

# Klimaatverandering zet door

## IPCC rapport 2013

**Deze eeuw stijgt de gemiddelde temperatuur verder. Klimaatwetenschappers zijn nog stilliger dan voorheen over de menselijke invloed op het klimaat. Door nieuwe metingen over langere periodes, nieuwe modellen en meer computerkracht is er meer inzicht in het klimaatsysteem. Deze bevindingen staan in het nieuwste rapport van het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), dat een overzicht geeft van de wetenschappelijke literatuur op het gebied van de fysische aspecten van klimaatverandering. De nieuwe gegevens bevestigen veel bevindingen uit de eerdere IPCC-rapporten.** Rob van Dorland

48

In de afgelopen 130 jaar is het wereldwijd gemiddeld 0,9 graden warmer geworden (zie figuur 1). De opwarming van de aarde gaat niet in een constant tempo maar is aan schommelingen onderhevig. Na een versnelling aan het eind van de vorige eeuw verliep de opwarming de afgelopen vijftien jaar langzamer. Zo'n tempowisseling is niet uniek in het waargenomen temperatuurverloop en kan goed verklaard worden in termen van natuurlijke fluctuaties. Ook klimaatmodellen vertonen dit soort schommelingen. De bronnen van deze fluctuaties (zoals El Niño) zijn in grote lijnen bekend, maar niet

voorspelbaar. Dit bemoeilijkt klimaatverwachtingen voor een aantal jaren vooruit. Op de langere termijn middelen deze fluctuaties veel beter uit en zien we vooral de menselijke invloed zowel in de waarnemingen sinds het midden van de twintigste eeuw als in de verwachte ontwikkelingen voor de toekomst.

### Metingen

Naast de waarnemingen met thermometers blijkt de opwarming van de aarde uit verschillende andere metingen (zie figuur 2). De totale warmteinhoud van de oceanen is fors toegenomen, ook in de laatste vijftien jaar waarin de mondiaal gemiddelde temperatuurstijging langzamer verliep. Vanwege de grote warmtecapaciteit van de oceanen is dit een maat voor de totale energieverandering van het klimaatsysteem. Verder zijn ijskappen en gletsjers aan het smelten en stijgt de zeespiegel – sinds het begin van de 20<sup>e</sup> eeuw met 20 cm – als gevolg van smeltend landijs en de uitzetting van het zeewater door hogere temperaturen. Ook het snel slinkende

zeeijsvolume in de Noordelijke IJszee is een indicatie voor de opwarming van de aarde. De laatste dertig jaar was zeer waarschijnlijk (>90%) de warmste periode in de afgelopen 1400 jaar. De concentraties in de atmosfeer van kooldioxide (CO<sub>2</sub>), methaan (CH<sub>4</sub>) en lachgas (N<sub>2</sub>O) zijn toegenomen tot waarden die in tenminste de afgelopen 800.000 jaar niet eerder zijn voorgekomen. De CO<sub>2</sub>-concentratie is toegenomen met 40% sinds het pre-industriële tijdperk tot een waarde van 390,5 ppm in 2011, vooral door verbranding van fossiele brandstoffen en ook door veranderingen in landgebruik. Bovendien heeft de oceaan ongeveer 30% van de door de mens uitgestoten CO<sub>2</sub> geabsorbeerd, wat verzuring van de oceaan heeft veroorzaakt. De pH-waarde is sinds 1750 met circa 0,1 gedaald.

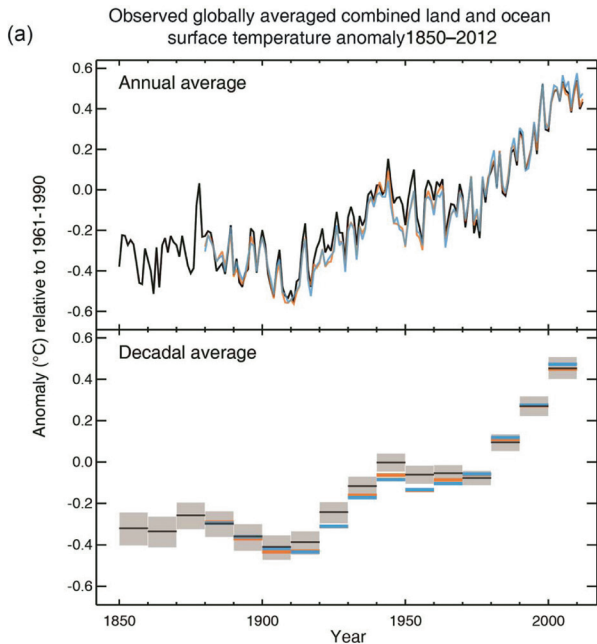
### Menselijke invloed

Het is uiterst waarschijnlijk (>95%) dat de invloed van de mens de belangrijkste oorzaak is van de waargenomen opwarming sinds het midden van de 20<sup>e</sup> eeuw. Dit concludeert het IPCC op basis van waargenomen ver-

Rob van Dorland is sinds 1988 verbonden aan het KNMI als senior onderzoeker/adviseur klimaat. Hij is één van de auteurs van het vierde klimaatrapport van het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) dat in 2007 is gepubliceerd.



dorlandv@knmi.nl



**Figuur 1** Waargenomen wereldgemiddelde temperatuur van 1850 tot 2012 (drie datasets) ten opzichte van het klimatologisch gemiddelde 1961-1990. Boven: jaargemiddelden. Onder: decenniumgemiddelden met een onzekerheidschatting voor de eerste dataset (zwart). (Bron: IPCC 2013)

anderingen in de energiebalans van het klimaatsysteem. Het gaat hierbij om de in- en uitgaande energie in de vorm van (zonne- en infrarode) straling en om de warmteopslag in het klimaatsysteem.

De sterkte van de oorzaken van veranderingen in de energiebalans wordt gekwantificeerd als stralingsforcering (*effective radiative forcing*, ERF) in eenheden van watt per  $m^2$  ( $W m^{-2}$ ). Vanwege de toename in de concentraties broeikasgassen door menselijke activiteiten neemt de stralingsforcering toe, omdat door meer broeikasgassen minder infrarode straling de aardatmosfeer verlaat. Over het tijdvak 1998-2011 wordt deze toename geschat op  $0,5 W m^{-2}$ . De totale stralingsforcering sinds het begin van de industriële revolutie rond 1750 is circa  $2,3 W m^{-2}$  (zie figuur 3).

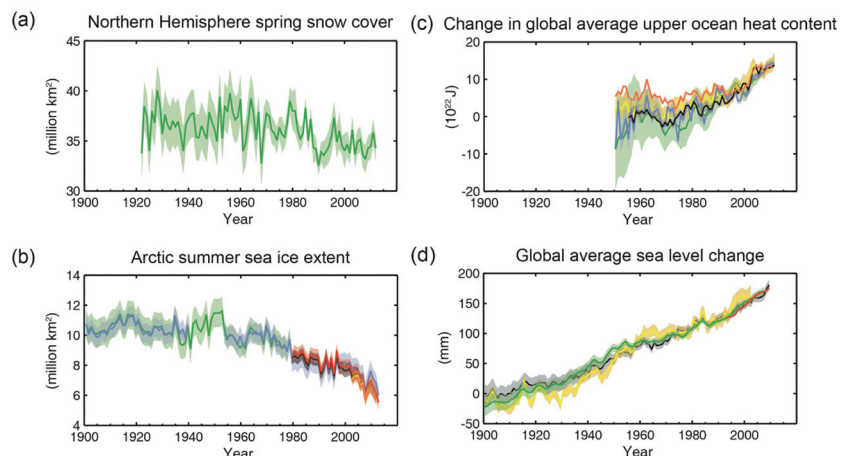
De menselijke invloed bestaat uit twee grote termen: een positieve stralingsforcering door de toename van broeikasgassen, waaraan de stijging van het  $CO_2$ -gehalte in de atmosfeer de grootste bijdrage levert, en een negatieve stralingsforcering door de toename van aerosolen. De meeste typen aerosolen weerkaatsen zonlicht. Daarnaast zijn er ook indirecte effecten op bewolking, zoals meer kleinere wolkeendruppels en een verlenging van de levensduur van wolken. Vanwege de onzekerheid in de indirecte bijdragen van aerosolen aan de stra-

lingsforcering is de zeer waarschijnlijke (90%) range van totale antropogene stralingsforcering  $1,1 - 3,3 W m^{-2}$ . De stralingsforcering door natuurlijke factoren zoals variaties in zonneactiviteit en vulkaanstof is klein ten opzichte van de menselijke forcering. Zo geeft de stijging van zonneactiviteit sinds 1750 slechts een stralingsforcering van  $0 - 0,10 W m^{-2}$ .

De positieve stralingsforcering heeft geleid tot een netto opname van ener-

gie door het klimaatsysteem. In figuur 4a is de cumulatieve energiestroom in het klimaatsysteem (zwarte lijn) door veranderingen (stralingsforcering) in broeikasgassen, zonne-energie, troposferische aerosolen, vulkaanstof en reflecterend vermogen (albedo) van het aardoppervlak ten opzichte van het tijdvak 1860-1879 (gekleurde lijnen) weergegeven.

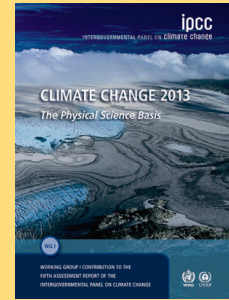
De toename van de cumulatieve energiestroom in het klimaatsysteem

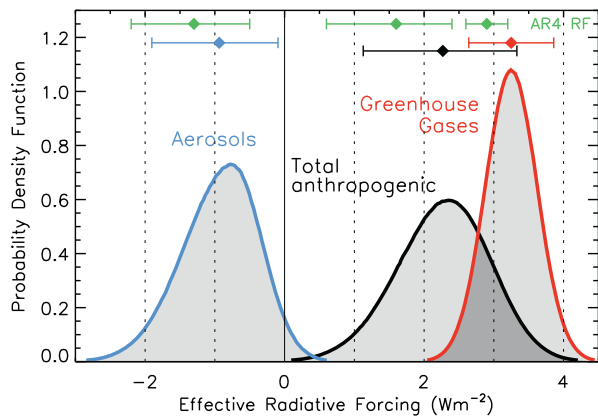


**Figuur 2** Verscheidene waargenomen indicatoren van een veranderend klimaat wereldwijd: a) maart-april (lente) gemiddelde sneeuwoppervlak op het Noordelijk Halfrond, b) juli-augustus-september (zomer) gemiddelde zeeijsoppervlak in het Noordpoolgebied, c) verandering in de wereldwijd gemiddelde hoeveelheid warmte in de bovenste laag van de oceaan, ten opzichte van het gemiddelde van alle datasets voor 1971, d) wereldwijd gemiddelde zeespiegel, afwijking ten opzichte van het 1900-1905 gemiddelde van de langstlopende dataset. Alle tijdsreeksen (gekleurde lijnen corresponderen met verschillende gebieden) tonen jaarlijkse waarden en waar beschikbaar zijn de onzekerheden aangegeven met gekleurde banden. (Bron: IPCC 2013)

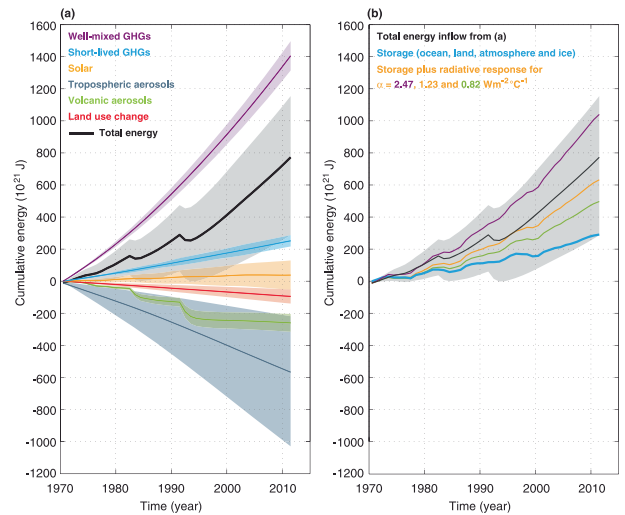
## IPCC-rapport

Een internationaal team van wetenschappers heeft jaren lang aan het IPCC-rapport gewerkt, waaronder klimaatwetenschappers van het KNMI. Het IPCC heeft zijn procedures veranderd na kritiek op het vorige rapport uit 2007 en is transparanter gaan werken. Net als bij eerdere rapporten zijn de commentaren van honderden onafhankelijke wetenschappers, ook uit Nederland, in de eindtekst verwerkt. Deze commentaren en de reacties daarop van de auteurs worden beschikbaar gesteld voor het publiek.





**Figuur 3** Waarschijnlijkheidsverdeling van de antropogene stralingsforcings (effective radiative forcing, ERF) door broeikasgassen, aerosolen en totaal in  $\text{W m}^{-2}$ . De lijnen boven tonen de vergelijking met de beste schattingen en onzekerheidsmarges (5-95% waarschijnlijkheid) uit het vorige IPCC-rapport (AR4). (Bron: IPCC 2013)



**Figuur 4** a) De cumulatieve energiestroom in het klimaatsysteem (zwarte lijn) door veranderingen (stralingsforcings) door menselijke en natuurlijke factoren ten opzichte van het tijdvak 1860-1979 (gekleurde lijnen). b) De cumulatieve energiestroom in het klimaatsysteem (zwarte lijn uit a) met waarschijnlijke bandbreedte (grijze band), de netto energie geabsorbeerd door het klimaatsysteem (blauwe lijn) en de toename van uitgaande warmtestraling ten gevolge van de temperatuurstijging van het aardoppervlak. De som van netto geabsorbeerde en uitgaande energie is weergegeven voor drie waarden van de klimaatfeedbackparameter: 0,82, 1,23 en  $2,47 \text{ W m}^{-2} \text{ C}^{-1}$ . (Bron: IPCC, 2013).

(zwarte lijn uit figuur 4a) is wegens de wet van behoud van energie in balans met de som van de energie geabsorbeerd door het klimaatsysteem (blauwe lijn) en de toename van uitgaande warmtestraling ten gevolge van de temperatuurstijging van het aardoppervlak (zie figuur 4b). De toename van deze uitgaande warmtestroom is echter ook afhankelijk van de klimaatfeedbackparameter (zie kader *Behoud van energie in het klimaatsysteem*), waarvan de waarde niet precies bekend is. In figuur 4b is daarom de genoemde som van energie weergegeven voor drie waarden van de klimaatfeedbackparameter: 0,82, 1,23 en  $2,47 \text{ W m}^{-2} \text{ C}^{-1}$ . Deze waarden corresponderen respectievelijk met een klimaatgevoeligheid (zie hierna) van 4,5, 3,0 en  $1,5^\circ\text{C}$ . Het energiebudget is gesloten voor een waarde van de feedbackparameter (klimaatgevoeligheid) als die lijn samenvalt met de totale instroom van energie (zwarte lijn), dus bij een klimaatgevoeligheid tussen de 1,5 en  $3^\circ\text{C}$ . De onzekerheid (grijze band) is weergegeven voor de waarschijnlijke (66%) bandbreedte van de totale instroom van energie. De gekozen range in klimaatgevoeligheid valt geheel binnen de onzekerheidsmarge van de totale instroom van energie.

### Klimaatgevoeligheid

De klimaatgevoeligheid is een be-

langrijke maat voor de uiteindelijke mondiale temperatuurstijging en is gedefinieerd als de verandering van de wereldgemiddelde temperatuur ten gevolge van een verdubbeling van de  $\text{CO}_2$ -concentratie (wat neerkomt op een stralingsforcings van ongeveer  $3,7 \text{ W m}^{-2}$ ). Het maakt overigens voor de temperatuurrepons van het klimaatsysteem niet uit wat de oorzaak van de stralingsforcings is. Zo zou eenzelfde forcings van  $3,7 \text{ W m}^{-2}$  door een verandering van de energieafgifte van de zon een nagenoeg gelijke temperatuurstijging teweegbrengen. De sterkte van de klimaatgevoeligheid is afhankelijk van de terugkoppelingen (feedbacks) in het klimaatsysteem. Temperatuurafhankelijke processen kunnen de mondiale temperatuurstijging door stralingsprocessen versterken of verzwakken. Met name de hydrologische kringlopen zijn sterk afhankelijk van de temperatuur. Zo neemt de hoeveelheid waterdamp toe als het warmer wordt. Waterdamp is een sterk broeikasgas en versterkt dus het initiële effect van een verhoging van het  $\text{CO}_2$ -gehalte. Ook neemt in een warmere wereld de ijsbedekking af, waardoor het reflecterend vermogen kleiner wordt. Dit impliceert een positieve terugkoppeling. De respons van wolken bij toenemende temperaturen is echter niet

goed bekend. Klimaatmodellen laten voor wolken een spreiding zien van neutrale tot positieve terugkoppeling. Volgens het huidige IPCC-rapport ligt de klimaatgevoeligheid waarschijnlijk tussen 1,5 en  $4,5^\circ\text{C}$ . Het vertrouwen in dit bereik is groot en is ten opzichte van het vorige IPCC-rapport uit 2007 toegenomen. De spreiding geeft aan dat er onzekerheid is over de precieze invloed van de broeikasgassen op de wereldgemiddelde 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 specifieke onzekerheden (bijvoorbeeld meeton nauwkeurigheid). De waarschijnlijke range van klimaatgevoeligheid is die, waar de bandbreedtes van de verschillende methoden overlappen. Nieuwe meetgegevens en onderzoek sinds het vorige IPCC-rapport waren aanleiding tot het verlagen van de ondergrens van de waarschijnlijke range van de klimaatgevoeligheid van  $2,0$  naar  $1,5^\circ\text{C}$ . Met name studies die gebruik maken van temperatuurmetingen van atmosfeer

en oceaan in de laatste decennia in combinatie met schattingen van de stralingsforcering, zoals in figuur 4 is weergegeven, laten een lagere klimaatgevoeligheid van rond de 2 graden Celsius zien. IPCC plaatst hier de kanttekeningen bij dat de onzekerheid in warmteopname door de oceaan aanzienlijk is en dat toevallige fluctuaties (interne variabiliteit) – zeker op tijdschalen van jaren tot decennia – de bepaling van klimaatgevoeligheid kunnen verstoren.

De sterkte van de klimaatgevoeligheid is van belang voor de klimaatprojecties voor de toekomst op basis van emissiescenario's. Merk op dat klimaatgevoeligheid niet hetzelfde is als de verwachte temperatuurstijging door menselijke invloed in 2100. Deze stijging is weliswaar afhankelijk van de klimaatgevoeligheid, maar ook van de toename van broeikasgassen, aërosolen en landgebruik.

### Temperatuuroename

Het IPCC schat in dat rond 2025 de wereldgemiddelde temperatuur 0,3 tot 0,7 graden hoger is dan aan het einde van de 20<sup>e</sup> eeuw. Deze verwachting is nagenoeg onafhankelijk van de emissiescenario's. Bovendien wordt een aanzienlijk deel van de opwarming bepaald door de reeds geëmitteerde CO<sub>2</sub>. De verwachte temperatuurstijging aan het eind van deze eeuw ten opzichte van het tijdvak 1986-2005 is wel sterk afhankelijk van de hoeveelheid broeikasgassen die we wereldwijd gaan uitstoten. Hiertoe zijn emissiescenario's ontwikkeld. In het hoogste scenario, waarbij de uitstoot onverminderd blijft stijgen, wordt het op aarde tussen de 2,6 en 4,8 graden warmer. In het laagste scenario, waarin de CO<sub>2</sub>-uitstoot in de komende tien jaar stabiliseert en daarna drastisch afneemt door wereldwijde maatregelen, warmt de aarde verder op met 0,3 tot 1,7°C aan het einde van deze eeuw. Vanwege de lange verblijftijd van CO<sub>2</sub> in de atmosfeer is er een eenduidig verband tussen de cumulatieve emissies en de temperatuurstijging (zie figuur 5; merk op dat de temperatuuroename gegeven is ten opzichte van de referentieperiode 1861-1880. Deze is circa 0,6 graden hoger dan ten opzichte van de periode 1986-2005). Een belangrijk gevolg van de wereldwijde temperatuuroename is de stijging van de zeespiegel. Tegen het

## Behoud van energie in het klimaatsysteem

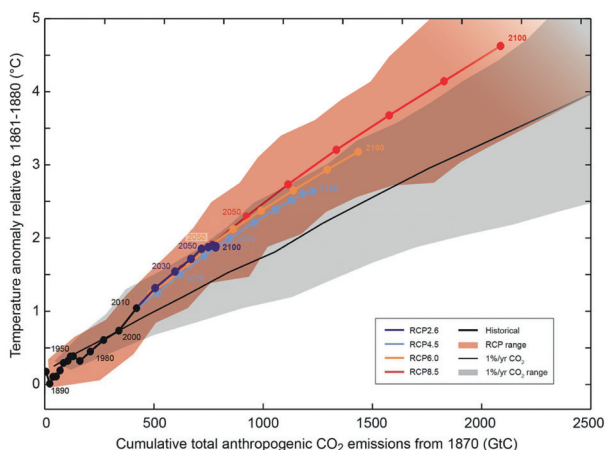
De energie, die per tijdseenheid netto door het klimaatsysteem wordt geabsorbeerd ( $\Delta N(t)$ ), is wegens de wet van behoud van energie gelijk aan de stralingsforcering ( $\Delta F(t)$ , ofwel de influx van energie per tijdseenheid) minus de uitgaande warmtestraling per tijdseenheid ( $\Delta H(t)$ ) ten opzichte van een referentieperiode, waarin de stralingsforcering verwaarloosbaar is. Het is gebruikelijk om deze grootheden in termen van  $W m^{-2}$  weer te geven.

$$\Delta N(t) = \Delta F(t) - \Delta H(t) \quad (1)$$

De uitgaande warmtestraling kan geschreven worden als het product van de temperatuurstijging van het aardoppervlak en de feedbackparameter ( $\alpha$ )

$$\Delta H(t) = \alpha \Delta T(t) \quad (2)$$

Wanneer gedurende een voldoende lange periode de stralingsforcering constant blijft doordat bijvoorbeeld het atmosferisch gehalte van broeikasgassen stabiliseert, zal het klimaatsysteem in (quasi)evenwicht komen ( $\Delta N = 0$ ). Anders gezegd: de temperatuur van het aardoppervlak komt uiteindelijk in evenwicht met de stralingsforcering ( $\Delta T = \alpha^{-1} \Delta F$ ). De reciproke van de feedbackparameter wordt ook wel klimaatgevoeligheidsparameter genoemd ( $\lambda = \alpha^{-1}$ ). De (evenwicht)klimaatgevoeligheid (in de literatuur aangeduid met ECS, *equilibrium climate sensitivity*) is gedefinieerd als de uiteindelijke temperatuurstijging van het aardoppervlak in graden Celsius bij een verdubbeling van de CO<sub>2</sub> concentratie. De bijbehorende stralingsforcering is  $3,7 W m^{-2}$  ( $ECS = \lambda \times 3,7$ ).



**Figuur 5** De wereldgemiddelde temperatuurstijging (ten opzichte van het gemiddelde over 1861-1880) als functie van de totale mondiale CO<sub>2</sub>-emissies (in PgC = Petagram Carbon). Zwart: historische (1860-2010) emissies. Geleerde lijnen: modelberekeningen op basis van de vier emissiescenario's (representative concentration pathways, RCPs) tot 2100. De geleerde pluim illustreert de spreiding in mondiale temperatuurstijging door onzekerheid in de klimaatgevoeligheid voor de vier RCP's. Grijs lijnen en banden geven resultaten van specifieke modelexperimenten weer. (Bron, IPCC 2013)

eind van de 21<sup>e</sup> eeuw wordt een stijging verwacht van 26 tot 82 cm (waarschijnlijke bandbreedte). Het IPCC stelt de projecties voor zeespiegelstijging deze eeuw naar boven bij omdat de kennis over ijskappen sterk verbeterd is. Op basis van de bijdrage van uitzetting van zeewater, smelten van

gletsjers, afkalven van ijskappen en verandering in grondwater, irrigatie en dammen, is de huidige zeespiegelstijging goed te verklaren. Het KNMI zal dit voorjaar nieuwe klimaatscenario's presenteren die de IPCC-bevindingen meer in detail vertalen naar de Nederlandse situatie.