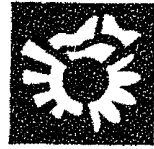


**Meteorologie ten behoeve van de
'Vierde Nota Waterhuishouding'**

KONNEN



Meteorologie ten behoeve van de 'Vierde Nota Waterhuishouding'

Verslag van een onderzoek in het kader van de voorbereidingen voor
de vierde Nota waterhuishouding, uitgevoerd door het KNMI



Meteorologie ten behoeve van
de 'Vierde Nota Waterhuishouding'

Dr G.P. Können
Drs W. Fransen
Drs R. Mureau

De Bilt
januari 1997

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut

Meteorologie ten behoeve van de 'Vierde Nota Waterhuishouding'

Inhoudsopgave

Pagina

5	1. Algemene inleiding
7	2. Klimaatveranderingen in en rond Nederland
	Inleiding
8	Sectie A. Temperatuur, ijsdikte en neerslag in Nederland
	A.1. Temperatuur
10	A.1.1. IJsvorming op oppervlaktewateren
11	A.1.2.a. Jaarlijkse hoeveelheid neerslag
12	A.1.2.b. Hoeveelheden zomer- en winterneerslag
13	A.1.2.c. Extreme neerslag
25	A.1.2.d. Neerslagtekort gedurende het zomerhalfjaar
27	Sectie B. Zeespiegelhoogte en wind- en golfklimaat op de Noordzee
	B.1. Gemiddelde zeespiegelhoogte
28	B.2. Windklimaat op zee, inclusief stormen
29	B.3. Golfklimaat
31	3. Tot slot
33	Relevante literatuur
	Appendices
35	Appendix 1. Klimaatparameters van belang voor de 'Nota Waterhuishouding'
37	Appendix 2. Suggesties voor verder onderzoek (NWS)

1. Algemene inleiding

Een eerste indruk van de effecten van klimaatveranderingen op het beheren en keren van zoet en zout water in Nederland of, kortweg, de waterhuishouding in Nederland, wordt verkregen met behulp van hydrologische modellen. Om deze modellen te kunnen gebruiken zijn invoergegevens nodig inzake veranderingen in een aantal *meteorologische grootheden* (= klimaatparameters). Van belang zijn veranderingen in gemiddelden en extremen van neerslag en verdamping, inclusief evapotranspiratie, luchtvochtigheid, zonne-instraling en bewolking, zeespiegel- en golfhoogte, windklimaat inclusief stormen, en temperatuur.

In dit rapport is getracht een schatting te geven van veranderingen in genoemde klimaatparameters in en om Nederland rond de jaren 2050 en 2100 ten opzichte van de situatie in 1990. De klimaatparameters waarvoor dit met de huidige kennis in kwantitatieve zin mogelijk bleek, zijn te vinden in de tabellen 1 en 2 op bladzijden 26, respectievelijk 29. **De tabellen 1 en 2 kunnen daardoor als samenvatting worden beschouwd van de resultaten van deze studie.**

Met behulp van klimaatmodellen kan in principe een *door externe factoren in gang gezette verandering in het statistisch gedrag van meteorologische grootheden* (= klimaatverandering) voor elke genoemde grootheid *berekend* worden. In de praktijk blijken slechts enkele van de op deze manier berekende veranderingen van klimaatparameters geloofwaardig, en dan nog slechts op de ruimtelijke schaal van zeer grote continenten. Het oplossend vermogen van de huidige generatie klimaatmodellen is beslist niet toereikend om klimaatveranderingen op *een ruimtelijke schaal van honderd tot enkele honderden kilometers* (= de regionale schaal) geloofwaardig weer te geven. Bovendien staan de benaderingen in de fysische beschrijving van meteorologische processen, die mede door het ontoereikende oplossend vermogen noodzakelijk zijn, ook op schalen die de regionale schaal te boven gaan, nauwkeurigheid van de voorspellingen in de weg.

Voor sommige gebieden op aarde zijn richtinggevende uitspraken mogelijk over klimaatveranderingen op regionale schaal. In de meest positieve gevallen moet hierbij worden gedacht aan het teken en de orde van grootte van de verandering. Voor Nederland en Noordwest-Europa zijn op grond van slechts experimenten met klimaatmodellen, dergelijke richtinggevende uitspraken niet mogelijk.

Als uitspraken op de schaal van Nederland nodig zijn, kan in principe gebruik worden gemaakt van methoden die aanvullend zijn op experimenten met klimaatmodellen. Zo kunnen waargenomen verbanden tussen verschillende onderdelen van het Nederlandse weer worden gebruikt. Deze veelal in statistische relaties te vatten verbanden, verschaffen inzicht in de consequenties van een verandering in het ene onderdeel van het Nederlandse weer voor een ander onderdeel. *Onder de aanname dat deze verbanden in het toekomstige klimaat ongewijzigd geldig blijven*, kan op grond van *bekend veronderstelde* veranderingen van grootschalige kenmerken van een beperkt aantal klimaatvariabelen, zoals die uit experimenten met klimaatmodellen volgen, een mogelijke realisatie worden geschetst van enkele andere klimaatvariabelen voor een gebied ter grootte van Nederland. Voorspellingen van dit type worden gekarakteriseerd als *klimaatscenario's* of *statistical downscaling*. Veel van de bevindingen inzake het toekomstige klimaat in Nederland dienen beschouwd te worden als klimaatscenario's.

Een klimaatscenario is feitelijk geen echte voorspelling. Een klimaatscenario is 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 aannamen over behoud van interne meteorologische consistentie van het geheel. *Een klimaatscenario is dus een voorwaardelijke uitspraak*. Andere voorwaarden of aannamen kunnen leiden 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 aannamen worden onderbouwd.

Een complicatie bij het opstellen van scenario's voor Nederland is dat er feitelijk geen enkele meteorologische grootheid is waarvoor klimaatmodellen uitspraken kunnen leveren. Dus er is geen basisgrootheid beschikbaar die kan dienen als uitgangspunt voor 'statistical downscaling'. Als er een aanname wordt gedaan over de frequentieverdeling van circulatiepatronen boven Noordwest-Europa, kan wel zo'n uitgangspunt worden verkregen en kan een beeld worden verkregen van andere parameters. Deze aanpak is in dit rapport gevolgd.

Voor een aantal meteorologische grootheden kunnen ook met behulp van bovenstaande scenario-aanpak geen uitspraken worden gedaan over toekomstige veranderingen op de schaal van Nederland. Dit geldt voor veranderingen die direct gekoppeld zijn met de verdeling van luchtcirculatiepatronen boven Nederland, zoals het windklimaat en ook de frequentie van natte of droge perioden. Klimaatparameters die zich wel voor de scenario-aanpak lenen, maar die nog niet zijn uitgewerkt, zijn de hoeveelheid zonne-instraling aan het oppervlak en de vochtigheidsgraad. Om deze hiaten in kennis op te vullen is een onderzoeksprogramma van lange duur vereist.

Regionale klimaatvoorspellingen

In tegenstelling tot voorspellingen op de schaal van zeer grote continenten, zijn door klimaatmodellen gegenereerde projecties van het klimaat op een regionale schaal zeer onzeker. Dit geldt in het bijzonder voor de regio Noordwest-Europa. Daarom vertonen de door verschillende modellen geproduceerde simulaties van het huidige en toekomstige klimaat van deze regio onderling zeer grote verschillen.

Een belangrijke oorzaak van deze onderlinge verschillen is het feit dat het Noordwest-Europese klimaat bij uitstek gevoelig is voor het karakter van de luchtstromingen en de frequentie van optreden van atmosferische circulatiepatronen. Dit wordt veroorzaakt door de specifieke ligging van dit gebied, met aan de westzijde een grote oceaan en aan de oostzijde een diep continent. Een kleine verandering in de richting van de luchtstroming heeft hierdoor grote repercussies op het klimaat in deze regio. Door allerlei oorzaken kunnen modellen circulatie moeilijk simuleren. Als met voldoende nauwkeurigheid berekend zou kunnen worden hoe de luchtcirculatiepatronen boven Noordwest-Europa veranderen, zouden met meer zekerheid uitspraken gedaan kunnen worden over het toekomstige Nederlandse klimaat. Ofschoon klimaatmodellen wel aangeven dat de grootschalige atmosferische circulatie niet drastisch verandert, leveren de berekeningen helaas geen signaal op over veranderingen in richting, sterkte of variabiliteit van deze luchtcirculatiepatronen dat gebruikt kan worden voor een kwantitatieve schatting van het klimaat in Nederland. Bij gebrek aan deze informatie, zijn slechts uitspraken over het toekomstige klimaat in Nederland mogelijk als een aanname over dit cruciale gegeven wordt gedaan. De aanname die in dit rapport wordt gehanteerd, hier de sleutelaanname genoemd, luidt dat de circulatiepatronen zich niet zullen wijzigen.

2. Klimaatveranderingen in en rond Nederland

Inleiding

In dit hoofdstuk worden schattingen gegeven voor de veranderingen in het Nederlandse klimaat, die kunnen optreden als gevolg van *de antropogene verstoring van het klimaatsysteem door een toename van de hoeveelheid broeikasgassen en (stof)deeltjes in de atmosfeer* (= het versterkte broeikaseffect). Het gaat hierbij om veranderingen in gemiddelde waarden voor een aantal klimaatparameters in 2050, respectievelijk 2100, ten opzichte van de situatie in 1990 voor de situatie in en om Nederland. Het resultaat is een mogelijke toekomstige realisatie van klimaatparameters die van belang zijn voor de waterhuishouding in Nederland.

In dit hoofdstuk wordt per paragraaf tevens een beknopt beeld geschetst van de veranderingen in de beschouwde klimaatparameters die zich de afgelopen eeuw hebben voorgedaan. Dit is gedaan om de voor de komende eeuw geschatte veranderingen in het perspectief te kunnen plaatsen van veranderingen uit het verleden, waarbij activiteiten door de mens slechts een verwaarloosbare rol kunnen hebben gespeeld. De betreffende uitspraken zijn voor het grootste deel gebaseerd op 'De toestand van het klimaat in Nederland 1996', een uitgave van het KNMI.

Gezien de aard van de voor de Vierde Nota Waterhuishouding gewenste uitspraken en de hier gevolgde methodiek, zijn primair schattingen vereist van veranderingen van het karakter van de luchtcirculatiepatronen rond Nederland en van de gemiddelde temperatuur.

Bij gebrek aan informatie over het toekomstige karakter van de luchtcirculatiepatronen, wordt in deze rapportage de sleutelaanname gehanteerd dat de variabiliteit van de luchtstromingen en de frequentieverdeling van circulatiepatronen rond Nederland bij versterking van het broeikaseffect niet zullen wijzigen. Deze aanname vormt de basis voor het formuleren van uitspraken omtrent de temperatuur. Opgemerkt zij dat uitkomsten van klimaatmodellen de sleutelaanname niet onmiddellijk tegenspreken. Anderzijds moet er de nadruk op worden gelegd dat het Nederlandse klimaat zo gevoelig afhangt van heersende circulatiepatronen, dat marginale wijzigingen van circulatiepatronen, die ruim binnen de foutenmarge vallen van klimaatmodellen, van grote invloed kunnen zijn op temperatuur en andere elementen van het Nederlandse klimaat.

De schatting in dit rapport voor de gemiddelde temperatuurverandering in Nederland is tot stand gekomen door het combineren van resultaten van klimaatmodellen op grote ruimtelijke schalen met de sleutelaanname. Deze schatting vormt *vervolgens* de basis voor uitspraken omtrent de parameters ijsdikte en neerslag.

Windsnelheid leent zich niet voor bovengenoemde aanpak; de enige informatie inzake veranderingen in windsnelheid die gegeven kan worden, is een pragmatische werkschatting van de marges, gebaseerd op waargenomen variabiliteit.

De uitspraak voor de verandering in zeespiegelhoogte is *direct* gebaseerd op de schatting van de toekomstige wereld-gemiddelde verandering van de zeespiegelhoogte zoals die volgt uit experimenten met klimaatmodellen.

De verandering in de gemiddelde temperatuur op grote ruimtelijke schaal en die van zeespiegelhoogten, die de basis vormen van de overige voorspellingen, zijn verkregen uit 'Climate Change 1995; the Second Assessment Report' van het 'Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC'. De resultaten van dit IPCC-rapport zijn gebaseerd op experimenten met een aantal klimaatmodellen, waarbij is onderzocht hoe het wereldklimaat zal veranderen als de versterking van het broeikaseffect doorzet. De in het IPCC-rapport gepresenteerde marges worden hieronder weergegeven en ten behoeve van deze rapportage beschouwd als 95% betrouwbaarheidsintervallen.

Wereld-gemiddelde veranderingen in temperatuur en zeespiegelhoogte volgens IPCC

Deze eeuw: Over de afgelopen eeuw is de wereld-gemiddelde temperatuur gestegen met tussen de 0.3 en 0.6° Celsius, de wereld-gemiddelde zeespiegelhoogte met 10-25 centimeter. Van het laatste is circa de helft verklaard.

Komende eeuw: De wereld-gemiddelde temperatuur zal ten gevolge van activiteiten door de mens in 2100 gestegen zijn met 1-3.5° Celsius ten opzichte van 1990, met een centrale schatting van 2°. De toename rond het midden van de volgende eeuw zal 0.5-1.5° zijn. De temperatuuroename zal vooral gedurende de winter en in de nachttemperaturen tot uitdrukking komen. Dit impliceert dat de temperatuurcontrasten tussen dag en nacht, en tussen zomer en winter, kleiner worden.

Een toename van de wereld-gemiddelde temperatuur zal, via uitzetting van zeewater, smelten van gletsjers en ijskappen, en verandering van het volume van landijs op Antarctica en Groenland, zorgen voor een stijging van de zeespiegel. In 2100 zal de zeespiegel ten opzichte van 1990 gestegen zijn met 15-95 centimeter, met een centrale schatting van 50 centimeter. In 2050 zal de toename 5-40 centimeter zijn, met een centrale schatting van 20 centimeter.

Sectie A. Temperatuur, ijsdikte en neerslag in Nederland

A.1. Temperatuur

Deze eeuw: De gemiddelde temperatuur vertoont tot het midden van de jaren tachtig geen trend. Het afgelopen decennium is echter warmer dan normaal geweest, vooral gedurende de winter.

Komende eeuw: De temperatuuroename in Nederland door een versterking van het broeikaseffect wordt onder de sleutelaanname geschat op 0.5-2° Celsius in 2050 en op 1-4° in 2100, in beide gevallen ten opzichte van de situatie in 1990. De centrale schattingen voor deze jaren zijn respectievelijk 1° en 2°. Als de marges rond de centrale schatting beschouwd worden als 80% betrouwbaarheidsintervallen, is de kans 10% dat de temperatuuroename in 2100 in Nederland groter is dan 4° Celsius en 10% dat zij kleiner is dan 1°. De temperatuuroename zal over enkele decennia merkbaar aanwezig zijn in het aanhoudend wisselvallige Nederlandse weer. In dit variabele weer blijven hittegolven een zeldzaam verschijnsel, alhoewel zij gemiddeld wat warmer zijn dan nu. De strengste winters worden minder extreem koud en kunnen zich minder ver in het vroege voorjaar doorzetten. Rond 2050 kan de grens voor extreme winterkoude een aantal dagen naar het begin van het jaar verschoven zijn.

Relevantie

Temperatuur is in indirecte zin van belang voor de waterhuishouding. Schattingen van toekomstige temperaturen kunnen namelijk als invoer worden gebruikt van modellen waarmee ijsdikten en neerslagintensiteiten kunnen worden berekend.

Onderbouwing

Voor de toekomstige situatie in en om Nederland is kennis van de toekomstige frequentieverdeling van luchtcirculatie patronen bepalend. Als deze verdeling structureel wijzigt, kan de verandering van het klimaat van Nederland afwijken van de gemiddelde verandering op onze breedtegraad. Het is echter niet met voldoende nauwkeurigheid bekend hoe de verdeling van deze patronen zal wijzigen. Wel volgt uit de IPCC-resultaten dat de luchtstromingen en de opeenvolging van weertypen net als nu gekenmerkt zullen blijven door grote afwisseling.

Onder de *sleutelaanname van ongewijzigde luchtcirculatiepatronen* geldt dat de temperatuurstijging op onze breedtegraad niet veel afwijkt van de wereld-gemiddelde temperatuurstijging. De stijging in Nederland wordt in dit rapport geschat op 0.5-2° Celsius in 2050 en 1-4° in 2100, in beide gevallen ten opzichte van de situatie in 1990. De centrale schattingen voor deze jaren zijn respectievelijk 1° en 2°. Gezien de onzekerheid in de sleutelaanname en de gevoeligheid van het Nederlandse temperatuurklimaat voor systematische veranderingen in luchtcirculatiepatronen, moet de kans dat de gegeven marges rond de centrale schattingen worden overschreden zeker een factor twee groter worden ingeschat dan in geval van de voormelde wereld-gemiddelde situatie. Aangenomen wordt dat de kans rond de 10% is dat de temperatuurtoename in 2100 in Nederland groter is dan 4° Celsius en rond de 10% dat zij kleiner is dan 1°. Binnen de aanhoudende grilligheid van het Nederlandse weer zal de systematische opwarming de komende decennia slechts geleidelijk zichtbaar worden, en in 2050 merkbaar aanwezig zijn.

Uit de combinatie van de IPCC-voorspellingen met de sleutelaanname volgt dat ook in Nederland de temperatuurverhoging niet gelijkelijk verdeeld zal zijn over de dagen van het jaar, maar in de winter en gedurende de nacht waarschijnlijk sterker zal zijn dan in de zomer en gedurende de dag. 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.

Ook volgt uit genoemde combinatie dat strenge winters zeldzamer worden en dat de strengste winters iets minder extreem koud worden. Extreme winterkou zal zich minder ver in het vroege voorjaar kunnen doorzetten. Thans ligt de grens voor extreme winterkoude rond de eerste maart; rond 2050 kan deze grens een aantal dagen naar het begin van het jaar verschoven zijn. Zachte winters veranderen minder sterk van karakter dan strenge winters.

In het vervolg van deze sectie zullen klimaatveranderingen berekend worden voor temperatuurtoenames van 1, 2, en 4° Celsius (tabel 1). 1 en 4° Celsius kunnen beschouwd worden als een onder-, respectievelijk bovengrens van de toename van de gemiddelde temperatuur in Nederland rond het jaar 2100 ten opzichte van 1990. Een waarde van 1° Celsius kan tevens gezien worden als een centrale schatting voor de temperatuurtoename in het jaar 2050. De toename van 2° Celsius kan beschouwd worden als de centrale schatting voor de temperatuurverandering in het jaar 2100 ten opzichte van de situatie in 1990. In het vervolg van deze sectie is aangenomen dat de temperatuurtoename gelijkelijk verdeeld zal zijn over de dagen van het jaar, hetgeen een vereenvoudiging impliceert van de IPCC-uitspraken. Tevens wordt in het vervolg *de sleutelaanname van ongewijzigde variabiliteit* toegepast.

A.1.1. IJsvorming op oppervlaktewateren

Deze eeuw: Het jaarlijks aantal dagen waarop deze eeuw sprake is geweest van ijsvorming, vertoont een grillig verloop. Van een aanwijsbare trend is geen sprake. Het gemiddeld aantal dagen per jaar waarbij sprake was van een ijsdikte van minimaal 7, 12 of 15 centimeter, bedroeg deze eeuw respectievelijk 18, 12 en 9 dagen.

Komende eeuw: Het jaarlijks gemiddeld aantal dagen waarbij sprake is van een ijsdikte van minimaal 7, 12 of 15 centimeter zal de komende eeuw voor alle dikten in relatieve zin in gelijke mate afnemen. De centrale schatting voor de afname in 2050 en 2100 ten opzichte van 1990 is rond de 35%, respectievelijk 60%.

Relevantie

Een verandering van de gemiddelde wintertemperaturen zal gevolgen hebben voor het aantal dagen dat er sprake is van ijsbedekking op de kanalen en rivieren in en om Nederland. Voor deze rapportage zijn ijsdikten van 7, 12, en 15 centimeter als uitgangspunt genomen. Een ijsdikte van 7 centimeter is voldoende om te kunnen schaatsen. Bij ijsdikten van 12 (15) centimeter beginnen (ernstige) belemmeringen voor de scheepvaart op te treden.

Onderbouwing

IJsgroei en ijssmelt zijn afhankelijk van dagelijks-gemiddelde temperatuur, relatieve luchtvochtigheid, bewolgingsgraad, windsnelheid, en mate van bedekking van reeds gevormd ijs door sneeuw. In een ijsgroeimodel worden de verbanden tussen de genoemde variabelen gerepresenteerd en wordt uit de geaccumuleerde ijsgroei, de ijsdikte van dag tot dag berekend.

Ten behoeve van deze rapportage is het ijsgroeimodel van het KNMI gebruikt om het aantal dagen te schatten waarop in de toekomst sprake is van een bepaalde mate van ijsbedekking op oppervlaktewateren in en om Nederland. Met behulp van dagelijkse waarnemingen van genoemde variabelen gedurende de afgelopen eeuw en de hiervoor gepresenteerde schattingen inzake temperatuurveranderingen, zijn reeksen gegenereerd die het toekomstige klimaat in Nederland simuleren. Hierbij zijn de waargenomen temperaturen met de hierboven geschatte toenames verhoogd. Bij gebrek aan informatie over toekomstige veranderingen in de andere variabelen is, *in overeenstemming met de eerder geformuleerde sleutelaanname*, de volgorde van weergebeurtenissen in de reeks ongewijzigd gehouden. Voorts is de relatieve vochtigheid constant gehouden. Binnen de gehanteerde aannamen vormen de gemodificeerde reeksen een metafoor voor de toekomst. De reeksen van alle genoemde variabelen zijn vervolgens gebruikt als invoer van het ijsgroeimodel en is de ijsdikte berekend voor stilstaand water van 2 meter diep.

Het gemiddeld aantal dagen waarbij sprake is van een ijsdikte van meer dan 7, 12, of 15 centimeter neemt voor alle drie de temperatuurschattingen in relatieve zin in gelijke mate af. De afname bedraagt rond de 35, 60, en 85% voor toenames in de wintertemperatuur van respectievelijk 1, 2, en 4° Celsius (tabel 1). Overigens volgt uit de modeluitkomsten dat het karakter van situaties met langdurige ijsbedekking relatief weinig zal veranderen.

A.1.2.a. Jaarlijkse hoeveelheid neerslag

Deze eeuw: De jaarlijkse hoeveelheid neerslag lijkt de tweede helft van deze eeuw toegenomen.
Komende eeuw: Een centrale schatting voor de verandering in de jaarneerslag in 2050 en 2100 ten opzichte van 1990, is een toename van 3, respectievelijk 6%.

Relevantie

Een verandering in de jaarlijks gemiddelde hoeveelheid neerslag zal gevolgen hebben voor de grondwatervoorraad en, daardoor, voor kwelintensiteiten.

Onderbouwing

De neerslaghoeveelheid hangt in belangrijke mate af van de temperatuur: een warmere atmosfeer kan meer waterdamp bevatten en zo meer neerslag genereren. Daarnaast is er op onze breedten een relatie met de heersende luchtcirculatiepatronen. Deze patronen bepalen of het in de lucht aanwezige vocht uitregent en of regengebieden, die van west naar oost over de Atlantische Oceaan trekken, over ons land komen en, zo, bij ons neerslag brengen.

Ook de schattingen van veranderingen in neerslag in Nederland en in het stroomgebied van de Maas zijn tot stand gekomen *onder de sleutelaanname dat de luchtcirculatiepatronen niet wijzigen*. De schattingen volgen dan direct uit de waargenomen meteorologische verbanden tussen temperatuur en neerslag. Op basis van deze verbanden wordt de toename in de jaarlijkse neerslaghoeveelheid geschat op 3% per graad temperatuurstijging. Aangezien als centrale schattingen voor de temperatuurveranderingen rond de jaren 2050 en 2100 ten opzichte van 1990 respectievelijk 1° en 2° Celsius zijn gehanteerd, zijn de centrale schattingen voor de verwachte neerslagjaartoe name in Nederland en in het stroomgebied van de Maas rond het jaar 2050 en 2100 ten opzichte van 1990, 3, respectievelijk 6% (tabel 1).

A.1.2.b. Hoeveelheden zomer- en winterneerslag

Deze eeuw: De hoeveelheid neerslag lijkt deze eeuw vooral gedurende de winter te zijn toegenomen. Opvallend is de toename van de winterneerslag na 1950 en vooral na 1975. Winterhalfjaren met meer dan 500 millimeter neerslag hebben zich alleen na 1960 voorgedaan.
Komende eeuw: Gerekend wordt met een toename van de winterneerslag in Nederland en in de stroomgebieden van de Maas van 6 en 12% in 2050, respectievelijk 2100 ten opzichte van 1990. De hoeveelheid zomerneerslag zal in 2050 (2100) met naar schatting 1% (2%) zijn toegenomen, in kortere tijdsintervallen vallen, en een geringere ruimtelijke samenhang vertonen.

Relevantie

Een verandering in neerslag in Nederland en in de omliggende landen in de winter kan leiden tot andere overschrijdingkansen van extreme neerslaghoeveelheden. Informatie hierover is van belang omdat de hoogste waterstanden in de Nederlandse rivieren ook gedurende het winterseizoen optreden.

Neerslagveranderingen in de zomer kunnen van belang zijn in verband met het voorkomen van schade aan gewassen door droge perioden en zoutschade als gevolg van kwel, van aantasting van funderingen door lage grondwaterstanden, en van inklinken van veengebieden. Een afname van de ruimtelijke correlatie van neerslag, zoals die voor de zomer is voorzien, heeft een dempend effect op de fluctuaties van de waterstanden van de grote rivieren (zie ook A.1.2.d.).

Onderbouwing

De jaarlijkse neerslagtoename zal voor het grootste deel toe te wijzen zijn aan een toename van de neerslag gedurende het winterseizoen. Gerekend wordt met een toename van de winterneerslag in Nederland en in de stroomgebieden van de Nederlandse rivieren van 6% per graad temperatuurstijging. Dit leidt tot een centrale schatting voor de neerslagtoename in de winter rond het jaar 2050, respectievelijk 2100 ten opzichte van 1990 van 6, respectievelijk 12% (tabel 1). De toename is vooral toe te wijzen aan een grotere activiteit van depressies bij een westcirculatie en een grotere vochtinhoud van de lucht, waardoor de neerslag ten gevolge van overkomende fronten toe zal nemen. Dit impliceert dat vooral de hoeveelheid regen per regendag toeneemt.

Modelexperimenten geven geen bruikbaar signaal voor (winter)neerslag. Een opmerkelijke uitkomst is echter dat modelresultaten met en zonder medeneming van een toename van de atmosferische concentratie van (stof)deeltjes diametraal tegengestelde beelden kunnen opleveren van de neerslagveranderingen in Europa.

Hoewel veranderingen in neerslaghoeveelheid gedurende de zomer moeilijk te voorspellen zijn en waarschijnlijk klein blijven, is de verwachting dat het karakter van neerslag in de zomer anders zal zijn. Een eerste schatting zegt dat de relatieve frequentie van zomerse namiddagbuien (= convectieve neerslag) toe zal nemen ten opzichte van de neerslag ten gevolge van overkomende fronten, dat de intensiteit per bui eveneens toe zal nemen, maar dat tegelijkertijd de frequentie van droge perioden groter wordt. In de zomer zal de neerslag waarschijnlijk dus een buiiger karakter krijgen, zodat de neerslag in kortere tijdsintervallen valt dan nu en de regengebieden verbrokkelder optreden. Voorts worden de zwaarste buien heviger; zij zullen vaker gepaard gaan met onweer of hagel. Als beste schatting kan een toename in de zomerneerslag van 1% per graad temperatuurverhoging worden aangehouden, leidende tot een centrale schatting voor de neerslagtoename in de zomers rond het jaar 2100 ten opzichte van de situatie in 1990 van 2% (tabel 1). Gezien de relatief kleine toename en de grote onzekerheid in deze toename, is een afname van de neerslag in de zomer evenzeer mogelijk.

A.1.2.c. Extreme neerslag

Deze eeuw: Over veranderingen die de afgelopen eeuw zijn opgetreden in frequenties en intensiteiten van extreme neerslag in Nederland en de stroomgebieden van de grote Nederlandse rivieren, worden in 'De toestand van het klimaat in Nederland 1996' geen uitspraken gedaan.

Komende eeuw: Onder de aanname van ongewijzigde luchtcirculatiepatronen, kunnen de volgende centrale schattingen worden gehanteerd:

De gemiddelde toename in de neerslagintensiteit van zware zomerbuien rond het jaar 2050 (2100) ten opzichte van 1990 is 10% (20%).

De toename in de gemiddelde hoeveelheid 24-uurs-neerslag rond het jaar 2050 (2100) ten opzichte van 1990 is 3% (6%).

De toename van de extreme winterneerslag in langdurige neerslagsituaties in en om Nederland rond het jaar 2050 (2100) ten opzichte van 1990 is 10% (20%). De hoeveelheden extreme tiendaagse neerslag die momenteel in De Bilt eens in de één, tien, en honderd jaar vallen, zullen rond het midden (eind) van de volgende eeuw volgens de centrale schatting eens in de respectievelijk 0,7 (0,5) jaar, 6 (4) jaar, en 47 (25) jaar vallen. De hoeveelheden extreme tiendaagse neerslag die momenteel in het stroomgebied van de Maas eens in de één, tien, en honderd jaar vallen, zullen rond het midden (eind) van de volgende eeuw volgens de centrale schatting eens in de respectievelijk 0,7 (0,5) jaar, 5 (3) jaar, en 32 (14) jaar vallen.

Relevantie

Als de kans op extreme, kortdurende neerslaghoeveelheden gaat toenemen, zullen reeds gebouwde individuele rioleringen vaker het water niet meer af kunnen voeren, waardoor, bijvoorbeeld, straten vaker blank kunnen komen te staan. Dit speelt vooral in de zomer. Een maatgevende grootte is de regenhoeveelheid die gedurende een periode van in de orde van een kwartier valt.

Voor de dimensionering van gemengde rioolstelsels zijn overstortingsfrequenties mede van belang. Dat is het aantal keren per jaar dat een rioleringsstelsel ongezuiverd water op het oppervlaktewater loost. Als rioleringsstelsels vaker overbelast raken, zullen de overstortingsfrequenties toenemen. Een maatgevende grootte is de regenhoeveelheid die gedurende een periode van in de orde van uren valt.

Een toename in de frequenties van maatgevende hoeveelheden neerslag die gedurende een periode van in de orde van enkele dagen gedurende de winter vallen, kan leiden tot frequentere overbelasting van waterlopen, zoals sloten, en tot ondercapaciteit van gemalen. Ook zal een dergelijke verandering gevolgen hebben voor lager-gelegen (natuur)gebieden waar sprake is van een hoge grondwaterstand en van (tijdelijk) uittreidend grondwater (= zoete kwel).

Een grotere kans op extreme meerdaagse neerslaghoeveelheden in de stroomgebieden van de grote Nederlandse rivieren gedurende de winter kan bij ongewijzigde hydraulica leiden tot een grotere kans op extreme waterstanden van deze rivieren. Dit zou implicaties kunnen hebben voor dijkbelastingen en kwelintensiteiten. Een maatgevend tijdsinterval voor deze gebeurtenis, is de hoeveelheid neerslag die gedurende een tiendaagse periode valt.

Onderbouwing algemeen

De sleutelaanname van ongewijzigde variabiliteit impliceert dat het aantal extreme gebeurtenissen en de verdeling van die gebeurtenissen over ruimte en tijd ongewijzigd blijven, zodat de hier gepresenteerde veranderingen in langdurige neerslag het gevolg zijn van verandering van de activiteit van de individuele weerssystemen bij verandering van temperatuur. Daarom volgt ook uit de sleutelaanname dat de herhalingstijden van extreme hoeveelheden neerslag direct uit de geschatte neerslagveranderingen kunnen worden afgeleid. De verandering in overschrijdingsfrequenties van vaste neerslaggrenzen volgt dan uit het opschalen van de huidige verdeling van extreme hoeveelheden neerslag. De veranderingen zijn in tabel 1 aangegeven. Hierbij zijn de 30-minuten-, 24-uurs-, en 10-dagen-grenzen als uitgangspunt genomen.

Een belangrijke aanname in de hier gehanteerde methode is de impliciete veronderstelling dat de statistische structuur van hoge neerslaghoeveelheden behouden blijft. Dit houdt een aanscherping in van de aanname dat de frequentie van gebeurtenissen die extreme neerslag opleveren, constant blijft. Wijzigingen in de statistische structuur van extreme hoeveelheden zijn van drastische invloed op de waarden van de berekende herhalingstijden.

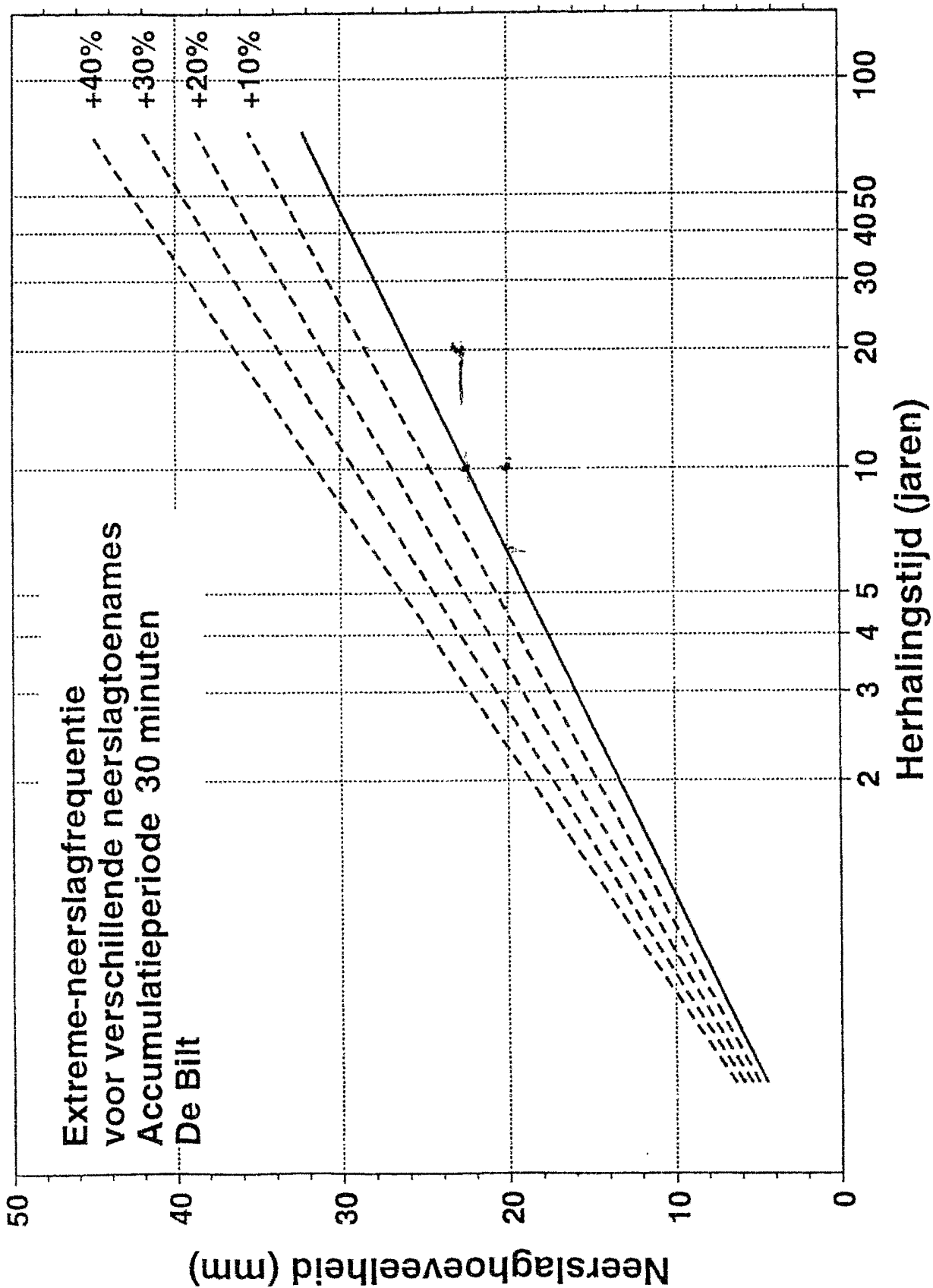
Onderbouwing neerslaghoeveelheid gedurende een periode van minuten tot een dag

Het aantal malen dat individuele rioleringen overlopen is sterk gecorreleerd aan het aantal zogeheten 'maatgevende buien' gedurende het zomerhalfjaar. Een maatgevende bui is gedefinieerd als de maximale hoeveelheid regen die gedurende een aantal minuten eens in een nader te bepalen aantal jaren valt en waarbij de riolen plaatselijk het water niet meer kunnen afvoeren. Meestal wordt een periode tussen de 5 en 60 minuten gekozen. In deze rapportage is het tijdsvenster van de betreffende maatgevende bui gesteld op 30 minuten. Gegeven de sleutelaanname is de parameter die van belang is bij dit tijdsvenster de neerslagintensiteit per individuele zomerbui.

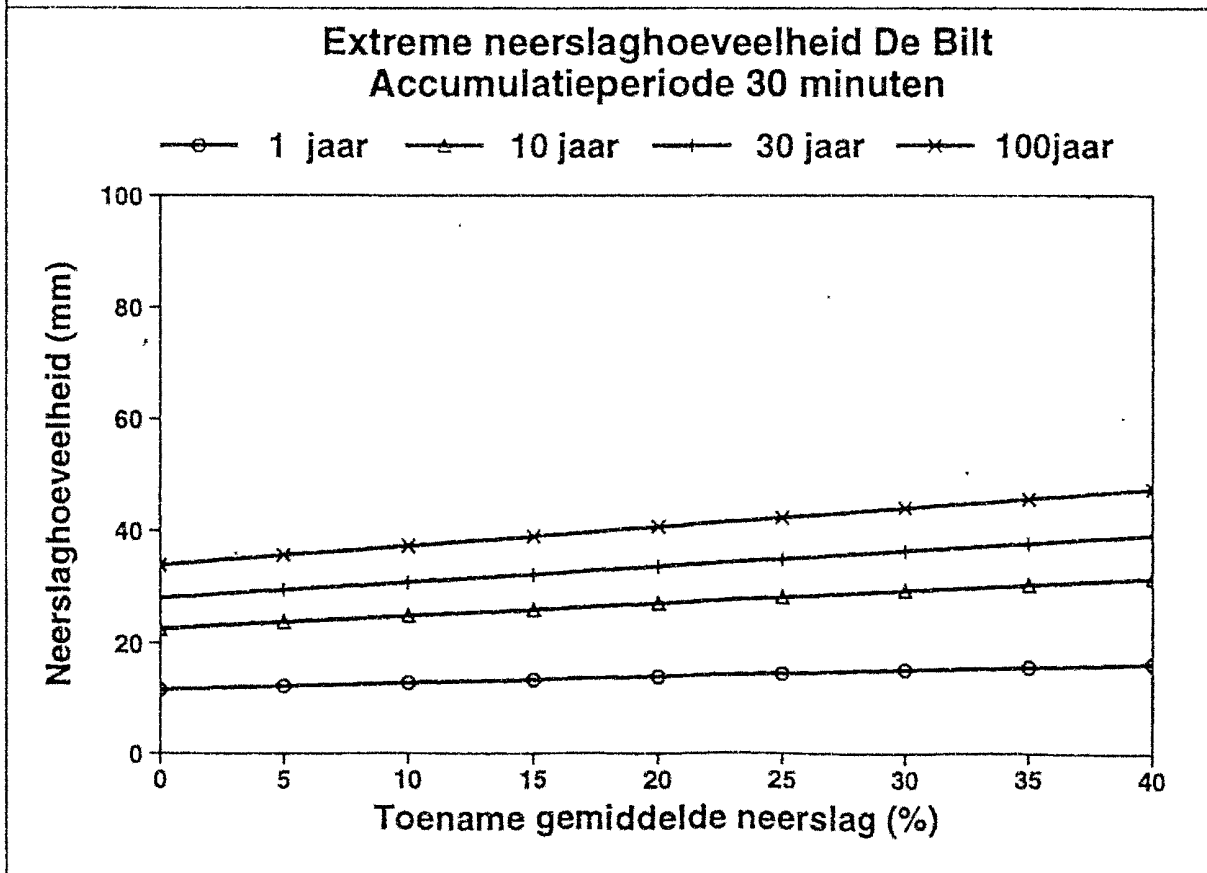
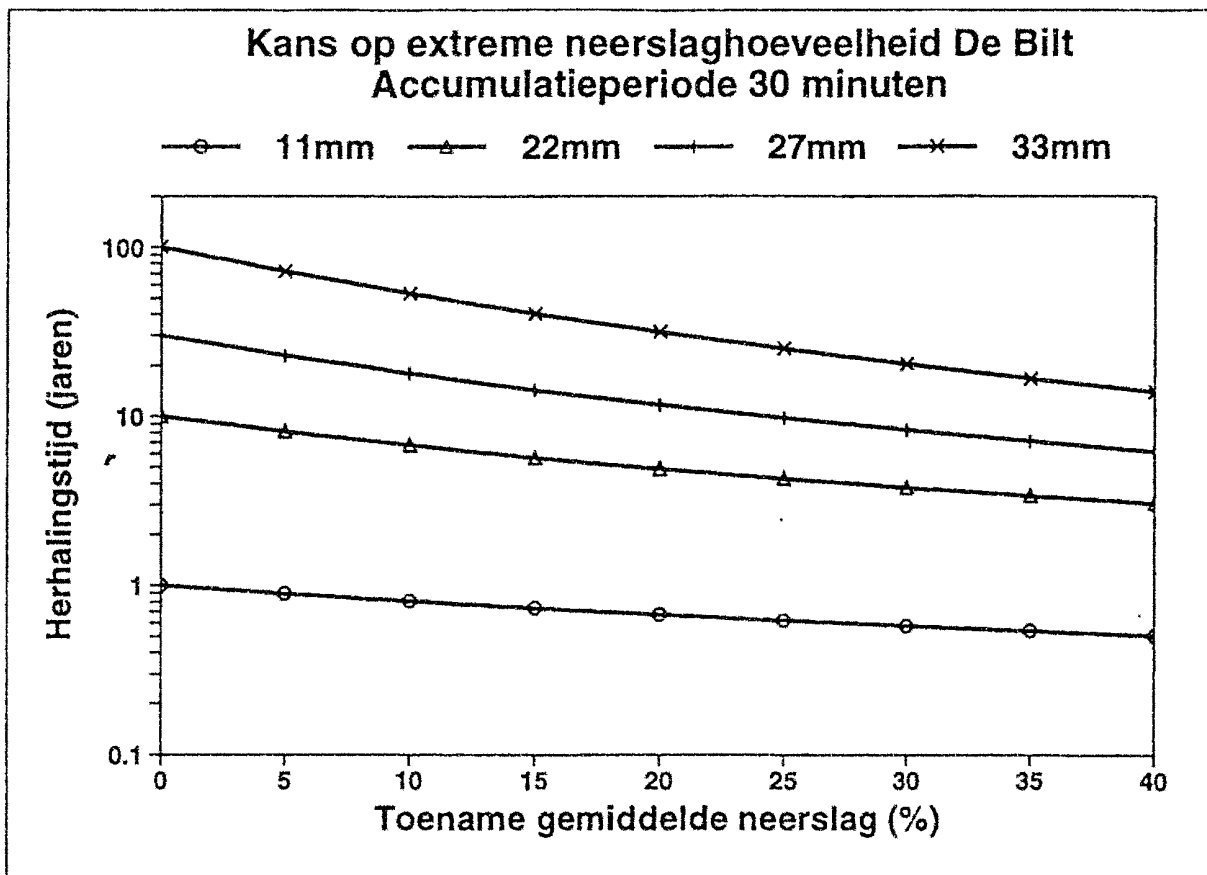
De intensiteit van zware zomerbuien blijkt direct gerelateerd aan de temperatuur. Een empirisch getoetste fysische beschrijving van het verband tussen temperatuur en de neerslagintensiteit van buien geeft aan dat de neerslagintensiteit van zware zomerbuien toeneemt met 10% per graad temperatuurverhoging. Dit leidt tot een centrale schatting voor de toename van de neerslagintensiteit per bui in 2050 en 2100 ten opzichte van 1990 van 10, respectievelijk 20%. Schattingen van veranderingen in de frequentie van het aantal buien met tijd en ruimte, zijn niet voorhanden. Indien gebruik wordt gemaakt van de sleutelaanname van ongewijzigde variabiliteit, gelden dezelfde schattingen ook voor extreme hoeveelheden per vast tijdsinterval, en volgen de toekomstige herhalingstijden van extreme hoeveelheden neerslag direct uit de geschatte veranderingen in de temperatuur. De veranderingen in overschrijdings-frequenties van vaste neerslaggrenzen volgen dan uit het opschalen van de huidige verdeling van extreme hoeveelheden. Zij zijn in de figuren 1, 2 en 3 op diverse wijze gepresenteerd, en in tabel 1 aangegeven. Een nadere explicatie van de figuren volgt hierna.

Frequenties van extreme hoeveelheden neerslag die gedurende 24 uur vallen geven een eerste indicatie van overstortingsfrequenties en van frequenties van het overlopen van sloten van akkers. Om veranderingen in extreme hoeveelheden 24-uurs-neerslag te berekenen, zijn de over de afgelopen decennia waargenomen hoeveelheden op vergelijkbare wijze als bij het aantal zware buien opgeschaald. In dit geval met de jaarlijks gemiddelde responsie van de totale hoeveelheid neerslag van +3% per graad temperatuuroptoe name. Onder de *sleutelaanname* van ongewijzigde luchtcirculatiepatronen, leidt dit tot een centrale schatting voor de toename van extreme hoeveelheden 24-uurs-neerslag rond het jaar 2050 en 2100 ten opzichte van de situatie in 1990 van 3, respectievelijk 6%. De veranderingen zijn in figuren 4, 5 en 6, en tabel 1 aangegeven.

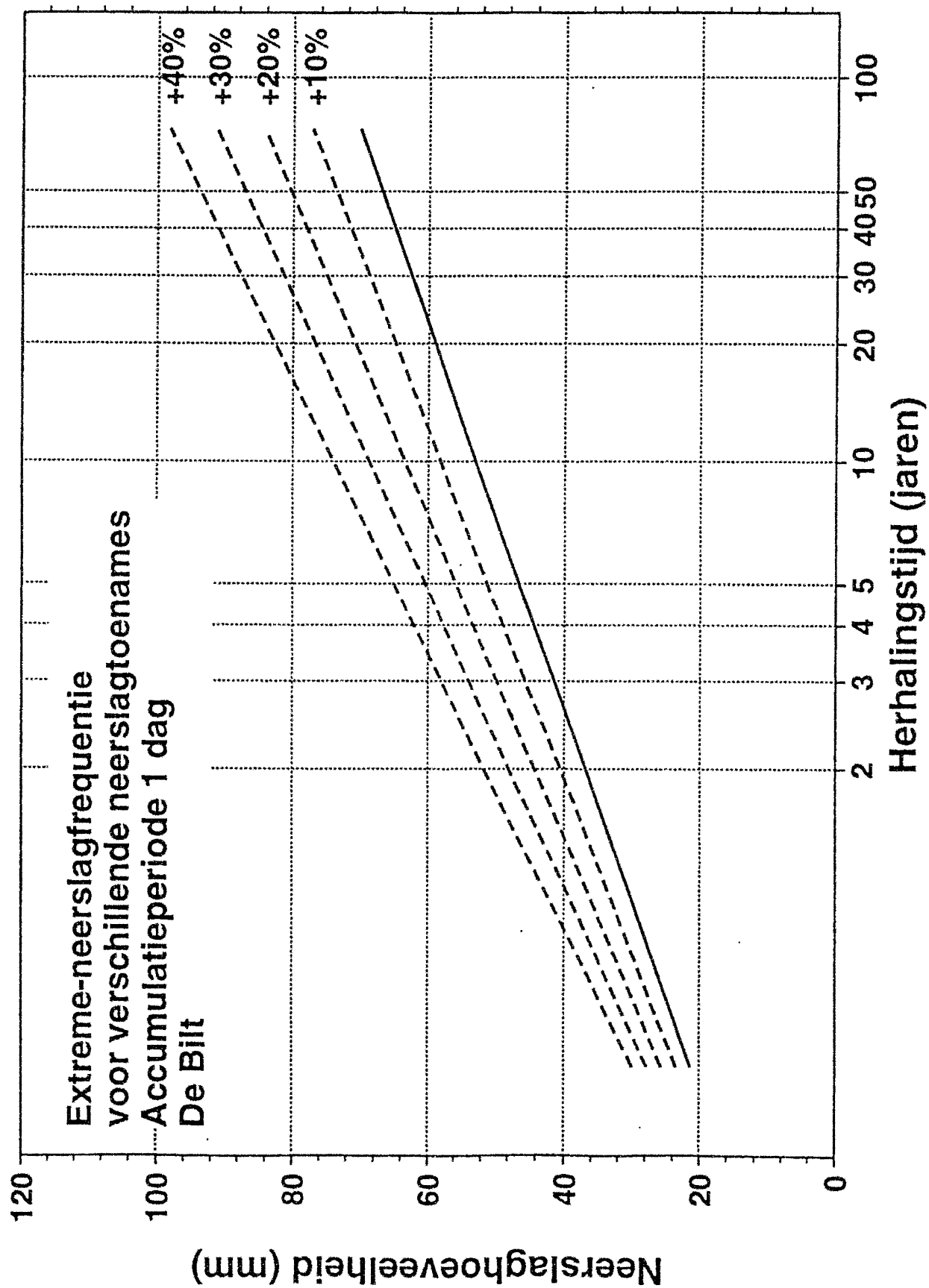
Figuur 1. Voor een toelichting wordt verwezen naar bladzijde 19.

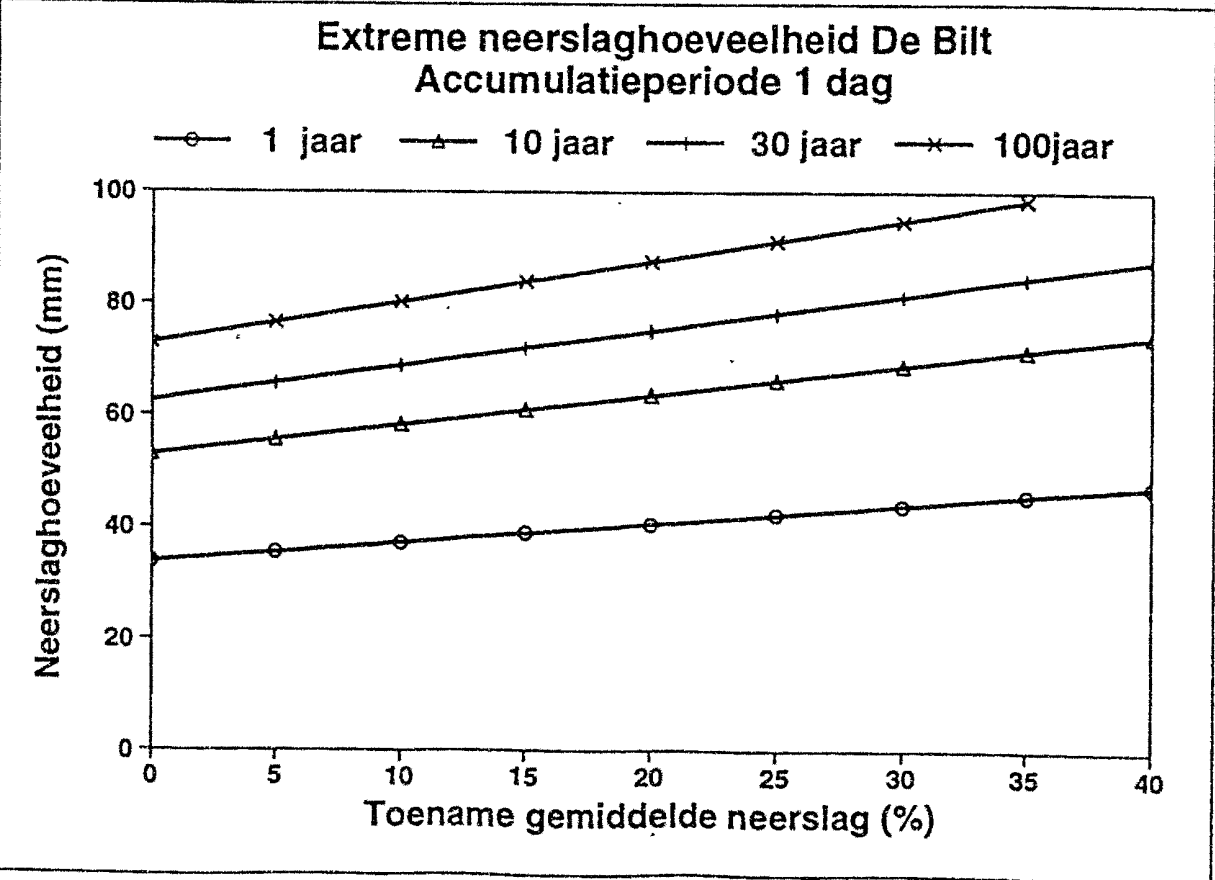
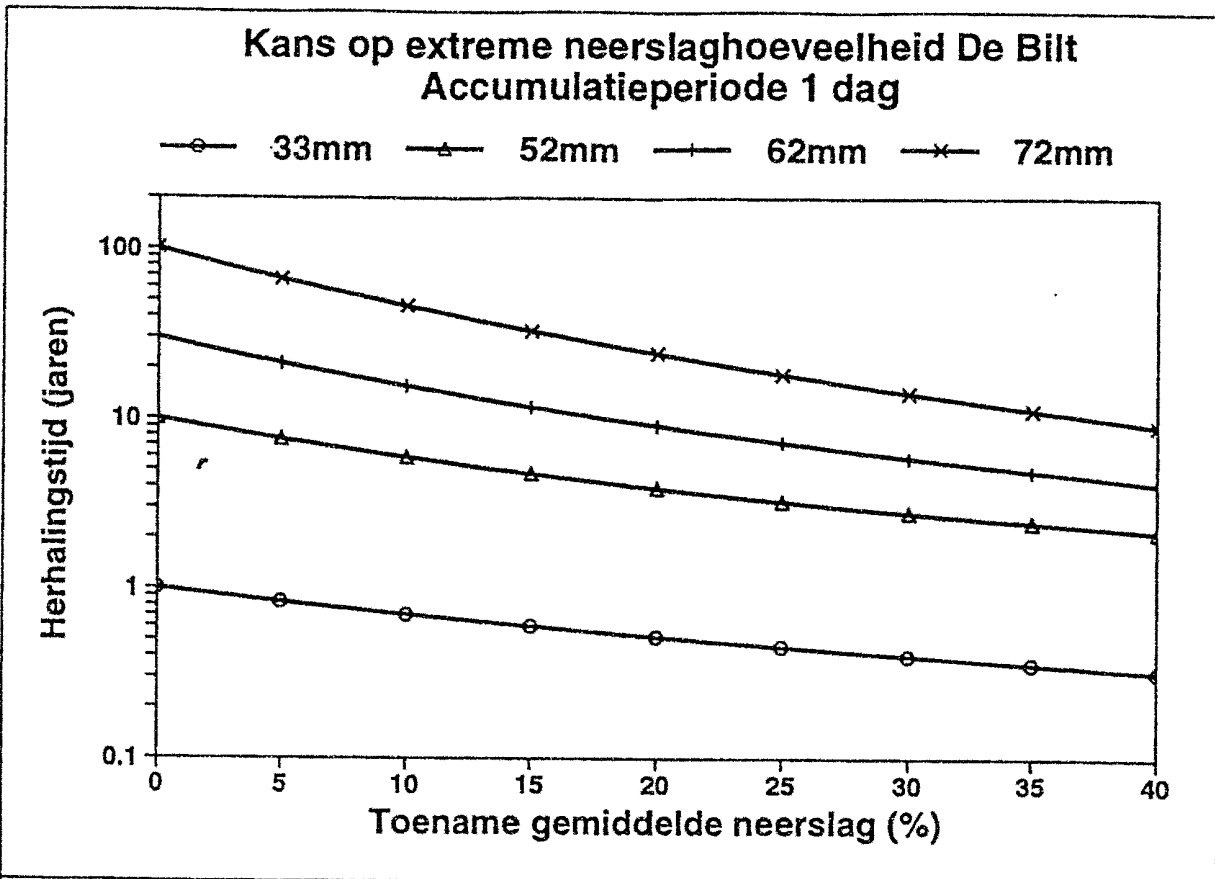


Figuren 2 (boven) en 3 (onder). Voor een toelichting wordt verwezen naar bladzijde 19.



Figuur 4. Voor een toelichting wordt verwezen naar bladzijde 19.





Onderbouwing winterneerslag gedurende een periode van in de orde van een week

Uit onderzoek volgt dat extreme winterneerslaghoeveelheden gedurende perioden van in de orde van een week optreden tijdens persistente westcirculaties. Het neerslag-temperatuurverband in dergelijke omstandigheden geeft aan dat de toename van de hoeveelheid bij vaste herhalingstijden gedurende de winter 10% per graad temperatuuroename zal bedragen, waarbij de helft wordt veroorzaakt door toename van de neerslagduur per natte dag en de helft door toename van de intensiteit. Over veranderingen in de frequenties van langdurige neerslagsituaties is binnen de sleutelaanname van ongewijzigde luchtcirculatiepatronen geen uitspraak te doen.

Het resultaat van 10% toename per graad is voor deze rapportage met behulp van statistische technieken bewerkt om tot uitspraken te komen over mogelijke veranderingen in langdurige extreme neerslag in de toekomst in De Bilt en in Visé. Hierbij is wederom uitgegaan van ongewijzigde frequenties van luchtcirculatiepatronen. *De berekende verandering voor overschrijdingskansen van extreme meerdaagse neerslaghoeveelheden gedurende de winter in De Bilt wordt in deze rapportage als indicatief beschouwd voor Nederland; de berekende verandering in Visé voor het Maasbekken.*

Explicatie grafiek extreme neerslaghoeveelheid

De hier gehanteerde statistische techniek is gebaseerd op de Gumbel-verdeling. Hierbij wordt de hoogste neerslaghoeveelheid gedurende een bepaalde periode per jaar, bijvoorbeeld van tiendaagse sommen in ieder *winterhalfjaar* (= de periode die loopt van 1 oktober tot 1 april van het erop volgende jaar), gerangschikt over de waarnemingsperiode, in ons geval de afgelopen 90 jaar. Wanneer een curve wordt *aangepast aan de gerangschikte gegevens* (= gefit), kunnen uitspraken worden afgeleid inzake de kans op een extreme hoeveelheid neerslag. In figuur 7 is de hoeveelheid extreme neerslag, die gedurende tien-daagse perioden in De Bilt is waargenomen, getransformeerd naar de verdeling van Gumbel weergegeven (de onderste lijn). Uit de figuur kan worden opgemaakt dat de grootste hoeveelheid tiendaagse neerslag die ooit gedurende genoemde periode gevallen is, 130 millimeter is. Op de horizontale as is de terugkeerperiode of omgekeerde waarschijnlijkheid weergegeven. Op basis van de *gefite* curve is aan de bovenzijde van de figuur af te lezen dat een hoeveelheid neerslag van 130 millimeter of meer eens in de ruim 60 jaar optreedt. Met andere woorden, als we veronderstellen dat de hoeveelheid regen die de afgelopen 90 jaar gedurende tiendaagse perioden is gevallen, representatief is voor het huidige klimaat, kan gesteld worden dat eens in de ruim 60 jaar in De Bilt de grens van 130 millimeter over een periode van tien dagen wordt overschreden. Zo kan ook afgelezen worden dat eens in de ruim 20 jaar 110 millimeter of meer regen zal vallen gedurende tien dagen.

Om na te gaan in hoeverre de frequenties van tiendaagse hoeveelheden neerslag in een toekomstig klimaat kunnen veranderen, zijn de aanpassingscoëfficiënten van de curve veranderd om toenames in de hoeveelheid neerslag van 10, 20, 30 en 40% na te bootsen. De middelste lijn op figuur 7 geeft aan wat de frequenties van de tiendaagse sommen zijn als de jaarlijkse hoeveelheid langdurige winterneerslag met de centrale schatting van 20% toe zou nemen. Terugkeerperioden van ruim 60 en ruim 20 jaar gelden dan voor hoeveelheden van meer dan 155 (nu: 130), respectievelijk meer dan 130 (nu: 110) millimeter. Evenzo valt 130 millimeter neerslag of meer dan eens in de bijna 20 (nu: ruim 60) jaar en 110 millimeter of meer eens in de ruim 7 (nu: ruim 20) jaar (zie ook figuren 8 en 9 waar de frequentiecurve in een andere vorm is gerepresenteerd). Figuren 1-3, respectievelijk 4-6 hebben dezelfde interpretatie als figuren 7-9.

Herhalingstijden extreme tiendaagse neerslaghoeveelheid; het Maasbekken

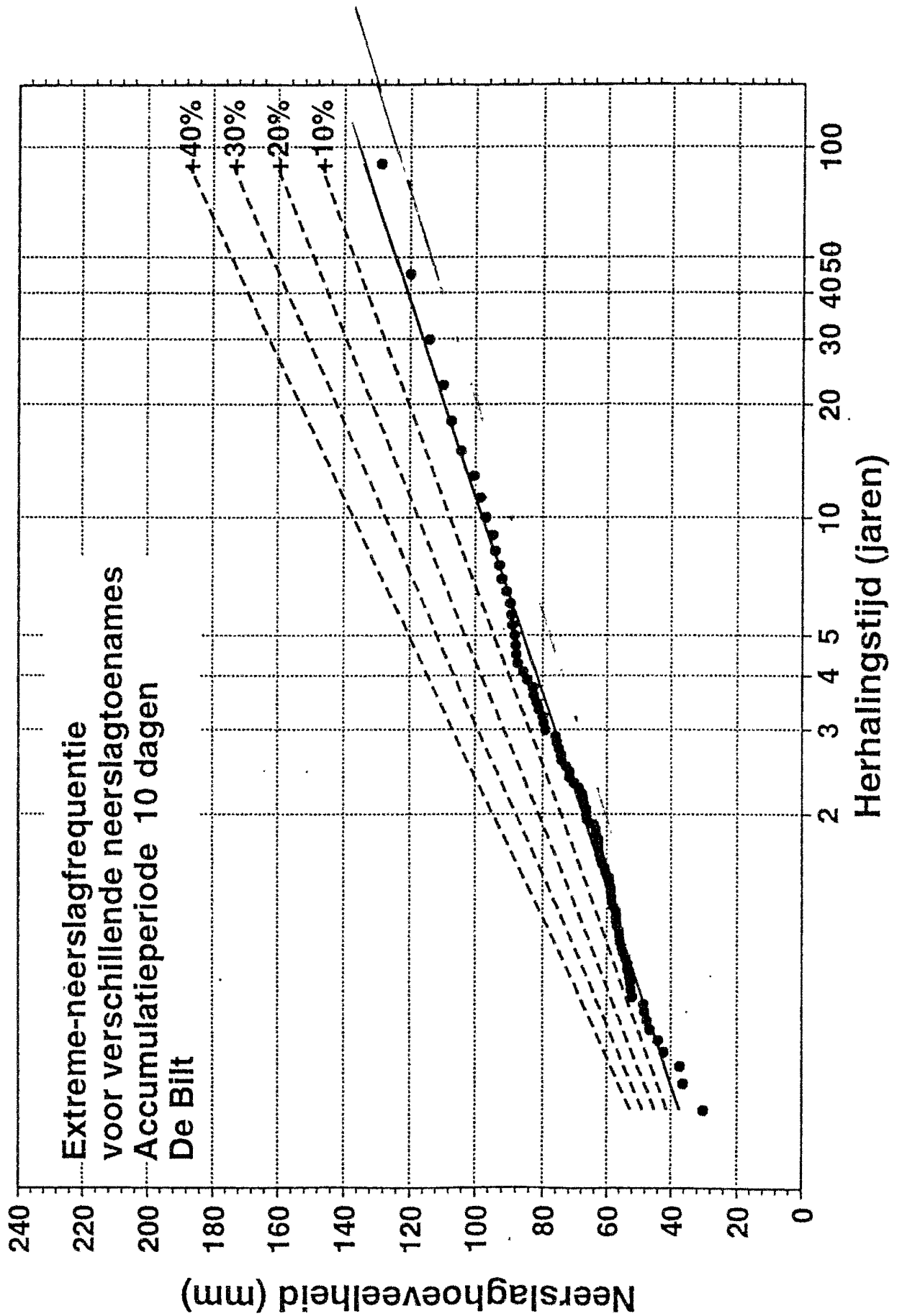
De extreme waterstanden van 1993 gaven aanleiding tot een uitgebreid rapport (Rapport van de Commissie Boertien). In dit rapport zijn door het KNMI en KMI herhalingstijden van extreme neerslaghoeveelheden geanalyseerd.

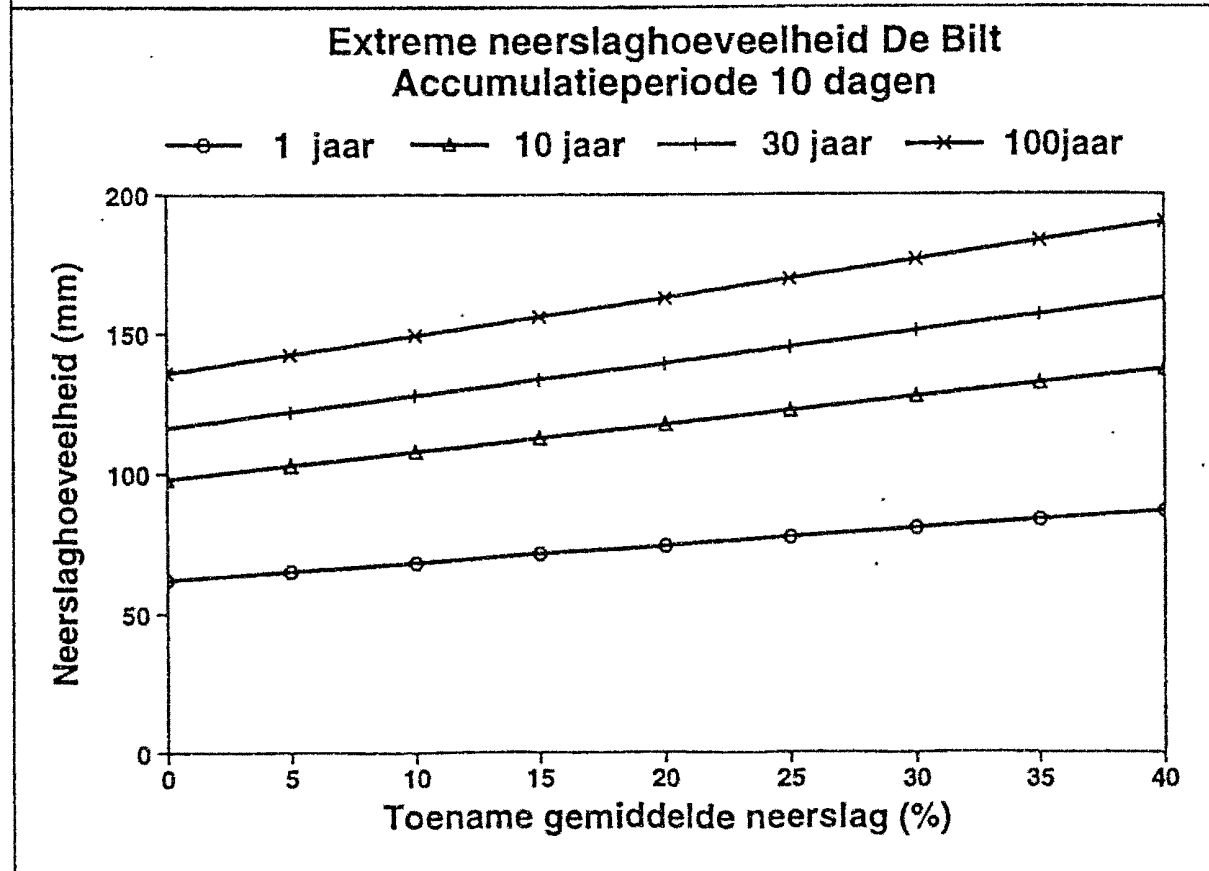
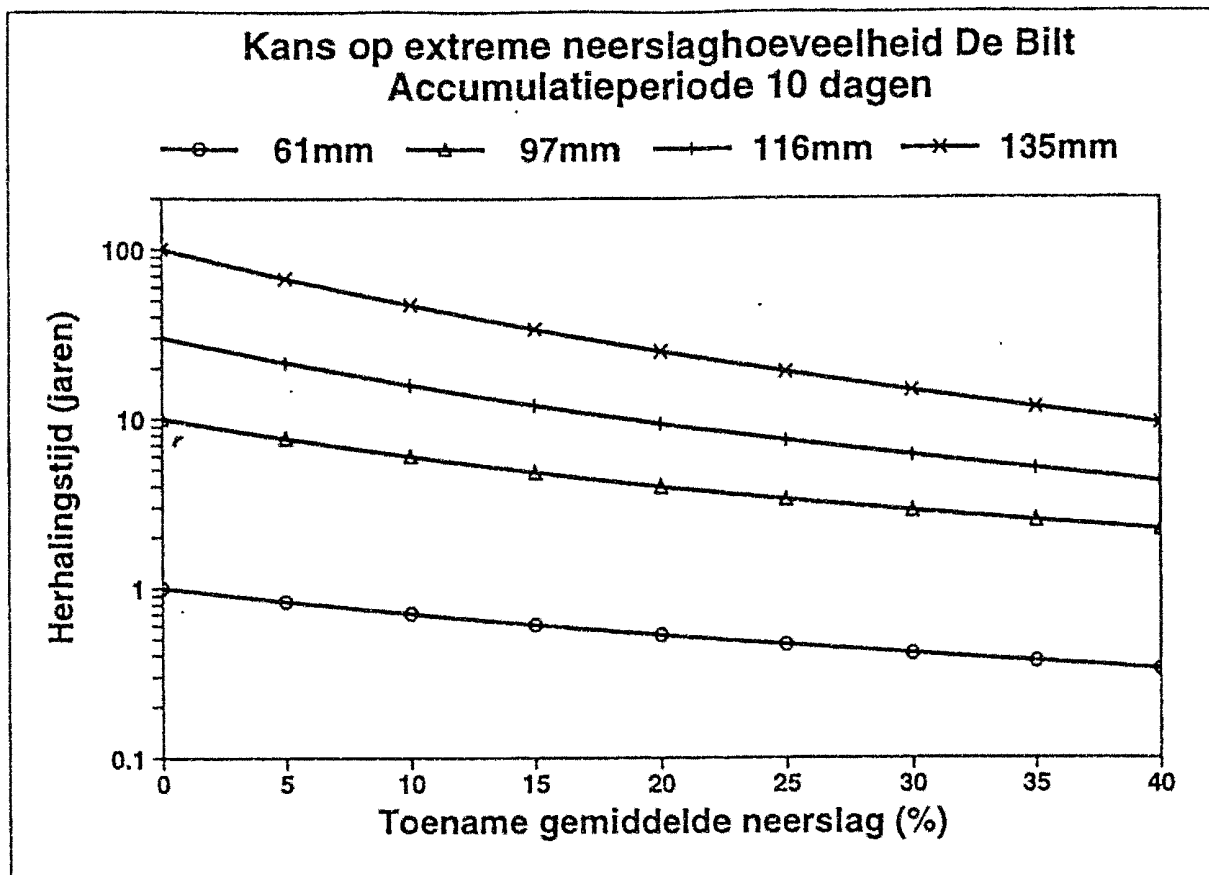
In het Rapport Boertien is een gegeneraliseerde vorm van de Gumbel-statistiek, de zogeheten 'GEV-statistiek', toegepast voor een aantal gebieden in België. Voor deze techniek werd gekozen omdat de waargenomen verdeling van langdurige neerslag in dit geval niet volgens de Gumbel-verdeling verdeeld bleek te zijn. Dit komt tot uiting als een kromming in de lijn van figuur 10. De analyse van de extreme neerslag in Visé is ten behoeve van de voorliggende rapportage gebruikt om te schatten hoe de tiendaagse neerslag in het Maasbekken zou kunnen veranderen in een warmer klimaat. Voor verdere details wordt verwezen naar het Rapport van de Commissie Boertien.

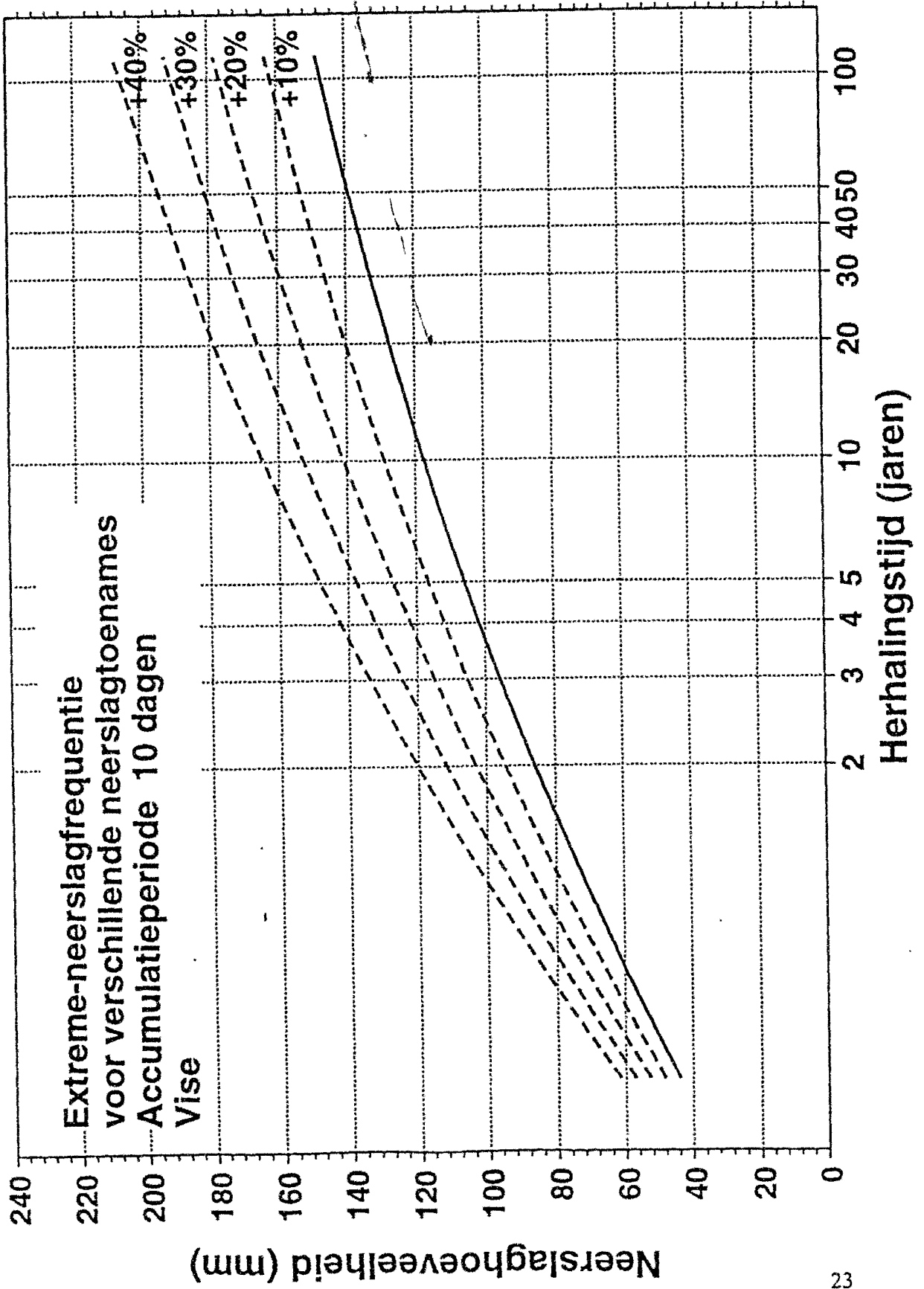
Met behulp van de in het Rapport Boertien vermelde coëfficiënten kon een curve gegenereerd worden die de extremen in het Maasbekken modelleert. Om een schatting te kunnen maken van de extreme neerslag in een toekomstig klimaat zijn de coëfficiënten opgeschaald met waarden die oplopen tot +40%. Dit laatste cijfer kan beschouwd worden als een bovengrens in de toename in de winterneerslag in het jaar 2100.

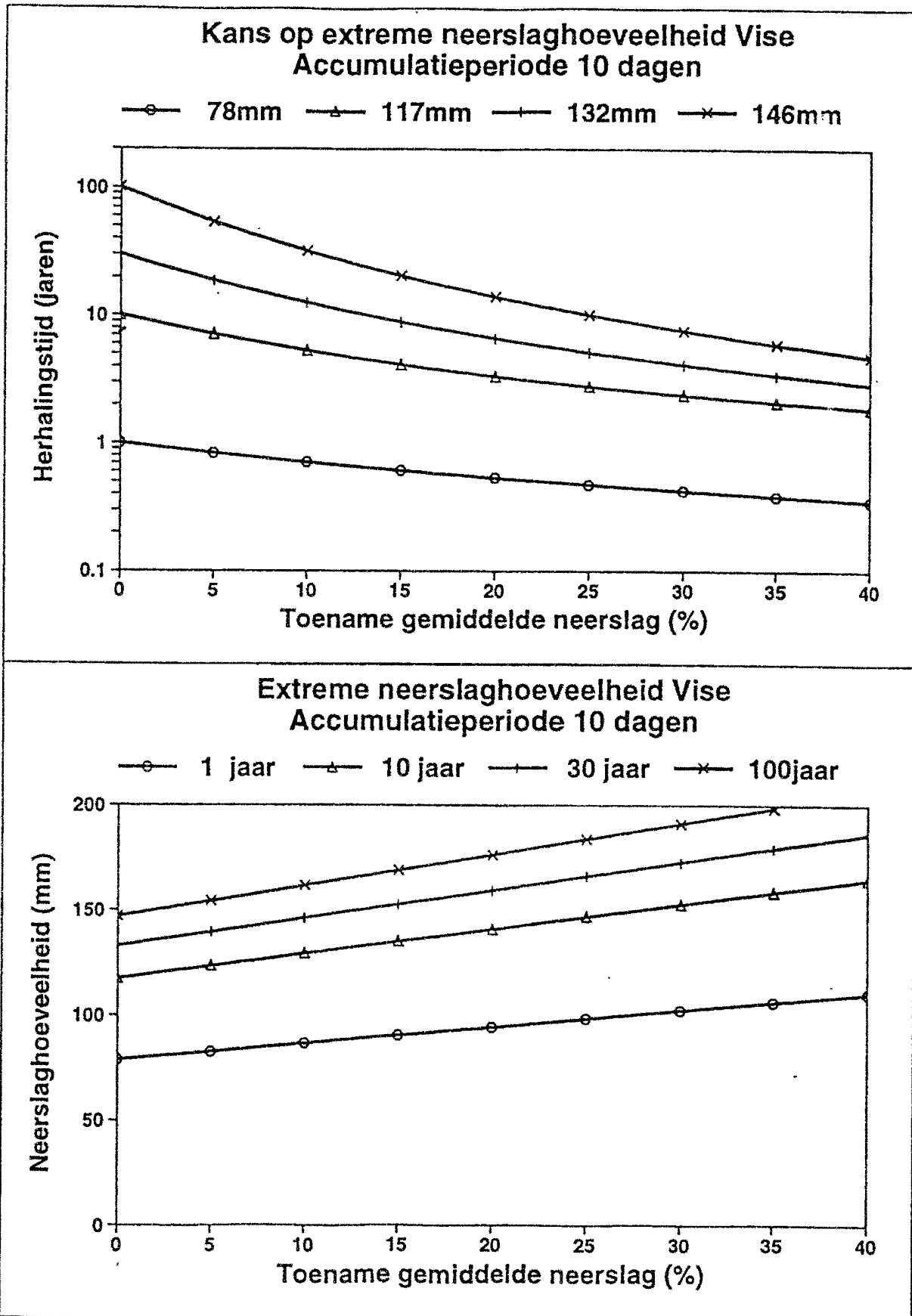
De verandering in de kans op tiendaagse neerslaghoeveelheden van meer dan 78, 117, en 146 millimeter, die momenteel eens in de respectievelijk 1, 10 en 100 jaar optreden, is in figuur 11 ingetekend. Getoond wordt hoe de kans op een extreme hoeveelheid tiendaagse neerslag van meer dan 146 millimeter toeneemt van ongeveer 1% (= eens per eeuw) nu tot ongeveer 7% (= eens per 14 jaar ofwel zeven keer per eeuw) in een toekomstige winter met 20% meer neerslag. In figuur 12 wordt getoond hoe de tiendaagse neerslaghoeveelheid bij een gegeven terugkeerperiode verandert als de jaarlijkse hoeveelheid neerslag met een bepaald percentage toeneemt. Af te lezen valt dat in het huidige klimaat eens per eeuw een hoeveelheid neerslag van 146 millimeter of meer valt, maar dat bij een toename in de gemiddelde neerslag van 20% eens per eeuw 175 millimeter of meer zal vallen.

Figuur 7. Voor een toelichting wordt verwezen naar bladzijde 19.









A.1.2.d. Neerslagtekort gedurende het zomerhalfjaar

Deze eeuw: *In het verloop van het grootste potentiële neerslagtekort tijdens het zomerhalfjaar is geen systematische trend te onderkennen. Over verleden periodes van langdurige droogte gedurende de zomer in de stroomgebieden van de grote Nederlandse rivieren worden in 'De toestand van het klimaat in Nederland 1996' geen uitspraken gedaan.*

Komende eeuw: *Een eerste-orde werkschatting is dat de komende eeuw zowel de natte als de droge perioden meer intens zullen zijn, waarbij de droge perioden langer kunnen duren, dat langdurige droogteperioden frequenter zullen optreden, en dat de verdamping in de stroomgebieden van de grote Nederlandse rivieren zal toenemen. De ruimtelijke correlatie van neerslag zal afnemen, hetgeen vooral tijdens de zomer een afvlakkend effect heeft op de fluctuaties in de 'run-off' naar de rivieren (zie ook A.1.2.b.).*

Relevantie

Een vergroting van het potentiële neerslagtekort in het zomerhalfjaar, kan leiden tot (tijdelijke) verdroging van die natuurwaarden en agrarische gebieden die voor wat betreft hun watervoorziening (voor een groot deel) afhankelijk zijn van neerslag. Dit zijn over het algemeen hoger gelegen gebieden.

Een gelijktijdige toename van langdurige droogteperioden en verdamping in de stroomgebieden van de grote Nederlandse rivieren kan leiden tot lagere waterstanden van deze rivieren in de zomer waardoor belemmeringen voor de scheepvaart, en problemen voor de landbouw en de drinkwatervoorziening kunnen optreden.

Onderbouwing

De verwachte toename van de zomertemperatuur heeft een hogere potentiële verdamping tot gevolg. Dit zal kunnen leiden tot een vergroting van het gemiddelde potentiële neerslagtekort en een grotere kans op droogte, waarbij de gemiddelde lengte van de droogteperiode en het maximale neerslagtekort kunnen veranderen.

Het neerslagscenario voor A.1.2.b. geeft aan dat zomerneerslag in de toekomst meer dan nu het geval is, door buien veroorzaakt wordt. Aangezien de verwachte toename van de hoeveelheid neerslag per bui groter is dan de toename van de hoeveelheid neerslag gemiddeld over de zomer, impliceert dit dat de totale hoeveelheid regen gedurende de zomer zich in kortere tijdsintervallen concentreert. Dientengevolge neemt de totale tijd zonder neerslag in de zomer toe.

Omdat in het geval van buien sprake is van een beperkte ruimtelijke correlatie, zal de ruimtelijke correlatie van neerslagpatronen gedurende de zomer waarschijnlijk kleiner worden. Dit betekent een afvlakking van de extremen in de gebiedsgemiddelde neerslag in grote bekkens als de Maas- en Rijnbeekens.

Op basis van de informatie inzake verdamping en neerslag in de toekomst kan als eerste-orde werkschatting worden gehanteerd dat op een gegeven plek in Nederland, zowel de natte als de droge perioden gedurende de zomer meer intens zullen zijn, waarbij de droge perioden langer zouden kunnen duren. Langdurige droogteperioden zullen frequenter kunnen optreden en de verdamping in de stroomgebieden van de grote Nederlandse rivieren zal kunnen toenemen. Kwantitatieve gegevens inzake overschrijdingskansen van neerslag in combinatie met droogte, c.q. verdamping, in de zomer in de stroomgebieden van de grote rivieren, zijn momenteel niet voorhanden.

Tabel 1. Temperatuur, ijsdikte en neerslag

	2050 centrale schatting; 2100 ondergrens	2050 bovengrens; 2100 centrale schatting	2100 bovengrens
jaartemperatuur in graden Celsius	+ 1	+ 2	+ 4
aantal dagen ijsdikte > 7 cm	- 33%	- 54%	- 81%
aantal dagen ijsdikte > 12 cm	- 34%	- 60%	- 85%
aantal dagen ijsdikte > 15 cm	- 37%	- 63%	- 88%
jaarneerslag	+ 3%	+ 6%	+ 12%
24-uur-neerslag in De Bilt bij vaste frequentie geldend voor het gehele jaar	+ 3%	+ 6%	+ 12%
herhaaltijd 1 jaar nu (= 33 mm)	0,9 jaar	0,8 jaar	0,65 jaar
herhaaltijd 10 jaar nu (= 52 mm)	8 jaar	7 jaar	5 jaar
herhaaltijd 100 jaar nu (= 72 mm)	78 jaar	62 jaar	40 jaar
zomerneerslag	+ 1%	+ 2%	+ 4%
intensiteit van zomerse buien (convectieve neerslag)	+ 10%	+ 20%	+ 40%
30-minuten-neerslag in De Bilt bij vaste frequentie geldend voor het gehele jaar	+ 10%	+ 20%	+ 40%
herhaaltijd 1 jaar nu (= 11 mm)	0,8 jaar	0,7 jaar	0,5 jaar
herhaaltijd 10 jaar nu (= 22 mm)	7 jaar	5 jaar	3 jaar
herhaaltijd 100 jaar nu (= 33 mm)	53 jaar	32 jaar	14 jaar
winterneerslag	+ 6%	+ 12%	+ 25%
langdurige winterneerslag	+ 10%	+ 20%	+ 40%
10-dagen-neerslag in De Bilt bij vaste frequentie geldend voor de winter	+ 10%	+ 20%	+ 40%
herhaaltijd 1 jaar nu (= 61 mm)	0,7 jaar	0,5 jaar	0,3 jaar
herhaaltijd 10 jaar nu (= 97 mm)	6 jaar	4 jaar	2 jaar
herhaaltijd 100 jaar nu (= 135 mm)	47 jaar	25 jaar	9 jaar
10-dagen-neerslag rond Visé bij vaste frequentie geldend voor de winter	+ 10%	+ 20%	+ 40%
herhaaltijd 1 jaar nu (= 78 mm)	0,7 jaar	0,5 jaar	0,35 jaar
herhaaltijd 10 jaar nu (= 117 mm)	5 jaar	3 jaar	2 jaar
herhaaltijd 100 jaar nu (= 146 mm)	32 jaar	14 jaar	5 jaar

Alle getallen ten opzichte van de situatie in 1990 en los van een eventueel waargenomen huidige trends voor zover ten gevolge van natuurlijke en onverklaarde oorzaken.

Sectie B. Zeespiegelhoogte en wind- en golfklimaat op de Noordzee

B.1. Gemiddelde zeespiegelhoogte

Deze eeuw: De jaargemiddelde zeespiegelhoogte aan onze kust is deze eeuw toegenomen met circa 20 centimeter. Deze stijging is waarschijnlijk voor het grootste deel het gevolg van uitzetting van het zeewater door een opwarming van de atmosfeer. De daling van de Nederlandse bodem heeft een bijdrage geleverd van enkele centimeters.

Komende eeuw: De zeespiegelstijging aan de kust van Nederland door een versterking van het broeikaseffect wordt geschat op 5-40 (20-100) centimeter in 2050 (2100) met als centrale schatting 20 (50) centimeter, in alle gevallen ten opzichte van de situatie in 1990. Als de marges beschouwd worden als 80% betrouwbaarheidsintervallen, is de kans 10% dat de zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust in 2100 groter is dan 100 centimeter en 10% dat zij kleiner is dan 20 centimeter. In deze schatting is het onverklaarde deel van de zeespiegelstijging van de afgelopen eeuw van ongeveer 10 centimeter, niet meegenomen.

Relevantie

Een toename in zeespiegelhoogte aan de Nederlandse kust kan de kustverdediging verzwakken doordat golven die momenteel breken op het strand in de toekomst (en bij ongewijzigde zandsuppletie) zullen breken op de duinen. Dit kan leiden tot (versterkte) dijk- en duinafkalving en, zo, tot gewijzigde sedimentatiesnelheden en -hoeveelheden aan de kust. Daarnaast kunnen veranderingen in zeespiegelhoogte leiden tot veranderingen in zoutwaterindringing in het kustgebied. Dit kan gevolgen hebben voor de zoetwaterlens onder de duinen, voor de benodigde capaciteit van de gemalen in lager gelegen gebieden in Nederland, en voor de intensiteit van zoute kwel.

Onderbouwing

Op basis van experimenten met klimaatmodellen is de gemiddelde zeespiegelstijging door een versterking van het broeikaseffect aan de kust van Nederland geschat op 5-40 centimeter in 2050 en op 20-100 centimeter in 2100, met centrale schattingen van 20, respectievelijk 50 centimeter, in alle gevallen ten opzichte van de situatie in 1990. Indien deze marges worden beschouwd als 80% betrouwbaarheidsintervallen, is de kans 10% is dat de zeespiegelstijging in 2100 in Nederland groter is dan 100 centimeter en 10% dat zij kleiner is dan 20 centimeter. De modelruns geven voor de afgelopen eeuw een wereld-gemiddelde stijging van de zeespiegel van 8 centimeter. Deze is lager dan de waargenomen stijging. Daar deze modellen niet alle processen omvatten die verantwoordelijk zijn voor fluctuaties in de wereld-gemiddelde zeespiegelhoogte, is het niet duidelijk welk gedeelte van dit verschil bij de voorspellingen inzake een zeespiegelstijging door een temperatuurtoename zou moeten worden opgeteld.

In tabel 2 zijn zeespiegelstijgingen van 20, 50, en 100 centimeter opgevoerd. 20 en 100 centimeter kunnen beschouwd worden als een onder-, respectievelijk bovengrens van de zeespiegelstijging in Nederland rond het jaar 2100 ten opzichte van 1990. Een waarde van 20 centimeter kan tevens gezien worden als een centrale schatting voor de broeikaseffect-gerelateerde zeespiegelstijging in het jaar 2050. De toename van 50 centimeter kan beschouwd worden als de centrale schatting voor de zeespiegelstijging in het jaar 2100 ten opzichte van de situatie in 1990. Dit impliceert dat er een versnelling voorzien wordt in de stijging van de zeespiegelhoogte gedurende de komende eeuw. Dit is in overeenstemming met voorspellingen die gebaseerd zijn op experimenten met klimaatmodellen.

In deze sectie wordt de sleutelaanname van ongewijzigde variabiliteit *niet* toegepast, daar de verandering van de zeespiegelhoogte niet afhangt van veranderingen in atmosferische circulatie.

B.2. Windklimaat op zee, inclusief stormen

Deze eeuw: *Waarnemingsreeksen van stormen en extreme wateropzet tonen geen aanwijsbare langjarige trend. Op basis hiervan kan geconcludeerd worden dat zich in het stormklimaat op de Noordzee deze eeuw geen duidelijke veranderingen hebben voorgedaan.*

Komende eeuw: *Een onderbouwde schatting inzake het toekomstige stormklimaat is niet te geven. Een eerste-orde werkschatting is dat de veranderingen in het stormklimaat tot 2100 niet meer zullen bedragen dan plus of min 5%, ongeacht de op dat moment gerealiseerde temperatuurverandering.*

Relevantie

Informatie over het toekomstige stormklimaat is van belang voor het bepalen van toekomstige grenspeilen, bijvoorbeeld voor de Noordzee bij Texel en voorts op het IJsselmeer bij het Kampereiland in verband met de afvoerproblematiek van de IJssel. Ook kan deze informatie gebruikt worden voor het bepalen van op overschrijdingsfrequenties gebaseerde hoogten van kust- en oeververdediging.

Informatie over veranderingen in windklimaat is verder nodig voor uitspraken over het optreden van stormvloeden aan de kust en op binnenwateren.

Onderbouwing

Een verandering van de verdeling van luchtcirculatiepatronen door een veranderend klimaat kan leiden tot veranderingen in het huidige wind- en stormklimaat. Er is geen betrouwbare informatie voorhanden inzake toekomstige veranderingen in het wind- en stormklimaat. Het hanteren van de sleutelaanname voegt hier niets aan toe. Als *werkhypothese* kan de natuurlijke variabiliteit van het lopend vijftienjaars-gemiddelde over de stormenreeks die teruggaat tot 1880 als *marge* worden aangehouden voor veranderingen die de komende eeuw in het stormklimaat kunnen optreden. Deze variabiliteit bedraagt plus of min 5%.

Beter onderbouwde uitspraken zijn thans niet mogelijk. De termijn waarop dit wel mogelijk is, is afhankelijk van het succes van de volgende generatie klimaatmodellen.

B.3. Golfklimaat

Deze eeuw: *Uit waarnemingen over de afgelopen twee decennia blijkt geen sprake van een significante trend in de gemiddelde golfhoogte op de Noordzee. Wel zijn er aanwijzingen dat er een verschuiving is opgetreden in de verdeling van extreme golfhoogten over het jaar, waarbij de extreme golfhoogten significant zijn toegenomen in februari en significant zijn afgenomen in november.*

Komende eeuw: *Als eerste-orde werkschatting kan een marge van plus of min 5% worden aangehouden, ongeacht de gerealiseerde temperatuurverandering (zie B.2.).*

Relevantie

De dominante factor, als het om schade aan kustverdedigingswerken gaat, zal zeespiegelstijging zijn. Veranderingen in het golfklimaat, waarbij men op de lange termijn ook aan veranderingen in het getijdenregime moet denken, kunnen echter ook leiden tot (versterkte) dijk- en duinafkalving en, zo, tot gewijzigde sedimentatiesnelheden en -hoeveelheden aan de kust. Veranderingen in golfklimaat leiden mogelijk ook tot schade aan booreilanden.

Onderbouwing

Het golfklimaat wordt bepaald door de heersende wind en door de diepte van de zee ter plaatse ten opzichte van de golfhoogte. Hoe dieper het water, hoe kleiner de invloed van diepte op de golven. Een stijging van de zeespiegel zal daarom slechts een verwaarloosbare invloed hebben op het golfklimaat van de open zee.

Een verandering van het windklimaat heeft wel een invloed op het golfklimaat. Zoals reeds is gezegd, is over het windklimaat in de toekomst geen uitspraak te doen.

Consistent met de schatting voor het windklimaat op de Noordzee, kan als eerste orde werkschatting voor het toekomstige golfklimaat op de Noordzee een marge van plus en min 5% worden aangehouden.

Tabel 2. Zeespiegelhoogte, golfklimaat, en stormen op zee

	2050 centrale schatting; 2100 ondergrens	2050 bovengrens; 2100 centrale schatting	2100 bovengrens
zeespiegelhoogte in centimeters	+ 20	+ 50	+ 100
stormfrequenties	tussen de plus en min 5% voor alle temperatuurschattingen		
golfklimaat	tussen de plus en min 5% voor alle temperatuurschattingen		

Alle getallen ten opzichte van de situatie in 1990 en los van eventueel waargenomen huidige trends voor zover ten gevolge van natuurlijke en onverklaarde oorzaken.

3. Tot slot

Deze rapportage geeft een richtlijn voor veranderingen in diverse klimaatparameters ten gevolge van de versterking van het broeikaseffect door activiteiten van de mens (zie tabellen 1 en 2). De gegeven getallen representeren de huidige stand van de wetenschappelijke kennis. Zij dekken evenwel slechts een deel van de hydrologisch relevante klimaatgrootheden. De uitspraken zijn grotendeels te karakteriseren als 'what-if'-kennis; zij leunen zwaar op enkele niet getoetste aannamen.

Voor het kwantitatief beschrijven van veranderingen die met frequenties samenhangen, of van grootheden zoals verdamping, is een robuust onderzoeksprogramma van lange duur nodig. Een dergelijk programma kan de te leveren uitspraken dichter bij de gevraagde of gewenste uitspraken brengen. Voor een goede meteorologische onderbouwing van toekomstige versies van de Nota Waterhuishouding is het uitvoeren van een dergelijk programma een noodzakelijke voorwaarde.

De adviezen van dr ir T. Brandsma, dr ir T.A. Buishand en ir H.R.A. Wessels hebben een waardevolle bijdrage geleverd aan de totstandkoming van dit rapport.

Relevante literatuur

- Beersma, J., et al., Survey of Climate Change Scenario Studies; a programming study, Dutch National Research Programme on Global Air Pollution and Climate Change, report no. 410 200 002 (1996).
- Bouws, E., et al., On the increasing wave height in the North Atlantic Ocean, Bulletin of the American Meteorological Society 77, 2275 (1996).
- Brandsma, T., Hydrologische gevolgen van klimaatverandering; een gevoeligheidsstudie voor Nederland, Proefschrift, ISBN 90-800089-7-4, Technische Universiteit Delft (1995).
- Brandsma, T., Overstortingsfrequenties en klimaatverandering, H2O 26, 722 (1993).
- Buishand, T.A., en T. Brandsma, Rainfall generator for the Rhine catchment; a feasibility study, Technical report TR-183, KNMI, De Bilt (1996).
- Buishand, T.A., Neerslaggegevens bij rioleringsberekeningen, H2O 17, 142 (1984).
- Houghton, J.T., et al., Climate Change 1995 - The Science of Climate Change: Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge (1996).
- Jannink, D., Trends in de golfhoogten van K13, IJmuiden en Europlatform, Memorandum WM-94-16, KNMI, De Bilt (1994).
- Jilderda, R., et al., Neerslag in het stroomgebied van de Maas in januari 1995; waarnemingen en verificatie van modelprognoses, Technisch rapport TR-178, KNMI, De Bilt (1995).
- Klein Tank, A.M.G., en T.A. Buishand, Klimaatverandering: realistische scenario's voor impact-studies, H2O 29, 630 (1996).
- Können, G.P., en W. Fransen (red.), De toestand van het klimaat in Nederland 1996, KNMI, De Bilt (1996).
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Onderzoek Watersnood Maas, Hoofdrapport 'De Maas meester' en 14 deelrapporten (*Rapport van de Commissie Boertien*), Waterloopkundig Laboratorium, Emmeloord (1994).
- Parmet, B., et al., Impact of climate change on the discharge of the river Rhine, in Climate Change Research: Evaluation and Policy Implications, S. zwerver, R.S.A.R. van Rompaey, M.T.J. Kok and M.M. Berk (Eds.), Elsevier, Amsterdam (1995).
- Parmet, B. en M. Burgdorffer, Extreme Discharges of the Meuse in The Netherlands: 1993, 1995 and 2100 - Operational Forecasting and Long Term Expectations, Phys. Chem. Earth, 20, 485 (1995).
- Reuvekamp, A., en A.M.G. Klein Tank, Probability estimates of extreme winter rainfall in a changing climate, Change 30, June 1996.
- Rider, K.M., et al., Simulations of the response of the ocean waves in the North Atlantic and North Sea to CO2 doubling in the atmosphere, Scientific report; WR 96-05, ISBN 90-369-2109-0, KNMI, De Bilt (1996).

Appendix 1. Klimaatparameters van belang voor de 'Nota Waterhuishouding'

Onderstaande tabel geeft de verschillende verbanden weer tussen mogelijke, dan wel verwachte langdurige veranderingen in die *meteorologische grootheden* (= klimaatparameters) waarover hierboven is gemeld dat uitspraken mogelijk zijn, en de gevolgen hiervan die van belang kunnen zijn voor de 'Nota Waterhuishouding'.

<u>Te onderzoeken klimaatparameter...</u>	<u>...dienend als invoer voor uitspraken over</u>
1) temperatuur aan de bodem (0,1 m) en op 1,5 meter hoogte gedurende het groeiseizoen, in combinatie met extremen zoals vorstfrequenties	groeisnelheid van planten, mineralisatiesnelheid in de bodem, schade aan gewassen, verdamping oppervlaktewateren
2) frequentie en verdeling in de tijd van het aantal ijsdagen	ijsvorming op oppervlaktewateren, recreatie, belemmeringen scheepvaart
3) jaarlijkse hoeveelheid neerslag	grondwatervoorraad, kwelintensiteiten
4) n-daagse gebiedsneerslag in de zomer in verband met droogteperioden	lage afvoer van waterlopen van diverse grootte, schade aan gewassen door zoute kwel, inklinken van veengebieden, aantasting van funderingen, extreme waterstanden
5) intensiteit en frequentie van convectieve buien in de zomer	ontwerpnormen van individuele riolen en van rioleringsstelsels
6) neerslagtekort in het droge halfjaar	verdroging natuurwaarden en akkers, kwaliteit oppervlaktewater
7) n-daagse gebiedsneerslag in de winter in verband met natte perioden	hoge afvoer van waterlopen van diverse grootte, verzuring laaggelegen gebieden, hoge grondwaterstand stedelijke gebieden, dijkbelastingen, kwelintensiteiten
8) zeespiegelstijging	zoutwaterindringing, duin- en dijkafkalving, bemaling, het Waddengebied
9) veranderingen in windklimaat en stormen op zee in combinatie met zeespiegelstijging	hoogwater aan de kust, stormvloed
10) zeespiegelstijging in combinatie met veranderingen in golfklimaat	schade aan kust- en oeververdedigingswerken

Appendix 2. Suggesties voor verder onderzoek (NW5)

Structureel onderzoek is noodzakelijk om de robuustheid van de in deze rapportage gepresenteerde getallen te verhogen en de aansluiting van resultaten van klimaatonderzoek op hydrologische parameters te garanderen. In het projectvoorstel dat ten grondslag ligt aan het onderzoek waarover hier wordt gerapporteerd, worden enkele suggesties voor verder onderzoek gedaan. Deze suggesties worden hieronder wederom gepresenteerd:

Neerslag en verdamping

- 1) De ontwikkeling van een 'neerslaggenerator' om klimaatveranderingen in de Rijn- en Maasbekkens te simuleren.

Als wordt besloten tot de ontwikkeling van een 'neerslaggenerator' voor klimaatveranderingen kan de volgende informatie worden verkregen:

- n-daagse gebiedsneerslag in de zomer in verband met droogteperioden; vereist uitbreiding 'neerslaggenerator' voor wat betreft neerslag, verdamping en straling
- intensiteit en frequentie van convectieve buien in de zomer: maatgevende bui, inclusief frequentie
- neerslagtekort in het droge halfjaar; vereist uitbreiding 'neerslaggenerator' voor wat betreft neerslagtekort
- n-daagse gebiedsneerslag in de winter in verband met natte perioden (Duitsland, empirisch)
- neerslagoverschot in het natte halfjaar; vereist uitbreiding 'neerslaggenerator' voor wat betreft neerslagoverschot
- testen van meerdaagse extreme-neerslagstatistiek op basis van dagwaarden
- intensiteit en frequentie van lange droogteperioden; vereist uitbreiding 'neerslaggenerator' voor wat betreft neerslagtekort en verdamping

Zeespiegelstijging en golf- en windklimaat op de Noordzee, inclusief stormen:

- 2) Onderzoek naar veranderingen in windklimaat.

Onderzoek naar het toekomstige windklimaat zou zich moeten concentreren op extreme windsnelheden (stormen) en op het verband met stormvloed en het golfklimaat op de Noordzee.

- 3) Onderzoek naar extreme waterstanden (stormvloed)

- 4) Onderzoek naar zeespiegelstijging in combinatie met veranderingen in golfklimaat

Omdat voornoemd onderzoek een langjarig karakter heeft, wordt op deze plek benadrukt dat het betreffende onderzoek op korte termijn dient te zijn aangevangen, willen de resultaten van dergelijk onderzoek als basis kunnen dienen voor de klimaat-gerelateerde onderwerpen van de Vijfde Nota Waterhuishouding.

Uitgever:

Projectteam vierde Nota waterhuishouding
p/a 5 De Vries projectsecretaris
Postbus 20907
2500 EX Den Haag
telefoon 070-311 43 69
fax 070-311 43 00

Waarbestellingen:

Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee
t.a.v. de Bibliotheek
Postbus 20907
2500 EX Den Haag
fax 070-311 43 21

E-mail: BENNINK@RIKZ.RWS.MINVENW.NL