

# Hydrologie en klimaatverandering

door ir. P.J.W. de Wildt en dr. G.P. Können \*

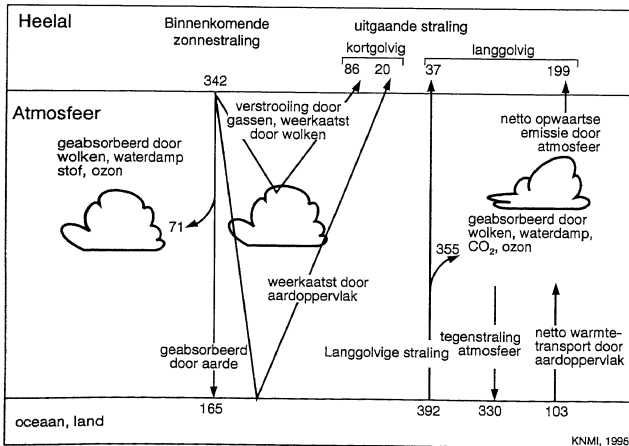
Een enorme hoeveelheid neerslag in korte tijd, zoals die in februari 1995 leidde tot extreem hoogwater op de Maas, is tot op heden altijd een uitzonderlijk verschijnsel geweest. Desondanks besloot de regering middels de Deltawet Grote Rivieren de dijken langs de rivieren met spoed te verhogen. En dat is maar goed ook, want als we de auteurs van bijgaand artikel mogen geloven, zal in de volgende eeuw de kans op soortgelijke situaties aanzienlijk kunnen toenemen.

De oorzaak is gelegen in het broeikaseffect waarvan vorig jaar is aangetoond dat menselijk handelen wel degelijk zal leiden tot een temperatuurverhoging op aarde van enkele graden. Temperatuurverhoging betekent meer waterdamp in de lucht en dus meer neerslag; in de winters zelfs tot 30 % meer. Die neerslag zal ook een ander patroon gaan aannemen met alle gevolgen van dien voor de hydrologie en dus de waterbeherende taak van de waterschappen.

Omdat voor studies naar de gevolgen van klimaatverandering voor de waterhuishouding neerslagvoorspellingen op regionale schaal essentieel zijn, heeft het KNMI een methode ontwikkeld voor het opstellen van klimaatscenario's met een meer regionaal karakter. Daarover leest u in bijgaand artikel meer (red.).

De stralingsbalans van het klimaatstelsel is schematisch weergegeven in figuur 1. De aarde ontvangt kortgolvlige straling van de zon in de vorm van licht, die deels wordt weerkaatst en deels wordt geabsorbeerd door het aardoppervlak. Het aardoppervlak wordt daardoor opgewarmd.

Van de langgolvlige infrarode straling die de aarde door zijn warmte uitstraalt verdwijnt slechts een klein deel regelrecht naar het heelal, omdat het overgrote deel door de atmosfeer wordt geabsorbeerd. Dit gebeurt voornamelijk door de broeikasgassen. Dit vasthouden van stralingsenergie is het natuurlijk broeikas effect.



Figuur 1 De stralingsbalans van het klimaatstelsel (Van Dorland)

De dampkring van de aarde bestaat vrijwel volledig uit één of twee atome-gassen stikstof (N<sub>2</sub>), zuurstof (O<sub>2</sub>) en argon (Ar), en slechts uit een geringe hoeveelheid drie of meer atome-gassen zoals waterdamp (H<sub>2</sub>O), kooldioxyde (CO<sub>2</sub>), methaan (CH<sub>4</sub>), ozon (O<sub>3</sub>) en lachgas (N<sub>2</sub>O). Het zijn echter juist deze zogeheten sporengas-sen of broeikasgassen, die voor de energiehuishouding van het klimaatstelsel van groot belang zijn.

De aarde is door zijn broeikasatmosfeer zo'n 30°C warmer dan zij zonder broeikasgassen zou zijn.

Door het aflopen van de 'kleine ijstijd' (ca. 1200-1800) is de mondiale gemiddelde temperatuur de afgelopen twee eeuwen wat opgelopen. Deze stijging is van natuurlijke oorsprong. De afgelopen decennia is echter een versnelling in die opwarming waarneembaar. De oorsprong daarvan is niet eenduidig aan te geven. Het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) concludeert in zijn laatste rapport, vastgesteld in december 1995, wel dat 'alle bewijsmateriaal wengend er aanwijzingen zijn voor een waarneembare menselijke invloed op het mondiale klimaat'.

## Versterking broeikas effect

Bovenop het natuurlijk broeikas effect komt nu een antropogene (door mensen veroorzaakte) versterking, omdat sinds 150 jaar de concentraties van de broeikas-gassen toenemen. De meeste aandacht

\* Ir. De Wildt is werkzaam bij het KNMI als coördinator klimaatbeleid ministerie Verkeer en Waterstaat, dr. G.P. Können is hoofd sectie Diagnostiek en Scenario's van het KNMI

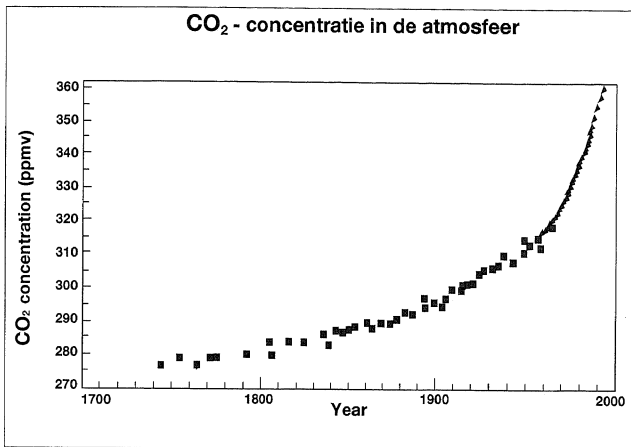
gaat uit naar de stijging van de concentratie van CO<sub>2</sub>, het belangrijkste antropogene broeikasgas. Door de enorm toegenomen verbranding van fossiele brandstoffen sinds de industriële revolutie, is die concentratie sinds de vorige eeuw sterk gestegen (figuur 2).

daan door het, grotendeels eveneens door mensen veroorzaakte, koelend effect van aerosolen.

Er is echter geen sprake van een structureel tegenwicht. De verblijftijd van aerosolen in de atmosfeer is daarvoor te kort: in de onderste laag van de atmosfeer circa

een week, in de hogere lagen (hoger dan ca. 10 km) olopend tot twee jaar.

Bovendien zijn aerosolen een vorm van luchtverontreiniging, en zal een overmaat aan aerosolen invloed hebben op andere onderdelen van het klimaat zoals zonneschijn en neerslag.

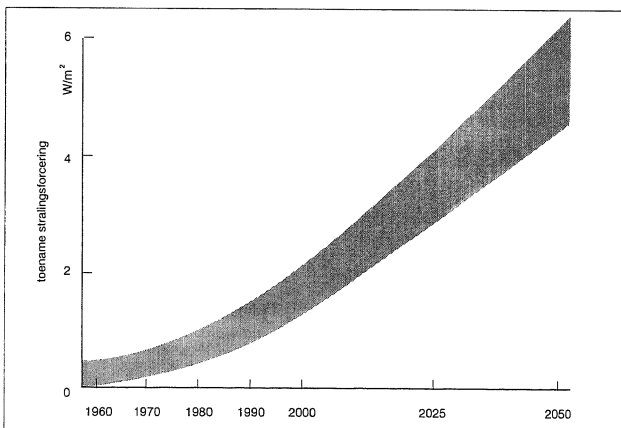


Figuur 2 Het verloop van de CO<sub>2</sub> concentratie sinds circa 1750. De pre-industriële concentratie van CO<sub>2</sub> is ± 280 ppmv (parts per million by volume). Dit is gelijk aan 0,028 % van het volume van de atmosfeer (IPCC).

Door de hogere concentratie van broeikasgassen wordt een groter deel van de door de aarde uitgezonden infrarode straling geabsorbeerd. Dit betekent dat extra energie in het klimaatsysteem wordt vastgehouden (positieve stralingsforcering) en dat het dus warmer wordt. Naast broeikasgassen worden er stoffen uitgestoten die als aerosol in de atmosfeer kunnen blijven zweven. Het gaat hier om microscopisch kleine deeltjes van ongeveer 0,01-1µm groot, zoals zwaveloxiden, roet en industrieel stof. Van tijd tot tijd wordt het aerosolgehalte in de atmosfeer door natuurlijke processen aangevuld, bijvoorbeeld met vulkaanstof bij grote vulkaanuitbarstingen.

Aerosolen reflecteren zonnestraling, zodat er minder energie aan het klimaatsysteem ten goede komt; we spreken dan van een negatieve stralingsforcering. Dit betekent een koelend effect op het klimaat.

De antropogene opwarming door de broeikasgassen wordt dus deels teniet ge-



Figuur 3 Ontwikkeling van de antropogene stralingsforcering ten opzichte van 1765; het blijkt dat tot ca. 1950 de netto stralingsforcering gering is. De trend is gecorrigeerd voor een koelend effect door aerosolen van ca. 1,6 W/m<sup>2</sup> (Van Uliden).

Op dit moment is er een netto positieve stralingsforcering ten opzichte van de situatie in 1765 van ca. 2 W/m<sup>2</sup>. Daarmee zitten we aan de rand van hetgeen vanuit de natuurlijke variabiliteit van ons huidige klimaat verklaarbaar is. Met andere woorden: bij verdere toename kan de stralingsforcering, en dus ook het versterkte broeikas effect, niet meer alleen vanuit natuurlijke oorzaken verklaard worden.

## Gevolgen voor temperatuur

De atmosfeer is een complex systeem, waarin allerlei soms onbegrepen wisselwerkingen tussen de onderdelen de evenwichtstoestand bepalen. Daarom is er onmogelijk een eenduidige en onweersproken kwantitatieve relatie te leggen tussen de stralingsforcering en de gevolgen voor het klimaat.

Volgens simpele recht-toe-recht-aan berekeningen zou een verdubbeling van de CO<sub>2</sub>-concentratie leiden tot een mondiaal gemiddelde temperatuurstijging van ca. 1°C. Gegeven onze huidige kennis van het klimaatsysteem is het echter duidelijk dat deze schatting zeker een factor twee te laag is.

*Het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) - opgericht door de Verenigde Naties - verzamelt alle relevante kennis, feiten en onzekerheden rond het broeikas effect en klimaatverandering. Wetenschappers uit alle delen van de wereld dragen bij aan de opstelling en toetsing van de 5-jaarlijkse rapporten van IPCC. Deze worden vastgesteld na uitgebreide wetenschappelijke reviews, en bevatten onder meer een samenvatting voor beleidsmakers en politici.*

Dit wordt ook onderbouwd door de laatste bevindingen van het IPCC, vastgesteld in december 1995. Vijf jaar geleden werd door het IPCC nog geconcludeerd dat de waargenomen temperatuurstijging in zijn geheel een gevolg kon zijn van een natuurlijk variatie van het klimaat. Nu wordt dat onwaarschijnlijk geacht; in zijn conclusies van december stelt het IPCC dat de waargenomen veranderingen van de laatste decennia wijzen op een nu al merkbaar menselijke invloed op het klimaat. Deze uitspraak is grotendeels gebaseerd op betere schattingen van de natuurlijke variabiliteit, maar ook zijn de patronen van opwarming die met de kli-

maatmodellen zijn voorspeld daadwerkelijk waargenomen.

*Voor het simuleren van het huidige of het toekomstige klimaat zijn wiskundige modellen ontwikkeld. Het betreft hier simuliatiemodellen van de algemene circulatie van de lucht in de atmosfeer, waarmee de gevolgen van een verstoring van de energiebalans op mondiale schaal worden ingeschat. Vrijwel alle uitspraken over het klimaat van de toekomst zijn gebaseerd op de uitkomsten van deze zogenaamde General Circulation Models (GCM's).*

Volgens diezelfde modellen is het onontbeerbaar dat de mondiale opwarming en daarmee de zeespiegelstijging versneld doorgaat. Voor het einde van de volgende eeuw wordt, ten opzichte van heden, een mondiale opwarming berekend van 1 tot ca. 3,5°C en een zeespiegelstijging van 15 tot 95 centimeter. Meer exacte waarden zijn nu niet te geven, zij hangen ondermeer af van de werkelijke uitstoot van broeikasgassen en aerosolen in de toekomst. Desondanks staat echter nu al wel vast dat de snelheid van de gemiddelde opwarming groter zal zijn dan in de afgelopen 10.000 jaar ooit is voorgekomen.

Die temperatuurstijging zal niet gelijkelijk verdeeld zijn over de aarde. Verwacht wordt een sterkere stijging van de temperatuur aan de polen dan aan de evenaar, een sterkere stijging in de winter dan in de zomer en een sterkere stijging boven land dan boven zee. Veel meer is niet bekend. Een enkele keer worden, op basis van modelberekeningen, vrij gedetailleerde conclusies getrokken over de mogelijke veranderingen voor een bepaalde regio. Dit is niet reeel. De berekende details in de verdeling van de temperatuurstijging zijn nog te onbetrouwbaar om die voor waar aan te kunnen nemen. Wel maken de berekeningen duidelijk dat er regionaal grote verschillen kunnen optreden in de wijze waarop de klimaatverandering zich voltrekt.

## Gevolgen voor hydrologie

Warme lucht kan meer waterdamp bevatten dan koude lucht. Dit heeft ondermeer tot gevolg dat, ook nu, bij frontpassages en lokale buien meer neerslag valt als de temperatuur hoog is. Met betrekking tot de hydrologie van de toekomst geldt daarom eenzelfde beeld als voor de temperatuur: wereldwijd gemiddeld zullen neerslag en

verdamping toenemen. Uit de modelberekeningen valt af te leiden dat er gemiddeld sprake is van ongeveer 2% extra neerslag per graad temperatuurstijging.

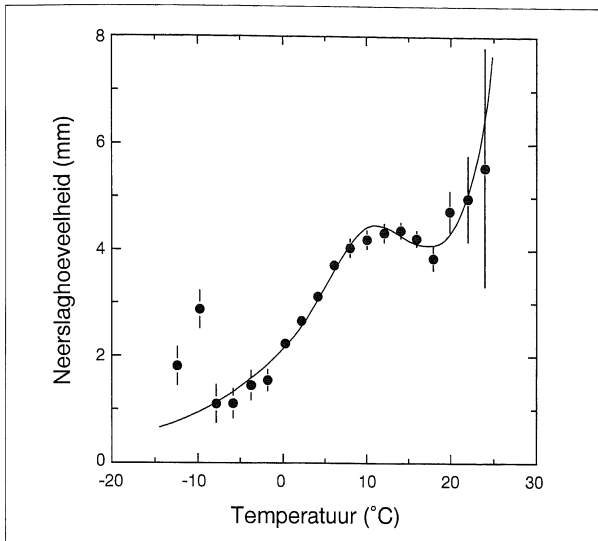
Voor neerslag geldt dat het al helemaal niet mogelijk is de berekeningen van klimaatmodellen te vertalen naar solide conclusies over tendensen in een bepaald gebied. Laat staan dat het mogelijk is iets te zeggen over bijvoorbeeld het toekomstige karakter van lokale buien of extreme neerslag.

Het onvermogen van de klimaatmodellen op het punt van de neerslag blijkt expliciet uit de grote onderlinge verschillen in de berekende verdeling van de neerslag; deze is aanmerkelijk groter dan voor de temperatuur. De oorzaak hiervan is grotendeels terug te voeren op de ingewikkeldheid van neerslag- en wolkenvorming en de nog gebrekkige wijze waarop deze processen in de klimaatmodellen weergegeven kunnen worden.

Voor studies naar de gevolgen van klimaatverandering voor de waterhuishouding zijn neerslagvoorspellingen op regionale (West-Europese) schaal echter essentieel. De laatste jaren is daarom wereldwijd studie verricht naar de mogelijkheden om klimaatscenario's met een meer regionaal karakter op te stellen. Binnen het Nationaal Onderzoek Programma Mondiale Luchtverontreiniging en Klimaatverandering heeft het KNMI een methode ontwikkeld voor het opstellen van dergelijke klimaatscenario's.

In het kort komt die methode erop neer dat de uitkomsten van klimaatmodellen waarin we het meeste vertrouwen hebben, zoals grootschalige temperatuurverandering, worden gecombineerd met gegevens van het huidige klimaat, die in de loop van de tijd zijn verzameld door de meteorologische waarnemingsstations. Door te veronderstellen dat waargenomen onderlinge verbanden tussen weer-elementen op lokale schaal - bijvoorbeeld tussen temperatuur en neerslaghoeveelheid - niet zullen veranderen, kan een scenario voor de neerslag worden geconstrueerd, uitgaande van een gegeven temperatuurverandering.

De methode is onder meer toegepast bij de modellering van mogelijke afvoerveranderingen in het stroomgebied van de Overijsselse Vecht. De resultaten zijn bemoedigend en het vertrouwen bestaat dat met deze methode een realistische indicatie van de mogelijke neerslagveranderingen in onze regio wordt verkregen.

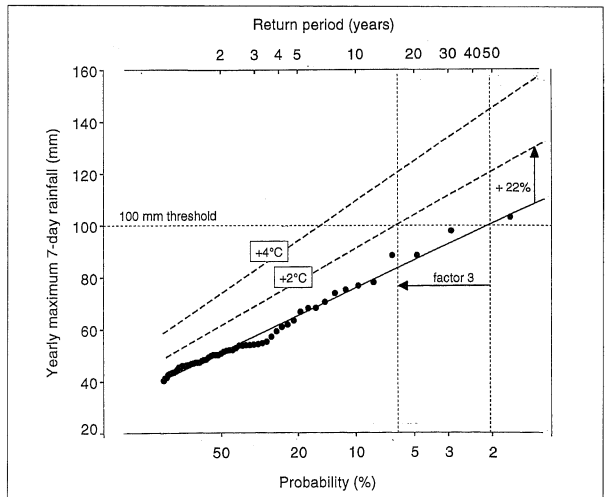


Figuur 4 Relatie tussen de gemiddelde neerslaghoeveelheid per natte dag (neerslag  $\geq 0.1$  mm) en de etmaalgemiddelde temperatuur in De Bilt zoals afgeleid uit de historische reeks 1906-1981. Dit verband wordt gebruikt om neerslagscenario's af te leiden voor een toekomstig klimaat. Met uitzondering van het middendeel neemt de neerslaghoeveelheid toe bij stijgende temperatuur. De daling in het middendeel wordt veroorzaakt door de afnemende activiteit van frontale neerslag rond de 15°C, terwijl buiten bij deze temperaturen nog niet zo actief zijn als bij hogere temperaturen (Buisshand en Klein Tank).

Het KNMI heeft voor zijn klimaatscenario gebruik gemaakt van het verband tussen de daggemiddelde neerslag en de daggemiddelde temperatuur zoals dat in figuur 4 is weergegeven voor De Bilt. In zijn algemeenheid volgt daaruit dat naar verwachting omstreeks het midden van de volgende eeuw de jaargemiddelde hoeveelheid neerslag in onze streken met 2 à 5% zal toenemen bij een temperatuurstijging van 0,5 à 2°C. Deze waarde is in lijn met indicaties van klimaatmodellen, maar betekent wel dat de toename per graad temperatuurstijging in onze regio

Figuur 5 Winter-maxima voor 7-daagse neerslagsommen in De Bilt.

Elke stijp vertegenwoordigt één winterseizoen. De getrokken lijn is gebaseerd op de waarnemingen en kan worden gebruikt om, bij ongewijzigd klimaat, de kans op overschrijding van hoge neerslagdrempels te bepalen (iedere winter is de kans op neerslag  $\geq 100$  mm bijvoorbeeld 2% oftewel eens in de 50 jaar). De stipellijnen geven de situatie bij een toename van respectievelijk 22 en 45% in neerslag, zoals dat bij een temperatuurstijging van respectievelijk 2 en 4°C wordt verwacht, onder de aanname van gelijkblijvende frequentie van de meteorologische situaties die extremen veroorzaken (Reuvekamp en Klein Tank).



hogers is dan het mondiale gemiddelde. Volgens het scenario is de toename niet gelijk verdeeld over de seizoenen: in de winter zal de toename twee keer zo groot zijn als de gemiddelde waarde, en in de zomer slechts enkele procenten bedragen.

In de zomer zijn de verwachte veranderingen dus niet zo groot, er is slechts een lichte tendens tot natter worden. Ook de natuurlijke schommelingen tussen natte en droge zomers, zoals we die uit het verleden kennen, zullen blijven voorkomen. De neerslag in de zomer krijgt waarschijnlijk wel een buiiger karakter, zodat de regen in korte tijdsintervallen naar beneden komt. Voorts wordt verwacht dat de zwaarste buien heviger worden en eerder gepaard gaan met onweer of hagel. Een eerste schatting geeft een toename in de maximale intensiteit van buien van ongeveer 10% per graad temperatuurstijging. Bij een temperatuurstijging van 0,5 à 2°C stijgt hun maximale intensiteit dus met 5 tot 20%. Dit kan gevolgen hebben voor de dimensionering van riolen en waterlopen als de huidige ontwerpnorm voor de waterafvoer gehandhaafd moet blijven.

Een tweede belangrijke conclusie voor de zomerperiode is dat de uitdroging in droge perioden groter zou kunnen worden. De neerslag blijft immers ongeveer gelijk maar valt in kortere tijdsperioden

en bovendien neemt door de hogere temperatuur de verdamping toe. Over een eventuele toename van de kans op lange droogteperiodes is thans nog geen uitsluitel te geven.

Langdurige natte perioden in de winter zullen volgens het scenario 5-20% meer neerslag brengen dan vergelijkbare perioden in het huidige klimaat. In het scenario wordt de verwachte toename in extreem natte perioden voor ongeveer de helft veroorzaakt doordat de neerslagintensiteit toeneemt, voor de andere helft doordat het in zulke perioden ook langduriger regent op dagen die neerslag brengen.

Vooralsnog is er geen duidelijkheid of de frequentie van zulke extreem natte perioden zal toe- of afnemen. Om toch tot een ruwe schatting te komen over de kans op hoge neerslag in lange perioden, bijvoorbeeld 10 dagen, wordt als eerste ordebenadering aangehouden dat de kans op de specifieke meteorologische situaties die tot hoge winterneerslag leiden gelijk blijft. Onder die aanname kan de toename van de kans op extreme neerslag berekend worden door gebruik te maken van informatie over soortgelijke gebeurtenissen in het verleden.

Ter illustratie toont figuur 5 de wintermaxima voor 7-daagse neerslagsommen in De Bilt. Er blijkt dan dat het scenario een enorme toename van de kans op overschrijden van hoge neerslagdrempels veroorzaakt: de kans op een neerslaghoeveelheid van 100 mm of meer in 7 dagen neemt toe van 2% per eeuw naar 6% bij 2°C temperatuurverhoging en zelfs naar 14% per eeuw bij een temperatuurstijging van 4°C. Dit betekent dat de kans op zo'n gebeurtenis bij 4°C temperatuurstijging maar liefst 7 keer hoger zou zijn dan nu.

*Gemiddeld valt in Nederland ca. 800 mm neerslag per jaar. De kans dat tenminste 1/8 deel van die gemiddelde jaarneerslag in één week valt is nu ca. 2%. Het is daarmee een uitzonderlijk fenomeen.*

*Hoewel in de Ardennen normaal meer neerslag valt dan in Nederland (800 à 1100 mm/jaar) is ook daar een neerslaghoeveelheid van 100 mm en meer in 7 dagen een opmerkelijk verschijnsel. De laatste keren, respectievelijk december 1994 (ca. 100 mm) en februari 1995 (ca. 150 mm), was het de aanleiding tot een hoogwater op de Maas.*

Het IPCC verwacht dat de mondiale gemiddelde temperatuurstijging in 2100 zal liggen tussen 1 en 3,5 °C en geeft als meest waarschijnlijke waarde in 2100 2 °C. Het is zonder meer duidelijk dat veranderingen van dergelijke grootte, als die optreden in het stroomgebied van de grote rivieren, aanleiding kunnen zijn tot het frequenter voorkomen van hoge en extreem hoge waterstanden. In het kader van de voorbereiding van de vierde Nota Waterhuishouding zal hier aandacht aan worden besteed.

In zijn algemeenheid kan worden gesteld dat de kennis over de mogelijke veranderingen in de neerslag in onze regio vooral betrekking heeft op het gedrag van regensystemen zelf. Als er aannamen gebruikt worden over de frequenties is daaruit een beeld te schetsen voor een mogelijke ontwikkeling van het toekomstig neerslagregime. De door het KNMI gebruikte aannamen voor het neerslagscenario lijken verantwoord maar zijn niet te toetsen.

Voor de ene karakteristiek van het toekomstige weer wegen de aannamen zwaarder dan voor de andere. Dit vinden we terug in de bruikbaarheid van de re-

sultaten. Voor sommige karakteristieken geldt voornamelijk dat wij met uitspraken zullen moeten wachten tot over de frequenties van neerslaggebieden meer in kwantitatieve zin te zeggen is. Het laat zich aanzien dat deze kennis zich in de nabije toekomst zal vergroten door de voortgaande aandacht en onderzoeksinspanning op dit terrein.

## Literatuur

- Houghton J.T. et al., 1995. Climate Change 1995. The IPCC Second Scientific Assessment Report, Cambridge University Press.
- Houghton J.T. et al. 1994. Radiative Forcing of Climate. The 1994 report of the Scientific Assessment Working Group of IPCC. Summary for Policymakers.
- KNMI, 1996. De toestand van het klimaat in Nederland. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Parmet, B.W.A.H. en M. Raak, 1996. Impact of climate change on the discharge of the river Rhine; a case studie for a sub-basin in the lowland part of the Rhine system, the Overijsselse Vecht. RIZA-nota 96.xxx, Arnhem
- Buishand, T.A. and A.M.G. Klein Tank, 1996. Regression model for generating time series of daily precipitation amounts for climate change impact studies. Stochastic Hydrology and Hydraulics.
- Reuwerkamp, A. and A.M.G. Klein Tank, 1996. Probability estimates of extreme winter rainfall in a changing climate. Change.