



Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

KNMI '14

klimaatscenario's
voor Nederland

Leidraad voor
professionals in
klimaatadaptatie



Inhoudsopgave

> Kerncijfers	6
> KNMI'14-klimaatscenario's samengevat	7
> Inleiding	8
KNMI'14-klimaatscenario's	8
Waarom nu nieuwe scenario's?	8
Scenario's plus natuurlijke variaties	8
Scenario-onderscheid: G versus W	9
Scenario-onderscheid: L versus H	9
> Temperatuur	10
> Neerslag	12
> Zeespiegel	14
> Wind en storm	16
> Zicht, mist, hagel en onweer	17
> Wolken, zonnestraling, verdamping en droogte	18
> Klimaat van 2030	19
> Weer van de toekomst	20
> KNMI'14-klimaatscenario's in de praktijk	22
Waterbeheer	22
Stedelijke leefomgeving	23
Landbouw en natuur	26
> KNMI'14 en KNMI'o6 vergeleken	27
> Achtergrondinformatie	28
Definitie klimaatscenario	28
Huidige stand van de wetenschap	28
Scenario-onderscheid: waarom zo?	29
Hoe zijn de scenario's gemaakt?	30
Verminderde temperatuurstijging sinds 1998	30
KNMI'14-klimaatscenario's en IPCC-uitstootscenario's	30
Klimaatscenario's voor landen in de omgeving	31
> Referenties	34
> Colofon	35

Het KNMI is het nationaal data- en kennisinstituut voor klimaatwetenschap en adviseert als agentschap van het ministerie van Infrastructuur en Milieu de Nederlandse overheid op het gebied van klimaatverandering. Als wetenschappelijk instituut draagt het KNMI bij aan het internationale klimaatonderzoek en vertegenwoordigt het Nederland in het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Het KNMI is constant bezig met het optimaliseren van het meetnetwerk en verfijnen van klimaatmodellen, die draaien op de KNMI supercomputer. Deze modelberekeningen vormen de basis van de KNMI-klimaatscenario's voor Nederland. Hiermee biedt het KNMI een toegepast product voor beleidsadviseurs en andere professionals om in een veranderend klimaat adequate besluiten te kunnen nemen voor een veilig en duurzaam Nederland.



Seizoen ^{A)}	Variabele	Indicator	Klimaat ^{B)} 1951-1980	Klimaat ^{B)} 1981-2010 = referentie- periode	
Wereldwijde temperatuurstijging:					
Verandering van luchtstromingspatroon:					
Jaar	Zeespiegel bij Noordzeekust	absolute niveau ^{E)}	4 cm beneden NAP	3 cm boven NAP	
		tempo van verandering	1,2 mm/jaar	2,0 mm/jaar	
	Temperatuur	gemiddelde	9,2 °C	10,1 °C	
	Neerslag	gemiddelde hoeveelheid	774 mm	851 mm	
	Zonnestraling	zonnestraling	346 kJ/cm ^{2F)}	354 kJ/cm ²	
	Verdamping	potentiële verdamping (Makkink)	534 mm ^{F)}	559 mm	
	Mist	aantal uren met zicht minder dan 1 km	412 uur	300 uur ^{G)}	
Winter	Temperatuur	gemiddelde	2,4 °C	3,4 °C	
		jaar-op-jaar variaties ^{H)}	-	± 2,6 °C	
		dagmaximum	5,1 °C	6,1 °C	
		dagminimum	-0,3 °C	0,5 °C	
		koudste winterdag per jaar	-7,5 °C	-5,9 °C	
		zachtste winterdag per jaar	10,3 °C	11,1 °C	
		aantal vorstdagen (min temp < 0°C)	42 dagen	38 dagen	
	Neerslag	aantal ijsdagen (max temp < 0°C)	11 dagen	7,2 dagen	
		gemiddelde hoeveelheid	188 mm	211 mm	
		jaar-op-jaar variaties ^{H)}	-	± 96 mm	
		10-daagse neerslagsom die eens in de 10 jaar wordt overschreden ^{I)}	80 mm	89 mm	
		aantal natte dagen (≥ 0,1 mm)	56 dagen	55 dagen	
	Wind	aantal dagen ≥ 10 mm	4,1 dagen	5,3 dagen	
		gemiddelde windsnelheid	-	6,9 m/s	
		hoogste daggemiddelde windsnelheid per jaar	-	15 m/s	
	aantal dagen met windrichting tussen zuid en west	44 dagen	49 dagen		
Lente	Temperatuur	gemiddelde	8,3 °C	9,5 °C	
	Neerslag	gemiddelde hoeveelheid	148 mm	173 mm	
Zomer	Temperatuur	gemiddelde	16,1 °C	17,0 °C	
		jaar-op-jaar variaties ^{H)}	-	± 1,4 °C	
		dagmaximum	20,7 °C	21,9 °C	
		dagminimum	11,2 °C	11,9 °C	
		koelste zomerdag per jaar	10,3 °C	11,1 °C	
		warmste zomerdag per jaar	23,2 °C	24,7 °C	
		aantal zomerse dagen (max temp ≥ 25°C)	13 dagen	21 dagen	
	Neerslag	aantal tropische nachten (min temp ≥ 20°C)	< 0,1 dagen	0,1 dagen	
		gemiddelde hoeveelheid	224 mm	224 mm	
		jaar-op-jaar variaties ^{H)}	-	± 113 mm	
		dagelijkse hoeveelheid die eens in de 10 jaar wordt overschreden ^{I)}	44 mm	44 mm	
		maximum uurneerslag per jaar	14,9 mm/uur	15,1 mm/uur	
		aantal natte dagen (≥ 0,1 mm)	45 dagen	43 dagen	
	Zonnestraling	aantal dagen ≥ 20 mm	1,6 dagen	1,7 dagen	
		zonnestraling	149 kJ/cm ^{2F)}	153 kJ/cm ²	
		Vochtigheid	relatieve vochtigheid	78%	77%
		Verdamping	potentiële verdamping (Makkink)	253 mm ^{F)}	266 mm
Droogte	gemiddeld hoogste neerslagtekort gedurende het groeiseizoen ^{J)}	140 mm	144 mm		
	hoogste neerslagtekort dat eens in de 10 jaar wordt overschreden ^{I)}	-	230 mm		
Herfst	Temperatuur	gemiddelde	10,0 °C	10,6 °C	
	Neerslag	gemiddelde hoeveelheid	214 mm	245 mm	

Scenario veranderingen voor het klimaat rond 2050^o (2036-2065)				Scenario veranderingen voor het klimaat rond 2085^o (2071-2100)				Natuurlijke variaties gemiddeld over 30 jaar ^{D)}
G_L	G_H	W_L	W_H	G_L	G_H	W_L	W_H	
+1 °C	+1 °C	+2 °C	+2 °C	+1,5 °C	+1,5 °C	+3,5 °C	+3,5 °C	
Lage waarde	Hoge waarde	Lage waarde	Hoge waarde	Lage waarde	Hoge waarde	Lage waarde	Hoge waarde	
+15 tot +30 cm	+15 tot +30 cm	+20 tot +40 cm	+20 tot +40 cm	+25 tot +60 cm	+25 tot +60 cm	+45 tot +80 cm	+45 tot +80 cm	± 1,4 cm
+1 tot +5,5 mm/jaar	+1 tot +5,5 mm/jaar	+3,5 tot +7,5 mm/jaar	+3,5 tot +7,5 mm/jaar	+1 tot +7,5 mm/jaar	+1 tot +7,5 mm/jaar	+4 tot +10,5 mm/jaar	+4 tot +10,5 mm/jaar	± 1,4 mm/jaar
+1,0 °C	+1,4 °C	+2,0 °C	+2,3 °C	+1,3 °C	+1,7 °C	+2,8 °C	+3,7 °C	± 0,16 °C
+4%	+2,5%	+5,5%	+5%	+5%	+5%	+6%	+7%	± 4,2%
+0,6%	+1,6%	-0,8%	+1,2%	-0,5%	+1,1%	-0,8%	+1,4%	± 1,6%
+3%	+5%	+4%	+7%	+2,5%	+5,5%	+6%	+10%	± 1,9%
-110 uur	-110 uur	-110 uur	-110 uur	-120 uur	-120 uur	-120 uur	-120 uur	± 39 uur
+1,1 °C	+1,6 °C	+2,1 °C	+2,7 °C	+1,3 °C	+2,0 °C	+2,8 °C	+4,1 °C	± 0,48 °C
-8%	-16%	-13%	-20%	-10%	-17%	-13%	-24%	-
+1,0 °C	+1,6 °C	+2,0 °C	+2,5 °C	+1,2 °C	+2,0 °C	+2,7 °C	+3,8 °C	± 0,46 °C
+1,1 °C	+1,7 °C	+2,2 °C	+2,8 °C	+1,4 °C	+2,1 °C	+3,0 °C	+4,4 °C	± 0,51 °C
+2,0 °C	+3,6 °C	+3,9 °C	+5,1 °C	+2,7 °C	+4,1 °C	+4,8 °C	+7,3 °C	± 0,91 °C
+0,6 °C	+0,9 °C	+1,7 °C	+1,7 °C	+1,0 °C	+1,2 °C	+2,4 °C	+3,1 °C	± 0,42 °C
-30%	-45%	-50%	-60%	-35%	-50%	-60%	-80%	± 9,5%
-50%	-70%	-70%	-90%	-60%	-80%	-80%	< -90%	± 31%
+3%	+8%	+8%	+17%	+4,5%	+12%	+11%	+30%	± 8,3%
+4,5%	+9%	+10%	+17%	+6,5%	+12%	+14%	+30%	-
+6%	+10%	+12%	+17%	+8%	+12%	+16%	+25%	± 11%
-0,3%	+1,4%	-0,4%	+2,4%	+0,3%	+1,0%	-0,9%	+3%	± 4,7%
+9,5%	+19%	+20%	+35%	+14%	+24%	+30%	+60%	± 14%
-1,1%	+0,5%	-2,5%	+0,9%	-2,0%	+0,5%	-2,5%	+2,2%	± 3,6%
-3%	-1,4%	-3%	0,0%	-2,0%	-0,9%	-1,8%	+2,0%	± 3,9%
-1,4%	+3%	-1,7%	+4,5%	-1,6%	+6,5%	-6,5%	+4%	± 6,4%
+0,9 °C	+1,1 °C	+1,8 °C	+2,1 °C	+1,2 °C	+1,5 °C	+2,4 °C	+3,1 °C	± 0,24 °C
+4,5%	+2,3%	+11%	+9%	+8%	+7,5%	+13%	+12%	± 8,0%
+1,0 °C	+1,4 °C	+1,7 °C	+2,3 °C	+1,2 °C	+1,7 °C	+2,7 °C	+3,7 °C	± 0,25 °C
+3,5%	+7,5%	+4%	+9,5%	+5%	+9%	+6,5%	+14%	-
+0,9 °C	+1,4 °C	+1,5 °C	+2,3 °C	+1,0 °C	+1,7 °C	+2,6 °C	+3,8 °C	± 0,35 °C
+1,1 °C	+1,3 °C	+1,9 °C	+2,2 °C	+1,4 °C	+1,7 °C	+2,9 °C	+3,7 °C	± 0,18 °C
+0,9 °C	+1,1 °C	+1,6 °C	+2,0 °C	+1,0 °C	+1,4 °C	+2,3 °C	+3,1 °C	± 0,43 °C
+1,4 °C	+1,9 °C	+2,3 °C	+3,3 °C	+2,0 °C	+2,6 °C	+3,6 °C	+4,9 °C	± 0,52 °C
+22%	+35%	+40%	+70%	+30%	+50%	+90%	+130%	± 13%
+0,5%	+0,6%	+1,4%	+2,2%	+0,9%	+1,2%	+4,5%	+7,5%	-
+1,2%	-8%	+1,4%	-13%	+1,0%	-8%	-4,5%	-23%	± 9,2%
+2,1 tot +5%	-2,5 tot +1,0%	+1,4 tot +7%	-4 tot +2,2%	+1,2 tot +5,5%	-2,5 tot +1,9%	-0,6 tot +9%	-8,5 tot +2,3%	-
+1,7 tot +10%	+2,0 tot +13%	+3 tot +21%	+2,5 tot +22%	+2,5 tot +15%	+2,5 tot +17%	+5 tot +35%	+5 tot +40%	±15%
+5,5 tot +11%	+7 tot +14%	+12 tot +23%	+13 tot +25%	+8 tot +16%	+9 tot +19%	+19 tot +40%	+22 tot +45%	±14%
+0,5%	-5,5%	+0,7%	-10%	+2,1%	-5,5%	+4%	-16%	± 6,4%
+4,5 tot +18%	-4,5 tot +10%	+6 tot +30%	-8,5 tot +14%	+5 tot +23%	-3,5 tot +14%	+2,5 tot +35%	-15 tot +14%	± 24%
+2,1%	+5%	+1,0%	+6,5%	+0,9%	+5,5%	+3%	+9,5%	± 2,4%
-0,6%	-2,0%	+0,1%	-2,5%	0,0%	-2,0%	-0,6%	-3%	± 0,86%
+4%	+7%	+4%	+11%	+3,5%	+8,5%	+8%	+15%	± 2,8%
+4,5%	+20%	+0,7%	+30%	+1,0%	+19%	+13%	+50%	± 13%
+5%	+17%	+4,5%	+25%	+3,5%	+17%	+14%	+40%	-
+1,1 °C	+1,3 °C	+2,2 °C	+2,3 °C	+1,6 °C	+1,6 °C	+3,3 °C	+3,8 °C	±0,27 °C
+7%	+8%	+3%	+7,5%	+7,5%	+9%	+5,5%	+12%	± 9,0%



Kerncijfers

> Toelichting

De tabel toont de gevolgen voor het klimaat in Nederland van door de mens veroorzaakte wereldwijde klimaatverandering. Daarbij is een schatting gegeven van het aandeel van natuurlijke variaties in het klimaat, schematisch weergegeven met de grijze cirkels in de figuren op bladzijde 7.

Als de klimaatverandering volgens de scenario's groot is ten opzichte van de verandering door natuurlijke variaties, dan verschilt het klimaat in de toekomst duidelijk van dat in de afgelopen eeuw. Als de klimaatverandering volgens de scenario's relatief klein is, dan blijven de natuurlijke variaties de belangrijkste factor bij adaptatie.

De tabel maakt het mogelijk de trend in de toekomstige veranderingen van het klimaat te vergelijken met de waargenomen trend in het verleden. De toekomstige veranderingen moeten daartoe worden vergeleken met het verschil tussen de gemiddelden voor 1951-1980 en voor de referentieperiode 1981-2010.

> Rekenvoorbeeld

In de laatste kolom van de tabel staan de natuurlijke variaties in het klimaat gemiddeld over 30 jaar. De getallen in deze kolom fungeren als referentie voor de berekende veranderingen volgens de vier klimaatscenario's. In het toekomstige klimaat komen deze positieve en negatieve variaties van de 30-jaar gemiddelde waarden bovenop de veranderingen volgens de scenario's. In de figuren met de scenario's verderop in dit rapport zijn ze weergegeven als grijze banden. Deze 30-jaar natuurlijke variaties veranderen niet in de scenario's. Dagelijkse, maandelijkse en jaarlijkse variaties blijven natuurlijk ook bestaan, en die kunnen voor sommige indicatoren wel veranderen in de toekomst. Voor de temperatuur neemt bijvoorbeeld bij alle scenario's de jaar-op-jaar variatie in de winter af en in de zomer toe. Een rekenvoorbeeld kan een en ander verduidelijken.



Stel dat informatie is gewenst over de hoeveelheid neerslag in een bepaalde winter rond 2050 bij het W_L -scenario. Daarvoor moet rekening worden gehouden met:

- 1) de gemiddelde hoeveelheid van 211 mm in de referentieperiode 1981-2010
- 2) de toename van 8% bij het scenario, wat resulteert in een gemiddelde hoeveelheid van $1,08 \times 211 = 228$ mm in de toekomst
- 3) de natuurlijke variaties op de 30-jaar tijdschaal van $\pm 8,3\%$ (van 228 mm), ofwel ± 19 mm
- 4) de jaar-op-jaar variaties van ± 96 mm en de toename in die variaties van 10%, resulterend in een jaar-op-jaar variatie bij het scenario van $\pm (1,10 \times 96)$, ofwel ± 106 mm

Kwadratisch opgeteld leveren 3) en 4) toekomstige variaties op van ± 108 mm. Gecombineerd met 2) geeft dit 228 ± 108 mm, ofwel een hoeveelheid tussen 120 en 336 mm neerslag in een bepaalde winter rond 2050 bij het W_L -scenario. Ter vergelijking, in de referentie periode 1981-2010 is de neerslaghoeveelheid in de winter 211 ± 96 mm, ofwel tussen 115 en 307 mm.

Hoewel de jaar-op-jaar variaties dus veel groter zijn dan de scenario veranderingen, duidt dit resultaat er op dat een extreem natte winter, bijvoorbeeld met meer dan 300 mm neerslag, vaker zal voorkomen in de toekomst. De twee kolommen met waarnemingen laten zien dat de toename in de winterneerslag over 30 jaar ongeveer even groot is geweest als de natuurlijke variaties gemiddeld over 30 jaar. In dit voorbeeld is geen rekening gehouden met de afhankelijkheid tussen de neerslag in opeenvolgende winters¹⁾.

^{A)} winter = december, januari, februari; lente = maart, april, mei; zomer = juni, juli, augustus; herfst = september, oktober, november; informatie over alle indicatoren voor alle seizoenen is beschikbaar op www.klimaatsscenarios.nl

^{B)} gemiddelden voor Nederland; voor temperatuur zijn alleen waarnemingen van De Bilt gebruikt en voor wind alleen van Den Helder / De Kooy; voor neerslag is het aantal stations waarvoor 60 jaar data beschikbaar is kleiner dan in de klimaatatlas; het verschil tussen de gemiddelden voor 1951-1980 en voor de referentieperiode 1981-2010 komt ruwweg overeen met een trend over 30 jaar

^{C)} scenario-waarden zijn afgerond rekening houdend met de grootte van de verandering en de verschillen tussen de vier scenario's

^{D)} 30-jaargemiddelden vallen met 90% kans binnen de genoemde bandbreedte

^{E)} de absolute stijging bij de scenario's, zonder bodemdaling, valt met 90% kans binnen de genoemde bandbreedte

^{F)} waarnemingen van de zonnestraling, die ook is gebruikt voor de potentiële verdamping en het neerslagtekort, begint in 1958

^{G)} referentie klimaat is 1971-2000 omdat de visuele waarnemingen voor mist eindigt in 2002

^{H)} jaargemiddelden vallen met 90% kans binnen de genoemde bandbreedte

^{I)} voor deze indicatoren zijn 30-jaar perioden eigenlijk te kort om de waarden goed te bepalen

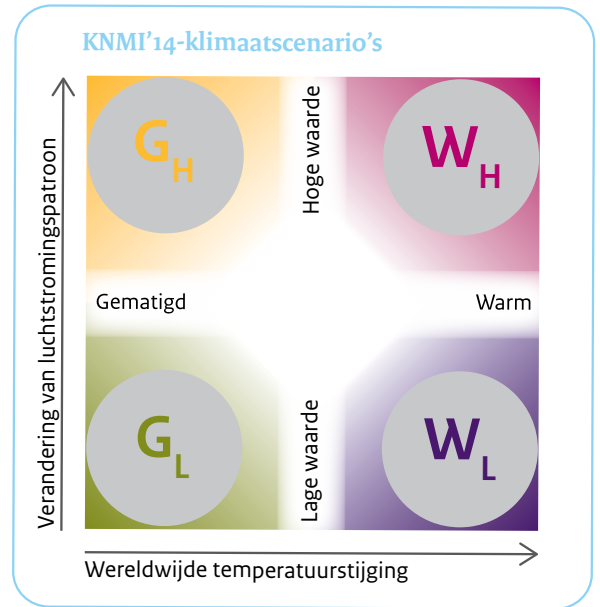
^{J)} groeiseizoen loopt van 1 april tot en met 30 september



KNMI'14-klimaatscenario's samengevat

Het KNMI presenteert de KNMI'14-klimaatscenario's: vier nieuwe scenario's voor toekomstige klimaatverandering in Nederland. Ieder scenario geeft een samenhangend beeld van veranderingen in twaalf klimaatvariabelen, waaronder temperatuur, neerslag, zeespiegel en wind. Het gaat om veranderingen niet alleen in het gemiddelde klimaat, maar ook in de extremen, zoals de koudste winterdag en de maximum uurneerslag per jaar. De veranderingen gelden voor het klimaat rond 2050 en 2085 ten opzichte van het klimaat in de referentieperiode 1981-2010, gepubliceerd in de klimaatatlas van het KNMI ²⁾.

De KNMI'14-scenario's zijn de vier combinaties van twee uiteenlopende waarden voor de wereldwijde temperatuurstijging, 'Gematigd' en 'Warm', en twee mogelijke veranderingen van het luchtstromingspatroon, 'Lage waarde' en 'Hoge waarde'. Samen beschrijven ze de hoekpunten waarbinnen de klimaatverandering in Nederland zich, volgens de nieuwste inzichten, waarschijnlijk zal voltrekken. Met deze KNMI'14-scenario's biedt het KNMI een leidraad voor berekeningen van de gevolgen van klimaatverandering en voor het ontwikkelen van mogelijkheden en strategieën voor adaptatie. Ze stellen gebruikers in staat om klimaatverandering te betrekken bij het nemen van besluiten voor een veilig en duurzaam Nederland in de toekomst.



Algemene veranderingen

- de temperatuur blijft stijgen
- zachte winters en hete zomers komen vaker voor



- de neerslag en extreme neerslag in de winter nemen toe
- de intensiteit van extreme regenbuien in de zomer neemt toe
- hagel en onweer worden heviger



- de zeespiegel blijft stijgen
- het tempo van de zeespiegelstijging neemt toe



- de veranderingen in windsnelheid zijn klein



- het aantal dagen met mist neemt af en het zicht verbetert verder
- de hoeveelheid zonnestraling nabij het aardoppervlak neemt licht toe

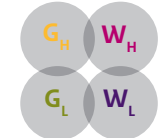


Scenario verschillen en natuurlijke variaties

- temperatuurveranderingen zijn verschillend voor de vier scenario's
- veranderingen in 2050 en 2085 zijn groter dan de natuurlijke variaties op de 30-jaar tijdschaal



- meer droge zomers in twee (G_H en W_H) van de vier scenario's
- natuurlijke variaties in neerslag zijn relatief groot, zodat de scenario's minder van elkaar verschillen



- het tempo van de zeespiegelstijging hangt sterk af van de wereldwijde temperatuurstijging
- geen verschil tussen scenario's met verschillend luchtstromingspatroon



- 's winters vaker westenwind in twee (G_H en W_H) van de vier scenario's
- het wind- en stormklimaat vertoont grote natuurlijke variaties



- natuurlijke variaties zijn verschillend voor de verschillende klimaatvariabelen





Inleiding

IPCC: 'De menselijke invloed op het mondiale klimaatsysteem is duidelijk zichtbaar'. Dat concludeert het vijfde klimaatrapport van het IPCC, het klimaatpanel van de Verenigde Naties, dat in september 2013 verscheen. Uit waarnemingen en onderzoek blijkt dat de mens invloed heeft op de opwarming van de atmosfeer en de oceanen, op veranderingen in de wereldwijde waterkringloop, op de afname van sneeuw en ijs, op zeespiegelstijging en op veranderingen in sommige klimaatextremen. Aanhoudende uitstoot van broeikasgassen door de mens zal de invloed op het klimaat doen toenemen³⁾.

> KNMI'14-klimaatscenario's

De KNMI'14-klimaatscenario's vertalen de onderzoeksresultaten voor het wereldwijde klimaat uit het IPCC 2013-rapport³⁾ naar Nederland. Het IPCC-rapport geeft geen resultaten voor afzonderlijke landen.

De klimaatscenario's voor Nederland zijn gebaseerd op de waargenomen klimaatverandering en op recente berekeningen met wereldwijde klimaatmodellen voor het IPCC, aangevuld met berekeningen met het klimaatmodel voor Europa van het KNMI.

Rekening houdend met het oordeel van experts, tonen de KNMI'14-klimaatscenario's vier hoekpunten. Binnen deze hoekpunten zal de door de mens veroorzaakte klimaatverandering in Nederland zich waarschijnlijk voltrekken.

> Waarom nu nieuwe scenario's?

De KNMI'14-klimaatscenario's zijn geactualiseerd ten opzichte van de scenario's uit 2006. De KNMI'06-klimaatscenario's kregen een officiële status in het Nationaal Waterplan⁴⁾ en zijn gecombineerd met socio-economische scenario's in de zogeheten Deltascenario's van het Deltaprogramma⁵⁾.

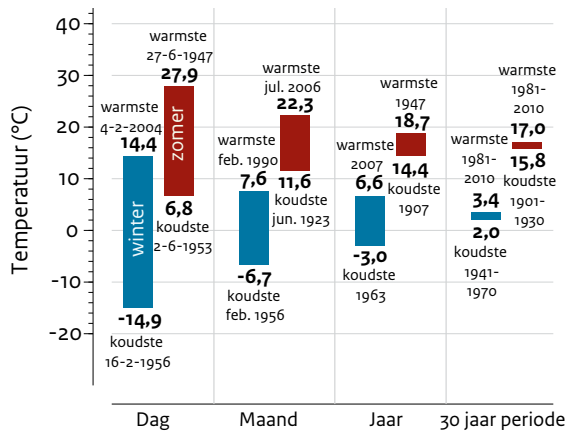
Er zijn verschillende redenen om nu nieuwe klimaatscenario's te publiceren. Het IPCC bracht een nieuw klimaatrapport uit en verschillende maatschappelijke sectoren stelden nieuwe vragen. Daarnaast verzocht de Rijksoverheid het KNMI om actuele klimaatscenario's op te stellen, om daarmee de volgende fase van het beleid voor klimaatadaptatie te ondersteunen.

> Scenario's plus natuurlijke variaties

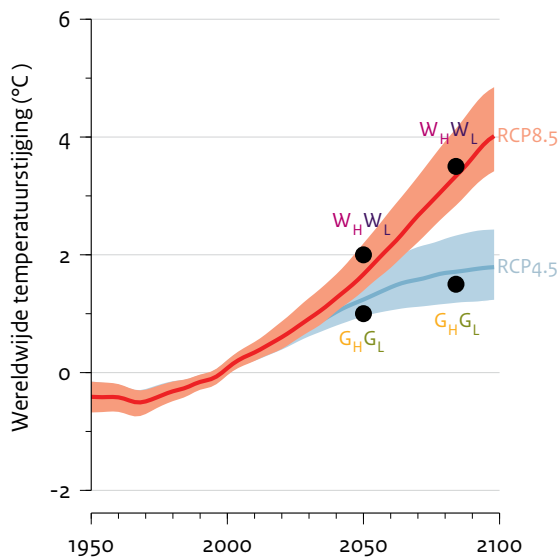
De klimaatscenario's tonen niet alleen de door de mens veroorzaakte klimaatverandering, maar ook de natuurlijke variaties van het klimaat. Natuurlijke variaties zijn bijvoorbeeld dagelijkse variaties in de temperatuur of het spontaan voorkomen van langdurige kou in de winter. Zulke natuurlijke variaties verklaren waarom niet ieder jaar warmer is dan het jaar ervoor, ook al warmt het klimaat op. Hoe langer de periode waarvoor een gemiddelde wordt berekend, hoe kleiner de invloed van natuurlijke variaties op dit gemiddelde is (Figuur 1). Maar zelfs gemiddelden over 30 jaar – het ijkpunt van wat als normaal weer wordt gezien – zijn erdoor beïnvloed. Vooral voor neerslag en wind zijn natuurlijke variaties in gemiddelden over 30 jaar aanzienlijk vergeleken met de veranderingen in de 30-jaar gemiddelden volgens de klimaatscenario's. Natuurlijke variaties zijn het gevolg van de wisselwerking tussen de atmosfeer, land, ijs en oceanen. Zulke variaties kunnen door de mens veroorzaakte veranderingen verhullen en afwijkingen veroorzaken ten opzichte van de trend op lange termijn, ook in tegenovergestelde richting (voor een voorbeeld zie bladzijde 29).

Instrument voor het plannen van adaptatiemaatregelen

De KNMI'14-scenario's zijn bedoeld als instrument voor het berekenen van gevolgen van klimaatverandering of voor het ontwikkelen van mogelijkheden en strategieën voor adaptatie. Ze stellen gebruikers in staat klimaatverandering te betrekken in besluitvorming over de toekomst, ook al is het toekomstige klimaat onzeker. Organisaties in de publieke en private sector gebruiken voor hun langetermijnplanning steeds vaker klimaatscenario's om de kwetsbaarheid voor klimaatrisico's te verkleinen en om nieuwe mogelijkheden te verkennen. Het KNMI ondersteunt dit proces, zonder een voorkeur uit te spreken voor scenario's of maatregelen. De scenario's zijn ontwikkeld als een algemeen beeld voor een brede groep van gebruikers. Ze bieden een gezamenlijk kader voor het plannen van adaptatie in verschillende maatschappelijke sectoren. Bij het ontwikkelen van de scenario's speelde contact met gebruikers een belangrijke rol. Zo was een brede groep ervaren gebruikers betrokken bij het kiezen van de relevante klimaatvariabelen en indicatoren.



FIGUUR 1 Waargenomen temperatuurvariaties in De Bilt sinds 1901 voor gemiddelden over verschillende tijdschalen. Ze zijn een optelsom van natuurlijke variaties en klimaatverandering.



FIGUUR 2 Wereldwijde temperatuurstijging ten opzichte van 1981-2010 volgens de modelberekeningen voor het IPCC 2013-rapport ³⁾. Twee uitstootscenario's (zie bladzijde 30): RCP4.5 (stabilisatie) en RCP8.5 (hoge uitstoot). Geleerde banden: spreiding tussen klimaatmodellen; lijnen: gemiddelde over de modellen; punten: wereldwijde temperatuurstijging zoals toegepast in de KNMI'14-klimaatscenario's voor Nederland.

> Scenario-onderscheid: G versus W

De IPCC-berekeningen voor de uitstoot van broeikasgassen, de verontreiniging van de lucht en de verandering van het landgebruik vormen de basis voor de KNMI'14-scenario's. Figuur 2 toont de wereldwijde temperatuurstijging tot 2100 die hiervan volgens berekeningen met klimaatmodellen het gevolg is.

De wereldwijde temperatuurstijging is het eerste kenmerk waarmee de scenario's worden onderscheiden. In de G-scenario's is de wereldwijde temperatuurstijging 1 °C in 2050 en 1,5 °C in 2085 ten opzichte van 1981-2010; in de W-scenario's is de stijging 2 °C in 2050 en 3,5 °C in 2085 ten opzichte van 1981-2010. G staat voor Gematigd; W voor Warm. Binnen deze waarden voor de toekomstige opwarming valt ruwweg 80% van de modelberekeningen. Omdat de modelberekeningen lopen tot 2100 is de uiterste tijdhorizon voor de KNMI'14-scenario's de 30-jaar periode rond 2085. Het jaar 2050 is gekozen als eerste tijdhorizon, omdat het ook de eerste tijdhorizon in de KNMI'o6-klimaatscenario's was.

> Scenario-onderscheid: L versus H

Naast de wereldwijde temperatuurstijging is ook de verandering van het luchtstromingspatroon van invloed op de klimaatverandering in Nederland. Verandering van het luchtstromingspatroon is daarom gekozen als het tweede kenmerk voor het onderscheiden van de scenario's. In de lage of L-scenario's (G_L en W_L) is de invloed van deze verandering klein, in de hoge of H-scenario's (G_H en W_H) is de invloed groot.

In de H-scenario's waait het in de winter vaker uit het westen. Ten opzichte van de L-scenario's betekent dit een zachter en natter weertype. In de H-scenario's hebben hogedrukgebieden in de zomer een grotere invloed op het weer. Vergeleken met de L-scenario's zorgen ze voor meer oostenwinden, die in Nederland warmer en droger weer met zich meebrengen.

Recente berekeningen met de wereldwijde klimaatmodellen voor het IPCC wijzen op deze veranderingen van het luchtstromingspatroon. Met behulp van het KNMI-klimaatmodel voor Europa zijn ze vertaald naar Nederland. Als laatste stap zijn voor de 12 klimaatvariabelen als temperatuur, neerslag en zonnestraling 22 indicatoren berekend die van belang zijn voor toepassingen door gebruikers, zoals de warmste zomerdag per jaar (denk aan gezondheidszorg) of de maximum uurneerslag per jaar (denk aan rioolcapaciteit).



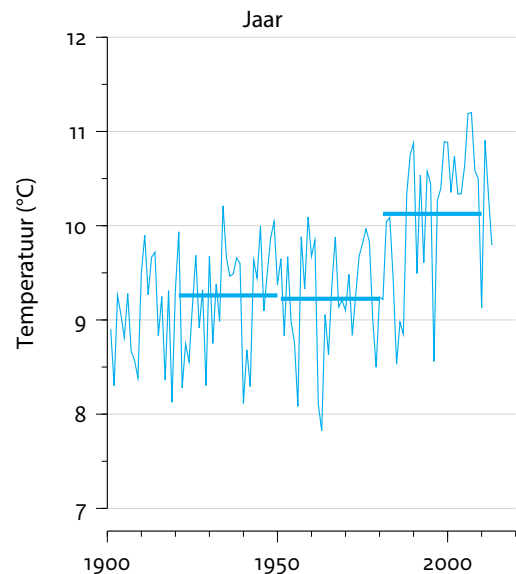
Temperatuur



Waarnemingen

IPCC: In de periode 1880-2012 steeg de wereldgemiddelde luchttemperatuur met ongeveer 0,9 °C. In de afgelopen 15 jaar was de stijging veel minder groot, o.a. door natuurlijke variaties in de oceaanstroming. Maar ook in deze periode is de zeespiegel gestegen, is de hoeveelheid warmte in de oceanen toegenomen, zijn gletsjers teruggetrokken en is de hoeveelheid sneeuw afgenomen³⁾.

Nederland is eveneens opgewarmd. Tussen 1901 en 2013 nam de gemiddelde temperatuur in De Bilt toe met 1,8 °C. Het grootste deel van deze toename, namelijk 1,4 °C, vond plaats tussen 1951 en 2013 (Figuur 3). Sinds 1951 is de toename ongeveer twee keer zo groot als de wereldwijde toename van de gemiddelde temperatuur over het land- en zee-oppervlak. De opwarming in onze buurlanden was vergelijkbaar. Over het algemeen warmt het land sneller op dan de oceaan. De winters (december, januari en februari) waren zachter doordat de wind vaker uit het westen kwam. De zomers (juni, juli en augustus) waren extra warm door een toename van de zonnestraling (zie bladzijde 18), vooral het gevolg van de afgenomen luchtverontreiniging.



FIGUUR 3 Waargenomen jaargemiddelde temperatuur in De Bilt. Horizontale lijnen: gemiddelden over 30 jaar.

Toekomst

IPCC: Bij drie van de vier uitstootscenario's van het IPCC (zie bladzijde 30) zal de wereldwijde temperatuur aan het einde van de 21ste eeuw meer dan 2 °C hoger zijn dan in de pre-industriële tijd (en ongeveer 1,3 °C hoger dan in de periode 1981-2010). De opwarming zal per gebied verschillen en relatief groot zijn boven land en in de poolgebieden³⁾.

Volgens alle vier de KNMI'14-scenario's zal de temperatuur in Nederland stijgen (Figuur 4). Rond 2050 is de gemiddelde toename het grootst in de winter (december, januari, februari) en het kleinst in de lente (maart, april en mei). In de G_H- en W_H-scenario's is de opwarming in Nederland groter dan gemiddeld over de wereld. Maar in geen enkel scenario is de opwarming in Nederland twee keer zo groot, zoals in de afgelopen decennia het geval was. Natuurlijke variaties kunnen er voor zorgen dat de trend iets groter of iets kleiner uitvalt.

Bovenop deze lange termijn veranderingen en variaties komen de variaties in de temperatuur van jaar op jaar. Temperatuurverschillen tussen winters onderling nemen vooral af doordat de kans op koude winters relatief sterk afneemt. Temperatuurverschillen tussen zomers nemen daarentegen toe doordat de temperatuur in warme zomers het sterkst toeneemt.

Het temperatuurverschil tussen dag en nacht neemt iets af. De maximumtemperatuur stijgt iets minder dan de minimumtemperatuur.

> Vergelijking met KNMI'06

De opwarming in de winter is in KNMI'14 iets groter dan in KNMI'06, maar de grootste opwarming in de zomer (+2,3 °C in het W_H-scenario) is kleiner dan in KNMI'06 (+2,8 °C in het W+ scenario).

In de recente modelberekeningen is de opwarming in de zomer veelal minder groot dan in de berekeningen uit 2006, als gevolg van verminderde uitdroging van het land (zie bladzijde 13).

> Extremen in temperatuur

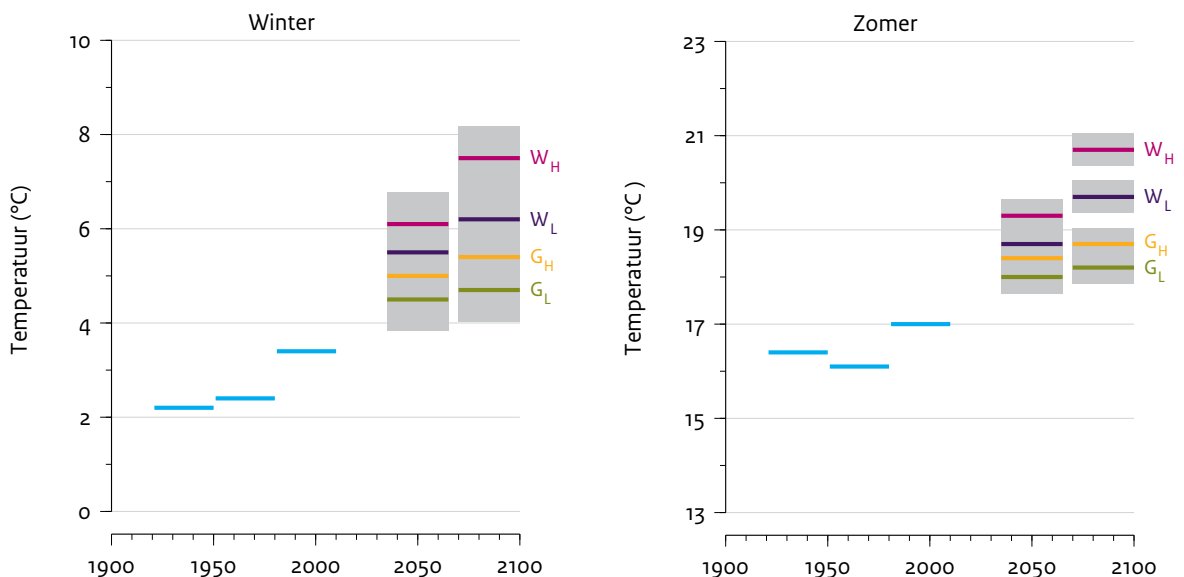
Net als in de KNMI'06-scenario's, is voor de koudste winterdagen en de warmste zomerdagen de opwarming het grootst (Figuur 5). Voor zachte winterdagen en koele zomerdagen is de opwarming echter relatief klein. Voor de winter betekent dit een aanzienlijke afname in het aantal dagen met een minimumtemperatuur onder nul (vorstdagen). Het aantal dagen met een maximumtemperatuur onder nul (ijsdagen), neemt nog sterker af.

In het warmste scenario W_H neemt het aantal ijsdagen per winter af van zeven in het huidige klimaat, tot één rond 2050. In het minst warme scenario G_L komen rond 2050 nog vier ijsdagen per winter voor.

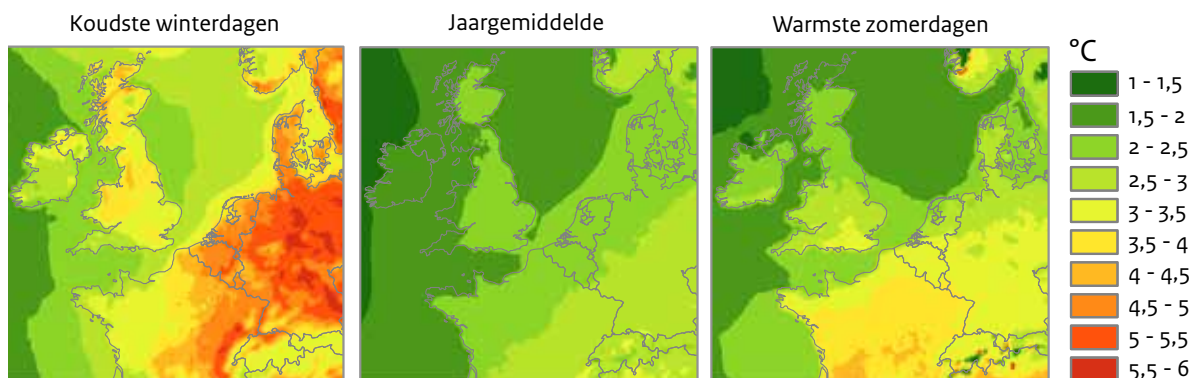
De zomer krijgt meer tropische nachten, met een minimumtemperatuur van 20 °C of hoger, en meer zomerse dagen, met een maximumtemperatuur van 25 °C of hoger. Dagelijkse temperatuurrecords zijn nog steeds mogelijk bij alle scenario's, maar worden wel veel minder waarschijnlijk voor koude extremen in de winter en waarschijnlijker voor warme extremen in de zomer.

> Regionale verschillen

De verwachte opwarming in Nederland vertoont regionale verschillen. Deze zijn het grootst voor de extremen in het W_H -scenario. Op de warmste zomerdagen neemt de temperatuur in dat scenario in het zuidoosten van Nederland ongeveer 1 °C meer toe dan in het noordwesten (Figuur 5). Regionale temperatuurverschillen tussen kust en binnenland nemen hierdoor toe. Op koude winterdagen is de opwarming in het oosten groter dan in de kustgebieden, waardoor de bestaande regionale verschillen juist afnemen.



FIGUUR 4 Winter- en zomertemperatuur in De Bilt: waarnemingen (drie 30-jaar gemiddelden, in blauw), KNMI'14-scenario's (2050 en 2085, in vier kleuren) en natuurlijke variaties (in grijs). Dit zijn natuurlijke variaties van 30-jaar gemiddelden.



FIGUUR 5 Opwarming voor de koudste winterdagen (links) en warmste zomerdagen (rechts) vergeleken met de jaargemiddelde opwarming (midden) bij het W_H -scenario voor 2050 ten opzichte van 1981-2010.



Neerslag



Waarnemingen

IPCC: Sinds 1901 is de gemiddelde neerslag boven land op de gematigde breedten van het Noordelijk Halfrond toegenomen. Het is redelijk zeker dat de mens heeft bijgedragen aan de toename van de neerslag op de gematigde breedten sinds 1950. Wereldwijd is de hoeveelheid waterdamp in de lucht sinds de jaren 1970 toegenomen. Dit is het gevolg van de opwarming, omdat warmere lucht meer vocht kan bevatten³⁾.

Tussen 1910 en 2013 nam de jaarlijkse neerslag in Nederland toe met 26%. Tussen 1951 en 2013 bedroeg de toename 14% (Figuur 6). Alle seizoenen behalve de zomer zijn natter geworden.

Het aantal dagen per jaar met ten minste 10 mm neerslag in de winter en het aantal dagen per jaar met ten minste 20 mm neerslag in de zomer nam toe (Figuur 7).

Gemiddeld overschrijdt de neerslag deze drempelwaarden overal in Nederland enkele keren per jaar. De grootste toename van deze gematigde extremen vond plaats in de kustgebieden. Het totaal aantal dagen met meer dan 0,1 mm neerslag, zogeheten 'natte dagen' of 'regen-dagen', veranderde niet.

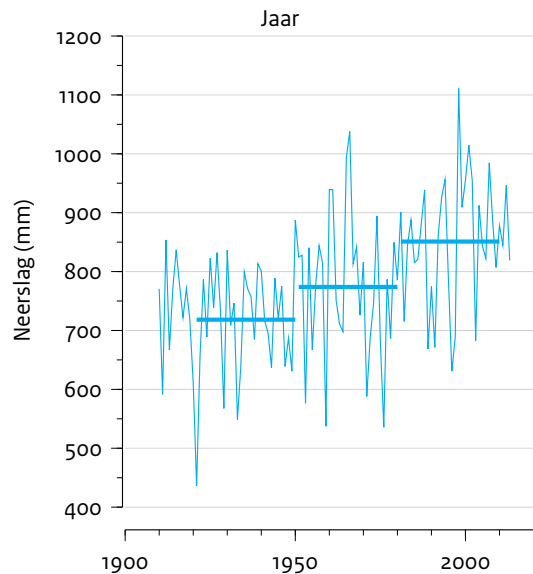
Door de toename van de temperatuur is ook de hoeveelheid waterdamp in de lucht toegenomen sinds 1950. Dit verklaart gedeeltelijk de toename van de jaarlijkse hoeveelheid neerslag. Het effect op zware buien is nog groter. Uit waarnemingen blijkt dat bij de meest extreme buien de hoeveelheid neerslag per uur toeneemt met ongeveer 12% per graad opwarming.

Toekomst

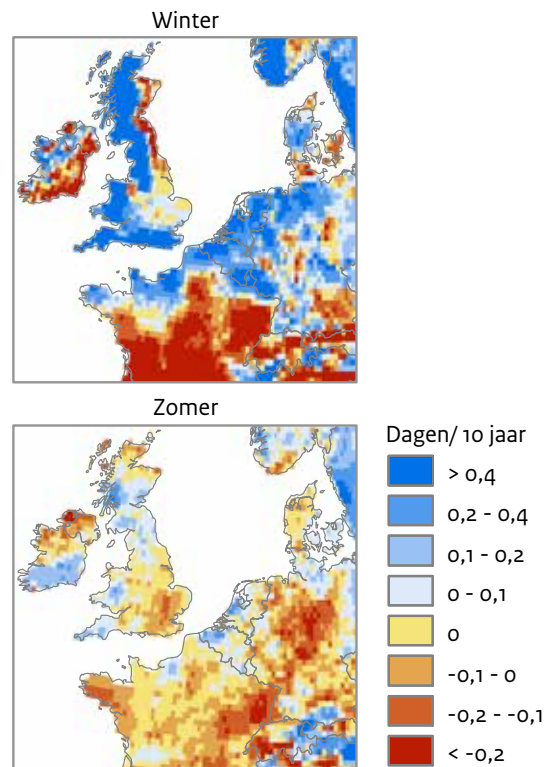
IPCC: Wereldwijd verschilt de verandering van de neerslag als gevolg van de opwarming in de 21ste eeuw van gebied tot gebied. Neerslagverschillen tussen natte en droge gebieden en tussen natte en droge seizoenen zullen in het algemeen toenemen³⁾.

In alle scenario's neemt de neerslag in alle seizoenen toe, met uitzondering van de zomer. Dit komt vooral doordat bij een opwarmend klimaat de hoeveelheid waterdamp in de lucht toeneemt.

Modelberekeningen zijn niet eenduidig of de gemiddelde neerslag in de zomer toe- of afneemt, en dit is zichtbaar in de scenario's (Figuur 8). De resultaten verschillen over hoe het luchtstromingspatroon boven Europa verandert, in welke mate de bodem uitdroogt en wat dit betekent voor bewolking en neerslag.



FIGUUR 6 Waargenomen jaarlijkse neerslag in Nederland.



FIGUUR 7 Waargenomen veranderingen in het aantal winterdagen per jaar met ten minste 10 mm neerslag (boven) en het aantal zomerdagen per jaar met ten minste 20 mm neerslag (onder) tussen 1951 en 2013. Bron: www.ecad.eu.

Twee scenario's (G_L en W_L) berekenen een kleine toename van de gemiddelde neerslag in de zomer, en de twee andere (G_H en W_H) een aanzienlijke afname. De procentuele afname is het grootst in zomers die al droog zijn.

> **Vergelijking met KNMI'06**

Bij de G_H - en W_H -scenario's neemt de neerslag in de zomer sterk af. Toch zijn ze minder extreem dan de scenario's G+ en W+ in KNMI'06 met vergelijkbare verandering van het luchtstromingspatroon. Nieuw onderzoek toont aan dat de recente resultaten aannemelijker zijn ³⁾. Recente berekeningen met klimaatmodellen geven nog maar beperkte aanwijzingen voor een afname van de zomerneerslag die zo extreem is als in G+ en W+ in KNMI'06. Bovendien is het vertrouwen in modellen die voor de toekomst wel extreme uitdroging berekenen klein, omdat dit juist de modellen zijn die ook het huidige klimaat te droog inschatten.

> **Neerslag-extremen**

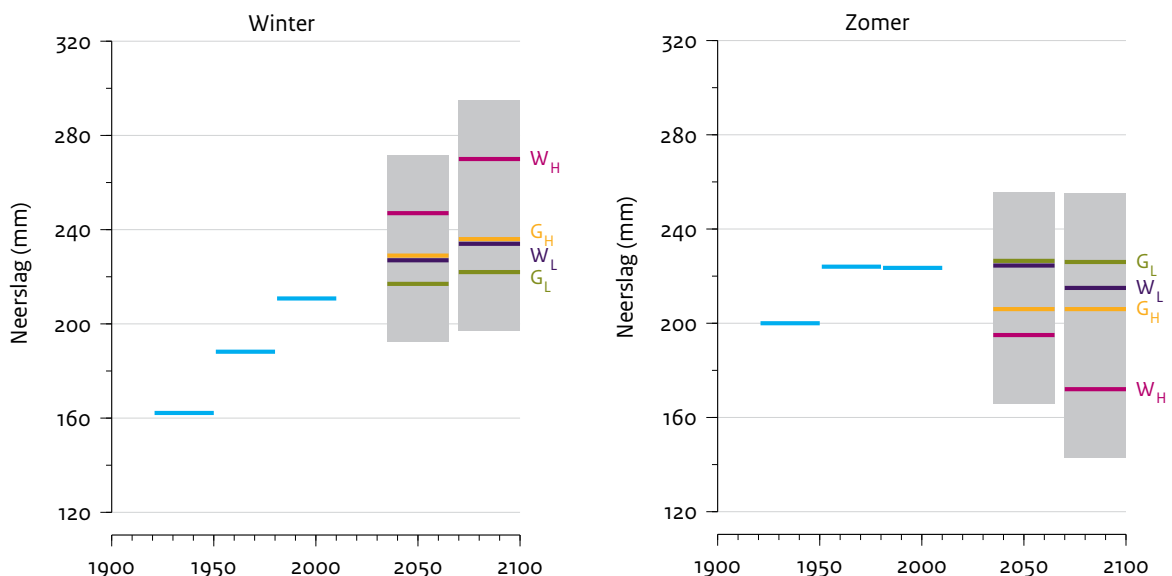
Extreme neerslagintensiteiten nemen in alle scenario's het hele jaar door toe, zelfs in de G_H - en W_H -scenario's, waarin de zomerneerslag afneemt. Dit is het gevolg van de toename van de hoeveelheid waterdamp in de lucht bij een opwarmend klimaat.

Neerslagextremen kunnen door twee meteorologische verschijnselen ontstaan, namelijk passage van fronten die samenhangen met depressies of buien als gevolg van sterke lokale verticale bewegingen in de atmosfeer. Fronten komen vooral voor in de winter en buien in de zomer, maar vaak treden ze ook tegelijk op.

De klimaatmodellen bootsen de fronten goed na. Dat geldt niet voor de kleinschalige buien, die in de zomer neerslagpieken veroorzaken. Veranderingen in neerslagextremen in de zomer die samenhangen met buien zijn daardoor extra onzeker. Bovendien zijn buien nauwelijks afhankelijk van verandering van het luchtstromingspatroon, maar vooral van lokale processen. Daarom wordt bij elk scenario in de zomer zowel een onder- als een bovenwaarde gegeven. In de scenario's met een droger wordende zomer, G_H en W_H , kan de kans op gematigde extremen, zoals zomerdagen met ten minste 20 mm neerslag, zowel af- als toenemen. Maar de kans op zware buien neemt bij elk scenario toe, weliswaar met een grote onzekerheidsband.

> **Regionale verschillen**

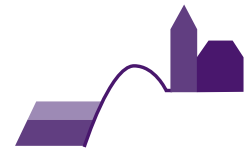
Binnen Nederland zullen de verschillen in veranderingen in de neerslag klein zijn. Er zijn enkele aanwijzingen voor een verschil in neerslag tussen de kustgebieden en het binnenland. Zo'n verschil zien we ook in de waarnemingen. Bij een klein aantal modelberekeningen neemt de neerslag in de kustgebieden 5 tot 10% meer toe dan in het binnenland. In de meeste modelberekeningen treedt dit zogeheten kusteffect echter niet of nauwelijks op. Het kusteffect hangt sterk af van de wisselwerking tussen verandering van het luchtstromingspatroon, het temperatuurcontrast tussen land en zee en de stijging van de temperatuur. Het totale effect is zo onzeker, dat het niet is meegenomen in de KNMI'14-klimaatscenario's.



FIGUUR 8 Neerslagklimaat in Nederland zoals waargenomen en volgens de KNMI'14-scenario's voor 2050 en 2085.



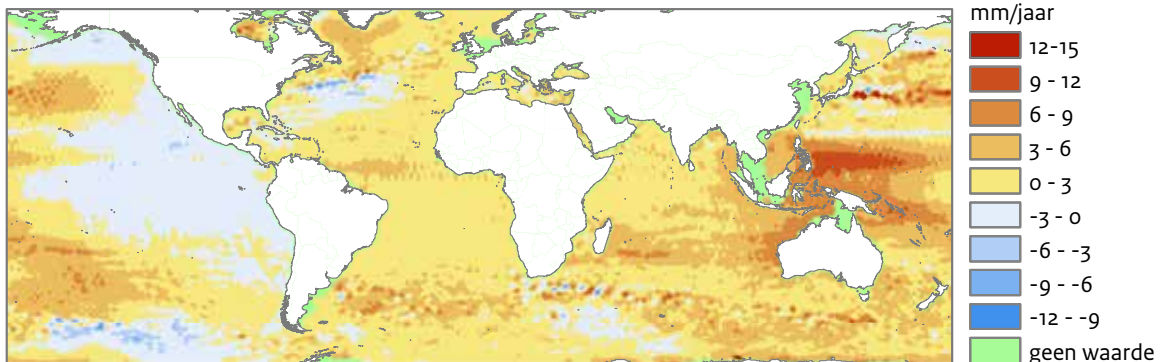
Zeespiegel



Waarnemingen

IPCC: In de periode 1901-2010 is de wereldgemiddelde zeespiegel gestegen met ongeveer 19 cm. Het gemiddelde tempo van de zeespiegelstijging was 1,7 mm per jaar tussen 1901 en 2010 en 3,2 mm per jaar tussen 1993 en 2010. In het noordoosten van de Atlantische Oceaan is de zeespiegelstijging ongeveer gelijk aan de wereldgemiddelde waarde (Figuur 9) ³⁾.

Uit waarnemingen blijkt dat de zeespiegel aan de Nederlandse kust sinds 1900 stijgt met een gemiddeld tempo van 1,8 mm per jaar. Voor de Noordzee is geen duidelijke versnelling zichtbaar in het tempo van stijging die uitstijgt boven de natuurlijke variaties ⁶⁾, zoals die wel zichtbaar is in het wereldgemiddelde. Dit wordt veroorzaakt doordat de natuurlijke variaties voor de Noordzee, die samenhangen met variaties in de wind, veel groter zijn dan voor de wereldgemiddelde zeespiegel.



FIGUUR 9 Tempo van de zeespiegelstijging in de periode 1993-2012. Merk op dat deze satellietgegevens geen waarde vermelden voor de Nederlandse kust ³⁾.

Toekomst

IPCC: Het wereldgemiddelde zeeniveau blijft deze eeuw stijgen. Volgens alle IPCC-uitstootscenario's zal het tempo van de zeespiegelstijging zeer waarschijnlijk hoger liggen dan 2,0 mm per jaar, als gevolg van verdere opwarming van de oceaan en massaverlies van gletsjers en ijskappen ³⁾.

In de berekening van de zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust (Figuur 10) is met vele factoren rekening gehouden, waaronder het uitzetten van de oceanen door opwarming en de veranderingen in zoutgehalte, en het massaverlies van gletsjers en van de ijskappen op Groenland en Antarctica. Ook het zogeheten zelfgravitatie-effect is meegenomen. Dit effect houdt in dat, door de veranderingen in het zwaartekrachtsveld, smeltwater van ijskappen niet gelijkmatig wordt verdeeld over de oceanen ⁷⁾. Bodemdaling, bijvoorbeeld door het inklinken van veen, is niet in de scenario's verwerkt, omdat deze langs de Nederlandse kust sterk varieert en nauwkeurige schattingen voor de toekomst niet voorhanden zijn. Voor de zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust geeft

elk scenario zowel een onder- als een bovenwaarde. Er wordt geen onderscheid gemaakt tussen de L- en H-scenario's, omdat de verandering van het luchtstromingspatroon boven Europa geen dominante invloed heeft op de lange termijn zeespiegelstijging. In elk scenario ligt het tempo van zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust rond 2050 en 2085 hoger dan het waargenomen tempo sinds 1900.

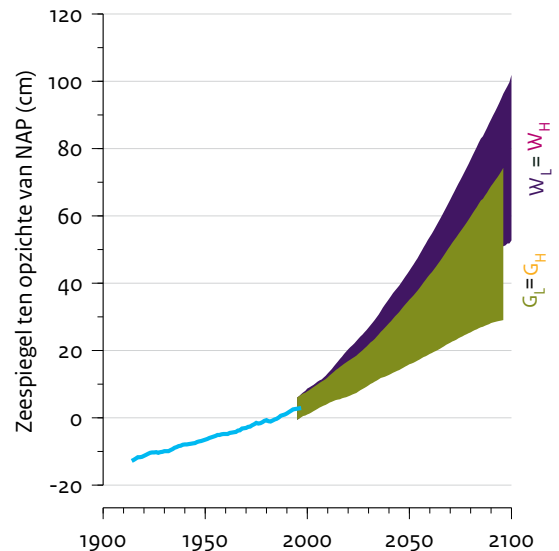
> Vergelijking met KNMI'06

De KNMI'14-scenario's berekenen voor 2050 een zeespiegelstijging tot 40 centimeter ten opzichte van 1981-2010. Deze bovenwaarde voor 2050 is 5 centimeter hoger dan die in KNMI'06 en in de Deltascenario's. Dit komt vooral doordat de ijskappen op Groenland en Antarctica sneller smelten. Daarnaast is in de KNMI'14-scenario's het uitzetten van het water in de Noordzee meegenomen in de berekeningen. KNMI'06 ging nog uit van berekeningen voor het noordoosten van de Atlantische Oceaan vanwege gebrek aan gegevens voor de Noordzee.

In 2085 zal de zeespiegel aan de Nederlandse kust volgens KNMI'14 tussen de 25 en 80 cm zijn gestegen. Voor 2100 is een bovenwaarde van 100 cm berekend. Deze waarde lijkt veel hoger dan de 85 cm in KNMI'06. Dit verschil komt voor het grootste deel doordat bij KNMI'14 de 95% bovenwaarde is toegepast, zoals gebruikelijk in het nieuwe IPCC rapport ³⁾, terwijl voor KNMI'06 de 90% bovenwaarde is toegepast. De KNMI'06 95% bovenwaarde correspondeert met een stijging van 95 cm. Het uiteindelijke verschil van 5 cm meer stijging in KNMI'14 komt vooral doordat de ijskap op Antarctica sneller smelt en het uitzetten van de oceaan meer bijdraagt.

> Voorbij 2100

Omdat het zeer lang duurt voordat de gehele oceaan en ijskappen zich hebben aangepast aan de wereldwijde opwarming, zal de zeespiegel nog eeuwenlang blijven stijgen, ook als de hoeveelheid broeikasgassen niet meer verder stijgt. Voor het jaar 2300 is de geschatte zeespiegelstijging in het Noordzeegebied 50 cm tot enkele meters ⁸⁾.

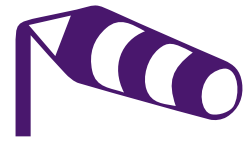


FIGUUR 10 Zeespiegel aan de Nederlandse kust zoals waargenomen en volgens de KNMI'14-scenario's. In plaats van 30-jaar gemiddelden worden gladgestreken curves getoond, omdat zeespiegelstijging een proces is met een regelmatige verandering. Om de band voor W_L en W_H zichtbaar te maken is die iets verder doorgetrokken.





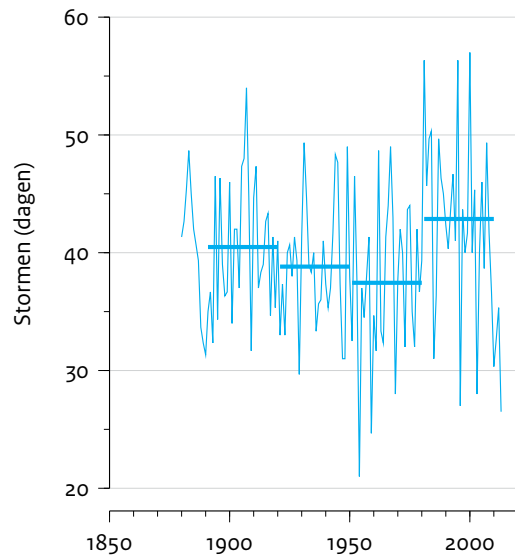
Wind en storm



Waarnemingen

IPCC: In de jaren 1950-1990 is de sterkte van westenwinden toegenomen op de gematigde breedten van het noordelijk halfrond. Deze toename is grotendeels teniet gedaan door recente afnames. De stormbanen, waarlangs stormen zich ontwikkelen en voortbewegen, zijn sinds de jaren 1970 waarschijnlijk naar het noorden verschoven³⁾.

Langlopende waarnemingsreeksen van de wind zijn schaars. Directe metingen zijn gevoelig voor veranderingen in meetinstrumenten en niet beschikbaar boven open zee. Daarom wordt veel gebruik gemaakt van andere, indirecte waarnemingen, zoals luchtdrukmetingen. Op basis van dit soort waarnemingen is geconstateerd dat er aan het begin en aan het einde van de twintigste eeuw meer stormen boven het Noordzeegebied waren. Halverwege de eeuw en in recente jaren is het aantal stormen lager (Figuur 11). Boven land zien we sinds de jaren zestig een gestage afname van de windsnelheid en het aantal stormen. Dit lijkt voornamelijk vooral een gevolg van de toenemende bebouwing in Nederland. Hoe meer bebouwing hoe ruwer het landoppervlak en hoe meer de wind afgeremd wordt. Langs de kust daalt de gemeten windsnelheid niet sinds de jaren zestig.



FIGUUR 11 Indicator voor stormcondities boven de Noordzee.

Toekomst

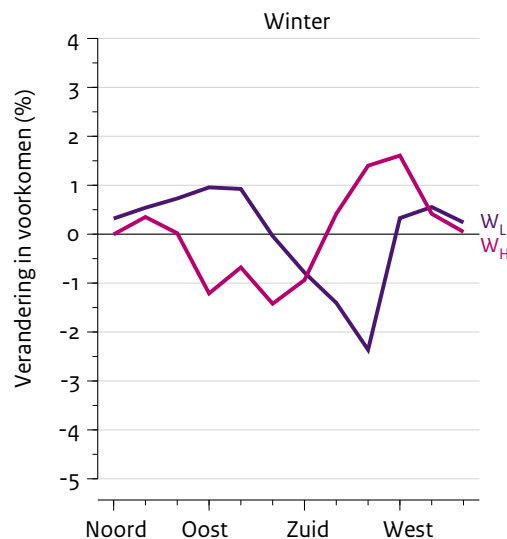
IPCC: Het aantal stormdepressies op de gematigde breedten zal hooguit enkele procenten veranderen. Er bestaat grote onzekerheid over de mate van verandering van stormbanen en -depressies boven Europa³⁾.

De door de mens veroorzaakte veranderingen van de windsnelheid zijn klein in de KNMI'14-scenario's. Dat gold ook voor de KNMI'06-scenario's. Veranderingen van de gemiddelde windsnelheid door het jaar heen en tijdens stormen in de winter vallen binnen de natuurlijke variabiliteit.

> Veranderingen in windrichting

Naast de sterkte is ook de richting van de wind van belang. Zo ontstaan de hoogste waterstanden langs de Nederlandse kust als een noordenwind het Noordzeewater opstuwt. De scenario's laten zien dat de frequentie van sterke noordenwinden in de toekomst niet veel verandert.

Windrichtingen tussen zuid en west, die in het huidige klimaat overheersen, komen in de winter vaker voor bij de G_H- en W_H-scenario's en minder vaak bij de G_L- en W_L-scenario's (Figuur 12). Dit stemt overeen met het verschil in de verandering van het luchtstromingspatroon dat de L- en H-scenario's van elkaar onderscheidt. In de zomer nemen



FIGUUR 12 Veranderingen van de windrichting aan de Nederlandse kust in de winter in het W_L- en W_H-scenario voor 2085.

windrichtingen tussen zuid en west in alle scenario's af, maar dat gebeurt het meest in de H-scenario's.



Zicht, mist, hagel en onweer



Waarnemingen

> Zicht en mist

Het zicht in Nederland is de afgelopen jaren verbeterd. Het jaarlijkse aantal uren mist, gedefinieerd als minder dan 1 km zicht, is geleidelijk gedaald van ongeveer 500 uur rond 1956 tot ongeveer 200 uur rond 2002 (Figuur 13). Binnen Nederland bestaan grote regionale verschillen: aan de kust komt momenteel per jaar ongeveer 60 uur minder mist voor dan in het binnenland.

De verbetering van het zicht en de afname van mist wordt vrijwel geheel toegeschreven aan de afname van luchtverontreiniging.

In de toekomst verbetert het zicht in Nederland nog verder, maar niet zo sterk als in de laatste 30 jaar. Voor 2050 wordt het aantal uren mist per jaar geschat op 190. Na 2050 is de verdere afname klein (Figuur 14). De verandering is voor alle scenario's hetzelfde, omdat steeds dezelfde afname in luchtvervuiling is aangenomen.

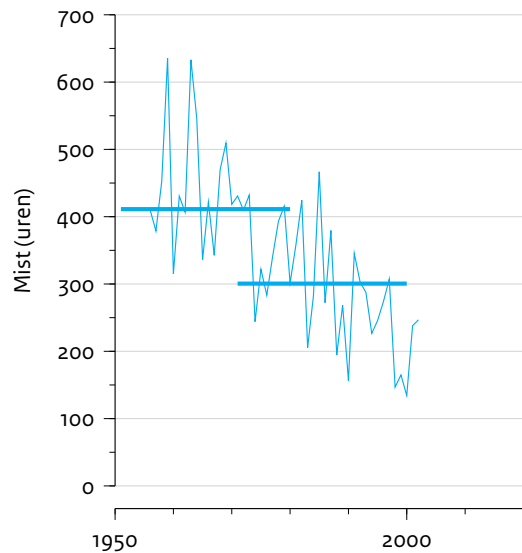
> Hagel en onweer

IPCC: Door gebrek aan metingen en onderzoek is er weinig zekerheid over wereldwijde veranderingen van de frequentie en intensiteit van hagel en onweer in de afgelopen decennia ³⁾.

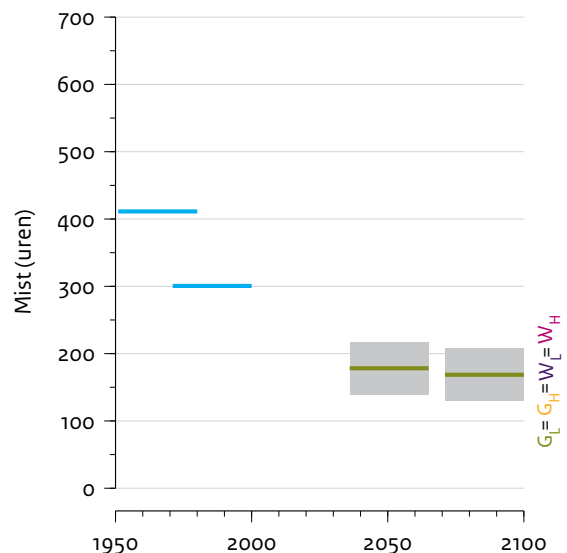
In Nederland zullen hagel en onweer in de toekomst heviger worden. Meer waterdamp leidt tot meer condensatiewarmte, waardoor de sterkte van verticale bewegingen in wolken toeneemt en het vaker hagelt en onweert, met grotere hagelstenen. Per graad opwarming neemt het aantal bliksemslagen bij onweer toe met ongeveer 10 tot 15%.

De grootste verandering zit in de W_L - en W_H -scenario's. In 2050 komt extreme hagel in deze scenario's ten minste twee keer zo vaak voor als in de referentieperiode 1981-2010. Deze semi-kwantitatieve schatting is gebaseerd op modelberekeningen en het verband tussen waterdamp en de verticale windsnelheid.

Toekomst



FIGUUR 13 Jaarlijks aantal uren mist (zicht minder dan 1 km) in Nederland.



FIGUUR 14 Mistklimaat (zicht minder dan 1 km) in Nederland: waarnemingen en berekeningen volgens de KNMI'14-scenario's. Aan het einde van de visuele waarneemreeks in 2002 was het jaarlijks aantal uren mist al afgenomen tot ongeveer 200 uur.



Wolken, zonnestraling, verdamping en droogte



Waarnemingen

> Wolken en zonnestraling

Sinds de jaren 1950 is de hoeveelheid bewolking in Nederland niet wezenlijk veranderd. De zonnestraling is vanaf de jaren-80 wel toegenomen, met 9% tussen 1981 en 2013 (Figuur 15). Deze periode overlapt grotendeels met de referentieperiode voor de scenario's 1981-2010. Een reden voor deze verandering is dat de lucht schoner is geworden en daardoor ook transparanter. De waarnemingen laten ook zien dat de zonnestraling onder bewolkte omstandigheden is toegenomen. Dit suggereert dat wolken transparanter zijn geworden door de verminderde luchtvervuiling. De toegenomen zonnestraling draagt ongeveer 0,2 °C bij aan de totale temperatuuroptocht van ongeveer 1 °C in Nederland tussen 1981 en 2013.

In de G_H - en W_H -scenario's is sprake van een kleine maar beduidende afname van de bewolking in toekomstige zomers. Dit is het gevolg van frequentere oostenwind. In die scenario's neemt de zonnestraling in de zomer daardoor toe.

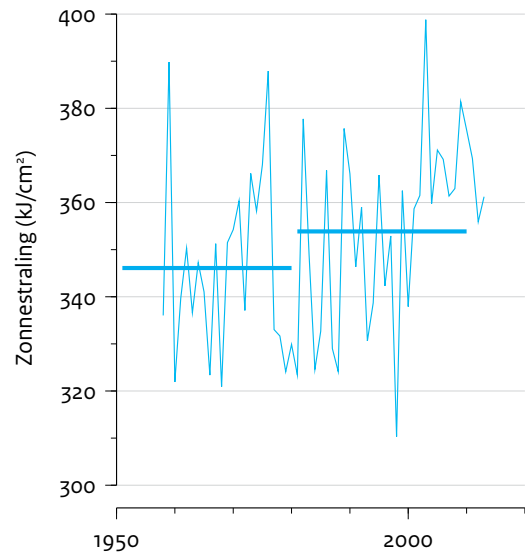
> Verdamping

Potentiële verdamping is de verdamping die optreedt zolang de bodem voldoende water bevat. Tussen 1958 en 2013 nam in De Bilt de potentiële verdamping in de zomer toe met 12%. Dit is berekend met de zogeheten formule van Makkink voor de potentiële verdamping van grasland die ook wordt toegepast in berichten over verdamping voor de agrarische sector. Meer verdamping is het gevolg van de toename van de temperatuur en de zonnestraling. Deze twee bijdragen zijn vrijwel even groot. Gegevens van Wageningen UR laten zien dat al sprake is van een toename in potentiële verdamping sinds 1928⁹⁾. Gestandaardiseerde verdampingswaarnemingen onder niet-uitdrogende omstandigheden bij de KNMI meetmast in Cabauw tussen 1979 en 2013 vertonen een vergelijkbare toename.

De formule van Makkink kan ook worden gebruikt om, bij benadering, veranderingen in de potentiële verdamping onder toekomstige omstandigheden te berekenen. In die scenario's neemt de potentiële verdamping evenredig toe met de zonnestraling. Daarnaast stijgt de potentiële verdamping afhankelijk van het seizoen met ongeveer 2% voor iedere graad die de temperatuur stijgt.

De verandering in de werkelijke verdamping kan afwijken van de verandering in de potentiële verdamping, omdat de werkelijke verdamping beperkt wordt door de beschikbaarheid van water in de bodem.

Toekomst



FIGUUR 15 Jaarlijkse zonnestraling aan het oppervlak in De Bilt.

> Droogte

IPCC: Er bestaat weinig zekerheid over wereldwijde veranderingen in het optreden van droogte sinds het midden van de 20ste eeuw³⁾.

Sinds 1951 komt droogte iets vaker voor in Nederland. Deze trend zet in de toekomst waarschijnlijk door. Indicatoren voor droogte, zoals het neerslagtekort gedurende het groeiseizoen (van 1 april tot en met 30 september), nemen in de G_H - en W_H -scenario's meer toe dan in de G_L - en W_L -scenario's. Dit stemt overeen met de veranderingen in neerslag en verdamping die ten grondslag liggen aan de droogteberekeningen.



Klimaat van 2030

Hoe verder in de toekomst, hoe groter het verschil in berekende wereldwijde temperatuurstijging voor de verschillende IPCC uitstootscenario's (Figuur 2). Maar rond 2030 – iets meer dan 15 jaar vanaf nu – is de opwarming volgens de verschillende uitstootscenario's nog bijna gelijk. De spreiding in de berekeningen voor 2030 is vooral het gevolg van modelonzekerheid en natuurlijke variaties.

In antwoord op de vraag naar meer informatie over de nabije toekomst is een extra scenario ontwikkeld voor 2030.

Onderstaande tabel toont het gemiddelde van de modelberekeningen voor enkele van de klimaatindicatoren uit de tabel op bladzijde 4. Meer klimaatindicatoren zijn beschikbaar via www.klimaatscenario.nl.

Voor de meeste indicatoren zijn de scenarioveranderingen voor 2030 relatief klein ten opzichte van de natuurlijke variaties.

Die natuurlijke variaties zijn dus op deze korte termijn relatief belangrijk. Ook al is momenteel niet goed te voorspellen of de natuurlijke variaties rond 2030 positief of negatief zijn, toch is een indicatie van de grootte voor veel toepassingen relevant.

Een rechtstreekse vergelijking van het gemiddelde van de modelberekeningen voor 2030 met de vier hoekpunt-scenario's voor 2050 en 2085 is niet voor de hand liggend. Het 2030-scenario kan nog het beste worden vergeleken met het gemiddelde van alle vier scenario's voor 2050 of 2085. Omdat voor 2030 een gemiddelde is berekend, en voor 2050 en 2085 vier hoekpunt-scenario's, zijn de waarden van enkele temperatuurindicatoren in 2030 groter dan in het minst warme scenario (G₁) voor 2050.

Seizoen ^{A)}	Variabele	Indicator	Klimaat ^{B)} 1981-2010 = referentie- periode	Gemiddelde verandering voor het klimaat rond 2030 ^{C)} (2016-2045)	Natuurlijke variaties gemiddeld over 30 jaar ^{D)}
Jaar	Zeespiegel bij Noordzeekust	absolute niveau ^{E)}	3 cm boven NAP	+10 tot +25 cm	±1,4 cm
		tempo van verandering	2,0 mm/jaar	+1 tot +6 mm/jaar	±1,4 mm/jaar
	Temperatuur	gemiddelde	10,1 °C	+1,0 °C	± 0,16 °C
	Neerslag	gemiddelde hoeveelheid	851 mm	+5%	± 4,2%
	Zonnestraling	zonnestraling	354 kJ/cm ²	+0,2%	± 1,6%
	Verdamping	potentiële verdamping (Makkink)	559 mm	+2,5%	± 1,9%
	Mist	aantal uren met zicht minder dan 1 km	300 uur ^{G)}	-100 uur	± 39 uur
Winter	Temperatuur	gemiddelde	3,4 °C	+1,2 °C	± 0,48 °C
		Neerslag	gemiddelde hoeveelheid	211 mm	+8,5%
		10-daagse neerslagsom die eens in de 10 jaar wordt overschreden ^{H)}	89 mm	+9%	± 11%
		aantal natte dagen (≥ 0,1 mm)	55 dagen	+1,5%	± 4,7%
	Wind	gemiddelde windsnelheid	6,9 m/s	+0,5%	± 3,6%
		hoogste daggemiddelde windsnelheid per jaar	15 m/s	-1,0%	± 3,9%
	aantal dagen met windrichting tussen zuid en west	49 dagen	+2,5%	± 6,4%	
Lente	Temperatuur	gemiddelde	9,5 °C	+0,8 °C	± 0,24 °C
	Neerslag	gemiddelde hoeveelheid	173 mm	+5,5%	± 8,0%
Zomer	Temperatuur	gemiddelde	17,0 °C	+0,9 °C	± 0,25 °C
		Neerslag	gemiddelde hoeveelheid	224 mm	+0,2%
		dagelijkse hoeveelheid die eens in de 10 jaar wordt overschreden ^{H)}	44 mm	+1,7 tot +10%	± 15%
		maximum uurneerslag per jaar	15,1 mm/uur	+5,5 tot +11%	± 14%
		aantal natte dagen (≥ 0,1 mm)	43 dagen	+0,5%	± 6,4%
	Zonnestraling	zonnestraling	153 kJ/cm ²	+1,9%	± 2,4%
	Vochtigheid	relatieve vochtigheid	77%	-0,6%	± 0,86%
Verdamping	potentiële verdamping (Makkink)	266 mm	+3,5%	± 2,8%	
Droogte	gemiddeld hoogste neerslagtekort gedurende het groeiseizoen ^{H)}	144 mm	+4%	± 13%	
Herfst	Temperatuur	gemiddelde	10,6 °C	+1,0 °C	± 0,27 °C
	Neerslag	gemiddelde hoeveelheid	245 mm	+5,5%	± 9,0%



Weer van de toekomst

Naast informatie over veranderingen in het toekomstige klimaat, zoals weergegeven in de tabellen op bladzijde 4 en 19, is het vaak van belang inzicht te hebben in het bijbehorende weer. Voor veel technische toepassingen zijn tijdreeksen nodig, bijvoorbeeld van dagelijkse neerslaghoeveelheden die corresponderen met de scenario's.

Er zijn verschillende methoden om kwantitatieve gegevens over toekomstig weer te verkrijgen, bijvoorbeeld door te kijken naar gebieden met vergelijkbaar klimaat of naar maanden die vergelijkbaar zijn, door berekeningen uit te voeren met fijnmazige modellen of door waarnemreeksen statistisch te bewerken en transformeren.

> Gebieden met vergelijkbaar klimaat

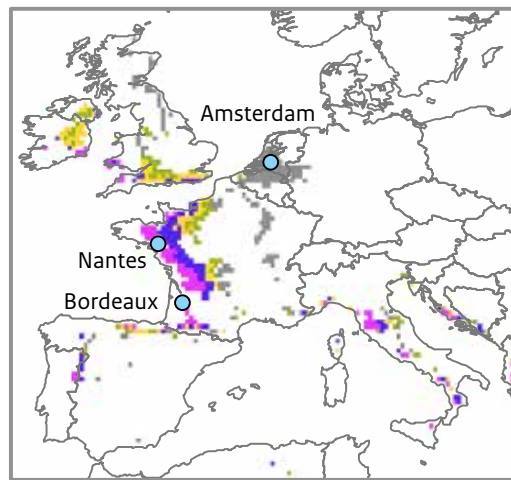
Een eerste indruk van het toekomstig weer bij een bepaald scenario ontstaat door te kijken naar het huidige weer in andere gebieden die nu al een klimaat hebben dat overeenstemt met het toekomstige klimaat in Nederland. Ter illustratie laat Figuur 16 gebieden zien waar het huidige klimaat vergelijkbaar is met het klimaat in Amsterdam rond 2050. Bij het W_H -scenario zijn de winters in Amsterdam rond 2050 bijvoorbeeld vergelijkbaar met die van nu in Nantes of Bordeaux.

> Vergelijkbare maanden

Een andere manier om een idee te krijgen van het toekomstige weer is om te kijken naar het huidige weer in kalendermaanden, waarin de omstandigheden nu al overeenstemmen met de berekende omstandigheden in de toekomst. Zo zal bij het W_H -scenario rond 2050 de temperatuur in januari en februari vergelijkbaar zijn met die in maart in het huidige klimaat (Figuur 17). Terwijl een maandgemiddelde temperatuur van ongeveer 18 °C of meer nu alleen optreedt in juli, zal dit in de toekomst ook optreden in juni en augustus.

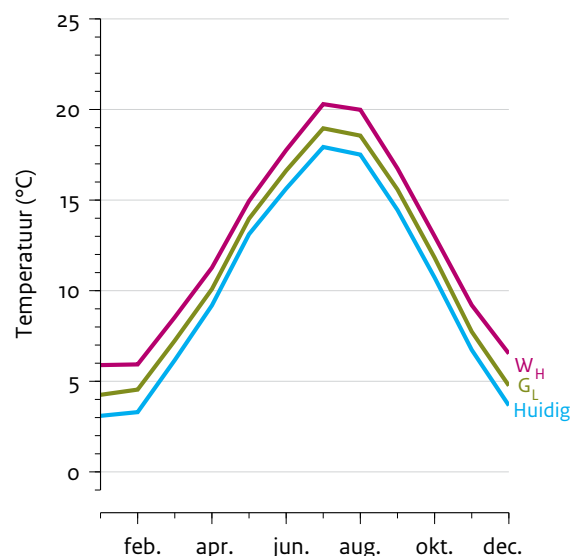
> Fijnmazige modellen

Modellen met veel detail kunnen een natuurgetrouw beeld van toekomstige weersomstandigheden geven. Zulke computermodellen vergen nu nog te veel rekenkracht om er volledige scenario's zoals KNMI'14 mee door te rekenen, maar zijn wel bruikbaar in specifieke situaties. Figuur 18 toont een voorbeeld van twee overeenstemmende weerpatronen, nu en in de toekomst. Dit voorbeeld betreft een situatie met hevige neerslag gedurende twee dagen in augustus 2010 in het oosten van Nederland. Met het gedetailleerde model is deze situatie volgens het W_H -scenario getransformeerd naar een 2°C warmer klimaat, resulterend in een beschrijving van alle klimaatindicatoren met ruimtelijke details tot op 2,5 km.

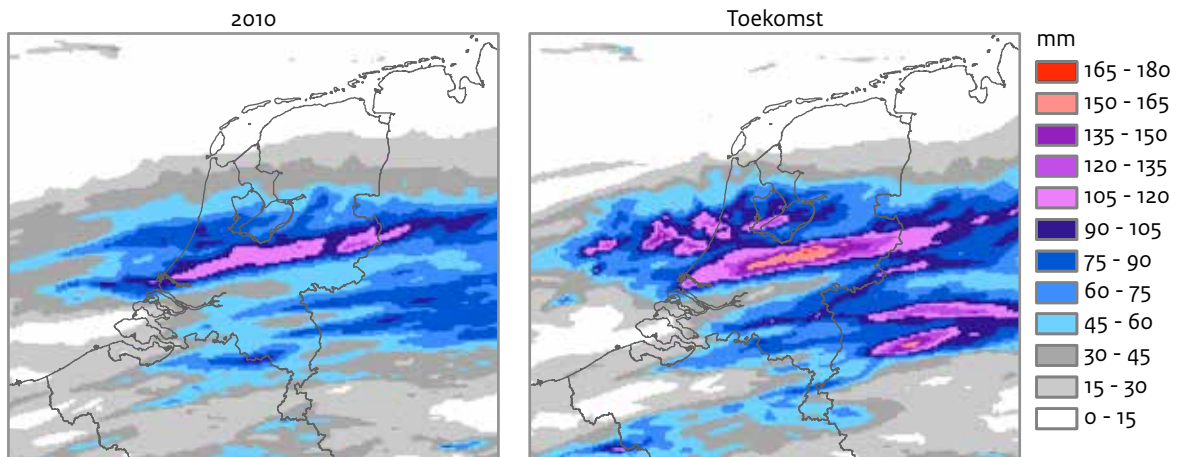


Huidig / G_L G_H W_L W_H

FIGUUR 16 Gebieden met een winterklimaat dat overeenstemt met het winterklimaat in Amsterdam rond 2050, berekend volgens de KNMI'14-scenario's en gebaseerd op de gemiddelde temperatuur en neerslag.



FIGUUR 17 Seizoencyclus van de temperatuur in het huidige klimaat (De Bilt, 1981-2010) en het klimaat rond 2050 bij de G_L - en W_H -scenario's.



FIGUUR 18 Situatie met meer dan 100 mm neerslag in twee dagen in augustus 2010 (links), en de transformatie naar een 2 °C warmer klimaat (rechts).

Toegepast op de situatie in augustus 2010 geeft het fijnmazige model de extreme neerslaghoeveelheid van 130 mm nabij de Duitse grens, vergeleken met waarnemingen van de regenradar, realistisch weer. Transformatie van deze extreme situatie naar een toekomstig klimaat leidt tot een aanzienlijke toename van de berekende hoeveelheid neerslag.

De maximale hoeveelheid neemt toe van 130 mm naar 180 mm en het gebied met meer dan 100 mm neerslag is bijna twee keer zo groot.

Het volledige beeld van het toekomstig weer dat zo is verkregen maakt gedetailleerd onderzoek naar de ontwrichtende gevolgen van extreem weer mogelijk.

> *Tijdreeks-transformatie*

Voor de KNMI'06-scenario's is een computerprogramma ontwikkeld dat tijdreeksen van de waargenomen temperatuur en neerslag omzet in tijdreeksen die passen bij het gekozen klimaatscenario. In de getransformeerde reeksen zijn de seizoensgemiddelde veranderingen en de veranderingen in de gematigde extremen gelijk aan die in de scenario's.

Dit programma is veelvuldig en succesvol gebruikt in veel toegepaste studies, waaronder het Deltaprogramma. Voor KNMI'14 is een nieuwe versie van dit programma ontwikkeld, dat ook tijdreeksen berekent voor zonnestraaling en verdamping. Dit programma is ook gebruikt voor het berekenen van een aantal klimaatindicatoren in de tabel op bladzijde 4.





KNMI'14-klimaatscenario's in de praktijk

Hieronder volgen enkele voorbeelden van toepassingen van de KNMI'14-klimaatscenario's in beleidsterreinen als waterbeheer, stedelijke leefomgeving, landbouw en natuur. De voorbeelden geven een beeld van de kansen en risico's bij een veranderend Nederlands klimaat.

Actualiseren van de kansen en risico's die nog zijn bepaald met behulp van de KNMI'06-scenario's¹⁰⁾ vergt tijd, maar omdat de algemene veranderingen bij de huidige scenario's niet veel verschillen van die bij de KNMI'06-scenario's, zijn geen grote wijzigingen te verwachten in de aard van de kansen en risico's zoals gegeven in onderstaande tabel. Daarbij is klimaat in de meeste studies slechts één van de factoren die invloed hebben op de uitkomsten.

Kusteffecten	Stormvloed en zeespiegel blijft stijgen; de zeespiegel stijgt relatief langzaam en dit vraagt om voortdurende bewaking en maatregelen ter bescherming van de kust
Overstromingen	Door toename van de hoeveelheid neerslag in de winter stijgt de rivierafvoer en neemt de kans op overstromingen van de Rijn, de Maas en kleinere rivieren toe
Watervoorraad	In twee van de vier scenario's leidt droogte tot watertekort, verminderde waterkwaliteit en verzilting van water; de zeespiegelstijging zal bijdragen aan het binnendringen van zout water
Gezondheid	Temperatuurstijging leidt tot minder sterfte in de winter en meer sterfte in de zomer; in hete zomers verslechtert de luchtkwaliteit; er bestaat grote onzekerheid over de effecten op besmettelijke ziekten; verdere stijging van het aantal 'allergiedagen' door verlenging van het groei- en bloeiseizoen
Mobiliteit	Verkeersvertragingen door buien kunnen toenemen; er is minder kans op gladde wegen en schade aan wegen bij vorst, maar meer kans op spoorvorming bij hittegolven
Energie	De behoefte aan energie voor het verwarmen van huizen, fabrieken en kantoren zal afnemen, maar voor airconditioning is meer energie nodig; de beschikbaarheid van koelwater voor elektriciteitsproductie neemt af
Landbouw	Mogelijke landbouwopbrengsten nemen toe door langere groeiseizoenen en hogere CO ₂ -concentraties, maar veranderingen in neerslag en toename van extreem weer kunnen oogsten bedreigen; vooral droge jaren kunnen problemen geven
Natuur	De risico's zijn het grootst voor ecosystemen die afhankelijk zijn van neerslag zoals heidevelden, droge graslanden en hoogveen; ook gevoelig zijn door ontwaterde polders omgeven moeraslanden, die afhankelijk zijn van de aanvoer van oppervlaktewater; de kans op natuurbranden neemt toe
Recreatie	Het aantal aantrekkelijke recreatiedagen neemt toe



> Waterbeheer

Samengestelde extremen

Als een gematigd extreme omstandigheid samenvalt met een andere omstandigheid, kan dit grote gevolgen hebben. Waterschap Noorderzijlvest verstrekte een recent voorbeeld van zo'n samenloop van omstandigheden. Het betreft de afvoer van water uit een gebied in Noord-Nederland naar de Waddenzee.

Omdat er geen pompen aanwezig zijn, kan overtollig water alleen onder invloed van de zwaartekracht uit een deel van dit gebied worden afgevoerd. Daarvoor moet het water boven zeeniveau staan. Door een combinatie van hevige regen en stormvloed was in januari 2012 slechts beperkte waterafvoer mogelijk. In het binnenland ontstond daardoor een extreem hoog waterpeil.

Met fijnmazige modellen zijn veel vergelijkbare situaties berekend voor de toekomst, zodat de mogelijke gevolgen van deze risicovolle situatie beter in kaart kunnen worden gebracht (Figuur 19).

Paalfunderingen

De grondwaterstand hangt af van de hoeveelheid neerslag. Omdat de hoeveelheid neerslag verandert, kan de grondwaterstand in het toekomstige klimaat mogelijk zakken tot beneden de top van houten funderingspalen. Deze palen, die in veel Nederlandse binnensteden oude gebouwen ondersteunen, kunnen onder invloed van zuurstof gaan rotten en zo de fundering verzwakken.

Ingenieursbureau Amsterdam heeft voor een testlocatie berekend dat in de droogste zomers van het G_L -scenario de laagste grondwaterstand aan het einde van deze eeuw ongeveer 5 cm hoger zal staan dan nu. Dit betekent iets minder paalrot. In het W_H -scenario, dat langere droogteperiodes kent, zal de laagste grondwaterstand gelijk blijven of juist 5 cm lager staan. Dit betekent dat de kans op paalrot slechts licht toeneemt.

Elfstedentocht

De kans om op natuurijs te kunnen schaatsen, geldt als een nationale graadmeter voor klimaatverandering. De verwachte temperatuurstijging is het grootst voor de koudste winterdagen en vermindert de kans op langdurige vorst en dus op schaatsijs.

Het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) heeft berekend hoe de kans op een Elfstedentocht verandert in de KNMI'14-scenario's voor 2050. Momenteel is die kans 15% per jaar. Bij alle scenario's neemt de kans in 2050 af: naar 2% bij G_L , 0,6% bij G_H , 0,4% bij W_L en 0,2% bij W_H in 2050. Die kansen zijn kleiner dan destijds bij de KNMI'06-scenario's (minimaal 0,6% bij $W+$)¹¹⁾, omdat bij KNMI'14 de koudste winterdagen veel sterker opwarmen.

> Stedelijke leefomgeving

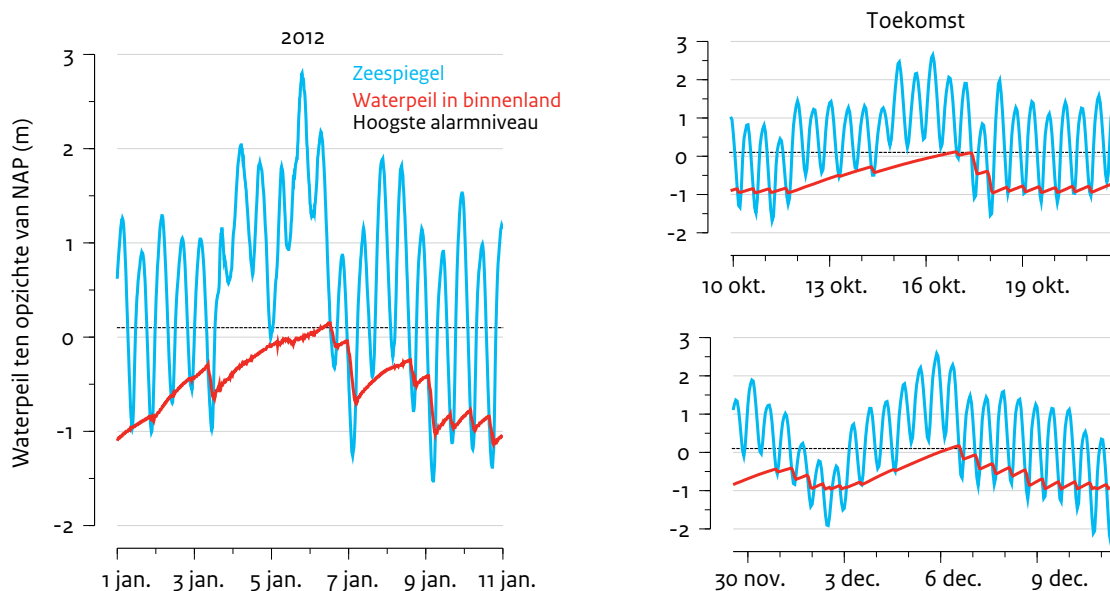
Luchtkwaliteit en klimaat

Of de toekomstige luchtkwaliteit verandert, hangt vooral af van veranderingen in de uitstoot van vervuilende stoffen door bijvoorbeeld de industrie en het verkeer. Veranderingen in het klimaat spelen ook een rol, de mate waarin verschilt per chemische stof.

Toekomstige concentraties ozon op leefniveau worden beïnvloed door temperatuur, zonnestraling en de aanvoer van ozon uit vervuilde gebieden of de ozonlaag. Ozon op leefniveau is vooral een probleem in de zomer, wanneer bij hoge temperaturen en veel zonlicht ozon ontstaat. Toekomstige concentraties fijnstof (PM₁₀) op leefniveau worden beïnvloed door veranderingen van regen en wind. Noorden- en westenwinden voeren vanaf de Noordzee naar Nederland relatief schone lucht aan, terwijl zuiden- en oostenwinden meer vervuilde lucht aanvoeren vanaf het vasteland. Fijnstof kan het hele jaar door problemen veroorzaken.

Veranderingen in ozon en fijnstof

Voor de vier KNMI'14-scenario's is een voorlopige schatting gemaakt van de invloed van klimaatverandering op de concentraties ozon en fijnstof op leefniveau in Nederland. Deze schattingen houden geen rekening met mogelijke nieuwe maatregelen en technologieën, of met veranderingen in de uitstoot van vervuilende stoffen. In de G_H - en W_H -scenario's is de toename van ozon in de zomer groter dan in de G_L - en W_L -scenario's. In deze scenario's leiden extra warmte en instraling tot meer



FIGUUR 19 Beperkte mogelijkheid om water af te voeren, doordat het waterniveau in het binnenland (rood) ook tijdens eb beneden de zeespiegel (blauw) staat. In 2012 leidde dit tot overstromingen op 6 januari (links). Twee vergelijkbare toekomstige weersituaties (rechts).

ozonproductie. De gemiddelde ozonconcentratie van 89 microgram per kubieke meter gebaseerd op zes meetstations op het platteland tussen 2003 en 2006 gaat in 2050 naar 97 in het G_L -scenario tot 108 in het W_H -scenario, een toename van 9% tot 21%.

De Europese norm vereist dat mensen worden geïnformeerd als de ozonconcentratie hoger is dan 180 microgram per kubieke meter. Tussen 2003 en 2006 gebeurde dit gemiddeld op 11 dagen per jaar en meestal in het zuidoosten van het land. Dit aantal zal rond 2050 in het G_L -scenario toenemen tot 14 dagen per jaar en in het W_H -scenario oplopen tot 19 dagen per jaar.

Voor fijnstof is de onzekerheid in de berekende veranderingen groter dan voor ozon. De jaargemiddelde concentratie van 30 microgram per kubieke meter tussen 2003 en 2006 neemt in 2050 toe met 2% bij de G_L - en W_L -scenario's tot 5% bij de G_H - en W_H -scenario's.

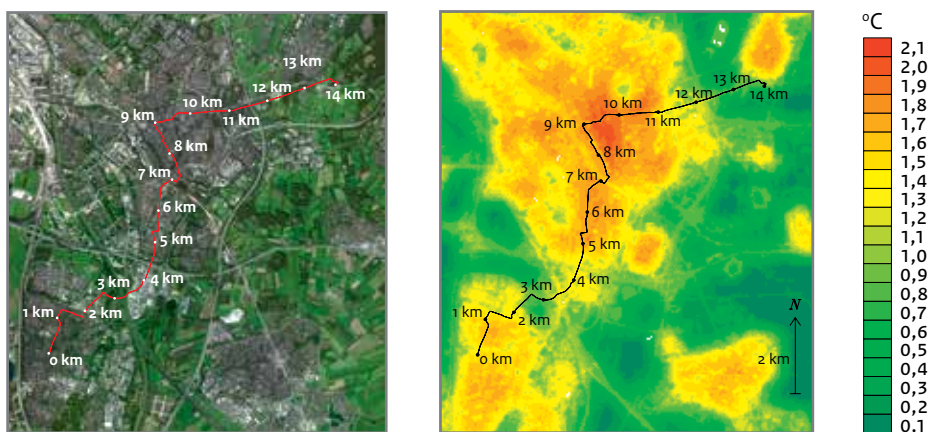
UV-straling

De ozonlaag hoog in de atmosfeer vertoont tekenen van beginnend herstel, dankzij internationale maatregelen om de uitstoot van ozonafbrekende stoffen te verminderen. Deze maatregelen zijn in 1987 vastgelegd in het Montreal Protocol. KNMI heeft waargenomen dat de dikte van de ozonlaag boven Nederland sinds ongeveer 2000 is toegenomen. Volgens een toekomstscenario voor ozonafbraak heeft de ozonlaag boven Nederland zich rond 2035 hersteld¹²⁾. Twintig jaar later heeft het ozongat, dat zich iedere lente boven Antarctica vormt, zich volledig hersteld.

De toekomstige UV-straling in Nederland hangt niet alleen af van de ozonlaag, maar ook van de toekomstige bewolking. De kleine, maar beduidende afname van de bewolking in de zomer, zoals berekend in het W_H -scenario en in mindere mate in het G_H -scenario, doet de verminderde blootstelling aan UV-straling door het herstel van de ozonlaag deels teniet.

Stedelijke warmte-eiland

Ruim 40% van alle Nederlanders woont in een stedelijke omgeving. Veranderingen van het klimaat en de luchtkwaliteit gaan hier samen met de effecten van het zogeheten 'stedelijk warmte-eiland', waarmee wordt bedoeld dat het in stedelijke gebieden warmer is dan in de landelijke gebieden. Het warmte-eiland effect is het grootst gedurende de nacht, en kent verschillen binnen de stad (Figuur 20). De grootte van dit effect hangt sterk af van de dichtheid van de bebouwing, van de hoeveelheid groen en van bewolking, windrichting en windsnelheid. Uit onderzoek van de Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek (TNO), Wageningen UR en het KNMI blijkt dat het temperatuurverschil door het warmte-eiland effect gemiddeld even groot is als de temperatuurverandering in de scenario's voor 2050. Daardoor worden de drempelwaarden voor hittestress in stedelijk gebied veel vaker overschreden dan op het platteland. De indicatoren voor het aantal dagen boven een bepaalde temperatuu drempel in de tabel op bladzijde 4 gelden voor het platteland.



FIGUUR 20 Nachtelijk warmte-eiland effect gemiddeld over het jaar in Utrecht (330.000 inwoners) (rechts). Gebaseerd op een landgebruikskaart (links) en mobiele metingen van temperatuur en vochtigheid per fiets langs de aangegeven route¹³⁾.

Gezondheid en sterfte

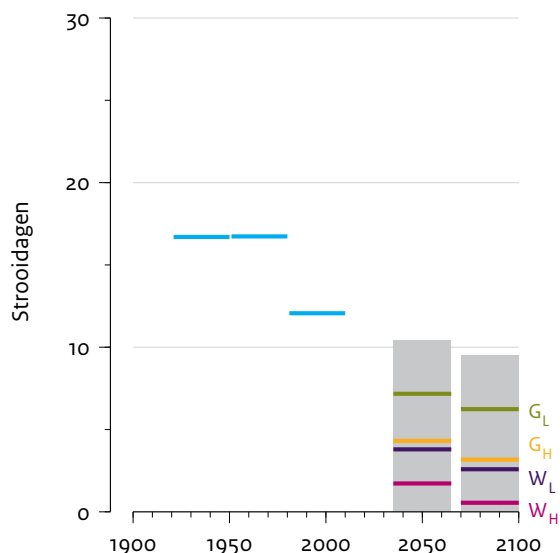
Een hogere temperatuur zal in de zomer meer sterfte door hittestress veroorzaken. In de winter zal juist minder sterfte optreden. TNO en de Universiteit van Maastricht (ICIS) hebben het verband tussen temperatuur en sterfte onderzocht. Daaruit blijkt dat in het huidige klimaat hittegolven tot meer sterfte leiden dan koudegolven. Voorlopige berekeningen door ICIS op basis van de KNMI'14-scenario's laten zien dat in de toekomst de afname van door koude veroorzaakte sterfte in de winter groter is dan de toename van door warmte veroorzaakte sterfte in de zomer.

Wegvervoer

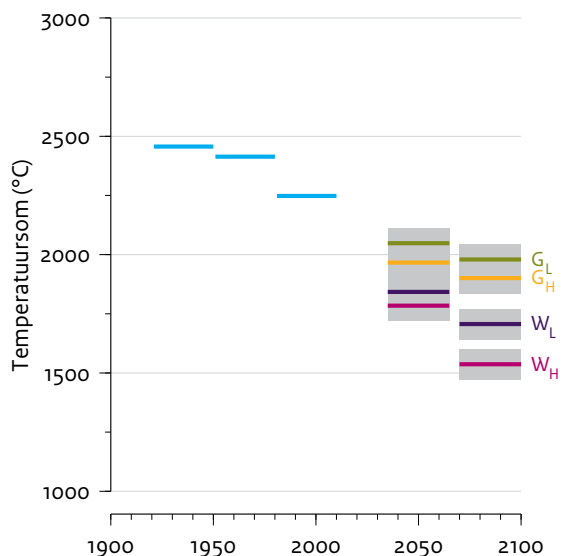
Vooraf het frequenter optreden van extremen, zoals hevige neerslag, is een effect van klimaatverandering dat het verkeer kan hinderen. Maar de opwarming kan ook positieve gevolgen hebben. Als voorbeeld is een index voor wintergladheid berekend bij het huidige klimaat en bij de KNMI'14-scenario's (Figuur 21). Deze index geeft het aantal dagen per winter met sneeuwval, een dooiaanval die gepaard gaat met neerslag, of een vorstaanval die gepaard gaat met neerslag. De afgelopen jaren kwam de waarde van deze index goed overeen met het aantal keren dat zout werd gestrooid. Ook al is de natuurlijke variatie van jaar op jaar groot, toch neemt de kans op wintergladheid in elk scenario af. In het toekomstige klimaat is zout strooien waarschijnlijk minder vaak nodig.

Energieverbruik voor verwarming

Door de verwachte hogere temperaturen in de toekomst zal de behoefte aan energie voor het verwarmen van huizen, fabrieken en kantoren verder afnemen. Het energieverbruik hangt af van het aantal zogeheten 'graaddagen'. Het aantal graaddagen wordt berekend door voor alle dagen met een gemiddelde buitentemperatuur van minder dan 17 °C te bekijken hoeveel graden de temperatuur lager was. De optelsom van alle afwijkingen is het aantal graaddagen. Gasterra en NAM hanteren deze index om het gebruik van gas en energie te schatten ¹⁴⁾. Ten opzichte van 1981-2010 zal het aantal graaddagen rond 2050 ongeveer 10% lager zijn in het G_L-scenario en 20% lager in het W_H-scenario (Figuur 22). In deze scenario's zal voor airconditioning juist meer energie nodig zijn.



FIGUUR 21 Index voor het aantal dagen per jaar in De Bilt dat op gladde wegen zout moet worden gestrooid, deels gebaseerd op de waargenomen temperatuur en neerslag, en deels op de berekende temperatuur en neerslag volgens de KNMI'14-scenario's.



FIGUUR 22 Aantal graaddagen als maat voor het gebruik van gas en energie, deels gebaseerd op waarnemingen in De Bilt, deels gebaseerd op berekeningen volgens de KNMI'14-scenario's voor 2050 en 2085. Graaddagen: som van de afwijkingen ten opzichte van 17 °C voor alle dagen met een gemiddelde temperatuur van minder dan 17 °C; bijvoorbeeld, een daggemiddelde temperatuur van 14 °C voegt 3 graaddagen toe; een daggemiddelde temperatuur van -2 °C voegt 19 graaddagen toe.

> Landbouw en natuur

Groeiseizoenen en de agro-klimaatkalender

Een hogere CO₂-concentratie en de hogere temperatuur kunnen in de toekomst leiden tot hogere landbouwopbrengsten en een verlenging van het groeiseizoen (Figuur 23). Maar veranderingen in neerslag en extreem weer, zoals buien, hagel, droogte en zomerse ozonstress kunnen oogsten juist bedreigen.

Wageningen UR heeft de mogelijke gevolgen van klimaatverandering voor de aardappeloogst berekend. Het resultaat is uitgewerkt in een kalender voor aardappelboeren, met speciale aandacht voor de timing van extremen tijdens de groeifase van de gewassen.

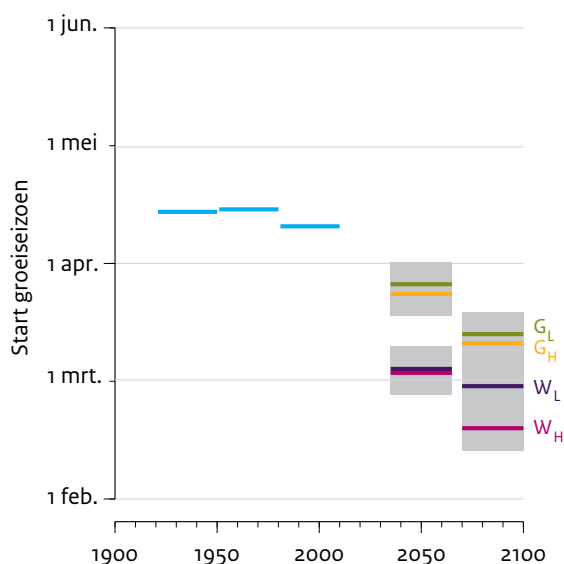
Deze kalender toont hoe enkele relevante klimaatfactoren volgens twee scenario's rond 2050 zijn veranderd.

Zo verschuift het tijdstip van ploegen en poten naar een latere datum door een toename van de hoeveelheid neerslag in de vroege lente. Een ander gevolg is dat hittegolven schade toebrengen aan de oogst. Warmere winters veroorzaken mogelijk opslagproblemen door vroegtijdige ontspruiting.

Pollenallergie

Hogere temperaturen leiden naar verwachting tot een verlenging van het groei- en bloeiseizoen en tot een toename van het aantal 'allergiedagen'. Mogelijk verschijnen er nieuwe allergie veroorzakende planten in Nederland.

Allergische verschijnselen door pollen kunnen dus eerder in het seizoen optreden. Wageningen UR heeft berekend dat volgens de KNMI'14-scenario's het seizoen voor berkenpollen rond 2050 gemiddeld negen dagen eerder begint dan in de referentieperiode 1981-2010, namelijk op 5 april in plaats van 14 april. Het seizoen voor graspollen begint gemiddeld tien dagen eerder, namelijk op 18 mei in plaats van 28 mei. De aanvangsdata verschillen per scenario en variëren sterk van jaar tot jaar.



FIGUUR 23 Start van het groeiseizoen, deels gebaseerd op waarnemingen in De Bilt, deels gebaseerd op berekeningen volgens de KNMI'14-scenario's voor 2050 en 2085. Het groeiseizoen start op de kalenderdag waarop de gemiddelde temperatuur boven 5 °C komt en blijft ten minste tot 1 juli.





KNMI'14 en KNMI'06 vergeleken

Onderstaande tabel vergelijkt de nieuwe KNM'14-klimaatscenario's met de vorige scenario's uit 2006. Wat zeggen de verschillen over de geloofwaardigheid van deze KNMI'06-scenario's die geïntegreerd zijn in de Deltascenario's van het Deltaprogramma?

De recente wetenschappelijke inzichten in het nieuwste IPCC-rapport, waarop KNMI'14 is gebaseerd, verschillen maar in beperkte mate van die in het vorige IPCC-rapport, waarop KNMI'06 is gebaseerd. Daarom lijken de algemene klimaatveranderingen in de KNMI'14-scenario's zoals beschreven op bladzijde 7 sterk op de algemene veranderingen in de KNMI'06-scenario's. Dit geeft aan dat de algemene kenmerken van de scenario's robuust zijn.

De KNMI'14-scenario's voegen detail toe en geven een breder beeld van het toekomstige klimaat van Nederland dan de KNMI'06-scenario's. De KNMI'14-scenario's omvatten meer klimaatvariabelen en -indicatoren dan KNMI'06, een weerspiegeling van de diversiteit aan gebruikerswensen.

De KNMI'06 scenario's zijn nog steeds mogelijke scenario's voor klimaatverandering in Nederland. Maar een aantal kenmerken van de KNMI'06 scenario's is gezien de huidige wetenschappelijke kennis minder waarschijnlijk. Het KNMI zal gebruikers adviseren bij de beoordeling van het belang van de verschillen tussen de KNMI'06 en de KNMI'14 scenario's voor hun toepassing.

KNMI'06	KNMI'14
Vier scenario's voor toekomstige klimaatverandering in Nederland	Vier scenario's voor toekomstige klimaatverandering in Nederland
Zeespiegelstijging tot 35 cm rond 2050 en tot 85 cm rond 2100 (=95 cm gecorrigeerd voor het verschil in de definitie van de bovenwaarde t.o.v. KNMI'14)	Zeespiegelstijging tot 40 cm rond 2050, 80 cm rond 2085 en 100 cm rond 2100
Sterke opwarming en uitdroging in de zomer in de G+ en W+ scenario's met grote verandering van het luchtstromingspatroon	Minder sterke opwarming en uitdroging in de zomer in de G _H en W _H scenario's met grote verandering van het luchtstromingspatroon
Kusteffect op de neerslag in 2009 toegevoegd ⁷⁾	Kusteffect te onzeker om mee te nemen
Geen informatie over neerslag per uur	Schatting van de maximale neerslag per uur
Gebaseerd op SRES-A1b scenario's voor uitstoot en landgebruik ³⁾	Gebaseerd op RCP4.5, RCP6.0 en RCP8.5 scenario's voor uitstoot en landgebruik ³⁾
Gebaseerd op 5 GCMs en 10 RCMs	Gebaseerd op EC-Earth en RACMO2, gebruik makend van 250 GCM-berekeningen
Zichtjaren 2050 (2036-2065) en 2100 (twee maal de veranderingen voor 2050, behalve voor zeespiegelstijging)	Zichtjaren 2030 (2016-2045), 2050 (2036-2065) en 2085 (2071-2100, het uiterste zichtjaar gegeven dat GCM berekeningen stoppen in 2100)
Referentieperiode 1976-2005	Referentieperiode 1981-2010 (= periode van de klimaatatlas ²⁾)
Set van 5 klimaatvariabelen en 10 klimaatindicatoren	Set van 12 klimaatvariabelen en 22 klimaatindicatoren, inclusief mist, wolken, zonnestraling en verdamping
Geen informatie over natuurlijke variaties	Geschatte natuurlijke variaties op 30-jaar tijdschaal
Geen onderscheid tussen regio's	Onderscheid tussen regio's voor eenduidige veranderingen, zoals de gemiddelde temperatuur
Contacten met gebruikers vooral na het opstellen van de scenario's	Contacten met gebruikers in elke fase van het proces
Tijdreeks-transformatie-tool verstrekt	Tijdreeks-transformatie-tool en mogelijkheid voor toekomstig-weerberekeningen verstrekt
Weinig voorbeelden van toepassingen door gebruikers	Belangrijkste kansen en risico's van klimaatverandering in Nederland samengevat op basis van voorbeelden van toepassingen door gebruikers en literatuur

- AR: Assessment Report
- EC-Earth: Mondiale klimaatmodel van het KNMI
- GCM: General Circulation Model (mondiaal klimaatmodel)
- IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change
- RACMO2: Klimaatmodel voor Europa van het KNMI
- RCM: Regional Climate Model (klimaatmodel van Europa)
- RCP: Representative Concentration Pathway
- SRES: Special Report on Emission Scenarios



Achtergrondinformatie

> Definitie klimaatscenario

IPCC: Een klimaatscenario is een aannemelijke en samenhangende voorstelling van het toekomstige klimaat, opgesteld om de mogelijke gevolgen van door de mens veroorzaakte klimaatverandering te onderzoeken ³⁾.

> Huidige stand van de wetenschap

De KNMI'14-klimaatscenario's brengen de wetenschappelijke klimaatkennis in beeld van dit moment. In Nederland is die mede tot stand gekomen in programma's als Klimaat voor Ruimte, Kennis voor Klimaat, NWO en Europese kennisprogramma's. Voor de scenario's gebruikte kennis is afkomstig van uitgebreid onderzoek zoals gerapporteerd in de internationale wetenschappelijke literatuur. Er is alleen gebruik gemaakt van aannamen waarvoor een robuuste wetenschappelijke onderbouwing bestaat ¹⁵⁾. Waar deze onderbouwing ontbreekt, zoals bij het volledig tot stilstand komen van de Golfstroom al in deze eeuw, is dit niet meegenomen in de scenario's. Extreme scenario's zijn niet opgesteld.

KNMI heeft de volgende criteria gehanteerd voor het selecteren van de toekomstscenario's in deze uitgave: geloofwaardigheid (zijn de scenario's aannemelijk, betrouwbaar en samenhangend?), relevantie (zijn de scenario's geschikt voor hun doel?) en helderheid (zijn de scenario's duidelijk beschreven?) ¹⁶⁾. De ontwikkeling van de KNMI'14-scenario's is begeleid door een internationale adviescommissie ¹⁷⁾.

Als basis voor de scenario's dienen de ruim 250 berekeningen met klimaatmodellen gedaan voor het nieuwste IPCC rapport. Het accent is gelegd op de waarschijnlijke door de mens veroorzaakte veranderingen waarvoor brede modelondersteuning bestaat en niet op de uitschieters. Daarnaast is gebruik gemaakt van kennis over processen in het klimaat die deels is afgeleid uit waarnemingen. De scenario's zijn ontwikkeld voor een brede gebruikersgroep. Hoe goed ze aansluiten bij specifieke gebruikers zal afhangen van de veronderstelde risico's, de ervaring met het omgaan met onzekerheden, en van de gevoelde urgentie of prioriteitstelling ¹⁸⁾.

Extreme scenario's: kleine kans, grote gevolgen

In wetenschappelijke kringen bestaat steun voor de opvatting dat door een sterke, wereldwijde opwarming de kans op een ingrijpende, abrupte verandering van het klimaatstelsel toeneemt ¹⁹⁾. Een goede kwantitatieve onderbouwing hiervoor ontbreekt echter op dit moment. Daarom valt het ontwikkelen van scenario's voor abrupte klimaatverandering buiten het bestek van KNMI'14. Toch geven we hieronder enkele voorbeelden. Een klein aantal klimaatmodellen laat zien dat de warme Golfstroom voor 2100 geleidelijk tot stilstand komt. Hierdoor neemt de opwarming van Europa in deze modellen af, met uitzondering van één model waarin de Golfstroom rond 2050 tot stilstand komt en waarbij Europa tijdelijk netto zelfs afkoelt.

Enkele modellen berekenen een abrupte afname van het zeeijsoppervlak in het Noordpoolgebied, waardoor de temperatuur in dit gebied sterk toeneemt. Dit kan eventueel invloed hebben op stormen in Europa.

Een ander effect dat sommige modellen berekenen, is een zeer sterke uitdroging van de bodem in Zuid-Europa. Deze 'verwoestijning' van het Middellandse Zeegebied vergroot de kans op oostenwinden in Nederland, met zeer droge en warme zomers tot gevolg.

Twee andere mogelijke verschijnselen worden in de huidige klimaatmodellen niet, of niet goed, nagebootst. Het eerste is het instorten van de West-Antarctische ijskap. Deze ijskap verliest momenteel massa doordat in toenemende mate ijs afkalft. Stort de ijskap in, waarvoor nog geen aanwijzingen bestaan, dan kan het massaverlies veel groter zijn dan waarmee rekening is gehouden in de KNMI'14-scenario's voor de zeespiegel.

Een tweede verschijnsel betreft de mogelijkheid dat restanten van tropische orkanen West Europa bereiken. De laatste jaren zien we orkanen relatief vaak in het oosten van de tropische Atlantische oceaan ontstaan, en minder vaak in het Caribische gebied. Veel oostelijke orkanen bewegen noordwaarts en buigen dan af richting West-Europa. De kans op het ontstaan van oostelijke orkanen neemt toe door de wereldwijde opwarming, en daarmee de kans dat restanten van orkanen West Europa bereiken. Nieuwe berekeningen van toekomstig weer met een zeer fijnmazig model van het KNMI bevestigen dit. In Nederland kan het stormseizoen daardoor eerder beginnen en kan de hevigheid van stormen toenemen.

> Scenario-onderscheid: waarom zo?

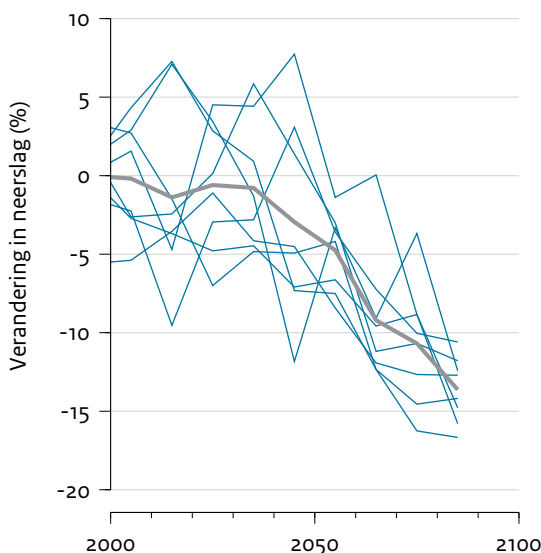
Door de wereldwijde temperatuurstijging als eerste kenmerk voor het scenario-onderscheid te kiezen, omvatten de KNMI'14-scenario's zowel de verschillen tussen de uitstootscenario's als de spreiding van de verschillende modelberekeningen bij een gegeven uitstootscenario. Dit laatste verschil komt door onzekerheden in hoe het klimaat moet worden gerepresenteerd in een model, waarbij kleinschalige processen, zoals bijvoorbeeld in wolken, een belangrijke rol spelen. Net als voor de KNMI'06-scenario's, is ook nu de verandering van het luchtstromingspatroon gehanteerd als tweede kenmerk voor het scenario-onderscheid.

Sommige klimaatmodellen berekenen voor de winter een kleinere opwarming boven de Noord-Atlantische Oceaan en een grotere opwarming in de subtropen vergeleken met andere klimaatmodellen. Het temperatuurverschil boven Europa dat hieruit volgt, veroorzaakt in die modellen in de winter vaker westenwinden, die in Nederland leiden tot zacht en nat weer. Voor de zomer berekenen sommige modellen een kleinere opwarming boven de Noord-Atlantische Oceaan en een grotere opwarming in Centraal Europa. Dit veroorzaakt meer oostenwinden, die in Nederland warm en droog weer met zich meebrengen.

Voorbeeld van de rol van natuurlijke variaties

Natuurlijke variaties zijn groter voor neerslag dan voor temperatuur, groter voor extremen dan voor het gemiddelde, groter voor afzonderlijke locaties dan voor gebiedsgemiddelden en groter voor Nederland dan voor Europa.

Ter illustratie toont Figuur 24 voor Nederland toekomstige veranderingen van de neerslag in de zomer volgens acht berekeningen met hetzelfde klimaatmodel en hetzelfde uitstootscenario. Gemiddeld neemt de zomerneerslag geleidelijk af. Dit is het algemene beeld zoals beschreven in de scenario's. De individuele modelberekeningen



Figuur 24 Toekomstige veranderingen in de neerslag (30-jaar gemiddelden ten opzichte van 1981-2010) in Nederland in de zomer volgens acht berekeningen met hetzelfde klimaatmodel (blauwe lijnen). Grijze lijn: gemiddelde.

verschillen echter van elkaar door de chaotische eigenschappen van het klimaatsysteem. Hierdoor kan het werkelijke toekomstige klimaat, dat gezien kan worden als een afzonderlijke modelberekening en niet als het gemiddelde van alle berekeningen, verschillen van het klimaat volgens de scenario's. Zo neemt bij drie van de acht berekeningen in Figuur 24 door natuurlijke variaties de neerslag toe tot ongeveer 2050, gevolgd door een sterke afname daarna.

Verschillen tussen waarnemingen en berekeningen volgens de scenario's hoeven niet onverenigbaar te zijn. Waargenomen veranderingen zijn een optelsom van door de mens veroorzaakte klimaatverandering en natuurlijke variaties. Het is niet eenvoudig de bijdrage van deze twee afzonderlijk te bepalen. Voor iedere klimaatvariabele geldt een ander tijdstip waarop de door de mens veroorzaakte klimaatverandering in Nederland (het signaal), zoals beschreven in de scenario's, is te onderscheiden van natuurlijke variaties (de ruis). Voor neerslag ligt dit moment bijvoorbeeld verder in de toekomst dan voor temperatuur. Voor neerslag is de verhouding tussen signaal en ruis kleiner dan voor temperatuur.

> Hoe zijn de scenario's gemaakt?

Voor de scenario's zijn de uitkomsten van alle IPCC modelberekeningen ³⁾ geanalyseerd. Daarnaast zijn er additionele modelberekeningen met de KNMI klimaatmodellen EC-Earth en RACMO₂ gemaakt, waarbij in totaal meer dan 1200 jaar aan klimaatdata voor Nederland is geproduceerd met een ongekend hoge ruimtelijke resolutie van ongeveer 10 km. Deze resolutie is 4 keer zo hoog als in de KNMI'o6 scenario's.

Op basis van de IPCC modelberekeningen zijn er voor elk van de vier KNMI'14-scenario's 8 modelberekeningen geselecteerd. Hierbij is gebruik gemaakt van het scenario-onderscheid op basis van wereldwijde opwarming en verandering in circulatiepatroon. Samen bestrijken deze 4 x 8 = 32 berekeningen het relevante gedeelte van de veranderingen volgens de andere IPCC modelberekeningen. De beschikbaarheid van meerdere berekeningen voor elk scenario maakt het bovendien mogelijk klimaatverandering (het signaal) te onderscheiden van de natuurlijke variaties (de ruis).

Naast deze modelberekeningen is voor een aantal indicatoren, bijvoorbeeld voor neerslagextremen, gebruik gemaakt van aanvullende informatie uit waarnemingen en zeer hoge resolutie modellen. Voor gedetailleerde informatie over de gevolgde methode wordt verwezen naar het wetenschappelijk rapport ¹⁾.

> Verminderde temperatuurstijging sinds 1998

Dat klimaatmodellen de verminderde wereldwijde temperatuurstijging sinds 1998 niet goed voorspelden, betekent niet dat ze ongeschikt zijn om het toekomstige klimaat te berekenen. Een van de oorzaken heeft te maken met natuurlijke variaties. De klimaatmodellen die zijn gebruikt voor de KNMI'14-scenario's, zijn niet bedoeld om nauwkeurig te voorspellen wat de richting is van natuurlijke variaties, positief of negatief, terwijl dat wel van invloed is op kortdurende trends.

Deze zogeheten 'fase' van natuurlijke variaties is in de nabije toekomst mogelijk wel voorspelbaar. Hiertoe wordt in het klimaatmodel als begintoestand voor de berekening de waargenomen toestand genomen, in het bijzonder die van de langzaam variërende delen van het klimaatsysteem, zoals de oceanen. Pogingen om de fase van natuurlijke variaties tien tot twintig jaar vooruit te voorspellen zijn tot nu toe slechts gedeeltelijk succesvol gebleken.

> KNMI'14-klimaatscenario's en IPCC-uitstootsscenario's

IPCC: Sinds het pre-industriële tijdperk is de CO₂-concentratie met 40% toegenomen. De toename van CO₂ in de atmosfeer is de belangrijkste oorzaak van klimaatverandering sinds 1750 en zal in de toekomst leiden tot verdere klimaatverandering. De modellen van het IPCC maken gebruik van vier scenario's voor de uitstoot en concentratie van broeikasgassen en aerosolen (zwevende deeltjes) en veranderingen in landgebruik. Deze scenario's vertegenwoordigen verschillende ontwikkelingen in wereldbevolking, economie en technologie (RCPs, Representative Concentration Pathways) ³⁾.

De vier uitstootsscenario's (RCPs) van het IPCC zijn niet één-op-één te koppelen aan de vier KNMI'14-klimaatscenario's voor Nederland. De keuze van de KNMI'14-klimaatscenario's is gebaseerd op de verschillen tussen klimaatmodellen, die de onzekerheid over het klimaat op korte termijn sterker bepalen dan de verschillen tussen de uitstootsscenario's.

Om de twee te kunnen vergelijken, laat Figuur 25 zien hoe de toename van de wereldwijde temperatuur in 2050 zoals aangenomen in de KNMI'14-scenario's overeenkomt met die volgens de uitstootsscenario's. De G_L- en G_H-scenario's vallen samen met het lagere deel bij de scenario's RCP4.5 en RCP6.0, waarin de concentraties stabiliseren. De W_L- en W_H-scenario's vallen samen met het hoge-uitstoot scenario. Voor 2085 is dat beeld vergelijkbaar.

Top-down en bottom-up

Terwijl bij de constructie van de KNMI'14-scenario's de informatiestroom top-down verloopt (van de IPCC-uitstootsscenario's, via modelberekeningen, aanpassing aan kleinere ruimtelijke schalen en statistische nabewerking, naar het bepalen van gevolgen van klimaatverandering in Nederland), zijn de scenario's ook ontworpen voor toepassingen waarbij de informatiestroom in tegenovergestelde richting verloopt.

In deze bottom-up aanpak bepaalt men eerst de kwetsbaarheid voor mogelijke verstoringen, bijvoorbeeld de kwetsbaarheid voor overstroming door zeespiegelstijging. Daarna beoordeelt men in hoeverre klimaatverandering de kans op een dergelijke verstoring wijzigt. De KNMI'14-scenario's laten in zo'n geval zien of en wanneer bijvoorbeeld de maximaal toelaatbare kans op overstroming wordt overschreden. De vertaling van eerder opgetreden extreem-weersituaties naar het toekomstige klimaat (zie bladzijde 20) kan behulpzaam zijn bij deze bottom-up aanpak.

Evaluatie van modelverschillen

Verschillen tussen modelberekeningen van het toekomstige klimaat hangen samen met aannames over de toekomstige uitstoot van broeikasgassen en aerosolen (zwevende deeltjes) en over veranderingen in landgebruik. Daarnaast hebben de natuurlijke klimaatvariaties een verschillende invloed op modelberekeningen. Tevens zit elk klimaatmodel weer anders in elkaar zodat uitkomsten van elkaar kunnen afwijken. Ook bij hetzelfde uitstootscenario berekenen verschillende modellen daarom systematisch verschillende veranderingen van de wereldwijde temperatuur, de zogeheten “klimaatgevoeligheid”. Vanwege lokale processen en grotere natuurlijke variaties op kleinere schalen zijn de verschillen tussen modelberekeningen overigens groter voor Europa, en nog groter voor Nederland.

De kennis en de voorspelbaarheid van het klimaat zijn de laatste jaren toegenomen. Klimaatmodellen beschrijven door hun toegenomen fijnmazigheid veel processen nu realistischer dan voorheen. Daarnaast geven de huidige satellietwaarnemingen ongekende mogelijkheden om modelresultaten te beoordelen, vooral wat betreft wolken. De modellen bootsen veel kenmerken van het klimaat op continentale schaal goed na, inclusief de waargenomen patronen van opwarming op continentale schaal sinds 1951³⁾.

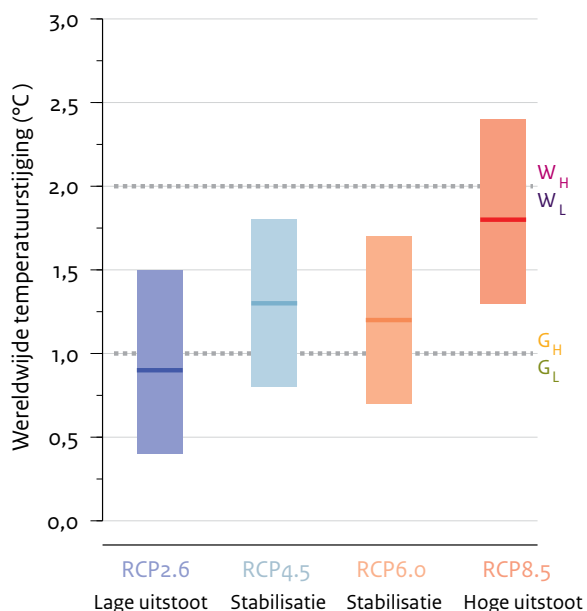
Toch hebben klimaatmodellen zwakke kanten en blijft een zorgvuldig en kritisch oordeel van experts nodig. Bijvoorbeeld om te beoordelen of alle klimaatmodellen niet een te lage of te hoge “klimaatgevoeligheid” hebben, of op een andere manier collectief er naast zitten. Ook garandeert een goede overeenstemming tussen waargenomen en berekende veranderingen over de afgelopen decennia niet dat een model de toekomst kan voorspellen. Omgekeerd sluit een slechte overeenstemming dit vermogen niet uit.

Het laagste uitstootscenario, RCP2.6, dat uitgaat van relatief sterke afname van uitstoot van broeikasgassen, is niet gebruikt voor de KNMI'14-klimaatscenario's. De G_L - en G_H -scenario's liggen nog wel dicht bij de gemiddelde wereldwijde temperatuurstijging bij RCP2.6. Maar de ondergrens voor de wereldwijde temperatuurstijging bij RCP2.6 wordt niet afgedekt door KNMI'14. Voor een beschrijving van het effect van die ondergrens op de klimaatverandering in Nederland is een extra scenario nodig passend bij een wereldwijd sterke beperking van het gebruik van fossiele brandstoffen.

➤ *Klimaatscenario's voor landen in de omgeving*

Nationale klimaatscenario's helpen de samenleving om op georganiseerde wijze om te gaan met klimaatverandering. Het gebruik van gestandaardiseerde scenario's maakt resultaten voor verschillende toepassingen en maatschappelijke sectoren vergelijkbaar. Al zijn er de afgelopen 25 jaar in veel West-Europese landen klimaatscenario's gemaakt, in maar weinig landen is de aanpak nationaal gecoördineerd zoals in Nederland.

In alle landen die over nationale klimaatscenario's beschikken, is uitgegaan van de berekeningen met mondiale klimaatmodellen voor het IPCC. De methode om hieruit de nationale klimaatscenario's af te leiden, verschilt echter van land tot land. Gebruik makend van toegenomen computerkracht en van nieuwe statistische methoden, hebben twee Europese landen recentelijk



FIGUUR 25 Toename van de wereldwijde temperatuur rond 2050, ten opzichte van 1981-2010, zoals aangenomen in de KNMI'14-scenario's (horizontale lijnen) en berekend voor de vier uitstootscenario's van het IPCC (RCPs, verticale balken voor modelspreiding met horizontale lijnen voor de centrale schatting).

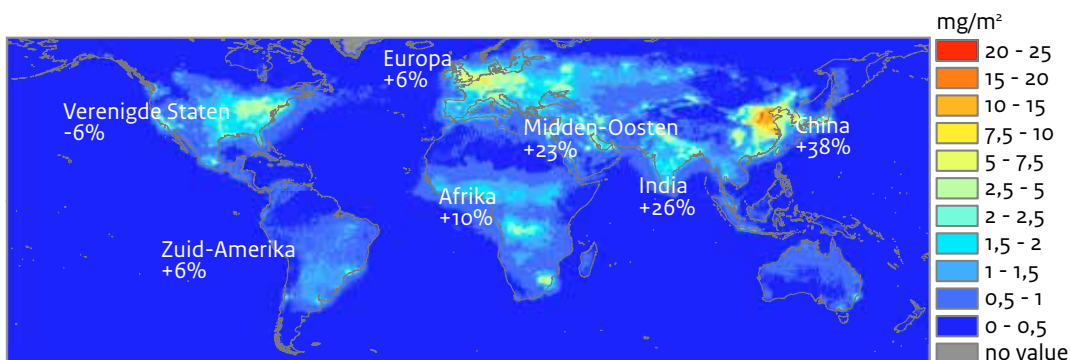
zogenoemde probabilistische klimaatscenario's gemaakt. Het Verenigd Koninkrijk ²⁰⁾ koppelt kansen aan toekomstige veranderingen in bijvoorbeeld de temperatuur of de neerslag. Zwitserland ²¹⁾ verstrekt drie mogelijke uitkomsten bij ieder uitstootscenario, ieder met een eigen kans (laag, midden en hoog). Omdat aan de IPCC-uitstootscenario's geen kansen zijn toegekend, is het moeilijk om volledig probabilistische klimaatscenario's te maken. Het KNMI heeft bewust gekozen voor vier aparte scenario's zonder bijbehorende kansen. De redenen hiervoor zijn, dat: 1) aparte scenario's elk hun eigen verhaal vertellen en daarom eenvoudiger

zijn te hanteren door de gebruikers; 2) bij aparte scenario's de gebruikers kunnen beschikken over een groter aantal klimaatindicatoren, wat de bruikbaarheid eveneens vergroot; en 3) de aparte scenario's expliciet zijn afgeleid van de twee dominante onzekerheden, namelijk de wereldwijde temperatuurstijging en de verandering van het luchtstromingspatroon, wat de geloofwaardigheid en interpreteerbaarheid vergroot. Er bestaan binnen Europa plannen om voor Europa gezamenlijk klimaatscenario's te ontwikkelen, en ook andere grensoverschrijdende klimaatdiensten.

Evaluatie van IPCC-uitstootscenario's

Om te zien in hoeverre de vier RCPs realistisch zijn, zijn ze vergeleken met de waargenomen concentraties van CO₂ en andere broeikasgassen in de periode 2000-2012. Daaruit blijkt dat de waargenomen concentraties ongeveer in het midden liggen van het bereik van de RCP-waarden, behalve die van aerosolen (zwevende deeltjes) en troposferisch ozon, die beiden boven het RCP-bereik liggen. Als deze tendens doorzet kan de wereldwijde temperatuurstijging berekend voor de vier uitstootscenario's van het IPCC zoals getoond in Figuur 25 eerder of later worden bereikt dan in 2050. Dat maakt dat de geldigheid van de KNMI'14 scenario's evenredig verschuift. Aerosolen hebben namelijk een koelend effect op het klimaat terwijl troposferisch ozon, na CO₂ en methaan, het belangrijkste broeikasgas van menselijke oorsprong is.

De toekomstige concentraties van aerosolen en ozon verschillen per gebied en hangen sterk af van de genomen maatregelen tegen luchtverontreiniging. Alle vier de RCPs veronderstellen vergaande maatregelen en een sterke afname van de uitstoot in 2030. Satellietmetingen van de hoeveelheid aerosolen tussen 2000 en 2009 laten echter zien dat de totale hoeveelheid nauwelijks is veranderd. De hoeveelheid aerosolen is afgenomen boven de Verenigde Staten en Europa, maar toegenomen boven China en India. Boven al deze gebieden zijn de waargenomen concentraties van ozon hoger dan in de RCPs. Ozon concentraties zijn gerelateerd aan NO₂-concentraties die bijna overal zijn toegenomen (Figuur 26), wereldwijd tussen 2005 en 2012 met 7%.



Figuur 26 Waargenomen veranderingen in NO₂-concentratie per regio tussen 2005 en 2012; de onderliggende kaart geeft de NO₂-concentratie in 2012. NO₂ is een goede maat voor de uitstoot van ozon en andere broeikasgassen en vervuiling door de mens.

Aanvullend maatwerk

De KNMI'14-klimaatscenario's bestaan uit een uitgebreid pakket van rapporten en online informatie. Ze zijn gemaakt voor beleidsadviseurs, ingenieurs en onderzoekers die Nederland voorbereiden op klimaatverandering in de toekomst. Om goed aan te sluiten bij gebruikerswensen zijn in 2010, 2012 en 2013 verscheidene workshops gehouden en is een gebruikerscommissie opgericht.

Bij de ontwikkeling van de scenario's kon niet aan alle verzoeken van gebruikers worden voldaan. Daarvoor waren deze te divers. Voor specifieke toepassingen kan het KNMI op gebruikerswensen toegesneden informatie beschikbaar maken, bijvoorbeeld over samengestelde extremen, meerdaagse neerslagsommen en regenduur.

Ook kunnen aanvullende scenario's worden ontwikkeld, bijvoorbeeld voor een breder bereik aan mogelijke toekomstige klimaten, inclusief scenario's met kleine kans maar grote gevolgen (zie bladzijde 28). Zulke extreme scenario's zijn onder meer bruikbaar voor stresstesten, om te bepalen wanneer een bepaalde adaptatiestrategie niet meer werkt.

Tot slot zal het KNMI de verschillende sectoren blijven ondersteunen bij het gebruik van de scenario's.





Referenties

- 1) KNMI, 2014: Climate Change scenarios for the 21st Century – A Netherlands perspective. Scientific Report WR2014-01, KNMI, De Bilt, The Netherlands. www.klimaatsscenarios.nl
- 2) KNMI, 2011: De Bosatlas van het Klimaat. Noordhoff Uitgevers, Groningen, KNMI, De Bilt, 112 pp. www.klimaatatlas.nl
- 3) IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- 4) Rijksoverheid, 2008: Nationaal Waterplan, 264pp. <http://www.helpdeskwater.nl/publish/pages/25409/nationaal-waterplan.pdf>
- 5) Bruggeman, W. en co-auteurs, 2013: Deltascenario's voor 2050 en 2100, Nadere uitwerking 2012-2013, 65pp. <https://deltaprogramma.pleio.nl/file/download/20469432>
- 6) Dillingh, D., F. Baart, J.G. de Ronde, 2010: Definitie zeespiegelstijging voor bepaling suppletiebehoefte. Rekenmodel t.b.v. handhaven kustfundament, Deltares. <http://publicaties.minienm.nl/documenten/definitie-zeespiegelstijging-voor-bepaling-suppletiebehoefte-rek>
- 7) Klein Tank, A.M.G. and G. Lenderink (Eds.), 2009: Climate change in the Netherlands; Supplements to the KNMI'06 scenarios, KNMI, De Bilt, The Netherlands. www.knmi.nl/knmi-library/climate-report/supplementsto06scenarios.pdf
- 8) Slangen, A.B.A., C.A. Katsman, R.S.W. van der Wal, L.L.A. Vermeersen and R.E.M. Riva, Towards regional projections of twenty-first century sea-level change using IPCC SRES scenarios, *Clim. Dyn.*, 2012, 38, 5, 1191-1209, doi:10.1007/s00382-011-1057-6
- 9) Jacobs, A.F.G., B.G. Heusinkveld and A.A.M. Holtslag, 2010: Eighty years of meteorological observations at Wageningen, the Netherlands: precipitation and evapotranspiration. *Int. J. Climatol.*, 30: 1315-1321, DOI: 10.1002/joc.1957
- 10) Ligtoet, W., et al., 2013: The effects of Climate Change in the Netherlands: 2012, The Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 90pp. http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/PBL_2013_The%20effects%20of%20climate%20change%20in%20the%20Netherlands_957.pdf
- 11) Visser, H. and Petersen, A.C., 2009: The likelihood of holding outdoor skating marathons in the Netherlands as a policy-relevant indicator of climate change, *Climatic Change*, 93, 39-54. And addendum: <http://www.compendiumvoordeleefomgeving.nl/indicatoren/nl0510-Kans-op-een-Elfstedentocht.html?i=9-54>
- 12) Van Velthoven en co-auteurs, 2013: Bescherming Ozonlaag: een gezonde ozonlaag lijkt dichterbij dan verstandig zongedrag. Brochure voor Wereldozondag, 16 september 2013, KNMI, RIVM, en IenM
- 13) Brandsma, T. and D. Wolters, 2012: Measurement and statistical modeling of the urban heat island of the city of Utrecht (the Netherlands), *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2012, 51, 1046-1060.
- 14) Vries, H. de, 2012: On future Western European winters with applications to the energy sector. KNMI-publication 231, De Bilt, Netherlands
- 15) Dammers, E., S. van 't Klooster, B. de Wit, H. Hilderink, A. Petersen & W. Tuinstra, 2013: Scenario's maken voor milieu, natuur en ruimte: een handreiking, PBL, Den Haag. <http://www.pbl.nl/publicaties/scenarios-maken-voor-milieu-natuur-en-ruimte-ee-handreiking>
- 16) Tang, S., S. Dessai, 2012: Usable Science? The U.K. Climate Projections 2009 and Decision Support for Adaptation Planning. *Wea. Climate Soc.*, 4, 300-313. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/WCAS-D-12-00028.1>
- 17) KNMI, 2012: Advisory Board report : towards the KNMI '13 scenarios. Climate change in the Netherlands, KNMI-publication 230, De Bilt, The Netherlands. <http://www.knmi.nl/bibliotheek/knmi/pubmetnummer/knmipub230.pdf>
- 18) Berkhout, F., B. van den Hurk, J. Bessembinder, J. de Boer, B. Bregman and M. van Drunen, 2013: Framing climate uncertainty: socio-economic and climate scenarios in vulnerability and adaptation assessments, *Reg and Environ Change*, doi: 10.1007/s10113-013-0519-2
- 19) Lenton, T.M., H. Held, E. Krigler, J.W. Hall, W. Lucht, S. Rahmstorf, H.J. Schnellhuber, 2008: Tipping elements in the Earth's climate system, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 105, 1786-1793
- 20) Jenkins, G.J., J.M. Murphy, D.S. Sexton, J.A. Lowe, P. Jones, C.G. Kilsby, 2009: UK Climate Projections: Briefing report. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK. ukclimateprojections.defra.gov.uk
- 21) CH2011, 2011: Swiss Climate Change Scenarios CH2011, published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich, Switzerland, 88 pp. ISBN: 978-3-033-03065-7. www.ch2011.ch/pdf/CH2011reportLOW.pdf

Postadres:
Postbus 201
3730 AE De Bilt

Bezoekadres:
Utrechtseweg 297 De Bilt
T 030 22 06 911
F 030 22 10 407
klimaatdesk@knmi.nl

Website:
www.klimaatsscenarios.nl



In samenwerking met:



> Colofon

Auteurs

Albert Klein Tank, Jules Beersma, Janette Bessembinder, Bart van den Hurk en Geert Lenderink

Productie

Bernadet Overbeek

Met KNMI-bijdragen van

Jisk Attema, Alexander Bakker, Else van den Besselaar, Richard Bintanja, Reinout Boers, Fred Bosveld, Theo Brandsma, Bram Bregman, Rob van Dorland, Sybren Drijfhout, Henk Eskes, Arnout Feijt, Harry Geurts, Rob Groenland, Hein Haak, Rein Haarsma, Ronald van Haren, Wilco Hazeleger, Rudmer Jilderda, Caroline Katsman, Janine Leunessen, Erik van Meijgaard, Erik Min, Twan van Noije, Geert Jan van Oldenborgh, Roeland van Oss, Martin Roth, Mark Savenije, Gerard van der Schrier, Frank Selten, Camiel Severijns, Pier Siebesma, Peter Siegmund, Rob Sluijter, Raymond Sluiter, Gerard van der Steenhoven, Andreas Sterl, Peter van Velthoven, Gé Verver, Hylke de Vries, Xueli Wang, Michiel van Weele, Jason Williams, Gerd-Jan van Zadelhoff

Met externe bijdragen van

Hein Daanen (TNO), Jan Gooijer (Waterschap Noorderzijlvest), Maud Huynen (ICIS), Jeroen de Jong (Ingenieursbureau Amsterdam), Lisette Klok (TNO), Astrid Manders (TNO), Ben Schaap (Wageningen UR), Gert-Jan Steeneveld (Wageningen UR), Hans Visser (PBL), Arnold van Vliet (Wageningen UR) en verschillende reviewers van dit rapport

Tekstredactie

Lijn43, Utrecht

Grafische vormgeving

VijfKeerBlauw, Rijswijk

Fotografie

Omslag: Frans Lemmens, Gettyimages

Pagina 15: Mischa Keijser, Hollandse Hoogte

Pagina 21: Olivier Middendorp, Hollandse Hoogte

Pagina 26: Tineke Dijkstra, Hollandse Hoogte

Druk

Zalsman B.V., Zwolle

Oplage

5000 exemplaren

Aan dit rapport kan als volgt worden gerefereerd

KNMI, 2014: KNMI'14-klimaatscenario's voor Nederland; Leidraad voor professionals in klimaatadaptatie, KNMI, De Bilt, 34 pp