

Postadres: Postbus 201, 3730 AE De Bilt
Bezoekadres: Wilhelminalaan 10
• • • •
Telefoon 030-22 06 911, Telefax 030-22 10 407
www.knmi.nl

Meer informatie?

Voor meer informatie over de nieuwe klimaatscenario's voor Nederland, hoe ze zijn gemaakt, en toepassingen kunt u terecht op de speciale website www.knmi.nl/klimaatscenarios.

Een wetenschappelijke verantwoording is te vinden in het Engelstalige KNMI rapport WR2006-01 'KNMI Climate Change Scenarios 2006 for The Netherlands'.

Voor vragen naar aanleiding van deze brochure kunt u ook contact opnemen met de klimaatdesk van het KNMI: klimaatdesk@knmi.nl, telefoon 030-22 06 850.

Het KNMI is het nationale data- en kenniscentrum voor
weer, klimaat en seismologie



• • • •

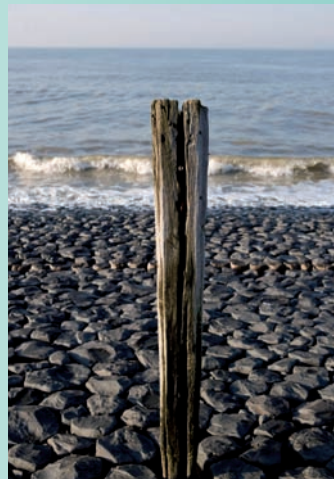
Klimaat in de 21^e eeuw *vier scenario's voor Nederland*





Klimaat in de 21^e eeuw

vier scenario's voor Nederland



Introductie

Het klimaat in Nederland verandert. Hoe het verandert is vooral afhankelijk van de wereldwijde temperatuurstijging en van veranderingen in de stromingspatronen van de lucht in onze omgeving (West Europa), en de daarmee samenhangende veranderingen in de wind.

Op basis van de meest recente resultaten van klimaatonderzoek presenteert het KNMI vier nieuwe klimaatscenario's voor Nederland. Ze vervangen de scenario's die in 2000 zijn opgesteld voor de Commissie Waterbeheer 21^e eeuw.

Figuur 1 (binnenzijde achterkaft) geeft een schematisch overzicht van de nieuwe scenario's. In **tabel 1** (binnenzijde achterkaft) is de bijbehorende klimaatverandering rond 2050 uitgedrukt in cijfers.

Wat zijn klimaatscenario's?

Klimaatscenario's zijn consistente en plausibele beelden van een mogelijk toekomstig klimaat. Ze zijn bedoeld om verkennende studies uit te voeren naar de effecten van klimaatverandering en maken het mogelijk hierop te anticiperen (adaptatie).

Klimaatscenario's zijn geen lange termijn weersverwachtingen: ze doen geen uitspraken over het weer op een bepaalde datum, maar alleen over het gemiddelde weer en de kans op extreem weer in de toekomst.

De KNMI'06 klimaatscenario's geven een beeld van de veranderingen in temperatuur, neerslag, wind en zeespiegel voor een klimatologische periode van 30 jaar. De scenario's voor 2050 zijn dus representatief voor het klimaat in de periode rond dat jaar (tussen 2036 en 2065). Evenzo is het klimaat in het gekozen basisjaar 1990 beschreven met gegevens van 1976 tot en met 2005.

In de cijfers voor de veranderingen in de KNMI'06 klimaatscenario's (zie **tabel 1**) komt informatie over jaar-op-jaar variatie en natuurlijke schommelingen op lange termijn, zoals die ook in het verleden zijn voorgekomen, niet tot uitdrukking. Vooral voor de wind zijn die schommelingen relatief groot ten opzichte van de veranderingen in de scenario's.

Hoe zijn de KNMI'06 klimaatscenario's gemaakt?

Voor de nieuwe scenario's zijn recente uitkomsten geanalyseerd van een groot aantal computermodellen, die wetenschappers gebruiken om de menselijke invloed op het wereldwijde en regionale klimaat te onderzoeken.

Voor de scenario's die in 2000 zijn gepubliceerd was slechts een beperkt aantal klimaatmodellen beschikbaar. Deze gaven alleen een goede indicatie van de wereldwijde opwarming en zeespiegelstijging. De verandering in neerslag in Nederland werd voor de scenario's bepaald aan de hand van de statistische relatie tussen neerslag en temperatuur in meetreeksen. Daarbij werd ervan uitgegaan dat die relatie en de luchtstromingspatronen niet zouden wijzigen.

Met de nieuwe analyses is de samenhang tussen de wereldwijde opwarming, veranderingen in de luchtstroming boven West Europa en klimaatverandering in Nederland systematisch in kaart gebracht. Het is voor het eerst dat dit is gedaan door de uitkomsten van een scala aan mondiale en regionale klimaatmodellen en meetreeksen te combineren.

Omgaan met onzekerheid

De uitkomsten van de modelberekeningen van de toekomstige temperatuurstijging op aarde verschillen onderling aanzienlijk. Dit hangt samen met onzekerheid over de toekomstige bevolkingsgroei en de economische, technologische en sociale ontwikkelingen, en de daarmee samenhangende uitstoot van broeikasgassen en stofdeeltjes. Daarnaast begrijpen we de complexe processen in het klimaatstelsel nog maar ten dele. Zo is de invloed van waterdamp, wolken, sneeuw en ijs op de stralingshuishouding en de temperatuur nog niet goed gekwantificeerd. Sommige processen worden in de modelberekeningen zelfs nog helemaal niet meegenomen. Zo heeft geen van de gebruikte klimaatmodellen een actieve koolstofkringloop. Bovendien zijn er ook fundamentele grenzen aan de voorspelbaarheid van complexe systemen zoals het klimaatstelsel.

Voor kleinschaliger regio's, zoals West Europa of Nederland, is de onzekerheid nog groter. Dan speelt de luchtstroming een belangrijke rol. De meeste klimaatmodellen berekenen een duidelijke verandering in de luchtstromingspatronen boven West Europa, maar de uitkomsten verschillen sterk in de aard en grootte van die verandering.

Om met deze onzekerheden om te gaan, heeft het KNMI uit de brede waaier van toekomstberekeningen vier verschillende oplossingen geselecteerd die voor het Nederlandse beleid het meest relevant zijn. Voor die situaties wordt een zo compleet mogelijk beeld geschetst van ons toekomstig klimaat. Deze scenario's zijn stuk voor stuk aannemelijk. Met de huidige kennis is echter niet aan te geven welk scenario het meest waarschijnlijk is.

Elk van de vier klimaatscenario's geeft slechts één getal voor de verandering in een variabele, behalve bij de zeespiegelstijging waarvoor de bandbreedte is aangegeven (zie tabel 1). De getallen zijn voor heel Nederland gelijk: er is geen differentiatie naar provincie of streek. De getallen kunnen indicatief ook voor de stroomgebieden van Maas en Rijn worden gebruikt (met uitzondering van de Alpen).

Hoe verandert ons klimaat in de toekomst?

In elk scenario komen een aantal kenmerken van de klimaatverandering in Nederland en omgeving naar voren:

- ▶ de opwarming zet door; hierdoor komen zachte winters en warme zomers vaker voor;
- ▶ de winters worden gemiddeld natter en ook de extreme neerslaghoeveelheden nemen toe;
- ▶ de hevigheid van extreme regenbuien in de zomer neemt toe, maar het aantal zomerse regendagen wordt juist minder;
- ▶ de berekende veranderingen in het windklimaat zijn klein ten opzichte van de natuurlijke grilligheid;
- ▶ de zeespiegel blijft stijgen.

I Temperatuur

Waargenomen wereldwijd

Sinds 1900 is de temperatuur op aarde gemiddeld met $0,8^{\circ}\text{C}$ gestegen (figuur 2). Het grootste deel van die stijging vond plaats in de afgelopen 30 jaar: sinds 1975 is de temperatuur gemiddeld met $0,5^{\circ}\text{C}$ gestegen. Op grond van vergelijking van modelberekeningen en waarnemingen kan men concluderen dat de opwarming in de afgelopen 30 jaar vooral door de mens is veroorzaakt. Voor 1975 hield de temperatuurstijging voornamelijk verband met natuurlijke oorzaken.

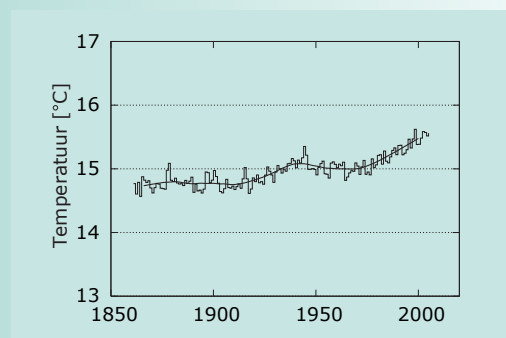
De temperatuur is niet overal op aarde in dezelfde mate gestegen. De opwarming was het grootst boven de continenten op het Noordelijk Halfrond.

Waargenomen in Nederland

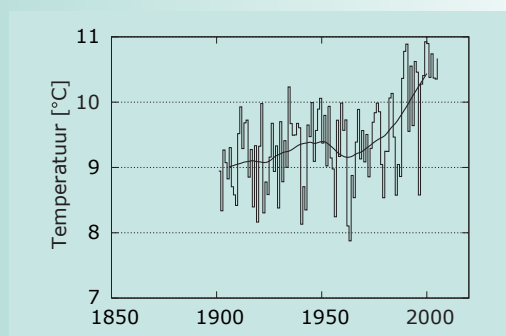
In ons land is de temperatuur sinds 1900 met gemiddeld $1,2^{\circ}\text{C}$ gestegen (figuur 3). De stijging van de temperatuur resulteerde in een afname van het aantal vorstdagen en een toename van het aantal zomerse dagen (figuur 4). De top tien van de warmste jaren sinds 1900 bestaat volledig uit jaren na 1988.

Vooral februari en maart zijn de afgelopen 20 jaar aanzienlijk warmer geworden. Behalve door de wereldwijde opwarming komt dit door een toename van het aantal dagen waarop de wind uit het zuidwesten waait.

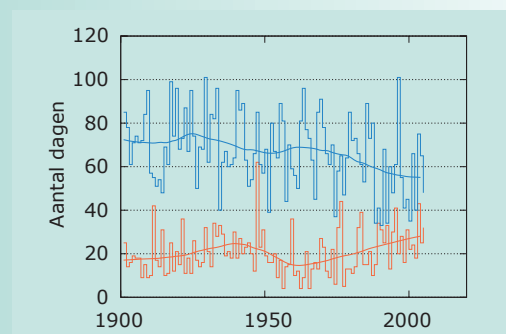
De temperatuur in ons land wordt sterk beïnvloed door de overheersende wind. Westenvind, die lucht aanvoert vanaf de zee, zorgt in de winter voor zacht weer. Oostenwind (over land dus) leidt in de zomer tot relatief hoge temperaturen. Onduidelijk is of de toename van 'warme' winden in februari en maart deels samenhangt met menselijke invloed op het klimaat of dat die verandering uitsluitend wordt veroorzaakt door natuurlijke schommelingen.



► **Figuur 2** Gemiddelde jaartemperatuur op aarde tussen 1860 en 2005. De dikke zwarte lijn volgt een voortschrijdend 30-jaar gemiddelde. Bron: CRU/UKMO.



► **Figuur 3** Gemiddelde jaartemperatuur in De Bilt tussen 1900 en 2005. De dikke zwarte lijn volgt een voortschrijdend 30-jaar gemiddelde.



► **Figuur 4** Aantal vorstdagen (minimum temperatuur $< 0^{\circ}\text{C}$; blauw) en aantal zomerse dagen (maximum temperatuur $\geq 25^{\circ}\text{C}$; oranje) in De Bilt tussen 1900 en 2005. De dikke gekleurde lijnen volgen de voortschrijdende 30-jaar gemiddelden.

Toekomst wereldwijd

Klimaatmodellen berekenen voor 2100, ten opzichte van 1990, een wereldwijde temperatuurstijging die varieert tussen 1°C en 6°C.

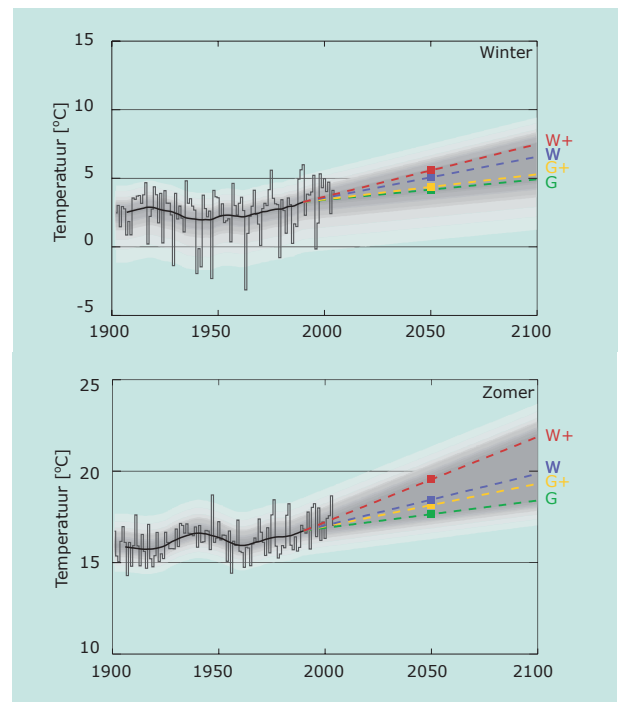
De gemiddelde temperatuur in Europa zal waarschijnlijk iets meer stijgen dan het wereldgemiddelde.

In de Scandinavische landen stijgen vooral de wintertemperaturen meer dan het wereldgemiddelde; in Zuid Europa stijgen juist de zomertemperaturen meer.

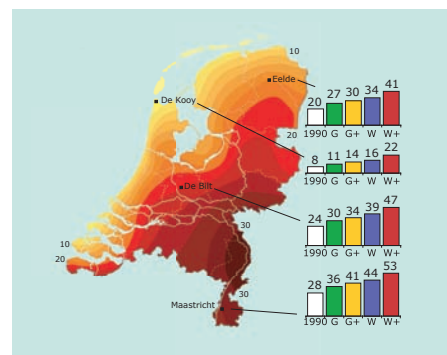
Toekomst in Nederland

In de KNMI'06 klimaatscenario's is de temperatuurstijging in Nederland niet gelijk aan de wereldgemiddelde temperatuurstijging. Van belang hierbij is de ligging van ons land aan de rand van een groot continent dat sterker opwarmt, maar ook dicht bij het noordoostelijk deel van de Atlantische Oceaan, waarvoor de meeste klimaatmodellen een veel minder sterke temperatuurstijging berekenen. Daarnaast is sprake van extra opwarming in de scenario's waarin ook de stromingspatronen veranderen.

De vier scenario's laten een opwarming zien rond 2050 variërend van 0,9°C tot 2,3°C in de winter en van 0,9°C tot 2,8°C in de zomer (figuur 5 en 6). Merk op dat dit de getallen zijn ten opzichte van het basisjaar 1990 (het gemiddelde tussen 1976 en 2005). De waargenomen temperatuurstijging tussen 1990 en 2005 is naar verhouding groot en bedraagt gemiddeld meer dan 0,5°C. Dit betekent niet noodzakelijkerwijs dat de laagste scenario's voor 2050 te conservatief zijn. In de waargenomen temperatuurstijging spelen ook de natuurlijke schommelingen een grote rol. Doordat die schommelingen zullen blijven voorkomen, is het goed mogelijk dat er in de komende decennia tijdelijk een periode van relatief koel weer zal volgen.



► **Figuur 5** Temperatuur in De Bilt tussen 1900 en 2005, en de vier klimaatscenario's voor 2050 (gekleurde stippen). De dikke zwarte lijn volgt een voortschrijdend 30-jaar gemiddelde in de waarnemingen. De dikke gekleurde gestippelde lijnen verbinden elk klimaatscenario met het basisjaar 1990. De grijze band illustreert de jaar-op-jaar variatie die is afgeleid uit de waarnemingen.



► **Figuur 6** Kaart met waargenomen gemiddeld aantal zomerse dagen (maximum temperatuur $\geq 25^\circ\text{C}$) per jaar voor 1971-2000, en voor vier plaatsen in Nederland de klimaatscenario's voor 2050. De verschillen in het aantal zomerse dagen tussen de vier plaatsen worden veroorzaakt door verschillen in het huidige klimaat.

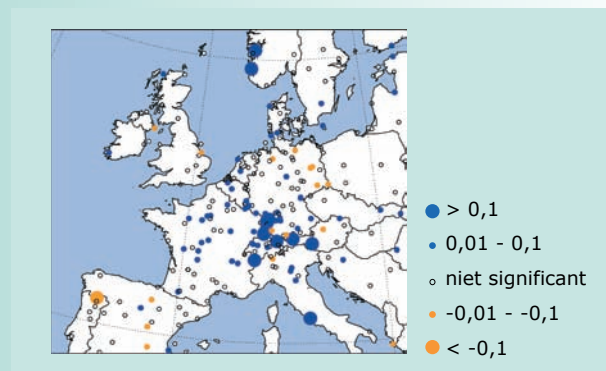
2 Neerslag

Waargenomen wereldwijd

In de gematigde streken op het Noordelijk Halfrond – waartoe Noordwest Europa behoort – is de neerslag in de 20^e eeuw gemiddeld met 5 à 10% toegenomen. Deze toename wordt gedeeltelijk veroorzaakt doordat warmere lucht meer waterdamp kan opnemen. Ook het feit dat de luchtstroming meer westelijk is geworden speelt een rol.

Gemiddeld over Europa is de hevigheid van extreme neerslag in de afgelopen 50 jaar toegenomen.

Net als in veel andere gebieden op de wereld geldt dat op de meeste plaatsen in Europa het aantal zeer natte dagen is toegenomen (figuur 7).



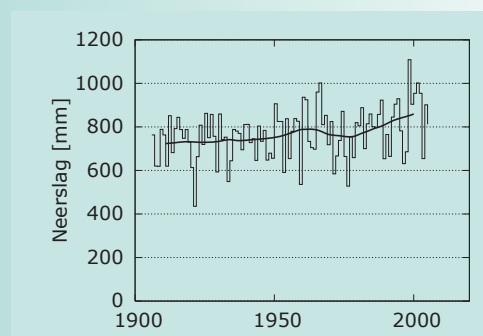
► **Figuur 7** Trends in aantal dagen per jaar met minimaal 20 mm neerslag, gemeten op Europese weerstations tussen 1946 en 2004. Bron: *eca.knmi.nl*.

Waargenomen in Nederland

In Nederland is de jaarlijkse neerslag vanaf 1906 toegenomen met 18% (figuur 8). Dit komt vooral voor rekening van de winter (+26%), het voorjaar (+21%) en de herfst (+26%). In de zomer is de neerslaghoeveelheid nauwelijks veranderd (+3%).

In de winter nam ook de neerslaghoeveelheid in lange periodes met veel regen toe. De hoogste 10-daagse neerslagsom per winter is sinds 1906 met 29% gestegen.

In de zomer is geen duidelijke trend in extreme neerslag vastgesteld.

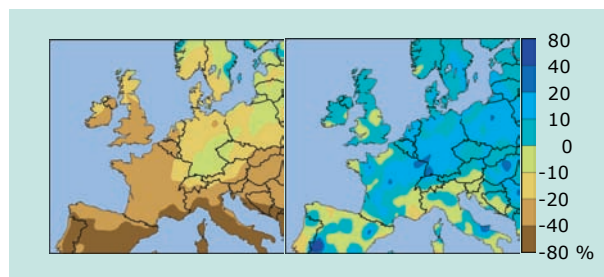


► **Figuur 8** Jaarlijkse neerslag in Nederland (gemiddelde van 13 stations) tussen 1906 en 2005. De dikke zwarte lijn volgt een voortschrijdend 30-jaar gemiddelde.

Toekomst wereldwijd

Klimaatmodellen voorzien een toename van de jaarneerslag op de gematigde breedten en een afname in de subtropen, maar de uitkomsten van de berekeningen verschillen onderling behoorlijk.

Voor Zuid Europa berekenen vrijwel alle klimaatmodellen een afname van de zomerneerslag en een grotere kans op droogte. Voor Noord Europa is de neerslagverandering minder eenduidig. Voor Europa als geheel wordt een toename berekend van de kans op langdurige zware neerslag en korte hevige buien (figuur 9).

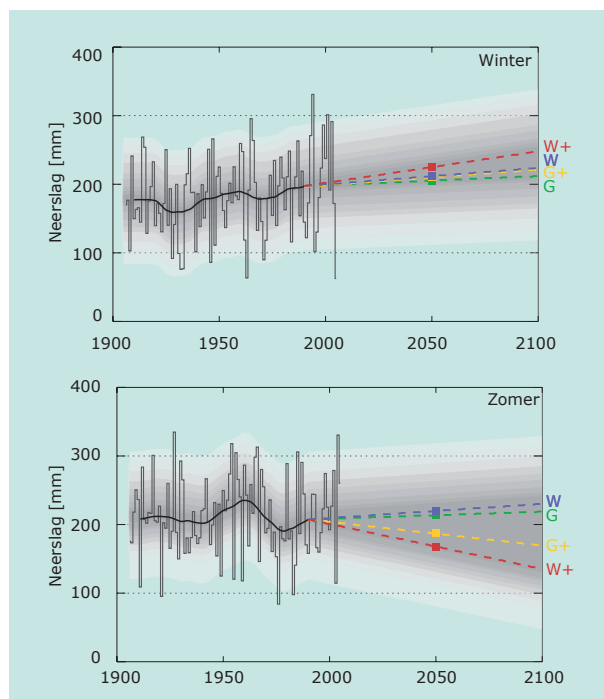


► **Figuur 9** Illustratie van de typische ruimtelijke patronen van de neerslagveranderingen in het W+ scenario voor de zomer in 2050 ten opzichte van 1990. Deze resultaten zijn verkregen met behulp van het KNMI regionale klimaat model RACMO2. Links de verandering in de gemiddelde neerslaghoeveelheid en rechts de verandering in hevige buien (dagsom die eens in de 10 jaar wordt overschreden). De gemiddelde neerslag neemt bijna overal af, terwijl de neerslaghoeveelheid in hevige buien juist toeneemt.

Toekomst in Nederland

In de G en W scenario's (waarbij ervan uit wordt gegaan dat de stromingspatronen niet veranderen) neemt de neerslag in Nederland zowel in de zomer als in de winter toe met circa 3% per graad wereldwijde temperatuurstijging. In de G+ en W+ scenario's (met verandering in stromingspatronen) neemt de neerslag extra toe in de winter (circa +7% per graad) en juist af in de zomer (circa -10% per graad; figuur 10 en tabel 1). De afname in de zomer komt vooral door de afname van het aantal dagen met regen.

In alle scenario's neemt in de zomer de gemiddelde neerslaghoeveelheid op dagen met veel regen juist toe door de zwaardere buien (het meest in het W scenario). Voor de winter geldt in alle scenario's dat de hoeveelheden in langere periodes met veel neerslag (extreme 10-daagse winterneerslag) ongeveer evenveel veranderen als de gemiddelde neerslagsom.



► **Figuur 10** Neerslag in Nederland (gemiddelde van 13 stations) tussen 1906 en 2005, en de vier klimaatscenario's voor 2050 (gekleurde stippen). De dikke zwarte lijn volgt een voortschrijdend 30-jaar gemiddelde in de waarnemingen. De dikke gekleurde gestippelde lijnen verbinden elk klimaatscenario met het basisjaar 1990. De grijze band illustreert de jaar-op-jaar variatie die is afgeleid uit de waarnemingen.

3 Wind en storm

Waargenomen wereldwijd

In de gematigde streken hangt het aantal stormen en de kracht van de stormen vooral af van de sterkte en van de koers van de stroming in de bovenlucht.

In de afgelopen decennia was die stroming boven het noordelijke deel van de Atlantische Oceaan gemiddeld sterker dan daarvoor. Bovendien volgde de stroming een noordelijker baan.

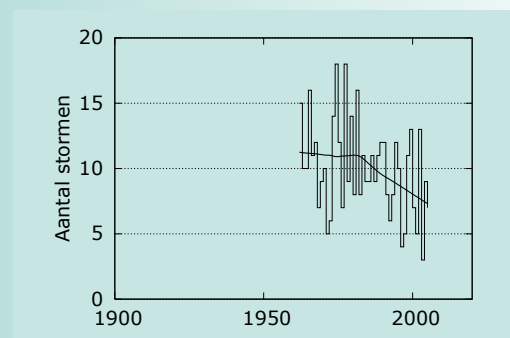
Of die verandering samenhangt met het door de mens versterkte broeikaseffect is niet vastgesteld.

Waargenomen in Nederland

Uit metingen op KNMI-stations blijkt dat het totale aantal 'stormen' (vanaf windkracht 6 in het binnenland en 7 aan de kust) in Nederland sinds 1962 is afgenomen (figuur 11).

Dergelijke gebeurtenissen komen gewoonlijk gemiddeld 10 keer per jaar voor, maar momenteel hebben we 20-40% minder 'stormen' dan begin jaren zestig.

Nederland is te klein en de meetreeksen zijn te kort om veranderingen in het aantal zware stormen (minstens windkracht 10 à 11) bij ons vast te stellen. Daarvoor komen ze te weinig voor: gemiddeld namelijk minder dan 1 keer per jaar.



► **Figuur 11** Aantal 'stormen' in Nederland (vanaf windkracht 6 in het binnenland en 7 aan de kust) tussen 1962 en 2005 (gemiddelde van 13 stations). De dikke zwarte lijn volgt een voortschrijdend 30-jaar gemiddelde.

Toekomst wereldwijd

Klimaatmodellen berekenen dat het totale aantal stormen op de gematigde breedte van het Noordelijk Halfrond licht afneemt. Daarnaast zijn er aanwijzingen dat de zwaarste stormen in kracht toenemen, maar die aanwijzingen zijn erg onzeker.

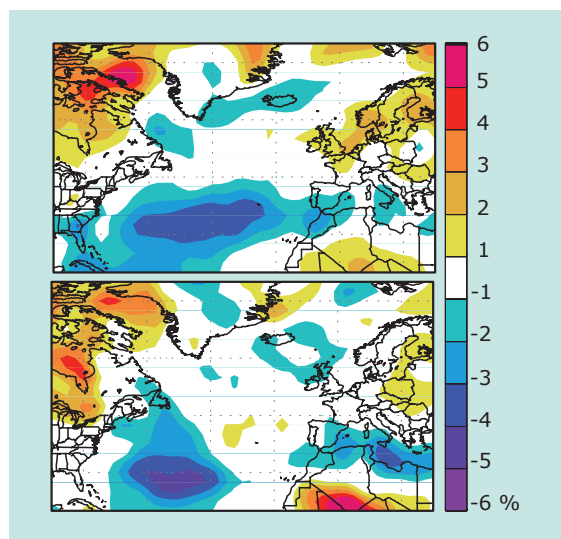
Voor het windklimaat in West Europa is het van belang in hoeverre de wereldwijde opwarming zal leiden tot een verandering van de stromingspatronen. Die zijn bepalend voor het aantal, de sterkte en de gemiddelde baan van depressies, en daarmee voor het toekomstige stormklimaat. De modelberekeningen voor de stromingspatronen in onze regio verschillen onderling behoorlijk.

Toekomst in Nederland

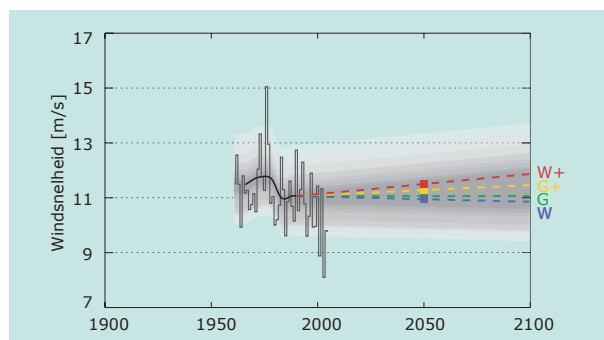
In de G en W scenario's verandert de hoogste daggemiddelde windsnelheid per jaar nauwelijks ($\leq 1\%$). De klimaatmodellen die zijn gebruikt voor de G+ en W+ scenario's laten een lichte toename zien van de hoogste daggemiddelde windsnelheid per jaar (figuur 12). De sterkte van de zware stormen, die momenteel minder dan eens per jaar voorkomen, neemt boven Noordwest Europa eveneens licht toe.

De toename in de hoogste daggemiddelde windsnelheid per jaar van circa +2% per graad wereldwijde temperatuurstijging in de G+ en W+ scenario's is klein ten opzichte van de jaar-op-jaar variatie en de natuurlijke schommelingen op langere termijn (figuur 13). In geen van de scenario's zet de waargenomen dalende trend van het totale aantal stormen in Nederland in dezelfde mate door.

Stormvloedten aan de Nederlandse kust treden op bij stormen uit westelijke tot noordelijke richtingen. De modelberekeningen die voor de vier scenario's zijn gebruikt geven aan dat de verandering van het aantal stormen uit deze richtingen gering is.



► **Figuur 12** Verandering in de hoogste daggemiddelde windsnelheid per jaar voor 2050 ten opzichte van 1990, berekend met klimaatmodellen representatief voor de G+ en W+ scenario's (boven) en de G en W scenario's (onder).



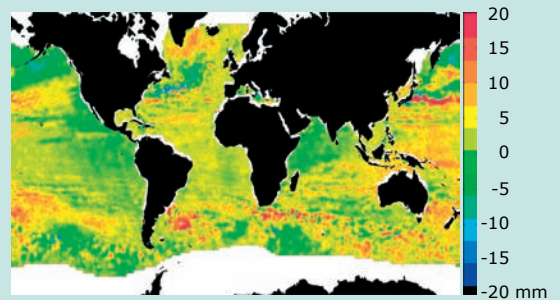
► **Figuur 13** Hoogste daggemiddelde windsnelheid in De Bilt tussen 1962 en 2005, en de vier klimaatscenario's voor 2050 (gekleurde stippen). De dikke zwarte lijn volgt een voortschrijdend 30-jaar gemiddelde in de waarnemingen. De dikke gekleurde gestippelde lijnen verbinden elk klimaatscenario met het basisjaar 1990. De grijze band illustreert de jaar-op-jaar variatie die is afgeleid uit de waarnemingen.

4

Zeespiegel

Waargenomen wereldwijd

Volgens waarnemingen in kustgebieden en met boeien op zee bedroeg de zeespiegelstijging vanaf 1900 gemiddeld 1 à 2 mm per jaar. Vooral tussen 1930 en 1960 en in het afgelopen decennium was de stijging relatief groot. Satellietwaarnemingen vanaf 1993 laten een wereldwijde zeespiegelstijging van ongeveer 3 mm per jaar zien, met plaatselijk sterke verschillen van -20 tot +20 mm per jaar (figuur 14). Deze regionale verschillen worden veroorzaakt door veranderingen in stromingspatronen in de lucht en in de oceaan. Of de versnelling van de zeespiegelstijging in de afgelopen 13 jaar veroorzaakt wordt door het versterkte broeikaseffect is niet vastgesteld.



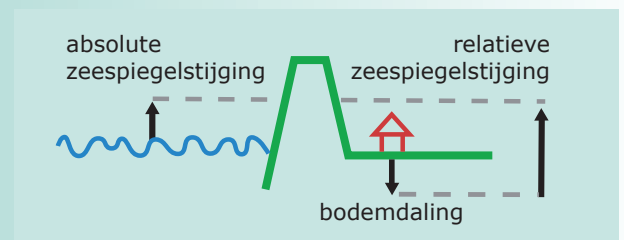
► **Figuur 14** Zeespiegelstijging in mm per jaar tussen 1993 en 2004 zoals gemeten door satellieten.
Bron: Leuliette et al., *Marine Geodesy*, 2004.

Waargenomen in Nederland

Tussen 1993 en 2004 steeg de waterstand in het noordoostelijke deel van de Atlantische Oceaan (inclusief Noordzee) ook ongeveer met 3 mm per jaar. Voor de periode vanaf 1900 was de stijging in de Noordzee gemiddeld 2 mm per jaar, ofwel 20 cm in de 20^e eeuw (figuur 16). Deze waterstand wordt niet alleen bepaald door de zeespiegelstijging in de Atlantische Oceaan, maar ook door veranderingen in de opstuwung van het water in de Noordzee.

Het totale effect aan de Nederlandse kust (= relatieve zeespiegelstijging) is groter door de opgetreden bodemdaling (figuur 15).

In Nederland varieerde de bodemdaling in de 20^e eeuw afhankelijk van de plaats gemiddeld tussen 0 en 4 mm per jaar.



► **Figuur 15** Schematische weergave van het verschil tussen absolute en relatieve zeespiegelstijging als gevolg van bodemdaling.

Toekomst wereldwijd

Oceanen reageren traag op opwarming van de lucht. De zeespiegelstijging in de komende decennia is daardoor vrijwel ongevoelig voor de snelheid waarmee de luchttemperatuur op aarde toeneemt. Na 2050 speelt de snelheid van de opwarming van de lucht een grotere rol.

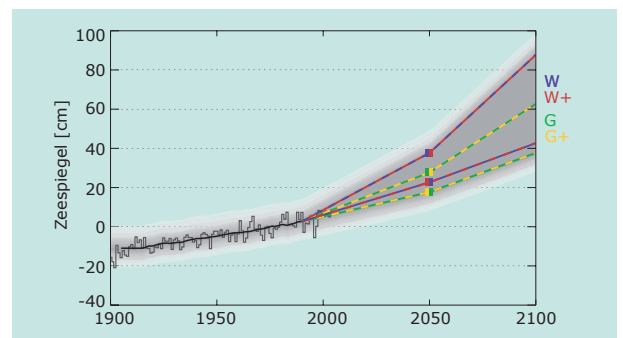
Als gevolg van de naijleffecten in de oceanen zal de zeespiegelstijging na 2100 nog lang doorgaan, zelfs als de broeikasgasconcentraties stabiliseren. Als ook ijskappen op grote schaal gaan afsmelten wordt op een termijn van enkele eeuwen een zeespiegelstijging van enkele meters verwacht.

Toekomst in Nederland

De klimaatmodellen laten onderling grote verschillen zien in de gevoeligheid van de zeespiegelstijging voor een verhoging van de luchttemperatuur. Om met deze onzekerheid te kunnen rekenen is per scenario de bandbreedte aangegeven voor zeespiegelstijging, in plaats van één getal. De scenario's verschillen alleen door de verschillen in wereldwijde temperatuurstijging en niet door de veranderingen in luchtstromingspatronen.

In de nieuwe scenario's wordt de absolute zeespiegelstijging gepresenteerd, wat ongeveer overeen komt met de verandering in de stand ten opzichte van NAP. Om de relatieve verandering van het zeeniveau ten opzichte van de Nederlandse bodem te verkrijgen, moet de bodembeweging nog worden opgeteld bij de scenario's.

De absolute zeespiegelstijging in 2050 aan de Nederlandse kust varieert in de scenario's tussen de 15 cm en 35 cm (figuur 16). Omstreeks 2100 varieert de stijging tussen de 35 cm en 85 cm. De zeespiegel blijft na 2100 verder stijgen en de stijging bedraagt in 2300 tussen de 1 m en de 2,5 m.



► **Figuur 16** Gemiddelde zeespiegelstand langs de Nederlandse kust tussen 1900 en 2004 ten opzichte van NAP (\approx absolute zeespiegelstijging), en de klimaatscenario's voor 2050 (gekleurde stippen). De dikke zwarte lijn volgt een voortschrijdend 30-jaar gemiddelde in de waarnemingen. De dikke gekleurde gestippelde lijnen verbinden elk klimaatscenario met het basisjaar 1990. De grijze band illustreert de jaar-op-jaar variatie die is afgeleid uit de waarnemingen. Bron waarnemingen: RWS-RIKZ.

Afvoer Rijn en Maas

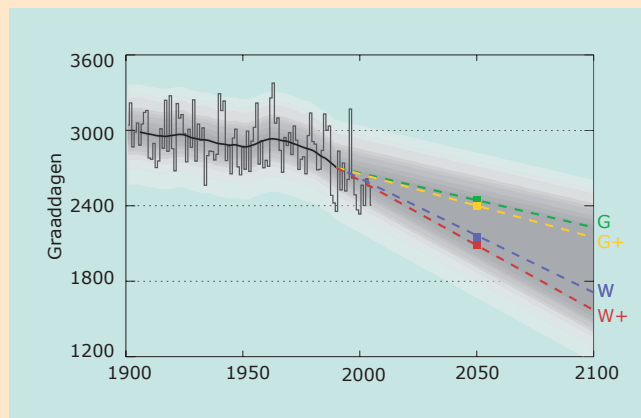
Toename van de winterneerslag, niet alleen in Nederland maar ook elders in de stroomgebieden van Rijn en Maas, zal resulteren in een toename van de piekafvoer van rivieren, het meest in het W+ scenario. Bovendien zal in berggebieden meer neerslag vallen in de vorm van regen in plaats van sneeuw. Hierdoor neemt de Rijnafvoer in de winter toe. In de zomer neemt in het W+ scenario de gemiddelde neerslag juist fors af. Tegelijkertijd neemt de verdamping toe (zolang er voldoende vocht aanwezig blijft). In de stroomgebieden van Rijn en Maas betekent dit een lagere rivierafvoer, en vaker een lage waterstand die de scheepvaart kan hinderen.



Lagere rivierafvoeren gecombineerd met hogere temperaturen hebben ook een negatieve invloed op de waterkwaliteit en de beschikbare hoeveelheid koelwater. In combinatie met zeespiegelstijging veroorzaken lagere rivierafvoeren het verder binnendringen van zout water vanuit zee.

Energieverbruik voor verwarming

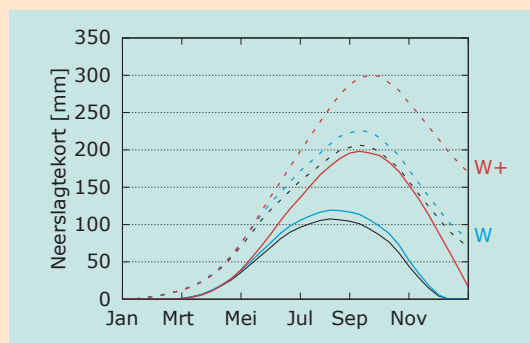
Bij een temperatuurstijging in Nederland zal de behoefte aan verwarming voor woningen, fabrieken en kantoren afnemen. De energiebehoefte voor verwarming vertoont een duidelijk verband met het aantal graaddagen (de som van de afwijkingen ten opzichte van 17°C voor alle dagen waarop de gemiddelde temperatuur lager is dan 17°C; bijvoorbeeld een dagtemperatuur van 14°C draagt 3 bij, een dagtemperatuur van -3°C draagt 20 bij). Afhankelijk van het klimaatscenario daalt het aantal graaddagen in 2050 met 9% (G scenario) tot 20% (W+ scenario) ten opzichte van 1990 (figuur 17).



► **Figuur 17** Aantal graaddagen in De Bilt tussen 1900 en 2005, en de vier klimaatscenario's voor 2050 (gekleurde stippen). De dikke zwarte lijn volgt een voortschrijdend 30-jaar gemiddelde in de waarnemingen. De dikke gekleurde gestippelde lijnen verbinden elk klimaatscenario met het basisjaar 1990. De grijze band illustreert de jaar-op-jaar variatie die is afgeleid uit de waarnemingen.

Landbouwproductie

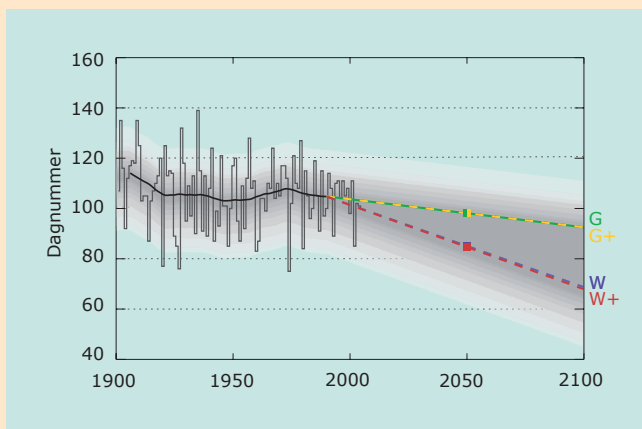
Stijging van de temperatuur en CO₂-concentratie in de lucht heeft in Nederland een gunstig effect op de landbouwproductie, onder andere van grasland. In de G+ en W+ scenario's wordt dit gunstige effect echter weer (deels) teniet gedaan door de grotere kans op een tekort aan water in de zomer (figuur 18). Vooral op de hoger gelegen zandgronden kan dit leiden tot lagere productie. Dezelfde scenario's hebben ook extra natte winters, waardoor vooral in het voorjaar in laag Nederland het grasland drassiger kan zijn, wat maaien en beweiden bemoeilijkt.



► **Figuur 18** Cumulatief neerslagtekort (= verschil tussen neerslag en potentiële verdamping) in Nederland (gemiddelde van 13 stations) voor het historische klimaat (1906-2000; zwarte lijnen), en twee klimaatscenario's voor 2050 (W en W+). Voor elke datum geldt steeds dat het cumulatief neerslagtekort in 50% van de jaren onder de doorgetrokken lijn ligt en in 90% van de jaren onder de onderbroken lijn. Potentiële verdamping is de verdamping bij optimale vochtvoorziening.

Ontwaken natuur

Door de hogere temperaturen in de winter en in het voorjaar start het groeiseizoen van veel planten vroeger, een tendens die we in de afgelopen jaren al hebben gezien (zie www.natuurkalender.nl). Een temperatuur van 5°C wordt vaak gebruikt als grens waarboven planten beginnen te groeien. Het dagnummer in het jaar waarop de gemiddelde temperatuur 5°C bereikt en daar niet meer onder komt tot na 1 juli is een benadering van de start van het groeiseizoen. Volgens deze definitie start het groeiseizoen bij de vier klimaatscenario's in 2050 gemiddeld tussen de 6 dagen (G en G+ scenario's) en 19 dagen (W+ scenario) eerder dan in 1990 het geval was (figuur 19).

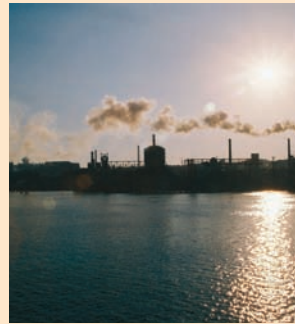


► **Figuur 19** Dagnummer waarop in De Bilt de gemiddelde temperatuur 5°C bereikt en daar niet meer onder komt tot na 1 juli tussen 1900 en 2005, en de vier klimaatscenario's voor 2050 (gekleurde stippen). De dikke zwarte lijn volgt een voortschrijdend 30-jaar gemiddelde in de waarnemingen. De dikke gekleurde gestippelde lijnen verbinden elk klimaatscenario met het basisjaar 1990. De grijze band illustreert de jaar-op-jaar variatie die is afgeleid uit de waarnemingen.

Energieopbrengst windturbines

De afname van de windsnelheid in Nederland, zoals gemeten in de afgelopen decennia, heeft consequenties voor de energieopbrengst van windturbines. De maximale hoeveelheid energie die de turbines kunnen leveren is afgenomen. De scenario's geven geen aanleiding om in de toekomst blijvend lagere windenergieopbrengsten te verwachten. Bij de scenario's met meer westenwind (G+ en W+ scenario's) is op den duur eerder sprake van een (kleine) toename. Maar de natuurlijke jaar-op-jaar variaties en schommelingen op langere termijn zijn voor deze toepassing van veel groter belang dan de kleine veranderingen in de scenario's.

*) Voor een meer compleet overzicht van 'Effecten van klimaatverandering in Nederland' wordt verwezen naar de gelijknamige publicatie van het Milieu en Natuurplanbureau (MNP), 2005.



Luchtkwaliteit

Weersomstandigheden zoals windrichting en zonneshijn bepalen in belangrijke mate de luchtkwaliteit door hun invloed op de aanvoer en vorming van verontreinigende stoffen. Zo vallen periodes met zomersmog (hoge ozonconcentraties) vaak samen met hittegolven (veel zonneshijn). Bij een toename van het aantal tropische dagen (maximum temperatuur $\geq 30^{\circ}\text{C}$) in Nederland zal vooral in het W+ scenario bij gelijkblijvende emissies de kans op zomersmog groter worden. In de winter neemt de kans op wintersmog af in de G+ en W+ scenario's, doordat vaker relatief schone lucht wordt aangevoerd uit westelijke richting.



Elfstedentochten

De kans op periodes met strenge vorst zal bij een temperatuurstijging in de toekomst kleiner worden. Daardoor neemt in alle vier klimaatscenario's de kans op een elfstedentocht af. In het klimaatscenario met de sterkste temperatuurstijging en verandering van de luchtstromingspatronen (W+ scenario) is de kans op een elfstedentocht rond 2050 het kleinst. Die kans neemt meer af dan op grond van alleen de gemiddelde opwarming zou worden verwacht, omdat in dit scenario de koudste dagen in de winter meer opwarmen dan het gemiddelde.

Verantwoording

De toekomstige temperatuurverandering op aarde, zoals berekend door de belangrijkste mondiale klimaatmodellen (GCM's), is gebruikt als uitgangspunt bij het maken van de nieuwe klimaatscenario's voor Nederland. Bovendien is onderzocht hoe volgens die klimaatmodellen de luchtstroming boven West Europa verandert.

Die projecties zijn 'vertaald' naar meer gedetailleerde veranderingen in temperatuur, neerslag, verdamping, wind, en zeespiegel in Nederland. Hiervoor is gebruik gemaakt van een groot aantal regionale klimaatmodellen (RCM's) voor Europa en van historische meetreeksen afkomstig van Nederlandse stations.

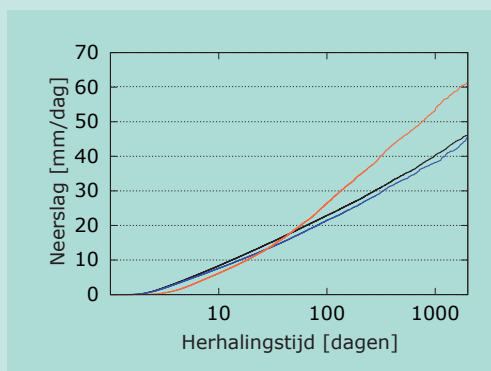
De gevolgde methode is schematisch weergegeven in **figuur 20**. Vooraf is de kwaliteit van de gebruikte GCM- en RCM-simulaties voor het huidige klimaat onderzocht door vergelijking met waarnemingen (**figuur 21**).

Kennis van het klimaatsysteem, zoals vastgelegd in wetenschappelijke publicaties, vormt de basis voor de nieuwe scenario's.

Een uitgebreide beschrijving met alle relevante bronvermeldingen en verwijzingen naar de wetenschappelijke literatuur is te vinden in de (Engelstalige) KNMI-publicatie WR 2006-01 'KNMI Climate Change Scenarios 2006 for The Netherlands'



► **Figuur 20** Schematische weergave van de gebruikte methode voor het afleiden van de KNMI'06 klimaatscenario's. De blauwe vakken beschrijven het bronmateriaal voor de scenario-informatie in de groene vakken. De pijlen symboliseren de informatiestroom. Voor de scenario's is gebruik gemaakt van kennis van het klimaatsysteem op mondiale, regionale en lokale schaal.



► **Figuur 21** *Vergelijking tussen berekende (blauw) en waargenomen (zwart) hoeveelheid neerslag op zomerdagen voor het stroomgebied van de Rijn. De berekeningen zijn uitgevoerd met het KNMI regionale klimaatmodel RACMO2. Weergegeven is de hoeveelheid neerslag op een dag bij een bepaalde herhalings-tijd. De neerslaghoeveelheid bij een herhalings-tijd van 100 wordt eens per 100 dagen overschreden. Modelberekeningen voor 1961-1990 komen goed overeen met de waarnemingen uit die periode. Dit geeft vertrouwen in de toekomstberekeningen. De berekeningen voor 2071-2100 (rood) laten een kleine afname zien van de lichte neerslag en een sterke toename van grotere neerslaghoeveelheden. Deze gegevens, die ook worden bevestigd door andere modelberekeningen, liggen ten grondslag aan de toename van extreme neerslaghoeveelheden in de scenario's voor de zomer.*

Keuze temperatuur +1°C en +2°C

De bandbreedte in de wereldwijde temperatuurstijging in 2100 (+1°C tot +6°C ten opzichte van 1990) van recente GCM-simulaties is zowel aan de lage als aan de hoge kant iets groter dan de bandbreedte in het meest recente rapport van het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) uit 2001. De hier gebruikte wereldwijde temperatuurstijging in 2100 van +2°C en +4°C (met bijbehorende temperatuurstijging in 2050 van respectievelijk +1°C en +2°C) ligt binnen de spreiding van de GCM's.

Een wereldwijde temperatuurstijging van +2°C in 2050 of +2°C in 2100 moet niet worden verward met de maximum toelaatbare waarde van +2°C die Nederland en de EU tot doelstelling hebben gekozen om gevaarlijke menselijke verstoring van het klimaatstelsel te voorkomen. Die

beleidsdoelstelling heeft betrekking op stabilisatie op 2°C boven preïndustrieel niveau, terwijl het in de KNMI'06 klimaatscenario's gaat om de temperatuurstijging ten opzichte van 1990. Het jaar 1990 wordt ook in de IPCC-rapportages als basisjaar gebruikt.

De wereldwijde temperatuurstijging van +2°C in 2100 is hetzelfde als in het oude 'centrale' klimaatscenario van het KNMI uit 2000. De stijging van +4°C in 2100 sluit goed aan bij het oude 'hoge' scenario.

Keuze wel of geen verandering in luchtstromingspatronen

De meeste van de gebruikte GCM's (geselecteerd op een goede weergave van de luchtstromingspatronen boven Europa) laten ofwel nauwelijks verandering van de luchtstromingspatronen in de zomer en winter zien, ofwel een duidelijke verandering in beide seizoenen. Op basis hiervan is gekozen voor twee scenario's met verandering van de luchtstroming en twee scenario's zonder verandering.

De laatste twee scenario's sluiten goed aan bij de oude KNMI klimaatscenario's uit 2000, waarin eveneens werd uitgegaan van onveranderde luchtstromingspatronen.

Wat zit niet in de scenario's?

De nieuwe klimaatscenario's beschrijven geen abrupte klimaatveranderingen, bijvoorbeeld ten gevolge van het volledig stilvallen van de 'Warme Golfstroom' of het onverwacht snel afsmelten van grote ijskappen op Groenland en West Antarctica. Klimaatmodellen vertonen voor deze aspecten nog grote tekortkomingen door onvoldoende wetenschappelijke kennis over deze fenomenen. Bovendien zijn de aanwijzingen voor snelle veranderingen in de waarnemingen erg onzeker.

De scenario's omvatten eveneens geen fenomenen waarvan onzeker is of ze realistisch zijn, zoals 'superstormen' die veel zwaarder zijn dan ooit in Europa voorgekomen.

Verantwoording

Nieuwe inzichten hierover worden zonnodig bij een volgende actualisatie verwerkt.

In diverse figuren in deze brochure wordt ter indicatie een jaar-op-jaar variatie van klimaatvariabelen aangegeven met een grijze band. Deze zijn gemaakt met de aanname dat de variatie die is opgetreden in het verleden gelijk zal blijven in de toekomst. In de scenario's wordt deze jaar-op-jaar variatie niet expliciet meegenomen. Of deze in de toekomst zal veranderen, moet nog verder worden geanalyseerd.

Klimaatscenario's 'op maat'

Scenario's voor een andere tijdshorizon, scenario's voor de overgangsperiodes lente en herfst, of scenario's die uitgaan van andere wereldwijde temperatuurstijgingen zijn niet altijd eenvoudig af te leiden door lineair te interpoleren of te extrapoleren.

Het KNMI blijft, in aanvulling op de scenario's in deze brochure, klimaatscenario's 'op maat' maken, bijvoorbeeld voor 2025, of scenario's met meer detail, zoals representatieve tijdreeksen voor het toekomstige klimaat.

Ook zullen de consequenties van de eerder genoemde abrupte veranderingen met grote gevolgen in kaart worden gebracht voor specifieke gebruikers, bijvoorbeeld om na te gaan wat de effecten zijn van snel afsmelten van ijskappen op de zeespiegelstijging na 2100.

Relatie met MNP-scenario's

Klimaatmodellen gebruiken veronderstellingen over de uitstoot van broeikasgasen en stofdeeltjes in de 21^e eeuw. Daarbij horen beelden van hoe de wereldbevolking, economie en techniek zich ontwikkelen. Het Milieu en Natuurplanbureau (MNP) gebruikt dergelijke wereldbeelden voor het maken van sociaal-economische toekomstscenario's voor Nederland. Deze wereldbeelden kunnen echter niet 1 op 1 aan de KNMI'06 klimaatscenario's worden gekoppeld.

Onzekerheid over toekomstige emissies van broeikasgasen en stofdeeltjes veroorzaakt slechts een klein deel van de verschillen tussen de scenario's voor 2050. De grootste onzekerheid is te wijten aan verschillen in modelberekeningen ten gevolge van de beperkte kennis van het klimaatstelsel. Grofweg kan wel worden gezegd dat de G en G+ scenario's beide beter passen bij de wereldbeelden B1 (mondiale solidariteit) en B2 (zorgzame regio) van het MNP, terwijl de W en W+ scenario's beide beter passen bij de wereldbeelden A1 (mondiale markt) en A2 (veilige regio).

IPCC-rapportages

In 2007 verscheen het 4^e rapport van het IPCC. In de aanloop naar dit rapport zijn recent verscheidene nieuwe model-simulaties uitgevoerd. De analyses van de modelresultaten worden momenteel gepubliceerd in de wetenschappelijke literatuur. Zowel de meest recente modelresultaten als publicaties zijn gebruikt bij het samenstellen van de KNMI'06 klimaatscenario's.

Dit betekent dat de nieuwe scenario's uitgaan van hetzelfde bronmateriaal als het 4^e IPCC-rapport.

Colofon

Vormgeving en productie

Studio KNMI, Johan Bremer

Lithografie en druk

Drukkerij van de Ridder, Nijkerk

Fotografie en illustraties

Ronald van der A

Corbis

Hollandse Hoogte

Peter-Paul Hattinga Verschure

Papier

Binnenwerk: Reviva Mega mat 150 g/m²

Omslag: Reviva Mega mat 250 g/m²

Reviva Mega mat bestaat uit 50% recycled en 50% totaal chloorvrij papier

Het omslag is voorzien van een mat laminaat.

Voor de productie hiervan is geen gebruik gemaakt van zware metalen, chloorverbindingen of pvc. Zowel het omslag als het binnenwerk is geschikt voor recycling van oud papier.

Bij huisvuilstort vindt geen grondwater- of bodemverontreiniging plaats.

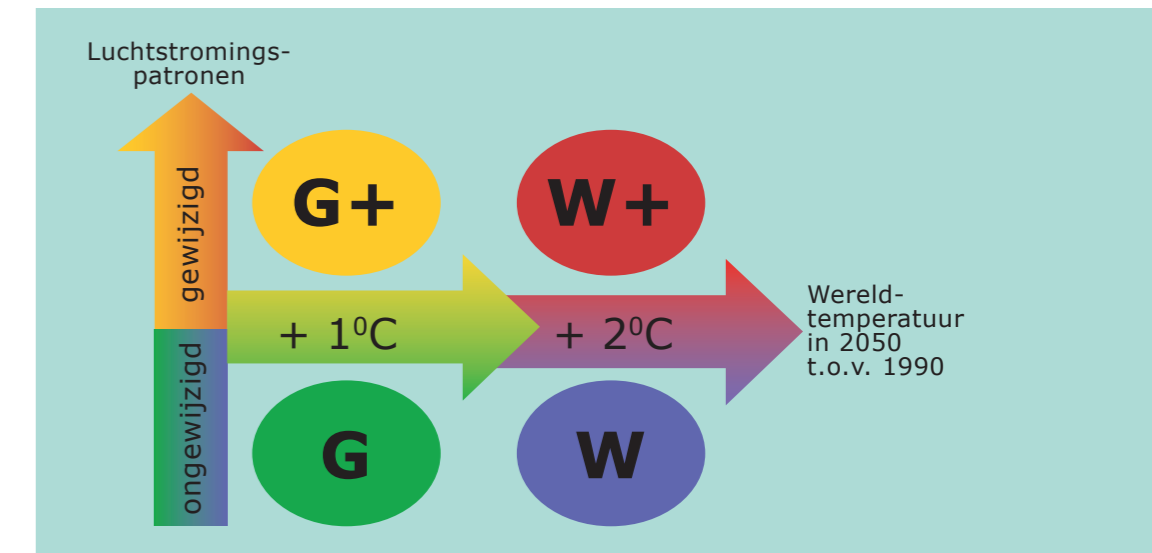
Oplage

3.000

© KNMI, De Bilt, mei 2006

► Figuur 1

Schematisch overzicht van de vier KNMI'06 klimaat-scenario's. Zie onderstaande legenda voor een toelichting.



G	Gematigd	1°C temperatuurstijging op aarde in 2050 ten opzichte van 1990 geen verandering in luchtstromingspatronen in West Europa
G+	Gematigd +	1°C temperatuurstijging op aarde in 2050 ten opzichte van 1990 + winters zachter en natter door meer westenwind + zomers warmer en droger door meer oostenwind
W	Warm	2°C temperatuurstijging op aarde in 2050 ten opzichte van 1990 geen verandering in luchtstromingspatronen in West Europa
W+	Warm +	2°C temperatuurstijging op aarde in 2050 ten opzichte van 1990 + winters zachter en natter door meer westenwind + zomers warmer en droger door meer oostenwind

Legenda voor de KNMI'06 klimaatscenario's

► Tabel 1

Klimaatverandering in Nederland rond 2050¹ ten opzichte van het basisjaar 1990² volgens de vier KNMI'06 klimaatscenario's.

		G	G+	W	W+
Wereldwijde temperatuurstijging		+1°C	+1°C	+2°C	+2°C
Verandering in luchtstromingspatronen		nee	ja	nee	ja
Winter ³	gemiddelde temperatuur	+0,9°C	+1,1°C	+1,8°C	+2,3°C
	koudste winterdag per jaar	+1,0°C	+1,5°C	+2,1°C	+2,9°C
	gemiddelde neerslaghoeveelheid	+4%	+7%	+7%	+14%
	aantal natte dagen (≥ 0,1 mm)	0%	+1%	0%	+2%
	10-daagse neerslagsom die eens in de 10 jaar wordt overschreden	+4%	+6%	+8%	+12%
Zomer ³	hoogste daggemiddelde windsnelheid per jaar	0%	+2%	-1%	+4%
	gemiddelde temperatuur	+0,9°C	+1,4°C	+1,7°C	+2,8°C
	warmste zomerdag per jaar	+1,0°C	+1,9°C	+2,1°C	+3,8°C
	gemiddelde neerslaghoeveelheid	+3%	-10%	+6%	-19%
	aantal natte dagen (≥ 0,1 mm)	-2%	-10%	-3%	-19%
Zeespiegel	dagsom van de neerslag die eens in de 10 jaar wordt overschreden	+13%	+5%	+27%	+10%
	potentiële verdamping	+3%	+8%	+7%	+15%
Zeespiegel	absolute stijging	15-25 cm	15-25 cm	20-35 cm	20-35 cm

¹ gegevens over de veranderingen in 2100 zijn te vinden op www.knmi.nl/klimaatscenario's

² het klimaat in het basisjaar 1990 is beschreven met gegevens van 1976 tot en met 2005

³ onder 'winter' wordt hier verstaan december, januari en februari; 'zomer' staat gelijk aan juni, juli en augustus