

Veranderingen in het klimaat

*Antwoorden op veelgestelde vragen over
natuurwetenschappelijke aspecten van klimaatverandering*

Paul Crutzen
Gerbrand Komen
Koos Verbeek
Rob van Dorland
Aad van Ulden

Een uitgave ter gelegenheid
van het 150-jarig jubileum van het
Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut



■ *Wat vindt u in deze brochure?*

Deze brochure gaat in op veelgestelde vragen over natuurwetenschappelijke aspecten van klimaatverandering. Op de rechterpagina's worden hoofdvragen over dit onderwerp behandeld. Links wordt ingegaan op kritische vragen over de onderzoeksresultaten.

Hoofdvragen:

Wat is het klimaat?	5
Wat bepaalt het huidige klimaat?	5
Hoe verandert het klimaat?	7
Waarom verandert het klimaat?	11
Hoe zal het klimaat verder veranderen?	15

Kritische vragen:

Overheerst waterdamp het broeikaseffect?	6
Hoe betrouwbaar zijn de oude temperaturen?	6
Kan de huidige wereldtemperatuur goed worden bepaald?	10
Ontkennen satellieten de opwarming?	10
Een graadje erbij kan toch geen kwaad?	12
Verstoort de verstedelijking de waarnemingen?	12
Zal de nieuwe ijstijd de opwarming voorkomen?	14
Overheerst de zon de andere klimaatfactoren?	14
Waarom nam de temperatuur niet alsmaar toe sinds 1750?	14
Waarom is de menselijke invloed op het klimaat zo lang betwijfeld?	14
Bepaalt de temperatuur de hoeveelheid broeikasgassen in plaats van andersom?	14
Dempen aërosolen de opwarming?	16
Hoe kun je het klimaat voorspellen als het weerbericht van de volgende week vaak al niet deugt?	16
Dempen wolken de opwarming?	16
Komt er een nieuwe ijstijd door het stilvallen van de Golfstroom	18

■ *Wat is het klimaat?*

Het weer wisselt van dag tot dag en is van een spreekwoordelijke grilligheid. Toch zijn algemene uitspraken over het weer mogelijk. In de winter is het kouder dan in de zomer, en in Spanje is de kans op zonnig zomerweer veel groter dan in Nederland. Dit soort patronen maakt deel uit van het klimaat, dat kan worden omschreven als het gemiddelde weer in een bepaald gebied, in een bepaalde periode.

De middeling maakt dat de veranderlijkheid van het weer in het klimaat plaatsmaakt voor ogenschijnlijk kleine verschuivingen, die evenwel zeer grote gevolgen kunnen hebben. Zo is het klimaat in het Alpengebied sinds 1850 met ongeveer één graad opgewarmd. Dat lijkt onbetekenend maar het heeft ertoe geleid dat de helft van het gletsjerijs is verdwenen.

Het klimaat vertelt wat je van het weer kunt verwachten en geeft daarmee houvast aan mens en natuur. Een vakantiebestemming, de gewaskeuze van een boer, de dijkhoogte langs de rivieren, maar ook de overwinteringsperiode van trekvogels, allemaal hangen ze samen met het klimaat.

■ *Wat bepaalt het huidige klimaat?*

Het klimaat varieert met de breedtegraad. Dichterbij de evenaar is het warmer, terwijl de temperatuur poolwaarts afneemt. Dat verband is terug te voeren tot de hoek waaronder de zonnestralen het aardoppervlak bereiken: hoe groter de hoek des te warmer het klimaat. De jaarlijkse verandering in die hoek, als gevolg van de baan van de aarde om de zon, verklaart de seizoenen, die in zekere zin kunnen worden gezien als een jaarlijks terugkerende klimaatschommeling.

Met de breedtegraad is niet alles gezegd: Rome ligt iets noordelijker dan New York, maar heeft toch een warmer klimaat. Dat wordt veroorzaakt door een samenspel van de oceaan en de atmosfeer. De overheersende stromingspatronen in de oceanen en de atmosfeer verspreiden de warmte over de aarde. Ze hebben daarmee een grote invloed op het lokale klimaat. Zo transporteert de Noord-Atlantische Golfstroom warm tropisch oceaanwater naar het noorden. De overheersende westenwinden op het Noordelijk Halfrond nemen die warmte mee naar het Europese continent met een mild klimaat tot gevolg.

Sommige klimaatinvloeden van de oceaan doen zich in wisselende mate voor. Normaal gesproken stuwen de passaatwinden in het oostelijk deel van de Stille Oceaan het warme oppervlaktewater langs de evenaar naar het westen.

Overheerst waterdamp het broeikaseffect?

Waterdamp is het belangrijkste broeikasgas en neemt een bijzondere positie in omdat water in overvloed aanwezig is op aarde. De concentratie waterdamp in de lucht wordt in hoofdzaak bepaald door de temperatuur. De directe invloed van menselijke activiteiten op de waterdamp in de atmosfeer is gering. Indirect is er beïnvloeding wanneer de temperatuur stijgt, bijvoorbeeld door een toename van de hoeveelheid CO₂. In dat geval stijgt de hoeveelheid waterdamp mee, waardoor vanwege het broeikaseffect van die extra waterdamp de temperatuur nog eens extra toeneemt. Zo wordt het broeikaseffect van CO₂ met ongeveer een factor twee versterkt. Waterdamp speelt dus een sleutelrol, maar verzwakt de invloed van de andere broeikasgassen niet.

Hoe betrouwbaar zijn de oude temperaturen?

Vóór 1860 zijn er maar weinig directe temperatuurmetingen met thermometers beschikbaar. Daarom wordt de temperatuur in het verdere verleden op indirecte wijze gereconstrueerd uit bijvoorbeeld boomringen en uit andere waarnemingen die verband houden met de temperatuur. De meest geavanceerde reconstructies maken gebruik van gegevens met een zo groot mogelijk geografische spreiding en houden rekening met de ruimtelijke patronen in klimaatfluctuaties. De verschillen tussen de reconstructies betreffen met name de sterkte, niet zozeer het moment van de fluctuaties. Recent onderzoek heeft aan het licht gebracht dat de statistische technieken die gebruikt worden bij temperatuurreconstructies de neiging hebben temperatuurfluctuaties te onderschatten. Het gaat hierbij om enkele tienden van graden bovenop de tot dusver berekende fluctuaties in de orde van een halve graad in het laatste millennium.

Klimaatreconstructie is een actief onderzoeksgebied. De komende jaren zullen meer details bekend worden over het wereldklimaat in het verre verleden, maar het is onwaarschijnlijk dat het beeld van een opvallende opwarming in de 20ste eeuw zal moeten worden bijgesteld.

Dat warme water maakt plaats voor kouder water uit de diepte. Daardoor is het oppervlaktewater in het oosten van de Stille Oceaan kouder dan in het westen. Dit temperatuurverschil veroorzaakt een luchtdrukverschil waardoor de passaatwinden op hun beurt versterken en de cirkel gesloten is. Eens in de drie tot zeven jaar raakt dat systeem doorbroken waardoor de passaatwinden in kracht afnemen en de oostelijke watertemperatuur flink oploopt, ten koste van de temperatuur in het westen. Dat verschijnsel, El Niño genaamd, heeft een wereldwijde invloed op de bewolking, de neerslag en de temperatuur en dus het klimaat. Na verloop van tijd hervindt het systeem zijn oorspronkelijke toestand.

Een andere belangrijke klimaatfactor is het broeikaseffect. Ongeveer dertig procent van de inkomende zonnestrallen wordt door de aarde en atmosfeer gereflecteerd, en heeft daarmee geen invloed op de temperatuur. De rest verwarmt vooral het landoppervlak en de oceanen. De aarde raakt die energie weer kwijt door de warmte uit te stralen in de atmosfeer en uiteindelijk het heelal. Zo ontstaat een evenwicht. Een half procent van de atmosfeer bestaat van nature uit broeikasgassen die het vermogen hebben de warmte aan het aardoppervlak vast te houden. Zonder dat effect zou de gemiddelde grondtemperatuur -18°C bedragen en was de aarde dus een dode planeet. Het natuurlijke broeikas effect verhoogt die temperatuur met 33°C naar $+15^{\circ}\text{C}$ en is dus van levensbelang.

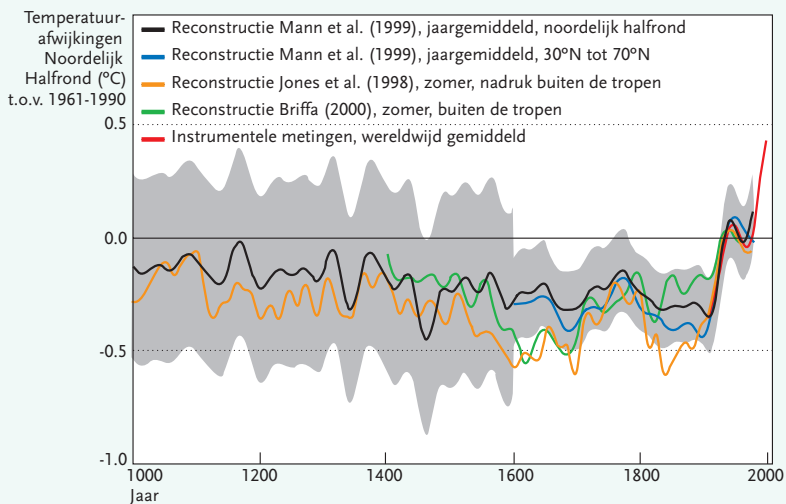
De mens is in staat gebleken het natuurlijke broeikas effect te versterken door de grootschalige uitstoot van broeikasgassen. Het huidige wereldklimaat wordt daarom mede bepaald door deze menselijke invloed.

Voor de rest wordt het klimaat bepaald door lokale omstandigheden zoals hoogte en mate van begroeiing, de aanwezigheid van een meer of een rivier, de kleur van het aardoppervlak en verstedelijking.

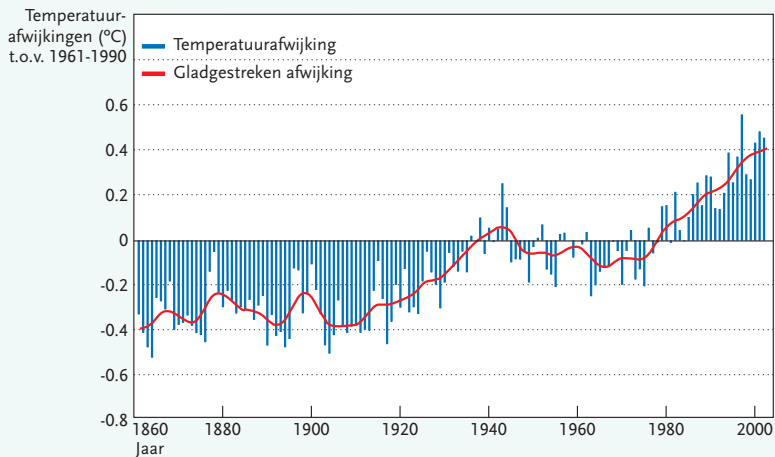
■ *Hoe verandert het klimaat?*

Naar menselijke maat gemeten lijkt het klimaat een stabiele factor. Toch blijken er allerlei klimaatvariaties op te treden. Zo wisselen wereldwijde ijstijden en warmere perioden elkaar af met tussenpozen van vele tienduizenden jaren. De laatste ijstijd is 10.000 jaar geleden afgelopen. De eerstvolgende wordt pas over vele duizenden jaren verwacht, dus voorlopig is dat niet aan de orde.

Ook in het meer recente verleden hebben zich klimaatfluctuaties voorgedaan. Zo waren de Europese temperaturen van de 10de tot de 14de eeuw aan de hoge kant (de warme middeleeuwse periode), terwijl de jaren 1650-1750 kouder waren (de



Figuur 1: Vier reconstructies van de gemiddelde temperatuur op het Noordelijk Halfrond in de afgelopen 1000 jaar. Het grijze gebied geeft de onzekerheid aan in de meest geavanceerde reeks (zwarte getrokken lijn).
 Figuur 1: Bron: Third Assessment Report, IPCC



figuur 2: De wereldgemiddelde temperatuur van 1861 tot en met 2003
 Figuur 2: Bron: Climatic Research Unit, Universiteit van East Anglia

zogenaamde Kleine IJstijd). Dit soort informatie kan worden afgeleid uit de dikte van boomringen, koralen, ijsboringen en gelaagde sedimenten in meren en oceanen.

In figuur 1 zijn vier reconstructies weergegeven van het verloop van de temperatuur op het Noordelijk Halfrond. De spreiding van de lijnen zegt iets over de precisie waarmee dat kan gebeuren. Recent onderzoek heeft aan het licht gebracht dat de statistische technieken die gebruikt worden bij deze temperatuurreconstructies de neiging hebben temperatuurfluctuaties te onderschatten. De mate waarin is vooralsnog niet vastgesteld.

Er zijn historische bronnen beschikbaar die een indruk geven van het klimaat in de loop der tijd. Die informatie is in redelijke overeenstemming met de wetenschappelijke gegevens. Zo is de Kleine IJstijd terug te vinden op de ijstaferelen van de oude Hollandse meesters. Wetenschappelijk onderzoek suggereert dat deze klimaatfluctuaties regionaal plaatsvonden en ten dele samenhangen met regionale veranderingen in overheersende lucht- en oceaanstromingen. Daarnaast hebben vulkaanuitbarstingen en variaties in zonneactiviteit hier een rol gespeeld.

Kijkt men naar de wereldgemiddelde temperatuur dan lijken de regionale veranderingen deels uit te middelen. De meeste studies concluderen dat het wereldklimaat als geheel in de periode 1000-1900 erg stabiel is geweest: er is sprake van een licht dalende trend van 0,15°C.

De tijd erna laat op gematigde en hogere breedte een sterke opwarming zien die zich in twee fasen heeft voorgedaan (zie figuur 2). Vanaf 1910 tot 1945 is de temperatuur opgelopen met 0,4°C. Deze opwarming wordt in verband gebracht met een verhoging van de zonneactiviteit en de afwezigheid van grote vulkaanuitbarstingen (een verdere verklaring volgt in het volgende hoofdstuk). Daarna daalde de temperatuur, in samenhang met de stabilisatie van de zonneactiviteit en een reeks krachtige vulkaanuitbarstingen, in de periode 1945-1976 met 0,15°C.

Vervolgens heeft zich vanaf 1976 tot aan het heden een opwarming met 0,4°C voorgedaan. Deze opwarming, onder de koelende invloed van grote vulkaanuitbarstingen in een periode van constante zonneactiviteit, is vooral veroorzaakt door de menselijke invloed op het klimaat en heeft de aarde in een uitzonderlijk warme toestand gebracht. De toptien van wereldgemiddeld warme jaren uit het achterliggende millennium is helemaal gevuld met jaren van na 1990.

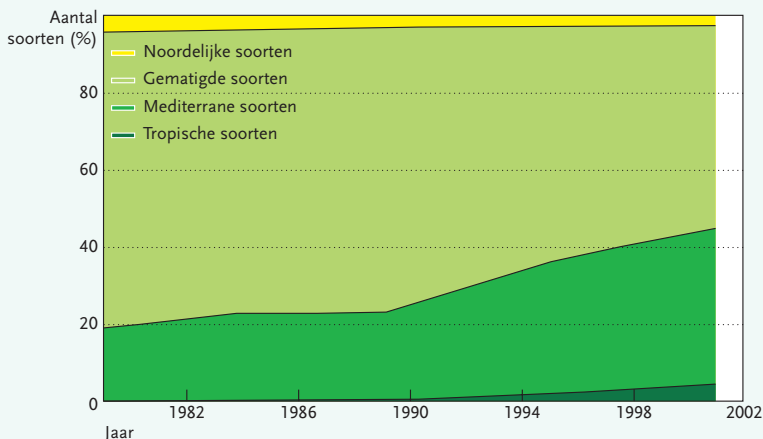
De opwarming in de 20ste eeuw blijkt niet alleen op de thermometer maar ook uit allerlei effecten die ermee samenhangen. Door de temperatuurstijging is de bedekking van de aarde met sneeuw en ijs afgenomen. De zeespiegel is met 10 tot 20 cm gestegen, door opwarming en daarmee het uitzetten van het zeewater en het

Kan de huidige wereldtemperatuur goed worden bepaald?

De toevallige variaties in de temperatuur op een locatie zijn veel groter dan de variaties in het wereldgemiddelde. De berekening van dat gemiddelde moet dan ook zorgvuldig gebeuren. Het blijkt dat 100 gelijkmatig over de aarde verdeelde meetstations volstaan om een betrouwbare wereldtemperatuur vast te stellen. Er zijn 5000 stations beschikbaar. De wereldgemiddelde oppervlaktetemperatuur kan dan ook zonder problemen worden bepaald met een precisie van ongeveer 0,2°C. Het klimaatonderzoek richt zich steeds meer op de ruimtelijke patronen van regionale klimaatverandering. Voor dergelijke studies is het aantal meetstations in met name de oceanen, en de ontwikkelingslanden helaas nog onvoldoende.

Ontkennen satellieten de opwarming?

Satellieten kijken door de atmosfeer en meten de temperatuur van dikke luchtlagen. Zo kan de gemiddelde atmosferische temperatuur in de onderste 8 kilometer worden bepaald. Het blijkt dat deze temperatuur in bepaalde perioden afwijkt van de grondtemperatuur. Die verschillen worden bevestigd door ballonoplatingen en duiden op een reëel, fysisch effect, niet op meetfouten. De verklaring wordt gezocht in het effect van wolken, stofdeeltjes, El Niño en ozon op de temperatuur in de bovenlucht. De computermodellen waarmee het klimaat gesimuleerd wordt zijn nog niet goed in staat dat effect goed weer te geven. De satellietmetingen ontkennen de opwarming dus niet, maar geven aan dat de klimaatmodellen verbeterd moeten worden met betrekking tot de beschrijving van de bovenlucht.



figuur 3:

Recente verschuiving in de Nederlandse soorten korstmossen

Figuur 3: Bron: Lichenologisch Onderzoeksbureau Nederland

smelten van het landijs. De hoeveelheid neerslag op gematigde en hogere breedtegraden is toegenomen, terwijl in de subtropen een afname is geconstateerd. Uit waarnemingen van de vegetatie blijkt dat wereldwijd de lengte van het groeiseizoen (jaarlijkse periode van biologische activiteit) is toegenomen. Al deze feiten wijzen op een opwarming van het wereldwijde klimaat.

Ook in Nederland is de opwarming merkbaar. Er is hier in de loop van de 20ste eeuw een graad bijgekomen. De toptien van warme Nederlandse jaren bestaat uit jaren na 1989. De ontwikkeling van de Nederlandse temperatuur blijkt in grote lijnen in de pas te lopen met de wereldwijde ontwikkeling. Het groeiseizoen is in samenhang met de opwarming met een maand verlengd. Tropische soorten doen hun intrede terwijl het aantal noordelijke soorten afneemt, zoals duidelijk blijkt uit de verschuivingen in de samenstelling van de Nederlandse korstmossen (zie figuur 3). De winterse neerslag over ons land is in de loop van de 20ste eeuw toegenomen.

■ *Waarom verandert het klimaat?*

Zoals hierboven aan de orde kwam wordt het klimaat bepaald door een aantal factoren. Veranderingen in die klimaatfactoren brengen veranderingen in het klimaat met zich mee.

Zo worden ijstijden gestuurd door zeer langzame, periodieke variaties in de positie van de aarde ten opzichte van de zon. Deze periodieke variaties duren vele tienduizenden jaren en leiden tot variaties in de zonne-instraling op aarde. Door allerlei processen wordt een aldus gestarte afkoeling versterkt. Zo neemt bij afkoeling het sneeuw en ijsoppervlak toe, terwijl de concentraties van broeikasgassen afnemen (zie figuur 4) Hierdoor wordt meer zonnestraling gereflecteerd, terwijl de broeikasgassen minder warmte vasthouden. Dergelijke versterkende processen worden positieve terugkoppelingen genoemd en zijn kenmerkend voor het klimaatstelsel. Ijstijden zijn zeer ingrijpend. De volgende ijstijd is de komende duizenden jaren nog niet te verwachten, en is daarmee niet relevant voor het huidige klimaatdebat.

Er zijn ook snellere klimaatvariaties, die van nature optreden. Zo kunnen variaties in de sterkte van de door de zon uitgezonden straling doorwerken in het klimaat. Daarnaast kunnen variaties in de hoeveelheid ultraviolette straling de chemische samenstelling van de hoge atmosfeer beïnvloeden en zijn er vermoedens dat fluctuaties in de zonnwind (een hoogenenergetische deeltjesstroom) in samenhang met kosmische straling zouden kunnen doorwerken in het klimaat.

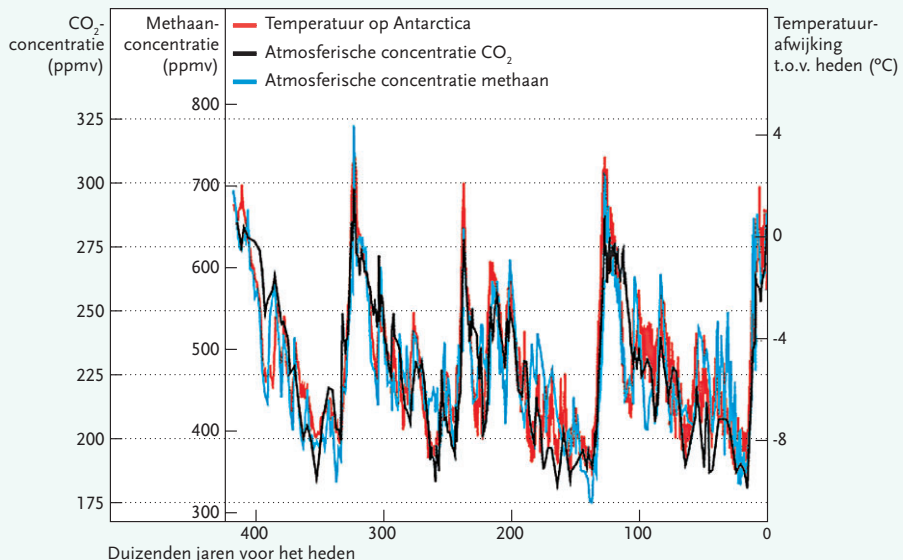
Een graadje erbij kan toch geen kwaad?

In landen met een gematigd klimaat kan een bescheiden opwarming voor bepaalde sectoren goed uitpakken. Voor de (sub)tropen is iedere temperatuurstijging nadelig omdat het er al warm is. De poolgebieden zijn kwetsbaar omdat het ijs sterk reageert op opwarming.

Bovendien warmen de polen veel sterker op dan de andere delen in de wereld. Voor Nederland geldt dat met name de effecten op de waterhuishouding (meer neerslag, hogere rivierafvoeren, hogere zeespiegel) nadelig zijn. Verder zijn de ecosystemen erg kwetsbaar voor snelle opwarming.

Verstoort de verstedelijking de waarnemingen?

De aanwezigheid van een stad heeft een plaatselijk verhogend effect op de temperatuur. Het is denkbaar dat de toenemende verstedelijking een kunstmatige verhoging van de gemeten wereld-gemiddelde temperatuur tot gevolg heeft, omdat in de loop der tijd een toenemend aantal meet-stations in stedelijk gebied is komen te liggen. Onderzoek heeft duidelijk gemaakt dat dat effect maximaal 0,1°C bedraagt. De waargenomen opwarming van ongeveer 0,6°C in de 20ste eeuw is dus niet te wijten aan het stadseffect.



figuur 4:

Het parallele verloop van de atmosferische concentraties CO₂ (zwarte lijn) en methaan (blauwe lijn) en de temperatuur in de afgelopen 400.000 jaar

Figuur 4: Bron: Third Assessment Report, IPCC

Grote vulkaanuitbarstingen brengen veel stof in de atmosfeer waardoor het zonlicht deels wordt tegengehouden, met lagere temperaturen tot gevolg. Dat effect is, samen met de veranderingen in de kracht van de zon hoofdzakelijk verantwoordelijk voor de ontwikkeling van de wereldgemiddelde temperatuur in de afgelopen duizend jaar, tot aan het midden van de 20ste eeuw. De opwarming van de aarde van 1910 tot 1945 is met name veroorzaakt door een toename van de kracht van de zon en de langdurige afwezigheid van grote vulkaanuitbarstingen. De opwarming vanaf 1976 tot aan het heden kan wetenschappelijk alleen worden begrepen door naast de natuurlijke klimaatfactoren de menselijke invloed op het klimaat in rekening te brengen.

Het belangrijkste broeikasgas na waterdamp is kooldioxide oftewel CO₂. Andere broeikasgassen zijn methaan, lachgas, CFK's en dergelijke, en ozon. CO₂ maakt onderdeel uit van de biologische kringloop. Het komt vrij bij de stofwisseling, is niet giftig en kan door planten worden omgezet in hout, vezels, voedingsstoffen etcetera. Methaan en lachgas komen vrij bij intensieve landbouw en veeteelt. De CFK's worden uitgestoten bij industriële activiteiten.

De hoeveelheden CO₂ en methaan in de lucht hangen sterk samen met de toestand van het wereldwijde klimaat. Uit ijsboringen op Antarctica blijkt dat het verloop van de atmosferische concentratie CO₂ en methaan in de afgelopen 420.000 jaar binnen zekere grenzen varieert in samenhang met de afwisseling van ijstijden en warmere periodes (zie figuur 4). Het is gebleken dat sinds de aanvang van de industriële revolutie de hoeveelheid broeikasgassen drastisch is toegenomen als gevolg van menselijke activiteiten zoals de verbranding van aardolie, gas en kolen, intensieve landbouw en veeteelt en grootschalige boskap.

De huidige concentratie CO₂ (379 ppmv) ligt 35% hoger dan de concentratie van voor de industriële revolutie en valt ver buiten de natuurlijke marge van de afgelopen 420.000 jaar. Het is wetenschappelijk bewezen dat die toename door de mens is veroorzaakt. Zoals hierboven ter sprake kwam bij de vraag: "Wat bepaalt het klimaat?", verhoogt het natuurlijke broeikaseffect de temperatuur met 33°C. CO₂ neemt daarvan 12°C voor zijn rekening. Het lijkt het dus zeer aannemelijk dat de toename van de CO₂-concentratie met 35% een aanzienlijk klimaateffect heeft. Het daadwerkelijk aantonen van dat effect is erg lastig omdat het klimaatsysteem op een uiterst complexe manier reageert op verstoringen.

Zal de nieuwe ijstijd de opwarming voorkomen?

De menselijke invloed op het klimaat is nu al merkbaar en zal in de loop van deze eeuw aanmerkelijk toenemen. De nieuwe ijstijd laat nog duizenden jaren op zich wachten en komt dus veel te laat om het broeikas effect te compenseren.

Overheerst de zon de andere klimaatfactoren?

De variaties in de kracht van de zon zijn verantwoordelijk geweest voor ongeveer $0,15^{\circ}\text{C}$ van de temperatuurstijging van $0,4^{\circ}\text{C}$ in de eerste helft van de 20ste eeuw. Daarna was de zonne-invloed marginaal. Voor zover de kennis nu reikt is de zon dus een belangrijke maar niet een overheersende factor voor klimaatveranderingen.

Waarom nam de temperatuur niet alsmaar toe sinds 1750?

Sinds de aanvang van de industriële revolutie heeft de mens de hoeveelheid broeikasgassen en daarmee het broeikas effect in toenemende mate verhoogd. Toch daalde de temperatuur in de periode 1945-1975. Dat kan worden verklaard door de invloed van de zon, vulkaanuitbarstingen, El Niño en het broeikas effect in samenhang te bekijken. De daling hangt samen met de stabilisatie van de zonneactiviteit en een verhoging van het aantal vulkaanuitbarstingen. Het blijkt dat de menselijke invloed op de temperatuur waarschijnlijk pas overheersend geworden is in de loop van de tweede helft van de 20ste eeuw.

Waarom is de menselijke invloed op het klimaat zo lang betwijfeld?

De theorie van het broeikas effect stamt uit de 19e eeuw en is wetenschappelijk goed doortimmerd. Toch spreekt de wetenschap zich pas sinds enige jaren ondubbelzinnig uit over de menselijke invloed op het klimaat. Die toegenomen zekerheid vloeit voort uit onder meer de grote vorderingen in de kennis van het klimaatsysteem, het grote aantal recordwarme jaren sinds 1990, en het feit dat de effecten van de opwarming (afname ijsbedekking, verschuiving neerslagpatronen, reactie ecosystemen) op grote schaal zijn waargenomen.

Bepaalt de temperatuur de hoeveelheid broeikasgassen in plaats van andersom?

Het blijkt dat in bepaalde perioden de broeikasgasconcentraties zich aanpassen aan veranderingen in de temperatuur, terwijl op andere momenten veranderingen in de broeikasgasconcentraties voorafgaan aan temperatuurswijzigingen. Er is dus niet sprake van een eenduidige oorzaak-gevolg-relatie. Dit wordt toegeschreven aan terugkoppelingen in het klimaatsysteem. Een voorbeeld van zo'n terugkoppeling is het verschijnsel dat er bij een temperatuurstijging broeikasgassen uit de oceaan vrijkomen, omdat de oplosbaarheid van gassen in oceaanwater afneemt met toenemende temperatuur. Die extra broeikasgassen leiden dan weer tot verdere temperatuurstijging, enzovoorts. Aan de andere kant veroorzaken wisselende concentraties broeikasgassen temperatuurveranderingen. Zonder externe invloed evolueren temperatuur en broeikasgasconcentraties in samenhang. Wordt één van de twee door een externe oorzaak veranderd dan volgt de ander en is het zinvol om in termen van oorzaak en gevolg te spreken.

De wereldwijde inspanning van duizenden wetenschappers heeft de laatste 15 jaar veel nieuwe inzichten opgeleverd. Vrijwel alle klimaatonderzoekers twijfelen inmiddels niet meer aan de menselijke invloed op het klimaat. Het verloop van de wereldgemiddelde temperatuur kan nu worden verklaard aan de hand van de invloeden van de zonneactiviteit, vulkaanuitbarstingen, El Niño en het door de mens versterkte broeikas-effect. De opwarming gedurende de laatste decennia is waarschijnlijk grotendeels door de mens veroorzaakt. Onderzoekers houden zich steeds meer bezig met de vraag hoe het klimaat, mede onder invloed van de mens, zal evolueren in de 21ste eeuw en wat de regionale effecten van de opwarming zullen zijn op mens en natuur.

■ *Hoe zal het klimaat verder veranderen?*

Uitgaande van aannamen over de toekomstige uitstoot van broeikasgassen en binnen de beperkingen van de wetenschappelijke kennis over het klimaatsysteem heeft het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) van de Verenigde Naties het volgende beeld geschetst van de ontwikkelingen van het mondiale klimaat in de 21ste eeuw.

De wereldgemiddelde temperatuur zal naar schatting in de periode 1990-2100 verder stijgen met 1,4 tot 5,8°C. De grote bandbreedte wordt bepaald door enerzijds de beperkingen in wetenschappelijke kennis (vooral over de rol die de wolken spelen) en anderzijds de onzekerheid in het toekomstige gebruik van fossiele brandstoffen. De bovengrens is van dezelfde orde als de natuurlijke temperatuurtoename sinds de laatste ijstijd, die zich over een veel langere periode van tienduizend jaar heeft voorgedaan. Dat scenario brengt de aarde in een totaal andere toestand. Het zou een volstrekte ramp betekenen voor mens en natuur. De ondergrens brengt de aarde in een toestand die vergelijkbaar is met de warme periode voor de laatste ijstijd (het Eemien). Er zijn aanwijzingen dat onder die omstandigheden grote ijsmassa's, zoals het ijs op Groenland, smelten. Dat zou op een termijn van duizend jaar een zeespiegelstijging van een aantal meters tot gevolg kunnen hebben.

De temperatuurtoename boven de continenten van het noordelijk halfrond zal tot 40% sterker zijn dan boven zee. De waterkringloop intensiveert waardoor er wereldgemiddeld gezien meer en heviger neerslag wordt verwacht. Die toename zal vermoedelijk vooral plaatsvinden op de gematigde breedten, terwijl in de subtropen juist een afname wordt voorzien.

Deze veranderingen gaan gepaard met toenemende jaarlijkse verschillen in de neerslag. Zee-ijs, gletsjers en landijs zullen zich verder terugtrekken, terwijl de ijsmassa van Antarctica door de vergroting van de lokale hoeveelheid neerslag juist zal toenemen.

Dempen aërosolen de opwarming?

De mens brengt stofdeeltjes (aërosolen) in de atmosfeer die het klimaat significant beïnvloeden. Zo resulteert de verbranding van zwavelhoudende fossiele brandstoffen in 'witte' stofdeeltjes die het klimaat afkoelen omdat ze het zonlicht reflecteren. De verbranding van dieselolie en biomassa (hout e.d.) stoot zwarte roetdeeltjes uit die een opwarmend effect hebben omdat ze zonlicht absorberen. Bovendien verlagen neergeslagen roetdeeltjes het reflecterend vermogen van sneeuw, met opwarming tot gevolg.

De stofdeeltjes hebben ook een invloed op wolkenvorming, met een overwegend afkoelende werking.

Over de sterkte van het netto afkoelende effect van aërosolen bestaat discussie. Het is een speerpunt in het onderzoek. Er is echter een grote mate van overeenstemming dat aërosolen het versterkte broeikaseffect in de afgelopen vijftig jaar slechts ten dele hebben gecompenseerd.

Hoe kun je het klimaat voorspellen als het weerbericht van volgende week vaak al niet deugt?

Een weersverwachting doet een uitspraak over het weer in de toekomst. Een klimaatverwachting doet een uitspraak over het gemiddelde weer (=klimaat) in de toekomst. Het gaat er dus niet om of het regent op 18 april 2050, maar of de kans op regen die dan verwacht wordt klopt. Het blijkt dat dergelijke kansen veel beter voorspelbaar zijn dan het weer zelf.

Dempen wolken de opwarming?

Wolken kaatsen zonnestraling terug naar het heelal en hebben gemiddeld een koelend effect op het klimaat. Hogere temperaturen versterken de verdamping, maar ook de neerslagvorming. Het netto effect op de bedekkingsgraad is onzeker, maar klimaatmodellen geven aan dat een hogere temperatuur het reflecterend vermogen van wolken beperkt, waardoor de opwarming versterkt. Anderzijds kunnen door de mens uitgestoten stofdeeltjes het reflecterend vermogen van wolken versterken, waardoor de opwarming dempt. Op langere termijn lijken veranderingen in wolken de opwarming te zullen versterken.

Het niveau van de zeespiegel zal in de loop van de 21ste eeuw naar verwachting met 9 tot 88 cm stijgen als gevolg van de opwarming van het zeewater en het smelten van landijs.

De gemiddelde temperatuur in Europa zal vermoedelijk iets sterker toenemen dan het wereldgemiddelde. De kans op hittegolven neemt toe, de kans op vorstdagen neemt af. In de Scandinavische landen zal de wintertemperatuur waarschijnlijk veel sterker stijgen dan het wereldgemiddelde. In Zuid-Europa lijken juist de zomertemperaturen omhoog te gaan. De zeespiegelstijging voor West-Europa zal niet wezenlijk afwijken van het wereldgemiddelde, al moet men voor Nederland ook nog rekening houden met een bodemdaling van 10 tot 20 cm per eeuw.

Het grillige karakter van neerslag maakt uitspraken over toekomstige ontwikkelingen onzeker. Er is een redelijke wetenschappelijke overeenstemming dat de winterneerslag in Noord-Europa met 5 tot 20% zal toenemen, met name in Scandinavië, maar ook op lagere breedtegraden. In de zomer is de neerslagverandering onzeker. In Zuid-Europa kan de neerslag met meer dan 20% afnemen. Er wordt een toename van zware neerslag en de kans op uitschieters verwacht. Dat geldt zowel op een termijn van dagen als op een termijn van jaren. De hogere temperaturen brengen meer verdamping met zich mee. In de zomer zal de verdamping meer toenemen dan de neerslag, terwijl in de winter de toename van neerslag de overhand heeft. De kans op zomerdroogte neemt toe, met name in Zuid-Europa.

Naast geleidelijke verschuivingen is het denkbaar dat het klimaatsysteem abrupte overgangen doormaakt met vermoedelijk grote gevolgen. Dat soort veranderingen is niet of nauwelijks opgenomen in de huidige klimaatprojecties. Zo kan een verzwakking van de Noord Atlantische Golfstroom een aanzienlijke verlaging van de gemiddelde temperatuur in West-Europa bewerkstelligen. Een ander voorbeeld is het afsmelten van de West Antarctische ijskap. Sommige onderzoeken geven aan dat die ijskap bij een temperatuurstijging van enkele graden in zee zal schuiven met een zeespiegelstijging van een meter per eeuw tot gevolg. Volgens de huidige, begrensde inzichten in dit soort verschijnselen is de kans op dergelijke abrupte verschijnselen in de 21ste eeuw zeer klein.

De huidige klimaatmodellen geven aan dat de te verwachten temperatuurstijging in Nederland nagenoeg in de pas loopt met de stijging van de wereldgemiddelde temperatuur. Uitgaande van de wereldgemiddelde temperatuurprojecties van het IPCC heeft het KNMI een drietal klimaatscenario's ontwikkeld voor het Nederlandse klimaat in het jaar 2100. Deze klimaatscenario's zijn het uitgangspunt voor

Komt er een nieuwe ijstijd door het stilvallen van de Golfstroom?

De Noord-Atlantische Golfstroom, die in Europa een mild klimaat veroorzaakt, wordt onder meer aangedreven door verschillen in zoutgehalte van het oceaanwater. Door de wereldwijde opwarming veranderen neerslag- en verdampingspatronen en smelt het ijs. Hierdoor verandert het zoutgehalte. Samen met de opwarming van het oceaanwater kan dit een afzwakking van de Golfstroom tot gevolg hebben. Dat effect lijkt evenwel niet sterk genoeg te zijn om de Golfstroom te stoppen. De kans dat het Europese klimaat erdoor afkoelt wordt zeer klein geacht.

verkennde studies van de gevolgen van klimaatverandering voor Nederland en omgeving. Zo wordt het nationale waterbeleid voor de 21ste eeuw mede gebaseerd op deze inzichten.

KNMI klimaatscenario's voor Nederland in 2100

Temperatuur	+1°C	+2°C	+4 tot +6°C
Gemiddelde winterneerslag	+6%	+12%	+25%
Hevigheid extreme winterneerslag	+10%	+20%	+40%
Kans op extreme winterneerslag	2x zo groot	4x zo groot	10x zo groot
Zeespiegelstijging	+20 cm	+60 cm	+110 cm

De verwachte toename van de neerslag zal gepaard gaan met een toename van de kans op perioden met extreme neerslag en de kans op natte jaren. Waterbeheerders houden daar nu al rekening mee. Tegenover de kleine toename van de gemiddelde zomerneerslag staat een sterkere toename van de verdamping in de zomer, met grotere kans op verdroging tot gevolg. Toch neemt de kans op lokale wateroverlast ook in de zomer toe, als gevolg van de toename van de kans op hevige lokale buien.

De verwachte invloeden op de neerslag en de verdamping in Europa vergroten de gemiddelde afvoer van de Rijn in de winter. Bij gelijke dijkhoogte verhoogt dat de kans op overstromingen. In de zomers wordt een verlaging van de gemiddelde afvoer voorzien. Dat leidt tot lagere waterstanden, die de scheepvaart kunnen hinderen. Lagere afvoeren hebben een negatieve invloed op de waterkwaliteit en vergemakkelijken het binnendringen van zout water in de riviermond. In droge zomers kan de vraag naar water de aanvoer overstijgen waardoor de kans op waterschaarste toeneemt.

De zeespiegelstijging vergroot de indringing van zout water in de kustgebieden, met gevolgen voor de drinkwatervoorziening en de landbouw. De kusterosie neemt toe. Het spuien van overtollig rivierwater uit bijvoorbeeld het IJsselmeer zal worden bemoeilijkt. De kans op hoge waterstanden aan de kust neemt in beginsel toe. De hoge onzekerheid van de invloed van klimaatverandering op het stormklimaat maakt dat veranderingen in de kans op hoogwater nog niet goed bekend zijn.

Hierboven is een beeld geschetst van de evolutie van het klimaat in de 21ste eeuw, onder invloed van de mens. De verblijftijd van met name CO₂ in de atmosfeer is dermate lang dat de huidige uitstoot van dit broeikasgas het klimaat na 2100 zal blijven beïnvloeden. Ook als men er in de loop van de 21ste eeuw in slaagt de huidige exponentiële groei van de CO₂-uitstoot weg te nemen moet toch rekening gehouden worden met een significante menselijke invloed op het klimaat in de 22ste eeuw.