

Klimaatverandering: realistische scenario's voor impact-studies

Inleiding

De invloed van het door de mens veroorzaakte versterkte broeikaseffect op het klimaat en de gevolgen daarvan voor de samenleving zijn onderwerpen die momenteel sterk in de belangstelling staan. Wereldwijd wordt gewerkt aan het verbeteren van de computermodellen voor het simuleren van de grootschalige stroming in de bovenlucht en het klimaatsysteem, de zogenaamde General Circulation Models (GCM's). Deze modellen geven voor elk gebied op aarde een indruk van de



A. M. G. KLEIN TANK
Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut,
De Bilt



T. A. BUISHAND
Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut,
De Bilt

mogelijke klimaatveranderingen door een verhoogde concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer. Ze leveren echter geen representatieve reeksen van dagwaarden of maandwaarden van de verschillende meteorologische elementen voor een bepaalde plaats of gebied. In het bijzonder zijn ze niet in staat het optreden van lokale buien (of extreme neerslag) weer te geven. Voor impact-studies naar de gevolgen van een klimaatverandering voor bijvoorbeeld de waterhuishouding zou men echter graag over dit soort gegevens willen beschikken. Dit heeft ertoe geleid dat verschillende methodes zijn bedacht om klimaatscenario's te construeren. Een klimaatscenario is hierbij gedefinieerd als een meteorologisch consistente dataset van verschillende elementen met de juiste tijd- en ruimteschaal voor impact-studies. In dit artikel wordt nagegaan waarom GCM-voorspellingen van een toekomstig klimaat niet zonder meer bruikbaar zijn als klimaatscenario. Ook wordt een overzicht gegeven van de methodes die de afgelopen jaren in het buitenland zijn ontwikkeld voor de vertaalslag van GCM-voorspellingen naar klimaatscenario's. Tenslotte wordt de methode gepresenteerd die hiervoor door het KNMI is ontwikkeld in het kader van het Nationaal Onderzoek Programma (NOP) Mondiale Luchtverontreiniging en Klimaatverandering.

Simulatie van het huidige klimaat met GCM's

De waarde van GCM-voorspellingen van

Samenvatting

Klimaatonderzoekers maken gebruik van General Circulation Models (GCM's) om de klimaatveranderingen tengevolge van het versterkte broeikaseffect te voorspellen. Naast de vele meteorologische processen in de atmosfeer wordt in deze modellen ook rekening gehouden met de uitwisseling van energie en waterdamp aan het aardoppervlak. Door allerlei vereenvoudigingen geven de GCM's slechts een indicatie van potentiële klimaatveranderingen. Het meest betrouwbaar zijn de veranderingen in de seizoengemiddelden van temperatuur en luchtdruk over grote gebieden. De veranderingen in de neerslag worden minder betrouwbaar geacht omdat de GCM's de gemiddelde neerslaghoeveelheden in het huidige klimaat niet goed kunnen weergeven. Ook hebben deze modellen moeite met het reproduceren van de eigenschappen van een tijdreeks en een kansverdeling van extreme waarden. Ze geven dus onvoldoende informatie om de gevolgen van klimaatveranderingen voor bijvoorbeeld de waterhuishouding te berekenen. Door het KNMI is in het kader van het Nationaal Onderzoek Programma (NOP) Mondiale Luchtverontreiniging en Klimaatverandering een methode ontwikkeld om meteorologisch consistente datasets of klimaatscenario's te construeren die geschikt zijn voor dergelijke toepassingen. Bij deze methode worden waarnemingsreeksen van meteorologische stations getransformeerd naar representatieve reeksen voor een mogelijk toekomstig klimaat. Daarbij wordt gebruik gemaakt van statistische relaties tussen de neerslag, de temperatuur en de luchtdruk in het huidige klimaat. Op deze manier wordt een aantal bezwaren ondervangen van het gebruik van directe GCM-voorspellingen van de neerslag als scenario in impact-studies en van alternatieve technieken voor de constructie van klimaatscenario's. De KNMI-methode wordt geïllustreerd aan de hand van twee voorbeelden van de transformatie van de waarnemingsreeksen van De Bilt.

een toekomstig klimaat wordt meestal beoordeeld op grond van de betrouwbaarheid waarmee GCM's het huidige klimaat kunnen simuleren. Uit een vergelijking met waarnemingen blijkt namelijk het beste waartoe GCM's in staat zijn en waar ze (nog) te kort schieten. Als voorbeeld wordt de simulatie van het huidige klimaat met een Canadees GCM besproken. Eerst zal echter worden ingegaan op enkele kenmerken van GCM's, waarbij de nadruk gelegd wordt op de representatie van het landoppervlak en het weergeven van ruimtelijke variabiliteit van de neerslag.

Kenmerken van GCM's

Weer en klimaat worden beïnvloed door de grootschalige stroming in de bovenlucht, aangeduid als atmosferische circulatie. GCM's simuleren de toestand en evolutie van deze circulatie door het oplossen van wiskundige vergelijkingen met een rekestijdstap van ≈ 30 minuten voor een wereldwijd drie-dimensionaal rooster met een horizontale resolutie van ≈ 250 km en een beperkt aantal verticale lagen (≈ 15). In deze vergelijkingen is veel van de bestaande kennis van het klimaatsysteem samengebracht. Naast de dynamische en fysische processen in de atmosfeer worden de interacties tussen de atmosfeer en de oceanen en tussen de atmosfeer en het landoppervlak beschreven. Daarbij zijn vele vereenvoudigingen aangebracht, enerzijds vanwege de gecompliceerdheid van de verschillende processen, anderzijds vanwege de lage resolutie van de GCM's.

De gecompliceerdheid van de processen gaf aanvankelijk aanleiding de oceanen voor te stellen als een 50 m dikke menglaag. Hiermee wordt vrijwel geen rekening gehouden met de vertragende werking van de oceanen op een klimaatverandering door het versterkte broeikaseffect. Ook is het niet mogelijk om de invloed van veranderende zeestromingen op het klimaat weer te geven. Vanaf omstreeks 1990 zijn er (gekoppelde) GCM's met een aparte module voor de stroming in de oceanen. De lage horizontale resolutie brengt met zich mee dat de land-zee verdeling en topografie weinig realistisch zijn. Groot-Brittannië is bijvoorbeeld met het vaste land van Europa verbonden en de Alpen zijn sterk afgevlakt. Het effect van processen die zich op kleinere schaal voordoen dan de roosterpuntafstand wordt in rekening gebracht door relaties te leggen met grootschalige variabelen. Men noemt dit parametrisatie. Voorbeelden van processen die op dergelijke wijze worden beschreven zijn de vorming van neerslag en de uitwisseling van energie en waterdamp aan het landoppervlak.

Een belangrijk aspect bij de parametrisatie van de uitwisselingsprocessen aan het landoppervlak is de modellering van het bodemvocht [Henderson-Sellers *et al.*, 1995]. Tot in de jaren tachtig werd in nagenoeg alle GCM's gebruik gemaakt van de zogenaamde 'bucket' representatie. Neerslag en sneeuwsmeelt vullen de 'bucket', verdamping leegt hem en bij een

volle 'bucket' treedt afvoer op. Er is dus geen onderscheid tussen oppervlakte- en grondwaterafvoer. De verdamping wordt gereduceerd wanneer de hoeveelheid water in de 'bucket' onder een bepaalde grens gedaald is. De huidige GCM's hebben geavanceerde 'soil-vegetation-atmosphere-transfer'-schema's (SVAT's) met verschillende bodemlagen en een expliciete beschrijving van de vegetatie [Henderson-Sellers *et al.*, 1993; Dickinson, 1995]. Verdamping kan geschieden vanaf de kale grond, het vegetatie-oppervlak (interceptie-verdamping) of via de huidmondjes in de bladeren (transpiratie). Bij vochttekorten in de bodem kan de transpiratie worden gereduceerd. Hoewel veel schema's onderscheid kunnen maken tussen oppervlakte-afvoer en afvoer via de ondergrond verdwijnt de afvoerbare neerslag voor ieder roosterpunt zonder vertraging uit het systeem. Alleen bij de meest recente GCM's wordt overtollig water via een stelsel van rivieren naar de oceanen afgevoerd zoals beschreven door Miller *et al.* [1994].

Omggaan met heterogeniteit

Een punt waarin de huidige GCM's tekortschieten is het meenemen van heterogeniteiten binnen een roostercel. Bij heterogeniteiten moet men denken aan het niet uniform verdeeld zijn van de meteorologische input over de roostercel (vooral de neerslag, maar ook enkele stralingscomponenten) en aan de verschillen in hoogteligging, vegetatie en bodemeigenschappen binnen de cel. De meeste GCM's hebben twee typen schema's voor de neerslag: één voor convectieve neerslag (buien) en één voor grootschalige neerslag. De gesimuleerde neerslaghoeveelheid voor een roosterpunt is echter de gemiddelde hoeveelheid over de gehele cel. Door het middelen over een groot oppervlak is de intensiteit in het algemeen gering waardoor er een risico is dat de oppervlakte-afvoer onderschat wordt en de interceptie van de vegetatie overschat wordt. Om dit soort problemen te ondervangen wordt bij sommige GCM's verondersteld dat de neerslag slechts over een bepaald gedeelte van de roostercel valt en dat binnen dat gebied de lokale hoeveelheden een exponentiële verdeling hebben [Pitman *et al.*, 1990; Thomas en Henderson-Sellers, 1991]. In het nieuwe GCM van de United Kingdom Meteorological Office is gekozen voor een bedekkingspercentage van 30% bij buien en van 100% bij grootschalige neerslag. Bij deze wijze van parametriseren is dus in principe sprake van ruimtelijke verschillen in de neerslaghoeveelheid binnen een roostercel, maar er wordt niet aangegeven waar de neerslag valt. Gao en Sorooshian [1994] stellen een Monte

TABEL I – Gemiddeld percentage dagen N met neerslag $\geq 0,1$ mm, gemiddelde neerslaghoeveelheid R , temperatuur T , en luchtdruk P (gereduceerd naar zeeniveau) voor een 10-jaar $1xCO_2$ simulatie run met het GCM van het Canadese Klimaatcentrum (CCC-GCM) en voor de waarnemingen in De Bilt voor het tijdvak 1961-1990.

Element		Seizoen				
		Winter	Lente	Zomer	Herfst	Jaar
N (%)	CCC-GCM	91*	90*	92*	91*	91*
	De Bilt	60	53	48	59	55
R (mm)	CCC-GCM	322*	263*	314*	331*	1243*
	De Bilt	194	176	214	220	803
T (°C)	CCC-GCM	3,1	8,4	16,2	9,7*	9,4
	De Bilt	2,6	8,4	16,2	10,2	9,4
P (hPa)	CCC-GCM	1015,8	1014,8	1013,1*	1015,8	1014,7
	De Bilt	1014,8	1014,4	1016,0	1015,3	1015,2

* Significant verschillend van de waarden in De Bilt (5% niveau, Welch-Aspin toets, tweezijdig).

Carlo-methode voor waarbij dit laatste wel mogelijk is. Hun methode houdt ook rekening met de verschillen in de langjarige gemiddelden binnen de roostercel en met het feit dat bij toenemende gemiddelde intensiteit over de gridcel de neerslag in het algemeen over een groter gebied zal vallen. Een zwak punt blijft echter dat de ruimtelijke patronen in twee opeenvolgende rekenstappen ongecorrigeerd zijn. In werkelijkheid is er een sterke samenhang omdat neerslag meestal geleidelijk over de roostercel trekt. Seth *et al.* [1994] ondervangen dit probleem door een geheugen in te bouwen voor de plaats van het centrum van een bui. Doordat zij voor de bodem en de vegetatie hetzelfde fijnmazige (50 km) subrooster hanteren als voor de neerslag binnen iedere cel, is het mogelijk rekening te houden met de correlatie tussen de meteorologische input enerzijds en de van de vegetatie afhankelijke interceptie en de van de bodem afhankelijke afvoer anderzijds. Dergelijke verfijningen maken de schema's echter fors ingewikkelder en rekenintensiever. Hoewel men ervan overtuigd is dat in het algemeen de processen bij het landoppervlak onvoldoende geparametriseerd zijn, bestaat er veel onduidelijkheid over wat wel en wat niet belangrijk is. Voor de neerslag is de ruimtelijke verdeling binnen de roostercel niet het enige probleem. Er zijn ook allerlei onvolkomenheden in de parametrisatie van atmosferische processen, waardoor de gemiddelde neerslaghoeveelheid over de gridcel niet goed wordt weergegeven zoals het volgende voorbeeld aangeeft.

Voorbeeld van de simulatie van het huidige klimaat met een Canadees GCM

Ondanks de vele vereenvoudigingen, zijn de huidige GCM's over het algemeen redelijk goed in staat de waargenomen seizoen-gemiddelde temperatuur- en luchtdrukverdeling te simuleren. Voor de neerslag lukt dit in mindere mate. Ter illustratie geeft Tabel I enkele resultaten van het GCM van het Canadese Klimaatcentrum

[McFarlane *et al.*, 1992; Boer *et al.*, 1992]. De cijfers zijn afkomstig van een 10-jaar simulatie run voor het huidige klimaat, de $1xCO_2$ run. De tabel geeft de resultaten voor de roosterpunten die Nederland bedekken en ter vergelijking de waarnemingen in De Bilt. Zelfs als rekening wordt gehouden met het effect van ruimtelijke middeling op de neerslagresultaten [Buishand *et al.*, 1993], dan nog is het gesimuleerde aantal dagen met neerslag $\geq 0,1$ mm in alle seizoenen significant te hoog. De gesimuleerde hoeveelheid neerslag is eveneens te hoog. De gemiddelde temperatuur daarentegen wordt realistisch gesimuleerd; alleen de waarde in de herfst wijkt significant af van de waarnemingen in De Bilt, maar ook dan is het verschil met de waarnemingen niet meer dan een halve graad. De gemiddelde luchtdruk op zeeniveau in het model is eveneens realistisch, zij wordt alleen in de zomer significant onderschat. De variatie van dag- en maandwaarden wordt in dit model zowel voor de temperatuur, de luchtdruk en de neerslag onderschat. Voor de temperatuur in de winter is de standaarddeviatie van de gesimuleerde daggemiddelden bijvoorbeeld $2,3^\circ C$, wat veel lager is dan de waarde van $4,3^\circ C$ voor de waarnemingen in De Bilt. In dit jaargetijde wordt het in het GCM niet kouder dan $-0,3^\circ C$, terwijl de waargenomen laagste gemiddelde dagtemperatuur in De Bilt in een 10-jaar tijdvak gemiddeld $-7,1^\circ C$ bedraagt.

Gebruik van GCM-resultaten voor impact-studies

Op grond van de bereikte resultaten voor de simulatie van het huidige klimaat met GCM's, wordt in het algemeen het meeste vertrouwen gesteld in de voorspelde seizoen-gemiddelde temperatuur- en luchtdrukverandering in een toekomstig klimaat met verhoogde CO_2 -concentratie voor zover deze betrekking hebben op grote gebieden. Hierbij moet men denken aan regio's die acht of meer roosterpunten beslaan [Von Storch *et al.*, 1993].

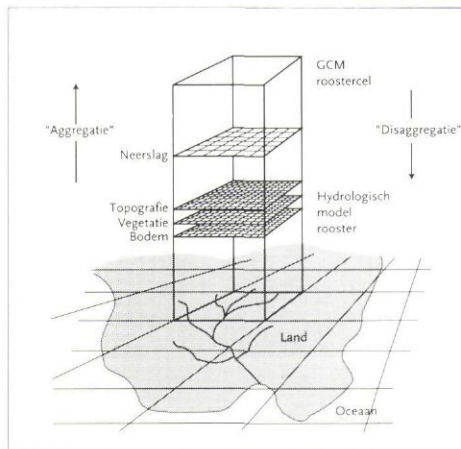
Het vertrouwen in de voorspelde regionale seizoengemiddelde neerslagverandering is kleiner. De grote variatie van de neerslag in de tijd bemoeilijkt bovendien de interpretatie van de seizoengemiddelde veranderingen zoals uit het volgende voorbeeld blijkt.

Voorbeeld van de neerslagveranderingen voorspeld door een Engels GCM

Afbeelding 1 toont de resultaten voor het winterseizoen van een 75-jaar simulatie run met het GCM van het United Kingdom Meteorological Office, waarin men de CO₂-concentratie in de atmosfeer met 1% per jaar heeft laten toenemen [Viner en Hulme, 1993]. Het rechter plaatje geeft de voorspelde veranderingen aan ten tijde van een verdubbeling van de CO₂-concentratie. Bij het linker plaatje is de CO₂-concentratie met ongeveer 50% gestegen. Een vergelijking van de twee plaatjes laat zien dat de neerslagtoename over een groot gedeelte van Noord-Europa ten tijde van een CO₂-verdubbeling kleiner is dan ten tijde van de 1,5xCO₂ situatie. Dit komt doordat de weergegeven veranderingen in deze plaatjes niet alleen een gevolg zijn van het versterkte broeikaseffect, maar ook van de van nature voorkomende variaties in de 10-jaarlijkse gemiddelden van de neerslag. In Nederland heeft deze natuurlijke variabiliteit ervoor gezorgd dat in de winters van het natste decennium (1981-90) van de afgelopen eeuw gemiddeld 22% meer neerslag viel dan in de winters van het droogste decennium (1921-30).

Schaal-mismatch tussen GCM's en impact-studies

De betrouwbaarheid van GCM-voorspellingen van veranderingen in andere kenmerken dan seizoengemiddelden over grote gebieden wordt gering geacht. Mogelijke veranderingen in de variabiliteit op korte tijdschalen en daarmee samenhangend in het voorkomen van extremen



Afb. 2 - Schaal-mismatch tussen hydrologische en atmosfeermodellen. Overgenomen uit WMO (1992).

over kleine gebieden (vaak veel kleiner dan één roostercel) zijn juist wel de kenmerken van het klimaat waar het vaak om draait bij impact-studies. Er is dus een schaal-mismatch tussen enerzijds wat de GCM's leveren en anderzijds wat nodig is voor de meeste impact-studies. Deze mismatch wordt schematisch geïllustreerd in afbeelding 2. Zij is een gevolg van de uiteenlopende ruimtelijke schalen waarop atmosferische en hydrologische processen opereren. Gezien de schaal-mismatch is het de vraag of seizoengemiddelde klimaatveranderingen voor een groot gebied zoals West-Europa zonder meer mogen worden toegepast op hogere resolutie data in impact-studies (bijvoorbeeld dagwaarden voor individuele stations). Voor klimaat-elementen met relatief geringe ruimtelijke variatie (bijvoorbeeld temperatuur en luchtdruk) is dit waarschijnlijk minder bezwaarlijk dan voor de neerslag, vanwege het grote contrast tussen de GCM-resolutie en de ruimtelijke schalen waarover de neerslag varieert [zie o.a. Von Storch, 1995]. Simpele transformaties van waargenomen reeksen, gebruik makend van GCM-voorspellingen van maand- of

seizoengemiddelde veranderingen voor het dichtstbijzijnde roosterpunt, zijn echter ook voor de neerslag bijzonder populair [Bultot *et al.*, 1992; Panagoulia, 1992]. Toch verdienen alternatieven in veel gevallen de voorkeur.

Klimaatscenario's

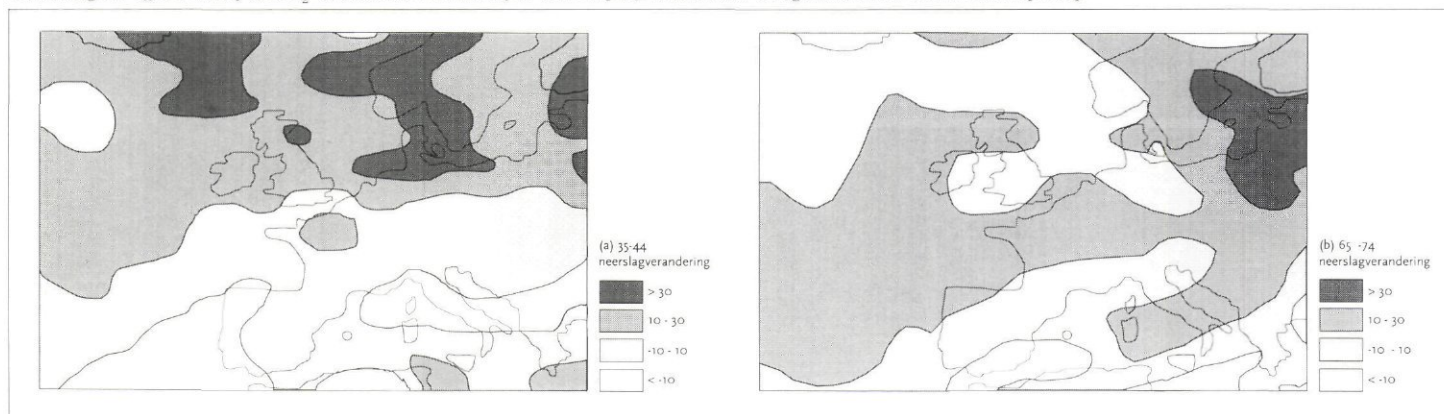
De afgelopen jaren zijn verschillende alternatieve methodes ontwikkeld om GCM-resultaten te 'vertalen' naar meteorologisch consistente data met de juiste tijd- en ruimte-schaal voor impact-studies [zie o.a. Giorgi en Mearns, 1991; Wilks, 1992 en Von Storch, 1995].

Dit onderwerp heeft in internationale onderzoekprogramma's een vaste plaats gekregen [BAHC, 1994] en ook op internationale conferenties over het klimaat bestaat vaak onder de titel 'downscaling' ruime aandacht voor het construeren van klimaatscenario's. Enigszins arbitrair kunnen twee benaderingen voor de 'vertaalslag' van GCM naar impact-studie worden onderscheiden: de deterministische en de stochastische.

Deterministische benadering

Hierbij worden klimaatscenario's verkregen door simulatie runs met een atmosfeermodel met hoge resolutie dat is ingebed (men spreekt van *nesting*) in een GCM met lage resolutie. Het hoge-resolutie model beslaat slechts een beperkt gebied (bijvoorbeeld Noordwest-Europa), waarvan de grenzen op iedere rekentijdstep worden gevoed met informatie uit het GCM. Hierdoor is de gesimuleerde stroming op de fijne schaal dynamisch consistent met die op de grove schaal. Vooral het effect van bergen op de neerslag en overgangen bij kustlijnen worden beter weergegeven. Het nadeel van de methode is dat voornamelijk een aantal resolutie afhankelijke fouten in de GCM-simulaties worden aangepakt. De overige tekortkomingen van de GCM's worden nog steeds doorvertaald naar het fijschalige scenario. Door de

Afb. 1 - Gemiddelde neerslagverandering in de winter voor de decennia 35-44 (a) en 65-74 (b) volgens een 75-jaar simulatie run met het GCM van het United Kingdom Meteorological Office waarbij de CO₂-concentratie in de atmosfeer met 1% per jaar toeneemt. Overgenomen uit Viner en Hulme [1993].



extreem hoge computerrekenkosten van geneste modellen is de lengte van de simulatie runs beperkt [Giorgi *et al.*, 1994]. Bovendien vindt slechts in één richting beïnvloeding plaats: weersystemen die ontstaan in het fijnmazige model kunnen, eenmaal aan de rand gekomen, niet de circulatie in het GCM beïnvloeden. De roosterpuntafstand van het uiteindelijke scenario ligt in de orde van ≈ 50 km en dat is voor veel impact-studies nog te groot. Door genoemde factoren is operationeel gebruik van deze methode voor impact-studies in Nederland vooralsnog niet goed mogelijk.

Stochastische benadering

Bij deze benadering worden klimaat-scenario's verkregen door kunstmatige tijdreeksen te genereren met behulp van stochastische modellen. Dergelijke weer-generatoren bevatten een aantal parameters die de grootte van gemiddelden, standaarddeviaties en andere statistische eigenschappen van de verschillende elementen bepalen. Stochastische modellen voor de neerslag hebben meestal een aparte module voor het beschrijven van de opvolging van droge en natte dagen (bijvoorbeeld een Markov keten) of de tijdstippen waarop buien vallen (Poisson cluster modellen). Voor het huidige klimaat worden de parameters van het model geschat op basis van waarnemingsreeksen. Vervolgens worden ze gewijzigd op grond van GCM-voorspellingen en worden kunstmatige reeksen voor het toekomstige klimaat gesimuleerd.

Een andere mogelijkheid is de modelparameters apart te schatten voor verschillende circulatietypen en vervolgens de tijdreeksen van deze typen te wijzigen volgens GCM-voorspellingen van de circulatie. Het voordeel van de stochastische benadering is dat eenvoudige scenario's kunnen worden gegenereerd die direct bruikbaar zijn in impact-studies, zonder langjarige runs met complexe fysische modellen die een groot aantal invoergegevens nodig hebben. Een nadeel is dat noodzakelijke versimpelingen kunnen leiden tot gebrekkige scenario's. Zo wordt bijvoorbeeld de variabiliteit van gemiddelde temperaturen en neerslaghoeveelheden over tijdsduren langer dan een dag niet perfect gesimuleerd; het optreden van langdurige periodes van extreme droogte of regenval wordt op die manier vaak onderschat. Een ander nadeel van het gebruik van weergeneratoren voor de neerslag is dat, hetzij onbetrouwbare GCM-gegevens nodig zijn over veranderingen in de neerslag of dat wordt verondersteld dat de neerslag alleen circulatie afhankelijk is. Zoals uit onderstaande zal blijken is de neerslag behalve van de

circulatie ook afhankelijk van de temperatuur [zie ook Matyasovszky *et al.*, 1993]. Bovendien zijn in de meeste GCM-simulatie runs de voorspelde veranderingen in de circulatie kleiner dan de verschillen tussen de circulatie in het huidige waargenomen klimaat en het huidige klimaat zoals dit door het GCM wordt gesimuleerd. Een belangrijke aanname bij alle stochastische benaderingen is dat de beschouwde statistische relaties weinig veranderen.

KNMI-methode

Er is vooralsnog geen consensus dat een bepaalde methode voor de constructie van klimaatscenario's de voorkeur verdient boven andere [zie o.a. BAHC, 1994]. De keuze van de methode hangt sterk af van de impact-studie waarvoor het scenario wordt gebruikt. Door het KNMI is een techniek ontwikkeld die aansluit bij de populaire transformatie van stationsreeksen met behulp van GCM-voorspellingen voor naburige roosterpunten. In tegenstelling tot deze simpele transformaties maakt de KNMI-techniek echter geen gebruik van minder betrouwbaar geachte voorspellingen van neerslagveranderingen. Zij is in eerste instantie gericht op hydrologische studies met een beperkt ruimtelijk domein (≈ 10 km) en een hoge tijdsresolutie (dagwaarden), waarvoor het minst kan worden vertrouwd op directe GCM-resultaten. De KNMI-techniek is binnen het NOP onder andere toegepast bij de modellering van mogelijke afvoerveranderingen in het stroomgebied van de Overijsselse Vecht [Parmet en Raak, 1996].

Statistische relaties

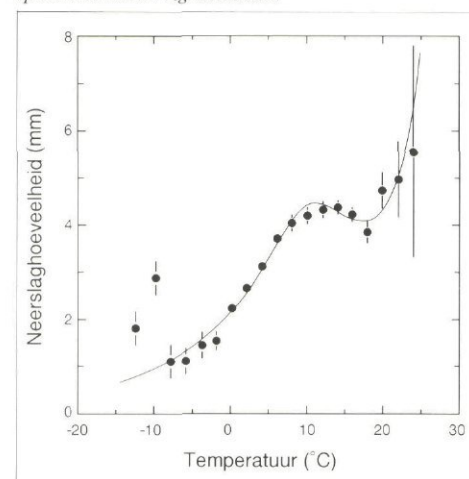
De KNMI-methode voor het opstellen van klimaatscenario's maakt slechts gebruik van die GCM-voorspellingen die het meest betrouwbaar worden geacht: grootschalige seizoengemiddelde veranderingen in de temperatuur en de luchtdruk. Waarnemingsreeksen van meteorologische stations worden getransformeerd naar reeksen van dagwaarden die representatief zijn voor een mogelijk toekomstig klimaat door gebruik te maken van statistische relaties in het huidige klimaat. Vooralsnog gaat het daarbij om de relatie tussen neerslag enerzijds en temperatuur, luchtdruk, vochtigheid en straling anderzijds. Doordat de methode sterk leunt op waarnemingsreeksen is de consistentie tussen de verschillende meteorologische elementen in het scenario verzekerd. Aangenomen wordt dat verbanden tussen deze elementen zoals die tot uitdrukking komen in ons dagelijkse weer (droog, warm en zonnig in de zomer; nat, warm en bewolkt in de winter) onveranderd blijven in een gewijzigd klimaat. Een verandering in één van de elementen

geeft dan een indicatie van veranderingen in de overige. Onderkend wordt dat een statistisch verband tussen genoemde variabelen nog geen oorzaak-gevolg relatie aangeeft. Wat dat betreft zouden goede predictoren voor de lokale neerslag zijn [Giorgi en Mearns, 1991]: 1. grootschalige neerslag, vochtigheid en atmosferische stabiliteit omdat zij direct het neerslagproces beïnvloeden; 2. luchtdruk op zee-niveau en gegevens over de bovenlucht omdat zij een maat voor de heersende weersomstandigheden zijn; en 3. bodemvocht, vegetatie, en topografie omdat zij belangrijke forceringen voor het neerslagproces vormen. Een probleem is echter dat voor een aantal van de genoemde variabelen geen kennis voorhanden is over mogelijke veranderingen in een toekomstig klimaat. Mede daarom is gestreefd naar een zo eenvoudig mogelijke vorm van de statistische relaties. Onderstaand volgen twee scenario's (Scenario 1 en Scenario 2) die de KNMI-methode illustreren.

Scenario 1

Scenario 1 gaat uit van het verband tussen de neerslaghoeveelheid en de temperatuur. Warme lucht kan meer waterdamp bevatten dan koude lucht. Dit heeft tot gevolg dat bij frontpassages en lokale buien in het algemeen meer neerslag valt bij hogere temperaturen. Uit GCM simulaties blijkt dat het versterkte broeikas effect niet alleen tot een stijging van de wereldgemiddelde temperatuur leidt, maar ook tot een toename in de jaarlijkse hoeveelheid neerslag op aarde. Gemiddeld is sprake van een neerslagtoename van $\approx 2\%$ per graad temperatuurstijging. Ook voor onze regio laten de meeste GCM's een toename zien

Afb. 3 - Gemiddelde neerslaghoeveelheid bij verschillende waarden voor de gemiddelde temperatuur in De Bilt zoals afgeleid uit de historische reeks 1906-1981. Alleen natte dagen (met neerslag $\geq 0,1$ mm) zijn meegenomen bij de analyse. De vloeiende lijn geeft voor elke temperatuur T de gemiddelde neerslaghoeveelheid $R(T)$ en is gebaseerd op een niet-lineair regressiemodel.



van zowel de gemiddelde temperatuur als de gemiddelde neerslaghoeveelheid. Het feit dat de atmosfeer bij hogere temperaturen meer waterdamp kan bevatten verklaart gedeeltelijk het in afbeelding 3 gegeven verband tussen de gemiddelde neerslaghoeveelheid op natte dagen en de temperatuur in De Bilt. Een uitzondering vormt het gedrag bij temperaturen tussen de 15°C en 20°C, waar sprake is van een afname van de gemiddelde neerslaghoeveelheid bij stijgende temperatuur. Dit wordt veroorzaakt door de verminderde activiteit van grootschalige neerslag-systemen bij temperaturen > 15°C. De neerslag bij temperaturen > 20°C valt voornamelijk in de vorm van buien. De vloeiende lijn in deze afbeelding geeft voor elke temperatuur T de gemiddelde neerslaghoeveelheid $R(T)$. Deze lijn berust op een niet-lineair regressiemodel voor de neerslaghoeveelheden op natte dagen [Buishand en Klein Tank, 1996]. Scenario 1 wordt verkregen door voor iedere dag de neerslaghoeveelheid te vermenigvuldigen met een factor die gebaseerd is op het verband in afbeelding 3:

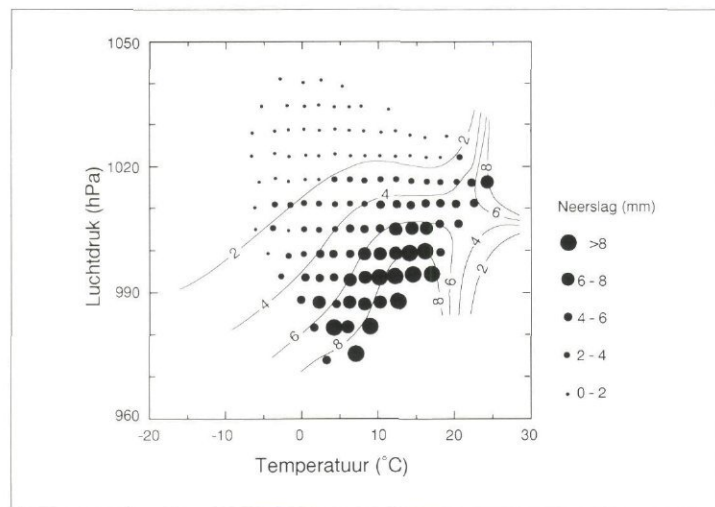
$$F_1 = R(T^*) / R(T) \quad (1)$$

met T de waargenomen temperatuur op de desbetreffende dag en T^* de temperatuur in het nieuwe klimaat. Het meest eenvoudige is om $T^* = T + \Delta$ te nemen, met Δ de gemiddelde temperatuuroptoe name over een regio volgens één of meerdere GCM's. De grootte van F_1 hangt zowel van T als van T^* af. Voor een dag met een gemiddelde temperatuur in de buurt van de 0°C is de vermenigvuldigingsfactor voor een 3°C temperatuurstijging bijvoorbeeld 1,28. Is echter $T = 15^\circ\text{C}$ dan is voor dezelfde temperatuurstijging $F_1 = 0,98$. In dit scenario blijft het aantal droge en natte dagen ongewijzigd.

Scenario 2

In Scenario 1 wordt impliciet verondersteld dat behalve de neerslag ook de atmosferische circulatie verandert volgens de relatie met de temperatuur in het huidige klimaat. Meer flexibele scenario's die kunnen omgaan met mogelijke veranderingen in de circulatie zoals die zouden kunnen blijken uit toekomstige GCM-simulatie runs vereisen dat, naast een verandering in de temperatuur, ook een verandering in de circulatie kan worden voorgeschreven. In Scenario 2 wordt hieraan ten dele tegemoetgekomen door bij de transformatie van de dagwaarden van de neerslag de luchtdruk te betrekken. In afbeelding 4 is voor de natte dagen in De Bilt de gemiddelde neerslaghoeveelheid gegeven voor verschillende combinaties van de tempera-

Afb. 4 - Als afbeelding 3, maar nu is de gemiddelde neerslaghoeveelheid gegeven voor verschillende combinaties van de temperatuur en de luchtdruk. De isolijnen geven voor elke temperatuur T en luchtdruk P de gemiddelde neerslaghoeveelheid $R(T,P)$ en zijn gebaseerd op een niet-lineair regressiemodel.



tuur en de luchtdruk. Zoals verwacht zijn de gemiddelde neerslaghoeveelheden hoog bij lage luchtdruk en laag bij hoge luchtdruk. Bij een vaste waarde van de luchtdruk P neemt de gemiddelde neerslaghoeveelheid in het algemeen toe met de temperatuur. Op de gemiddelde neerslaghoeveelheden $R(T,P)$ in afbeelding 4 is met behulp van niet-lineaire regressie een wiskundig verband aangepast. Dit verband vormt de basis voor Scenario 2. De factor waarmee de neerslaghoeveelheden vermenigvuldigd worden hangt nu zowel van de temperatuur als de luchtdruk af:

$$F_2 = R(T^*, P^*) / R(T, P) \quad (2)$$

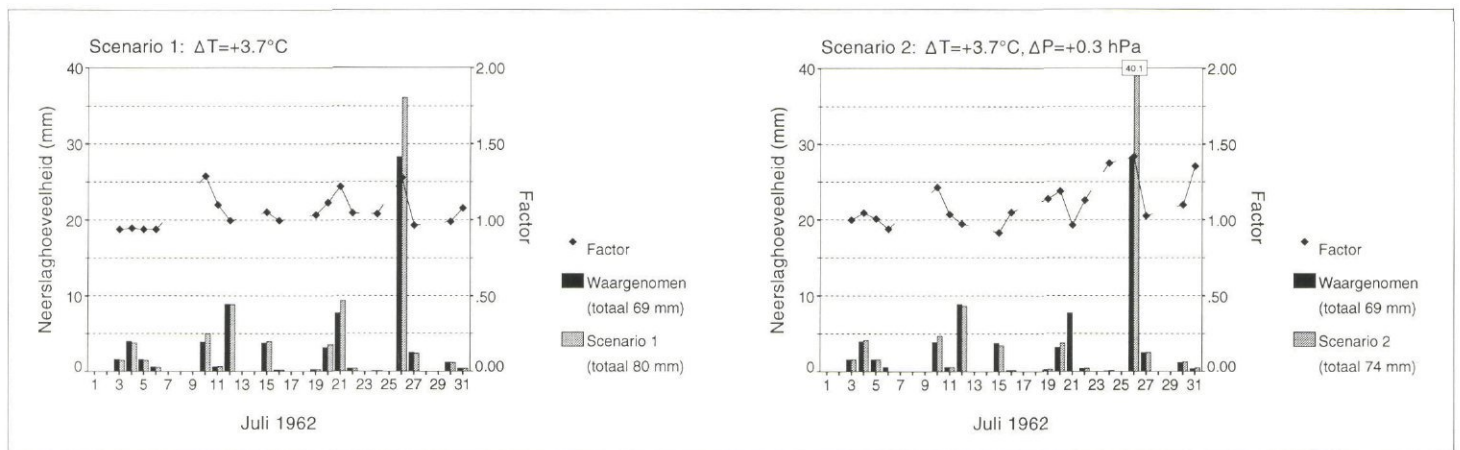
met T^* en P^* de waarden van de temperatuur en de luchtdruk in het nieuwe klimaat. Aangezien behalve de neerslaghoeveelheid ook het optreden van neerslag sterk afhangt van de luchtdruk, kan het aantal droge en natte dagen niet langer ongewijzigd blijven zoals in Scenario 1 is verondersteld. Om bij een verandering van de luchtdruk het aantal droge of natte dagen te wijzigen is voor elke dag een neerslagkans berekend op analoge wijze als bij weersverwachtingen [Klein Tank en Buishand, 1995]. Deze kans wordt in sterke mate bepaald door de luchtdruk. Daarnaast hangt ze ook af van de zonne-straling en de vochtigheid. Bij een afname van de luchtdruk wordt de neerslagkans groter en zal dus het aantal natte dagen moeten toenemen. Dit kan bewerkstelligd worden door droge dagen met een relatief hoge neerslagkans in natte dagen te veranderen. De neerslaghoeveelheden op deze nieuwe natte dagen kunnen uit een exponentiële verdeling gegenereerd worden waarvan het gemiddelde wordt ontleend aan het verband in afbeelding 4. Op analoge wijze kunnen bij een toename van de luchtdruk natte dagen in droge dagen veranderd worden.

Voorbeeld KNMI-scenario's

Met de KNMI-methode, zijn uit de historische reeks dagwaarden van De Bilt (1961-1990) twee klimaatscenario's geconstrueerd: één voor Scenario 1 en één voor Scenario 2. De seizoengemiddelde veranderingen in de temperatuur en de luchtdruk (Tabel II) zijn afgeleid uit de voorspellingen voor West-Europa in een 10-jaar $2 \times \text{CO}_2$ simulatie run met het eerder besproken GCM van het Canadese Klimaatcentrum. De scenario's zijn daarmee representatief voor het klimaat zoals dit in het midden van de volgende eeuw kan optreden. In afbeelding 5 zijn, ter illustratie, voor één enkele maand de waargenomen neerslaghoeveelheden en de getransformeerde neerslaghoeveelheden voor de Scenario's 1 en 2 gegeven. De afbeeldingen laten zien dat de factoren F_1 en F_2 van dag op dag kunnen variëren. Verder kan worden opgemerkt dat in Scenario 2 twee droge dagen voorkomen die in de oorspronkelijke reeks nat waren. De grootste neerslagverandering in de scenario's vindt plaats in de winter (+20% en +44% respectievelijk voor Scenario 1 en 2) en de kleinste in de herfst (+5% voor Scenario 1) of de zomer (+8% voor Scenario 2). Op individuele dagen varieert de neerslagverandering van een afname met $\approx 10\%$ voor een aantal zomerdagen tot een toename boven de 80%. Een dergelijke forse toename beperkt zich tot winterdagen in Scenario 2 met een relatief lage neerslag-

TABEL II - Seizoengemiddelde veranderingen in temperatuur T en luchtdruk P zoals voorspeld voor West-Europa door een $2 \times \text{CO}_2$ simulatie run met het GCM van het Canadese Klimaatcentrum [McFarlane et al., 1992; Boer et al., 1992]. Deze veranderingen zijn gebruikt in het praktijkvoorbeeld met de neerslag-scenario's volgens de KNMI-methode.

	Winter	Lente	Zomer	Herfst
ΔT (°C)	+3,0	+2,3	+3,7	+3,4
ΔP (hPa)	-3,4	-1,1	+0,3	-0,1



Afb. 5 - Waargenomen neerslaghoeveelheden in De Bilt in juli 1962 en de getransformeerde neerslaghoeveelheden voor de Scenario's 1 en 2. Door de verschillen in de temperatuur (en bij Scenario 2 ook de luchtdruk) is de waargenomen neerslaghoeveelheid op achtereenvolgende dagen niet met dezelfde factor vermenigvuldigd.

hoeveelheid (< 5 mm) en zomerdagen bij hoge luchtdruk. De effecten van de temperatuur en (in geringere mate) de luchtdruk op de neerslag zorgen er voor dat vooral in de winter extreme neerslaghoeveelheden aanmerkelijk vaker voorkomen dan op grond van de historische reeks mag worden verwacht. Zo wordt in de scenario's op 8% van alle winterdagen de drempel van 10 mm neerslag overschreden. In het huidige klimaat gebeurt dit slechts op 5% van alle winterdagen. Het Canadese GCM geeft voor de twee roosterpunten die Nederland bedekken ook een sterke toename in de gemiddelde winterneerslag (+28%). In tegenstelling tot de scenario's is voor de zomer in het GCM sprake van een sterke afname van de neerslag (-26%). Zoals gezegd zijn de GCM-voorspelde seizoengemiddelde neerslagveranderingen voor zo'n klein gebied erg onbetrouwbaar. Dit neemt niet weg dat mogelijke veranderingen in de bewolking, de straling en de vochtigheid die (nog) niet expliciet in onze scenario's zijn meegenomen, wel degelijk kunnen leiden tot verdroging in de zomer. Een scenario voor een dergelijke situatie verdient nadere aandacht.

Conclusies

Uit het bovenstaande kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De huidige generatie GCM's zijn over het algemeen redelijk goed in staat de waargenomen regionale seizoengemiddelde temperatuur- en luchtdrukverdeling te simuleren. Op grond hiervan is het vertrouwen in de gesimuleerde toekomstige klimaatveranderingen voor deze kenmerken het grootst. Het vertrouwen in GCM-voorspellingen van veranderingen van de variabiliteit op korte tijdschalen is minimaal.

- Het is zeer twijfelachtig of regionale GCM-voorspellingen voor de seizoengemiddelde

neerslag mogen worden toegepast op hogere resolutie data (bijvoorbeeld dagwaarden voor stations) in impact-studies. Voor elementen met een relatief geringe ruimtelijke variatie (bijvoorbeeld temperatuur en luchtdruk) is een simpele transformatie gebruikmakend van voorspellingen van seizoengemiddelde veranderingen voor de dichtstbijzijnde roosterpunten in een GCM minder bezwaarlijk.

- Afhankelijk van de impact-studie waarvoor ze worden gebruikt, kleven er bezwaren aan de verschillende methodes die in de loop der tijd zijn ontwikkeld om GCM-voorspellingen te 'vertalen' naar meteorologisch consistente data met de juiste tijd- en ruimte-schaal voor impact-studies. De door het KNMI ontwikkelde techniek, waarbij waarnemingsreeksen van meteorologische stations worden getransformeerd naar reeksen die representatief zijn voor een mogelijk toekomstig klimaat, ondervangt een aantal van deze bezwaren. Zij is in eerste instantie gericht op hydrologische studies met een beperkt ruimtelijk domein (≈ 10 km) en een hoge tijdsresolutie (dagwaarden).

- De grootschalige seizoengemiddelde veranderingen in temperatuur en luchtdruk zoals voorspeld door een $2 \times \text{CO}_2$ simulatie run met een Canadees GCM leiden in een scenario volgens de KNMI-methode tot een toename van de neerslag in De Bilt over alle seizoenen met een maximum van 20-44% in de wintermaanden. Extreme neerslaghoeveelheden (bijv. aantal dagen met neerslag ≥ 10 mm) komen aanmerkelijk vaker voor dan mag worden verwacht op grond van de historische reeks.

Literatuur

BAHC Core Project Office (Ed.) (1994). *Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle (BAHC), Focus 4: The Weather Generator Project*. Report No. 4, Karlsruhe, Germany, 25-28 June 1994.

- Boer, G. J., McFarlane, N. A. and Lazare, M. (1992). *Greenhouse gas-induced climate change simulated with the CCC second-generation general circulation model*. *J. Climate*, 5, 1045-1077.
- Buishand, T. A. and Klein Tank, A. M. G. (1996). *Regression model for generating time series of daily precipitation amounts for climate change impact studies*. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 10, 87-106.
- Buishand, T. A., Mourik, B. van and Klein Tank, A. M. G. (1993). *The effect of spatial averaging on threshold exceedances of daily precipitation amounts*. KNMI Technical Report TR-154, De Bilt.
- Bultot, F., Gellens, D., Spreafico, M. and Schädler, B. (1992). *Repercussions of a CO₂ doubling on the water balance - a case study in Switzerland*. *J. Hydrol.*, 137, 199-208.
- Dickinson, R.E., (1995). *Land processes in climate models*. *Remote Sensing of the Environment*, 51, 27-38.
- Gao, X. and Sorooshian, S. (1994). *A stochastic precipitation disaggregation scheme for GCM applications*. *J. Climate*, 7, 238-247.
- Giorgi, F. and Mearns, L. O. (1991). *Approaches to the simulation of regional climate change: A review*. *Rev. of Geophys.*, 29, 191-216.
- Giorgi, F., Brodeur, C. S. and Bates, G. T. (1994). *Regional climate change scenarios over the United States produced with a nested regional climate model*. *J. Climate*, 7, 375-399.
- Henderson-Sellers, A., Yang, Z.-L. and Dickinson, R. E. (1993). *The project for intercomparison of land-surface parameterization schemes*. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 74, 1335-1349.
- Henderson-Sellers, A., Pitman, A. J., Love, P. K., Irannejad, P. and Chen, T. H. (1995). *The project for intercomparison of land-surface parameterization schemes (PILPS): phases 2 and 3*. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 76, 489-503.
- Klein Tank, A. M. G. and Buishand, T. A. (1995). *Transformation of precipitation time series for climate change impact studies*. KNMI Scientific Report WR 95-01, De Bilt.
- Matyasovszky, I., Bogardi, I., Bárdossy, A. and Duckstein, L. (1993). *Space-time precipitation reflecting climate change*. *Hydrol. Sci. J.*, 38, 539-558.
- McFarlane, N. A., Boer, G. J., Blanchet, J.-P. and Lazare, M. (1992). *The Canadian Climate Centre second-generation general circulation model and its equilibrium climate*. *J. Climate*, 5, 1013-1044.
- Miller, J. R., Russell, G. L. and Caliri, G. (1994). *Continental-scale river flow in climate models*. *J. Climate*, 7, 914-928.
- Panagoulia, D., (1992). *Impacts of GISS-modelled climate changes on catchment hydrology*. *Hydrol. Sci. J.*, 37, 141-163.