat helpen om voor 2050 de transitie naar CO<sub>2</sub>-vrije energieopwekking mogelijk te maken. Zelfs als de ontwikkeling vanaf vandaag van een leien dakje gaat en de ‘roadmap’ zonder problemen wordt gevolgd, dan zal dat leiden tot een *demonstrator*-fase ergens rond 2060. Een *demonstrator* is een proefcentrale met alles er op en eraan. Maar een proefcentrale is nog geen centrale die voor energieproductie is ontworpen, het is een noodzakelijk tussenstop in de ontwikkeling naar een commerciële, op productie gerichte kernfusie-centrale. Wil dit iets op wereldschaal gaan betekenen dan moeten er vele honderden fusiecentrales in gebruik worden genomen. Daar gaan tientallen jaren overheen.

### In de kinderschoenen

Wat betreft de ontwikkeling loopt kernfusie ongeveer 70 jaar achter op bijvoorbeeld zonnestroom. Dat is ook helemaal niet verwonderlijk. Het fysische principe van zonnepanelen werd in 1839 al ontdekt, aan het begin van de twintigste eeuw verklaard, in de jaren vijftig in het laboratorium in praktijk gebracht en begin jaren zestig op de markt gebracht. Ter vergelijking: het principe van kernfusie is minder dan een eeuw geleden ontdekt, onderzoek naar kernfusie op laboratoriumschaal begon in de jaren vijftig.

De binnenkant van een fusor, een experimentele opstelling van de Technische Universiteit Eindhoven. De fusor kan fusiereacties opwekken door ionen te versnellen met een elektrostatisch veld. Het elektrisch veld wordt opgewekt door twee concentrische bolvormige elektroden. De bal van draden (de ene boelektrode) op de foto hiernaast hangt in een bolvormige vacuumkamer (de andere boelektrode). Via een rond venster kijken we naar binnen.



Kernfusie kan dus nog niet als ‘beschikbare’ energiebron worden gezien. Het moet nog worden aangetoond dat het überhaupt mogelijk is om een energieleverende reactor te maken. ITER is een heel belangrijk experiment daarvoor.

Tegelijk wordt in tal van laboratoria gewerkt aan kleinere experimenten. De meeste zijn gefinancierd door overheden, maar ook heel wat door industriële sponsors. Soms zijn dat variaties op ITER, soms radicaal andere concepten. Voor de ontwikkeling van fusie-energie is dit heel gezond, hoe meer parallelle innovatie hoe beter. Fusie is ‘laat’ in de zin dat het 70 jaar achter loopt op zonnecellen. Omdat opschalen tijd kost, of het nu gaat om kernfusie of een andere energiebron, zal de energietransitie het tot 2050 moeten hebben van technologieën die nu al flink groot zijn: zon en wind.

Alle nieuwe ideeën en innovaties, die nu nog op laboratoriumschaal worden uitgetoetst, zullen zich net als fusie-energie pas later melden. Vandaag zijn dit niet meer dan opties voor de toekomst, opties die buitengewoon belangrijk zijn om te hebben. Misschien hebben we ze wel heel erg hard nodig tegen de tijd dat ze beschikbaar komen. En om dan opties te hebben moeten we vandaag het onderzoek doen. Net als bij zonnecellen: 40 jaar voor de grootschalige toepassing uit. Voor de energietransitie geldt: geen onderzoek doen is geen optie.

# Naar nul-op-de-meter met zonnepa

*Sinds wanneer heb je zonnepanelen op je dak? En waarom heb je hiervoor gekozen?*

‘Zes jaar inmiddels. De belangrijkste reden is dat ik mijn CO<sub>2</sub>-footprint wil verminderen. Een duurzaam huis met zonnepanelen hoort daarbij. Het is voor mij een beetje een meerjarenproject om op “0” uit te komen, en ik heb gekeken waar de meeste CO<sub>2</sub>-winst te behalen valt en dat in de prioritering van de maatregelen laten meewegen. Een set van elf zonnepanelen was in 2015 de eerste stap.’

*Hoeveel zonnepanelen heb je nu? En is dit afgestemd op eigen gebruik of op de grootte van je dak?*

‘Inmiddels heb ik 25 stuks. Dit is afgestemd op een maximale benutting van de dakruimte. Nu we van het gas af zijn, zouden we onder de streep voor het “thuis”-verbruik meer dan genoeg opbrengst hebben. En er blijft nog wat over voor de elektrische auto.’

*En denk je al na over thuisbatterijen om het overschot aan stroom op te slaan?*

‘In Nederland hebben we nu nog de situatie dat je onbeperkt mag salderen: je mag gewoon terugleveren en die stroom wordt dan netjes een-op-een verrekend met de levering. Daardoor ontbreekt de financiële prikkel om het eigen gebruik van zonne-energie te optimaliseren. Gelukkig wordt die salderingsregeling afgebouwd. In de tussentijd probeer ik wel de boel zodanig in te richten dat de zonnestroom al zo veel als mogelijk thuis gebruikt wordt. Ik heb nu een slimme laadpaal geïnstalleerd (de Zappi) die continu de zonnestroom-opbrengst meet en de laadsnelheid van de auto met de

zonne-opbrengst meeregelt. Nu alleen omdat ik het belangrijk vind, straks wordt het ook financieel interessanter. De huidige elektrische auto leent zich nog niet voor *vehicle to grid*: de batterij in de auto krijgt dan ook een rol in de opslag, buffering en teruglevering van stroom. Maar wie weet gaat dat komen. Een thuisbatterij lijkt me zeker óók interessant.’

*Hou je sindsdien de opbrengst aan zonne-energie en eigen verbruik bij?*

‘Ja. Ik heb de meterkast flink uitgebreid; ik meet drie groepen zonne-opbrengst, verder een aparte meter voor de autolaadpaal, en ik heb meters toegevoegd voor de warmtepompen zodat ik een beetje kan bijhouden en uitsplitsen hoe alle verschillende maatregelen uitpakken.’

*Vraag je je af waarom nog niet iedereen zonnepanelen op zijn eigen dak heeft?*

‘Bij de zonnevelden heb ik wel gemengde gevoelens. Eerst de daken vol, zeker in ons kleine landje! En als je het sommetje maakt, is zonnepanelen plaatsen een hartstikke interessante investering. Met de dalende prijzen is het nu zelfs nóg interessanter dan in 2015. De hobbels zitten hem in de investering vooraf – de kosten gaan voor de baten uit – en de “gedoe-factor”. En in de huursector heb je woningbouwverenigingen die geen vaart maken met hun maatschappelijk taak.’

*Wat zijn je ervaringen met de zonnepanelen tot nu toe?*

‘Het werkt allemaal vlekkeloos. Het is ook bijzonder fijn om de meters terug te zien lopen. En

# neeleigenaar Anne Schulp



Anne Schulp bij de slimme laadpaal die voorrang geeft aan zonne-energie. In het dagelijkse leven is hij onderzoeker bij het museum Naturalis in Leiden en hoogleraar vertebratenpaleontologie aan de Universiteit Utrecht.

al helemaal als aan het eind van een zonnige dag je auto ook nog eens gratis en groen volgeladen klaarstaat.’

*Heb je nog andere maatregelen genomen in je huis om energie of CO<sub>2</sub>-uitstoot te besparen?*

Ja, we hebben extra vloerisolatie aangebracht, het dak na-geïsoleerd, beneden triple glas laten plaatsen, alle verlichting naar LED, alle apparatuur

naar A+++; gasfornuis vervangen door inductie, elektrische auto, en zowel verwarming als tapwater middels een elektrische warmtepomp. Om dat laatste mogelijk te maken hebben we wel eerst alle radiatoren eruit gesloopt en op alle verdiepingen vloerverwarming ingefreesd. Een warmtepomp werkt beter met een wat lagere temperatuur. Vloerverwarming in plaats van radiatoren is dan wel wenselijk, los nog van het extra comfort en de luxe van de vrijgekomen ruimte die de radiatoren eerst innamen.

*Wat zou er nog meer moeten gebeuren om zonnestroom beter te benutten?*

‘Eigenlijk wil ik een soort slimme kabouter in mijn meterkast. Eentje die opbrengst, levering, kosten en de bijbehorende CO<sub>2</sub>-uitstoot goed in de gaten houdt. En op basis daarvan een gesprek aangaat met het energiebedrijf, de thuisbatterij, de wasmachine, de laadpaal en andere grote verbruikers, zodanig dat de zonnestroom wérkelijk slim wordt ingezet, en de CO<sub>2</sub>-uitstoot daarmee zo laag mogelijk wordt.’

‘Onder de streep: ons huis uit 1998, dat niet spectaculair goed geïsoleerd was, is dat nu inmiddels wél. En met 25 zonnepanelen is nul-op-de-meter in een gemiddeld rijtjeshuis dus prima haalbaar. Sterker nog, we koersen nu af op onder-nul-op-de-meter en houden nog kWh's over om de auto mee op te laden ook. Met zonnepanelen én betere isolatie is “van het gas af” en je huis CO<sub>2</sub>-neutraal maken, kan ik nu uit eigen ervaring zeggen, prima te doen.’

# Koken op zon

REDACTIE, IN SAMENWERKING MET MAARTEN OLT Hof

**In 1997 richtte ecooloog Maarten Olthof Stichting Vajra op. Deze stichting heeft, naast vele andere activiteiten, een project opgezet om Bhutanese vluchtelingen in Oost-Nepal met zonneovens te helpen in hun basisbehoefte te voorzien. Het werd het grootste zonneovenproject wereldwijd in zijn soort.**

**E**EN ZONNEOVEN is een technisch simpele voorziening om op zonne-energie te koken en bestaat al sinds de achttiende eeuw. De Zwitserse natuuronderzoeker en uitvinder Horace de Saussure bouwde destijds een zonneoven in de vorm van een goed geïsoleerde doos met aan de bovenzijde glas. Het duurde honderd jaar voordat het Franse vreemdelingenlegioen in Noord-Afrika dit kookinstrument een stap verder bracht door het te voorzien van holle spiegels die het weerkaatste zonlicht bundelden. Halverwege de vorige eeuw nam de aandacht voor zonneovens toe en sindsdien is het aantal typen sterk uitgebreid.

Zonneovens zijn vooral succesvol op plekken waar brandstof schaars is en de zon overvloedig schijnt – zoals het geval was in zeven vluchtelingkampen in Nepal waar sinds de jaren 1990 meer dan honderdduizend Bhutanese vluchtelingen verbleven. Maarten Olthof vatte in 1998 het idee op om via Stichting Vajra deze kampen van zonneovens te voorzien. ‘Het eerste type dat we er introduceerden was een goedkope “zonnedoos”, afgeleid van het door De Saussure ontwikkelde type. Maar voor gebruik in vluchtelingkampen bleek die te traag te koken. Bovendien was het

ontwerp met spiegels en glasplaten te kwetsbaar in de vluchtelingensituatie,’ legt Olthof uit. ‘Daarom zijn we overgestapt op de parabolische zonneoven, die inkomende zonnestraling concentreert in het brandpunt, waar een zwarte pan op een rooster de hitte absorbeert. Dit type bleek zo effectief dat twee gezinnen, doorgaans samen twaalf vluchtelingen, een oven konden delen. Daarmee was deze zonneoven per persoon bovendien goedkoper dan de zonnedoos.’

## Belang van een hooikist

‘In het brandpunt van de parabolische zonneoven kan de temperatuur oplopen tot boven 200°C, waardoor je er zelfs mee kunt frituren. Dit verhoogde de acceptatie ervan aanzienlijk. Frituren is namelijk een voorwaarde voor het bereiden van curry, een gerecht boven aan het menu van deze vluchtelingen’, vertelt Olthof. ‘Essentieel voor het welslagen van het project was dat zij naast de zonneoven een hooikist ontvingen. Niet alleen blijft overdag bereid voedsel daarin warm tot aan de avondmaaltijd, het kan er bovendien in nagaren, wat de kooktijd aanzienlijk verkort.’

De ovens, hooikisten en bijbehorende zwarte pannen werden in lokale werkplaatsen door vluchtelingen zelf in elkaar gezet met onderdelen uit Nepal, China en Duitsland. Olthof: ‘Wat de acceptatie van de zonneoven verder sterk bevorderde waren de uitgebreide gebruikerstrainingen, een reparatiedienst en aanpassingen van het ontwerp op voorstel van gebruikers. Ook een geringe bijdrage per gezin aan de aanschaffkosten die gebruikers “eigenaar” van de oven maakte, droegen daar aan bij.’



**Bhutanese vluchtelingen te midden van parabolische zonneovens en hooikisten.**

Na de succesvolle testfase in één kamp breidde de stichting het project stapsgewijs uit naar de overige kampen. Zo konden in 2008 ruim 85.000 vluchtelingen hun dagelijkse maaltijd met de zon bereiden. Daarmee was het in zijn soort het grootste zonneovenproject ter wereld. De UNHCR, de vluchtelingenorganisatie van de Verenigde Naties, was vanaf het begin betrokken bij het project.

Deze manier van koken heeft grote milieuvordelen en kan flinke besparingen opleveren, aldus Olthof. 'Studenten van de Universiteit Utrecht hebben voor ons becijferd dat onze zonneovens jaarlijks een besparing opleverden van het equivalent van 15 miljoen kilogram hout of 1,3 miljoen liter kerosine.' Daardoor werd een CO<sub>2</sub>-uitstoot voorkomen van ruim 3000 ton respectievelijk 24.000 ton. Een zonneoven verdiende zich zo in ruim twee jaar terug. Bij gemiddeld gebruik gaat een zonneoven ruim tien jaar mee.

### **Aanpassen aan lokale situatie**

Niet elke situatie leent zich overigens voor de inzet van zonneovens. Olthof: 'Nadat landen buiten Bhutan en Nepal de meeste vluchtelingen hadden opgenomen, verdeelden wij de zonneovens onder de plaatselijke bevolking rondom de kampen. Daar kwamen de apparaten minder goed tot hun recht. Dorpelingen werken er overdag veelal buitenshuis, in tegenstelling tot vluchtelingen in de kampen. En om met de zon te kunnen koken, moet de oven elk kwartier opnieuw naar de zon worden gericht.'

Door het ontwerp aan te passen kunnen zonneovens ook buiten vluchtelingensituaties succesvol zijn. Een goed voorbeeld hiervan vormt de Vajra Academy, een door de stichting gebouwde ecologische school in de Nepalese Kathmandu-vallei. Bij de bouw ervan in 2007 is een zonnestoomkeuken geïnstalleerd. Op het dak van de school prijken tien parabolische spiegels van elk 9 m<sup>2</sup> die zonlicht op een buisvormig waterreservoir bundelen. De opgewekte stoom bereikt via een geïsoleerde leiding speciale ketels in de schoolkeuken, waar dagelijks voor honderdvijftig leerlingen wordt gekookt. Een mechanisch uurwerk zorgt dat de spiegels de baan van de zon volgen, waardoor tijdrovende afstelling met de hand niet nodig is.

# 4

# Zon en gezondheid



Gezondheid is zo iets als een toestand van algeheel welbevinden zonder ziekte en lichamelijk en geestelijk ongemak. Het woord dateert waarschijnlijk uit de vroege Middeleeuwen toen de mens de pest wist te vermijden door, weg van anderen, de zon op te zoeken. De relatie tussen zon en gezondheid is echter ingewikkelder dan dat. De zon heeft positieve en negatieve effecten op onze gezondheid; soms lopen ze door elkaar.



## Het ontstaan van verschillende huidskleuren

De menselijke huid heeft een scala aan tinten en ook binnen een regio kunnen er van nature grote verschillen bestaan. Deze verschillen in huidskleur hebben de mensheid altijd enorm gefascineerd.

KLARA MOSTERD, FRANK  
DE GRUIJL, ROY ERKENS EN  
JANNES VAN EVERDINGEN

**D**E OUDE Grieken vonden voor het bestaan van verschillende huidskleuren een verklaring in de mythologie. Zo veroorzaakte de ongelukkige Phaëton – de sterfelijke zoon van de zonnegod Helios – door een ongeluk met zijn vaders zonnewagen dat er stukken aarde verschroelden en volken met een donkere huid ontstonden.

In de daaropvolgende eeuwen circuleerden diverse andere verklaringen, maar één ding bleef hetzelfde: een donkere kleur was in Europa niet voordelig. Velen waren ervan overtuigd dat hoe warmer het klimaat was, hoe donkerder de huidskleur en hoe trager en slechter de geest werkte. Men beriep zich daarbij op het Hebreeuwse Bijbelboek *Genesis*, waarin Cham werd vervloekt en donkere nakomelingen kreeg omdat hij samen met zijn zoon Kanaän zijn dronken vader Noach naakt had gezien.

### Kleur als 'compromis'

Toen de eerste mensachtigen zich samen met de chimpansees afsplitsten van hun voorouders, hadden ze net als de huidige mensapen een lichte huid onder hun donkere vacht. Toen onze voorouders de bomen verruilden voor de savanne kregen zij een minder dikke lichaamsbehaarung en vormde hun huid meer melaninepigment om beschermd te zijn tegen de Afrikaanse zon. Zonnestraling bevat schadelijke ultraviolette (uv) straling die huidkanker veroorzaakt en de vitamine folaat afbreekt. Folaat is de natuurlijke vorm van vitamine B11, ook bekend als foliumzuur.



## Genen voor een lichte huidskleur zijn afkomstig van neanderthalers

Het menselijk lichaam heeft ook uv-straling nodig. Het veroorzaakt de aanmaak van vitamine D wat noodzakelijk is voor kalkopname, botgroei en botvernieuwing bij volwassenen. Net als de bovenste laag van de huid (de opperhuid = epidermis) is ook bot een levend weefsel dat zich continu vernieuwt om zijn mechanische sterkte te behouden. Een tekort aan vitamine D (zie Vitamine D en zonlicht) leidt tot de Engelse ziekte (rachitis), wat naast kromme benen de bekkenbeenderen en daarmee het baringskanaal van vrouwen zo nauw maakt dat er ernstige problemen bij de bevalling ontstaan.

Het is mogelijk dat er bij onze vroege voorouders een selectie is geweest op de productie van melanine. Huidskleur werd een 'compromis' tussen gunstige effecten, zoals het in stand houden van de voorraad vitamine D en minder baringsproblemen versus de bescherming tegen schadelijke effecten van zonnestraling, zoals verlies van folaat. De kleur van iemands huid hangt daardoor samen met de natuurlijke geografische verspreiding van de mens van eeuwen geleden.

De Inuit rond Groenland zijn daarop een uitzondering; zij hebben met hun relatief donkere (indianen)huid in een extreem zonarme omgeving toch weten te overleven door hun traditioneel vette-visrijke voeding die veel vitamine D bevat.

Daarnaast lijkt het erop dat genen die de lichte huidskleur van de Europese moderne mens (*Homo sapiens*) bepalen, afkomstig zijn van de uitgestorven neanderthalers (*Homo neanderthalensis*) die al veel langer op het noordelijk halfrond vertoefden. Toen de voorouders van de moderne mens ergens tussen 45.000 en 65.000 jaar geleden uit Afrika naar het noorden trokken en in het Midden-Oosten neanderthalers tegenkwamen, hebben zij zich deels vermengd, is de gedachte. Dat leverde vruchtbare nakomelingen op van wie alle Europeanen en Aziaten zouden afstammen. Er is een belangrijk neanderthalergen dat daarop duidt, het BNC2-gen. Dit zorgt ervoor dat niet-Afrikanen minder huid-

pigment aanmaken, wat mogelijk belangrijk is geweest voor de overleving in noordelijke streken.

### Melanine kleurbepalend

Twee factoren die bijdragen aan het verschil in huidskleur zijn de dikte van de hoornlaag (het bovenste deel van de opperhuid) en de pigmenten in de huid en het bloed. De hoornlaag bevat keratine dat een gele kleur heeft. Een dikkere hoornlaag zorgt zodoende voor een meer geelachtig getinte huid. Dit speelt eigenlijk alleen mee als er sprake is van eelt; de hoornlaag is bij normale dikte van 10 micrometer zo goed als doorzichtig.

In de bloedvaten komen de pigmenten oxyhemoglobine en deoxyhemoglobine voor en in de opperhuid caroteen en melanine. Melanine is verreweg het belangrijkste pigment en komt voor in twee vormen: feomelanine (rood tot geel) en eumelanine (donkerbruin tot zwart). Melanine wordt geproduceerd door melanocyten. Deze pigmentcellen liggen permanent in de onderste laag van de opperhuid. Het aantal melanocyten is bij alle mensen, ongeacht hun huidskleur, even groot, maar ze kunnen wel een verschillende hoeveelheid melanine vormen. De pigmentkorrels (melanosomen) uit de melanocyten van een donkere huid zijn groter en ook het aantal en de verdeling kan verschillen. Deze factoren veroorzaken het verschil in huidskleur.

Grote hoeveelheden melanine worden bij blanke mensen gevonden in sproeten, moedervlekken, tepels, genitaliën en oksels. Andere delen van het lichaam zoals de lippen, handpalmen en de voetzolen bevatten minder melanine. Ook het type melanine draagt bij aan de kleur van de huid. Een lichte huidskleur met sproetjes en rood haar komt voor bij iemand met veel feomelanine in verhouding tot eumelanine in de huid. Een donkere huidskleur bevat juist meer eumelanine dan feomelanine.

Vier tot zes genen bepalen de hoeveelheid en het type melanine. Die genen kunnen elkaars effecten

niet maskeren; ze zijn 'co-dominant', waardoor er een complexe variatie in huidskleur ontstaat. Een belangrijk gen voor de donkere huidskleur bij Afrikanen is het MC1R-gen. Dit gen is bij bijna alle Afrikaanse mensen identiek; een bewijs voor een strenge selectie door het klimaat. Buiten Afrika is het gen heel variabel, vanwege een scala aan andere selectiemechanismen. Andere genen laten echter andere patronen zien, wat aangeeft dat huidskleur een complex fenomeen is.

### Onaangepast

In de afgelopen eeuwen zijn mensen steeds minder honkvast geworden: blanke Europeanen zwermde bijvoorbeeld uit over de tropen en de laatste decennia is de migratiestroom omgekeerd. Steeds meer en steeds sneller vestigen mensen zich in gebieden waar ze qua huidskleur niet aan aangepast zijn. De kans dat de nakomelingen van die migranten van huidskleur veranderen door evolutie is uiterst klein. Mensen passen zich aan hun nieuwe leefomgeving aan door zich te beschermen met kleren, parasols, hoeden en zonnebrandcrème tegen de ongewenste effecten van de zon of ze bestrijden vitamine D-gebrek met een simpel pilletje. Daarmee is er van natuurlijke selectiedruk op de huidskleur weinig meer over.

## Maakt de zon ons gelukkig?

**Zodra de zon schijnt raken we collectief in een goede stemming. Bij de eerste prille zonnestraaltjes gaan we massaal naar buiten, naar een terrasje, heerlijk baden in het warme lentelicht. Dat lentegevoel zien we ook in de natuur: het leven barst letterlijk uit de aarde.**

**N**ET ALS beweging en goede voeding, lijkt licht een essentieel ingrediënt voor geluk en gezondheid. Maar hoe kan zonlicht ons gelukkig maken? Dat gebeurt onder andere door het stimuleren van de aanmaak van een tweetal eiwitten, serotonine en  $\beta$ -endorfine, die in de volksmond ook wel gelukshormonen worden genoemd. Serotonine wordt in de hersenen gevormd uit tryptofaan, een van de aminozuren die uit de voeding moet worden opgenomen. Het blijkt dat de aanmaak van serotonine in het brein, dat beïnvloed wordt door zichtbaar licht in het oog, het laagst is in de winter. Onder invloed van uv-straling ontstaat

De Rokjesdagloop in Amsterdam ter nagedachtenis aan de schrijver Martin Bril die het fenomeen Rokjesdag introduceerde.



## Leven zonder zon

In 1962 deed Michel Siffre (1939), een Franse speleoloog, een experiment om de invloed van licht op het dag-nachtritme te onderzoeken. Hij sloot zichzelf voor twee maanden op in een ondergrondse gletsjer in Zuid-Frankrijk en liet zijn onderzoeksteam boven de grond weten wanneer hij wakker werd, at en ging slapen. Hij kreeg geen informatie terug.

Uit zijn verslag bleek dat zijn slaap-waakritme wel in de pas had gelopen met het leven

boven de grond, maar dat hij zijn langere slaapperioden voor hazenslaapjes had gehouden en dat hij daarom maar één maand onder de grond had gezeten in plaats van twee maanden. Hij was in het donker zijn gevoel voor tijd volledig kwijtgeraakt. Verder had hij zijn experiment goed doorstaan.

Tien jaar later zocht Siffre nogmaals de eenzaamheid van een grot op, maar nu voor een langere periode. Na tweeënhalve maand werd hij depressief en suïcidaal.



Ondergrondse ontdekkingsreiziger Michel Siffre die twee maanden alleen in een ondergrondse grot in Zuid-Frankrijk doorbracht, wordt naar buiten gehesen op 17 september 1962. Hij verbleef die tijd in de Scarasson-grot zonder toegang tot een klok, licht of een kalender.

in de huid ook het hormoon  $\beta$ -endorfine, met het eiwit  $\beta$ -lipotropine als voorlopermolecuul. Endorfines lijken op opiaten in hun vermogen om pijnstilling te veroorzaken evenals een gevoel van welbevinden en geluk.

### Winterblues

Een dip in de productie van beide gelukshormonen kan bijdragen aan een seizoensgebonden stemmingsstoornis. Deze stoornis treedt meestal op van september tot maart, gedurende de donkere dagen van het jaar. Daarom wordt de aandoening ook wel winterdepressie genoemd en de iets lichtere variant winterblues. De symptomen zijn onder andere lusteloosheid, somberheid, vermoeidheid, veel slapen en trek in troosteten dat vaak rijk aan koolhydraten is. Hoewel 60% van de mensen in de donkere dagen voor kerst last heeft van een of meer symptomen, lijdt 2% werkelijk aan een echte winterdepressie. De klachten keren ieder jaar in het najaar terug en verdwijnen weer in de lente. Dat doet vermoeden dat behandeling met licht de klachten kan reduceren.

In Nederland is aan het eind van de jaren tachtig voor het eerst onderzoek verricht naar winterdepressie, de zogenoemde *seasonal affective disorder* (SAD), door de Groningse hoogleraar psychiatrie Rutger Hendrik van den Hoofdakker – beter bekend als dichter Rutger Kopland, (pseudoniem) – en collega's. Uit hun onderzoek kwam onder meer naar voren dat de therapeutische effecten van *full-spectrum* witlicht (zonder uv) het grootst waren in vergelijking met alleen blauw licht (430-465 nanometer) en rood licht (615-655 nanometer). Verder bleek dat de lichtinval op het netvlies (retina) van wezenlijk belang was voor het bereiken van een vermindering van de depressie. Deze reactie op licht, evenals de pupilrespons, verloopt via fotogevoelige ganglioncellen die het lichtgevoelige pigment melanopsine als fotoreceptor hebben. Ganglioncellen spelen met name een rol in het synchroniseren van het dag-nachtritme en de aanmaak van serotonine en melatonine. Bij depressieve mensen is het dag-nachtritme vaak verstoord. Melatonine kan dit herstellen en lijkt tevens stemmingsstoornissen te verminderen.

# Vitamine D en zonlicht

**Om zelf vitamine D aan te maken hebben we bijna elke dag een beetje zonlicht nodig. In de winter vormt dit wel een probleem, en ligt een vitamine D-tekort op de loer.**

**V**ITAMINE D is nodig om calcium uit de voeding op te nemen en daardoor belangrijk voor de opbouw en onderhoud van het skelet en het gebit. Daarnaast speelt het een rol bij een goede werking van het afweersysteem en van de spieren. Een gebrek aan vitamine D veroorzaakt bij kinderen een botziekte: rachitis (Engelse ziekte). Bij deze kinderen is er onvoldoende botaanmaak waardoor de benen kromgroeien. Bij volwassenen en ouderen kan door een tekort aan vitamine D botontkalking (osteoporose) en spierzwakte ontstaan.

Eigenlijk is vitamine D (cholecalciferol, D3) geen vitamine maar een prohormoon. Het wordt in de huid aangemaakt onder invloed van ultraviolette straling van de zon. In Nederland, waar het over het algemeen minder zonnig is dan in de tropen, lopen mensen met een donkere huid iets meer kans op vitamine D-gebrek, omdat hun huid minder (snel) vitamine D uit zonlicht aanmaakt. Voor mensen met een licht huidtype is in de zomer een korte blootstelling van hoofd, armen en handen aan zonlicht van ongeveer een kwartier tot een half uur een paar keer per week waarschijnlijk al genoeg voor de aanmaak van voldoende vitamine D. In de winter blijft de zon te laag staan en is er ook voor hen te weinig uv-B-straling voor de aanmaak van vitamine D. Het lichaam kan vitamine D opslaan in vetweefsel en organen, maar deze voorraad is niet afdoende om het winterse gebrek aan vitamine D aanmaak volledig te compenseren.

Vitamine D zit ook in voedsel, zoals witte vis, lever, vlees, eieren en melkproducten, in de vorm

van vitamine D3 (cholecalciferol), maar slechts in kleine hoeveelheden. Vitamine D2 (ergocalciferol) is van plantaardige origine en komt vooral uit bepaalde paddenstoelen en schimmels. Alleen in vette vis zit zo veel vitamine D3, dat mensen in het hoge noorden die weinig zon zien toch nog over voldoende vitamine D beschikken. Aan halvarine en margarine wordt vitamine D in geringe hoeveelheden toegevoegd.

Naast mensen met een donkere huid, lopen ook ouderen door hun vaak spaarzame voeding een groter risico op een vitamine D-tekort. Als zij ook nog weinig buiten de deur komen, is die kans extra groot. Daar komt bij dat zij een dunnere huid hebben die minder vitamine D kan aanmaken en dat zij hun huid vaker bedekken tegen de zon. Ouderen en mensen met een donkere huid hebben daarom baat bij het slikken van vitamine D.

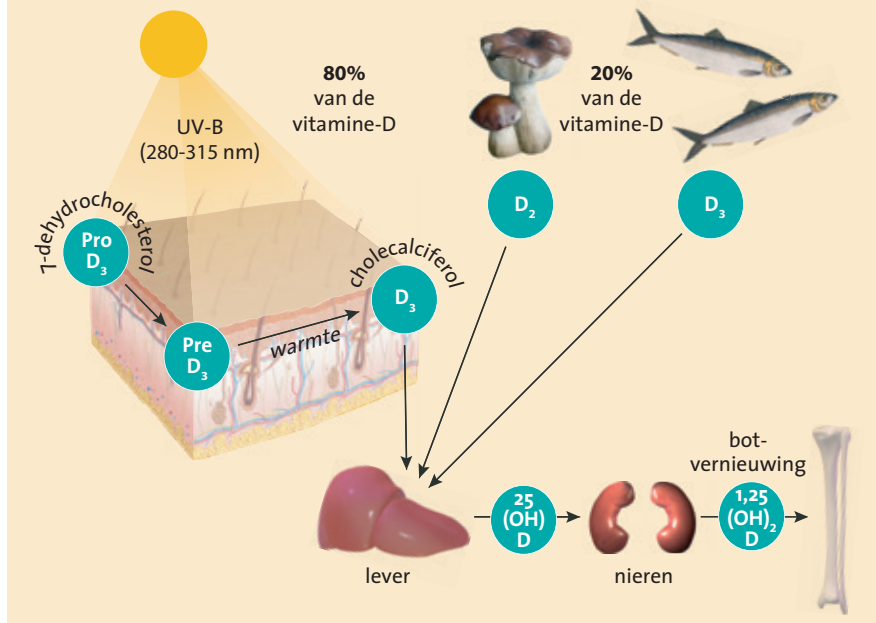
## Vitamine D en kanker

Van verschillende voedingssupplementen is verondersteld dat ze helpen om kanker te voorkomen. Vitamine D is vooralsnog de enige vitamine waarvoor aanwijzingen zijn dat het in een hogere dosis dan de standaarddosering van 10 microgram per dag een kankerremmend effect kan hebben. Deze bevindingen berusten op zowel onderzoek met proefdieren en menselijke cellen in kweekbakjes als op observationeel epidemiologisch onderzoek waarbij gekeken is naar verschillen tussen grote groepen mensen. De eerste aanwijzingen dat vitamine D mogelijk beschermt tegen kanker stammen uit de jaren zeventig van de vorige eeuw. Bij kankerregistraties in de Verenigde Staten werden verschillen gevonden in het voorkomen van darmkankersterfte die werden toegeschreven aan mogelijke verschillen in vitamine D-gehalten in het bloed. Dat kwam overeen met Europese bevindingen: Zuid-Europa vertoont een lagere incidentie en sterfte dan de noordelijke landen waar de zon minder schijnt.



**In de winter staat in Nederland de zon te laag om voldoende vitamine D aan te maken**

## VITAMINE D EN DE ZON



In twee stappen wordt vitamine D (D<sub>3</sub>, cholecalciferol) na vorming in de huid omgezet in een actieve vorm. In de lever wordt vitamine D omgezet in 25-hydroxyvitamine D. En de nieren zetten 25-hydroxyvitamine D vervolgens om in 1,25-dihydroxyvitamine D. Dit is de actieve vorm van vitamine D, ook wel calcitriol genoemd. We maken ongeveer 80% van de vitamine D zelf.

In een andere studie werden de gegevens en resultaten samengenomen van 30 interventie-onderzoeken met extra vitamine D-toediening bij borstkanker. De uitkomsten lieten een sterk verband zien tussen een hoog vitamine D-gehalte in het bloed en een betere overleving van borstkankerpatiënten.

Verder bleek in een laboratoriumonderzoek met huid- en prostaatcancercellijnen het toedienen van vitamine D de groei van de kankercellen te onderdrukken. Ook hadden ratten met prostaatcanker minder vaak uitzaaiingen als ze vitamine D kregen. Maar bij een subgroep van mannen met prostaatcanker bij wie de kankercellen harder groeiden onder invloed van hormonen was geen verschil te zien. Ook het verband tussen vitamine D en het risico op alveolairkanker en andere zeldzamere vormen van kanker, is onderzocht. Deze studies lieten tegenstrijdige resultaten zien. Of vitamine D een kankerremmend effect heeft,

hangt dus erg af van het soort kanker, maar ook van soort studie (juiste duur, grootte, eindpunt of populatie).

## Vitamine D en Covid-19

Het is bekend dat vitamine D goed is voor de gezondheid en een aantal onderdelen van het afweersysteem versterkt. Het zorgt ervoor dat de afweerrespons goed op gang komt en goed wordt gecontroleerd. Dat is belangrijk bij het voorkomen of het snel onder controle krijgen van een infectie. Ook zorgt het ervoor dat de ontstekingsreactie die bij een infectie optreedt en die veel van de nare symptomen veroorzaakt, wordt geremd.

Kan vitamine D ook helpen tegen het coronavirus? Over het specifieke effect tegen Covid-19 bestaat nog wat onduidelijkheid. In een recente meta-analyse werden de resultaten van verschillende onderzoeken naar vitamine D en Covid-19 op een rijtje gezet. Sommige studies met relatief weinig bewijskracht wezen al eerder op een weerstand verhogend effect van vitamine D-tabletten tegen virale luchtweginfecties, maar dit wil niet zeggen dat het slikken van vitamine D de oorzaak was dat iemand minder bevattelijk was. Verder bleek dat mensen die met Covid-19 in het ziekenhuis waren opgenomen, twee keer zoveel kans hadden om te overlijden als ze een vitamine D-tekort hadden. Dat tekort hoeft echter niet de oorzaak te zijn van de grotere overlijdenskans. Er kan een derde factor in het spel zijn die zowel het vitamine D-tekort als de verhoogde vatbaarheid voor het virus veroorzaakt; obesitas bijvoorbeeld, want vitamine D wordt opgeslagen in vetweefsel. Hoe meer vet iemand heeft, hoe meer vitamine D die persoon moet innemen om het gehalte op peil te houden.

Voor een overtuigend bewijs is er medisch onderzoek nodig waarbij de helft van de mensen met Covid-19 een vitamine D-supplement krijgt en de andere helft niet. Na de studie moet er een substantieel verschil te bespeuren zijn in overleving of

snelle genezing. In augustus 2020 is een dergelijk onderzoek verricht in Spanje. Dit was een klein verkennend onderzoek met 76 patiënten; voor overtuigend bewijs is een grotere groep nodig. Dergelijk onderzoek is tot nu toe nog niet verricht. Zodoende kwam ook de Gezondheidsraad in maart 2021 in een rapport over de preventieve werking van vitamine D bij Covid-19 tot de conclusie dat er te weinig onderzoek van voldoende kwaliteit beschikbaar is om dat aan te raden.

Gezien het algemene effect van vitamine D op het afweersysteem lijkt het in tijden van Covid-19 of andere pandemische infecties voor iedereen raadzaam om in ieder geval voldoende vitamine D in het lichaam te hebben om mogelijk de mate en de ernst van een infectie bij besmetting te verminderen. Sommige wetenschappers pleiten zelfs voor het uit voorzorg slikken van vitamine D en niet te wachten tot er een absoluut bewijs is dat vitamine D een rol speelt in preventie van Covid-19.

## Veroudering van de huid

**Dat de mens veroudert, is genetisch bepaald. Dit is een intrinsiek proces. Allerlei uitwendige factoren, zoals zonlicht, doen daar voor de huid nog een schepje bovenop. Maar aan die 'extrinsieke veroudering' is wel iets te doen.**



### Uv-straling veroorzaakt DNA-beschadigingen in huidcellen

**B**IJ INTRINSIEKE veroudering van de huid schieten de regulatie- en reparatiemechanismen van het beschadigde DNA tekort, die ook een rol spelen bij het ontstaan van huidkanker. Bij extrinsieke veroudering zijn er ook schadelijke effecten, zoals van ultraviolette straling, op het netwerk van eiwitten – de collageen- en elastinevezels – in de lederhuid die veroudering veroorzaken. Zo worden er onder invloed van uv-A ongewenste kruisverbindingen tussen collageenvezels gevormd. Ook onder invloed van uv-B komen enzymen (matrix-metalloproteïnases) vrij die de componenten van het eiwitnetwerk gaan oplossen. Verder treden er door uv-straling in huidcellen versneld DNA-schade en zelfs chromosoombreuken op.

#### Beschermende telomeren en antioxidanten

In de kern van elke lichaamscel, of het nou een geslachtscel, hersencel of huidcel is, bevinden zich dezelfde chromosomen met hetzelfde genetische materiaal (DNA). Er zijn speciale DNA-fragmenten en bijbehorende eiwitten die het chromosoom beschermen tegen afbraak en invloeden van buitenaf en daarmee verouderingsprocessen tegen gaan. Die DNA-fragmenten, telomeren genoemd, bevinden zich aan de uiteinden van de chromosomen. Zij bepalen theoretisch het maximale aantal delingen en daarmee de leeftijd die de cel kan bereiken (*Hayflick limit*).

DNA-beschadigingen in huidcellen veroorzaakt door uv-straling leiden tot foutieve aflezingen van eiwitten waardoor in de huid allerlei defecten optreden, zoals dunnere huid, pigmentvershui-



## Hoe korter de golflengte van uv-straling, hoe schadelijker voor de cel

vingen en actinische keratosen. Door verkorting van de telomeren en het verlies van het vermogen tot deling waarbij de verouderde cel wel aanwezig blijft – de cel is dan in ‘senescence’ – zal een huidcel geen plaats maken voor een nieuwe delende cel en niet meer bijdragen aan de vernieuwing van het weefsel. De vernieuwing van het weefsel stagneert en degenereert alleen nog maar. Senescente cellen verdwijnen dus niet en worden ook niet vervangen. Dode cellen wel.

Bij intrinsieke veroudering gaat het uiteindelijk om het vermogen van het lichaam om zich te beschermen tegen agressieve moleculen die het DNA kunnen beschadigen, zoals vrije zuurstof-radicalen. Er zijn bijvoorbeeld enzymen met een beschermende werking tegen vrije zuurstofradicalen, zoals antioxidanten. Melanine hoort daar ook bij. Deze vrije-radicalenvangers kunnen op de celmembranen zitten (vitamine A en vitamine E) of los in de cel (vitamine C). In enkele verouderingssyndromen met specifieke afwijkingen van de genen, zoals bij de ziekte progeria, treedt een versnelde veroudering op.

### Omgevingsfactoren

In de praktijk zijn intrinsieke en extrinsieke mechanismen van veroudering vaak moeilijk van elkaar te scheiden, zeker in de huid. De huid vormt immers de grens tussen de binnenkant en de buitenwereld en is meer dan andere organen blootgesteld aan factoren uit de omgeving, en daardoor gevoeliger voor extrinsieke veroudering.

De extrinsieke veroudering van de huid bestaat uit de zich over de jaren heen opstapelende inwerkende veranderingen als gevolg van allerlei omgevingsfactoren, zoals roken, blootstelling aan toxische stoffen en klimatologische omstandigheden (hitte, wind). Daarnaast spelen voeding, lichaamsgewicht en hormonale veranderingen een rol.

De sterkste uitwendige factor is chronische blootstelling aan zonlicht: het effect van uv-straling op de huid is groter dan dat van alle andere factoren, inclusief de intrinsieke. Extrinsieke veroudering is daarom vooral toe te schrijven aan cumulatieve zonlichtblootstelling. De plekken waar dit het meest zichtbaar is, zijn het gelaat, de nek, de handruggen, de V van de hals, het kalende hoofd en de onderbenen.

### Schadelijke uv-straling

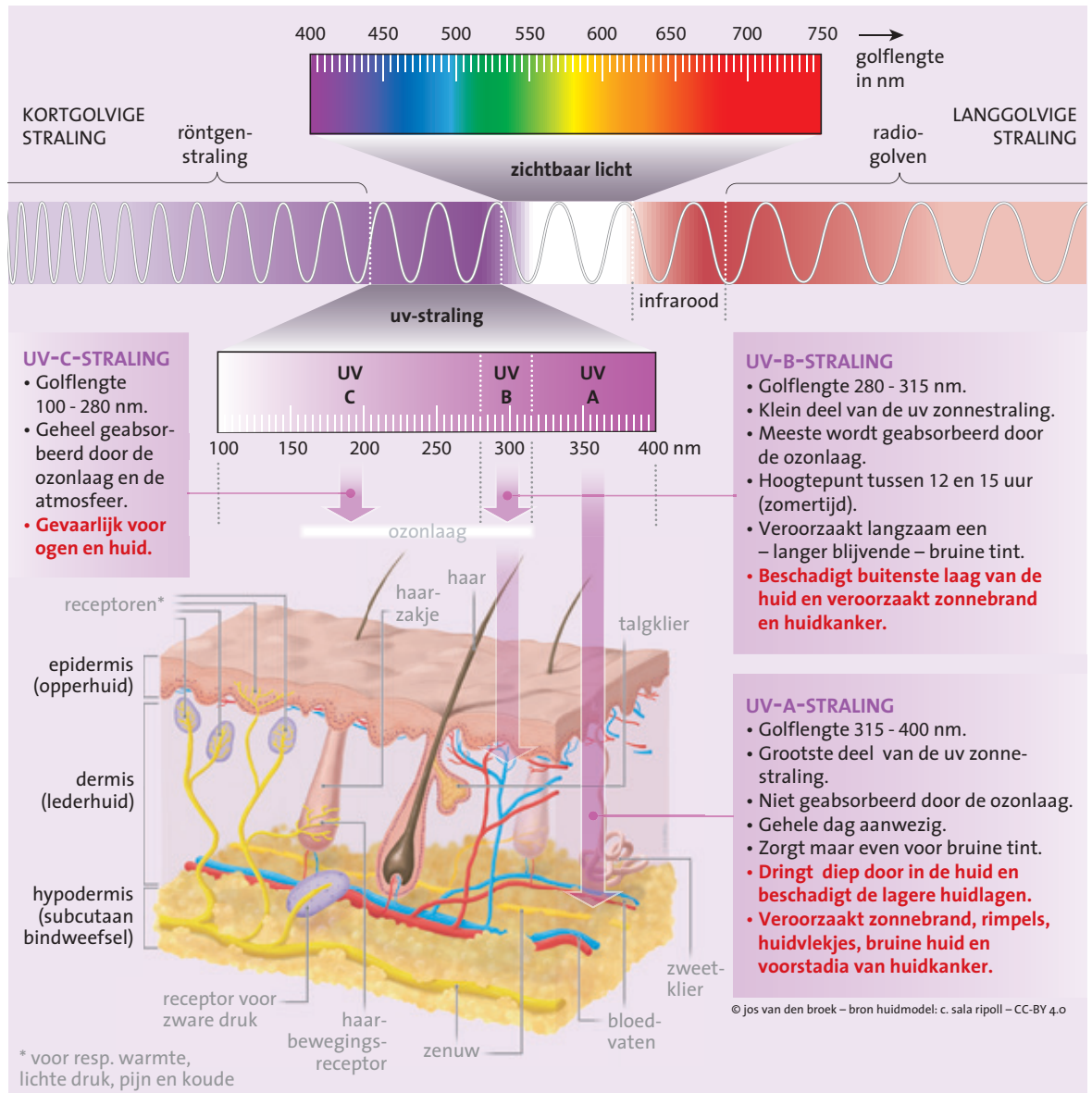
Ouder worden onder invloed van (zon)licht noemen we *solaire degeneratie* of *photo aging* in het Engels. Wanneer de huid door zonlicht is verouderd, is dat duidelijk te zien: de huid ziet er fijn tot grof gerimpeld uit terwijl de intrinsiek verouderde huid er filmachtig dun, transparant en fragiel uit ziet.

Zonlicht bestaat uit infrarood licht, zichtbaar licht en uv-straling. Hooguit 10% van de zonne-energie op het aardoppervlak is uv-licht, de rest zit in het infrarood en zichtbare licht, die samen de warmte bepalen die wij voelen. Het ultraviolette gedeelte wordt, afhankelijk van de golflengte, in drie soorten onderverdeeld: direct naast het violet in het zichtbare deel van het zonlicht volgt het uv-A (315-400 nm), dan uv-B (280-315 nm) en uv-C (280-100 nm).

Hoe korter de golflengte van de ultraviolette straling, hoe schadelijker het is voor een onbeschermde cel. Op het aardoppervlak bestaat de ultraviolette stralingsenergie voor meer dan 95% uit uv-A en voor een klein deel uv-B. Uv-C wordt volledig uit het zonlicht gefilterd door de ozonlaag in de stratosfeer hoog boven het aardoppervlak.

Uv-B dringt minder diep in de huid door dan uv-A, maar is als veroorzaker van zonnebrand (zonkracht) en risico op huidkanker veel belangrijker. Uv-A-straling kan dezelfde negatieve effecten veroorzaken, maar daarvoor is een grotere stralingsdosis nodig. Zowel uv-B als uv-A-stralen werken in op de pigmentcellen van de huid, waardoor men

Een doorsnede van de huid en de invloed van ultraviolette straling. Hoe korter de golflengte van de ultraviolette straling, hoe dieper het doordringt in de huid en hoe schadelijker het is voor de onbeschermde cellen.



bruin wordt. Via omliggende huidcellen activeert uv-B straling de melanocyten, die vervolgens het pigment, melanine, produceren. Uv-A verdonkert het pigment. Om die reden zijn zonnebanken vaak uitgerust met uv-A lampen, waarin ook 1 à 2% uv-B

zit. Door een directe schadelijke werking op de lederhuid (dermis) levert uv-A een belangrijke bijdrage aan huidveroudering en dus aan rimpels. Uv-A-straling lijkt ook minder onschuldig dan vroeger werd aangenomen. Zeker op de lange

Ouderdomsvlekken op de handen van een Aziatische oudere man. Deze bruine, grijze of zwarte vlekken worden ook wel levervlekken of zonnevlekken genoemd.



termijn, omdat de straling dieper doordringt dan uv-B, en schade toebrengt aan allerlei moleculen die dieper in de huid liggen.

### Wat zijn de effecten van ultraviolette straling?

Overmatige blootstelling aan ultraviolette straling leidt ertoe dat de lederhuid zijn elastische structuur verliest. Het regelmatige patroon van collageen- en elastinevezels in de lederhuid wordt geleidelijk aan vervangen door onregelmatig verdikte en gefragmenteerde vezels die uiteindelijk overgaan in een vormloos kluwen van draderige en draadloze structuren. Deze huidstructuur wordt *solaire elastose* genoemd.

Er bestaan verschillende theorieën over de vorming van deze structuren, maar de samenstelling en exacte oorzaak van dit 'elastotische materiaal' is nog niet volledig opgehelderd. Waarschijnlijk spelen enzymen zoals elastases en collagenases, die de afbraak van elastine- en collageenvezels in gang zetten, een belangrijke rol. Ook zuurstofradicalen en kruisverbindingen tussen collageenvezels

veroorzaakt door uv-straling dragen bij aan de vorming van deze structuren.

Solaire elastose komt zichtbaar vooral voor in het gelaat en de nek, met name rond de mond en langs sommige lijnen op de wangen, en gaat gepaard met een typische, gele verkleuring en verdikking van de huid met grillig gevormde witte streepjes en rimpels. Een ander effect van ultraviolette straling op de lederhuid is dat er adertjes, zogenoemde teleangiëctasieën, ontstaan.

Overmatige blootstelling aan ultraviolette straling heeft ook een negatief effect op de opperhuid dat zich uit in wisselende pigmentatie en ruwe plekjes (actinische keratosen). Een bekend voorbeeld van wisselende pigmentatie zijn de bekende 'levervlekken' met in de huidcellen ophopingen van lipofuscine, fijne geelbruine pigmentkorrels bestaande uit onvoldoende verteerde lipidenresten in de cel. Een droge, verdikte, rimpelige huid met vlekkerige pigmentaties en verwijde bloedvaatjes wordt ook wel zeemanshuid genoemd.

# Huidkanker

**De meeste mensen schrikken als ze horen dat ze huidkanker hebben. Dat is heel begrijpelijk. 'Kanker' is een diagnose die men liever niet te horen krijgt. Het maakt wel heel veel uit om wat voor soort huidkanker het gaat.**

**E**R ZIJN verschillende vormen van huidkanker: alles bij elkaar wel meer dan vijftig. De meeste kankers zijn echter zeldzaam. De drie veelvoorkomende vormen van huidkanker (zie kader) komen zo vaak voor dat huidartsen spreken van de *the big three*. Deze huidkankers komen voort uit de opperhuid (epidermis), dat is de bovenste 0,1 millimeter dikke huidlaag.

Het melanoom ontstaat uit de pigmentvormende cellen (de melanocyten), het basaalcelcarcinoom uit epidermale aanhangsels zoals haarzakjes, en het plaveiselcelcarcinoom uit de basale laag van de epidermis. Jaarlijks sterven er ruim 900 mensen aan huidkanker, voornamelijk vanwege melanomen.

De meeste (dunne) melanomen (>90%) zijn goed te behandelen. Hoewel de sterfte aan een basaalcelcarcinoom of plaveiselcelcarcinoom veel lager is, is een tijdige en goede behandeling van groot belang. Bij doorgroei kunnen deze beide kankertypen plaatselijk veel schade aanrichten, waarbij een plaveiselcelcarcinoom ook nog eens kan uitzaaien.

## Relatie met zonlicht

Voor het ontstaan van een basaalcelcarcinoom en een plaveiselcelcarcinoom is blootstelling aan zonlicht de belangrijkste risicofactor. De gevoeligheid hiervoor is afhankelijk van het huidtype (zie infografic huidtypen, zie blz 63) en genetische aanleg. De combinatie van deze factoren met de daadwerkelijke zonblootstelling bepaalt of iemand huidkanker krijgt of niet. Zo is bij iemand met huidtype 1 die 'nooit' in de zon komt en daardoor

dus niet verbrandt, de kans op het krijgen van huidkanker klein. En kan iemand met een donkere huid (huidtype 3 of 4), die dertig jaar buiten in de bouw heeft gewerkt, wel huidkanker krijgen. In sommige families komt huidkanker veel vaker voor dan in andere families, terwijl huidtype en zongedrag niet veel lijken te verschillen.

Van een groot aantal genen die celdeling aanzwengelen of controleren, is bekend dat zij betrokken zijn bij het ontwikkelen van huidkanker. Wanneer die genen ontregeld raken door een mutatie, drijven ze een cel richting kanker. Dat geldt voor de genen die celdeling bevorderen (de oncogenen) en genen die celdeling niet meer kunnen afremmen (de suppressorgenen). Van mensen ouder dan 55 jaar bevat minimaal een kwart van alle huidcellen in de zonbeschenen huid een mutatie in een van 74 onco- of suppressorgenen: de drijfvergenen.

Eén mutatie is niet voldoende voor een normale (huid)cel om in een kankercel te veranderen. Wel geeft zo'n mutatie in een drijfvergen de cel vaak een klein voordeel bij de celdeling. Zo ontstaan klontjes van cellen met dezelfde mutatie, waardoor de kans op een tweede mutatie in een al gemuteerde cel toeneemt. Hoe meer mutaties, hoe groter de kans op kanker.

Ultraviolette straling zorgt continu voor beschadigingen waardoor steeds weer nieuwe mutaties optreden. Gelukkig zijn de cellen van de opperhuid uitgerust met een speciaal reparatiesysteem om deze schade aan het erfelijk materiaal in de celkern te herstellen. Dit vermogen tot herstel neemt echter af met de leeftijd. Als dat mechanisme tekortschiet, kan na verloop van tijd huidkanker ontstaan. De schade aan de huid wordt pas na een periode van tientallen jaren zichtbaar.

Voor een melanoom is de relatie met blootstelling aan ultraviolette straling minder duidelijk dan voor een plaveiselcelcarcinoom en een basaalcelcarcinoom. Wel is er een duidelijke relatie met verbranding door zonlicht (vooral op jonge



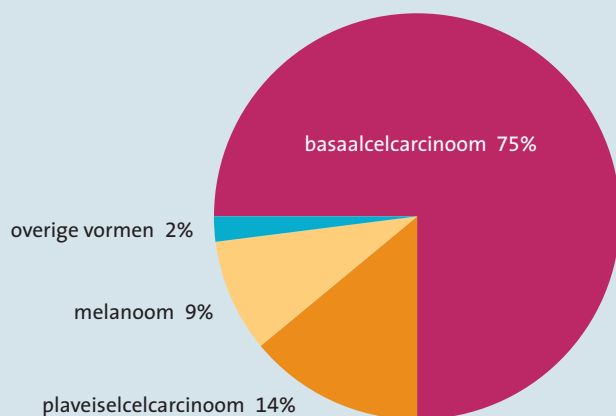
**Het vermogen tot herstel van DNA-mutaties neemt af met de leeftijd**

## Toename van huidkanker onder zonzonabidders

Huidkanker is de meest voorkomende soort kanker in Nederland met ruim 70.000 nieuwe gevallen per jaar – minstens viermaal zoveel als 25 jaar geleden. Dit betreft in 75% een basaalcelcarcinoom (circa 50.000), 9% (7-8000) een melanoom en 14% (13-14.000) een plaveiselcelcarcinoom. Eén op de vijf Nederlanders krijgt tijdens zijn of haar leven een vorm van huidkanker. In het laatste decennium nam het aantal

patiënten met deze diagnose, afhankelijk van het type huidkanker, toe met ongeveer 5 tot 9% per jaar. Daarmee is huidkanker de snelste stijger van alle vormen van kanker. Het RIVM verwacht dat deze trend zich nog verder doorzet. De belangrijkste oorzaak is waarschijnlijk het zonminnende gedrag van mensen: we lagen de laatste decennia steeds langer en vaker in de zon.

Huidkankertypen



leeftijd), zonnebankgebruik (vooral door mensen jonger dan 35 jaar) en het hebben van een lichte huid met veel sproeten en licht of rossig haar. Daarnaast maakt het ook uit of men een groot aantal (meer dan 100) onrustige moedervlekken heeft, die ongelijkmatig van vorm, formaat en kleur zijn (klinisch atypisch). Iemand die tot een familie behoort waarin dit voorkomt, heeft een vergrote kans om een melanoom te krijgen. Zeker wanneer er nog een ander familielid is met een melanoom.

## Behandeling

Huidkanker is over het algemeen goed te behandelen, als men maar op tijd aan de bel trekt. Bij een basaalcelcarcinoom gaat de voorkeur gewoonlijk uit naar wegsnijden onder plaatselijke verdoving. Dit is echter afhankelijk van het type en de locatie. Om zeker te zijn dat men de tumor in zijn geheel verwijdert, neemt men als veiligheidsmarge een deel van de gezonde huid mee. Sommige basaalcelcarcinomen groeien sprieterig en ook verder de huid in. Die uitlopers kunnen met het routineonderzoek onder de microscoop worden gemist. Voor sprieterige basaalcelcarcinomen in het gezicht is jaren geleden een speciale techniek ontwikkeld, de zogenoemde Mohs' micrografische chirurgie, waarbij alle snijranden worden beoordeeld. Dit gebeurt direct aan de hand van vriescoupes tijdens de operatie: het weggenomen weefsel wordt meteen diep gevoren waardoor ultradunne plakjes huid kunnen worden gesneden die ook meteen onder de microscoop worden beoordeeld. Behalve dat dit nauwkeuriger is dan het huidige routineonderzoek, biedt dit ook de mogelijkheid om minder gezonde huid weg te nemen, waardoor de uiteindelijke wond kleiner is. Dit komt vaak ten goede aan het cosmetische resultaat. Bij een oppervlakkig groeiend basaalcelcarcinoom kan men ook kiezen voor niet invasieve behandeling, zoals met de immuniteit opwekkende crème imiquimod of met fotodynamische therapie.

Een plaveiselcelcarcinoom is minder onschuldig dan een basaalcelcarcinoom. Deze tumor kan wel uitzaaien. Het is dan ook zaak er op tijd bij te zijn, want bij tijdige herkenning is de prognose nog altijd zeer goed. Een plaveiselcelcarcinoom wordt gewoonlijk net als een basaalcelcarcinoom onder plaatselijke verdoving operatief verwijderd.

## Melanomen

Bij een melanoom wordt de kans op genezing in belangrijke mate bepaald door vroege herkenning



**Te lang in de zon zitten of geen zonnecrème gebruiken is niet alleen pijnlijk maar geeft ook huidschade en kans op huidkanker.**

en behandeling. Iedere moedervlek die groter wordt, jeukt, van kleur verandert, niet symmetrisch is in vorm (uitlopertjes!) of structuren en of bloedt, moet men wantrouwen. Zo'n moedervlek mag pas onschuldig worden genoemd als het tegendeel is bewezen, meestal door histopathologisch onderzoek, waarbij een weggesneden stukje weefsel onder de microscoop wordt beoordeeld.

Een melanoom stelt hoge eisen aan de behandeling. Als men deze vorm van huidkanker niet tijdig en adequaat behandelt, is er een grotere kans op uitzaaiing. Een voor melanoom verdachte 'moedervlek' snijdt men altijd onder plaatselijke verdoving weg met een marge van enkele millimeters omliggende huid. Soms is het nodig om na onderzoek van het weggesneden materiaal door de patholoog nog een tweede operatie te verrichten en nog meer ogenschijnlijk gezonde huid te verwijderen, omdat zich hier toch al (soms microscopisch onzichtbare) kwaadaardige cellen in kunnen bevinden.

Wanneer melanoomcellen via het bloed in andere organen terechtkomen, is de behandeling niet meer gericht op genezing, maar op verbete-

ring van de kwaliteit van leven of levensverlenging. Er kan dan worden gekozen tussen radiotherapie, chemotherapie, doelgerichte (gen)therapie of immunotherapie, afhankelijk van de plek en de uitbreiding van de uitzaaiing. De afgelopen jaren is er veel vooruitgang geboekt in behandeling met immuuntherapie en doelgerichte (gen)therapie. Deze levensverlengende behandelingen hebben de prognose sterk verbeterd en worden gegeven in gespecialiseerde melanoomcentra en ziekenhuizen.

# Zonne(god)aanbidders

ASTRID VAN DE GRAAF

**De zon gaat op, de zon gaat onder. Voor vroegere culturen was dat al voldoende om de zon als een god te aanbidden. De huidige zonneaanbidders zoeken voor warmte, licht of een bruinkleurtje de zon op.**

**W**E HEBBEN veel aan de zon te danken. Al het leven op aarde is direct of indirect afhankelijk van de zon (zie hoofdstuk 2). Volgens sommigen vindt zelfs het christendom zijn oorsprong bij de zon. In het dagblad Trouw (2015) vertelt de van huis uit hervormde predikant Edward van der Kaaij over zijn nieuwe inzicht dat Jezus van Nazareth in werkelijkheid nooit heeft geleefd en dat het christendom een uitgevonden religie was. “Alle elementen uit het verhaal van Jezus vinden hun oorsprong in het oude Egypte. Daar komt de oermythe vandaan van een God (Osiris) die mens wordt, van sterven en opstaan, van geboren worden uit een maagd.” En die mythe grijpt weer

terug op een nóg veel ouder archetype: de zon die elke dag opkomt en ondergaat. Dat wordt in veel religies, ook in het oude Egypte, gezien als God die naar de onderwereld gaat en daar ‘s morgens weer uit oprijst.

## Zonnecultus in verleden

Uit het oude Egypte zijn verschillende verklaringen bewaard gebleven voor het ontstaan van het universum. Elk belangrijk godsdienstcentrum had daar zo zijn eigen versie van, maar steeds lag aan die scheppingsmythen hetzelfde principe ten grondslag: orde die geschapen wordt uit chaos. Een toestand van ‘oerwater’ werd gebruikt om de chaos te symboliseren. Uit het oerwater rijst een heuvel op met daarop een zonnegod. Die gebeurtenissen vormen een afspiegeling van de jaarlijkse overstroming van de Nijl en het terugtrekken van het water, waarna er een dikke laag slibafzetting achterblijft. Dat slib is vruchtbaar, maar er is wel zon bij nodig om er iets op te laten groeien.

In veel oude culturen was men zich bewust van de zon, niet alleen in Egypte. De aanbidding van de zon was niet alleen gebruikelijk bij Afrikaanse en Indo-Europese culturen. De aanbidding van de hemel en zon, ook wel religieuze kosmologie genoemd, wordt gezien als een van de oudste vormen van religie in China. De zonnegod Inti was een van de belangrijkste goden in de religie van de Inca's in het huidige Peru.

Er zijn talloze vindplaatsen van een zonnecultus dichterbij huis, zoals het beroemde Stonehenge in Zuid-Engeland, een megalithisch monument uit de Jonge Steentijd. In de omgeving van Stonehenge

Tempel van Taffeh in het Rijksmuseum voor Oudheden in Leiden. Oude culturen zoals de Egyptenaren hechtten groot belang aan hemellichamen. Deze jaar oude tempel telt bevat bijna honderd afbeeldingen van zonnen, de meeste op de kop van een cobra: de uraeusslang. Deze wordt gezien als de vrouwelijke tegenhanger van de zonnegod Ra. In de centrale gevleugelde zonnescijven staan de vleugels voor de hemel en de slangen aan weerszijden voor respectievelijk Opper- en Neder-Egypte.



Een Inca aanbidt de zon tijdens de Inti Raymi, het festival van de zon, in Cusco in Peru.



zijn de laatste decennia nog een aantal opgravingen gedaan, onder andere op drie kilometer van Stonehenge bij Durrington. Ook daar bevindt zich een grote neolithische nederzetting met een *henge*-omheining. De positionering van de zonsondergang en zonsopkomst op midzomer en midwinter is tegenovergesteld aan die bij Stonehenge en doet vermoeden dat er processies waren van de ene cirkel naar de andere tijdens de viering van de zonneden. Volgens Michael Parker Pearson, een Engelse archeoloog die veel onderzoek heeft gedaan naar neolithische nederzettingen, zou de cirkel in Durrington verwijzen naar een land van de levenden en die van Stonehenge naar het land van de doden.

### Zonnecultus in heden

Het woord gezondheid, dat in zijn oorsprong niet meer is dan een verwijzing dat men enige tijd in de zon heeft doorgebracht, is een uiting van de helende werking en leven schenkende kracht van het zonlicht. Dat werd in het begin van de twintigste eeuw ook wetenschappelijk vastgesteld. In de negentiende eeuw was bij blauw bloed een bleke huid nog het schoonheidsideaal, waardoor veel mensen leden aan de gevolgen van vitamine D-gebrek. Dat veranderde drastisch toen de Duitse kinderarts Kurt Huldshinsky in 1919 aantoonde dat de Engelse ziekte of rachitis met ultraviolet licht van een kwik-

damplamp te genezen was (zie hoofdstuk 4).

Geleidelijk aan kwam in de loop van de twintigste eeuw steeds meer huid ontbloot en werden buitenactiviteiten zoals fietsen, tennissen en strandbezoek betaalbare en geliefde vrijetijdsbestedingen. Een gebruinde huid werd door alle lagen van de bevolking gezien als een teken van welvarendheid en succes. Het is niet verwonderlijk dat men in die tijd ook de nadelige effecten van zonlicht ontdekte. Maar de trek naar meer frisse lucht, lichaamsbeweging en blootstelling aan zonlicht was inmiddels breed in gang gezet en niet meer te stoppen, gezien de talrijke aanbiedingen voor bakvakanties aan tropische stranden, zonnerizen naar verre oorden en het bestaan van vele zonnebankcentra.

Kuren aan zee en in de bergen werden populair bij de gegoede klasse, kuren in een kuuroord had vooral een medisch doel. Zo ook het Nederlandse kuuroord in Davos, waar men eerst voor tuberculose terechtkon, later voor astma en eczeem. Het bestaat nog steeds. De website van het Nederlands Astmacentrum Davos meldt hoopvol weer zorg voor astmapatiënten te kunnen aanbieden. Bekende kuuroorden in Nederland zijn in Nieuweschans en in het buitenland Ein Bokek bij de Dode Zee in Israël en Bad Bentheim in Duitsland. De behandeling bestaat vaak uit een combinatie van baden en uv-licht.

Met de komst van de 'beautyfarms' kreeg het kuren een meer preventieve functie. Kuuroorden zijn nu centra voor gezondheid, schoonheid en geestelijke ontspanning. De zon doet nog wel mee, maar staat iets minder centraal.

# Bescherming tegen zonlicht

**Wie huidveroudering wil tegengaan, doet er verstandig aan op jonge leeftijd al zo veel mogelijk de zon te mijden of zich goed te beschermen tegen te veel ultraviolette straling. Dat is best een lastige opgave, wanneer een bruine huid nog steeds als gezondheid wordt gezien.**

**H**ET IS al weer meer dan honderd jaar geleden dat men zich bewust werd van de nadelige effecten van zonlicht. Maar de trek naar het strand en de bergen voor ontspanning was reeds in volle gang en niet meer te stoppen. Kuren aan zee en in de bergen werden populair bij de gegoede klasse. In de loop der tijd werden deze oorden omgetoverd tot gezondheidscentra. Later kon men daar ook terecht voor schoonheidsbehandelingen en geestelijke ontspanning.

Sinds de jaren tachtig is er een tegenbeweging actief, aangewakkerd door onderzoeksresultaten uit Australië en de Verenigde Staten, waar de toename van huidkanker en huidveroudering onmiskenbaar samenhang met toegenomen blootstelling aan zonlicht. In de jaren negentig startte het Koningin Wilhelmina Fonds (KWF) de campagne 'Kijk uit voor je huid' met als belangrijkste doel om kinderen tussen 11.00 en 15.00 uur uit de zon te houden. Die aandacht ebde na jaren weer weg.

Inmiddels is iedereen het erover eens dat te weinig en te veel zon niet gezond is. Hoeveel zon goed of slecht voor iemand is, verschilt van persoon tot persoon. Dat hangt af van veel factoren, zoals zonkracht (seizoen, wolken, moment van de dag), leeftijd, huidskleur en kleding. Iemand die de hele zomer gesluierd over straat loopt, komt echt vitamine D te kort. Een roodharige stratenmaker die de hele zomer met een bloot bovenlijf rondloopt 'vraagt' om huidkanker.

## Wennen aan de zon

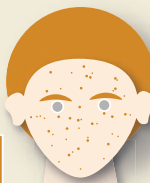
Na de winterperiode is de huid nog niet gewend aan ultraviolette straling. Maar in het voorjaar is de zonkracht lager dan in de zomer. Door nu de huid geleidelijk aan de zon bloot te stellen, treedt gewenning op. Dit is een natuurlijk proces waardoor iemand steeds beter tegen ultraviolette straling kan zonder te 'verbranden'. Pigmentvormende cellen maken melanine, dat rondom de celkernen van huidcellen gaat zitten en de energie van uv-straling absorbeert en mogelijk nog belangrijker, de schadelijke (zuurstof)radicalen die uv-straling veroorzaakt, vangt. Daarnaast gaan de cellen in de basis van de opperhuid sneller delen, zodat die dikker wordt en de onderliggende cellen, inclusief de delende, beschermt tegen zonlicht.

In Nederland is op een onbewolkte zomerdag de zonkracht midden op de dag – rond half twee – het sterkst. De zon staat dan op het hoogste punt. De weg die de zonnestralen op dat moment door de atmosfeer afleggen is het kortst en de filtering het geringst. Bij zonkracht 3 kan een blootstelling van vijftientig minuten tot roodheid leiden bij een niet aan zonlicht gewende huid. Bij zonkracht 5 is dat twintig minuten en bij zonkracht 7 kun je al na vijftien minuten rood worden. Deze getallen zijn slechts een indicatie. Huidgedeelten en huidtypen verschillen sterk in gevoeligheid.

In Nederland is de zonkracht midden op een zomerse dag 6 à 7. Er zijn zeldzame uitschieters richting 8. Ter vergelijking: in Zuid-Frankrijk of Spanje bereikt de zonkracht maximale waarden rond de 10. In de vroege ochtend en de late namiddag daalt de zonkracht behoorlijk. Van oktober tot maart, als de zonkracht kleiner is dan 2 à 3, maakt de huid vrijwel geen vitamine D3 aan. Door de lage zonnestand blijft de zonkracht in de periode november tot januari zelfs beneden de 1.

De Fitzpatrick-indeling wordt gebruikt om een inschatting te maken van de gevoeligheid van de huid in termen van verbranding en bruinkleuring.

## FITZPATRICK HUIDTYPERING

**1**  zeer lichte huid; vaak sproeten; rood of lichtblond haar

**VERBRANDT ALTIJD; BRUINT NOOIT**

**2**  lichte huid; blond haar; grijze, groene of blauwe ogen

**VERBRANDT GEMAKKELIJK; BRUINT HEEL LICHT**

**3**  licht getinte huid; donkerblond tot bruin haar; vrij donkere ogen

**VERBRANDT SOMS EEN BEETJE; BRUINT GOED EN GELIJKMATIG**

**4**  meestal een getinte huid; donker haar; donkere ogen

**VERBRANDT ZELDEN EN MINIMAAL EN DAN ALLEEN HEEL LICHT; BRUINT SNEL EN GEMAKKELIJK**

**5**  donkere huid (Aziatische huid); donker tot zwart haar; donkere ogen

**VERBRANDT ZELDEN; BRUINT GEMAKKELIJK EN STERK**

**6**  zeer donkere huid (Afrikaanse – negroïde – huid); zwart haar; donkere ogen

**VERBRANDT NOOIT EN PIGMENTEERT GEMAKKELIJK DIEP BRUIN TOT ZWART**



Bij zonkracht 7 kan iemand met een lichte, nog niet aan zon gewende huid al na vijftien minuten rood worden

## Beschermingsfactor 50

De zonbeschermingsfactor – *sun protection factor*, SPF – is een maat die aangeeft hoe goed zonnebrandcrèmes en -lotions de ultraviolette straling tegenhouden en de huid beschermen tegen zonnebrand. Vroeger hielden de meeste zonnebrandcrèmes met name uv-B straling tegen, omdat deze straling verantwoordelijk is voor verbranding. Tegenwoordig worden ook ingrediënten toegevoegd die uv-A tegenhouden om de diepere huid te beschermen en schade aan de collageenvezels en dus huidveroudering te voorkomen.

SPF geeft aan hoeveel keer de zonkracht – de verbrandingssterkte van de zon – verzwakt wordt. Een SPF van 30 verzwakt een zonkracht van 6 tot zonkracht 0,2. Zonnebrandcrèmes worden op basis van deze SPF ingedeeld in verschillende klassen om de keus voor de consument te vereenvoudigen:

- lage beschermingsfactor: SPF 6 tot 10
- matige beschermingsfactor: SPF 15 tot 25
- hoge beschermingsfactor: SPF 30 tot 50
- zeer hoge beschermingsfactor: SPF 50+

Bij de voorgeschreven laagdikte blokkeert zonnebrandcrème met SPF 4, 75% van de zonnebranddosis aan ultraviolette stralen en laat 25% door. SPF 15 blokkeert ruim 93% en SPF 50 bijna 98%. Bij gemiddeld gebruik werkt een middel met SPF 30, dat 97% blokkeert, eigenlijk net zo goed als SPF 50.

Over het algemeen voegen hogere beschermingsfactoren dan 20 maar weinig toe in termen van bescherming tegen zonverbranding. Bij jonge kinderen met een heel blanke huid valt een beschermingsfactor van 30 te overwegen als er bovenmatige blootstelling aan zonlicht wordt verwacht. Dat geldt ook voor mensen met voor uv-gevoelige aandoeningen (zie BOX Ziekten die door zonlicht verbeteren en verergeren).

Bij mensen met een normale huid, met huidkanker of een verhoogde kans op huidkanker is een bescherming tegen zowel uv-A als uv-B gewenst.

De meeste gangbare zonnebrandcrèmes bevatten beide filters. Ook is het belangrijk dat zonnebrandcrèmes goed op de huid blijven zitten en waterresistent zijn.

### Vaak en veel smeren

In Nederland verbranden we niet zo snel door het dagelijkse doen en laten. Voor iemand met een

kantoorbaan die elke dag een kort lunchwandelingetje maakt, is smeren meestal niet nodig. Mensen die niet of onvoldoende buiten komen, moeten zich echter wel beschermen. Evenals mensen die bewust de zon opzoeken, op het water, het strand, in de wintersport of het hooggebergte.

Het is verstandig de crème steeds tijdig aan te brengen, bij voorkeur 30 minuten voor men naar

## Zonnebanken geven verhoogd risico op huidkanker

Zonlicht bestaat voor meer dan 95% uit uv-A-straling en voor een klein deel uit uv-B. Zonnebanken zenden eveneens vooral uv-A uit en een heel klein beetje uv-B. Het bruinen onder zonnebanken is daarom net als zonnebaden, voor iedereen schadelijk. Het leidt op de lange duur tot meer huidveroudering en een verhoogd risico op alle vormen van huidkanker.

Naar schatting zijn er 2950 'zonnepunten' in Nederland (stand 2015), waarvan 450 professionele zonnestudio's en 2500 zonneplekken bij ondernemers die het zonnen niet als kernactiviteit hebben, zoals fitnesscentra en zwembaden. Het aantal zonnebanken in particulier bezit is onbekend.

Het gebruik van zonnebanken is bij wet voor mensen verboden voor mensen jonger dan 18 jaar. Tot 2012 bestond hierop actief toezicht, met als resultaat een naleving van 85%. In 2013 werd dit vervangen door reactief toezicht: het aantal jongeren dat geweigerd werd, daalde naar 24%. Maar liefst 20% van de jongeren heeft geen kennis van het verhoogde

risico op huidkanker.

Uit Europees onderzoek blijkt dat in Nederland 40% van de zonnestudio's geen of onvoldoende advies geeft en dat 38% de klant niet voldoende informeert over de risico's. Bij fitnesscentra en zwembaden liggen die percentages nog hoger: respectievelijk 47% en 51%.

Wat vooral zorgen baart, is de behoefte aan een 'kleurtje', het liefst zo snel mogelijk. Dit leidt veelal tot verbrandingen en daarmee tot een verhoging van het risico op melano-

men. De Nederlandse Vereniging voor Dermatologie en Venereologie (NVDV) heeft de overheid aangesproken op zijn verantwoordelijkheid: meer controle op wettelijke voorschriften, toegangsbeperking voor jongeren en verplichte informatievoorziening. In het op 19 april 2021 gepubliceerde Nationaal Actieplan Huidkanker pleiten deskundigen ervoor op om zonnebanken accijns te gaan heffen.

**Het bruinen onder een zonnebank is net zo schadelijk als onder de zon.**





**De beschermende laag zonnebrandcrème slijt bij verblijf in de zon binnen een aantal uren weg. Het is daarom belangrijk om de huid regelmatig – om de twee uur – opnieuw in te smeren.**

buiten gaat. Dat is gunstig voor het intrekken en voor het niet wegwassen met zweet in de volle zon.

De meeste mensen smeren zich niet goed in. Het best beschermende effect wordt bereikt door de huid twee keer kort achter elkaar in te smeren, zodat zo alle plekken gelijkmatig bedekt worden met een dikke laag zonnebrandcrème. Een flesje of tube van 100 milliliter zou na driemaal over het hele lichaam aanbrengen leeg moeten zijn om de SPF waar te maken, maar in praktijk smeren we minder dan de helft van de benodigde hoeveelheid en daarmee is de werkelijke SPF veel lager. Een SPF 30 wordt bij de helft van de vereiste hoeveelheid een beschermingsfactor van circa 5,5 tot 10, wat nog steeds een goede bescherming geeft.

De beschermende laag zonnebrandcrème slijt bij verblijf in de zon binnen een aantal uren weg. Zweeten of wrijven langs kleding of een handdoek versnelt dit proces, evenals het liggen in zand en water. De *waterproof*-crèmes blijven weliswaar beter op de huid zitten na contact met water, maar toch blijft het zaak om de huid regelmatig – om de twee uur – opnieuw in te smeren. Bedekkende bad-

kleding of een T-shirt, is daarom vaak een betere oplossing tijdens het zwemmen op zomerse dagen. Kijk vooral uit met wintersport, mooie dagen in het voorjaar, zonvakanties, stranddagen en sportdagen.

### **Uit de zon**

De belangrijkste maatregel tegen huidveroudering en vermindering van risico op huidkanker is ongetwijfeld het vermijden van zonlicht. Wie op latere leeftijd een mooie huid wil hebben, moet daar op jonge leeftijd al rekening mee houden door zo veel mogelijk uit de zon te blijven. Dat is in onze huidige cultuur, waarbij een bruine huid nog steeds wordt geassocieerd met gezondheid, geen gemakkelijke opgave. Zonlicht totaal vermijden is niet haalbaar en zoals eerder gezegd, ook niet wenselijk.

Schaduw beschermt tegen de zon, maar niet voor 100%. Ruim 10 tot 20% van de straling wordt weerkaatst via muren en zand. Ook wolken reflecteren zonlicht. Op een zomerse dag komt meer dan 50% van de ultraviolette straling uit de blauwe lucht en niet direct van de zon zelf. Een parasol beschermt, maar houdt lang niet alle straling tegen als de blauwe hemel nog grotendeels zichtbaar is.

Kleding is over het algemeen dicht genoeg, laat weinig zonlicht door en hoeft niet vernieuwd te worden zoals een zonnebrandcrème. Elk kledingstuk heeft een eigen SPF; met waarden hoger dan 150 voor blauwe denim. Voor dunne witte T-shirts kan de SPF aanmerkelijk lager liggen: 4 tot 8, wat in Nederland nog altijd goede en vooral aanhoudende bescherming geeft. Is de kleding nat, dan kan deze ook weer wat meer ultraviolette straling doorlaten (variërend van 0-10%).

# Ziekten die door zonlicht verbeteren

Veel huidziekten kunnen verbeteren door zonlicht. Lichttherapie is een belangrijke behandelingsmogelijkheid van de dermatoloog voor huidziektes als psoriasis of bepaalde vormen van eczeem. Sommige huidziekten verergeren echter juist door zonlicht. Een bekend voorbeeld is lupus erythematoses (LE), een auto-immuunziekte waarbij rode, schilferende huidafwijkingen kunnen optreden.

## ZIEKTEN DIE VERBETEREN

### Psoriasis

Een bekende huidziekte die profijt kan hebben van zonlicht is psoriasis. Veel mensen met psoriasis ervaren dat hun plekken door de zon verminderen. Dat effect is vooral toe te schrijven aan uv-B. Vandaar dat men psoriasis ook wel met uv-B-lampen behandelt. Een psoriasispatiënt moet wel voorzichtig zijn met zon, een verbranding van de huid kan een averechts effect hebben.

### Uremische jeuk

Een andere groep patiënten die veel baat kan hebben bij lichttherapie zijn nierpatiënten die dialyse krijgen. Deze mensen hebben vaak veel jeuk die wordt veroorzaakt door het ophopen van afvalstoffen in het bloed zoals ureum. Men noemt dat 'uremische jeuk'. De jeuk is moeilijk te behandelen en sommige patiënten hebben baat bij speciale lotion of lichttherapie.

### Geelzucht

Bij pasgeborenen met geelzucht (*icterus neonatorum*) kan licht therapeutisch werken. Deze kinderen breken na de geboorte te veel rode bloedlichaampjes af, waardoor de afvalstof bilirubine vrijkomt en de huid van deze kinderen geel kleurt.



Lichttherapie is een behandeling voor (winter)depressie of huidziektes als psoriasis of eczeem.

Een veel te hoog bilirubinegehalte in het bloed kan hersenbeschadiging veroorzaken. Onder invloed van foterapie (violet/blauw licht) wordt bilirubine wateroplosbaar waardoor het in de lever beter wordt afgebroken en de hoeveelheid in het bloed daalt.

# of verergeren

## ZIEKTEN DIE VERERGEREN

### Porfyrie

Bij porfyrie kan blootstelling aan zonlicht de aandoening verergeren. Het hangt wel af van de vorm van porfyrie die iemand heeft of dat gebeurt. Porfyrie is namelijk niet één ziekte, maar een groep van minstens acht ziekten die erg van elkaar verschillen wat betreft ernst, soort klachten en behandeling. Een gemeenschappelijk kenmerk van alle porfyriën is dat het erfelijk is, waarbij diverse porfyрины (voorlopers van heem, als ijzerhoudende kleurstof in de rode bloedcellen) zich in organen en in kleine bloedvaatjes ophopen. Als dat in de huid gebeurt, spreekt men van een *cutane porfyrie*. Die vormen gaan gepaard met blaarvorming, jeuk en zonlichtovergevoeligheid. Zonlicht, het zichtbare deel van het spectrum, moet men dan zo veel mogelijk vermijden. Het dragen van een (donkere) zonnebril en bedekkende kleding kan huidklachten voorkomen.

### Zonneallergie

*Chronische polymorfe lichtdermatose* (CPLD) is de meest voorkomende huidziekte van mensen die ultraviolette straling niet goed kunnen verdragen, men noemt het wel 'zonneallergie'. Het begint meestal op jong volwassenleeftijd en wordt vooral veroorzaakt door uv-A-straling, maar soms ook door uv-B-straling. Wat men vaak ziet zijn sterk jeukende kleine bultjes op aan zonlicht blootgestelde delen van de huid. Over het algemeen wordt gedurende de zomer een uitdoving van de klachten gezien, terwijl het volgend jaar de klachten



Een Thaise man en een vrouw dragen overdag beschermende kleding tegen de zon.

opnieuw kunnen optreden. Er treedt blijkbaar een tijdelijke gewenning op.

### Lupus erythematoses

Een andere huidziekte die kan verergeren door zonlicht is *lupus erythematoses*, vaak afgekort als LE. Het is een auto-immuunziekte waarbij behalve de huid ook andere organen aangedaan kunnen zijn. Als het alleen de huid is, wordt het cutane LE genoemd. Als diverse organen zijn aangedaan wordt het *systemische lupus erythematoses* (SLE) genoemd. Dat kan een ernstige ziekte zijn met aantasting van nieren en gewrichten. Er zijn ook allerlei mengbeelden. Ook hierbij geldt: vermijd zoveel mogelijk blootstelling aan zonlicht als de ziekte hierdoor verergert, vooral vanwege de uv-B-straling.

5

# Zon en klimaat- verandering





## De zon als de motor van het klimaat op aarde

Veranderingen in de balans tussen inkomende zonnestraling en uitgaande infraroodstraling bepalen of de aarde opwarmt of afkoelt. Het effect van vulkaanuitbarstingen of wisselende zonneactiviteit middelt op een termijn van eeuwen uit. Maar door de uitstoot van broeikasgassen warmt het klimaat-systeem op en sneller dan ooit te voren.

ROB VAN DORLAND

De aarde warmt op. Dat is inmiddels een gegeven. De vraag is: heeft de activiteit van de zon invloed op deze klimaatverandering. En hoe groot is die bijdrage in vergelijking met het effect van de verhoogde concentratie aan broeikasgassen in de atmosfeer? De zon heeft in ieder geval invloed op het al of niet optreden van ijstijden, maar dat ligt aan de positie van de aarde ten opzichte van de zon en niet aan de zon zelf.

**D**E ZON vervult een cruciale rol in het klimaat op aarde. De absorptie van zonnestraling door de atmosfeer en door het aardoppervlak hebben daarbij de belangrijkste invloed. Zonder deze zonnestraling zou de aarde maar een levenloze bevroren planeet zijn in de ruimte, met een temperatuur van ongeveer min  $270^{\circ}\text{C}$ . Luchtstromingen in de atmosfeer worden voor een groot deel bepaald door de geografische verdeling van de geabsorbeerde zonnestraling en van de uitgaande infrarode warmtestraling van de aarde.

De dagelijkse hoeveelheid geabsorbeerde zonnestraling varieert van plaats tot plaats en van seizoen tot seizoen. Bij loodrechte inval bedraagt de zonne-energie aan de bovenkant van de atmosfeer zo'n 1361 watt per vierkante meter ( $\text{W}/\text{m}^2$ ). Gemiddeld genomen over dag en nacht is dit nog maar een kwart ( $340 \text{ W}/\text{m}^2$ ). Tijdens de reis door de atmosfeer wordt ongeveer een kwart van de zonne-energie geabsorbeerd door aanwezige gassen en een kwart wordt gereflecteerd, voornamelijk door wolken, rondzwevende vaste deeltjes (aerosolen) en door verstrooiing aan gassen. De hoeveelheid geabsorbeerde en gereflecteerde energie is echter sterk afhankelijk van de hoek van inval.

Aangekomen bij het aardoppervlak is iets meer dan de helft van de inkomende zonnestraling over. Deze energie bestaat uit directe zonnestraling en licht dat door de atmosfeer verstrooid is. Ook het

aardoppervlak reflecteert zonlicht: verse sneeuw reflecteert bijna alles en water vrijwel niets. En kale woestijngrond reflecteert weer meer dan bossen. Het resterende deel aan zonne-energie wordt geabsorbeerd door het aardoppervlak.

Van de binnenkomende zonnestraling wordt gemiddeld 30% gereflecteerd en 70% geabsorbeerd door het aardoppervlak en de atmosfeer. De geabsorbeerde zonne-energie, ongeveer  $240 \text{ W/m}^2$ , is de energietoevoer in het klimaatstelsel (zie figuur Energiehuishouding van het klimaatstelsel). Er zijn geen noemenswaardige andere energiebronnen. De aardwarmte, de geothermische energie die ontstaat door radioactief verval in het binnenste van de aarde, bedraagt gemiddeld  $0,04 \text{ W/m}^2$  en is daarmee verwaarloosbaar ten opzichte van de hoeveelheid energie die de zon levert.

#### Uitwisseling van straling

De gemiddelde temperatuur op aarde is ongeveer  $15^\circ\text{C}$ . Dit wordt voor een belangrijk deel bepaald door de intensiteit van de zonnestraling en door de hoeveelheid broeikasgassen in de atmosfeer. Uitwisseling van energie tussen onze planeet en de rest van het universum gebeurt alleen via elektromagnetische straling. De zon is hierbij dus de energiebron die het klimaatstelsel van kortgolelige zichtbare straling (zonlicht) voorziet. Nu zendt alle materie elektromagnetische straling uit, of het nu een vaste stof, vloeistof of gas is, en meer naarmate de temperatuur hoger is. De oppervlakte-temperatuur van de zon ligt dicht tegen de  $6000^\circ\text{C}$ . Dat de zonnestraling voor ons zichtbaar is komt omdat onze ogen de frequenties ervan als licht waarnemen.

De straling van het aardoppervlak kunnen we echter niet met onze ogen waarnemen. Die bevindt zich in het onzichtbare infrarode spectrum, maar we kunnen het wel voelen als warmte. Ook de straling afkomstig van de iets koelere atmosfeer ligt in het infrarode spectrum.

Broeikasgassen en wolken zijn in staat een aanzienlijk deel van de infrarode straling te absorberen en ook zelf weer uit te stralen. Slechts 10% van de warmtestraling afkomstig van het aardoppervlak verdwijnt ongehinderd de ruimte in via het meest transparante gedeelte van het spectrum, ook wel het *atmosferisch venster* genoemd. De rest, zo'n 90%, wordt geabsorbeerd door de atmosfeer (zie figuur Energiehuishouding van het klimaatstelsel). Broeikasgassen en wolken zenden op hun beurt ook infrarode straling uit. Door de hogere temperatuur van de atmosfeer nabij het aardoppervlak is de neerwaartse atmosferische straling aan de onderkant van de atmosfeer bijna anderhalf maal groter dan de opwaartse straling aan de top van de atmosfeer. De totale infrarode straling die de ruimte in verdwijnt ( $239 \text{ W/m}^2$ ) is gemiddeld over de aardbol en over het jaar nagenoeg in evenwicht met de geabsorbeerde zonnestraling ( $240 \text{ W/m}^2$ ).

Het ontbreken van een exact evenwicht tussen de netto inkomende zonne-energie en de uitgaande infrarode energie komt doordat energie ook tijdelijk kan worden opgeslagen. Met name de oceanen, die zo'n 70% van het aardoppervlak beslaan en gemiddeld vier kilometer diep zijn, hebben een enorme warmtecapaciteit. Volgens de wet van behoud van energie is de door de aarde geabsorbeerde zonne-energie gelijk aan de som van uitgestraalde infrarood-energie en de opgeslagen energie in het klimaatstelsel.

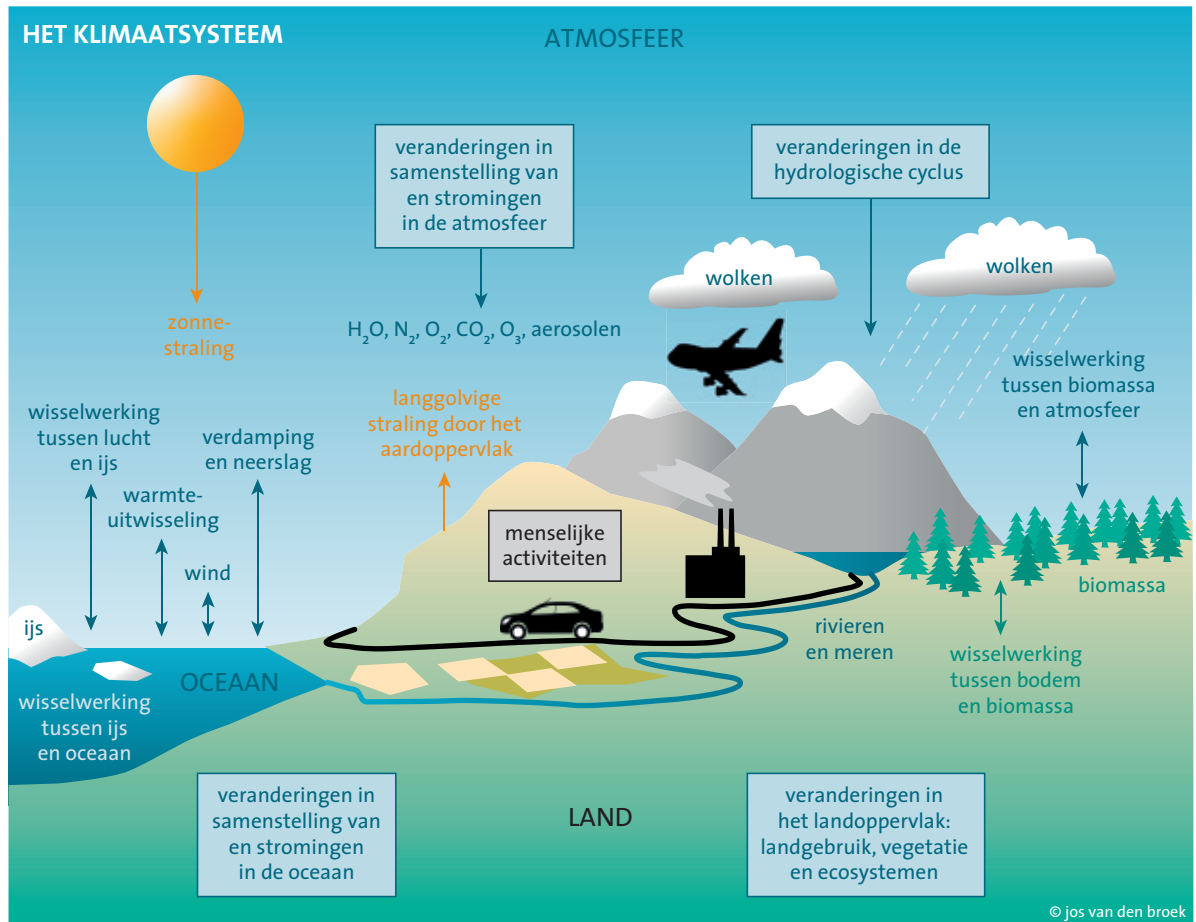
#### Energie-uitwisseling via warmtestromen

Behalve via straling vindt er tussen het aardoppervlak en de atmosfeer uitwisseling van energie plaats via latente en voelbare warmtestromen. Latente warmte is de hoeveelheid energie die nodig is om een stof van fase (gas, vast en vloeistof) te laten veranderen, zoals de verdamping en condensatie van water. Voor de verdamping van water wordt de energie onttrokken aan het aardoppervlak. De waterdamp wordt door menging in de



De zon is de energiebron die het klimaatstelsel van kortgolelige zichtbare straling voorziet

Het klimaatstelsel bestaat uit vijf componenten: de atmosfeer (lucht), de hydrosfeer (water), de cryosfeer (ijsbedekking en permafrost), de lithosfeer (landoppervlak) en de biosfeer (flora en fauna). Uitwisselingen vinden plaats door fysische, chemische en biologische processen. Onderdeel van deze uitwisselingen zijn de kringlopen, zoals de hydrologische en de koolstofkringloop. Verder vindt herverdeling van de toegevoerde energie plaats. Dit gaat gepaard met lucht- en oceaanstromingen en beïnvloed hiermee de temperatuur en neerslag op regionale schaal. Aan elkaar gekoppeld zorgen de componenten voor interne fluctuaties, die op tijdschalen van seizoenen tot millennia variaties teweegbrengen in de wereldgemiddelde temperatuur.

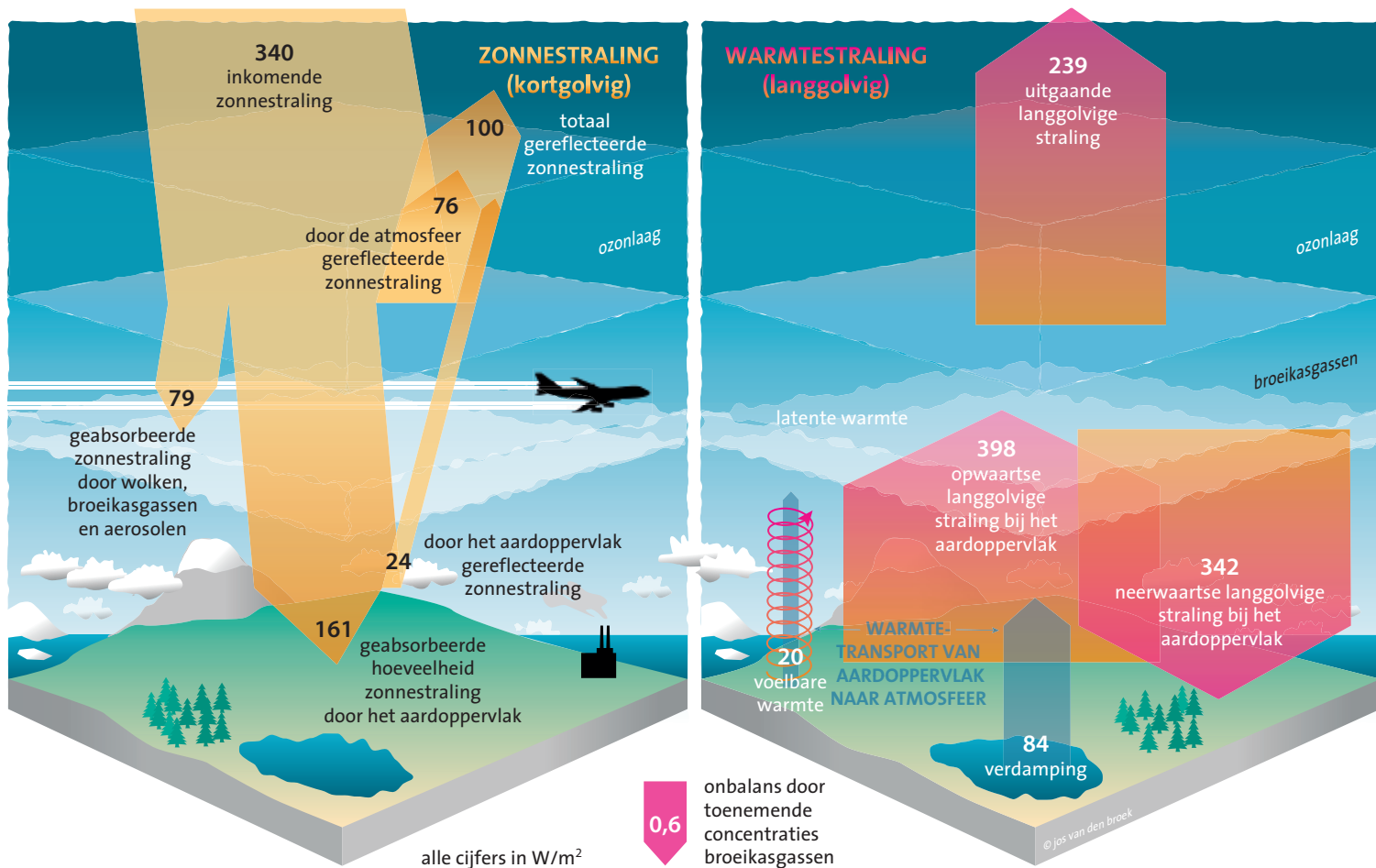


atmosfeer naar hogere koudere luchtlagen getransporteerd. Hier ontstaan wolken doordat de waterdamp tot druppels condenseert. Bij dit proces komt de latente warmte weer vrij. Wanneer dit water als regen of sneeuw weer terechtkomt op het aardoppervlak, heeft er dus een energietransport van het oppervlak naar de atmosfeer plaatsgevonden.

Verder ontstaat door de efficiënte absorptie van straling aan het aardoppervlak in het onderste gedeelte van de atmosfeer een sterke temperatuurgradiënt, waarbij de temperatuur afneemt met de hoogte. Dit veroorzaakt voelbare turbulente lichtbewegingen waarbij eveneens energietransport

van het aardoppervlak naar de atmosfeer plaatsvindt. Zweefvliegtuigen maken dankbaar gebruik van deze turbulenties; dit verschijnsel staat bekend als thermiek.

Zowel de latente als voelbare warmtestromen hebben over de hele aardbol een koelend effect op het aardoppervlak. Door deze warmtestromen is de luchtlaag die ons dagelijks weer bepaalt, de troposfeer, sterk gekoppeld aan het aardoppervlak. Deze 'weerlaag' is zo'n 13 kilometer hoog. Daarboven ligt de stratosfeer. Daar zijn het hoofdzakelijk stralingsprocessen die de dienst uitmaken in de energiehuishouding.



De energiehuishouding van het klimaatsysteem is opgebouwd uit zonnestraling, warmtestraling en warmte-transporten van aardoppervlak naar atmosfeer. De energiestromen zijn uitgedrukt in watt per vierkante meter ( $\text{W/m}^2$ ).

Broeikasgassen en wolken vervullen dus een essentiële rol in de energiehuishouding van het klimaatsysteem. De belangrijkste natuurlijke broeikasgassen zijn waterdamp ( $\text{H}_2\text{O}$ ), kooldioxide ( $\text{CO}_2$ ), ozon ( $\text{O}_3$ ), methaan ( $\text{CH}_4$ ) en lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Slechts één op de tweehonderd moleculen in de aardse atmosfeer is een broeikasmolecuul. Toch zorgen de broeikasgassen voor een temperatuur aan het aardoppervlak die circa  $33^\circ\text{C}$  hoger is dan een atmosfeer zonder deze gassen. Waterdamp heeft het grootste broeikaseffect, en neemt ruwweg  $18^\circ\text{C}$  temperatuurstijging voor zijn rekening. Op de tweede plaats staat kooldioxide. De sterkte

van de broeikaswerking is afhankelijk van het aantal moleculen, de verticale verdeling en de sterkte van de absorptiebanden (zie kader). Ook is er sprake van overlap van absorptiebanden, waardoor de broeikaswerking van het ene gas wordt beïnvloed door de concentratie van de andere broeikasgassen.

### Veranderingen in de energiehuishouding

Wijzigingen in de toevoer en afvoer van energie aan de bovenkant van onze atmosfeer bepalen het optreden van mondiale klimaatveranderingen. Er zijn drie energiestromen relevant: de binnenko-

mende zonnestraling, de gereflecteerde zonnestraling en de uitgaande langgolvlige warmtestraling.

Wanneer de toevoer van energie groter is dan de afvoer neemt de gemiddelde temperatuur op aarde toe, terwijl bij een grotere afvoer naar de ruimte de temperatuur van de aarde daalt. Maar de bufferende werking van de oceaan vertraagt deze temperatuurverandering sterk. Het verschil tussen energietoevoer en -afvoer wordt in vakjargon *stralingsforcering* genoemd.

#### *Effect van de zon*

De zon is geen constante energiebron, maar vertoont kleine variaties. Gedurende de ongeveer 11-jarige zonnevlekkencyclus (zie hoofdstuk 1) bedraagt het verschil in lichtkracht van de zon tussen de meest actieve fase met veel zonnevlekken en de rustige fase circa 0,1%. Vertaald naar de netto energietoevoer van de zon aan het klimaatstelsel bedraagt dit  $0,2 \text{ W/m}^2$ . Over een 11-jarige periode middelt dit effect uit.

Er bestaan ook langjarige cycli van zonneacti-

viteit zoals de quasi-periodieke Gleissbergcyclus van 80 tot 90 jaar. Verder zijn er langere periodes bekend van een zeer inactieve zon, zoals het Maunder Minimum (1645-1745), waarin nauwelijks zonnevlekken zichtbaar waren. De schatting van het verschil in energietoevoer tussen het Maunder Minimum en nu is  $0,08\text{-}0,18 \text{ W/m}^2$ .

#### *Effect van aerosolen en broeikasgassen*

Ook in de gereflecteerde zonnestraling door atmosfeer en aardoppervlak treden variaties op. Zo is de aerosolinhoud van de atmosfeer sinds het begin van de industriële revolutie toegenomen. Dit verhoogt de reflectie. Ook de bedekking door wolken varieert van dag tot dag, maar uit waarnemingen blijkt dat op jaarbasis de mondiale bedektingsgraad nagenoeg constant is. Veranderingen in ijs- en sneeuwbedekking en landgebruik hebben eveneens invloed op de hoeveelheid gereflecteerde zonnestraling.

Hogere concentraties broeikasgassen in de atmosfeer leiden tot een afname van de uitgaande infrarode straling naar de ruimte. Sinds het begin van de industriële revolutie nam de  $\text{CO}_2$  concentratie toe van 280 ppm (= aantal moleculen  $\text{CO}_2$  per miljoen moleculen lucht) vóór 1800 tot 412 ppm gemiddeld over het jaar 2020. De stijging wordt vooral veroorzaakt door de verbranding van fossiele brandstoffen, cementproductie en verandering in landgebruik. Andere menselijke activiteiten, zoals landbouw, veeteelt en gaswinning dragen bij aan de uitstoot van de broeikasgassen methaan en lachgas en via ingewikkelde chemische reacties tot de vorming van extra ozon nabij het aardoppervlak.

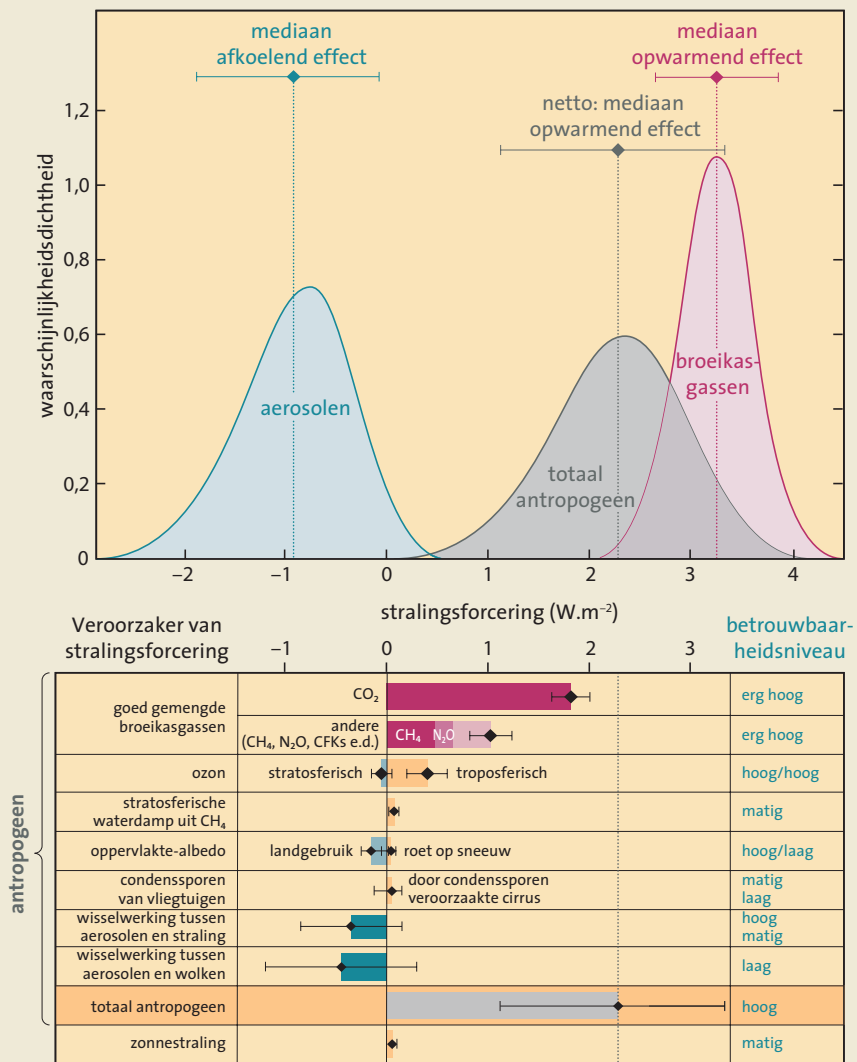
De totale stralingsforcering door de toename van broeikasgassen en aerosolen direct of indirect uitgestoten door menselijke activiteiten sinds de industriële revolutie tot 2011, het peiljaar in het laatste IPCC rapport, bedraagt  $2,3 \text{ W/m}^2$  (zie figuur Stralingsforcering).

## Broeikasgassen: absorptie van warmtestraling door gas

Gassen zoals stikstof, zuurstof of argon (edelgas) kunnen geen warmtestraling absorberen omdat ze geen absorptielijnen in het infraroodspectrum hebben, en dragen dus niet bij aan het broeikaseffect. Gasmoleculen zoals waterdamp, koolstofdioxide, lachgas en ozon hebben dat wel. De absorptielijnen in de infraroodspectra van gassen worden veroorzaakt door (rotatie)vibratieovergangen. Het energieverschil tussen die toestanden bepaalt de golflengte (in micrometer,  $\mu\text{m}$ ) van de geabsorbeerde warmtestraling.

Waterdamp absorbeert sterk in de banden 2,4-3,1  $\mu\text{m}$ , 4,5-6,5  $\mu\text{m}$  en boven de 16  $\mu\text{m}$ . Voor  $\text{CO}_2$  is de belangrijkste absorptieband gelegen bij 14-16  $\mu\text{m}$ , maar er zijn ook absorptiebanden bij 2,6  $\mu\text{m}$  en 4,2  $\mu\text{m}$ . Daar waar in het infrarode spectrum waterdamp en  $\text{CO}_2$  niet werkzaam zijn als absorptiemedium, zoals in de nabijheid van 10  $\mu\text{m}$  golflengte, ontsnapt langgolvlige straling ongehinderd de ruimte in. Het gebied van 8,5-13  $\mu\text{m}$  is het zogenoemde atmosferische venster.

## STRALINGSFORCERING TUSSEN 1750 EN 2011



Stralingsforcering sinds 1750, het begin van de industriële tijdperk. Boven: Waarschijnlijkheidsverdeling van de antropogene stralingsforcering door broeikasgassen, aerosolen en totaal in  $W/m^2$ . Deze verdelingen geven de onzekerheidsmarges weer: voor de stralingsforcering van goed gemengde broeikasgassen zoals CO<sub>2</sub>, is die marge ongeveer 10%, van aerosolen is de marge veel groter. Onder: Stralingsforcering, uitgesplitst voor diverse broeikasgassen en aerosolen. Bron: gebaseerd op figuur TS6 IPCC AR5 WGI, 2013.

## Temperatuurveranderingen op aarde

De waarde van de stralingsforcering is uiteindelijk bepalend voor het effect op de temperatuur op aarde (temperatuurrepons). Het maakt daarbij geen verschil of de zon extra energie (van bijvoorbeeld  $1 W/m^2$ ) toevoegt of dat broeikasgassen zorgen voor  $1 W/m^2$  minder uitgaande warmtestraling. In beide gevallen spreken we dan van een positieve stralingsforcering van  $1 W/m^2$ .

Het klimaatstelsel kan die extra energietoevoer compenseren door het aardoppervlak en de daaraan sterk gekoppelde troposfeer in temperatuur te laten stijgen. Hierdoor wordt uiteindelijk de energiestroom naar de ruimte verhoogd, zodat er aan de rand van de atmosfeer weer een stralingsevenwicht ontstaat.

Door de grote warmtecapaciteit van de oceanen duurt het vele jaren voordat het klimaatstelsel reageert op een stralingsforcering. Oceanen zijn daarmee een vertragende factor in de temperatuurrepons. Door deze bufferende werking van oceanen is het klimaatstelsel bovendien gevoeliger voor langzame veranderingen in de stralingsforcering dan voor snelle fluctuaties. Het temperatuureffect door een stralingsforcering van  $0,2 W/m^2$  veroorzaakt door de 11-jarige zonnevlekkencyclus wordt viermaal zo sterk gedempt dan eenzelfde stralingsforcering die eeuwenlang aanhoudt.

Het bepalen van het uiteindelijke temperatuureffect van de hogere broeikasgasconcentraties vergt een zeer gedetailleerde kennis van het klimaatstelsel. Zo stijgt de temperatuur bij een verdubbeling van het CO<sub>2</sub>-gehalte op basis van het stralingseffect ( $3,7 W/m^2$  aan stralingsforcering) met ongeveer  $1,1^\circ C$ . Deze waarde van de temperatuurstijging geldt overigens voor elke bron, die eenzelfde stralingsforcering teweegbrengt, en is dus niet uniek voor CO<sub>2</sub>.

## Tegen- en meekoppelen

Veel processen in de dampkring zijn temperatuurafhankelijk en kunnen zo'n temperatuurverande-

ring zowel tegengaan als versterken. We noemen dit respectievelijk tegenkoppelen en meekoppelen. Het veranderen van de temperatuur door veranderingen in fysische processen in het klimaatstelsel wordt met een algemene term ook wel terugkoppeling (feedback) genoemd. De uiteindelijke temperatuurverandering met inbegrip van alle feedbacks door een stralingsforcering van  $3,7 \text{ W/m}^2$  wordt klimaatgevoeligheid genoemd. De sterkte van de klimaatgevoeligheid is afhankelijk van de terugkoppelingen in het klimaatstelsel.

Temperatuurafhankelijke processen kunnen de temperatuurstijging door stralingsprocessen versterken of verzwakken. Met name hydrologische kringlopen zijn sterk afhankelijk van de temperatuur. Wanneer het warmer wordt, neemt de hoeveelheid waterdamp in de atmosfeer toe. Waterdamp is een sterk broeikasgas en versterkt dus het effect van een verhoging van het  $\text{CO}_2$ -gehalte. Ook neemt in een warmere wereld de ijsbedekking af, waardoor het reflecterend vermogen van de aarde kleiner wordt. Dit impliceert een positieve terugkoppeling (meekoppeling). In welke mate bij toenemende temperaturen wolken eigenschappen veranderen, is echter niet goed bekend. Klimaatmodellen laten voor wolken een spreiding zien van geen extra effect tot versterkende factor.

Volgens de meest recente inzichten ligt de klimaatgevoeligheid waarschijnlijk tussen  $2,6$  en  $4,1^\circ\text{C}$ . De spreiding van deze waarden geeft aan dat er onzekerheid is over de precieze invloed van de broeikasgassen op de gemiddelde temperatuur. Klimaatgevoeligheid wordt bepaald door gebruik te maken van verschillende technieken en bronnen op basis van instrumentele metingen, satellietgegevens, temperatuur van de oceanen, vulkaanuitbarstingen, klimaatveranderingen in het verleden en klimaatmodellen. Bij alle technieken hebben we te maken met onzekerheden.



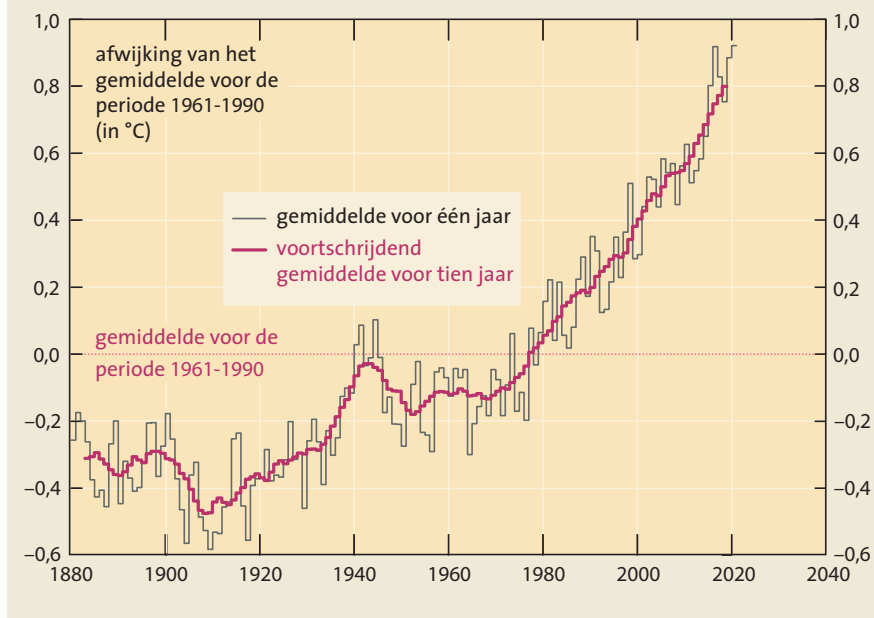
Een huis in Fairbanks Alaska zakt de grond in door het ontdooien van de permafrost als gevolg van de opwarming van de aarde.

### Temperatuurveranderingen in de afgelopen 150 jaar

Sinds de tweede helft van de negentiende eeuw worden op veel locaties, zowel op land als op zee, temperatuurmetingen verricht om een wereldgemiddelde temperatuur te bepalen. Als referentieperiode van het pre-industriële tijdperk wordt de gemiddelde temperatuur over het tijdvak 1850-1900 gehanteerd. Sinds die tijd is de temperatuur met circa  $1,1^\circ\text{C}$  gestegen (zie figuur De gemiddelde jaartemperatuur).

De aarde is echter niet gelijkmatig opgewarmd: de temperatuur van continenten stijgt sneller dan die van de oceanen, en het noordpool gebied warmt twee tot driemaal sneller op dan het wereldgemiddelde. Ook verloopt de opwarming niet in een constant tempo, maar is deze aan schommelingen onderhevig. Na een versnelling in de laatste decennia van de twintigste eeuw verliep de opwarming in het eerste decennium van de eenentwintigste eeuw wat trager. Inmiddels lijkt weer een versnelling te zijn ingezet.

## MONDIAAL GEMIDDELDE JAARTEMPERatuur



De waargenomen wereldgemiddelde jaartemperatuur (zwarte lijn) en het lopend gemiddelde over een periode van tien jaar (rode lijn). Bron: Climate Explorer, KNMI.

Zo'n tempowisseling is niet uniek en kan goed verklaard worden in termen van natuurlijke fluctuaties. Natuurlijke factoren kunnen worden ingedeeld in externe forceringen en interne variabiliteit. Twee bronnen van externe forcering zijn van belang op een tijdschaal van eeuwen: vulkaanuitbarstingen en de eerder beschreven zonneactiviteit.

### Vulkaanuitbarstingen en zonneactiviteit

Grote vulkaanuitbarstingen, zoals die van de Filipijnse vulkaan Pinatubo in 1991, blazen een enorme hoeveelheid stof (aerosolen) hoog in de atmosfeer. Door winden in de stratosfeer verspreiden deze aerosolen zich in een tijdsbestek van een half jaar over de wereld. Daardoor wordt tijdelijk meer zonnestraling teruggekaatst en koelt de aarde enkele tienden van een graad af. Na een jaar is het meeste stof naar de lage atmosfeer gedwaald en wordt vervolgens via neerslag uit de atmosfeer

verwijderd. Hiermee verdwijnt het effect op de stralingsbalans.

Onder de interne variabiliteit verstaan we de klimaatfluctuaties die ontstaan door de herverdeling van warmte in de oceaan. Op een tijdschaal van enkele jaren is El Niño – Southern Oscillation (ENSO) een fenomeen waarbij de zeewatertemperatuur in een groot gebied van de Grote Oceaan ten westen van Peru abnormaal hoog is. Hierdoor wordt de luchtcirculatie rond de evenaar tussen Indonesië en het Amerikaanse continent beïnvloed. El Niño doet zich onregelmatig, maar gemiddeld eens in de drie à zeven jaar voor. Sterke El Niño's zoals in 1998 veroorzaken een gemiddelde temperatuurtoename van 0,2 à 0,3°C.

Ook klimaatmodellen vertonen dergelijke schommelingen, maar een El Niño is niet voorspelbaar. Dit geldt ook voor vulkaanuitbarstingen en zonneactiviteit en dit bemoeilijkt meerjarige klimaatverwachtingen. Op de langere termijn middelen deze fluctuaties uit en zien we vooral de menselijke invloed op de waargenomen temperatuurstijging sinds de tweede helft van de negentiende eeuw.

Met klimaatmodellen kunnen de mondiale temperatuurveranderingen door vulkaanuitbarstingen, zonneactiviteit en menselijke invloed, broeikasgassen en aerosolen gezamenlijk of apart worden doorgerekend. Het IPCC concludeert in haar assessmentrapport uit 2013 dat het uiterst waarschijnlijk (>95%) is dat de menselijke invloed de belangrijkste oorzaak is van de waargenomen opwarming sinds het midden van de twintigste eeuw. Over de afgelopen 150 jaar middelen de natuurlijke fluctuaties, zowel forceringen als interne variabiliteit praktisch uit, zodat de waargenomen opwarming van 1,1°C volledig kan worden toegeschreven aan de menselijke invloed (zie figuur Wereldgemiddelde oppervlaktetemperatuur).

Wereldgemiddelde oppervlaktetemperatuuranomalie van 1870 tot 2010, en de natuurlijke bijdragen van zon, vulkanen en interne variabiliteit.

A. Wereldgemiddelde oppervlaktetemperatuurreeks ten opzichte van de klimatologische periode 1961-1990 (zwarte lijn).

Gemodelleerde oppervlakte-temperatuurverandering (rode lijn) van de som van de impact op de temperatuur van de natuurlijke factoren (B,C,D) en de menselijke invloed (E).

B. Geschatte temperatuur-effect door de stralingsforcering van de zon.

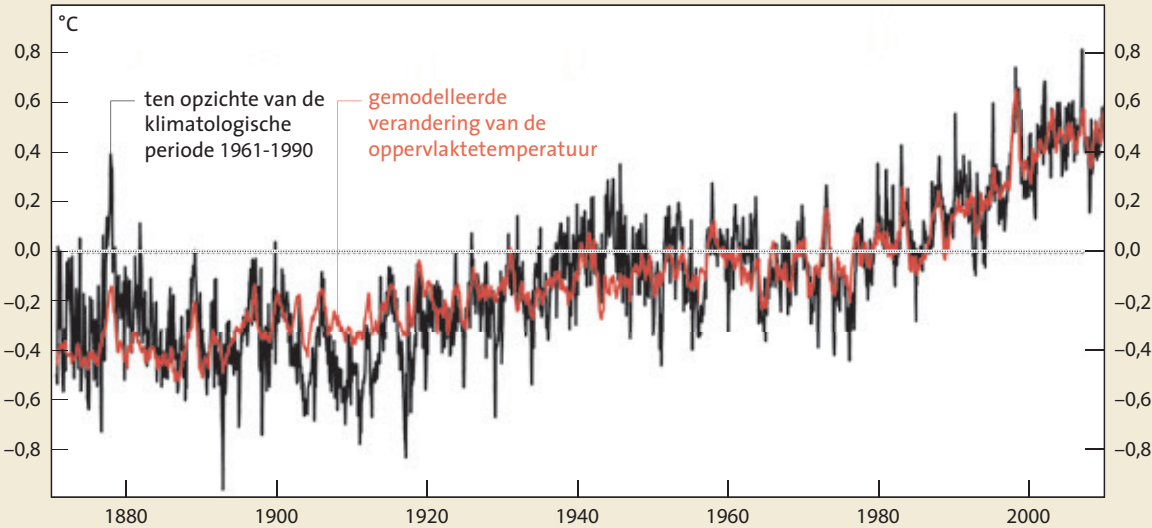
C. Geschatte temperatuur-effect door vulkaanuitbarstingen.

D. Geschatte temperatuureffect door natuurlijke variabiliteit gerelateerd aan El Niño.

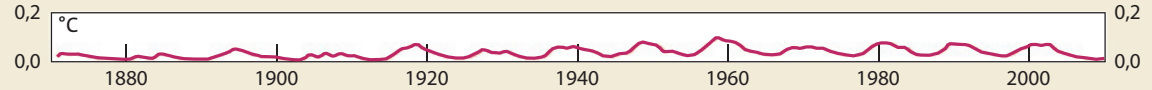
E. Geschatte temperatuur-effect door de menselijke invloed bestaande uit de opwarmingscomponent door broeikasgassen en de afkoelingscomponent door aerosolen.

Bron: gebaseerd op figuur 1 FAQ 5.1, IPCC AR5 WGI, 2013.

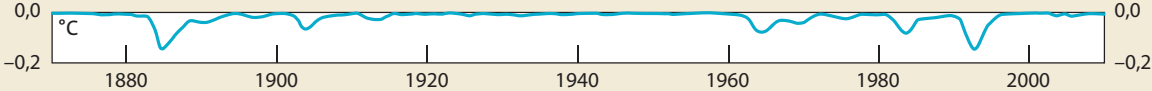
A. WERELDGEMIDDELDE ANOMALIE VAN DE OPPERVLAKTETEMPERATUUR



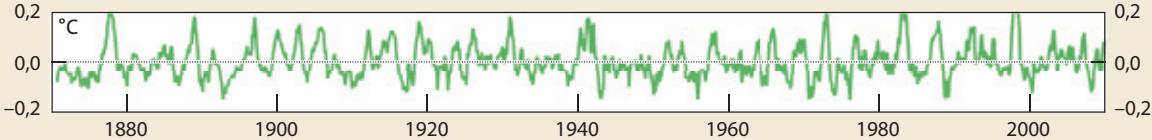
B. NATUURLIJKE BIJDRAGE VAN DE ZON



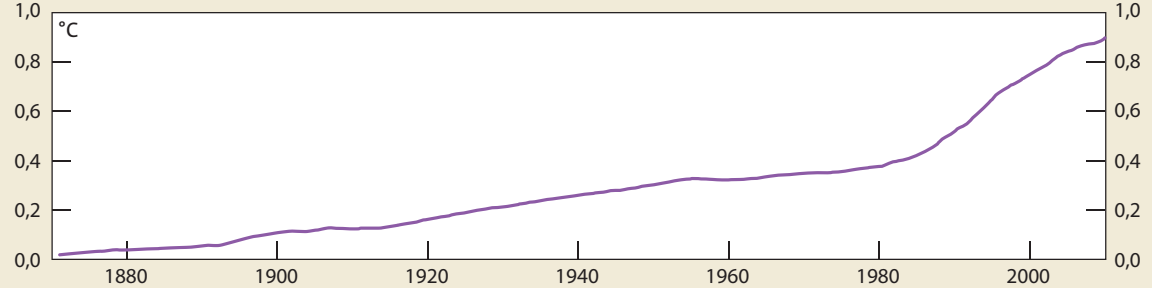
C. NATUURLIJKE BIJDRAGE VAN VULKANEN



D. INTERNE VARIABILITEIT



E. ANTROPOGENE COMPONENT



# In actie komen met klimaatambassa

*Wat houdt het werk van een klimaatambassadeur in?*  
 ‘Voor de titel ‘klimaatambassadeur’ bestaat geen vaste omschrijving. Nadat ik stopte als weervrouw bij RTL vroegen de media wat ik dan ging doen. Ze wilde graag een soort functieomschrijving horen en toen bedacht ik dat klimaatambassadeur mijn werkzaamheden misschien wel het beste benaderde.

Ik geef er op mijn manier invulling aan door als pleitbezorger op een positieve en constructieve manier mensen bewust te maken van de urgentie, handvatten te geven voor de oplossingen en actie te ontlokken met inzicht in ons gedrag.’

*Wat is de missie?*

‘Als onderdeel van een ecosysteem kunnen, moeten en willen wij met elkaar deze prachtige aarde veilig, gezond en weerbaar houden. De planeet kan ons alles bieden wat we nodig hebben, voor al zijn bewoners. Door bewustwording en juiste keuzes kunnen we zorgen dat we nog lange tijd kunnen profiteren van ons enige leefbare ruimteschip in het verder onleefbare heelal.’

*Heb je hiervoor nog een speciale training gevolgd?*

‘Ik heb geen specifieke trainingen gevolgd. Alle kennis valt onder “je leven lang blijven leren”. Regelmatig pak ik cursussen op of volg bijeenkomsten die raken aan dit onderwerp. Met name de gedragscomponent is een complexe schakel. Ons gedrag is wel de sleutel.’

*Tref je veel ongeloof over de ernst van de klimaatcrisis?*

‘Het hangt een beetje af van de bubbel die je treft. Het is verleidelijk te denken dat er veel weerstand

is als je de sociale media erg serieus neemt. Maar tegelijkertijd merk ik met de persoonlijke gesprekken in het land tijdens mijn lezingen dat bijna iedereen er wel voor open staat dat we de klimaatverandering moeten aanpakken. Aan de voorzijde (mitigatie) en aan de achterzijde (adaptatie). Zolang ze maar handelingsperspectief zien en niet dat wijzende vingertje ervaren. Als je het gevoel krijgt dat anderen jouw gedrag afkeuren, dan ga je in de weerstand.’

*Wat zijn de meest gehoorde tegenwerpingen?*

‘De beruchte “Ja, maar...”. Veel gehoorde tegenwerpingen zijn: “We zijn maar zo’n klein land. Andere grote landen gaan gewoon op de oude voet door. Het kost teveel. Pak de grootste vervuilers eerst maar aan.” Eigenlijk ligt de weerstand niet zozeer óf de huidige klimaatverandering wel disproportioneel is in de recente geschiedenis: de menselijke invloed is evident. Maar hoe je het aanpakt, is meer politiek beladen. En dan ontstaan de discussies.’

*Probeer je mensen te overtuigen dat het een serieus probleem is?*

‘Mijn keuze is om het verhaal rondom klimaatverandering niet te dramatisch te brengen. Geen crisis, maar een verstoring: het verstoort het evenwicht waar we nu op ingesteld zijn. Of disruptie. Dat geeft al iets meer lading. Als je het huidige comfort wilt behouden, dan kan het niet anders dan dat je toch in actie moet komen. Ik probeer het brede plaatje van impact te laten zien: op wereldschaal, maar ook wat het betekent voor jouw persoonlijke leven.’

# deur Helga van Leur



Helga van Leur is meteoroloog en presenteerde twintig jaar lang het RTL-weerbericht. Als ambassadeur van onze planeet verzorgt ze lezingen over het weer, klimaat, duurzaamheid en gedrag.

*Hoe pak je dat aan? Welke argumenten gebruik je daarbij?*

‘Ik laat mensen graag nadenken over wat de gevolgen zijn en of ze daar last van ondervinden. Wat willen ze zelf voor rol daarin spelen? Hoe willen ze worden herinnerd? Maar vooral het besef bijbrengen dat alle veranderingen met kleine stapjes beginnen. Onderschat de kracht van ons sociale omgeving niet. We roepen dat we geld belangrijk vinden, maar intussen is wat de buurman of familielid doet de grootste trigger. Je moet de verandering vooral ook gemakkelijk maken. Dan is de kans op gewenst gedrag groter.’

*Woon je zelf in een energiezuinig of -neutraal huis, als goed voorbeeld?*

‘Uiteraard heb ik al veel in mijn huis gedaan. Misschien is het beste voorbeeld juist wel dat je zelf nog niet het maximale hebt gedaan, maar laat zien dat het ook voor mij een continue zoektocht is naar wat haalbaar en betaalbaar is. Je zoekt een optimum naar wat jij kunt doen en waar voor jouw persoonlijk de mogelijkheden liggen (in kennis, financiën en techniek). Vertel ook gerust over je *guilty pleasures* en waar je tegenaan loopt. Zo voelen mensen zich meer verbonden met je en is de kans dat ze in actie komen voor een duurzamere wereld (met een stabiel klimaat) alleen maar groter!’

# De 11-jarige zonnevlekkencyclus en mogelijke klimaateffecten

Variatie in de energietoevoer of de magnetische activiteit van de zon kan klimaatverandering veroorzaken. Ook variatie in het ultraviolette deel van het zonnespectrum kan een rol spelen via veranderingen in het ozongehalte in de hoge atmosfeer. Welke fysische processen spelen een rol bij deze variaties in zonneactiviteit?

DE ZON varieert in lichtkracht volgens de 11-jarige zonnevlekkencyclus en beïnvloedt daarmee direct het klimaatstelsel. Voor het gehele spectrum dat de zon aan straling uitzendt bedraagt het verschil tussen zonnevlekkenminimum en -maximum in de orde van 0,1%. De grootste veranderingen treden op in het ultraviolette deel van het spectrum (zie tabel). Voor de specifieke golflengte van 121 nanometer loopt het verschil op tot 65%. Deze uv-straling speelt een belangrijke rol in het fotochemische productieproces van ozon. Voor de langere golflengtegebieden in het nabij infrarood, groter dan 680 nanometer, zijn de verschillen beduidend kleiner.

### Variaties in ultraviolette straling

Ongeveer 90% van de ozon bevindt zich in de stratosfeer, de luchtlag tussen 13 en 50 kilometer hoogte. Ozon wordt gevormd uit zuurstof onder inwerking van uv-licht. Door absorptie van dit hoogfrequente zonlicht wordt een zuurstofmolecuul (O<sub>2</sub>) gesplitst in twee losse zuurstofatomen (2 O). Door recombinitie van een vrij zuurstofatoom en zuurstofmolecuul ontstaat vervolgens ozon (O<sub>3</sub>). In de troposfeer is door absorptie in de hogere luchtlagen weinig uv-licht meer over, zodat ozonvorming via dit proces voornamelijk in de stratosfeer plaatsvindt.

Zoals de tabel laat zien, zijn de veranderingen van de uv-straling in de 11-jarige zonnevlekken-

| Golflengte                               | Verskil in % |
|------------------------------------------|--------------|
| Gehele spectrum                          | 0,08         |
| 250 - 680 nm (zichtbaar licht + deel uv) | 0,164        |
| 680 - 4000 nm (nabij infrarood)          | 0,013        |
| 121 nm (Lyman alpha, uv-C)               | 65           |
| 178,6 - 202,0 nm (uv-C)                  | 9,9          |
| 202,0 - 241,0 nm (uv-C)                  | 8,9          |
| 241,0 - 289,0 nm (uv-C)                  | 0,90         |
| 289,0 - 305,5 nm (uv-B)                  | 0,54         |
| 305,5 - 313,5 nm (uv-B)                  | 0,45         |

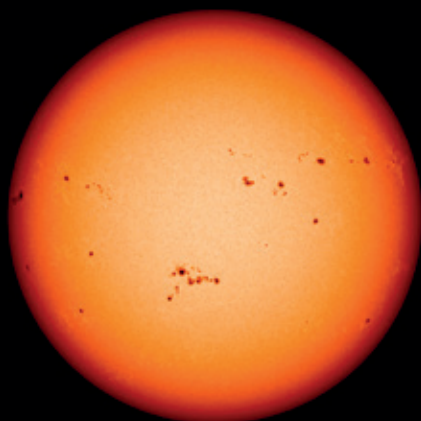
Tabel Verandering van de zonne-energie, uitgesplitst voor een aantal golflengtegebieden, in de 11-jarige zonnevlekkencyclus. Weergegeven is het procentuele verschil tussen zonnevlekkenminimum en -maximum.

cyclus relatief veel groter dan de veranderingen gemiddeld over het gehele spectrum van de zon. De veranderingen worden groter naarmate de golflengte afneemt. Bij heel korte golflengten, zoals Lyman alpha, is de intensiteit tijdens het zonnemaximum maar liefst 1,65 keer groter dan tijdens het zonneminimum.

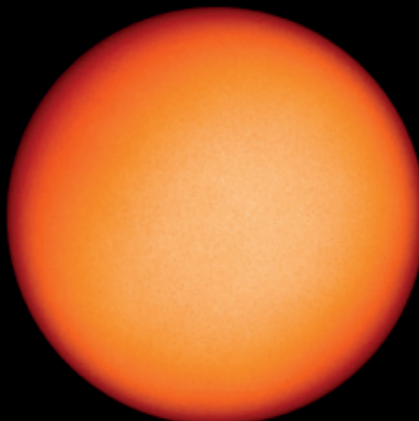
Sinds 1979 kunnen satellieten deze verandering in de kortgolvlige uv-straling waarnemen, en sindsdien zijn er pogingen ondernomen om met klimaatmodellen te berekenen wat de invloed is op de aardatmosfeer. De modellen berekenden een toename van 2 tot 6% ozon gedurende een zonnevlekkenmaximum ten opzichte van minimumcondities, wat goed overeenkomt met de waargenomen fluctuaties in het ozongehalte. In de stratosfeer gaat deze toename van ozon gepaard met een verhoging van de temperatuur met enkele graden volgens een seizoensafhankelijk patroon. Dit veroorzaakt veranderingen in de stratosferische wind.

In het algemeen gaat het om een afname van de wind in de stratosfeer, die zich nabij het aard-

Zonnevlekken 19 juli 2000

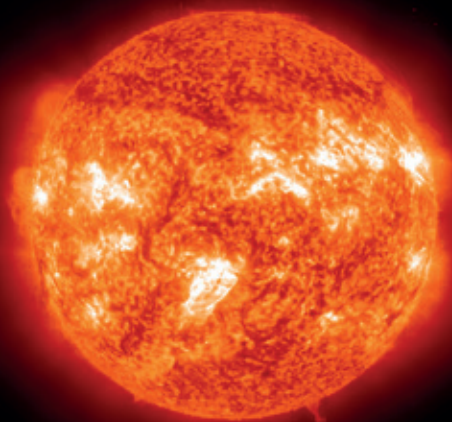


Zonnevlekken 18 maart 2009



Zonnevlekken bij een zonnevlekkenmaximum (juli 2000) en -minimum (maart 2009). Gebieden van sterke activiteit manifesteren zich als zichtbare vlekken op het oppervlak van de zon. Zonnevlekken op het oppervlak van de zon (bovenste rij) en ultraviolet licht dat uit de zonneatmosfeer straalt (onderste rij) tijdens het laatste zonnemaximum (2000, linkerkolom) en tijdens het huidige zonneminimum (2009, rechterkolom). Op 18 maart 2009 was het oppervlak van de zon smetteloos.

Ultraviolet 19 juli 2000



Ultraviolet 18 maart 2009



oppervlak vertaalt in kleine veranderingen in het windpatroon. Zo wordt tijdens een zonnevlekkenmaximum de oostenwind in de tropen sterker. En buiten de tropen zijn er gordels te zien van toe- en afnemende westenwind. De exacte locatie

van deze veranderingen verschilt van model tot model, maar omdat het om kleine veranderingen gaat, verdwijnt het veelal in de ruis van het grillige weer. De ozonveranderingen door fluctuaties in de uv-straling hebben een verwaarloosbare invloed op

de wereldgemiddelde temperatuur, maar kunnen lokaal door kleine veranderingen in de wind wel degelijk temperatuur- en neerslagveranderingen teweegbrengen.

### Variaties in kosmische straling

Door variaties van het magnetische veld van de zon wordt de aarde meer of minder afgeschermd voor kosmische straling, hoogenergetische deeltjes in de ruimte afkomstig van bijvoorbeeld super nova's. De aardatmosfeer zorgt ervoor dat het grootste deel van deze schadelijke straling niet het aardoppervlak bereikt. Deze deeltjes botsen met luchtmoleculen en verhogen de ionisatie in de atmosfeer vanaf een hoogte van enkele kilometers. De atmosferische ionisatiegraad varieert met de intensiteit van kosmische straling.

Een hypothese is dat de ionisatiegraad de hoeveelheid bewolking op aarde beïnvloedt. Meer lage bewolking veroorzaakt afkoeling van de aarde doordat het effect van reflectie veel groter is dan het broeikas effect. Meer hoge bewolking heeft juist een opwarmend effect. Zo kan zonneactiviteit via kosmische straling de aardse atmosfeer dus op een indirecte manier beïnvloeden.

Satellietmetingen laten echter geen duidelijk verband zien tussen veranderingen in kosmische straling en lage of hoge bewolking. Ook is de vorming van condensatiekernen, die wolkenvorming stimuleren, door kosmische straling niet aangetoond. Het grootste deel van de aardse atmosfeer is al verzadigd met condensatiekernen voor wolkenvorming, waardoor de bijdrage van kosmische straling verwaarloosbaar zal zijn.

### Nauwelijks klimaateffecten op wereldschaal

De temperatuurverandering op aarde door de veranderingen in de lichtkracht tijdens de 11-jarige zonnevlekkencyclus, is klein. Berekeningen laten zien dat deze verandering voor een stralingsforcering van  $0,2 \text{ W/m}^2$  kleiner is dan  $0,05^\circ\text{C}$  en

daarmee nauwelijks zichtbaar. Op regionale schaal kan de impact van de zonnevlekkencyclus op de temperatuur groter zijn, in de orde van enkele tienden van graden. Verder kunnen de uv-verschillen tijdens de 11-jarige zonnevlekkencyclus regionale verschillen opleveren in temperatuur en neerslag (door ozonveranderingen in de stratosfeer), maar wereldgemiddeld gezien zijn de effecten door uv verwaarloosbaar. Ook voor de link tussen de hoeveelheid kosmische straling en de mate van bewolking bestaat echter geen duidelijk fysische basis, noch ondersteunen waarnemingen deze hypothese. In de wereldgemiddelde temperatuur sinds 1850 wordt trouwens geen 11-jarige periode gevonden.

---

Het jaarlijks gemiddelde totale zonnevlekkengetal vanaf 1610. Het terugkerend patroon van de pieken met een tijdschaal van circa 90 jaar – de zogenoemde Gleissbergcyclus – is goed zichtbaar. Ook in het begin van de twintigste eeuw was de zonneactiviteit relatief laag en daarvoor in het begin van de negentiende eeuw, het zogeheten Daltonminimum. Bron: SIDC, Solar Influences Data Analysis Center.

# De rol van de zon in het verleden

**Vroeger was een ijzig aardoppervlak eerder uitzondering dan regel. Door de geleidelijke daling van de temperatuur sinds 50 miljoen jaar geleden werden ijstijdencycli mogelijk, veroorzaakt door de periodieke veranderingen van de aardbaan. Eeuwen geleden was er sprake van een kleine ijstijd. Welke processen spelen hierbij een rol?**

**O**NZE HUIDIGE ZON bevindt zich in een inactieve fase. In december 2019 werd een zonnevlekkenminimum bereikt. En ook wanneer we kijken naar de maxima in het aantal zonnevlekken is de zonneactiviteit gedaald sinds 1959, het jaar dat het hoogste maximum van de twintigste eeuw werd bereikt (zie figuur Zonnevlekkengetal).

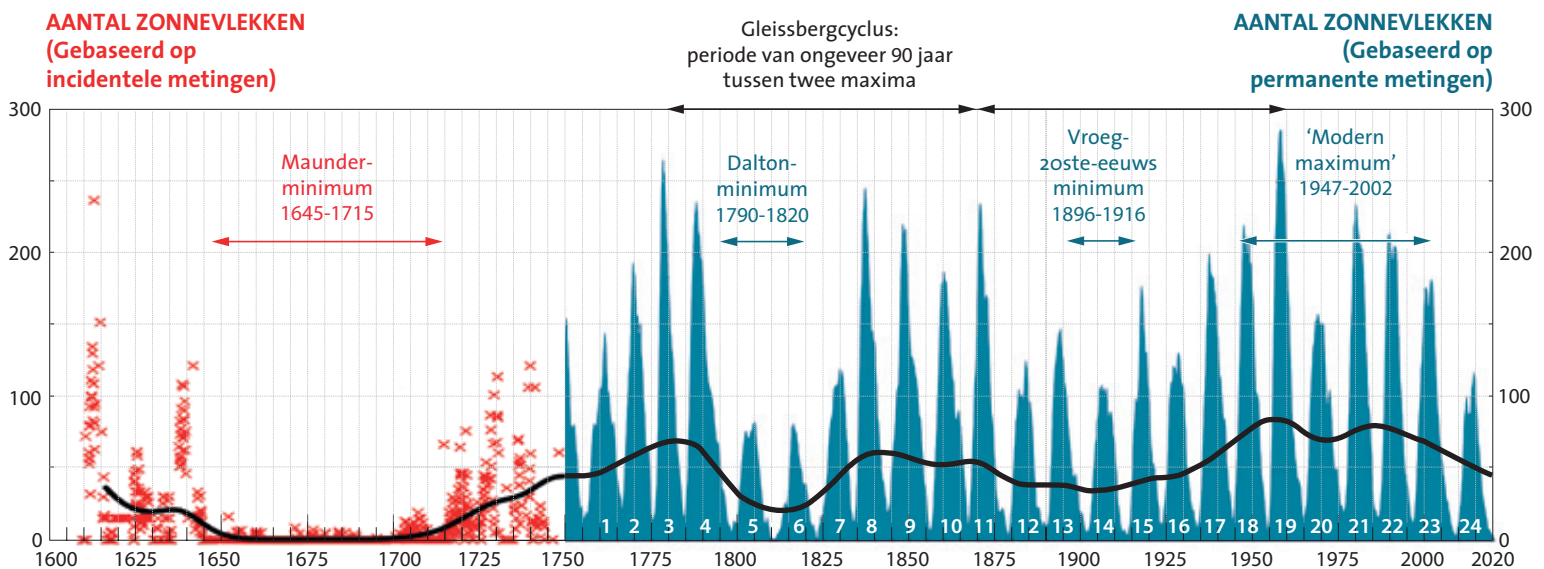
Vanuit de astrofysica komen signalen dat de activiteit van de zon in de komende decennia nog lager kan worden dan nu het geval is, wat een situatie zou opleveren die vergelijkbaar is met het Maunder Minimum dat duurde van 1645 tot 1715. Het Maunder Minimum wordt vaak verward met

de Kleine IJstijd. De Kleine IJstijd duurde echter langer en begon eerder, van 1550 tot 1750. De gemiddelde jaartemperatuur op het Noordelijk Halfrond lag toen tussen de 0,4 en 0,9°C lager dan in de periode 1961-1990. Verder is uit recent onderzoek gebleken dat de afkoeling gedurende de Kleine IJstijd zich vooral manifesteerde op het Noordelijk Halfrond.

Waarschijnlijk had de rustige zon destijds inderdaad een verkoelende invloed op het mondiale klimaat, zo'n 0,1 tot 0,3°C, maar ook andere factoren speelden een rol. Zo waren er sterke vulkaanuitbarstingen en mogelijk veranderingen in zeestromingen en in atmosferische circulatie. In hoeverre deze veranderingen samenhangen met zonneactiviteit is niet duidelijk.

## IJstijden (glacialen) en warme intermezzo's (interglacialen)

In de geologische geschiedenis van de aarde is bedekking van het aardoppervlak met ijs eerder uitzondering dan regel. Zo'n 50 miljoen jaar geleden is een daling van de temperatuur inge-



zet door de teruglopende concentratie CO<sub>2</sub> in de lucht. Ruim 30 miljoen jaar geleden was het koud genoeg om de Antarctische ijskap te vormen. En pas sinds twee en een half miljoen jaar geleden is er sprake van permanente ijsbedekking op Groenland.

De oorzaak van deze klimaatveranderingen is in belangrijke mate een gevolg van periodieke veranderingen in de aardbaan en de stand van de aardas ten opzichte van deze baan. Hierbij varieert de totale ontvangen zonne-energie niet, maar wel de verdeling van zonne-energie op aarde. Er zijn drie variaties, die een rol spelen: de excentriciteit, de obliquiteit, en de precessie.

#### *Excentriciteit*

De aardbaan varieert in vorm van een cirkel tot een ellips, de excentriciteit, in een periode van ongeveer 100.000 jaar en met een modulatie van 413.000 jaar. Een modulatie is een langere cyclus bovenop de (kortere) cycli. Deze vormverandering ontstaat door de zwaartekracht van de planeten Saturnus en Jupiter. In 2021 is het verschil in afstand tussen het punt van de aardbaan dat het dichtst bij de zon ligt (het *perihelium*) en het punt dat het verst van de zon verwijderd ligt (het *aphelium*), 5,1 miljoen kilometer. Dit resulteert in een verschil van inkomende zonnestraling van 6,8%. Als de baan zijn maximale afwijking heeft bereikt, bedraagt dit verschil zelfs bijna 23%.

#### *Obliquiteit*

De hellingshoek die de aardas maakt met het baanvlak, de obliquiteit, varieert met een periode van 41.000 jaar tussen de 22,1° en 24,5°. Bij een grotere hoek nemen de verschillen tussen de seizoenen toe, wat betreft de instraling van de zon en daarmee de temperatuur. In 2021 bevindt de aarde zich halverwege de afnemende fase van obliquiteit.

#### *Precessie*

De aardas vertoont een tolbeweging met een periode van ongeveer 26.000 jaar, wat een gevolg is van de getijdenkrachten die zon en maan op de aarde uitoefenen. In combinatie met de momenten waarop in de seizoenscyclus het perihelium en aphelium bereikt worden, leidt dit tot verschillen tussen zomer- en wintertemperaturen. Deze eeuw wordt het perihelium op 3 januari bereikt, waardoor de instraling in de zomer op het zuidelijk halfrond groter is dan op het noordelijk halfrond.

#### **Sneeuw- en ijsreflecties**

In combinatie met de seizoenen leveren deze aardbaanvariaties, in de verdeling van zonne-energie over het aardoppervlak, een interessante cyclus van ijstijden op (zie figuur Baanparameters). De ijstijden worden afgewisseld door warmere perioden waarbij alleen de ijskappen van Groenland en Antarctica overbleven.

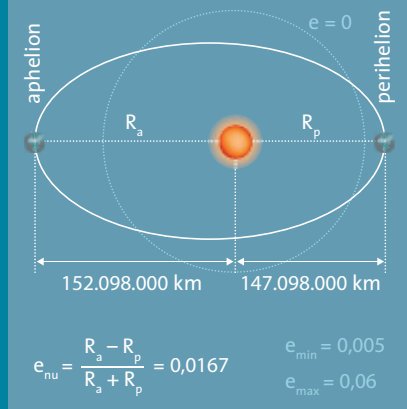
Perioden waarin de hoeveelheid zonnestraling tijdens de zomer in het noordelijk poolgebied (boven 65 graden noorderbreedte) afneemt, leidt tot ingrijpende veranderingen. Door een daling van de zomertemperatuur in gebieden rond de noordpool smelt de wintersneeuw's zomers niet meer volledig weg, terwijl door de warmere winters meer neerslag valt in de vorm van sneeuw.

Meer sneeuw en ijs zorgt voor een toename van reflectie van zonlicht, waardoor de afkoeling versterkt wordt, dit wordt het ijs-albedo effect genoemd. Een koeler poolklimaat geeft bovendien een verandering van vegetatie, van donkere boreale bossen naar toendra's, waardoor de reflectie van zonlicht ook versterkt wordt.

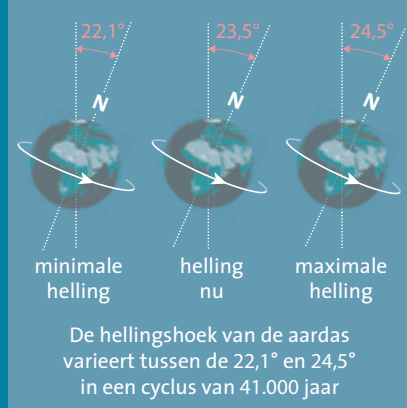
De aangroei van ijs op de continenten van Noord-Amerika en Eurazië verloopt traag omdat dit door aanwas van winterse neerslag gebeurt. Wanneer de instraling in de zomer door de verandering in aardbaanparameters weer toeneemt, smelt er zomers meer ijs weg dan er in de winter

**Baanparameters en tijdreeksen over de laatste 800.000 jaar.** (A) Excentriciteit: (links) grafische voorstelling, (rechts) reconstructie, (B) Obliquiteit: (links) grafische voorstelling, (rechts) reconstructie. (C) Precessie (links) grafische voorstelling, (rechts) reconstructie. (Rechts onder C) Vijf gereconstrueerde tijdreeksen van de atmosferische concentratie CO<sub>2</sub>, oppervlaktetemperatuur van het tropische zeewater, temperatuur op Antarctica, zuurstof-isotoop 18O en een niveau (0 = einde pre-industriële tijdperk rond 1750). Bron: deels gebaseerd op figuur 5.3 IPCC AR5 WGI.

## A AARDBAAN & EXCENTRICITEIT



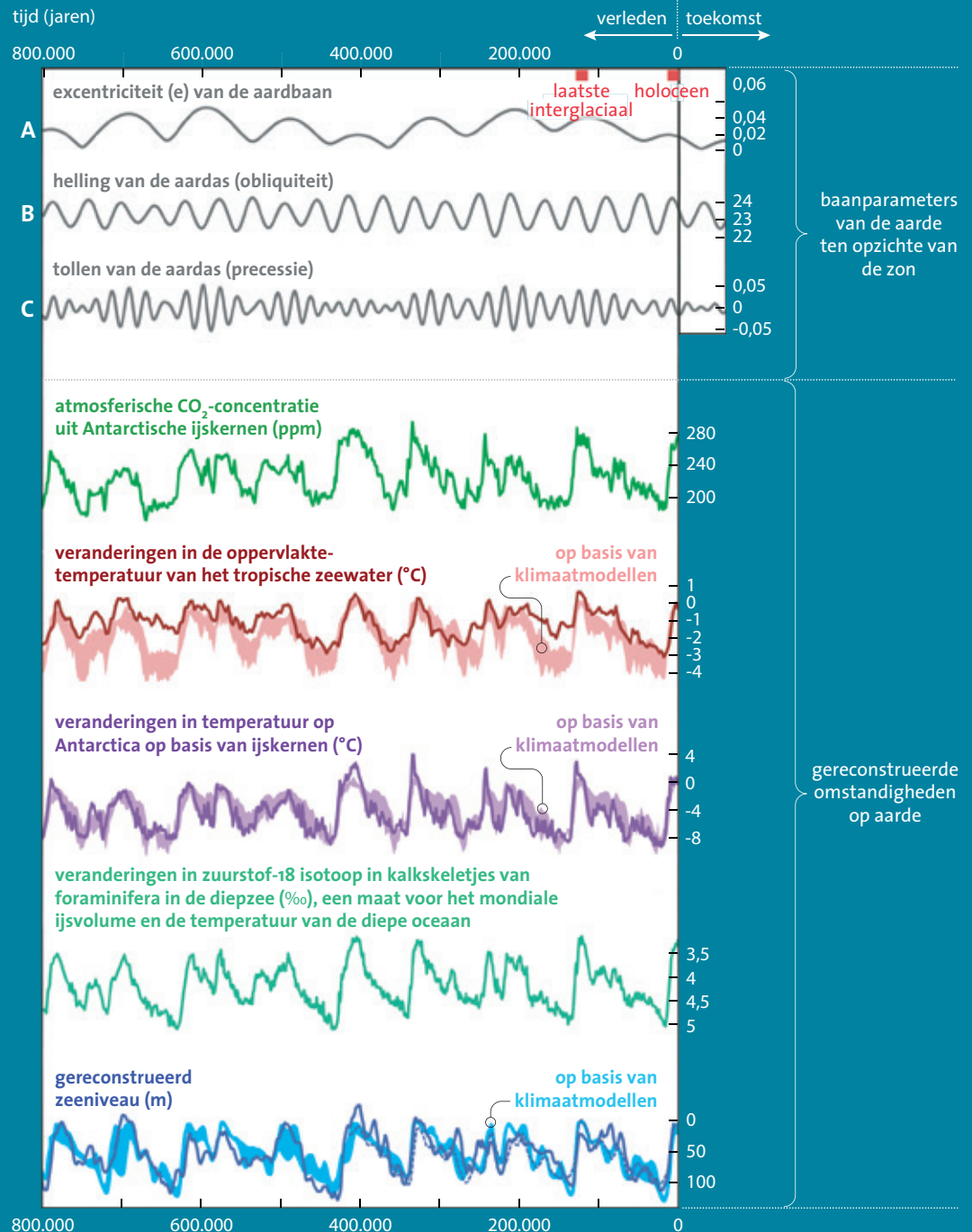
## B HELLING VAN DE AARDAS



## C TOLLEN VAN DE AARDAS



## IPCC & SCHOMMELINGEN IN DE AFGELOPEN 800.000 JAAR



© jos van den broek – bron grafieken: IPCC

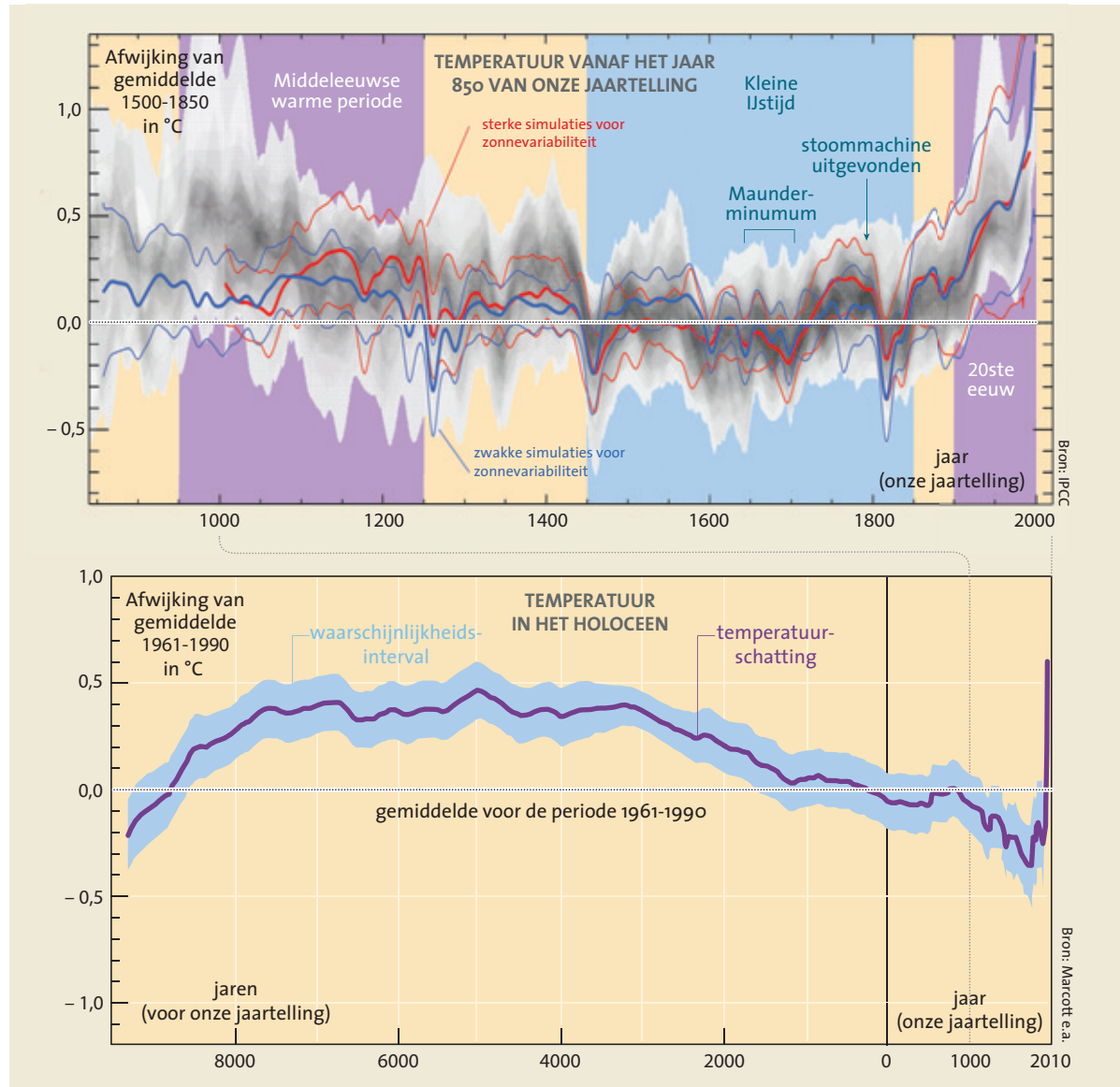
door neerslag bijkomt. Daar komt nog bij dat door het gewicht van de ijskap de aardkorst daalt. Dit versnelt het proces van het verdwijnen van de ijskap. Het resultaat is een soort zaagtand (zie figuur Baanparameters): met trage afkoeling in circa 80.000 jaar van warme periode (interglaciaal)

naar ijstijd, gevolgd door een snelle opwarming in een tijdsbestek van 20.000 jaar van ijstijd tot de volgende warme periode.

### Variatie CO<sub>2</sub>-concentratie

Tijdens het maximum van de laatste ijstijd, onge-

Gereconstrueerde (grijs) en gesimuleerde (rood/blauw) temperatuur sinds 850. Grijs arcering geeft de mate van overlap van de reconstructies weer. Rode/blauwe lijnen: modelsimulaties met een sterke/zwakke invloed van de zon. Dikke lijnen betreffen het modelgemiddelde, dunne lijnen het 90% interval van de modelsimulaties.



Reconstructie van de mondiaal gemiddelde temperatuur tijdens het Holocene. (Marcott et al., 2013)



Deze CO<sub>2</sub>-toename van 132 ppm is een gevolg van de verbranding van fossiele brandstoffen

veer 18.000 jaar geleden, was mondiaal de gemiddelde temperatuur ongeveer vier tot vijf graden Celsius lager dan nu, terwijl het kooldioxidegehalte circa 45% van de huidige waarde bedroeg. Deze informatie over de temperatuur en concentratie broeikasgassen ligt opgeslagen in het kilometers dikke ijs van Antarctica. Zo zijn wetenschappers erin geslaagd om tijdreeksen van deze grootheden te reconstrueren van de laatste 800.000 jaar. De tijdreeks van het kooldioxidegehalte in de atmosfeer laat zien dat de CO<sub>2</sub>-concentratie schommelt tussen de 180 ppm tijdens het hoogtepunt van de ijstijd en 280 ppm tijdens de interglacialen.

Opvallend is de parallelle variatie van de temperatuur en de concentratie CO<sub>2</sub>. Dit wordt toegeschreven aan terugkoppelingen in het klimaatsysteem. Bij stijging van de temperatuur komen broeikasgassen uit de oceaan vrij omdat de oplosbaarheid van gas in water afneemt met toenemende temperatuur. Die extra broeikasgassen leiden dan weer tot verdere temperatuurstijging en versterken zo de ijstijdencyclus. Ook spelen veranderingen in vegetatie op land en biomassa in de oceaan hierin een rol. Bij deze terugkoppeling ijlt de CO<sub>2</sub>-concentratie na op de mondiale temperatuur met zo'n 900 jaar. In feite wordt het broeikasgas CO<sub>2</sub> herverdeeld over de atmosfeer en de oceaan. De sterkte van het effect is circa 20 ppm CO<sub>2</sub>-toename in de atmosfeer per graad (mondiale) opwarming.

In de laatste twee eeuwen is de CO<sub>2</sub>-concentratie toegenomen van de interglaciale waarde van 280 ppm naar ruim 412 ppm in 2020. Deze toename van 132 ppm is een gevolg van de verbranding van fossiele brandstoffen en kan niet verklaard worden door temperatuurschommelingen van minder dan een graad in het afgelopen millennium. Bovendien neemt zowel de concentratie CO<sub>2</sub> in de atmosfeer als de hoeveelheid opgelost CO<sub>2</sub> in de oceaan toe; dit laatste is zichtbaar aan de toenemende zuurgraad (lagere pH) van de oceanen.

## Het Holoceen

Ongeveer 12.000 jaar geleden, toen het Holoceen na de laatste ijstijd begon, stabiliseerde de gemiddelde temperatuur op een niveau dat 5°C hoger lag dan tijdens het hoogtepunt van de ijstijd. Het klimaatarchief laat zien dat de temperatuur in een tijdsbestek van 2000 jaar met 0,5°C steeg tot het zogeheten mid-holoceen optimum. Dit optimum hield enkele millennia aan.

In de afgelopen 5000 jaar daalde de temperatuur met circa 0,7°C tot een dieptepunt enkele eeuwen geleden, ook wel de Kleine IJstijd genoemd. Ten opzichte van deze schommelingen in het verleden is de opwarming met zo'n 1,1°C sinds het einde van de negentiende eeuw razendsnel gegaan.

De geleidelijke afkoeling na het Holoceen-optimum is voornamelijk het gevolg van de veranderingen in obliquiteit. Het laatste maximum was 10.700 jaar geleden. Het eerstvolgende minimum wordt over 9800 jaar verwacht. Op grond van obliquiteit zou de aarde nog duizenden jaren moeten afkoelen. Maar de plotse opwarming van de twintigste eeuw maakt een abrupt einde aan een zeer lange periode van heel geleidelijke afkoeling.

Deze opwarming kan voor een aanzienlijk deel worden toegeschreven aan de stijgende concentraties broeikasgassen die met zekerheid samenhangen met menselijke activiteiten. Gegeven de verwachte toename van de uitstoot van broeikasgassen, zal de gemiddelde temperatuur van de eenentwintigste eeuw waarschijnlijk warmer uitvallen dan welke eeuw dan ook in het Holoceen.

# Epiloog: De invloed van de mens

ROB VAN DORLAND

**De huidige klimaatverandering is vooral het gevolg van de uitstoot van broeikasgassen en aerosolen door menselijke activiteiten. Als we niets doen om die uitstoot te verminderen, zien de toekomstscenario's er voor de temperatuur- en zeespiegelstijging niet rooskleurig uit. De invloed van de zon is echter gering en onderdeel van natuurlijke fluctuaties. Zelfs een langdurig inactieve zon, zoals sommige voorspellen, zal ons niet uit de brand helpen.**

**S**INDS 1870 is de temperatuur met 1,1°C gestegen. Verreweg het grootste deel van die stijging vond de afgelopen 40 jaar plaats met een gemiddelde snelheid van bijna 0,2°C per decennium. Die 1,1°C opwarming kan geheel worden toegeschreven aan menselijke invloed; temperatuurtrends veroorzaakt door natuurlijke factoren middelen over deze periode van 150 jaar praktisch uit. Deze duidelijke conclusie is gebaseerd op kennis van het klimaatsysteem en op metingen van bronnen van klimaatverandering, zoals variaties van zonne-intensiteit, vulkaanuitbarstingen en veranderingen in de samenstelling van de atmosfeer.

Hoewel er geen grootschalig veldexperiment mogelijk is waarin de opwarming van de aarde wordt nagebootst en uitgetest, is er vanuit de klimaatwetenschap inmiddels grote zekerheid dat de hoeveelheid broeikasgassen die door menselijke activiteiten deze eeuw en daarna in de atmosfeer terechtkomen, bepalend zijn voor de temperatuurontwikkeling de komende decennia en eeuwen. Natuurlijke factoren zijn weliswaar onvoorspel-

baar, maar de verwachting is dat het effect daarvan op het klimaat in de komende eeuw zullen uitmidelen, net zoals in het verleden is gebeurd.

In de epiloog blikken we vooruit, waarbij we ook naar het scenario zullen kijken voor het geval de zonneactiviteit weer terugvalt naar een Maunder Minimum-achtige toestand van weinig zonnevlekken, zoals het geval was in de periode 1645-1715.

## Emissiescenario's voor broeikasgas

Hoe het klimaat zich in de toekomst ontwikkelt, hangt af van de hoeveelheid broeikasgassen en aerosolen die de mensheid nog gaat uitstoten. Daarom worden er emissiescenario's gemaakt op basis van de verwachte bevolkingsgroei en technologische en sociaaleconomische ontwikkelingen.

Uiteraard is dit ook afhankelijk van de politieke keuzes die – nu en in de toekomst – gemaakt worden om de wereld duurzamer te maken. Dit gaat niet alleen om de vervanging van fossiele brandstoffen door wind-, zonne- en kernenergie, maar ook om de inrichting van onze voedselproductie. Die politieke keuzes zijn bovendien afhankelijk van de internationale afspraken, die gemaakt worden in het kader van de klimaatonderhandelingen. Hoewel de meeste landen wel overtuigd zijn dat er iets moet gebeuren om de opwarming van de aarde te beperken, is het maken van concrete afspraken lastig vanwege de diversiteit van belangen.

Op basis van emissiescenario's kunnen met klimaatmodellen verwachtingen worden gemaakt van het toekomstig klimaat. Dit worden *projecties* genoemd en geen voorspellingen, omdat ze afhankelijk zijn van de emissiescenario's. Hiermee



wordt dus in feite klimaatwetenschap (het doorrekenen van klimaatveranderingen op basis van de emissiescenario's) en klimaatbeleid (de keuze van het meest waarschijnlijke emissiescenario) losgekoppeld.

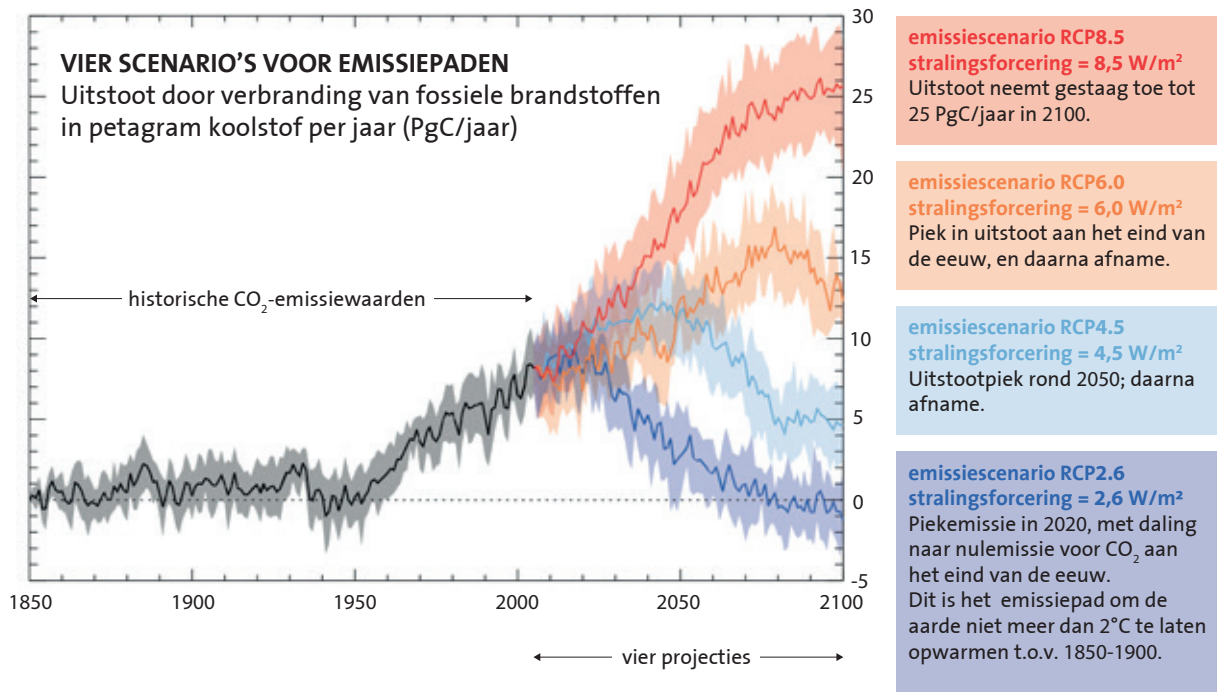
In het vijfde assessment rapport van het *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) uit 2013 zijn klimaatprojecties beschouwd die gebaseerd zijn op vier emissiescenario's (zie figuur CO<sub>2</sub>-emissiescenario's tot 2100). Ze worden *representative concentration pathways* (RCP) genoemd en bevatten tijdreeksen van concentraties broeikasgassen en aerosolen voor de toekomst, in ieder geval tot 2100 en met een ruwe schets tot 2300. Het getal achter RCP is een aanduiding van de

stralingsforcering (in watt per vierkante meter) in 2100 en geeft dus de verwachte verstoring van de stralingsbalans van het klimaatstelsel aan (zie hoofdstuk 5).

Het hoogste scenario, RCP8.5, laat een gestage toename zien van de CO<sub>2</sub>-uitstoot van rond de 10 gigaton koolstof (PgC) per jaar anno 2020 tot in de orde van 25 gigaton koolstof per jaar in 2100. De overige emissiescenario's laten op enig moment in deze eeuw een piek zien met daarna dalende emissies.

Voor het laagste scenario, RCP2.6, ligt de piek van CO<sub>2</sub>-uitstoot rond 2020 met een daling naar een nul-emissie in de tweede helft van de eenentwintigste eeuw. Dit scenario is gemaakt om te

CO<sub>2</sub>-emissiescenario's tot 2100 onderdeel van de Representative Concentration Pathways (RCP). Het getal achter RCP geeft de waarde van de stralingsforcering in watt per vierkante meter ten opzichte van het pre-industriële tijdperk. Zwart: historische CO<sub>2</sub>-emissies in petagram koolstof (PgC, ofwel gigaton koolstof) per jaar. Bron: figuur TS19a, IPCC AR5 WGI, 2013.



laten zien wat het emissiepad voor CO<sub>2</sub> zou moeten zijn om de aarde niet verder te laten opwarmen dan 2°C ten opzichte van het tijdvak 1850-1900. Toen in 2013 het laatste IPCC-rapport verscheen, was de 2-gradendoelstelling in beeld bij de klimaatonderhandelingen.

### Verwachte mondiale temperatuurstijging

Op basis van emissiescenario's voor de uitstoot van broeikasgassen en aerosolen kunnen met klimaatmodellen de consequenties voor de temperatuurontwikkeling worden berekend. Het IPCC schatte in het rapport uit 2013 in dat rond het jaar 2025 de wereldgemiddelde temperatuur 0,9 tot 1,3°C hoger is dan het gemiddelde over het tijdvak 1850-1900. Dit loopt aardig in de pas met de waarnemingen: anno 2020 is sprake van circa 1,1°C opwarming. Deze verwachting is nagenoeg onafhankelijk van de emissiescenario's, aangezien deze pas na langere tijd verschillen vertonen.

Bovendien wordt een aanzienlijk deel van de opwarming bepaald door de reeds uitgestoten CO<sub>2</sub>. Ongeveer de helft van de CO<sub>2</sub>-uitstoot blijft in de atmosfeer, de rest wordt opgenomen door de oceanen en de biosfeer. Door de lange verblijftijd in de atmosfeer accumuleert de CO<sub>2</sub>.

De verwachte temperatuurstijging aan het eind van deze eeuw is sterk afhankelijk van de hoeveelheid broeikasgassen die wereldwijd nog worden uitgestoten. In het hoogste emissiescenario blijft de uitstoot onverminderd stijgen. Hierdoor is het aan het eind van deze eeuw op aarde tussen de 3,2 en 5,4°C warmer dan in de periode 1850-1900 (zie figuur Mondiale temperatuurstijging).

In het laagste scenario (zeer sterke emissiereductie) stabiliseert de CO<sub>2</sub>-uitstoot in de komende tien jaar door ambitieus beleid, om vervolgens drastisch af te nemen door mondiale maatregelen. In dit scenario is de aarde aan het einde van deze eeuw 0,9 tot 2,3°C warmer, met 66% kans op haal-

baarheid van de doelstelling om onder de 2°C te blijven. Voor alle scenario's geldt dat door natuurlijke factoren de mate van opwarming fluctueert.

### **Zeespiegelstijging met 4 millimeter per jaar**

Een belangrijk gevolg van de wereldwijde temperatuurtoename is de stijging van de zeespiegel. Die stijging kan berekend worden op basis van de bijdragen van uitzetting van zeewater, smelten van gletsjers, smelten en afkalven van ijskappen en verandering in grondwater, irrigatie en dammen. Tegen het eind van de eenentwintigste eeuw wordt een stijging verwacht van 26 tot 55 centimeter voor het laagste scenario en van 45 tot 82 centimeter voor het hoogste scenario.

Op basis van recente studies heeft het IPCC inmiddels de projecties voor zeespiegelstijging deze eeuw naar boven bijgesteld van 51 tot 92 cm voor het hoogste scenario (Speciaal Rapport over Oceanen en Ijskappen in een Veranderend Klimaat, SROCC, 2019).

Metingen laten momenteel een stijging van de zeespiegel zien die het hoogste scenario volgt. Bedroeg de zeespiegelstijging gemiddeld over de twintigste eeuw nog ongeveer 1,5 millimeter per jaar, over de laatste tien jaar is dit versneld naar 4 millimeter per jaar. Ook nu nog bestaat onzekerheid hoe snel met name de grote ijskappen van Groenland en Antarctica kunnen smelten en afkalven.

### **Wat als de zon tot rust komt?**

Het is onmogelijk om het toekomstig verloop van natuurlijke factoren te voorspellen, zoals het aantal en sterkte van vulkaanuitbarstingen, de activiteit van de zon en van El Niño's. De effecten op de gemiddelde temperatuur op aarde zijn voor ieder van deze factoren wel bekend, maar die kunnen pas achteraf verdisconteerd worden in klimaatmodellen. Daarmee is men goed in staat om de temperatuurontwikkeling in het verleden te simuleren.

De verwachting voor de komende eeuw is dat de natuurlijke factoren, net als overigens de laatste anderhalve eeuw, geen noemenswaardige trend vertonen of in ieder geval substantieel kleiner zijn dan de temperatuurtrends ten gevolge van de stijging van broeikasgassen. Maar als er vanaf nu tot het eind van deze eeuw tientallen grote vulkaanuitbarstingen à la die van de Pinatubo (de grootste uitbarsting van de twintigste eeuw) plaatsvinden, dan zal dat zeker een afkoelend effect geven.

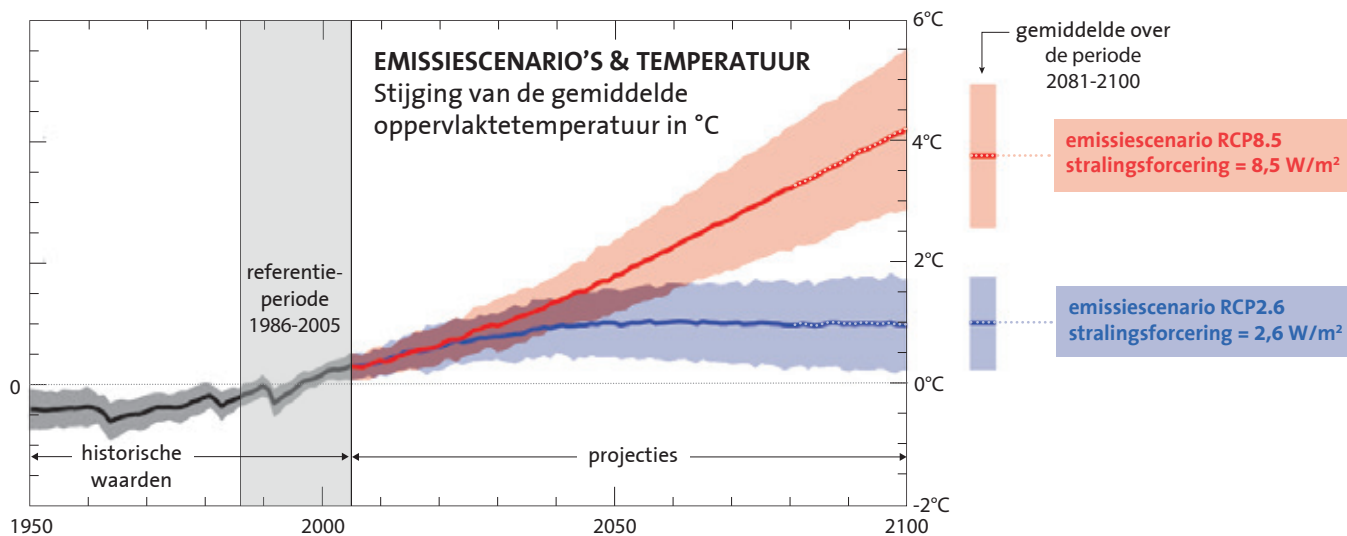
Ook de zon zou zich anders kunnen gaan gedragen dan in de twintigste eeuw. Sommige astrofysici houden er rekening mee dat de zon kan terugvallen op een inactief niveau dat vergelijkbaar is met het Maunder Minimum in de periode 1645-1715 (zie hoofdstuk 5). Aangezien we het effect op de mondiale temperatuur kennen, kunnen we een scenario maken waarin de zon tot rust komt. Dus stel dat er in de komende zeventig jaar nauwelijks zonnevlekken verschijnen, als maat voor een rustige zon, dan betekent dit een mondiale afkoeling van ergens tussen 0,1 tot 0,3°C (zie hoofdstuk 5). Vanwege de traagheid van enkele decennia, door de warmtecapaciteit van de oceanen tussen oorzaak (inactieve zon) en gevolg (temperatuurverandering), zal die afkoeling ergens halverwege deze eeuw bereikt worden. Dit geeft een lichte afname van de temperatuurstijging door de toename van broeikasgassen in de atmosfeer (momenteel circa 0,2°C per decennium). Maar aan het einde van deze eeuw, wanneer de zon weer uit zijn rusttoestand komt, zal dit afkoelende effect teniet worden gedaan door een even grote opwarming.

### **Het klimaatakkoord**

In december 2015 hebben bijna alle landen van de wereld zich geschaard achter het klimaatakkoord van Parijs. In deze overeenkomst is afgesproken dat de gemiddelde stijging van de temperatuur wordt beperkt tot ruim onder de 2°C, en dat inspanningen worden geleverd om de opwarming



**Metingen laten zien dat de stijging van de zeespiegel het hoogste scenario volgt**



Berekende mondiale temperatuurtoename ten opzichte van 1986-2005 voor het hoogste (rood) en laagste (blauw) emissiescenario ten tijde van het IPCC rapport uit 2013. Rechts is de berekende opwarming gegeven voor twee scenario's voor het tijdvak 2081-2100. De zwarte lijn geeft de historische temperatuurontwikkeling weer. De opwarming over het tijdvak 1986-2005 (referentieperiode voor de berekeningen) bedraagt 0,6°C ten opzichte van pre-industrieel (1850-1900). Voor de toekomst is de waarschijnlijke (66%) bandbreedte gegeven. Deze bandbreedte komt overeen met de onzekerheid in klimaatgevoeligheid.

te beperken tot 1,5°C ten opzichte van het pre-industriële niveau van de periode 1850-1900.

Voorafgaand aan dit akkoord is landen gevraagd om plannen voor het terugdringen van de uitstoot van broeikasgassen in te dienen. Opgeteld is dit nog verre van voldoende: becijferd is dat het totaal aan beloofde maatregelen gaat leiden tot een temperatuurstijging van rond de 3°C in 2100.

Aangezien het laagste emissiescenario niet verder ging dan 2°C mondiale opwarming, is aan het IPCC gevraagd om een rapport te produceren, waarin de wetenschappelijke kennis samengevat wordt over de verschillen in klimateffecten tussen 1,5 en 2°C opwarming alsook welke opties er zijn om de doelstelling van het Parijsakkoord te halen. Hiervoor hebben wetenschappers 1,5°C-emissiescenario's ontwikkeld.

Het IPCC speciale rapport 'Global Warming of 1,5°C' werd in oktober 2018 gepubliceerd. Belangrijkste conclusie is dat het op basis van de cumulatieve uitstoot in het verleden geofysisch nog haalbaar is om met een redelijke kans onder de 1,5°C opwarming te blijven. Dat vergt wel dat de emissies snel worden gereduceerd, en – in bijna

alle scenario's – na 2050 negatief moeten worden, wat wil zeggen dat er mondiaal netto CO<sub>2</sub> uit de atmosfeer wordt verwijderd. Met het huidige opwarmingstempo wordt 1,5°C opwarming ten opzichte van pre-industrieel ergens tussen 2030 en 2052 bereikt.

Iedere halve graad meer opwarming leidt tot grotere effecten en dus tot grotere risico's; ook een opwarming van 1,5°C heeft risico's. Het rapport laat zien dat risico's bij 1,5 en 2°C opwarming groter zijn dan in eerdere rapporten werden ingeschat. Ook wordt ingeschat dat het optreden van onomkeerbare effecten, zogeheten *tipping points*, ergens tussen de 1,5 en 2°C opwarming zou kunnen liggen. Voorbeelden van dergelijke effecten zijn het versneld afsmelten van ijskappen en onherstelbare schade aan ecosystemen.

### De mens veroorzaakt een versnelde opwarming

Er wordt vaak gevraagd of er een ideale temperatuur van de aarde bestaat. Het antwoord is negatief, die bestaat niet, wel is de snelheid van de temperatuurverandering van belang. Wat er toe doet, is dat de huidige mensheid zich gesetteld heeft volgens



De door de mens op gang gebrachte klimaatverandering gaat een factor 40 sneller. Als we niets doen kan dat oplopen tot een factor 100

de klimatologische omstandigheden van het Holoceen, het tijdperk na de laatste ijstijd, twaalf duizend jaar geleden. Onze maatschappij is hierop ingericht. Snelle klimaatveranderingen, of dit nu een snelle opwarming of afkoeling betreft, hebben nadelige gevolgen en vragen om ingrijpende aanpassingen als we ons huidige leefgebied willen behouden.

Het huidige tempo van opwarming van  $1,1^{\circ}\text{C}$  in ruim een eeuw is bij benadering een factor 40 keer sneller dan dat de natuur erover gedaan heeft om van de laatste ijstijd tot het pre-industriële klimaat te komen. Als helemaal niets gedaan wordt aan de uitstoot van broeikasgassen wordt het hoogste scenario (RCP8.5) gevolgd, waarbij de temperatuur aan het eind van deze eeuw sinds het pre-industriële tijdperk net zo veel is gestegen, circa  $4$  à  $5^{\circ}\text{C}$ , als het verschil in mondiale temperatuur tussen een ijstijd en een interglaciaal. Dan gaat de door de mens op gang gebrachte klimaatverandering een factor 100 sneller dan wat de natuur ooit heeft gedaan.

Aan de snelheid van opwarming kunnen we wat doen, namelijk het beperken van de uitstoot van broeikasgassen, het liefst zodanig dat de doelstellingen van het klimaatakkoord van Parijs worden gehaald, namelijk  $1,5^{\circ}\text{C}$  ten opzichte van 150 jaar geleden en niet meer. En zelfs dan zullen de in gang gezette langzame processen niet meer gestopt kunnen worden. Zo is de verwachting dat de zeespiegel zelfs voor het Parijsscenario op een termijn van millennia 5 tot 12 meter zal stijgen, vooral vanwege het smelten van ijskappen.

### Tot slot het einde

Ooit, over een heel lange tijd, zal de zon wel alles-overheersend zijn over het klimaat. Sinds het ontstaan van de aarde 4,5 miljard jaar geleden, is de zon al ongeveer 30% feller gaan schijnen. Dit proces zal zich voortzetten. De verwachting is dat over vijf miljard jaar het leven van de zon eindigt als

rode reus (zie hoofdstuk 1), waardoor de aardbaan zich binnen de zonne-atmosfeer zal bevinden. Op die tijdschaal doet de samenstelling van de atmosfeer er echt niet meer toe: een alles verzengende hitte is over de aarde gekomen, en de mensheid is dan al heel lang daarvoor verdwenen.

## Meer informatie

### Boeken

Zonwijzer, meer zicht op zon en licht. Han van der Rhee, 2014.

Chasing the Sun, A History of the Star That Gives Us Life, Richard Cohen, 2010.

Exoplaneten. De zoektocht naar nieuwe werelden. Joris Jansen, 2017.

Planetenjagers, op zoek naar buitenaards leven. Lucas Ellerbroek, 2014.

### Rapporten

Global energy system based on 100% renewable energy; Power, heat, transport and desalination sectors, LUT University & EnergyWatchGroup (2019): <http://bit.ly/3dpWRoL>

Zonpositief: Zonne-energie op weg naar impact. Whitepaper TNO (2021): <http://bit.ly/39y8HMz>

Whitepaper: Scenario's toekomstig duurzaam en betaalbaar energiesysteem (2020): <http://bit.ly/3wjmaBU>

### Websites

De actuele situatie op de zon: [www.spaceweather.com](http://www.spaceweather.com)

De zon uit de stoomcursus sterrenkunde van Govert Schilling: <http://bit.ly/3m67r8C>

KlimaatHelpdesk voor vragen over klimaatverandering: [www.klimaathelpdesk.org](http://www.klimaathelpdesk.org)

Het nationale data- en kenniscentrum voor weer, klimaat en seismologie: [www.knmi.nl](http://www.knmi.nl)

Nieuws en rapporten van de Intergouvernementele Werkgroep inzake Klimaatverandering (IPCC) over de risico's van klimaatverandering: [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)

Over de bouw van werelds grootste kernfusieapparaat: <http://iter.org>

Het klimaatakkoord: [www.klimaatakkoord.nl](http://www.klimaatakkoord.nl)

Wat is het broeikaseffect? <http://bit.ly/3ucowgY>

### Video

Zononderzoek (Het Klokhuis):

<http://bit.ly/2PfGQ1J>

Over zoonanbidders en zonnehaters (VPRO):

<http://bit.ly/3ucoKEQ>

Reis naar de zon van (De Kennis van Nu):

<http://bit.ly/2PfWzZX>

Waarom verbrandt je huid in de zon?:

<http://bit.ly/39vGK81>

Bestaat de winterdepressie? (UvN):

<http://bit.ly/3dllBPf>

Waarom worden we gefrituurd en bevroren als de zon sterft?: <http://bit.ly/3rHKfhY>

Over de allereerste zonnecellen bij Bell in de VS:

<http://bit.ly/3m67gtY>

Hoe kun je vanaf de aarde zien waar sterren van gemaakt zijn?: <http://bit.ly/3rErsnR>

De zon: kernfusie (Labyrint): <http://bit.ly/3fv1Mrb>

## Auteurs

Dr. Hans Breeuwer is universitair hoofddocent moleculaire evolutiebiologie bij het Instituut voor Biodiversiteit en Ecosysteem Dynamica van de Universiteit van Amsterdam.

Prof. dr. Jos van den Broek is emeritus hoogleraar wetenschapscommunicatie in Leiden en lid van de raad van advies van de stichting Biowetenschappen en Maatschappij.

Ir. Rob Buiter is freelance wetenschapsjournalist.

Prof. dr. Niek Lopes Cardozo is hoogleraar science and technology of nuclear fusion aan de TU Eindhoven.

Dr. Rob van Dorland is senior adviseur klimaatverandering bij het KNMI.

Dr. Jannes van Everdingen is dermatoloog in ruste en voorzitter van het bestuur van stichting Biowetenschappen en Maatschappij.

Dr. Roy Erkens is evolutiebioloog en universitair hoofddocent evolutionaire biologie van planten aan de Universiteit van Maastricht, en gast-onderzoeker bij het Naturalis Biodiversity Center.

Dr. ir. Astrid van de Graaf is freelance wetenschapsjournalist en eindredacteur van De Ingenieur.

Dr. Frank de Gruijl, gepensioneerd, was onderzoeker bij de afdeling huidziekten van het Leids Universitair Medisch Centrum.

Ans Hekkenberg, MSc., is redacteur bij New Scientist en freelance wetenschapsjournalist.

Helga van Leur is meteoroloog & klimaat- en duurzaamheidsambassadeur.

Dr. Klara Mosterd is universitair hoofddocent en als dermatoloog werkzaam binnen de staf van de afdeling dermatologie van het Maastricht Universitair Medisch Centrum+.

Prof. dr. Jelle Reumer is emeritus hoogleraar vertebrate paleontology in Utrecht, publicist en penningmeester van het bestuur van stichting Biowetenschappen en Maatschappij.

Govert Schilling is freelance wetenschapsjournalist en publicist op gebied van sterrenkunde en ruimteonderzoek.

Prof. dr. Anne Schulp is onderzoeker bij museum Naturalis in Leiden en hoogleraar vertebratenpaleontologie aan de Universiteit Utrecht.

Prof. dr. Wim Sinke is natuurkundige, principal scientist en programmacoördinator Zonne-energie bij TNO. Daarnaast is hij deeltijdhoogleraar photovoltaic energy conversion aan de Universiteit van Amsterdam.

# Illustratieverantwoording

Cover: iStockphoto

Esther van Berk: p. 3

ESA / ATG medialab: p. 4-5

NASA / SDO / AIA: p. 7

Jos van den Broek naar [http://chandra.harvard.edu/edu/formal/variable\\_\\_stars/HR\\_\\_student.html](http://chandra.harvard.edu/edu/formal/variable__stars/HR__student.html): p. 8 o

Jan Reinier van der Vliet / Stip Media: p. 11

iStockphoto: p. 13, 19 lo, 65, 66, 89

ANP Foto / Science Photo Library: p. 14-15

MARUM / Center for Marine Environmental Sciences, University of Bremen (CC-BY 4.0): p. 16

Patrick J. Krug / Cal State L.A.: p. 21

Shutterstock: p. 22, 56, 59, 64

NASA Ames / JPL-Caltech / T. Pyle: p. 23

ESO (CC-BY 4.0): p. 25

Th. B. Roep: p. 27

ANP Foto / Hollandse Hoogte / Marco van Middelkoop: p. 28-29

Bron: TNO White paper Zonpositief (2021)/  
Renewables 2020: Global Status Report, REN21  
(2020): p. 31

HyET Solar: p. 34 o

TNO: p. 34 b

Bron: TNO White paper Zonpositief: zonne-energie  
op weg naar impact (2021): p. 35

JCR / Solar Visuals BV: p. 36 l, r

ITER: p. 37

Alamy / Imageselect: p. 39, 67, 75

TU/e, Bart van Overbeeke: p. 41

Anne Schulp: p. 43

Maarten Olthof: p. 45

Depositphotos: p. 46-47

ANP Foto / Hollandse Hoogte / Berlinda van Dam:  
p. 49

Keystone-France / Gamma-Rapho via Getty Images:  
p. 50

Foto's CC-BY 4.0: p. 52

Rijksmuseum van Oudheden, Leiden: p. 60

Dreamstime: p. 61

Frans Lanting / Mint Images / Nature in Stock:  
p. 68-69

Helga van Leur: p. 79

SOHO, the EIT Consortium, and the MDI Team:  
p. 81

Dit cahier is mede tot stand gekomen door:



## In dit nummer:

- › **De geboorte en levensloop van onze zon**
- › **Hoe het leven op aarde haar bestaan dankt aan de zon**
- › **Maakt zonlicht ons gelukkig en gezonder?**
- › **Kan zonne-energie straks fossiele brandstof gaan vervangen?**
- › **Wat is de invloed van de zon op het klimaat en klimaatverandering?**

### REDACTIE

Jos van den Broek  
Jannes van Everdingen  
Rob van Dorland  
Astrid van de Graaf

Met een voorwoord van Govert Schilling  
En een interview met zonneprofessor Kees de Jager

Vandaag wordt het weer extreem zonnig en zeer warm met zonkracht 7, waarschuwt het KNMI. Dat is de achtste op een rij van deze maand. Een nieuw record. Hoge zonkracht betekent dat veel ultraviolette straling van het zonlicht de aarde zal bereiken, en dat de kans op verbranding toeneemt. Door klimaatverandering zullen we dit soort waarschuwingen vaker horen. En volgens klimaatwetenschappers wereldwijd ligt dat niet aan de zon maar aan de mens.

De zon is ons bekendste en belangrijkste hemellichaam, de bron van alle licht en warmte op aarde. En van het leven: zonder zon zou er eenvoudig geen leven mogelijk zijn, zouden we geen energie en geen voedsel hebben. Deze bijzondere ster staat in al zijn facetten centraal in dit cahier. Zijn invloed op het ontstaan van leven, op onze gezondheid, de energievoorziening en het klimaat en klimaatverandering. Hier doen uiteenlopende wetenschappers verslag van: sterrenkundigen, archeologen, klimatologen en dermatologen. Dit cahier gaat over onze zon die zo vanzelfsprekend elke dag opkomt en weer onder gaat, die zover weg is en toch zo dichtbij.

BEKIJK  
DIT THEMA  
OP ONZE  
WEBSITE

 **bio** wetenschap+  
maatschappij

