

**OPWARMING VAN DE AARDE**

Inleiding

Onder opwarming van de Aarde, in België ook klimaatopwarming genoemd, wordt de stijging van de wereldtemperatuur sinds de 19e eeuw verstaan. De gemiddelde temperatuur van de aardse atmosfeer op grondhoogte is in de periode 1880 tot 2012 met ongeveer 0,85 °C (0,65-1,06 °C) gestegen. Deze opwarming gaat gepaard met andere mondiale klimaatveranderingen.

Onder klimaatwetenschappers is het onomstreden dat gedurende de laatste decennia van de 20e eeuw de gemiddelde temperatuur op Aarde is toegenomen. Zij menen bovendien in grote meerderheid dat deze trend voornamelijk wordt veroorzaakt door een stijging van de concentratie broeikasgassen in de atmosfeer wat het gevolg is van menselijke activiteiten zoals het verbranden van fossiele brandstoffen, ontbossing en bepaalde industriële en agrarische activiteiten. Enkele wetenschappers zijn van mening dat natuurlijke variatie een belangrijkere reden voor de temperatuurstijging is dan menselijke activiteiten. Inmiddels zijn ook het publiek en politici in meerderheid de mening toegedaan dat er een klimaatprobleem bestaat en dat dit mede door menselijk toedoen is ontstaan.

Modelberekeningen, geëvalueerd in de rapporten van het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), hebben voorspeld dat de temperatuur op Aarde in 2100 met 1,6 °C (0,9-2,3 °C) zal zijn gestegen ten opzichte van de temperatuur tussen 1850 en 1900 wanneer een ambitieus programma tot het verminderen van de uitstoot van broeikasgassen geïmplementeerd wordt. Andere emissiescenario's komen uit op temperatuurstijgingen tussen de 2,4 en 4,3 °C (1,7-5,4 °C) boven het pre-industriële niveau.

Naar verwachting zouden met name temperatuurstijgingen van meer dan 2 °C grote veranderingen met zich meebrengen voor mens en milieu, onder andere door zeespiegelstijging, toename van droogte- en hitteperioden en extreme neerslag. In 2015 kwam een groot panel van experts echter met een nieuwe conclusie. Ze stellen dat 1,5 als nieuwe limiet moet worden overwogen. De "2-gradengrens" was gebaseerd op enkele foute aannames, bijvoorbeeld dat de mensheid al eerder een periode met een dergelijke hogere gemiddelde temperatuur zou hebben beleefd en dat de ijskappen langzaam reageren op hogere temperaturen.

Aanwijzingen (1)

De stijging van de zeespiegel tussen 1993 en 2013 bedroeg gemiddeld 3,2 mm per jaar. Dit is ruwweg een toename van 50% ten opzichte van het gemiddelde over de 20e eeuw.

Ten minste sinds 1970 komt er gemiddeld meer straling naar de Aarde, dan dat de Aarde uitzendt. De energie van deze straling wordt opgeslagen in verschillende onderdelen van het klimaatsysteem. Het grootste reservoir is de oceaan en dan vooral de bovenste 700 m.

Er is een groot aantal onafhankelijke observaties vanuit verschillende wetenschapsgebieden, zoals de meteorologie, glaciologie, oceanografie en biologie, die indicaties geven voor de opwarming van de Aarde.

Uit de meteorologie blijkt dat de temperaturen boven land en boven de oceanen, gecorrigeerd voor effecten zoals het hitte-eilandeffect, systematisch oplopen. De gemiddelde oppervlaktetemperatuur is in de periode 1880-2012 opgelopen met 0,85 °C (0,65-1,06 °C), waarbij de opwarming sterker is boven land dan boven de oceanen. Uit analyse van vele gletsjers volgt dezelfde historische opwarmingskromme van de Aarde als uit directe temperatuurmetingen. Er is opwarming waargenomen van de eerste 700 meter van de oceaan en van de diepe oceaan. De temperatuur in de eerste 75 meter is met 0,11 °C (0,09-0,13 °C) gestegen.

Er is een toename gevonden van enkele extreme weersomstandigheden. Zo zijn er gemiddeld meer uitzonderlijk warme dagen en minder uitzonderlijk koude dagen. Temperatuurmetingen in het noordpoolgebied laten zien dat de temperaturen grotendeels, 9 tot 12 maanden per jaar, boven het langjarig gemiddelde liggen. Een afname van het drijfijs in de Noordelijke IJszee is het gevolg. Kuststations in Noord-Siberië laten ook zien dat het jaargemiddelde voortdurend boven normaal is. Het is erg waarschijnlijk dat menselijke activiteiten hier de hoofdoorzaak van zijn. Bovendien zijn zowel het aantal hittegolven als de gemiddelde luchtvochtigheid toegenomen. Het IPCC Fourth Assessment Report concludeerde dat menselijke activiteit waarschijnlijk (kans > 50%) heeft geleid tot een toename van het aantal hevige regenbuien.

Andere aanwijzingen zijn de (gedeeltelijke) afsmelting en terugtrekking van de meeste gletsjers, het afsmelten van landijs bij de Zuidpool, het zee-ijs rond de Noordpool en van de ijskap op Groenland en de stijging van de zeespiegel. Ook neemt men verzuring van de oceanen waar: de pH van water is met 0,1 afgenomen door toename van CO2 sinds het begin van de industriële revolutie, wat overeenkomt met een toename van 26% in waterstofionconcentratie. De lente begint gemiddeld vroeger en het groeiseizoen van zowel flora als fauna is langer. De boomgrens in gebergten is verschoven naar grotere hoogten, leefgebieden van flora en fauna zijn verschoven naar hoger gelegen gebieden en gebieden dichter bij de polen. Zo is bijvoorbeeld de samenstelling van korstmossen in Nederland veranderd naar een hoger percentage warmtelievende soorten.

Daarnaast wordt er een energie-onbalans in de buitenste laag van de atmosfeer gemeten: er komt meer (stralings)energie binnen dan er wordt uitgezonden naar de ruimte. Deze overtollige energie wordt voor het overgrote deel omgezet in warmte.

Historische context (2)

De temperatuur op Aarde wordt sinds halverwege de 19e eeuw systematisch gemeten. Uit die gegevens blijkt dat de temperatuur op Aarde sinds 1880 significant stijgt. Voor 1880 werden directe temperatuurmetingen niet systematisch uitgevoerd: door het gebrek aan technische hulpmiddelen en de beperkte geografische spreiding worden deze metingen dan ook beschouwd als onnauwkeurig. Historische aardtemperaturen worden daarom in kaart gebracht door inventarisatie van secundaire effecten zoals de jaarringen van bomen, de ontwikkeling van koraal en de resten van gassen in ijs op Antarctica. Deze afgeleide metingen, proxies genoemd, zijn minder nauwkeurig dan de moderne temperatuurmetingen, maar laten zien dat de temperatuur op het noordelijk halfrond ongekend hoog was gedurende de late 20e eeuw en begin 21e eeuw in vergelijking met ten minste de laatste 1000 jaar (zie bijbehorende grafiek). Ook uitgesproken veranderingen zoals smeltende ijskappen en de terugtrekking van gletsjers over de hele wereld, lijken ongekend in vergelijking met ten minste de laatste 2000 jaar.

Op een schaal van tienduizenden jaren zijn er cycli van glacialen waar te nemen. Glacialen zijn relatief korte koude periodes binnen een ijstijdvak, welke zich gemiddeld eens in de 10.000 tot 30.000 jaar voordoen. Gedurende een glaciaal is het gemiddeld zo'n 5 tot 8 graden kouder dan in een interglaciaal en is de CO2-concentratie substantieel lager (zie bijbehorende grafiek). Het laatste glaciaal eindigde ruwweg 10.000 jaar geleden. Nog verder terugkijkend in het verleden, zien we dat de gemiddelde temperatuur op Aarde zowel substantieel lager als substantieel hoger is geweest dan de huidige waarde.

Oorzaken (1)

Bijdrage van verschillende factoren aan de opwarming van de Aarde volgens modelberekeningen. De gemodelleerde (bruin) en gemeten (zwart) temperatuurverandering tussen 1900 en 1990 alsmede de bijdrage van verschillende factoren aan de modeltemperatuur worden weergegeven.

Het IPCC concludeerde in zijn vierde rapport, dat in de loop van 2007 werd voltooid, dat de opwarming van de Aarde "onmiskenbaar" aan de gang is en dat "het zeer waarschijnlijk is dat" de dominante oorzaak menselijk handelen is. Het panel noemde de toename van broeikasgassen, verandering in het landgebruik en de straling van de zon als de oorzaken van toename van energie in het klimaatsysteem en de toename van de concentratie aerosolen als een factor die dit juist tegengaat. In zijn opvolgende rapporten was het IPCC steeds stelliger over de mens als veroorzaker.

De conclusie van het IPCC dat de wereldwijde opwarming sinds 1998 zou zijn afgenomen werd in 2015 weersproken door nieuw onderzoek van Amerikaanse klimaatwetenschappers, die hun artikel publiceerden in Science. Zij hadden in hun eigen berekeningen ook de Arctis betrokken en meer rekening gehouden met de temperatuur van het water in de oceanen.

Invloed van de mens (2)

Versterkt broeikaseffect (3)

Het is zeer waarschijnlijk dat de opwarming vooral het gevolg is van een versterkt broeikaseffect veroorzaakt door broeikasgassen, waarvan de uitstoot sinds de industriële revolutie sterk is toegenomen. Voorbeelden van broeikasgassen zijn waterdamp, kooldioxide (CO2), methaan (CH4), lachgas (N2O) en CFK's. Deze broeikasgassen absorberen de warmtestraling van de Aarde en zenden die deels weer terug naar het aardoppervlak in plaats van deze door te laten richting de stratosfeer waardoor de Aarde meer energie vasthoudt. Dit komt overeen met metingen dat er meer energie de Aarde bereikt dan ze verlaat. Deze onbalans wordt ook wel een positieve stralingsforcering genoemd en draagt bij aan de opwarming van de Aarde. Als gevolg van dit versterkte broeikaseffect worden de lagere atmosfeer en het aardoppervlak warmer en de hogere atmosfeer, de stratosfeer, kouder. De concentraties broeikasgassen in de atmosfeer zijn de hoogste in minstens 800.000 jaar.

De toename van broeikasgassen is grotendeels het gevolg van menselijk handelen: verbranding van fossiele brandstoffen (inclusief de onbedoelde kolenbranden), productie van cement. Ook landbouw, veeteelt en verandering van landgebruik (voornamelijk ontbossing) dragen bij aan de verhoging van de concentraties broeikasgassen.

Van de belangrijkste door de mens uitgestoten broeikasgassen, blijft CO2 ook op lange termijn de grootste invloed hebben. Het merendeel wordt binnen enkele honderden jaren opgenomen door de oceanen en de biosfeer, echter ruwweg een kwart kan slechts uit de atmosfeer verdwijnen door een aantal geologische processen, zoals verwering van gesteentes op Aarde en het begraven raken van sedimenten. Dit zijn processen die zich voltrekken op een tijdsschaal van tienduizenden jaren.

Het idee van het broeikaseffect werd voor het eerst voorgesteld aan het begin van de 19e eeuw en vijftig jaar later werd het inderdaad ontdekt. In 1979 kwam men met een schatting over wat er gebeurt met de temperatuur van het Aardoppervlak wanneer de CO2-concentratie zich zou verdubbelen. Men kwam uit op een stijging van 3,0 ± 1,5 °C, wat redelijk goed overeenkomt met huidige schattingen. Dit getal wordt de klimaatgevoeligheid genoemd.

Roet (3)

Een andere antropogene factor die invloed heeft op het klimaat is de uitstoot van aerosolen. Dit zijn colloïdale deeltjes vaste stof of vloeistof in de lucht. Netto hebben deze deeltjes een afkoelend effect door verhoogde reflectie in de atmosfeer. Fijnstof en roet zijn voorbeelden van aerosolen uitgestoten door mensen. Aerosolen hebben een direct en indirect effect op het klimaat. Door hun reflecterende eigenschappen verhogen ze het vermogen van de atmosfeer om straling te weerkaatsen, ook wel de albedo genoemd. Dit leidt tot afkoeling. Daarnaast zijn sommige aerosolen condensatiekernen, zoals sulfaten, en zorgen ze voor verhoogde wolkvorming die ook langer kan aanhouden. De onzekerheid over beide effecten is substantieel zoals ook kan worden gezien in de volgende grafiek. Door de korte levensduur van aerosolen in de atmosfeer zijn aerosolen niet homogeen verspreid over de atmosfeer: er zijn grote lokale verschillen.

Roet zorgt juist voor een afname van de albedo en daarmee opwarming, met name indien het terechtkomt op sneeuw.

De meeste deeltjes die onder deze categorie vallen, zijn na enkele weken tot enkele jaren weer uit de atmosfeer verdwenen. Hoe hoger de deeltjes zich in de atmosfeer bevinden, hoe langer het duurt voordat ze neerslaan.

Invloed van de natuur (2)

Elektromagnetische straling afkomstig van de Zon (rood), het aantal zonnevlekken (blauw) en de zonnevlamactiviteit (groen) zoals gemeten tussen 1975 en 2005. Drie zonnecycli worden getoond, die gemiddeld elf jaar duren.

Een statistische analyse over de temperatuursveranderingen gedurende de periode van 1500 tot 2000 wijst uit dat voor 99% vaststaat dat de opwarming van de Aarde sinds 1880 niet het gevolg is van natuurlijke fluctuaties.

Natuurlijke fluctuaties, in bijvoorbeeld de zonneactiviteit, kunnen de opwarming van de Aarde sinds 1900 niet volledig verklaren. Wanneer een grotere stralingsintensiteit van de Zon de belangrijkste aandrijver van de huidige temperatuurstijging zou zijn, zou zowel opwarming van de lage atmosfeer (de troposfeer) als de hogere atmosfeer (de stratosfeer) verwacht worden; er wordt echter alleen een stijging waargenomen in de troposfeer. Dit patroon van opwarming is wel wat men verwacht bij een opwarming veroorzaakt door broeikasgassen. Sinds 1950 is het aantal zonnevlekken redelijk constant, en hoger dan in de twee eeuwen daarvoor. Deze zonnevlekken zijn een goede indicatie van de stralingsintensiteit van de Zon. Ook directe metingen, die sinds 1978 gedaan worden, geven aan dat de stralingsintensiteit van de Zon niet is toegenomen, en dat toegenomen stralingsintensiteit dus geen verklaring kan zijn van de versnelde opwarming sindsdien. Het aantal zonnevlekken correleert sinds 1950 redelijk met temperatuurfluctuaties die boven op de stijgende trend zichtbaar zijn, maar in de eerste helft van de 20e eeuw is juist sprake van een anticorrelatie.

Een andere hypothese over de invloed van de Zon betreft de gevolgen van kosmische straling. Volgens deze hypothese zouden door straling geïoniseerde deeltjes bijdragen aan de vorming van condensatiekernen, deeltjes die wolkvorming bevorderen. De activiteit van de Zon bepaalt hoeveel kosmische straling de Aarde bereikt, en zou dus invloed hebben op de wolkvorming. Deze hypothese wordt op statistische gronden betwijfeld: slechts indien je uitgaat van heel specifieke tijdreeksen, bestaat er een verband tussen wolkvorming en kosmische straling. De eerste resultaten van het CLOUD-project bevestigen deze uitspraken: kosmische straling heeft geen significant effect op de vorming van een belangrijke groep aerosolen die als nucleatiekernen dienen, maar de invloed op de vorming van andere aerosolen is nog niet uit te sluiten.

Overige natuurlijke bijdragen aan temperatuurschommelingen, zoals de uitstoot van aerosolen door vulkanisme en de Milanković-cycli werken voornamelijk op andere tijdschalen dan de opwarming van de Aarde. Hevige vulkaanuitbarstingen kunnen voor een afkoeling van de Aarde zorgen doordat aerosolen in de stratosfeer terechtkomen en zonlicht blokkeren. Deze aerosolen bevinden zich na de uitbarsting maximaal een paar jaar in de atmosfeer. De stand van de Aarde ten opzichte van de Zon varieert langzaam, wat over het algemeen een trage verandering van aardse temperaturen veroorzaakt. De emissies van CO2 door vulkanen zijn veel lager dan antropogene emissies. Met antropogeen wordt bedoeld dat wat louter door menselijke handelen wordt veroorzaakt.

Terugkoppelingen (1)

Een simpel diagram van een terugkoppeling. P heeft invloed op Q, en Q invloed op P. Een verandering in P kan zo indirect worden versterkt (positieve terugkoppeling) of verzwakt (negatieve terugkoppeling).

Het klimaatsysteem kent een aantal terugkoppelingen. Een positieve terugkoppeling, of meekoppeling, versterkt de initiële opwarming. Een negatieve terugkoppeling, of tegenkoppeling, zorgt ervoor dat de initiële opwarming lager wordt. De concentratie broeikasgassen gecombineerd met het netto-effect van de terugkoppelingen bepaalt de klimaatgevoeligheid: hoeveel verandert de temperatuur op Aarde door een verandering in de concentraties broeikasgassen.

De sterkste terugkoppeling is de waterdampterugkoppeling: dit is een positieve terugkoppeling. Voor elke graad temperatuurstijging kan lucht ongeveer 7% meer waterdamp bevatten. Het versterkte broeikaseffect door waterdamp is sterker dan de directe invloed van CO2. Een andere positieve terugkoppeling is het smelten van sneeuw en ijs bij hogere temperaturen. Hierdoor neemt de albedo van de Aarde af, met als gevolg dat er minder zonnestraling gereflecteerd wordt.

Veranderingen in de wolkenbedekking van de Aarde leiden waarschijnlijk tot een versnelde opwarming. Wolken hebben een dubbel effect op de energiebalans van de Aarde. Aan de ene kant zorgen ze ervoor dat de albedo van de Aarde toeneemt en er meer licht wordt teruggekaatst naar de ruimte. Aan de andere kant zorgen ze ervoor dat warmte minder makkelijk kan ontsnappen. Hoe sterk beide effecten zijn hangt af van het type wolk en de hoogte van de wolken. De grootte van het effect is zeer onzeker (zie bijbehorende grafiek).

Een belangrijke negatieve terugkoppeling komt voort uit de wet van Stefan-Boltzmann: bij een stijgende temperatuur zendt de Aarde meer straling uit. Op het moment is de koolstofcyclus een negatieve terugkoppeling voor de concentratie CO2: de oceanen en biomassa op het land nemen nu grote hoeveelheden CO2 op. Er zijn aanwijzingen dat de reservoirs minder koolstof op gaan nemen bij hogere temperaturen en wanneer ze verder verzadigd raken, met als gevolg een groter percentage van de nieuwe uitstoot die in de atmosfeer achterblijft.

Klimaatmodellen (1)

Verschillende RCP scenario's met projecties van concentraties CO2-equivalent, gebruikt door het IPCC in zijn vijfde rapport. De namen van de projecties RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 en RCP8.5 duiden op de stralingsforcering die in 2100 wordt verwacht.

Klimaatmodellen die behalve natuurlijke processen zoals de variabele instraling van zonlicht ook de effecten van de toegenomen concentraties broeikasgassen en aerosolen in de atmosfeer op het klimaat betrekken, geven een temperatuurstijging aan op termijnen van tientallen tot honderden jaren. Gebaseerd op deze modellen wordt door het IPCC voor de komende twee decennia een temperatuurstijging van ongeveer 0,2 °C per decennium verwacht, in alle onderzochte emissiescenario's. Zelfs als de concentraties broeikasgassen en aerosolen gelijk gebleven waren aan de niveaus van 2000 zou de temperatuur toenemen met ongeveer 0,1 °C per decennium. Bij deze kortetermijnverwachtingen worden een aantal aannames gedaan: variaties in zonnesterkte, vulkaanuitbarstingen en interne variabiliteit zorgen voor korstondige extra afkoeling of opwarming.

Na 2030 lopen de temperatuurprojecties verder uiteen, afhankelijk van de hoeveelheid broeikasgasemissies. Bij een scenario waar vergaande mitigatie plaatsvindt komt de temperatuurstijging ten opzichte van de pre-industriële waarden in 2100 uit op 1,6 °C (0,9-2,3 °C). Bij een scenario met minder ambitieuze mitigatie wordt de opwarming geschat op 2,4 °C (1,7-3,2 °C). Twee scenario's geven een beeld over de opwarming van de Aarde zonder uitstootvermindering. Hierbij zal de temperatuur oplopen met 2,8 en 4,7 (2,0-5,4 °C) in 2100 ten opzichte van de pre-industriële waarden.[a 2] Onderzoekers van het MIT publiceerden in mei 2009 modeluitkomsten die wijzen op een temperatuurstijging van 5,1 °C (3,5-7,4 °C) ten opzichte van 1990. Een van de oorzaken van de hogere temperatuurstijgingen dan die van het IPCC zijn de hogere broeikasgasemissies in de MIT-scenario's.

Op mondiale en continentale schaal worden de waargenomen klimaatveranderingen, zoals veranderingen in neerslag en temperaturen, binnen redelijke onzekerheidsmarges gesimuleerd, maar op regionale schaal presteren de modellen minder goed. Om dit te verbeteren wordt vaak gebruikgemaakt van geneste modellen: modellen met een hogere resolutie worden in een model met een lagere resolutie gezet: de randen van dit model gebruiken dan de waarden (zoals luchtvochtigheid en temperatuur) uit het model met de lage resolutie.

Volgens de gebruikte klimaatmodellen zou de troposfeer in de tropen sneller moeten opwarmen dan het aardoppervlak, maar dit blijkt niet uit alle waarnemingen. Men verwacht dat de oorzaak hiervan de lage kwaliteit van de waarnemingen is. Meer onderzoek is echter nodig om dit duidelijk te maken. Ook de recente vertraging van de temperatuurstijgingen van de lage atmosfeer kan niet goed gesimuleerd worden door een groot percentage van de klimaatmodellen.

De grootste onzekerheid bij het opstellen van klimaatmodellen is de dynamica van bewolking, welke voor een belangrijk deel verantwoordelijk is voor de grote spreiding in uitkomsten tussen modellen. Andere punten van verbetering zijn de simulatie van de waterkringloop, en de koolstofcyclus op de lange termijn.

Een aantal belangrijke factoren die op een tijdsschaal van millennia het klimaat bepalen zijn de afstand van de Aarde tot de zon en de hoek die de rotatieas van de Aarde maakt met het vlak waarin de Aarde om de zon draait. Dit zijn mechanismes die afzonderlijk slechts kleine temperatuurschommelingen teweeg kunnen brengen, maar door positieve terugkoppelingen een groot effect op het klimaat kunnen hebben. In de jaren zeventig van de 20e eeuw waren enkele wetenschappers ervan overtuigd dat er een volgende ijstijd naderde, maar de meerderheid voorspelde toen al een netto opwarming.

Verwachte gevolgen (1)

Klimatologische veranderingen (2)

Door het stijgen van de gemiddelde temperatuur wordt verwacht dat een deel van de gletsjers, het (land)ijs op de polen en op Groenland gaat smelten, waardoor het zeeniveau stijgt. Een bijkomend gevolg van deze smeltende ijskappen is een afname van de albedo, het weerkaatsende effect van het ijs. Minder ijs betekent minder weerkaatsing - dus meer absorptie van zonlicht, met als gevolg een verdere toename van de temperatuurstijging. Dat is de voornaamste reden dat de relatieve toename van de temperatuur aan de polen het hoogst is. Er wordt een zeespiegelstijging tussen de 26 en 82 centimeter verwacht in de periode 1981-2100 ten opzichte van de referentieperiode 1986-2005 (over de vorige eeuw geschat op 1 à 2 millimeter per jaar, 3 millimeter per jaar sinds 1992). De stijging van de zeespiegel wordt veroorzaakt door twee effecten: er komt smeltwater vanuit de ijskappen en de gletsjers in de oceaan terecht en het water wordt warmer en zal daardoor uitzetten.

Wanneer de temperatuur toeneemt, neemt ook de verdamping van warm (zee)water toe, wat mondiaal gezien leidt tot meer neerslag. Bij de polen en in hoger gelegen gebieden valt die neerslag in de vorm van sneeuw, hetgeen de krimp van de ijskappen weer afremt. Er zijn grote regionale verschillen in de effecten op de hoeveelheid neerslag: op sommige plaatsen zal het juist minder gaan regenen. Ook is het mogelijk dat de toename in verdamping van water groter is dan de neerslagtoename. Op een aantal plaatsen kan klimaatverandering leiden tot meer droogte, met als mogelijke gevolg meer kans op bosbranden en woestijnvorming. De kracht van de Golfstroom zal waarschijnlijk geleidelijk afnemen door de smeltende polen. Dit kan in een uiterst geval juist een daling van de gemiddelde temperatuur voor West-Europa betekenen. Het precieze verloop hiervan is echter allerminst zeker en de scenario's hierover geven dan ook verschillende uitkomsten. Het KNMI verwacht geen grote effecten op de Golfstroom voor 2100, en geen afnemende temperaturen. Men verwacht over het algemeen wel een toename van extreme weersomstandigheden. De gevolgen van de opwarming op de intensiteit en frequentie van orkanen zijn nog niet duidelijk.

Veranderingen in het ecosysteem (2)

De voornoemde veranderingen zullen leiden tot aantasting van ecosystemen: klimaatverandering gaat samen met de verschuiving van klimaatzones naar hoger gelegen gebieden en richting de polen. Soorten die in koudere gebieden beter gedijen zullen in aantal afnemen bij opwarming en soorten die warmere klimaten prefereren zullen in aantal toenemen. Wanneer de migratiesnelheid van soorten kleiner is dan de snelheid van de opwarming van de Aarde, kunnen soorten zich niet goed aanpassen aan de veranderingen. Biomen, specifieke geografische gebieden met karakteristieke soorten, zullen van plaats of van grootte veranderen. Een groot deel van zowel soorten die op land leven als in het water, heeft een grotere kans op uitsterven, zeker wanneer de effecten van opwarming worden gecombineerd met andere impacts zoals habitatveranderingen, overexploitatie, vervuiling en invasieve soorten. Koraalriffen zijn erg gevoelig voor stijgende temperaturen en zeewaterverzuring als gevolg van de toename van CO2 en zullen waarschijnlijk op grote schaal afsterven.

Gevolgen voor de mens (2)

De productie van graan wordt beïnvloed door de opwarming van de Aarde. Op midden- en hoge hoogtegraad neemt de oogst bij een lage temperatuurstijgingen (1 of 2 °C) mogelijk toe, bij lage hoogtegraden zal de opbrengst afnemen bij elke temperatuurstijging.

De opwarming van de Aarde zal in de 21e eeuw voor miljoenen mensen negatieve gevolgen hebben, zoals overstromingen in kustgebieden en nabij rivieren, vermindering in de beschikbaarheid van drinkwater, toegenomen ondervoeding en impacts op de gezondheid. Hoewel de temperatuur het snelst zal stijgen op de polen vanwege de verandering van de albedo, wordt verwacht dat de ecologische en sociale gevolgen het grootst zullen zijn in de tropen. Deze gebieden kennen van nature namelijk weinig klimaatvariatie tussen de seizoenen onderling, en kennen daardoor een relatief grote temperatuurstijging. Bovendien bevinden veel ontwikkelingslanden zich in deze gebieden, waardoor adaptatie niet altijd betaalbaar zal zijn. De mondiale economische gevolgen van klimaatverandering zijn nog erg onzeker. De voorspelde gevolgen bij een kleine temperatuurstijging met behulp van mitigatie (tussen de 0 en 2 °C) kunnen zowel een stijging als een daling van het mondiale BBP teweegbrengen. Als de Aarde meer dan 2,5 °C of 3 °C opwarmt wordt een daling van het BBP voorspeld door een groot deel van het beschikbare onderzoek.

De landbouwproductiviteit gaat veranderen: een afname wordt verwacht in gebieden waar droogte door klimaatverandering toeneemt, zoals in het Midden-Oosten en India, en toename (bij matige klimaatverandering en mitigatie) in koudere gebieden door een verlenging van het groeiseizoen. Netto kan het positief of negatief uitvallen voor een lage temperatuurstijging, en wordt een afname verwacht bij hogere waarden (> 2 °C) van temperatuurstijging.

Het smelten van ijs in verschillende gebieden heeft ook positieve effecten: er komen natuurlijke grondstoffen bij de polen vrij voor ontginning, zoals olie. De Noordwestelijke Doorvaart in Canada komt vrij, waardoor schepen aan de noordkant om het Amerikaanse continent kunnen varen.

Effecten op de gezondheid (3)

De veranderende hydrologische cyclus, zoals veranderingen in neerslag en het smelten van gletsjers, heeft invloed op de beschikbaarheid en kwaliteit van drinkwater. Het aantal mensen dat getroffen wordt door overstromingen zal mogelijk toenemen van 13 miljoen naar een kleine 100 miljoen per jaar, door de stijging van de zeespiegel. Laag liggende eilandstaten zoals de Maldiven en Tuvalu lopen het risico om onbewoonbaar te raken. Infectieziekten zoals malaria en knokkelkoorts kunnen vaker voor gaan komen, doordat hun vectoren een groter leefgebied krijgen. Het risico op sterfte en ziekte door hitte, ondervoeding en bosbranden zal toenemen. In sommige landen zal de sterfte door koude afnemen. Mogelijk verhoogt de toegenomen schaarste ten gevolge van klimaatverandering de kans op conflicten. Migratiestromingen kunnen ook beïnvloed worden door voorgenoemde effecten.

Abrupte klimaatverandering (2)

Enkele grote veranderingen in het klimaatsysteem zouden abrupt plaats kunnen vinden. Een voorbeeld hiervan is het ontsnappen van methaan uit permafrost of methaanhydraten uit de oceaan, wat als positieve terugkoppeling de temperatuurstijging zal versterken. Over het algemeen is er nog veel onduidelijk over de onderliggende mechanismes die tot abrupte klimaatverandering kunnen leiden. De waarschijnlijkheid van abrupte veranderingen lijkt klein te zijn. Bij sterkere opwarming is er een grotere kans op abrupte veranderingen.

Nederland en België (1)

Een verandering van de voorjaarstemperatuur heeft een significante invloed op de gemiddelde datum van de vondst van het eerste kievitsei in Friesland.

Hoewel ontwikkelingslanden het meest kwetsbaar zijn, zullen ook Nederland en België te maken krijgen met de gevolgen van klimaatverandering. In Nederland is de opwarming sinds 1950 twee keer zo snel verlopen als het wereldwijde gemiddelde. Naast hogere temperaturen en een stijgende zeespiegel zal Nederland te maken krijgen met nattere winters en hevigere hagel- en onweersbuien. Ook zal het aantal dagen met mist afnemen. Andere voorspelde veranderingen in het klimaat zijn afhankelijk van de verschillende scenario's die het KNMI hanteert: De G-scenario's (G van gematigd) gaan uit van 1,5 °C toename van de gemiddelde wereldtemperatuur in 2085 ten opzichte van 1990, en de W-scenario's (W van warm) van 3,5 °C. Klimaatmodellen laten zich niet eenduidig uit over de windrichting in het toekomstig klimaat in Noordwest-Europa. Sommige voorzien een verandering van de overheersende windrichting. Daarmee is rekening gehouden in de GH- en WH-scenario's. In deze 'H'-scenario's zijn de zomers droger en is de gemiddelde jaartemperatuur iets hoger.

Gevolgen

Een toename van de hoeveelheid neerslag zal gevolgen hebben voor de rivieren. Rivieren in Nederland en België zullen mogelijk 's winters meer en 's zomers juist minder water afvoeren. Om schade door overstromingen te voorkomen, wordt het ruimtegebruik daar op ingesteld. Daarnaast heeft de stijging van de zeespiegel gevolgen voor de kustbescherming. Door verzilting kan de landbouwproductie in de kuststreken achteruit gaan. De Waddenzee zal mogelijkerwijs niet meer grotendeels droog komen te liggen bij eb, wat verregaande gevolgen kan hebben voor het ecosysteem aldaar. Positieve gevolgen zullen er ook zijn, zoals een toename van de landbouwproductie door een verlengd groeiseizoen. Ook zal het aantal gunstige recreatiedagen toe kunnen nemen.

Ecosystemen veranderen omdat door de veranderende externe omstandigheden bepaalde dier- en plantensoorten zich beter, of juist minder goed, kunnen handhaven. Een toename van uitheemse dier- en plantensoorten (exoten) valt te verwachten, voorbeelden hiervan zijn de eikenprocessierups en de wespenspin. Andere soorten uit zuidelijker streken rukken op en vestigen zich in Nederland, zoals de bijeneter, terwijl soorten die vroeger in Nederland overwinterden, zoals de bonte kraai, verdwijnen.

Maatregelen (1)

Er zijn verschillende mogelijkheden om schade door de opwarming van de Aarde te beperken. Men kan de oorzaak ervan aanpakken: mitigatie, of men kan zich aanpassen aan de gevolgen van de opwarming van de Aarde: adaptatie. Ook bestaat de mogelijkheid om grootschalig aan het klimaat te knutselen: geo-engineering.

Mitigatie (2)

Een zonnepaneel gemonteerd op een hybride auto. Door het gebruik van zonne-energie is er minder brandstof nodig en stoot de auto minder broeikasgassen uit.

Mitigatie wordt gedefinieerd als een menselijke interventie om het vrijkomen van broeikasgassen uit bronnen te verminderen en de werking van zogenoemde putten te versterken. Met een put bedoelt men ieder proces, activiteit of mechanisme dat broeikasgassen, aerosolen, of wat daar aan voorafgaat, uit de atmosfeer haalt. Voorbeelden van natuurlijke putten zijn de oceanen en bossen die door hun opname van warmte en CO2 als een natuurlijke hitte- en koolstofput kunnen dienen. De volgende maatregelen worden dus onder mitigatie geplaatst: het verminderen van energieverbruik door energiebesparende maatregelen te nemen, zoals het verminderen van consumptie en een verhoogde energie-efficiëntie; gebruik te maken van minder milieubelastende vormen van energie, zoals duurzame energie en kernenergie; en door CO2 direct bij verbranding van fossiele brandstoffen of biobrandstoffen op te vangen en op te slaan. Het is niet helemaal duidelijk wanneer het versterken van putten onder mitigatie, en wanneer dit onder geo-engineering valt.

Broeikasgasemissies (gemeten in CO2-equivalenten) stegen gemiddeld in de periode tussen 2000 en 2010 2,2% per jaar, vergeleken met 1,3% per jaar in de periode 1970-2000.

De kans op het overschrijden van verschillende temperatuurstijgingen voor verschillende CO2-concentraties.

Adaptatie (2)

Een andere maatregel is adaptatie, wat wordt gedefinieerd als: "het proces van aanpassen aan huidige of verwachte klimaatverandering". In menselijke systemen houdt dit in dat schade wordt beperkt, en dat voordelen kunnen worden benut. In natuurlijke systemen kunnen mensen de veranderingen faciliteren. Een gerelateerde term is de adaptatiecapaciteit: de mogelijkheid van systemen, organisaties, mensen en andere organismes om zich aan te passen aan de opwarming van de Aarde. Deze adaptatiecapaciteit kan onder andere verhoogd worden door betere socio-economische omstandigheden.

Er bestaat een relatie tussen mitigatie en adaptatie. Sommige adaptatiemaatregelen, zoals het inzetten van ventilatoren om gebouwen te koelen, werken tegen mitigatie in. Bij andere maatregelen, zoals koude-warmteopslag waarbij huizen in de zomer worden gekoeld en in de winter worden opgewarmd door in de grond opgeslagen water, werken mitigatie en adaptatie elkaar juist in de hand.

Geo-engineering (2)

Geo-engineering, ook wel klimaat-engineering genoemd, is het opzettelijk grootschalig aanpassen van het klimaat. Er zijn twee categorieën te onderscheiden: management van zonnestraling en verwijdering van CO2 uit de lucht. Voorbeelden van beide zijn respectievelijk reflecterende sulfaatdeeltjes in de stratosfeer injecteren, en de Sahara vol planten met bomen. In 2014 verscheen er een onderzoek naar een aantal veel genoemde methodes en concludeerde dat alle ofwel ineffectief waren, ofwel zeer grote bijwerkingen hadden en bij abrupt stoppen tot grotere opwarming zouden leiden dan in het geval dat er geen geo-engineering had plaatsgevonden.

Publieke discussie en bewustzijn (1)

Percentage van de mensen dat denkt dat de opwarming van de Aarde alleen veroorzaakt wordt door menselijk handelen, per land. Van de onderzochte Europese landen, is het percentage in Nederland het laagst. (2008-2009)

Het idee van een opwarmende Aarde verspreidde zich gedurende de jaren 80 richting het publiek domein. In 1981 had ongeveer een derde van de Amerikaanse bevolking gehoord over het broeikaseffect en had de New York Times voor het eerst een artikel over klimaatopwarming op haar eerste pagina. In 1988 nam het aantal artikelen in Amerikaanse kranten over klimaatopwarming met een factor tien toe in vergelijking met het jaar daarvoor. Voor veel milieuorganisaties werd de afname van broeikasgasuitstoot een van de topprioriteiten. De publiciteit van het Kyoto-protocol in 2005 bracht de opwarming van het klimaat naar een breder publiek debat. De film An Inconvenient Truth van Al Gore zorgde er in 2006 voor dat vrijwel iedere Amerikaan gehoord had over de opwarming van de Aarde. Tegelijkertijd ontstond er een tegenbeweging vanuit bedrijven met economische belangen in de status quo, zoals oliebedrijven, tezamen met voornamelijk Amerikaanse conservatieve denktanks die de nadruk legden op de voordelen die klimaatverandering met zich mee brengt. Ook stellen deze organisaties dat vaak voorgestelde maatregelen tegen de opwarming van de Aarde meer schade doen dan oplossen, bijvoorbeeld op economisch gebied.

Ondanks de toegenomen belangstelling in de westerse wereld bleek in 2009 dat ongeveer een derde van de wereldbevolking zich nog steeds niet bewust was van de opwarming van de Aarde. In 2009 dacht in Europa een groter percentage van de bevolking dat de opwarming van de Aarde het gevolg is van menselijk handelen, dan in de Verenigde Staten. Volgens Gallup-polls over 2007 en 2011 ziet 42% van de wereldbevolking de opwarming van de Aarde als een persoonlijke bedreiging. In 2014 bleek uit onderzoek door Ipsos MORI dat in alle twintig onderzochte landen de meerderheid denkt dat de opwarming van de Aarde door menselijke activiteit wordt veroorzaakt en deze opwarming rampzalige gevolgen kan hebben voor het milieu. In voornamelijk Engelstalige landen bleek de wetenschappelijke consensus het minst algemeen aanvaard te zijn.

Controverse (2)

De controverse rond de opwarming van de Aarde verwijst naar een verscheidenheid van geschillen, significant meer uitgesproken in de populaire media door enkele critici dan in de wetenschappelijke literatuur, met betrekking tot de aard, oorzaken en gevolgen van opwarming van de Aarde. De betwiste kwesties omvatten de oorzaken van de toegenomen mondiale gemiddelde luchttemperatuur, vooral sinds het midden van de 20e eeuw, of deze opwarmingstrend ongekend is of binnen de normale klimaatschommelingen valt, of de mensheid aanzienlijk heeft bijgedragen, en of de stijging geheel of gedeeltelijk een artefact is van slechte metingen. Andere geschillen hebben betrekking op schattingen van de klimaatgevoeligheid, voorspellingen van extra opwarming, en wat de gevolgen van de opwarming van de Aarde zullen zijn. Slechts een beperkt deel ervan is gepubliceerd in peer reviewed tijdschriften, zodat de wetenschappelijke waarde van de kritiek onduidelijk is.

Uit verschillende onderzoeken blijkt dat ongeveer 97% van de klimaatwetenschappers zegt dat het klimaat verandert en dat dit wordt veroorzaakt door invloed van de mens. De overige 3% publiceert gemiddeld minder en wordt als minder prominent beschouwd binnen de klimaatwetenschap. Het percentage wetenschappers dat zegt dat de huidige klimaatverandering wordt veroorzaakt door de mens lijkt gegroeid te zijn in de periode 1991-2011.

Acties en het ontstaan van een klimaatbeweging (2)

Sinds het begin van de eenentwinstigeste eeuw nam het sociale protest tegen klimaatverandering toe, waardoor men is gaan spreken van een klimaatbeweging. Waar de beweging zich in eerste instantie boog over een groot aantal thema's zoals veeteelt, industrie en de energie-transitie is sinds 2008 het concept klimaatrechtvaardigheid centraal te komen staan. Dit slaat op het gegeven dat rijke landen over het algemeen het meest hebben bijgedragen aan het probleem van klimaatverandering, armere landen het gros van de kosten moeten dragen.

Daarnaast zijn er een themadagen zijn geweid aan (de gevolgen van) klimaatverandering. Een aantal bekende zijn Earth Hour, Dikketruiendag / Warmetruiendag en de Dag van de Aarde.

Internationale afspraken (1)

In 1992 werd in Rio de Janeiro het "Raamverdrag Klimaatverandering" van de Verenigde Naties gesloten, beter bekend als het Klimaatverdrag. De doelstelling hiervan is: "het stabiliseren van de concentratie broeikasgassen in de dampkring op een zodanig niveau, dat een gevaarlijke menselijke invloed op het klimaat wordt voorkomen." Nederland is een van de 177 landen die het Klimaatverdrag hebben ondertekend.

Zowel de Verenigde Naties als de Verenigde Staten hebben de post in het leven geroepen van Special Envoy for Climate Change: een diplomaat die gespecialieerd is in internationaalrechtelijke aangelegenheden met betrekking tot de klimaatverandering-problematiek. De eerste Amerikaanse diplomaat die deze post vervulde, sinds januari 2009, was Todd Stern. Sinds april 2016 wordt deze functie bekleed door Jonathan Pershing.

Tweegraden doelstelling (2)

Het meest recente rapport van het IPCC stelt dat het wenselijk is, te zorgen dat de opwarming van de Aarde beperkt blijft tot maximaal 2 °C. Hierboven wordt de kans op ernstige problemen substantieel, zoals het smelten van de ijskap op Groenland, tekorten aan water voor honderden miljoenen en een aantasting van de mondiale voedselproductie. Om de kans dat de temperatuur meer dan 2 °C stijgt onder de 50% te houden, moet de CO2-equivalente concentraties (gemeten inclusief aerosolen) onder de 450 ppmv blijven. In de huidige situatie compenseert de afkoelende werking van aerosolen ruwweg voor het opwarmend effect van andere broeikasgassen dan CO2, en zijn de CO2-concentratie en de CO2-equivalente concentratie ongeveer gelijk.

Twee rapporten, gepubliceerd in 2011 en 2012 door het VN-Milieuprogramma en het Internationaal Energieagentschap, gaven aan dat inspanningen begin 21e eeuw om de uitstoot van broeikasgassen te verminderen mogelijk onvoldoende waren om het doel van 2 °C opwarming te halen. Voor de onderhandelingen in Parijs in 2015, kwam een rapport uit waarin werd gesteld dat de tweegradendoelstelling gebaseerd is op foutieve aannammes en dat een doel van 1.5 °C nodig is om gevaarlijke klimaatverandering te voorkomen.

Kyoto-protocol (2)

Het Kyoto-protocol werd in 1997 aangenomen als protocol bij het Klimaatverdrag. Industrielanden hebben afgesproken om de uitstoot van broeikasgassen in de periode 2008 - 2012 gemiddeld met vijf procent te verminderen ten opzichte van het niveau in 1990. Per land gelden andere verminderingspercentages. De vermindering geldt voor de broeikasgassen koolstofdioxide (CO2), methaan (CH4), lachgas (N2O) en een aantal fluorverbindingen zoals (HFK's, PFK's en zwavelhexafluoride).

Op 16 februari 2005 trad het Kyoto-protocol officieel in werking. De Verenigde Staten hebben het Kyoto-protocol wel ondertekend, maar niet geratificeerd, en hoefden zich er dus niet aan te houden. Landen als China en India doen wel mee, maar het protocol heeft voor ontwikkelingslanden geen verplichting tot uitstootvermindering.

In mei 2007, in de aanloop naar de 33e jaarlijkse conferentie van de G8, onderschreven alle nationale academies van wetenschappen van de G8+5-landen dat landen gezamenlijk maatregelen moeten treffen tegen klimaatverandering. In 2009 vond de Klimaatconferentie Kopenhagen 2009 plaats waar het Akkoord van Kopenhagen gesloten werd. In 2012 werd op de COP18 in Doha besloten het Kyoto-protocol aan te passen en te verlengen tot 2020. Deze wijziging is nog niet in werking getreden.

Parijs-overeenkomst (2)

In 2015 werd een bindend akkoord gesloten met alle leden van de VN met als doel klimaatverandering te beperken tot ver onder de twee graden. Dit akkoord is net als het Kyoto-protocol een uitwerking van het klimaatverdrag. Het stelt een procedure vast om elke vijf jaar met ambitieuzere plannen te komen en deze elke vijf jaar op een uniforme manier te evalueren. Ook werd opnieuw vastgesteld dat er schadevergoeding aan ontwikkelingslanden moet worden betaald.

Beleid op continentaal en nationaal niveau (2)

De Europese Unie heeft afgesproken de uitstoot met 20% te verminderen in 2020 ten opzichte van 1990. Een van de middelen die ze hiervoor gebruikt is het handelssysteem in uitstootrechten.

Met de economische groei in opkomende economieën in met name Zuidoost-Azië, zoals China en India, bestaat er ook een toenemende vraag naar energie. Aangezien het merendeel van de energieproductie niet duurzaam is, zal de wereldwijde uitstoot van broeikasgassen toenemen ondanks dat andere landen verminderde CO2-uitstoot bewerkstelligen. Politiek gezien is de situatie ook zeer lastig doordat de uitstoot per hoofd van de bevolking in China nog altijd bijna twee keer zo laag ligt als in Nederland.