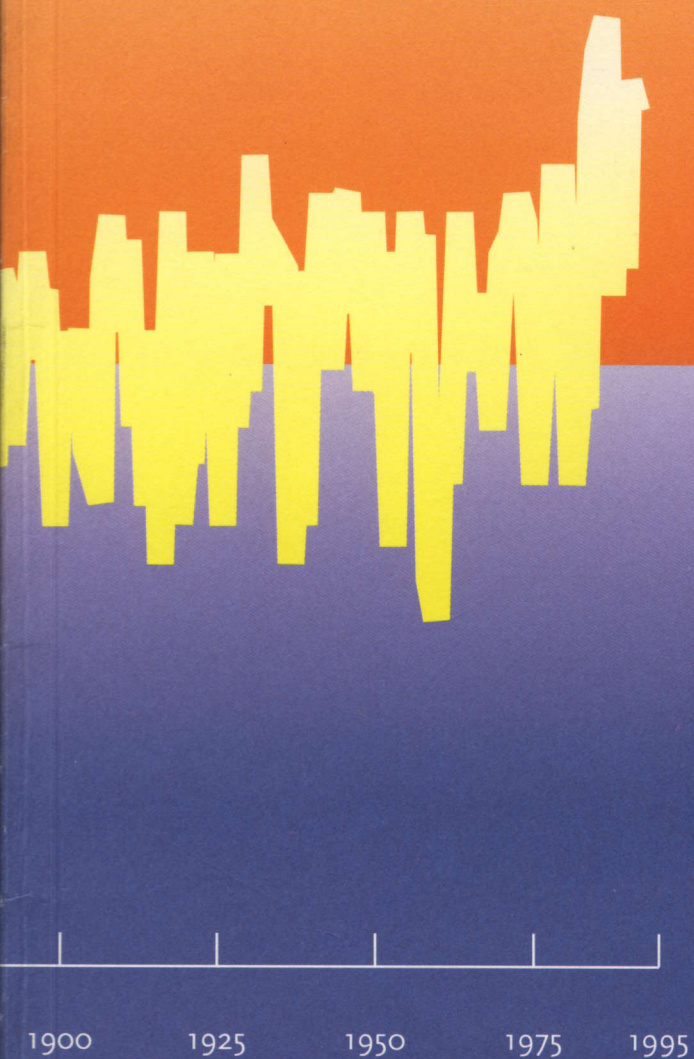


• • • •



De toestand van het klimaat in Nederland 1996



Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut

De toestand van het klimaat in Nederland 1996

Samenvatting

1. Waargenomen schommelingen in het Nederlandse klimaat van deze eeuw

- 1.1 Temperatuur en windrichting 7
- 1.2 Windsnelheid en stormen 10
- 1.3 Golven en waterstanden op de zuidelijke Noordzee 11
- 1.4 Bewolking en zonneschijn 13
- 1.5 Neerslaghoeveelheid 14
- 1.6 Droogte in de zomer 15
- 1.7 Onweer 17
- 1.8 Is het klimaat veranderd? 17

2. Klimaatvoorspellingen

- 2.1 Het modelleren van het klimaatsysteem 20
- 2.2 De voorspelbaarheid van het klimaat 22
- 2.3 Toekomstige veranderingen in het mondiale klimaat 23
- 2.4 Een mogelijk toekomstig klimaat in Nederland 27

Voorwoord

Voor u ligt de tweede KNMI-rapportage over de toestand van het klimaat in Nederland. Deze rapportage is een vervolg op "De toestand van het klimaat en van de ozonlaag in Nederland" uit maart 1993. Reden om deze rapportages uit te brengen is de sterk levende zorg over verandering van het klimaat als gevolg van menselijk handelen. De kwetsbaarheid van het klimaat vereist bewaking.

De directe aanleiding om nu de tweede rapportage uit te brengen is het verschijnen van het Tweede Integrale IPCC-rapport over Klimaatverandering. Dit gezaghebbende en internationaal gedragen rapport concludeert dat de menselijke invloed thans naar alle waarschijnlijkheid reeds zichtbaar is geworden in het wereldklimaat en verwacht dat de verandering versneld door zal gaan. De voorliggende rapportage beoogt een brug te slaan tussen voorspellingen van het wereldklimaat en de toekomst van het Nederlandse klimaat.

Kennis over de toekomst vereist kennis van het verleden. Deze rapportage plaatst de waargenomen klimaatschommelingen van de twintigste eeuw en de anomalieën van het laatste decennium in elkaars perspectief. Het zorgvuldig bijgehouden KNMI-archief maakt het mogelijk om op vrijwel alle onderdelen een gedetailleerd beeld te verschaffen van het Nederlandse klimaat vanaf de eeuwwisseling tot en met de recente winter.

De IPCC-conclusies laten zich niet meteen vertalen naar de concrete Nederlandse situatie. Maar dat ook ons klimaat zal veranderen is evident. Deze rapportage brengt door samenbundeling van kennis over klimaatkenmerken en fundamenteel voorspelbaarheidsonderzoek de marges in kaart waarbinnen uitspraken mogelijk zijn en presenteert de uitkomst in de vorm van een schets van een mogelijke realisatie van het toekomstige klimaat in Nederland. Het beeld dat opdoemt is nog wazig, maar zal gaandeweg verhelderen naarmate ons inzicht toeneemt en puzzelstukken op hun plaats vallen.

In tegenstelling tot de vorige klimaatrapportage vindt u in deze rapportage geen uitspraken over ozon en ultraviolette straling. Dit KNMI-aandachtspunt vormt het onderwerp van een aparte rapportagereeks.

Dr H.M. Fijnaut, Directeur KNMI

Samenvatting

Klimaatdiagnose Waarnemingen van het Nederlandse klimaat over de laatste honderd jaar geven aan dat het temperatuurklimaat zowel jaar-op-jaar fluctuaties als trage fluctuaties kent. In samenhang met temperatuur variëren ook neerslaghoeveelheid, bewolking, windrichting en stormfrequenties, hoewel meer versluierd door hun hogere jaar-op-jaar variabiliteit.

Statistisch onderzoek leert dat een aantal onderdelen van het Nederlandse klimaat het afgelopen decennium significant afweek van hun gemiddelden. Dit geldt vooral voor de winter-temperatuur en in samenhang daarmee vertonen ook winterneerslag en windrichting afwijkingen. In het windsnelheidsklimaat en het stormklimaat zijn geen trends zichtbaar. Deze laatste conclusie wordt bevestigd door waarnemingen van het golfklimaat op de Noordzee en door waarnemingen van opstuwing van de zee aan de Nederlandse kust.

Onderzoek toont aan dat de abnormaal hoge temperatuur van het afgelopen decennium in belangrijke mate verklaard wordt uit het optreden van een abnormale verdeling van atmosferische circulatiepatronen boven Nederland. Deze afwijkende verdeling blijkt veroorzaakt door een anomale versterking van het IJslandse lagedrukgebied in de winter, gepaard gaand met een afwijkende temperatuurverdeling over het oceaanooppervlak. Eerder deze eeuw deed zich een analoge situatie voor, maar de anomale versterking van het IJslandse lagedrukgebied was toen minder groot. Daar niet bekend is of het versterkte broeikaseffect van invloed is op het optreden van dit verschijnsel, ontbreekt de wetenschappelijke grond om de abnormaal hoge temperatuur van het afgelopen decennium aan het versterkte broeikaseffect toe te schrijven. Wereldwijd gemiddeld is de temperatuur in deze eeuw gestegen. Deze stijging is aanzienlijk

geringer dan de Nederlandse temperatuuroptename van het laatste decennium, maar is onmiskenbaar aanwezig. Het IPCC acht het onwaarschijnlijk dat de wereldtemperatuurstijging alleen door natuurlijke veranderingen kan zijn veroorzaakt.

Klimaatvoorspellingen

Het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) geeft voor halverwege de volgende eeuw een toename aan van 0,5-2 graden in de wereldgemiddelde temperatuur en een toename van enkele procenten in de wereldgemiddelde neerslag, waarbij de veranderingen het grootst zijn boven continenten op hoge breedten in het winterseizoen. Een nadere uitwerking van deze gegevens naar de Nederlandse situatie vereist informatie over toekomstige veranderingen in de frequentieverdeling van atmosferische circulatiepatronen rond Nederland. Deze informatie ontbreekt. Fundamenteel onderzoek naar de eigenschappen van luchtstromingen geeft aan dat regionale klimaataspecten van dit type in de praktijk onvoorspelbaar zouden kunnen blijken. Dit komt voort uit het feit dat het klimaatstelsel nooit met oneindige precisie kan worden gemodelleerd.

Bij projectie van de huidige interne samenhang van klimaatonderdelen op de toekomst, kan uit de IPCC-voorspellingen een meteorologisch consistent beeld van een mogelijke realisatie van het klimaat in Nederland worden afgeleid dat behoort bij een bepaalde toestand van de atmosferische circulatiepatronen. Indien als *sleutelaanname* de veronderstelling wordt geïntroduceerd dat *de frequentieverdeling van de circulatiepatronen zich niet wijzigt* bij versterking van het broeikaseffect, is het beeld voor 2050 als volgt:

- De temperatuuroptename zal circa 0,5-2 graden zijn en is daarmee merkbaar aanwezig in het aanhoudend wisselvallige Nederlandse weer. In dit variabele weer blijven hittegolven een zeldzaam verschijnsel. De strengste winters zijn iets minder extreem koud en kunnen zich minder ver in het vroege voorjaar voortzetten.
- De jaarlijkse neerslaghoeveelheid zal met enkele procenten toegenomen zijn. De toename concentreert zich in het winterseizoen. Situaties met langdurige hevige winterneerslag leveren 5-20% meer neerslag op per regendag. Zware zomerbuien zijn heviger. Hun maximale neerslagintensiteit is 5-20% hoger.
- Stormfrequenties, windrichtingsfrequenties, de frequenties van droogteperioden of van neerslagsituaties zijn zo direct gerelateerd aan de sleutelaanname dat hiervoor binnen deze aanname geen zinvol toekomstbeeld kan worden geschetst.

Bovenstaand mogelijk weerbeeld voor 2050 leunt zwaar op de sleutelaanname. Onderbouwing van deze aanname ontbreekt. Diagnostiek van het klimaat wijst uit dat het variabele Nederlandse weer op al zijn onderdelen hoogst gevoelig is voor veranderingen in atmosferische circulatie. Een al dan niet onderbouwde andere sleutelaanname leidt derhalve tot een drastisch afwijkend toekomstig weerbeeld.



1 Waargenomen schommelingen in het Nederlandse klimaat van deze eeuw

De wetenschap dat het klimaat varieert en zich naar een andere toestand kan bewegen, is een reden om te onderzoeken of in het Nederlandse klimaat systematische wijzigingen te ontdekken zijn. In dit hoofdstuk wordt dit gedaan door het analyseren van meetreeksen.

Het klimaat van een plaats of gebied wordt beschreven door de gemiddelde waarden, en de dag-op-dag en jaar-op-jaar variaties, van temperatuur, vocht, luchtdruk, wind, bewolking en neerslag. Voorts door gegevens over frequenties van bijvoorbeeld onweer en hagel. Meteorologische instituten leggen deze grootheden al anderhalve eeuw vast. De metingen worden mede gebruikt om lange tijdreeksen samen te stellen. Deze reeksen vormen de basis voor een uitspraak over een al dan niet veranderend klimaat. In een intensief bewoond land als Nederland is de opbouw van lange, betrouwbare meetreeksen echter uiterst moeilijk. Regelmatig moeten meetstations verplaatst worden ten gevolge van veranderingen in de onmiddellijke omgeving, zoals inpoldering of toenemende verstedelijking. Hierdoor ontstaat een overgang in een meetreeks, die, als er geen correctie mogelijk is, de reeks inhomogeen maakt en dus ongeschikt voor trendonderzoek. Homogene meetreeksen zijn maar zelden langer dan honderd jaar.

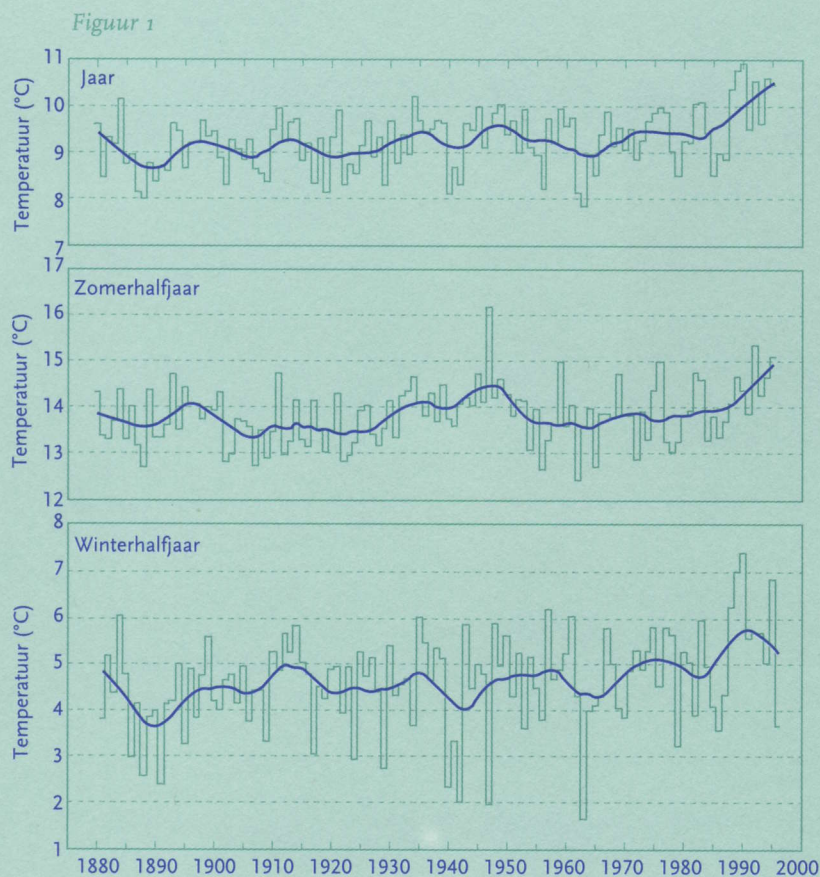
Het weer in de landen van Noordwest-Europa wordt slechts in beperkte mate bepaald door lokale processen zoals instraling van zonnewarmte. Veel belangrijker is de aanvoer van koude of warme (c.q. droge of vochtige) lucht uit andere streken. Voor Nederland is de ligging bij de westrand van een continent zeer bepalend. Omdat aanvoer van zee's zomers tot een afkoelend effect leidt, maar 's winters tot tempering van de kou, worden in dit hoofdstuk bij de meteorologische meetreeksen naast de jaarwaarden, ook de waarden voor de periode van 1 april tot



1 oktober en voor de periode van 1 oktober tot 1 april gepresenteerd. Gemakshalve zullen we daarbij vaak over respectievelijk de zomer en de winter spreken, hoewel de werkelijke meteorologische seizoenen uiteraard geen zes maar drie maanden omvatten. Het jaarnummer van een winter correspondeert met dat van de tweede helft van het winterseizoen, zodat bijvoorbeeld de winter 1947 betrekking heeft op het tijdvak 1 oktober 1946 tot 1 april 1947. De grafieken van jaar- en zomerwaarden zijn gegeven tot en met 1995, bij de wintergrafieken is de winter van 1996 ook meegenomen.

1.1 Temperatuur en windrichting

Figuur 1 laat het verloop van de temperatuur te De Bilt zien gedurende de laatste eeuw. De variaties van jaar op jaar in het temperatuurverloop zijn opvallend. Met name opeenvolgende winters kunnen sterk verschillen. Soms waren er lange reeksen van jaren met afwijkende seizoentemperatuur: de koude winters rond 1890 of de

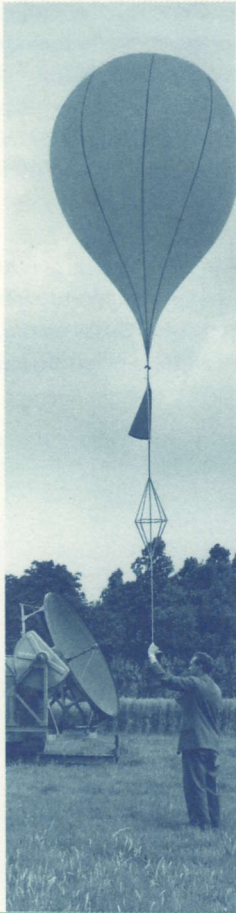


Figuur 1

Temperaturen te De Bilt (1880-1995/96), gemiddeld over het kalenderjaar, het zomer- en het winterhalfjaar. De zomer wordt in dit rapport beschouwd als durende van april tot en met september; de winter van oktober van het vorige jaar tot en met maart van het aan-gegeven jaar. De golvende lijn geeft een voortschrijdend gewogen gemiddelde van de 15 dichtstbijzijnde jaren. In de volgende figuren is een aldus berekende lijn ook getrokken.

vele warme zomers tussen 1930 en 1950. In de lijnen die het lopend langjarig gemiddelde weergeven, leiden zulke aaneenschakelingen tot maxima of minima. Bij het begin- en eindpunt van het lopend langjarig gemiddelde weegt het eerste respectievelijk laatste jaar relatief zwaar mee. De neerwaartse trend sinds 1990 in het lopend gemiddelde van de wintertemperatuur is uitsluitend veroorzaakt doordat de winter van 1996 is meegenomen: zonder deze winter loopt het gemiddelde omhoog.

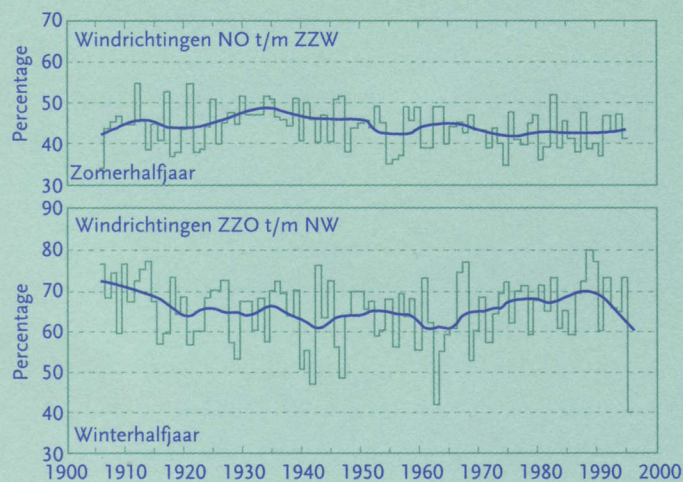
De jaar-op-jaar grilligheid van het Nederlandse temperatuurverloop vindt zijn bron in de steeds wisselende posities van lage- en hogedrukgebieden om ons heen. Deze positiewisselingen zorgen ervoor dat soms lucht uit warme streken wordt aangevoerd en dan weer lucht uit koude oorden. Dergelijke omstandigheden kunnen wekenlang aanhouden. De seizoengemiddelde



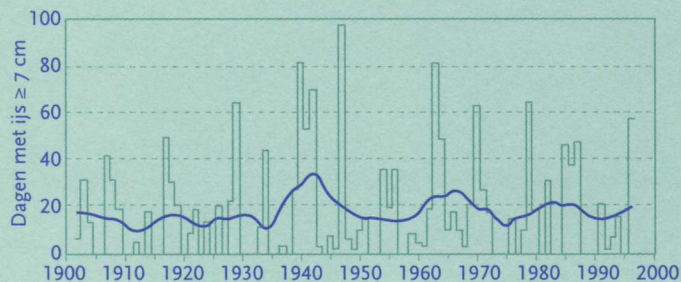
posities van druksystemen kunnen bovendien gedurende vele jaren systematisch afwijken ten opzichte van hun gebruikelijke posities. Dit leidt dan tot jarenlange systematische veranderingen in de verdeling van windrichtingen, zoals te zien is in *figuur 2*. Voor zowel zomer als winter is het optreden van de windrichtingen getoond die de grootste kans bieden op aanvoer van warme lucht. De overeenstemming van de individuele pieken en dalen in de windrichtingverdelingen (*figuur 2*) met de pieken en dalen in het temperatuurverloop (*figuur 1*) is duidelijk, met name in het winterhalfjaar.

Nadere beschouwing leert dat de temperatuur van ieder jaar in goede benadering berekend kan worden uit de gemiddelde eigenschappen van de verschillende luchtmassa's en het aantal dagen dat deze massa's in dat jaar ons land bereiken. Dit geeft aan dat het overgrote deel van de temperatuurfluctuaties inderdaad wordt veroorzaakt door wisseling van luchttransport.

Figuur 2



Figuur 3



Figuur 2

Frequentie van windrichtingen te De Bilt (1906-1995/96). Per halfjaar wordt de 180 graden sector met de gemiddeld warmste aanvoer gepresenteerd, dus 's zomers met een zuidoostelijke windcomponent en 's winters met een zuidwestelijke.

Figuur 3

Aantal dagen met ijsdek van minstens 7 centimeter, berekend per winterhalfjaar voor een stilstaand water van 2 meter diep uit meteorologische gegevens voor De Bilt (1902-1996).

Van speciaal belang voor allerlei menselijke activiteit is het optreden van strenge winters. De befaamde winters van 1940, 1942, 1947 en 1963 zijn in *figuur 1* opvallend aanwezig. Een nuttige maat voor de strengheid van het winterweer, zowel relevant voor scheepvaarthinder als voor de schaatssport, is het aantal dagen met bedekking door ijs. Voor de grote rivieren is de ijsbedekking in het verleden goed bekend, maar die wordt sterk beïnvloed door het weer in het stroomgebied in Frankrijk en Duitsland en na de veertiger jaren door warmwaterlozingen. Voor Nederlandse kanalen en meren zijn er weinig historische gegevens. Het is echter wel mogelijk de ijsdikte af te leiden uit gewone meteorologische gegevens als temperatuur, bewolking en wind. Meer nog dan de reeks van wintertemperaturen toont de reeks van dagen met

De recente temperatuurstijging

Alle in dit rapport getoonde temperatuurgrafieken laten voor de afgelopen tien jaar een stijging zien. Een aantal Nederlandse winters is ongekend zacht geweest en ook de zomers waren aan de warme kant, hoewel nog niet vergelijkbaar met de recordhitte van 1947. Veel andere West-Europese stations laten een vergelijkbaar beeld zien. De directe oorzaak van de stijging gedurende het afgelopen decennium is niet zozeer een wereldwijde opwarming door het broeikaseffect, maar eerder het feit dat ons weer de afgelopen jaren vaak gekenmerkt werd door luchtaanvoer vanuit warmere streken. De lucht uit koelere gebieden stroomde dus ergens anders naar toe, en inderdaad was het 's winters de afgelopen tien jaar in Zuidoost-Europa aan de koele kant.

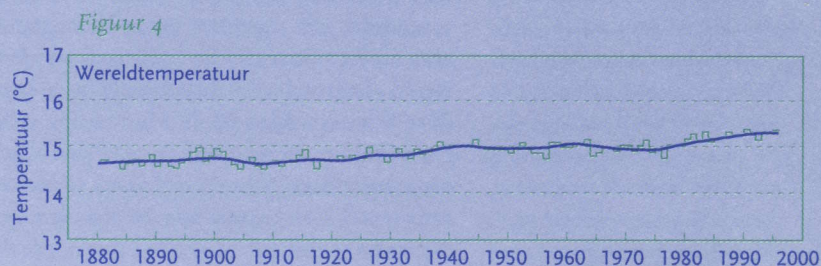
De oorzaak van de veranderende voorkeursposities van de druksystemen wordt gezocht in de zogeheten Noord-Atlantische oscillatie. Dit is een verschijnsel waarbij het IJslandse lagedrukgebied in de winter zich zonder aanwijsbare oorzaak versterkt, hetgeen gepaard gaat met een afwijkende temperatuurverdeling van het oceaanoppervlak, met onder meer relatief koud water ten zuidwesten van Groenland. De versterking van het IJslandse lagedrukgebied veroorzaakt bij ons een grotere kans op westelijke stroming en dus op zachte winters. Het versterkte IJslandse lagedrukgebied kan zich soms jaren handhaven voordat de normale toestand terugkeert. Eerder deze eeuw deed dit zich rond 1910 voor, maar het laatste decennium is het in heviger mate teruggekomen. Zowel in het wintertemperatuurverloop als in de windrichtingen (zie figuur 2) zijn deze twee gebeurtenissen goed waarneembaar.

Figuur 1 laat zien dat de zes warmste jaren van deze eeuw alle vielen in het meest recente tijdvak van 1988-1995. Als de jaar-op-jaar temperatuurschommelingen slechts door het toeval bepaald zouden zijn, zou een dergelijke samenklontering hoogst zeldzaam zijn en in een temperatuurreeks

van 116 jaar eigenlijk niet voor mogen komen. Het bestaan van trage en langdurig aanhoudende fluctuaties in het temperatuurklimaat plaatst deze gebeurtenis in een ander daglicht. De hevigheid van de Noord-Atlantische oscillatie in het afgelopen decennium maakte de omstandigheden ongewoon gunstig voor het breken van temperatuurrecords. Het is niet bekend hoe lang deze situatie nog zal voortduren.

Het is mogelijk dat de recente Nederlandse temperatuurstijging niet alleen door gewijzigde luchtaanvoer, maar ook door een stijging van de grootschalig-gemiddelde temperatuur wordt veroorzaakt. Bij de wereldwijd-gemiddelde temperatuur is inderdaad sprake van een duidelijke stijging (figuur 4), ofschoon die veel kleiner is dan die in Nederland. Het grootste deel van de stijging van de wereldtemperatuur over de laatste eeuw kan aan natuurlijke variaties worden toegeschreven, zoals de stijging gedurende de jaren dertig. Het wordt echter aannemelijk geacht dat de stijging van $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ na 1970 mede veroorzaakt is door het versneld toenemen van broeikasgasconcentraties. Op dit moment is nog niet duidelijk hoeveel die factor precies heeft bijgedragen. Omdat een toename van enkele tiende graden in het niet valt bij de jaar-op-jaar grilligheid van het Nederlandse temperatuurklimaat, is de mondiale temperatuurverhoging niet groot genoeg om de recente temperatuurstijging in Nederland te verklaren.

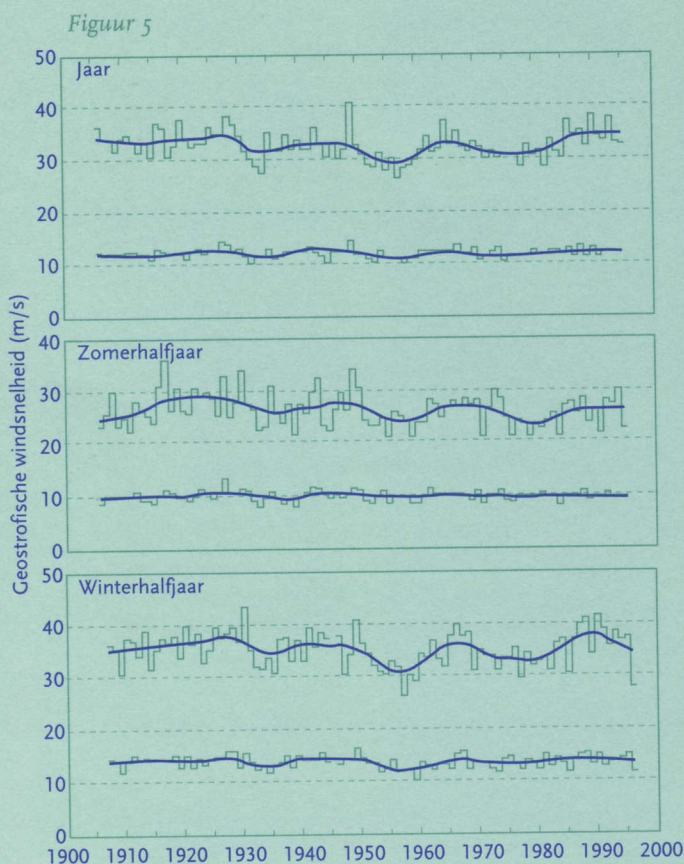
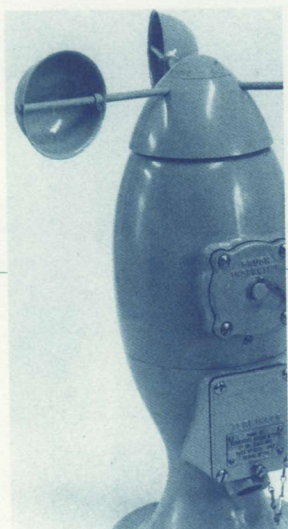
In theorie is het denkbaar dat het versterken van het broeikaseffect, via beïnvloeding van de Noord-Atlantische oscillatie of via een ander mechanisme, afwijkingen in de atmosferische circulatiepatronen teweeg brengt die tot extra temperatuurstijging in Nederland leiden. Daar echter het bestaan van een dergelijk verband tussen mondiale opwarming en atmosferische circulatie niet aangetoond kan worden, ontbreekt de wetenschappelijke grond om de recente temperatuurstijging in Nederland aan het versterkte broeikaseffect toe te schrijven.



Figuur 4
Wereldgemiddelde jaartemperatuur
(1880-1995) (Bron: IPCC 1995)

ijsbedekking (figuur 3) hoe grillig strenge winters over een eeuw verdeeld zijn. Zelfs in de relatief warme periode tussen 1930 en 1950 kwamen ze nog veel voor en ook de huidige nog warmere periode kende recentelijk (1996) een koude winter, zodat we ook bij de huidige stijgende jaartemperatuur nog niet mogen concluderen dat strenge winters tot het verleden behoren.

1.2 Windsnelheid en stormen De laatste tijd verschenen er berichten in de media dat stormen in aantal en hevigheid zouden zijn toegenomen. Deze berichten zijn in veel gevallen gebaseerd op het toegenomen aantal stormschadeclaims bij verzekeringsmaatschappijen. Het IPCC-rapport concludeert echter dat op grond van meteorologische gegevens geen systematische toename in stormactiviteit is vast te stellen.



Figuur 5

Gemiddelde (onderste krommen) en extreme (bovenste krommen) geostrofische windsnelheden in Nederland, berekend uit de uurlijkse luchtdrukverschillen tussen stations in of nabij Groningen, Den Helder en De Bilt (1906-1995/96). De geostrofische windsnelheid is gemiddeld ongeveer twee keer zo groot als de windsnelheid op de normale waarnemingshoogte van 10 meter. De bovenste krommen geven de windsnelheid die in 1% van de uren wordt overschreden.

Om te onderzoeken of het wind- of stormklimaat in Nederland wellicht toch systematisch is veranderd, zijn meerdere lange homogene reeksen van windmetingen nodig. Zulke reeksen zijn echter zeldzaam. De metingen worden namelijk sterk beïnvloed door - in de tijd veranderende - begroeiing en bebouwing in de omgeving van de windmeters. De exacte invloed van deze veranderingen op de windmeting is meestal onbekend. Een alternatieve mogelijkheid om het windklimaat over een langere periode in beeld te brengen, is gebruik te maken van luchtdrukverschillen. Van de luchtdruk bestaan namelijk wel lange homogene reeksen en uit luchtdrukverschillen tussen drie stations kan een benaderde windsnelheid berekend worden zoals die op enige hoogte boven het aardoppervlak waait. De op deze wijze berekende wind wordt de

geostrofische wind genoemd. Zijn snelheid is gemiddeld ongeveer twee keer zo groot als de windsnelheid bij de grond, waar de luchtstroom door wrijving is afgeremd.

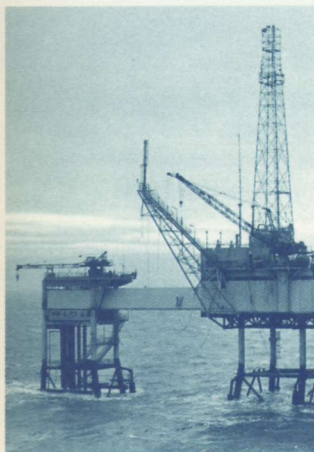
De resultaten voor de geostrofische windsnelheid tonen dat er deze eeuw geen sprake is geweest van een systematische toe- of afname. Dit blijkt uit **figuur 5**. Naast het langjarig verloop van de gemiddelde windsnelheid is hierin het verloop van een vrij willekeurig gedefinieerde extreme geostrofische windsnelheid weergegeven, namelijk van de uurlijkse windsnelheid die gedurende slechts ongeveer 1% van de uren overschreden wordt. De hoogte van die extreme windsnelheid wordt in sterke mate bepaald door het aantal en de sterkte van langdurige zware stormen. Enkele beruchte stormen, zoals die van 1990, zijn zo hevig geweest dat ze de hoogte van een piek in de figuur vrijwel volledig hebben bepaald.

In de langjarig gemiddelden van windsnelheden wisselen perioden met hoge en minder hoge extreme windsnelheden elkaar met een zekere regelmaat af. Opvallend is dat de winter en de zomer vrijwel dezelfde pieken en dalen laten zien, al zijn in de winter de snelheden duidelijk hoger. **Figuur 5** laat zien dat het laatste minimum in het langjarig gemiddelde van extreme windsnelheden rond 1980 viel, waarna een stijging intrad die inmiddels tot staan lijkt gekomen. In de meest recente jaren waren extreme windsnelheden niet groter dan in de rest van de achter ons liggende eeuw. De extreme windsnelheden (stormen) laten dus wel grote fluctuaties zien, maar zeker geen trend. Hoewel dit resultaat op indirecte windgegevens berust, is de conclusie gerechtvaardigd dat ook de echte windsnelheidsklimaat en het echte stormklimaat geen aanwijsbare trends bevatten.

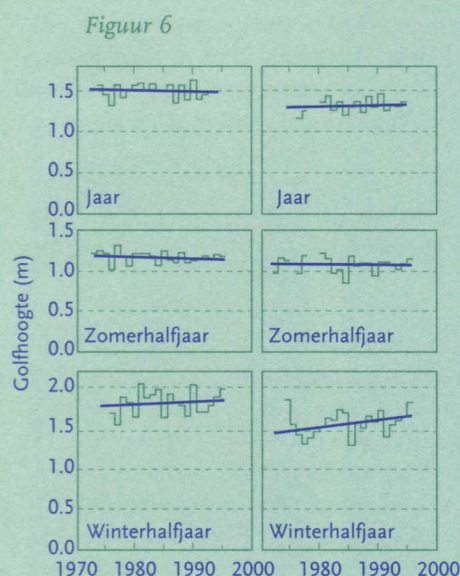
1.3 Golven en waterstanden op de zuidelijke Noordzee

De wind boven de Noordzee veroorzaakt golven en afwijkingen van de waterstanden. Variaties in deze grootheden hangen samen met variaties in het wind- en stormklimaat.

Vast staat dat tussen 1960 en 1990 de hoogte van de golven op de Atlantische Oceaan in de omgeving van Lands End aan de zuidwestpunt van Engeland aanwijsbaar is toegenomen. Dit geldt overigens niet voor de windsnelheid aldaar, zodat die hogere golven blijkbaar in een ander deel van de oceaan opgewekt zijn. Op de Noordzee komen golven doorgaans niet van zo heel ver, zodat de golfhoogte nauwer verband houdt met het windklimaat in het gebied zelf. Tot de jaren zeventig werden de hoogte en de lengte van golven uitsluitend met het oog geschat, hetgeen vrij onnauwkeurig is. Vanaf die tijd zijn systematische instrumentele metingen beschikbaar. Bij een golfmeting wordt het hoogteverschil tussen golftoppen en golfdalen van het wateroppervlak gemeten. De duur van een meting varieert tussen 15 en 30 minuten en omvat honderden toppen en dalen van golven met zeer uiteenlopende hoogte en lengte. Voor het eindresultaat van zo'n meting bepaalt men gemiddelde grootheden over het hoogste derde deel van de golven in de meting. Deze definitie sluit goed aan bij de praktijk van de visuele waarnemer, die immers ook vooral op de hogere golven let.

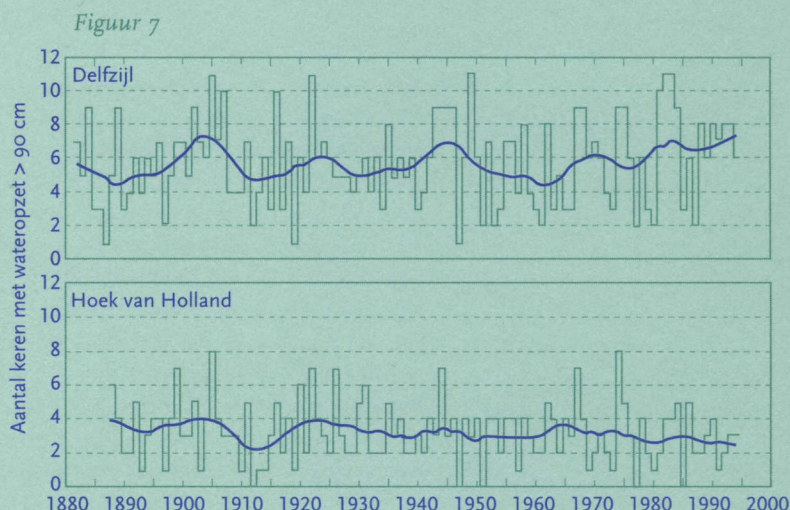


Figuur 6
Gemiddelde golfhoogten op twee posities in de Noordzee op het Nederlandse deel van het continentale plat (respectievelijk 1973-1995 en 1971-1995). Het meetpunt IJmuiden (rechts) is 35 km ten westen van de haven, het booreiland K13 (links) ligt 100 km ten westen van Texel in de open Noordzee.



De resultaten van de instrumentele golfmetingen van de afgelopen 25 jaar zijn in **figuur 6** getoond voor twee meetpunten in het Nederlandse deel van het continentale plat. Ze geven geen aanwijzing voor een duidelijke toename van de hoogte van de golven op de Noordzee. Met de analyse van zeewaterstandsgegevens kunnen wij veel verder teruggaan in de tijd dan bij golven. Uit langjarige metingen is bekend dat de jaargemiddelde zeewaterstand aan onze kust al meer dan anderhalve eeuw toeneemt met circa 20 centimeter per eeuw. Deze stijging hangt samen met de bodemdaling en met de toename in wereldgemiddelde temperatuur sinds halverwege de vorige eeuw, maar staat los van het windklimaat.

De actuele waterstand wordt wel bepaald door de wind. Als de wind boven de Noordzee naar ons land toe is gericht, wordt het zeewater langs de kust opgestuwd. Hierdoor valt de vloed hoger uit dan de getijdetafels aangeven. Het verschil tussen de waargenomen en de op astro-



Figuur 7
Aantal keren per winterhalfjaar dat een storm boven de Noordzee leidt tot een wateropzet boven 90 cm, bepaald uit waterstandsmetingen bij hoogwater te Delfzijl (1882-1994) en Hoek van Holland (1888-1994). De wateropzet bij hoogwater is de opgetreden verhoging van de zeewaterstand ten opzichte van de verwachte hoogte van de vloed bij afwezigheid van weersinvloeden. (Bron: J. Doekes, Rijkswaterstaat)

nomische gronden berekende waterstand wordt aangeduid met wateropzet. Omdat de wateropzet versneld stijgt bij toenemende windsnelheden, is de statistiek van wateropzetten zeer nauw verbonden met de statistiek van stormen in het zeegebied rond Nederland.

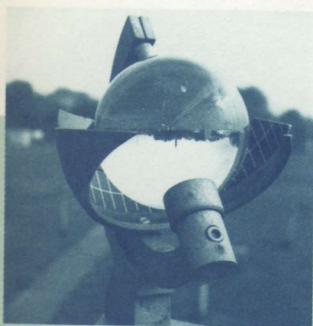
Figuur 7 geeft een beeld van de wateropzet in Delfzijl en Hoek van Holland. Aangegeven is hoe vaak er sprake was van meer dan 90 centimeter wateropzet tijdens stormen op de Noordzee. Opvallend zijn de grote variabiliteit en het feit dat desondanks de schommelingen in het langjarig gemiddelde vrijwel synchroon lopen met die van de extreme windsnelheden in **figuur 5**. Evenals de windsnelheid bevat ook de reeks van wateropzetten geen aanwijsbare langjarige trend.

1.4 Bewolking en zonneshijn

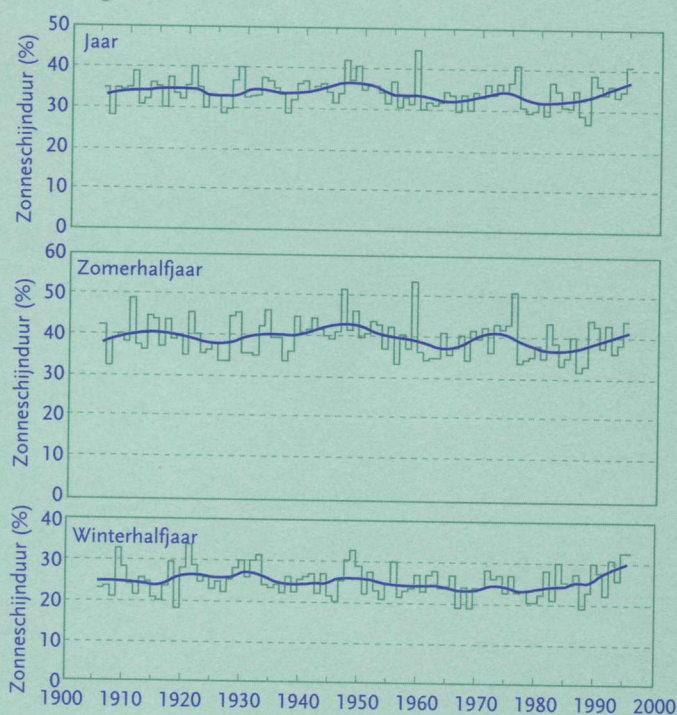
Het soort en de mate van bewolking zijn doorgaans visueel bepaald, zodat reeksen van deze waarnemingen zich niet lenen voor trend-

onderzoek. Om deze reden kan over wijzigingen in het soort bewolking geen uitspraak worden gedaan. Hetzelfde geldt voor mate van bewolking 's nachts. Van de zonneshijnduur zijn echter wel instrumentele reeksen beschikbaar. Deze metingen kunnen beschouwd worden als indirecte bepalingen van de mate van bewolking overdag.

De zonneshijnduur werd tot voor kort gemeten met een grote glazen bol die als een brandglas werkt als de zon schijnt. Door de beweging van de zon langs de hemel ontstaat dan een ingebrand spoor op een strook papier. De lengte van dit spoor bepaalt het aantal uren zonneshijn. Dit is ook een maat voor de (afwezigheid van) bewolking overdag. De laatste jaren wordt de zonneshijnduur uit de registratie van een stralingsmeter afgeleid, waarbij een optimale aanpassing aan de bestaande meetreeksen is nagestreefd.



Figuur 8



Het jaargemiddelde van de zonneshijnduur in Nederland bedraagt ongeveer 1500 uur. Omdat de gemiddelde daglengte in het zomerhalfjaar bijna twee keer zo groot is als in het winterhalfjaar, kunnen we de zonneshijnduur beter als percentage van de daglengte uitdrukken.

Het jaargemiddelde is dan ongeveer 34% en kan blijkens figuur 8 flink schommelen. Het zomergemiddelde van de relatieve zonneshijnduur is ongeveer 40% en het wintergemiddelde circa 25%. Door de grotere daglengte weegt de zomerzonneshijn sterk mee in het jaarpercentage. Hierdoor lopen de jaar-op-jaar fluctuaties in de zomer- en jaargrafiek vrijwel gelijk op. In de zomergrafiek zijn aaneenschakelingen van zonnige jaren te herkennen, zoals 1940-1955. Deze perioden vallen vaak samen met aaneenschakelingen van warme zomers van figuur 1.

In de wintergrafiek vertoont het langjarig gemiddelde minder schommelingen dan in de zomergrafiek. Van een systematische trend is in de tijdreeksen geen sprake.

Figuur 8

Instrumenteel bepaalde relatieve zonneshijnduur te De Bilt (1906-1995/96), in procenten van het voor de desbetreffende periode geldende theoretische maximum.

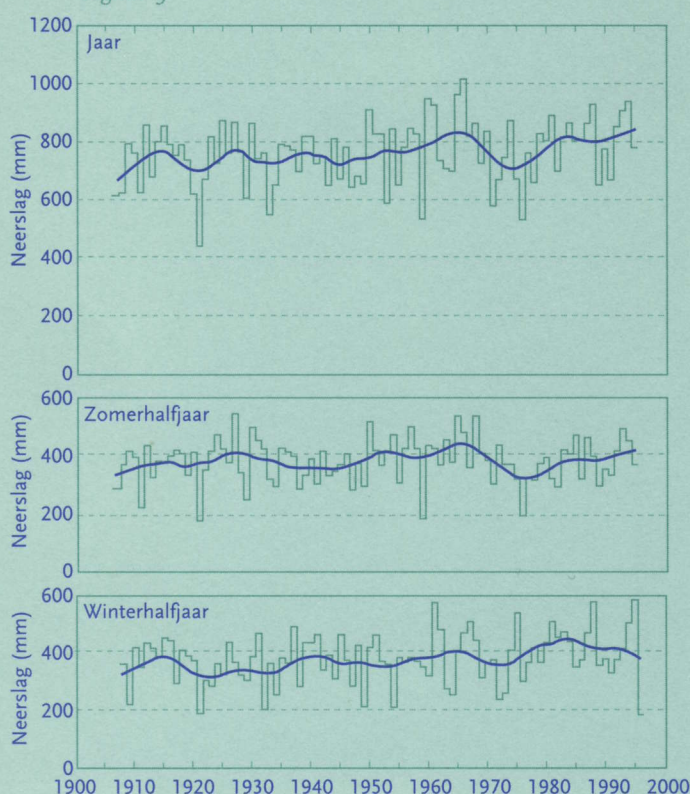
1.5 Neerslaghoeveelheid

Neerslag wordt gekenmerkt door een sterke variabiliteit. In Nederland valt in een nat jaar ongeveer twee keer zoveel neerslag als in een droog jaar. Door deze sterke variabiliteit zijn eventuele systematische veranderingen in neerslag niet makkelijk te detecteren.

Omdat veel lange meetreeksen van neerslag inhomogeen zijn ten gevolge van veranderingen in de meetopstellingen en het waarnemingsterrein, beperken we ons hier tot metingen met een gestandaardiseerde methode die in het begin van deze eeuw werd ingevoerd.

De enige relevante wijziging die zich bij deze methode heeft voltrokken, is een verandering in opstellingshoogte van de regenmeters in de periode direct na de Tweede Wereldoorlog. De metingen die gebruikt zijn voor dit rapport zijn hiervoor gecorrigeerd.

Figuur 9



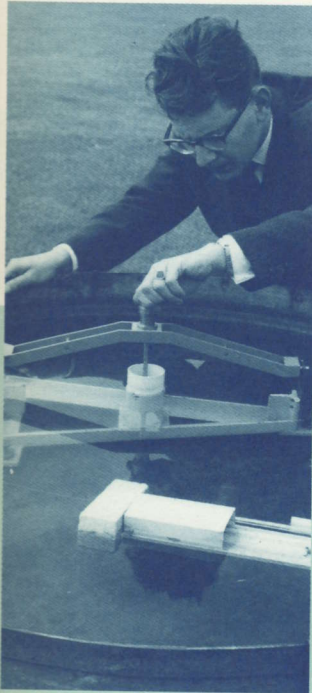
Figuur 9 laat de neerslaghoeveelheid in Nederland zien voor opeenvolgende jaren en seizoenen. Afwijkend blijken bijvoorbeeld de droge zomers van de jaren zeventig. Het meest opvallend is echter de toename van de winterneerslag na 1950 en vooral na 1975. Winterhalfjaren met meer dan 500 mm neerslag hebben zich alleen na 1960 voorgedaan. De langjarige afwijkingen in de winterneerslag ten opzichte van de gemiddelde neerslag in de winter zijn voor een deel gekoppeld aan de schommelingen in de temperatuur. Zachte winters zijn vaak neerslagrijk en dat zien we ook bij de recente zachte winters. Door de kleinere variabiliteit van de temperatuur zijn trends in het temperatuurverloop echter beter zichtbaar dan die in het begeleidende neerslagverloop.

Figuur 9

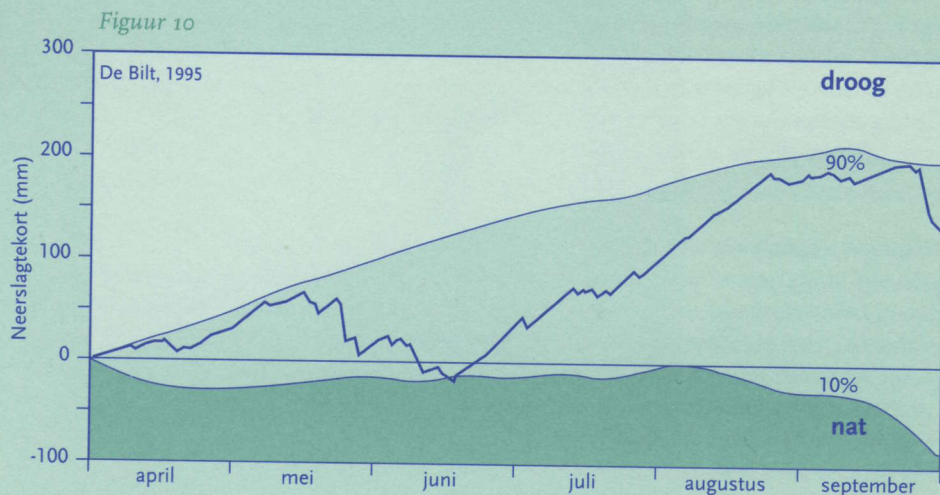
Neerslaghoeveelheid in Nederland, verkregen door middeling over 13 geselecteerde stations (1907-1995/96).

1.6 Droogte in de zomer

Droogte ontstaat als de verdamping groter is dan de neerslag. In tegenstelling tot de neerslag hangt de verdamping sterk af van de aard van het oppervlak. De verdamping boven een stad verschilt bijvoorbeeld sterk van die boven bossen en landbouwgebieden.



Bij weinig neerslag en onvoldoende aanvoer van water droogt de bodem uit. Planten reageren hierop door de huidmondjes te sluiten waardoor de verdamping gereduceerd wordt. Men maakt daarom bij begroeide oppervlakken onderscheid tussen de werkelijke en de potentiële verdamping. De potentiële verdamping is de verdamping die plaats zou vinden als de begroeiing optimaal van water is voorzien. De grootte van de potentiële verdamping kan worden berekend uit meteorologische grootheden, maar hangt af van de aard van de begroeiing. Ze wordt meestal gegeven voor kort gras. Bij vochttekorten in de bodem is de werkelijke verdamping minder dan de berekende potentiële verdamping.



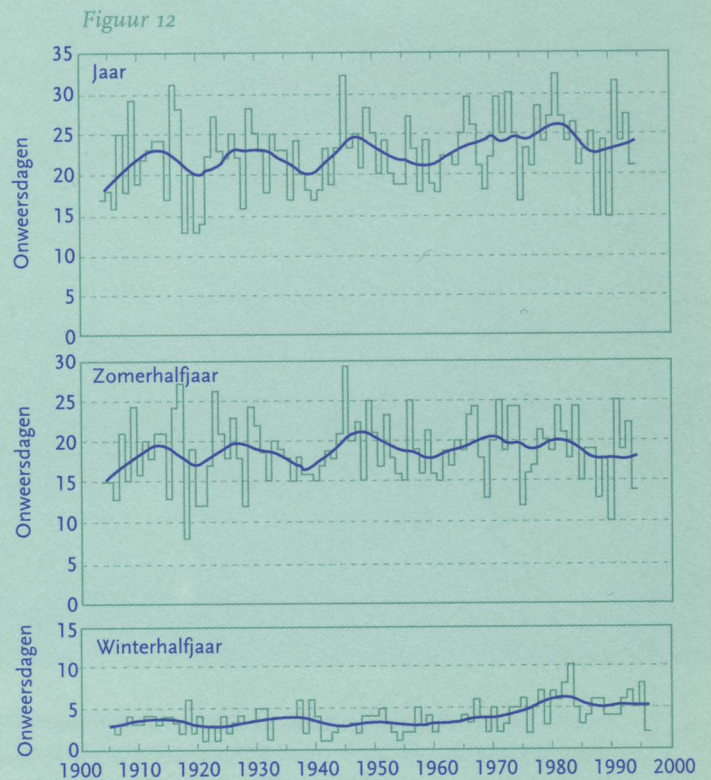
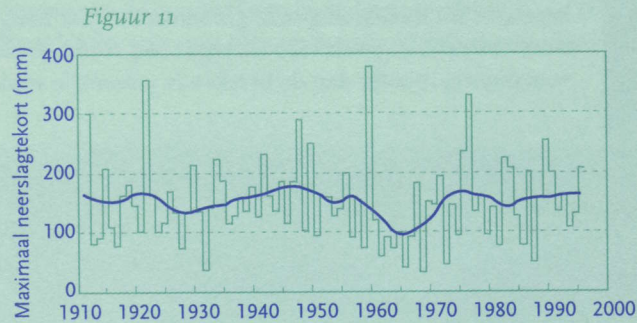
Figuur 10

Doorlopend potentiële neerslagtekort voor De Bilt van het zomerhalfjaar van 1995 (dikke lijn). Het doorlopend potentiële neerslagtekort is hier het verschil vanaf 1 april tot de aangegeven datum tussen verdamping en neerslag boven kort gras als dat optimaal van water is voorzien. De dunne lijnen geven percentielen weer: voor elke datum geldt steeds dat het potentiële neerslagtekort in 90% van de jaren onder de 90%-lijn ligt en in 10% van de jaren onder de 10%-lijn.

Het verschil tussen potentiële verdamping en neerslag (potentieel neerslagtekort) bepaalt de hoeveelheid water die men kunstmatig moet aanvoeren via beregning of irrigatie. Voor landbouwkundige doeleinden wordt in Nederland de droogtegraad van een jaar gerelateerd aan het grootste potentiële neerslagtekort binnen het groeiseizoen, dat wil zeggen het zomerhalfjaar.

Figuur 10 toont voor De Bilt het doorlopend potentiële neerslagtekort van het zomerhalfjaar van 1995, gerekend vanaf 1 april. De waarde 90 mm op 31 juli geeft bijvoorbeeld aan dat de potentiële verdamping in de periode april tot en met juli 90 mm groter was dan de neerslag. Bij een stijgend verloop van de lijn overtreft de dagelijkse potentiële verdamping dus de neerslag. In de periode 18 juni-23 september nam het doorlopend potentiële neerslagtekort toe met ongeveer 210 mm. Voor De Bilt was dit het grootste potentiële neerslagtekort in 1995.

Figuur 11 geeft per jaar de grootste waarden van het doorlopend potentiële neerslagtekort voor de periode 1911-1995. Het tekort van 210 mm in 1995 ligt boven het gemiddelde voor De Bilt, maar nog aanzienlijk onder de waarden van ruim 300 mm voor de beruchte droge zomers van 1921, 1959 en 1976. Zonnige en warme zomers, zoals in de periode 1940-1955, zijn vaak droog (figuren 1 en 8). In de jaren zestig kwam een aantal natte zomers voor en waren de potentiële neerslagtekorten relatief gering. In het verloop van het grootste potentiële neerslagtekort van het zomerhalfjaar is geen systematische trend te onderkennen.



Figuur 11

Grootste waarden van het doorlopend potentiële neerslagtekort van zomerhalfjaren volgens meteorologische gegevens van De Bilt (1911-1995). Het potentiële neerslagtekort is hier het verschil tussen verdamping en neerslag boven kort gras als dat optimaal van water is voorzien.

Figuur 12

Aantal dagen waarop donder werd gehoord (gemiddeld over De Bilt, Den Helder, Groningen, Vlissingen en Maastricht; 1905-1995/96).

1.7 Onweer

Neerslag, met name buiige neerslag, kan samengaan met onweer. Hoewel de kans op blikseminslag op een bepaalde plaats niet groot is, kan een individueel trefgeval veel schade veroorzaken.

Pas sinds 1987 worden bliksems afzonderlijk geregistreerd, zodat we voor het verleden gebruik moeten maken van de door waarnemers gehoorde donder. De homogeniteit van deze reeks kan niet gegarandeerd worden, onder meer omdat pas na 1945 weerstations met een 24-uurs wacht gebruikelijk werden. In **figuur 12** zijn de waarnemingen van vijf stations gemiddeld om een zo betrouwbaar mogelijke maat voor het hele land te krijgen.

De resultaten in **figuur 12** laten voor de zomer geen merkbare trend zien. Een duidelijke correlatie van zomeronweer met de temperatuur is er niet, omdat onweer niet zozeer ontstaat in langdurig warme of koele zomerperiodes, maar juist in zomers met sterk wisselend weer: mooi zomerweer wordt dan vaak onderbroken door het binnenstromen van koele oceaanlucht. Opvallend is de recente toename van onweer in de winter, die waarschijnlijk samenhangt met de hogere frequentie van zachte en natte winters. Overigens gaat winteronweer met minder blikseminslagen gepaard dan de zomerse onweersbuien, zodat we op basis van **figuur 12** niet mogen concluderen dat het bliksemgevaar de laatste decennia merkbaar is toegenomen.

1.8 Is het klimaat veranderd?

Van diverse meteorologische grootheden zijn lange meetreeksen beschikbaar. Die tonen dat het klimaat van Nederland op al zijn onderdelen voortdurend varieert. Hierbij lopen grillige jaar-op-jaar fluctuaties en trage fluctuaties door elkaar. De variaties zijn duidelijk gekoppeld aan afwijkingen van de atmosferische stromingen van het gemiddelde. Bij de jaar-op-jaar fluctuaties bepaalt de toevalligheid van de dagelijks wisselende toestand van deze stromingen hoe deze afwijkingen gemiddeld per jaar uitvallen; de trage fluctuaties worden veroorzaakt door tijdelijke systematische afwijkingen van deze stromingen van lange duur, mogelijk samenhangend met trage processen in de oceaan. Door de specifieke ligging van Nederland, met aan zijn westkant een oceaan en aan zijn oostkant een groot continent, hangt ons weer wel zeer gevoelig samen met de richting van de luchtstromingen. Dit leidt tot een uiterst variabel klimaat.

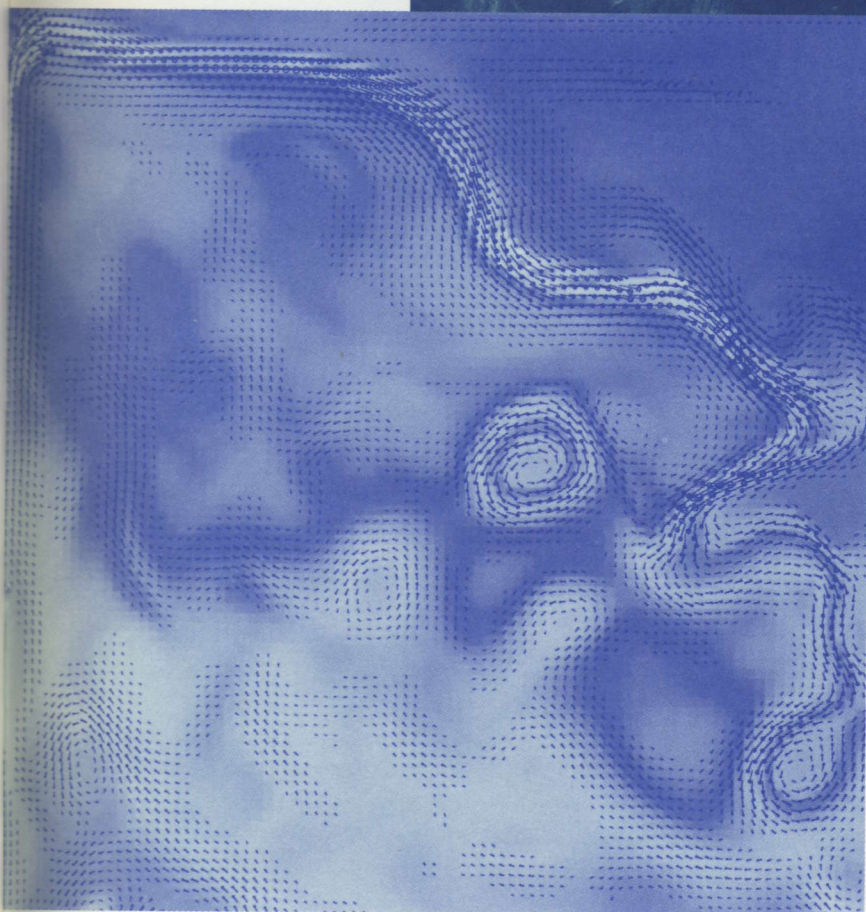
De afgelopen jaren toont een aantal meteorologische grootheden afwijkingen ten opzichte van hun gedrag in het voorafgaande deel van de eeuw. Dit geldt voor temperatuur, neerslag en onweer. De oorzaak hiervan is een versterking van het IJslandse lagedrukgebied gedurende het laatste decennium, die ervoor zorgde dat er een afwijkende gemiddelde toestand van luchtstromingen optrad. Door deze toestand was de kans op hoge temperaturen toegenomen, vooral voor de winter. Temperatuur, neerslag en onweer zijn geen losstaande verschijnselen, en met de hogere temperaturen vertoonden ook neerslaghoeveelheid en onweersfrequentie het afgelopen decennium afwijkingen, hoewel deze soms meer versluierd zijn door de grote jaar-op-jaar grilligheid. Daar niet bekend is of het versterkte broeikaseffect een rol kan spelen bij het versterken van het IJslandse lagedrukgebied, ontbreekt de wetenschappelijke grond om het afwijkende weer van het afgelopen decennium aan het broeikaseffect toe te schrijven.

Mondiaal gezien is er eveneens sprake geweest van een opwarming, vooral in de afgelopen twintig jaar. Deze stijging bedraagt slechts een derde van de Nederlandse temperatuurstijging. Doordat de wereldgemiddelde temperatuur een lage variabiliteit kent, komt deze stijging duidelijk in de grafieken naar voren. In tegenstelling tot de veel grotere Nederlandse temperatuurstijging heeft de wereldtemperatuurstijging, ondanks zijn thans nog relatief kleine waarde, nu een niveau bereikt dat hij niet meer volledig aan natuurlijke oorzaken wordt toegeschreven.

2 Klimaatvoorspellingen

Aan de polen is het veel kouder dan in de tropen, maar het temperatuurverschil is toch veel minder dan men op grond van verschillen in de hoeveelheid geabsorbeerde zonnestraling zou verwachten. Dit komt omdat de atmosfeer en de oceanen continu trachten dit verschil kleiner te maken door via winden en oceaanstromingen warmte poolwaarts te transporteren. Door de draaiing van de aarde, de afwisseling van land en zee en nog talloze andere zaken, gaat dit transport niet geleidelijk, maar wisselvallig. De mate van wisselvalligheid van dit transport op een bepaalde plaats weerspiegelt zich in de wisselvalligheid van het 'weer' ter plekke. Klimaat is het gemiddelde weer op een bepaalde plek inclusief zijn variabiliteit. Het is de afspiegeling van de hoeveelheid zonne-instraling, de grootschalige stroming in atmosfeer en oceanen, hun onderlinge wisselwerking, de wisselwerking van de luchtstromingen met het landoppervlak en de uitwisseling van vocht tussen atmosfeer, land en oceaan.

Zo vinden wij een warm, vochtig en gelijkmatig klimaat in de tropen, omdat de zon er overvloedig schijnt en voortdurend warme lucht, aangezogen uit de subtropen, verder verwarmt en doet opstijgen, zodat condensatieprocessen hierin op gang komen, en uiteindelijk de opgestegen lucht via de hoge luchtlagen weer naar de subtropen terug doet stromen. Daarentegen is er een wisselvallig en winderig klimaat op onze breedten, doordat het poolwaartse warmtetransport door de atmosfeer turbulent verloopt, en daarbij steeds weer nieuwe laagdrukgebieden vormt. We kennen de verschillen tussen ons vochtige en milde 'zeeklimaat', tegenover het droge 'landklimaat' met meer extreme temperaturen, ver landinwaarts, waar de matigende invloed van oceanen klein is en de relatief droge landoppervlakken makkelijk opwarmen en afkoelen.

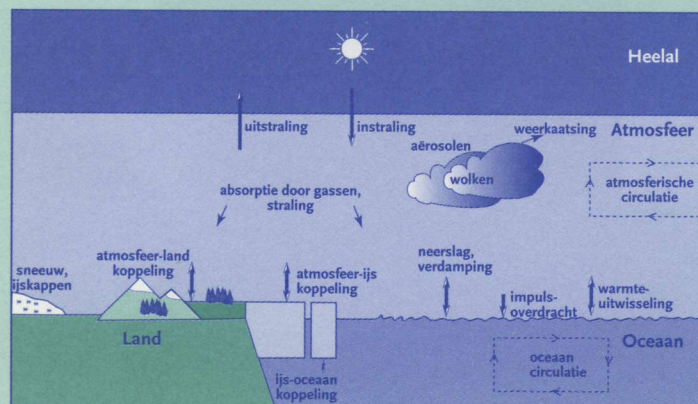


Het geheel van atmosfeer, oceanen, landmassa's, biosfeer, land- en zeeijs, waarin en waar-tussen transporten en uitwisselingen plaatsvinden van warmte, van beweging, van vocht en van andere stoffen, noemen we het klimaatsysteem (figuur 13). De onderdelen van het klimaat-systeem laten hun invloed op verschillende tijdschalen gelden. De atmosfeer varieert snel, op tijdschalen van dagen en weken, de oceanen veranderen traag, op tijdschalen tot honderden jaren, en de grote landijsmassa's van het Zuidpoolgebied en Groenland groeien en slinken op tijdschalen van duizenden jaren.

2.1 Het modelleren van het klimaatsysteem

Hoe het klimaatsysteem reageert op een verstoring (zoals een verande-ring in de stralingsbalans door een toename van broeikasgassen of van stofdeeltjes in de atmosfeer), hangt sterk af van genoemde wisselwerkingen tussen de onderdelen van het klimaatsysteem. Die kunnen de verstoring versterken (= positieve terugkoppe-ling), of juist tegenwerken (= negatieve terugkoppeling). Een bekend voorbeeld van een positieve terugkoppeling is de afname van sneeuw en ijs bij klimaatopwarming, waardoor min-der terugkaatsing van zonnestraling optreedt, zodat het klimaat nog meer gaat opwarmen, waardoor sneeuw en ijs nog verder afnemen.... Een voorbeeld van negatieve terugkoppeling in het klimaatsysteem is het afremmen van temperatuurstijging door verdamping: verwarming leidt tot sterkere verdamping, maar versterkte verdamping heeft een relatieve afkoeling tot

Figuur 13



gevolg, zodat de temperatuurstijging van een verdampend oppervlak beperkt blijft. Het klimaatsysteem zit vol met positieve en negatieve terugkoppelingen. Hoe al die verschil-lende terugkoppelingen op elkaar inwerken en hoe ze gezamenlijk uitwerken is een ingewik-keld probleem. Wellicht de enige manier om daar op toetsbare wijze enig licht op te werpen is het bouwen van computermodellen, die gebaseerd zijn op universeel geldende natuurwetten met betrekking tot lucht, water, enzovoorts, en waarin het 'gedrag' van al die onderdelen van het klimaatsysteem, inclusief hun wisselwerkingen, nagebootst wordt. Zo kan het klimaat-systeem gesimuleerd worden en zijn gevoeligheid voor verstoringen worden onderzocht.

Figuur 13

Schematische voorstelling van het klimaatsysteem en processen hierbinnen. Deze processen moeten in een klimaatmodel goed weer-gegeven worden, wil men enig ver-trouwen hebben in het door het model voor de toekomst berekende klimaat.

Wat is de voorspellende waarde van zulke computerberekeningen? Hoe moeten wij de model-uitkomsten interpreteren? Hoe gevoelig zijn de uitkomsten voor kleinere of grotere fouten in de beschrijving van processen die deel uitmaken van het klimaatsysteem? Hoe onderscheiden we antropogene (= door de mens veroorzaakte) klimaatveranderingen van de op natuurlijke wijze voorkomende variaties in het klimaat? Het is niet eenvoudig deze vragen te beantwoor-den. Een groot probleem is dat klimaatvoorspellingen niet direct te controleren zijn. Immers, toekomstige klimaten hebben zich nog niet voorgedaan en in de periode dat systematisch meteorologische waarnemingen zijn verricht, hebben zich geen drastische klimaat-

Complexe systemen en chaotisch gedrag

Het klimaatsysteem bestaat uit zeer veel onderdelen die in onderlinge wisselwerking staan. In bepaalde situaties is de wisselwerking zwak en kunnen deze onderdelen als min of meer losse elementen worden gezien. Maar van tijd tot tijd is dat niet mogelijk. Dit manifesteert zich door het optreden van klassen van verschijnselen die voortkomen uit de totaliteit van meerdere onderdelen. Een bekend voorbeeld is het El Niño-verschijnsel in de Stille Oceaan, dat voortkomt uit de oceaan en atmosfeer als totaalsysteem en niet opgewekt kan worden door oceaan of atmosfeer alleen.

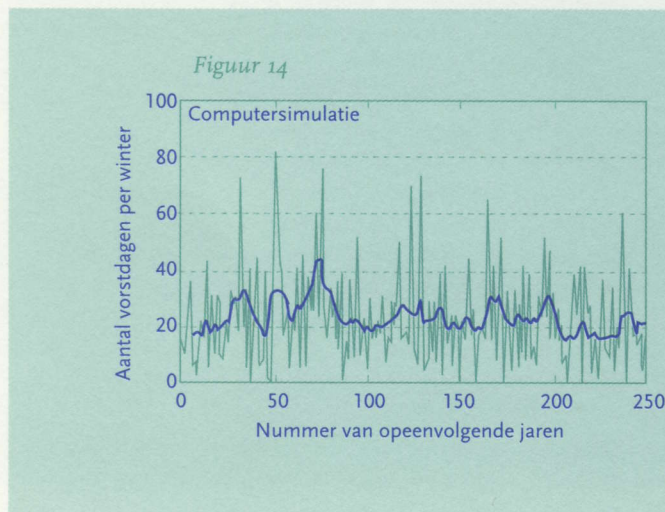
Een systeem als het klimaatsysteem, bestaande uit de samenhang van zeer veel wisselwerkende onderdelen, is complex. Algemeen wordt aangenomen dat zeer complexe systemen - zoals het klimaatsysteem of de wereldeconomie - slechts een beperkte voorspelbaarheid hebben. Dit hangt samen met het feit dat kleine oorzaken in een deelsysteem tot grote gevolgen voor het geheel kunnen leiden. Deze beperkte voorspelbaarheid is te vergelijken met wat in de theorie van dynamische systemen chaotisch gedrag wordt genoemd. Door dit verschijnsel kan het systeem dat aanvankelijk rond een bepaalde gemiddelde toestand varieert, zonder aanwijsbare oorzaak dit gemiddelde verlaten en rond een ander gemiddelde gaan variëren, en na enige tijd weer terugkeren. De natuurlijke variabiliteit van een complex systeem met chaotisch gedrag kan hierdoor veel groter zijn dan men uit een relatief korte waarnemingsreeks zou opmaken, terwijl daarnaast in een complex systeem verrassende ontwikkelingen mogelijk blijken.

Alle klimaatmodellen voorspellen klimaatwijzigingen door toedoen van menselijk handelen. De marges van de voorspellingen zijn breed, maar voor een aantal onderdelen van het klimaat is de richting van de verandering duidelijk. Maar bovendien kan de mogelijkheid niet worden uitgesloten dat het complexe klimaatstelsel uit zichzelf of wellicht aangezet door de door mensen aangebrachte verstoring, naar een andere gemiddelde toestand gaat bewegen. Hoe het klimaat er na zo'n gebeurtenis uit zou zien, is niet bekend.

veranderingen voltrokken. Het vertrouwen in klimaatvoorspellingen is vooral gebaseerd op het vermogen van de modellen om belangrijke kenmerken van het huidige weer en klimaat correct te simuleren en voorts op successen bij het simuleren van wereldklimaatsschommelingen die het gevolg zijn van tijdelijke veranderingen in de stralingsbalans, zoals na de stofuistoot door de uitbarsting van de vulkaan Pinatubo in 1991. Een rigoureuze test van de voorspellende kracht van klimaatmodellen ontbreekt echter. In principe zou dit adequaat kunnen gebeuren met behulp van indirect gemeten temperatuurreeksen die betrekking hebben op het zeer verre verleden, de zogenoemde paleo-klimatologische meetreeksen. Helaas verschaffen die reeksen op dit moment nog geen informatie die gedetailleerd genoeg is om voor dit doel bruikbaar te zijn. Dit betekent dus dat klimaatvoorspellingen tot stand komen met behulp van computermodellen die slechts in beperkte mate getest kunnen worden op hun voorspellende kracht. Dit noopt tot voorzichtigheid bij het hanteren van de uitkomsten van klimaatmodellen.

2.2 De voorspelbaarheid van het klimaat

Kunnen uitspraken worden gedaan over de voorspelbaarheid van het klimaat? Nog niet heel concreet, maar de kennis omtrent de aard van de atmosferische stromingen verschaft wel inzicht in aspecten van het voorspelprobleem. De atmosfeer is een systeem waarvan de ontwikkelingen zeer gevoelig zijn voor details: kleine oorzaken kunnen grote gevolgen hebben. De betekenis hiervan voor de voorspelbaarheid van het klimaatsysteem kan in beeld worden gebracht door bestudering van eenvoudige wiskundige



modellen met gelijksoortig gedrag als de atmosfeer. Sommige van deze zogenoemde dynamische systemen kunnen in bepaalde opzichten worden opgevat als een analogon van de atmosferische circulatie.

Figuur 14

Een illustratie van de natuurlijke variabiliteit van het klimaat op twee tijdschalen. Een klimaatmodel dat men het verloop van het weer laat nabootsen, toont uit zichzelf net als de werkelijkheid een grote variabiliteit. De dunne lijn geeft weer hoe in een computersimulatie het aantal vorstdagen in Europa van jaar tot jaar fluctueert. Gemiddeld over een aantal winters - de vetgedrukte lijn toont het lopend 10-jaars gemiddelde - vertoont het aantal door het model berekende vorstdagen eveneens een aanzienlijke variatie.

In het voorspelbaarheidsonderzoek wordt onderscheid gemaakt tussen twee typen van voorspellingen, die van de eerste en die van de tweede soort. Bij voorspellingen van de eerste soort worden, uitgaande van een schatting van de actuele toestand van de atmosfeer, aspecten van deze toestand voorspeld voor een van te voren afgesproken tijdstip in de toekomst, bijvoorbeeld voor vijf dagen vooruit. Deze voorspellingen kunnen meer of minder gedetailleerd zijn. De mate van detail zal afhangen van de voorspeltermijn: hoe verder vooruit, hoe minder detail. Bij voorspellingen van de tweede soort gaat het erom slechts in statistische zin te voorspellen wat de gevolgen zijn van veranderende externe factoren, zoals bijvoorbeeld de toename van het kooldioxidegehalte in de atmosfeer, en niet om te voorspellen hoe de toestand van de atmosfeer op een bepaalde dag is of hoe de atmosfeer zich tot die dag zal ontwikkelen.

Een dynamisch systeem met chaotisch gedrag, zoals de atmosfeer, heeft een beperkte voorspelbaarheid van de eerste soort. Dit is de reden dat de voorspeltermijn van het weer begrensd is. Voorbij deze tijdhorizon zijn voorspellingen van de tweede soort - klimaatvoorspellingen -

echter wèl mogelijk, in theorie zelfs met onbeperkte voorspelhorizon. Wel moet de dynamica van het systeem dan volledig bekend zijn en nauwkeurig genoeg kunnen worden gemodelleerd. De vereiste nauwkeurigheid hangt af van de mate waarin het klimaatsysteem gevoelig is voor verstoringen.

In eenvoudige klimaatmodellen geven kunstmatig aangebrachte wijzigingen van ogenschijnlijk onbeduidende omvang aanleiding tot verrassende en significante veranderingen, die zich vooral uiten in het meer of minder voorkomen van bepaalde atmosferische circulatiepatronen. Dit geeft aan dat kleine onvolkomenheden in de meer realistische, maar complexere klimaatmodellen de nauwkeurigheid van simulaties van klimaten ernstig kunnen verstoren. Inderdaad worden belangrijke aspecten van het huidige klimaat nog niet goed weergegeven door de klimaatmodellen. Dit geldt, net als in de versimpelde modellen, bijvoorbeeld voor hoe vaak bepaalde atmosferische circulatiepatronen optreden. De gevoeligheid van de huidige modellen voor antropogene effecten moet dan ook kritisch worden beschouwd. Sommige resultaten, zoals de toename van de mondiaal gemiddelde temperatuur en de temperatuur op de schaal van continenten, lijken tamelijk robuust. Andere, zoals veranderingen in het voorkomen van circulatiepatronen, zijn uiterst gevoelig voor kleine veranderingen in het model. Aspecten van het klimaat die heel gevoelig reageren, kunnen in de praktijk onvoorspelbaar blijken. Zulke aspecten kunnen evenwel een cruciaal onderdeel uitmaken van de informatie die noodzakelijk is voor het doen van voorspellingen van het regionale klimaat.

Een complicerende factor bij het bepalen van het toekomstige klimaat is dat klimaatveranderingen niet slechts veroorzaakt worden door veranderingen in externe factoren. In het verleden zijn grote en kleine klimaatveranderingen voorgekomen zonder dat de mens enige invloed op het klimaatsysteem uitoefende.

Zo hebben we rond de zeventiende eeuw een tamelijk koude periode gekend die als 'de kleine ijstijd' bekend staat. Een gangbare theorie is dat deze klimaatfluctuatie ontstond door elkaar versterkende natuurlijke variaties. Dit verschijnsel wordt geïllustreerd door de klimaatsimulatie van [figuur 14](#). Blijkbaar is het klimaatsysteem uit zichzelf in staat tot het veroorzaken van tijdelijke veranderingen van langdurige aard. Dit soort trage fluctuaties vormt een wezenlijk onderdeel van de natuurlijke variabiliteit van het klimaat.

Voorspellingen over het verloop in de tijd van zulke klimaatfluctuaties zijn van de eerste soort en het is dus fundamenteel onmogelijk een uitspraak te doen over het tijdstip waarop zo'n natuurlijk verschijnsel zal optreden. Bij de voorspelling van antropogene klimaatveranderingen moeten we dit in gedachte houden. Hoe nauwkeurig we in de toekomst wellicht ook het antropogene effect kunnen voorspellen, er zal steeds een marge in de voorspellingen moeten worden aangebracht, die een reflectie is van de onvoorspelbare natuurlijke variabiliteit van het klimaat. Dit houdt in dat klimaatvoorspellingen pas betekenis krijgen als het voorspelde klimaatsignaal groter is dan de onvoorspelbare klimaatruis. Op de tijdschalen die vallen binnen de voorspeltermijn van een eeuw zijn grootte en structuur van de natuurlijke variabiliteit ofwel van de klimaatruis echter slechts ten dele bekend.

2.3 Toekomstige veranderingen in het mondiale klimaat

Uitgaande van een bekend verondersteld verloop in de toekomstige atmosferische samenstelling zijn klimaatmodellen in staat een indruk te geven van de toekomstige patronen van temperatuur- en neerslagverandering op zeer grote ruimtelijke schaal. Het IPCC ([pagina 24](#)) heeft in 1995 de kennis over modeluitkomsten van het toekomstig klimaat ten tweede maal in kaart gebracht en de bevindingen neergelegd in het Tweede Integrale IPCC-rapport over Klimaatverandering. Dit rapport is het ijkpunt bij het doen van klimaatvoorspellingen.

De basis van de voorspellingen wordt gevormd door het waargenomen verloop in atmosferische samenstelling en schattingen van het toekomstig verloop. Op grond van aannames over bevolkingsgroei, industriële ontwikkeling en energieverbruik heeft het IPCC zes scenario's opgesteld voor het verloop van de emissie van broeikasgassen en van industriële deeltjes (aërosolen) tot eind volgende eeuw. Rekening houdend met de gemiddelde verblijftijd van deze stoffen in de atmosfeer, is voor ieder scenario het bijbehorende verloop in atmosferische

Het IPCC

Het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) is eind jaren tachtig in het leven geroepen door het United Nations Environment Programme (UNEP) en door de World Meteorological Organization (WMO), beide onderdeel van de Verenigde Naties (VN). Het IPCC heeft als opdracht de beschikbare wetenschappelijke, technische en sociaal-economische informatie met betrekking tot het broeikasprobleem op uitgebreide, objectieve, open en doorzichtige wijze in kaart te brengen. Hiertoe heeft het IPCC drie Werkgroepen ingesteld, elk belast met een rapportage over een deelaspect. Werkgroep I stelt een rapport op over de stand van zaken betreffende de natuurwetenschappelijke achtergrond van klimaat en klimaatverandering, Werkgroep II stelt een rapport op over de ecologische en sociaal-economische gevolgen van klimaatverandering en Werkgroep III stelt een rapport op over de onderlinge samenhang tussen sociaal-economische activiteiten en klimaatbeïnvloeding en brengt de gevolgen van regulerende maatregelen in beeld. De drie rapporten worden aangeboden aan het IPCC en vormen hierna tezamen, na elk voorzien te zijn van een Samenvatting voor Beleidsmakers, het Integrale IPCC-rapport over Klimaatverandering. Het eerste Integrale IPCC-rapport over Klimaatverandering verscheen in 1990. De resultaten van dit rapport hebben een basis gelegd voor het tijdens de United Nations Conference on Environment and Development (UNCED) in 1992 opgestelde Klimaatverdrag, het zogeheten Framework Convention on Climate Change (FCCC). In het kader van dit verdrag onderhandelen de lidstaten van de VN thans over verdergaande maatregelen in verband met het tegengaan van, en het anticiperen op, de verwachte klimaatverandering. Tijdens de UNCED hebben de lidstaten het IPCC verzocht de problematiek andermaal in kaart te brengen. Dit heeft geleid tot het Tweede Integrale IPCC-rapport, dat eind 1995 is vastgesteld.

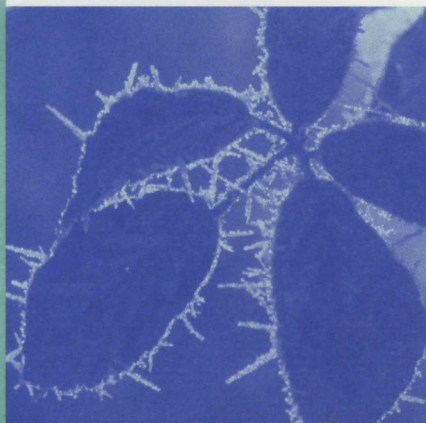
Het wetenschappelijke beoordelingsproces van IPCC-rapportages

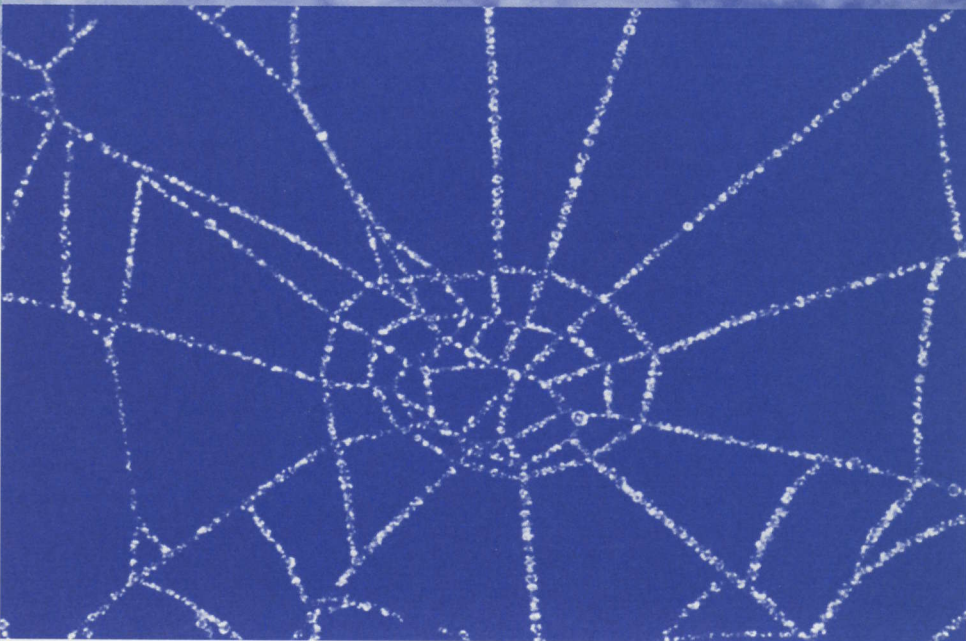
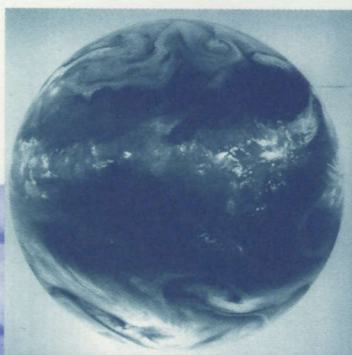
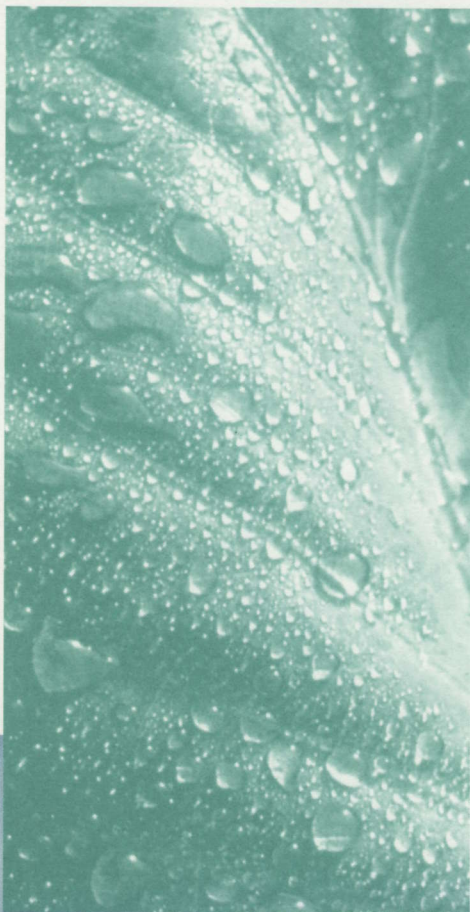
Het IPCC heeft procedures ingesteld waardoor deskundigen uit zoveel mogelijk landen en organisaties kunnen deelnemen aan het opstellen van een rapport. Ieder hoofdstuk van een IPCC-rapport komt tot stand onder verantwoordelijkheid van een zogeheten 'lead author team', bestaande uit een aantal prominente onder-

zoekers uit het desbetreffende vakgebied. Daarbij heeft elk team de expliciete opdracht ook andere specialisten uit dit vakgebied uit te nodigen een bijdrage te leveren ('contributing author'). De hoofdstukken van het rapport worden als concept twee keer ter beoordeling voorgelegd aan de lead author teams van andere hoofdstukken en aan andere geselecteerde deskundigen. Tijdens de tweede beoordelingsronde wordt het rapport tevens voorgelegd aan elke VN-lidstaat. Deze laat door zijn deskundigen een nationaal-gecoördineerd beoordelingsrapport opstellen over de wetenschappelijke inhoud van het concept IPCC-rapport. Omdat het IPCC bij deze procedure alle landen betreft en hierbij honderden wetenschappers uit al die landen verenigt, en omdat uitspraken die onder verantwoordelijkheid van IPCC gedaan worden in technisch-wetenschappelijke zin verantwoord kunnen worden, hebben de IPCC-rapporten een draagvlak, in zowel de wetenschappelijke wereld als in de aan IPCC deelnemende landen, dat uniek is.

Het intergouvernementele beoordelingsproces van IPCC-rapportages

De conclusies van de wetenschappelijke rapporten van de drie IPCC-werkgroepen worden door de lead authors elk samengevat voor beleidsmakers. Deze Samenvatting voor Beleidsmakers wordt vervolgens regel voor regel voorgelegd aan de algemene vergadering van nationale afgevaardigden van de deelnemende landen met de desbetreffende werkgroep. Dit leidt tot uitgebreide discussie tussen vertegenwoordigers van de belanghebbende landen en vertegenwoordigers van de lead author teams over formuleringen in de samenvatting. Omdat later de Samenvatting voor Beleidsmakers een belangrijke rol speelt in de FCCC-vergaderingen, weegt tijdens deze discussie de toon van de formuleringen voor de politici vaak even zwaar als de wetenschappelijke correctheid voor de auteurs. Uiteindelijk bevestigt de vergadering dat het rapport inderdaad een uitgebreide, objectieve, open en doorzichtige weergave is, en dat de samenvatting goed en voor het FCCC bruikbaar is. Het Integrale IPCC-rapport over Klimaatverandering is uiteindelijk gereed als de drie Samenvattingen door de plenaire vergadering van vertegenwoordigers van de bij het IPCC betrokken landen zijn overgenomen.





samenstelling berekend. Ondanks reducties in verschillende emissiescenario's leiden ze alle zes ertoe dat de atmosferische concentratie van broeikasgassen, en in mindere mate die van de aerosolen, in de toekomst steeds hoger wordt. Verschillende onderzoeksgroepen hebben de klimaatconsequenties van deze zes scenario's doorgerekend. Als uitgegaan wordt van het scenario dat resulteert in concentratietoenames die het midden houden tussen de toenames van de andere vijf scenario's, luiden de meest zekere voorspellingen van het IPCC-1995 rapport voor het klimaat halverwege de volgende eeuw als volgt:

- De wereldgemiddelde temperatuur zal in 2050 een halve graad tot twee graden hoger zijn dan in 1990, met als centrale schatting één graad Celsius. De marge is voornamelijk het gevolg van onzekerheden met betrekking tot de invloed van bewolking, waarvan het gedrag en de invloed op het klimaat moeilijk te modelleren is. Daarnaast is niet nauwkeurig bekend hoe aerosolen van menselijke origine op de atmosferische stralingshuishouding inwerken: zij hebben een koelende werking, maar hun verblijftijd in de atmosfeer is slechts kort.
- De grootste opwarming zal optreden boven de continenten op hoge breedten en het grootst zijn in het winterseizoen. De verhoogde aerosolconcentratie nabij gebieden met grote industriële activiteit zorgt ervoor dat de temperatuurstoename daar achterloopt ten opzichte van die in andere gebieden.
- Door de warmtecapaciteit van het gekoppelde land-oceaan-atmosfeersysteem ijlt de temperatuur na op de broeikasgasconcentratie. Voor de hierboven genoemde temperatuurverandering van één graad houdt dit in dat zelfs als de concentraties van broeikasgassen in de atmosfeer in 2050 gestabiliseerd zouden kunnen worden, de wereldgemiddelde temperatuur nog enkele tienden van graden verder zal stijgen na 2050. Hieruit blijkt dat een stabilisatie van concentraties pas op zeer lange termijn tot een stabilisatie van het klimaat zal leiden, waarbij aangetekend dient te worden dat een stabilisatie van broeikasgasconcentraties pas zeer lange tijd na een reductie van emissies op zal treden.
- De wereldwijd gemiddelde neerslag zal in 2050 met enkele procenten toegenomen zijn, waarbij de grootste procentuele toename plaatsvindt op hoge noordelijke breedten in het winterseizoen ter plekke.
- De met de temperatuurstijging geassocieerde verhoging van het wereldgemiddelde zeespiegelniveau zal in 2050 tien tot veertig centimeter bedragen, met als centrale schatting twintig centimeter.

Op vele punten kunnen geen eenduidige conclusies worden getrokken. Een in de context van dit rapport belangrijke conclusie is dat veranderingen in het lokale klimaat of veranderingen in het voorkomen van extreme weersverschijnselen, zoals zware stormen, hittegolven en uitzonderlijke wolkbreuken, momenteel niet uit de modellen zijn af te leiden.

In het IPCC-rapport van 1995 is ook gekeken naar emissiescenario's die dermate laag zijn dat ze er toe zouden leiden dat de concentratietoename van broeikasgassen in de loop van de komende eeuw tot staan komt. Het blijkt dat zelfs bij deze extreme scenario's, die een dusdanige reductie van emissies van broeikasgassen vereisen dat ze alleen met zeer vergaande en moeilijk voorstelbare maatschappelijke veranderingen gerealiseerd zouden kunnen worden, de klimaatveranderingen groter zijn dan de natuurlijke variaties die gedurende de laatste tien-duizend jaar op de tijdschaal van een eeuw zijn opgetreden.

2.4 Een mogelijk toekomstig klimaat in Nederland

De in het IPCC-rapport gepresenteerde voorspellingen hebben betrekking op gemiddelden over zeer grote ruimtelijke gebieden van een beperkt aantal klimaatvariabelen. Deze voorspellingen laten zich niet regelrecht op de Nederlandse situatie projecteren. Dit staat het opstellen van een gefundeerde klimaatvoorspelling voor Nederland in de weg. Waargenomen verbanden tussen verschillende

onderdelen van het Nederlandse weer verschaffen echter wel inzicht in de consequenties van een verandering in het ene onderdeel van het Nederlandse weer voor een ander onderdeel. Onder de statistische aanname dat deze verbanden in het toekomstig klimaat ongewijzigd geldig blijven, kan voor Nederland op grond van uit het IPCC-rapport geschatte veranderingen van grootschalige kenmerken van een zeer beperkt aantal klimaatvariabelen een mogelijke realisatie worden geschetst van enkele andere klimaatvariabelen.

Een voorspelling van dit type noemt men een klimaatscenario. Een klimaatscenario is feitelijk geen echte voorspelling, maar eerder een samenhangend geheel van meerdere onderdelen van het toekomstig klimaat, zoals dat volgt uit een bekend verondersteld verloop van tenminste één van die onderdelen en uit statistische aannamen over behoud van interne meteorologische consistentie van het geheel. Tezamen vormen deze onderdelen een mogelijke realisatie van het klimaat. Andere aannamen leiden uiteraard tot andere uitkomsten voor onderdelen van dit geheel en dus tot een ander klimaatscenario. Het waarheidsgehalte van een klimaatscenario is per definitie niet te toetsen, hoogstens kan de geloofwaardigheid van de consistentie-aannamen worden onderbouwd.

Een centraal gegeven bij het opstellen van klimaatscenario's wordt gevormd door inzicht in het karakter van de luchtstromingen om ons heen en in de frequentie van optreden van atmosferische circulatiepatronen. De cruciale rol van dit gegeven voor het Nederlandse klimaat blijkt uit de grote gevoeligheid hiervoor van het geheel van temperatuur, neerslag, bewolking en wind in het huidige klimaat, zoals uiteengezet in hoofdstuk 1. Hoewel klimaatmodellen wel aangeven dat de grootschalige atmosferische circulatie zich niet drastisch verandert, leveren de berekeningen geen enkel bruikbaar signaal op over veranderingen in richting, sterkte of variabiliteit van luchtstromingen boven West-Europa. Bij gebrek aan informatie, gaat het hier gepresenteerde klimaatscenario uit van een aanname over dit cruciale gegeven. Als sleutelaanname wordt geponeerd dat de variabiliteit van de luchtstromingen en de frequentieverdeling van circulatiepatronen rond Nederland zich bij versterking van het broeikaseffect niet zullen wijzigen.

De wereldgemiddelde temperatuur zal in 2050 met 0,5-2 graden gestegen zijn, met als centrale schatting één graad. Een plausibele schatting bij bovengenoemde sleutelaanname is dat de temperatuurstijging in Nederland hier niet sterk van afwijkt. Dit wordt in onderstaand klimaatscenario gehanteerd als uitgangspunt. Voorts wordt verondersteld dat het waargenomen gemiddelde verband tussen dagtemperatuur en neerslaghoeveelheid geldig blijft, wordt gebruik gemaakt van het IPCC-gegeven dat de opwarming het grootst is boven landmassa's en in de winter, en wordt waar nodig de sleutelaanname van ongewijzigde variabiliteit wederom toegepast.

Uitgaande van een temperatuurstijging in Nederland van 0,5-2 graden, ontstaat door combinatie van bovenstaande aannamen het volgende beeld van een mogelijk klimaat in Nederland in 2050:

- De temperatuurverhoging in Nederland van 0,5-2 graden zal niet gelijkelijk verdeeld zijn over de seizoenen, maar in de winter waarschijnlijk iets sterker zijn dan in de zomer.
- De luchtstromingen en de opeenvolging van weertypen zullen net als nu gekenmerkt blijven door grote afwisseling. Binnen deze grilligheid zal de systematische opwarming de komende decennia slechts geleidelijk zichtbaar worden, maar in 2050 merkbaar aanwezig zijn in het Nederlandse weer.
- Hoewel de zomer warmer wordt, blijft een hittegolf een verschijnsel dat gemiddeld slechts eens in de paar jaar optreedt. Gemeten naar de huidige normen zullen ze wel vaker voorkomen en iets langer duren, waarbij ze iets heviger kunnen zijn.

- Strengere winters worden zeldzamer en de strengste winters worden iets minder extreem koud. Extreme kou in Nederland wordt veroorzaakt door luchtaanvoer van het continent, en bij wereldwijde opwarming zal het winterse sneeuwdek op het Europese continent eerder in het seizoen verdwijnen. Dit verlaagt voor Nederland de kans op extreem lage temperaturen in het vroege voorjaar. Zachte winters veranderen minder sterk van karakter omdat zulke winters worden gekenmerkt door luchtaanvoer van de oceaan.
- De neerslaghoeveelheid neemt toe waarbij de toename zich voornamelijk concentreert in de winter. Uitgaande van een verhoging van 0,5-2 graden in temperatuur leveren analyses van waargenomen temperatuur-neerslagverbanden voor Nederland een schatting op van 2 tot 5 procent toename in jaargemiddelde neerslaghoeveelheid.
- Situaties met langdurige, hevige winterneerslag zullen meer neerslag opleveren per regendag. Zulke situaties worden gekenmerkt door zogeheten westcirculaties. Geschat wordt dat de neerslaghoeveelheid bij zulke circulaties met 5 tot 20 procent zal toenemen. Door gebrek aan onderbouwde aanwijzingen over wijzigingen in het voorkomen van circulatiepatronen, is geen uitsluitsel te geven over veranderingen in de frequentie van deze gebeurtenissen.
- In de zomer zal de neerslag waarschijnlijk een buiiger karakter krijgen, zodat de neerslag in kortere tijdsintervallen valt dan nu. Voorts worden de zwaarste buien heviger; zij zullen dus vaker gepaard gaan met onweer of hagel. Een empirisch getoetste fysische beschrijving van het verband tussen temperatuur en de neerslagintensiteit van buien geeft aan dat de maximale neerslagintensiteit van zware buien met naar schatting 5 tot 20 procent toeneemt.
- Een toename van de gemiddelde zomertemperatuur heeft een hogere potentiële verdamping tot gevolg. Het is niet vanzelfsprekend dat dit ook tot grotere droogte in de vorm van neerslagtekort zal leiden, zelfs in geval de zomerneerslag gelijk zou blijven. De reden is dat veel planten op een hogere kooldioxideconcentratie reageren door sluiting van huidmondjes en daarmee efficiënter gebruik gaan maken van water. Het effect van de temperatuurstijging op de potentiële verdamping wordt daardoor voor een nog onbekend gedeelte teniet gedaan.
- Stormfrequenties en frequenties van neerslagloze perioden zijn direct gerelateerd aan specifieke circulatiepatronen. Over veranderingen hierin is dus geen zinvolle uitspraak mogelijk.

Scenariogewijs is dit de stand van zaken bij het beschrijven van een mogelijke realisatie van het klimaat van Nederland behorend bij een temperatuurstijging van 0,5-2 graden. Binnen de statistische consistentie-aanname bestaat voor het temperatuurklimaat een min of meer samenhangend beeld, terwijl voor neerslag bij gebrek aan onderbouwing van de sleutelaanname het beeld zich vooral beperkt tot karakteristieken die voortkomen uit het gedrag van de neerslagsystemen zelf. Over veranderingen die samenhangen met wijzigingen in frequenties van het overtrekken van deze en andere meteorologische systemen zijn binnen de huidige inzichten geen onderbouwde uitspraken of aannamen mogelijk.

Met nadruk zij vermeld dat bovenstaand toekomstbeeld slechts één mogelijke realisatie schetst van het Nederlandse klimaat in 2050; andere realisaties zijn evenzeer mogelijk. Indien de consistentie-aanname waarop het scenario berust niet houdbaar blijkt, of indien er inzicht ontstaat over veranderingen in de frequentieverdeling van circulatiepatronen, zal het toekomstbeeld zich zeer drastisch kunnen wijzigen. Naar het zich laat aanzien, zal het toekomstbeeld stapsgewijs concreter worden naarmate aannamen vervangen worden door feiten en naarmate klimaatmodellen gedetailleerder worden en het inzicht in hun voorspellende kracht toeneemt.



Colofon

Auteurs:

Hoofdstuk 1: J.J. Beersma, E. Bouws, T. Brandsma, T.A. Buishand, G.P. Können en H.R.A. Wessels (red.)

Hoofdstuk 2: A. Kattenberg, G.P. Können en J.D. Opsteegh

Eindredactie:

G.P. Können en W. Fransen

Figuren:

T. Brandsma

Vormgeving:

Birgit van Diemen

Productie en coördinatie:

Johan Bremer

Werktekenen:

Jaap Kwakkel

Lithografie en druk:

Meerpaal Offset BV, Tiel

Oplage:

2500

Op de omslag:

Het temperatuurverloop voor De Bilt sinds 1706 zoals dat uit verschillende meetreeksen is gereconstrueerd.

© KNMI, De Bilt, mei 1996

Postadres: Postbus 201, 3730 AE De Bilt



Bezoekadres: Wilhelminalaan 1

Telefoon 030-220 69 11, Telefax 030-221 04 07

