

Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

KNMI'23 *klimaatscenario's*

voor Nederland



Chris Biesheuvel

Over het KNMI

Het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) is het nationale kennisinstituut voor weer, klimaat en seismologie. Daarmee is het instituut een van de belangrijkste kennispartners van de Nederlandse overheid als het gaat om klimaatverandering. Als wetenschappelijk instituut doen wij onderzoek naar klimaatverandering in Nederland. Het KNMI vertegenwoordigt Nederland in het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

Het KNMI adviseert de Nederlandse overheid over klimaatverandering en waarschuwt de Nederlandse samenleving voor gevaarlijk weer en de effecten van klimaatverandering. We ontwikkelen voortdurend hoogwaardige kennis en zetten die kennis in om veiligheidsrisico's te verminderen en bij te dragen aan een duurzame samenleving. Onze kennis en onze modellen vormen de basis voor deze nieuwe nationale klimaatscenario's, waarmee we wereldwijde bevindingen over de effecten van klimaatverandering vertalen naar de Nederlandse situatie.

Met de nieuwe klimaatscenario's biedt het KNMI een leidraad voor beleidsadviseurs en andere professionals om in een veranderend klimaat adequate besluiten te kunnen nemen voor een veilig, leefbaar en welvarend Nederland.

Kerncijfers KNMI'23

Seizoen	Variabele	Indicator	Klimaat 1991-2020 = referentie-periode	**2050** (2036-2065)				**2100** (2086-2115)			
				Ld	**Ln**	**Hd**	**Hn**	**Ld**	**Ln**	**Hd**	**Hn**
	Wereldwijde temperatuurstijging ten opzichte van 1991-2020			+0,8°C	+0,8°C	+1,5°C	+1,5°C	+0,8°C	+0,8°C	+4,0°C	+4,0°C
	Wereldwijde temperatuurstijging ten opzichte van 1850-1900			+1,7°C	+1,7°C	+2,4°C	+2,4°C	+1,7°C	+1,7°C	+4,9°C	+4,9°C
Jaar	Zeespiegel bij Nederlandse kust	gemiddelde niveau	0 cm [1]	+24 (16 tot 34) cm	+24 (16 tot 34) cm	+27 (19 tot 38) cm	+27 (19 tot 38) cm	+44 (26 tot 73) cm	+44 (26 tot 73) cm	+82 (59 tot 124) cm	+82 (59 tot 124) cm
		tempo van verandering	3 mm/jaar [1]	+3 (1 tot 6) mm/jaar	+3 (1 tot 6) mm/jaar	+5 (4 tot 8) mm/jaar	+5 (4 tot 8) mm/jaar	-1 (-4 tot 4) mm/jaar	-1 (-4 tot 4) mm/jaar	+11 (6 tot 23) mm/jaar	+11 (6 tot 23) mm/jaar
	Temperatuur	gemiddelde	10,5°C	+0,9°C	+0,9°C	+1,6°C	+1,5°C	+0,9°C	+0,9°C	+4,4°C	+4,1°C
	Neerslag	hoeveelheid	851 mm	0%	+3%	-2%	+3%	0%	+3%	-3%	+8%
	Zonnestraling	gemiddelde	120 W/m²	+5,8 W/m²	+4,8 W/m²	+5,4 W/m²	+2,5 W/m²	+5,8 W/m²	+4,8 W/m²	+7,1 W/m²	+1,3 W/m²
	Vochtigheid	gemiddelde relatieve vochtigheid [2]	82%	-1%	-1%	-1%	0%	-1%	-1%	-1%	+1%
	Verdamping	potentiële verdamping (Makkink)	603 mm	+7%	+6%	+9%	+6%	+7%	+6%	+17%	+11%
	Wind	gemiddelde windsnelheid	4,8 m/s	-0,1 m/s	-0,1 m/s	0,0 m/s	0,0 m/s	-0,1 m/s	-0,1 m/s	-0,1 m/s	-0,1 m/s
Winter	Temperatuur	gemiddelde	3,9°C	+0,7°C	+0,7°C	+1,2°C	+1,3°C	+0,7°C	+0,7°C	+3,7°C	+3,9°C
		gemiddelde dagmaximum	6,3°C	+0,7°C	+0,7°C	+1,1°C	+1,2°C	+0,7°C	+0,7°C	+3,5°C	+3,6°C
		gemiddelde dagminimum	1,4°C	+0,7°C	+0,7°C	+1,2°C	+1,4°C	+0,7°C	+0,7°C	+4,0°C	+4,2°C
	Neerslag	hoeveelheid	218 mm	+4%	+5%	+4%	+7%	+4%	+5%	+14%	+24%
		aantal natte dagen (≥ 0,1 mm)	57 dagen	0,0 dagen	0,0 dagen	0,0 dagen	+0,6 dagen	0,0 dagen	0,0 dagen	0,0 dagen	+1,1 dagen
		aantal dagen ≥ 10 mm	5,4 dagen	+0,4 dagen	+0,5 dagen	+0,5 dagen	+0,8 dagen	+0,4 dagen	+0,5 dagen	+1,6 dagen	+2,5 dagen
		10-daagse neerslagsom die eens in de 10 jaar wordt overschreden	109 mm [3]	-2%	+2%	0%	+2%	-2%	+2%	+8%	+15%
	Zonnestraling	gemiddelde	34 W/m²	+1,2 W/m²	+1,5 W/m²	+0,8 W/m²	+0,4 W/m²	+1,2 W/m²	+1,5 W/m²	-0,7 W/m²	-1,5 W/m²
	Vochtigheid	gemiddelde relatieve vochtigheid [2]	87%	0%	0%	+1%	+1%	0%	0%	+1%	+2%
	Wind	gemiddelde windsnelheid	5,6 m/s	-0,1 m/s	-0,1 m/s	0,0 m/s	+0,1 m/s	-0,1 m/s	-0,1 m/s	+0,1 m/s	+0,2 m/s
		aantal dagen met windrichting tussen noord en west	13 dagen	+0,1 dagen	-0,8 dagen	0,0 dagen	+0,1 dagen	+0,1 dagen	-0,8 dagen	-1,7 dagen	-1,0 dagen

Tabel 1. KNMI'23-scenariotabel landelijk gemiddelden.

Seizoen	Variabele	Indicator	Klimaat 1991-2020 = referentie-periode	**2050** (2036-2065)				**2100** (2086-2115)			
				Ld	Ln	Hd	Hn	Ld	Ln	Hd	Hn
Lente	Temperatuur	gemiddelde	9,6°C	+0,8°C	+0,7°C	+1,3°C	+1,1°C	+0,8°C	+0,7°C	+3,6°C	+3,3°C
		gemiddelde dagmaximum	13,7°C	+0,9°C	+0,8°C	+1,2°C	+1,0°C	+0,9°C	+0,8°C	+3,3°C	+2,9°C
		gemiddelde dagminimum	5,5°C	+0,7°C	+0,7°C	+1,4°C	+1,3°C	+0,7°C	+0,7°C	+3,9°C	+3,7°C
	Neerslag	hoeveelheid	153 mm	+1%	+3%	0%	+4%	+1%	+3%	+4%	+10%
	Zonnestraling	gemiddelde	161 W/m²	+6,6 W/m²	+5,2 W/m²	+3,2 W/m²	+0,8 W/m²	+6,6 W/m²	+5,2 W/m²	-0,2 W/m²	-4,8 W/m²
	Vochtigheid	gemiddelde relatieve vochtigheid [2]	78%	-1%	-1%	0%	0%	-1%	-1%	+1%	+2%
	Verdamping	potentiële verdamping (Makkink)	190 mm	+6%	+5%	+6%	+4%	+6%	+5%	+10%	+6%
	Droogte	maximaal neerslagtekort april en mei	76 mm	+11%	+6%	+15%	+5%	+11%	+6%	+21%	+8%
	Wind	gemiddelde windsnelheid	4,7 m/s	-0,1 m/s	-0,1 m/s	0,0 m/s	0,0 m/s	-0,1 m/s	-0,1 m/s	+0,1 m/s	0,0 m/s
Zomer	Temperatuur	gemiddelde	17,3°C	+1,2°C	+1,1°C	+2,1°C	+1,7°C	+1,2°C	+1,1°C	+5,1°C	+4,7°C
		gemiddelde dagmaximum	21,7°C	+1,4°C	+1,2°C	+2,2°C	+1,7°C	+1,4°C	+1,2°C	+5,4°C	+4,7°C
		gemiddelde dagminimum	12,9°C	+1,0°C	+1,0°C	+1,9°C	+1,8°C	+1,0°C	+1,0°C	+5,0°C	+4,9°C
	Neerslag	hoeveelheid	235 mm	-8%	-2%	-13%	-5%	-8%	-2%	-29%	-12%
		1-daagse neerslagsom die eens in de 10 jaar wordt overschreden [4]	63 mm [3]	+4 (1 tot 6)%	+5 (2 tot 7)%	+6 (2 tot 9)%	+9 (5 tot 14)%	+4 (1 tot 6)%	+5 (2 tot 7)%	+15 (5 tot 26)%	+26 (12 tot 41)%
		uurlijkse neerslag die eens per jaar wordt overschreden [4]	16 mm [3]	+4 (2 tot 6)%	+6 (3 tot 8)%	+6 (2 tot 9)%	+11 (6 tot 16)%	+4 (2 tot 6)%	+6 (3 tot 8)%	+15 (5 tot 26)%	+31 (17 tot 46)%
	Zonnestraling	gemiddelde	206 W/m²	+12 W/m²	+9,1 W/m²	+14 W/m²	+7,4 W/m²	+12 W/m²	+9,1 W/m²	+24 W/m²	+11 W/m²
	Vochtigheid	gemiddelde relatieve vochtigheid [2]	77%	-2%	-1%	-2%	-1%	-2%	-1%	-4%	-1%
	Verdamping	potentiële verdamping (Makkink)	286 mm	+8%	+6%	+11%	+7%	+8%	+6%	+22%	+14%
	Droogte	maximaal neerslagtekort april t/m september	160 mm	+22%	+13%	+35%	+15%	+22%	+13%	+79%	+37%
		maximaal neerslagtekort april t/m september dat eens in de 10 jaar wordt overschreden	265 mm	+16%	+9%	+30%	+16%	+16%	+9%	+63%	+30%
	Wind	gemiddelde windsnelheid	4,2 m/s	-0,1 m/s	-0,1 m/s	-0,1 m/s	-0,1 m/s	-0,1 m/s	-0,1 m/s	-0,2 m/s	-0,2 m/s
Herfst	Temperatuur	gemiddelde	11,2°C	+1,0°C	+0,9°C	+1,8°C	+1,6°C	+1,0°C	+0,9°C	+5,0°C	+4,8°C
		gemiddelde dagmaximum	14,5°C	+1,1°C	+1,1°C	+1,9°C	+1,6°C	+1,1°C	+1,1°C	+5,1°C	+4,6°C
		gemiddelde dagminimum	7,8°C	+0,9°C	+0,9°C	+1,8°C	+1,7°C	+0,9°C	+0,9°C	+5,1°C	+5,1°C
	Neerslag	hoeveelheid	245 mm	+4%	+5%	+1%	+4%	+4%	+5%	+1%	+13%
	Zonnestraling	gemiddelde	77 W/m²	+3,7 W/m²	+3,5 W/m²	+3,7 W/m²	+1,4 W/m²	+3,7 W/m²	+3,5 W/m²	+5,4 W/m²	+1,0 W/m²
	Vochtigheid	gemiddelde relatieve vochtigheid [2]	85%	-1%	0%	-1%	0%	-1%	0%	-1%	0%
	Wind	gemiddelde windsnelheid	4,7 m/s	-0,1 m/s	-0,1 m/s	-0,1 m/s	0,0 m/s	-0,1 m/s	-0,1 m/s	-0,2 m/s	-0,1 m/s

Kerncijfers KNMI'23

Toelichting tabel 1

De getallen voor klimaatverandering zijn voor temperatuur afgerond op 0,1°C, voor de andere variabelen onder de tien op 0,1 (mm, dagen, %, m/s, W/m^2) en daarboven op hele getallen. Ranges zijn afgerond op hele getallen.

Landelijk gemiddelden zijn bepaald op basis van de volgende meetstations:

- Temperatuur, zonnestraling, verdamping, vochtigheid, wind: gemiddelde van vijf stations: De Bilt, De Kooy, Eelde, Vlissingen, Maastricht.
- Neerslag: gemiddelde van 13 neerslagstations (P13).
- Droogte: P13 neerslagstations + verdamping op de meest nabije KNMI-stations.

Zie www.knmi.nl/klimaatscenarios voor de uitgebreide tabel met getallen voor klimaatverandering voor de KNMI'23-klimaatscenario's, voor meer variabelen, seizoenen, tijdshorizonten (2150), locaties, aanvullende berekeningen voor een matige uitstoot, aanvullende impact cases en eventuele errata. Op de de laatste pagina (p. 65) van dit rapport staan voor vijf locaties enkele scenariogetallen.

1 De referentieperiode voor zeespiegel is 1995-2014. Het gemiddelde zeespiegelniveau is in deze periode op 0 gezet.
2 De relatieve vochtigheid is in procentpunten (voorbeeld: 80% in de referentie, met 1% erbij wordt 81%).
3 De hoeveelheid neerslag in de referentieperiode is de hoeveelheid die gemiddeld eens per jaar op een locatie voorkomt, zoals beschreven in STOWA 2019-19, Neerslagstatistiek en -reeksen voor het waterbeheer 2019; update volgt in 2024. Afgerond op hele getallen.
4 Gebaseerd op een andere methodiek en modellen en met een onzekerheidsband vanwege de bandbreedte in kleinschalige processen rond buien (zie hoofdstuk Zomerbuien, hagel en onweer).

Hoe de scenariotabel te gebruiken?

De getallen voor klimaatverandering in de scenariotabel (tabel 1) voor 2100 laten zien hoe - per scenario - het gemiddelde van de betreffende variabele in de toekomst (2086-2115) verandert ten opzichte van het gemiddelde in de referentieperiode (1991-2020). Beide gemiddelden gaan over perioden van 30 jaar. Door natuurlijke variaties zullen de waarden het ene jaar hoger en het andere jaar lager zijn. In de figuren in dit rapport geeft de lichtgrijze band 90% van deze jaar-op-jaar variaties weer (zie voorbeeld hieronder).

Het KNMI berekent om de 10 jaar langjarige gemiddelden ('normalen') voor een groot aantal KNMI-stations. De meest recente langjarige gemiddelden gaan over de periode 1991-2020. Dit is de referentieperiode voor 'het klimaat van nu'. De getallen voor klimaatverandering zijn ten opzichte van deze periode berekend.

Rekenvoorbeeld

Stel, je wilt weten hoe het maximale neerslagtekort (een maat voor droogte) in Nederland rond 2100 is veranderd:

1) Zoek in de scenariotabel de variabele op onder 'zomer' en lees af in de lichtblauwe kolom: Het gemiddelde maximale neerslagtekort is nu (1991-2020): 160 mm.

2) Lees in de laatste vier kolommen de getallen voor 2100 af: Het gemiddelde maximale neerslagtekort neemt in alle vier de scenario's rond 2100 toe ten opzichte van nu (1991-2020), maar het meest in het scenario Hoge uitstoot, droog (Hd) met +79%. De kleinste toename geeft het scenario Lage uitstoot, nat (Ln) met +13%.

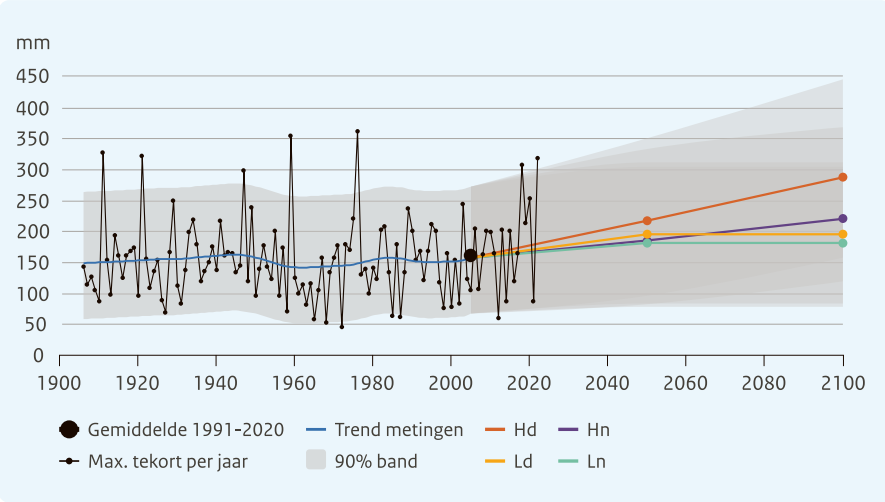
3) Dit geeft de volgende range voor de vier scenario's voor het gemiddelde maximale neerslagtekort (gemiddeld in de periode 2086-2115): tussen de 181 en 286 mm.

- Hd, scenario Hoge uitstoot, droog: 160 x 1,79 = 286 mm
- Ln, scenario Lage uitstoot, nat: 160 x 1,13 = 181 mm

4) Van jaar tot jaar kunnen grote verschillen in droogte optreden. Dat zie je ook als je in Figuur 1 kijkt naar het waargenomen maximale neerslagtekort per jaar (1906-2022): de zwarte bolletjes liggen zowel (ver) boven als (ver) onder de blauwe trendlijn.

De lichtgrijze band geeft aan waar 90% van de jaarwaarden voor het maximale neerslagtekort binnen valt. Kortom, gemiddeld valt 9 op de 10 jaar binnen de band en 1 op de 10 jaar valt hier nog buiten. De extreem droge jaren, zoals in het verleden 1976 (362 mm), 2018 (308 mm) en 2022 (318 mm) liggen hier dus nog boven. Rond 2100 ligt de bovengrens van de 90%-range van het droogste scenario Hd op 445 mm. De meest extreme droogtes in het scenario Hd kunnen nog flink droger worden dan dat. Ook blijven er natte jaren voorkomen, zoals de ondergrens van de 90%-range aangeeft.

Maximaal neerslagtekort april-september
Toenemende droogte



Figuur 1. Maximaal neerslagtekort april-september (mm), landelijk gemiddeld: waarnemingen (zwart) en de vier KNMI'23-klimaatscenario's (2050 en 2100, in vier kleuren).

5) De conclusie is dat het maximale neerslagtekort rond 2100 (2086-2115) ten opzichte van nu (1991-2020) in alle vier de scenario's toeneemt. Vooral in het scenario Hoge uitstoot, droog (Hd) is er sprake van een zeer sterke toename in de droogte.

Inhoudsopgave

Over het KNMI 2

Kerncijfers KNMI'23 3

KNMI'23 klimaatscenario's voor Nederland samengevat 8

Inleiding 12
Ook in Nederland is het klimaat al veranderd 13
KNMI'23-klimaatscenario's: toekomstige klimaatverandering in Nederland 13
Twee referentieperioden: voor nu en voor het pre-industriële tijdperk 13
Natuurlijke variaties en geleidelijke trends 13
Scenario's met lage uitstoot (L) en hoge uitstoot (H) 14
Scenario's met veel nattere winters (n) of veel drogere zomers (d) 15
Gemiddelden en extremen 15

Trends en projecties per variabele 16
Temperatuur 17
De stedelijke klimaatproblematiek 19
Het weer van de toekomst: hitte 20
Neerslag 22
Zomerbuien, hagel en onweer 25
Droogte en verdamping 27
Zonnestraling en wolken 28
Wind, storm en windstoten 29
Zicht en mist 31
Zeespiegelstijging 32

Hoe warm is het in Nederland als de wereld 1,5°C is opgewarmd? 34

Klimaatscenario's voor de BES-eilanden 35
Neerslag en temperatuur 36
Zeespiegelstijging 39
Orkaanfrequentie 39
Het weer van de toekomst: orkanen 40

KNMI'23-klimaatscenario's in de praktijk 11 impact cases 41
Veranderingen in temperatuurgerelateerde sterfte 43
Hittestress in Amsterdam 44
Natuurbrandgevaar neemt ook in Nederland toe 45
Invloed van meer zonnestraling op de elektriciteitsproductie 46
Invloed van extreem weer op gewasopbrengst 47
Meer stranddagen, meer strandvakanties in eigen land? 48
Zoetwatervoorziening vanuit het blauwe hart van Nederland 49
Klimaatbestendig bouwen 50
Minder kans op schade aan bloesem door afname late voorjaarsvorst 51
Agrariërs anticiperen met water- en bodembeheer op droogte en extreme neerslag 52
Oosterscheldekering moet vaker dicht 53

KNMI'23 en KNMI'14 vergeleken 54

Achtergrondinformatie 56

Verklarende woordenlijst 61

Referenties 62

Kerncijfers voor vijf locaties 63

Colofon 64



KNMI’23 klimaatscenario’s voor Nederland *samengevat*

Het KNMI presenteert vier nieuwe scenario's voor klimaatverandering in Nederland (figuur 2) inclusief Caribisch Nederland rond 2050 en 2100. De KNMI'23-klimaatscenario's zijn gebaseerd op de laatste inzichten en vervangen de klimaatscenario's uit 2014. Voor zeespiegelstijging is gebruik gemaakt van de nieuwe inzichten van het IPCC over het mogelijk versneld afkalven van de Antarctische IJskap. In KNMI'23 is de droogteproblematiek in Nederland en omgeving beter in kaart gebracht en zijn de veranderingen in neerslagextremen in zomerbuien beter onderbouwd. Verder zijn de schattingen van de wereldwijde temperatuurstijging voor een bepaalde toename van broeikasgassen nauwkeuriger. Net als na 2014 kunnen de nieuwe klimaatscenario's worden gebruikt om de effecten op verschillende sectoren door te rekenen. Hiermee worden de risicoanalyses uit de Nationale Adaptatie Strategie geactualiseerd. Ook worden de Deltascenario's van het Deltaprogramma gebaseerd op de combinatie van de KNMI'23-klimaatscenario's en de sociaal-economische scenario's voor Nederland van het PBL (de WLO-scenario's).
De klimaatscenario's voor Caribisch Nederland dienen als uitgangspunt voor adaptatiebeleid voor Bonaire, Sint Eustatius en Saba (BES-eilanden).

De mate waarin ons klimaat zal veranderen, hangt af van de hoeveelheid broeikasgassen die nog zal worden uitgestoten en de gevoeligheid van het klimaatsysteem. Daarvoor kiezen we twee scenario's:

- Hoge uitstootscenario (aangeduid met hoofdletter 'H') waarin de uitstoot in gelijke mate blijft toenemen tot 2080 en daarna afvlakt. De mondiale opwarming rond 2100 is dan 4,9°C[1] voor de beste schatting van klimaatgevoeligheid.
- Lage uitstootscenario (aangeduid met hoofdletter 'L') waarin de uitstoot snel wordt verminderd en broeikasgassen worden verwijderd uit de atmosfeer, in lijn met het Klimaatakkoord van Parijs om de mondiale opwarming tot ruim onder de 2°C te beperken. De mondiale opwarming rond 2100 is dan 1,7°C.

We hebben gekozen voor een grote bandbreedte in uitstootscenario's om de gevolgen van internationale keuzes in klimaatbeleid zo helder mogelijk te maken, en om nationaal een goede risicoafweging te kunnen maken van de mogelijke gevolgen van klimaatverandering. Klimaatverandering ontwikkelt zich waarschijnlijk binnen deze bandbreedte. Voor specifieke toepassingen hebben we aanvullende berekeningen voor een matige uitstoot gemaakt. Deze zijn te vinden op www.knmi.nl/klimaatscenarios.

Verdere opwarming betekent hoe dan ook dat de Nederlandse zomers droger en de winters natter worden. Voor de mate waarin geven klimaatmodellen verschillende uitkomsten. Om die te laten zien hebben we per uitstootscenario de volgende twee varianten:

- een 'nat' scenario (aangeduid met de letter 'n') waarin de winters sterk vernatten en de zomers licht verdrogen.
- een 'droog' scenario (aangeduid met de letter 'd') waarin de winters licht vernatten en de zomers sterk verdrogen.

In Caribisch Nederland stijgt de temperatuur en neemt de neerslag af. De afname is het sterkst in de droge scenario's in het droge seizoen (december-april).

De KNMI'23-klimaatscenario's voor Nederland samengevat
Versnelling van de zeespiegelstijging
Toename van de gemiddelde temperatuur en van hitte
Meer zon
Toename van droogtes
Nattere winters
Toename van extreme zomerbuien
Mogelijk sterkere windstoten en valwinden bij buien
Weinig verandering in windsnelheid en -richting

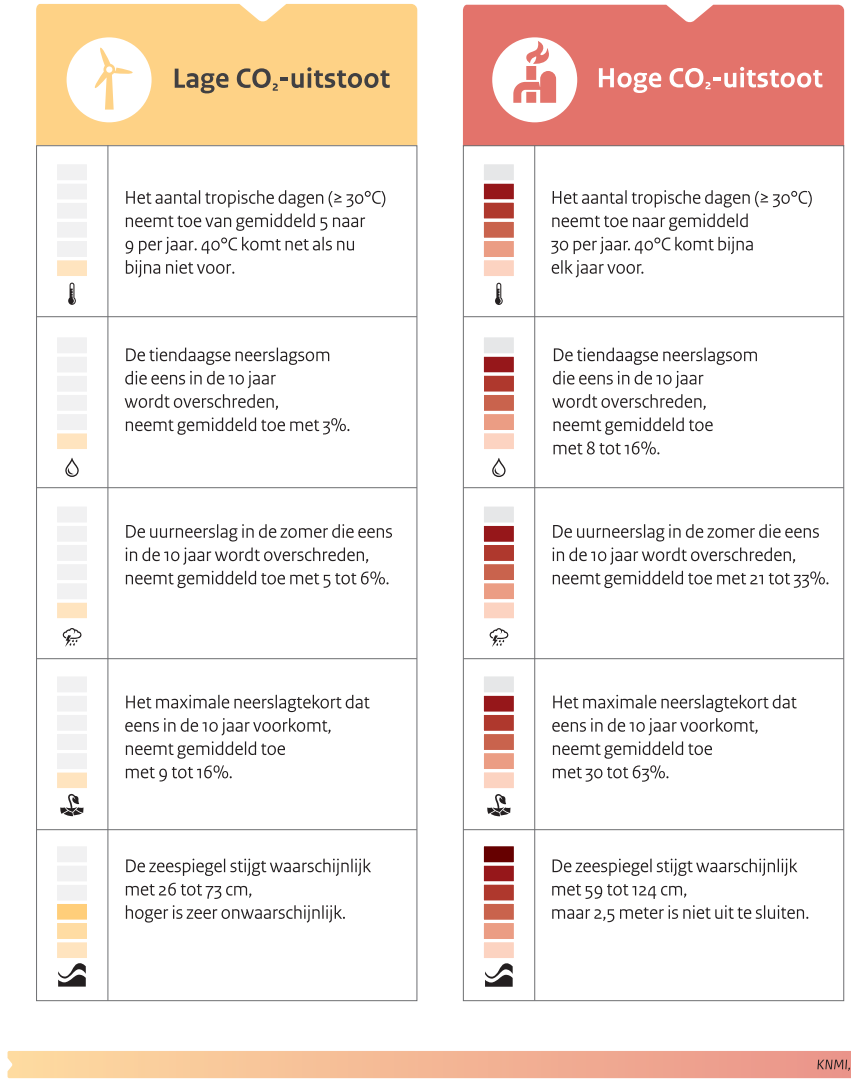
Tabel 2. Hoe ons klimaat deze eeuw in alle scenario's verandert ten opzichte van de referentieperiode 1991-2020. De grootte van de verandering verschilt per scenario.

1 Mondiale opwarming ten opzichte van het pre-industriële tijdperk (1850-1900). Ten opzichte van de referentieperiode (1991-2020), die voor de KNMI'23-klimaatscenario's wordt gebruikt, is de mondiale opwarming 0,9°C lager.

Vier scenario's voor klimaatverandering in Nederland



Figuur 2. Vier scenario's voor klimaatverandering in Nederland. Het aantal blokjes staat voor de mate van klimaatverandering rond 2100 ten opzichte van 1991-2020.



Figuur 3. Toename van extremen in het klimaat van Nederland rond 2100 ten opzichte van 1991-2020.

Door de twee uitstootscenario's (H en L) te combineren met de twee varianten 'nat' (n) en 'droog' (d), ontstaan er vier klimaatscenario's: Hn, Hd, Ln en Ld. Dit zijn de nieuwe KNMI'23-klimaatscenario's, die de KNMI'14-klimaatscenario's (ref. 3) vervangen. In Nederland voltrekt de klimaatverandering zich waarschijnlijk binnen de grenzen van deze vier klimaatscenario's. Voor de meeste toepassingen is het zinvol om met deze scenario's te rekenen.

Het klimaat is nu al veranderd en dat merken we aan de toename van extremen in hitte, droogte en neerslag. Met zogeheten klimaatattributie is aangetoond dat de frequentie van extreem weer al is toegenomen als gevolg van de door de mens veroorzaakte klimaatverandering. De KNMI'23-klimaatscenario's laten zien wat Nederland nog meer te wachten staat als de uitstoot van broeikasgassen tot 2080 in het huidige tempo blijft toenemen. Ook tonen ze dat de mate waarin het klimaat nog zal veranderen veel minder groot zal zijn als de wereld zich houdt aan het Klimaatakkoord van Parijs (lage uitstoot, figuur 3). Alle vier de scenario's laten zien dat we hoe dan ook te maken krijgen met zeespiegel- en temperatuurstijging, drogere zomers en nattere winters (tabel 2). Alleen de grootte van de verandering verschilt per scenario (figuur 2). De klimaatscenario's stellen gebruikers in staat om in een veranderend klimaat de gevolgen van veranderingen in het klimaat en extreem weer in kaart te brengen en besluiten te nemen om Nederland ook in de toekomst veilig, duurzaam en bewoonbaar te houden.



Inleiding

Het staat vast dat de mens het klimaat beïnvloedt. Niet eerder in ten minste de afgelopen 2000 jaar steeg de temperatuur op aarde zo snel als nu. Dit concludeert het IPCC in het zesde klimaatrapport, dat in augustus 2021 verscheen (ref. 1). De wereldgemiddelde temperatuur was in 2022 1,2°C hoger dan in het pre-industriële tijdperk (1850-1900). Bij een verdere opwarming nemen de frequentie en intensiteit van hittegolven, extreme neerslag en droogtes wereldwijd verder toe. Sommige veranderingen, zoals de opwarming van de oceanen, het smelten van de ijskappen en de stijging van de zeespiegel zullen nog eeuwen tot millennia doorgaan.

Ook in Nederland is het klimaat al veranderd

Nederland is nu ruim 2°C warmer sinds het begin van onze metingen in 1901. De hoeveelheid neerslag is met ruim 20% toegenomen. De neerslag valt in extremere buien en de kans op extreme hitte is toegenomen. In Caribisch Nederland neemt de temperatuur sinds de jaren 80 van de vorige eeuw toe met ongeveer 0,2°C per 10 jaar. Relatief recent ontwikkelde technieken maken het mogelijk de bijdrage van de mens aan deze veranderingen vast te stellen. Hierbij worden metingen en berekeningen met klimaatmodellen zonder en met menselijke invloed gecombineerd. Uit zo'n attributiestudie (ref. 2) van de hittegolf in juli 2019, waarbij voor het eerst in Nederland temperaturen boven de 40°C werden gemeten, blijkt dat deze hittegolf vrijwel onmogelijk was geweest zonder door de mens veroorzaakte klimaatverandering.

KNMI'23-klimaatscenario's: toekomstige klimaatverandering in Nederland

De KNMI'23-klimaatscenario's vertalen de nieuwe inzichten en onderzoeksresultaten uit het meest recente IPCC-rapport (2021) naar de situatie in Nederland, inclusief Caribisch Nederland. Ze zijn berekend met de nieuwste klimaatmodellen die, uitgaande van een gegeven uitstoot van broeikasgassen, een bandbreedte aan mogelijke veranderingen in het klimaat in Nederland laten zien.

Uit deze bandbreedte is een selectie gemaakt. In samenspraak met gebruikers is gekozen voor klimaatscenario's die samen een breed palet aan mogelijke uitkomsten vertegenwoordigen. De door de mens veroorzaakte klimaatverandering zal zich in Nederland waarschijnlijk hierbinnen voltrekken. De scenario's zijn ontwikkeld om een brede groep gebruikers een beeld te geven van de klimaatverandering tot eind deze eeuw. Als nieuwe aanvullingen geven we ook een doorkijk naar 2150 en beschrijven we hoe warm het is in Nederland als de wereldwijde opwarming beperkt blijft tot 1,5°C, zoals afgesproken in Parijs. Deze opwarming van 1,5°C wordt waarschijnlijk rond het jaar 2033 bereikt.

Twee referentieperioden: voor nu en voor het pre-industriële tijdperk

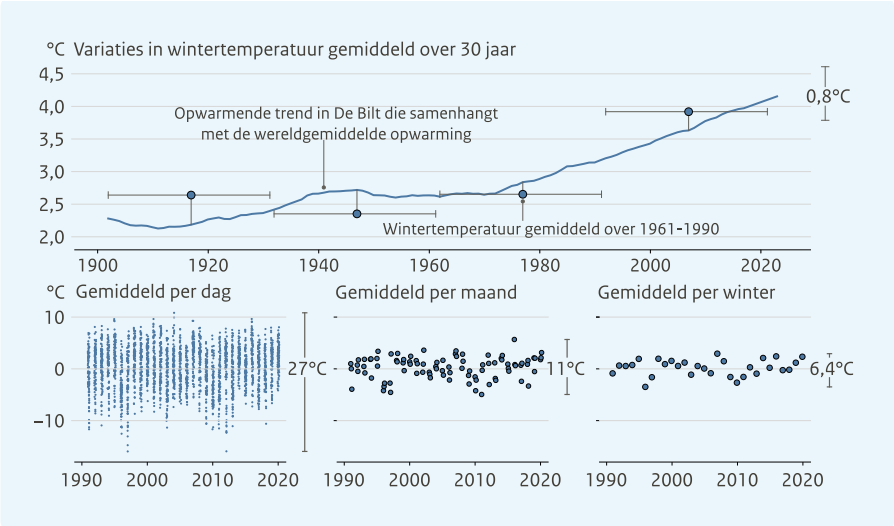
De klimaatscenario's laten zien hoe het klimaat van Nederland verder zou kunnen veranderen. Voor perioden van 30 jaar rond enkele specifieke jaren in de toekomst (o.a. 2050 en 2100) berekenen we gemiddelden en extremen (temperatuur, neerslag, zonnestraling en windsnelheid). We vergelijken dit toekomstige klimaat met de meest recente referentieperiode, 1991-2020. De wereldgemiddelde temperatuur ligt in deze referentieperiode 0,9°C hoger dan in het pre-industriële tijdperk (1850-1900), de referentieperiode die het IPCC hanteert. De 1,5 tot 2°C opwarming uit het Klimaatakkoord van Parijs is ten opzichte van het pre-industriële tijdperk en komt overeen met 0,6 tot 1,1°C opwarming ten opzichte van 1991-2020.

Natuurlijke variaties en geleidelijke trends

Het klimaat kent natuurlijke variaties. Die worden veroorzaakt door de wisselwerking tussen atmosfeer, oceanen, land en ijskappen. Een natuurlijke variatie met invloed op de wereldgemiddelde temperatuur en neerslagpatronen is bijvoorbeeld het onregelmatig optreden van El Niño en La Niña. Op regionale schaal zijn natuurlijke variaties vaak groter dan wereldwijd en hangen ze sterk samen met variaties in windrichting. En die hangen weer samen met de sterk variërende ligging van hoge- en lagedrukgebieden. Dat de ene Nederlandse winter kouder is dan de andere, heeft met diezelfde natuurlijke variaties te maken.

Hoe langer de periode waarover wordt gemiddeld, hoe kleiner de natuurlijke variaties rondom dit gemiddelde zijn (figuur 4): zelfs gemiddelden over 30 jaar vertonen nog natuurlijke variaties, hoewel veel kleiner dan de jaar-op-jaar variaties. Vooral voor neerslag en wind in de winter zijn de natuurlijke variaties groot. Om die reden geven we de jaar-op-jaar variaties weer: die geven een indruk van hoe individuele jaren kunnen afwijken van het gemiddelde.

Natuurlijke temperatuurvariaties in De Bilt op verschillende tijdschalen



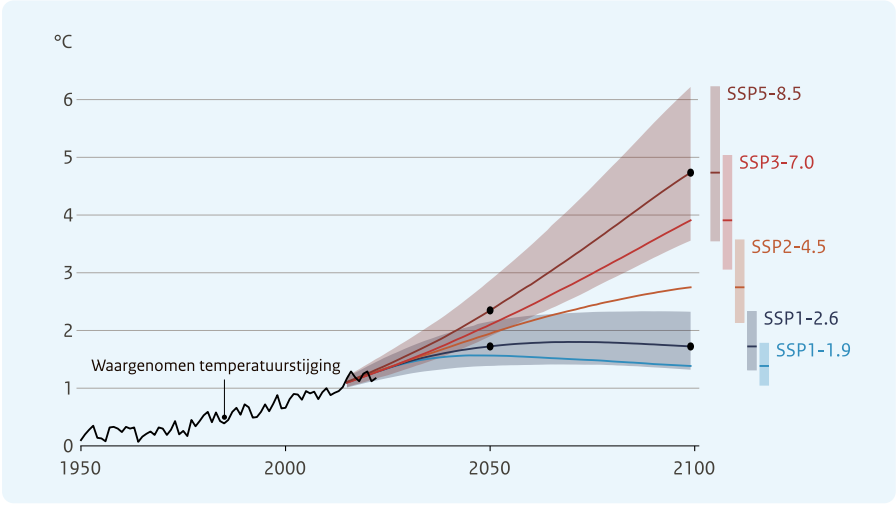
Figuur 4. Natuurlijke variaties in de wintertemperatuur in De Bilt. Gemiddeld over 30-jarige periodes (boven) en gemiddeld over een dag, maand en seizoen (onder). De variaties zijn berekend ten opzichte van de opwarmende trend (boven, blauwe lijn).

Scenario's met lage uitstoot (L) en hoge uitstoot (H)

Het IPCC maakt gebruik van verschillende scenario's, gebaseerd op combinaties van sociaal-economische ontwikkelingen en klimaatbeleid (Shared Socioeconomic Pathways, SSP's), die leiden tot verschillende concentraties van broeikasgassen. Er zijn scenario's waarin de uitstoot in het huidige tempo blijft doorgaan en scenario's waarin de uitstoot snel wordt verminderd, op den duur zelfs naar nul. In elk scenario zijn de timing en de geografische verdeling van uitstoot van broeikasgassen anders. Aan de hand van de concentraties van broeikasgassen in de atmosfeer rekenen klimaatmodellen voor elk scenario uit hoe het klimaat verandert. Hogere concentraties broeikasgassen betekenen bijvoorbeeld meer opwarming en wereldwijd meer neerslag.

In 2015 is door bijna alle landen van de wereld in het Klimaatakkoord van Parijs afgesproken de wereldgemiddelde opwarming ruim onder de 2°C te houden ten opzichte van het pre-industriële tijdperk, en te streven naar 1,5°C. De daadwerkelijk beloofde maatregelen van alle landen samen om de uitstoot van broeikasgassen te verminderen is vooralsnog onvoldoende om dit doel te halen. Toch is het lage uitstootscenario (L) – conform het Klimaatakkoord van Parijs – nog steeds mogelijk. Dit scenario is gebaseerd op SSP1-2.6 en leidt tot circa 1,7°C mondiale opwarming rond 2050 en 2100 (figuur 5). Omdat de opwarming in dit scenario min of meer stabiliseert na 2050, zijn de scenariogetallen voor 2100 gelijk aan die voor 2050. Voor het hoge uitstootscenario (H) is het SSP-scenario genomen met de hoogste uitstoot (SSP5-8.5). Dit leidt tot 2,4 en 4,9°C mondiale opwarming rond respectievelijk 2050 en 2100 (zwarte stippen in figuur 5). Figuur 5 laat ook de wereldwijde opwarming zien voor vijf SSP's rond 2100. De spreiding in de gekleurde banden geeft de onzekerheid in klimaatgevoeligheid weer. Als de klimaatgevoeligheid hoog blijkt, kan de meest waarschijnlijke opwarming van 4,9°C rond 2100 in SSP5-8.5, ook worden bereikt in het scenario met minder hoge uitstoot: SSP3-7.0.

Wereldwijde temperatuurstijging ten opzichte van 1850-1900
Zwarte punten: temperatuurstijging gebruikt in de KNMI'23-klimaatscenario's



Figuur 5. Wereldwijde temperatuurstijging zoals waargenomen (zwarte lijn) en voor de SSP's (mediaan (gekleurde lijnen) en 90%-bandbreedte). Verticale balken: wereldwijde opwarming voor vijf SSP's rond 2100. Bron: IPCC.

Scenario's met veel nattere winters (n) of veel drogere zomers (d)

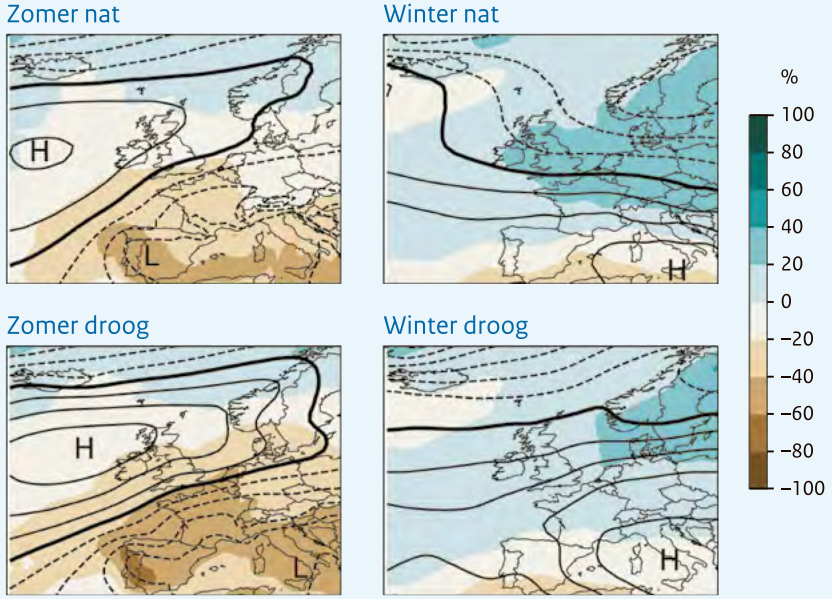
Naast een wereldwijde temperatuurstijging, gebaseerd op uitstootscenario's (SSP's), geven klimaatmodellen bij hetzelfde SSP verschillende uitkomsten voor regionale klimaatveranderingen. Deze regionale verschillen zijn onder andere het gevolg van onzekerheid over hoe de ligging van lage- en hogedrukgebieden verandert. Dit heeft een grote impact op met name neerslag (figuur 6). Mede vanwege de droogteproblematiek van de afgelopen jaren is ervoor gekozen om voor beide uitstootscenario's (L en H) twee varianten (d en n) door te rekenen: één met veel verdroging in de zomer (Ld en Hd), en één met een sterke neerslagtoename in de winter (Ln en Hn). In de droge scenario's blijkt eveneens sprake van een afname van de jaarneerslag, waardoor het herstel van droge zomers in de daaropvolgende winters nog lastiger wordt.

Gemiddelden en extremen

Naast zeespiegelstijging en de gemiddelden voor onder andere temperatuur en neerslag in de vier seizoenen, is voor elk klimaatscenario een groot aantal klimaatindicatoren berekend: extremen in neerslag en temperatuur, zonnestraling, verdamping, vochtigheid, droogte en wind. De gemiddelden en extremen in de referentieperiode voor Nederland zijn weergegeven in de tabel voorin. Voor enkele variabelen die binnen Nederland duidelijke verschillen vertonen, zoals het aantal zomerse dagen, staan de berekende waarden voor diverse (stations)locaties achter in dit rapport.

Luchtdruk- en neerslagpatronen boven Europa

Droge zomers in het zuiden, natte winters in het noorden



Figuur 6. Luchtdruk- en neerslagpatronen boven Europa voor een droge en natte groep van mondiale klimaatmodellen bij hoge uitstoot rond 2100. Neerslagveranderingen zijn weergegeven in procenten.



Trends en projecties per variabele

Temperatuur

Ontwikkelingen tot nu

De jaargemiddelde temperatuur in Nederland is sinds het begin van de metingen in 1906 gestegen met ruim twee graden (figuur 7). Dit is bijna twee keer zo veel als de toename van de wereldgemiddelde temperatuur sinds de pre-industriële periode (1850-1900); die bedraagt 1,2°C (2022). In de winters komt dit mede doordat de wind vaker uit het westen komt. Door toenemende zonnestraling als gevolg van afnemende bewolking en afnemende luchtvervuiling warmen de lentes en zomers extra op. De helft van de temperatuurstijging in Nederland sinds begin vorige eeuw vond plaats in de afgelopen 30 jaar.

Ontwikkelingen in de toekomst

Volgens alle KNMI'23-klimaatscenario's stijgt in Nederland de temperatuur (figuur 7 en 8). Zowel rond 2050 als rond 2100 is de opwarming het grootst in de zomer en het kleinst in de winter en de lente. De sterkere opwarming in de zomer wordt deels veroorzaakt door een uitdroging van de bodem. Ook waait de wind vaker uit het oosten (figuur 6) en voert dan warme, droge lucht aan. Deze effecten zijn het sterkst aanwezig in de droge scenario's, vandaar dat daarin de opwarming in de zomer ook sterker is dan in de natte scenario's. Jaargemiddeld is de opwarming van Nederland in de meeste scenario's rond 2050 en 2100 iets groter dan de wereldgemiddelde opwarming.

De verschillen in opwarming tussen de hoge en lage uitstootscenario's zijn groot. Dit betekent dat mondiaal klimaatbeleid gericht op vermindering van de uitstoot ervoor kan zorgen dat het klimaat in de toekomst minder opwarmt.

Het toekomstige klimaat in Nederland kan sterk beïnvloed worden door klimaatbeleid

Regionale temperatuurverschillen

De opwarming in Nederland is het kleinst in het noordwesten en neemt toe naar het zuidoosten (figuur 9). In West-Europa is de opwarming in de zomer groter dan in de winter.

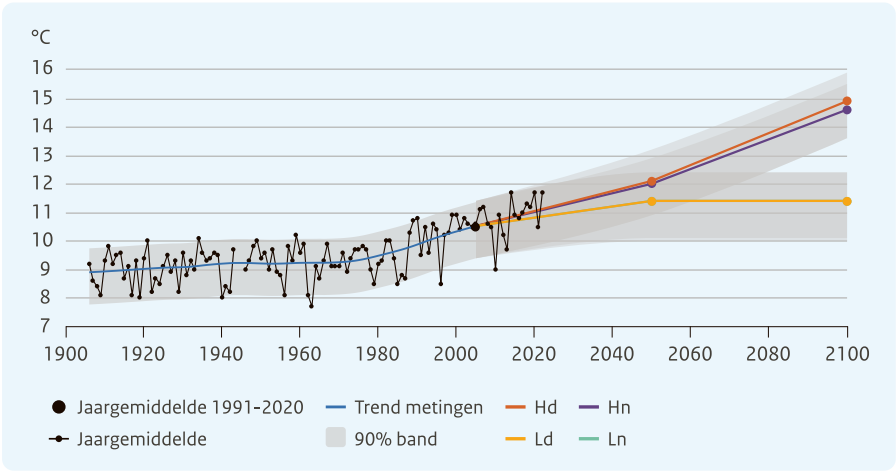
Extreme temperaturen

De opwarming van Nederland is het grootst op de warmste zomerdagen en de koudste winterdagen. Op de koudste winterdagen komt de lucht doorgaans uit Noord-Europa, waar de temperatuur in de winter het meest toeneemt. Op de warmste zomerdagen waait de wind vaak uit het zuiden, waar de temperatuur juist in de zomer het meest toeneemt. Voor de winter betekent dit een aanzienlijke afname van het aantal dagen met een maximumtemperatuur onder nul (ijsdagen). In de H-scenario's neemt in De Bilt het aantal ijsdagen af van zes (in het huidige klimaat) tot drie (rond 2050) en tot minder dan één (rond 2100). In de L-scenario's komen rond 2050 en rond 2100 nog ongeveer vier ijsdagen per jaar voor.

De zomers krijgen meer tropische nachten, met een minimumtemperatuur van 20°C of hoger. In de H-scenario's neemt in De Bilt het aantal tropische nachten per zomer toe van 0,3 (in het huidige klimaat) tot 3 (rond 2050) en tot 19 (in 2100). In de L-scenario's komt per zomer ongeveer één tropische nacht voor. Ook komen er meer zomerse dagen, met een maximumtemperatuur van 25°C of hoger. In de H-scenario's neemt in De Bilt het aantal zomerse dagen per jaar toe van 28 (in het huidige klimaat) tot 49 (rond 2050) en tot 89 (rond 2100). In de L-scenario's komen er per jaar 40 zomerse dagen voor.

Jaargemiddelde temperatuur

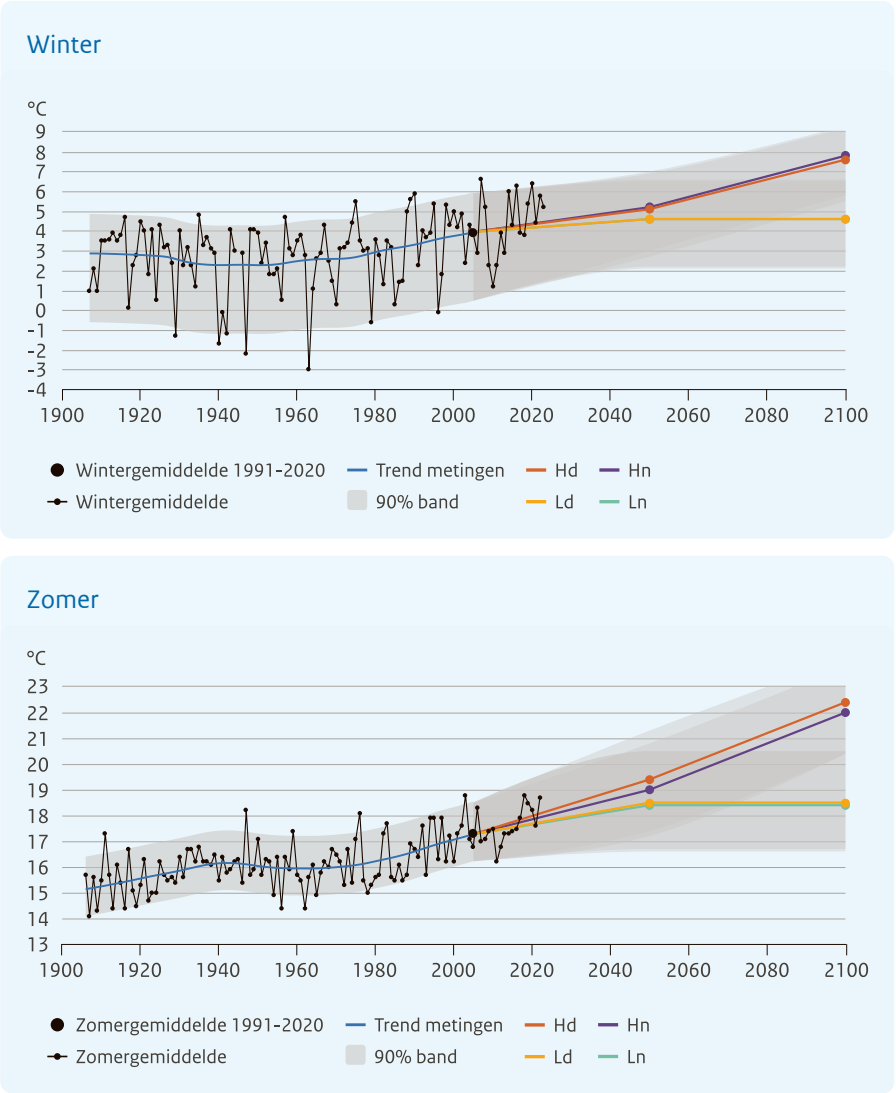
De temperatuur neemt verder toe



Figuur 7. Gemiddelde jaartemperatuur, landelijk gemiddeld: waarnemingen (zwart) en de vier KNMI'23-klimaatscenario's (2050 en 2100, in drie kleuren (Ln en Ld vallen samen)).

Winter- en zomertemperatuur

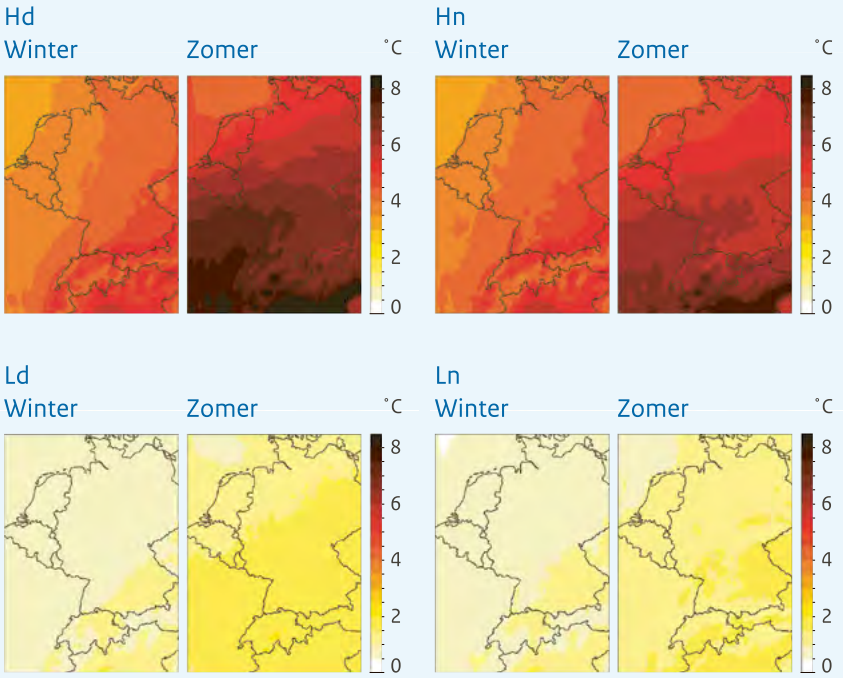
De opwarming is het grootst in de zomer



Figuur 8. Winter- en zomertemperatuur, landelijk gemiddeld: waarnemingen (zwart) en de vier KNMI'23-klimaatscenario's (2050 en 2100, in vier kleuren).

Temperatuur in West-Europa

De opwarming neemt toe naar het zuidoosten



Figuur 9. Temperatuurverandering in West-Europa, in de winter en de zomer rond 2100, volgens de vier KNMI'23-klimaatscenario's.

De stedelijke klimaatproblematiek

Het overgrote deel van de Nederlanders woont en werkt in stedelijke gebieden. Steden dragen in belangrijke mate bij aan de emissies die het klimaat beïnvloeden. Tegelijkertijd worden de effecten van klimaatverandering op gezondheid en economie in de stad sterker gevoeld. Dit komt door het 'hitte-eilandeffect': stedelijke gebieden zijn warmer dan de landelijke omgeving. Aanpassing aan klimaatverandering is voor steden urgent.

Opeenstapeling van effecten

Nederlandse steden hebben te maken met een opeenstapeling van effecten die door klimaatverandering versterkt worden. De opwarming en de toename van langdurige droogte leiden tot extremere temperaturen tijdens hittegolven, met als gevolg meer oversterfte. De nabijheid van de opwarmende Noordzee leidt tot een toename van extremere buien met wateroverlast en overstromingen tot gevolg.

Het hitte-eilandeffect is voor een groot deel toe te schrijven aan de wijze waarop veel steden zijn ingericht, namelijk met bebouwing en bestrating en minder ruimte voor beplanting. Hierdoor wordt overdag een groter deel van de invallende zonnestraling opgenomen en vindt er minder verdamping door planten plaats. In stedelijk gebied is opgewekte warmte door menselijke activiteiten ook groter dan daarbuiten. Omdat veel warmte wordt vastgehouden, zorgt het hitte-eilandeffect vooral voor minder afkoeling in de avond en nacht. Bij extreme hitte heeft dit negatieve gevolgen voor onze nachtrust en gezondheid.

Steden hebben ook invloed op de vorming en de verdeling van neerslag. Boven steden is de lucht niet alleen warmer, maar ook viezer. Rond fijne stofdeeltjes kunnen gemakkelijk waterdruppeltjes ontstaan. Verder wordt de wind afgeremd door bebouwing. In de buurt van grote steden, zoals Amsterdam, Den Haag en Rotterdam, valt hierdoor relatief veel neerslag. Omdat in Nederland veel steden dicht bij elkaar liggen, is moeilijk vast te stellen hoe sterk dit effect hier is. Ook de nabijheid van de Noordzee is van invloed.

Klimaatadaptieve inrichting

Temperatuurverschillen tussen stad en omgeving veranderen niet bij verdere opwarming. De negatieve effecten van de opwarming zullen in de steden het eerst gevoeld worden, omdat men daar door het hitte-eilandeffect al dichter bij de grenswaarden zit. Dit leidt in de stad bijvoorbeeld tot een sterkere toename van het aantal tropische nachten dan in het buitengebied. Door de regionale verschillen in zomertemperaturen worden de hoogste waarden in steden in Zuidoost-Nederland bereikt. Een deel van het hitte-eilandeffect is terug te dringen door meer groen aan te planten in de stad. Dit leidt ertoe dat invallende zonnestraling – in plaats van de lucht te verwarmen – zorgt voor meer verdamping van water.

Early warning

Aanpassen aan de toenemende kans op extreem weer, zoals hitte, kan niet alleen door steden anders in te richten, maar ook door tijdige en gedetailleerde waarschuwingen te geven. Door deze zogeheten 'early warning' is het mogelijk om tijdig maatregelen te nemen tegen een naderende hittegolf. Als warm weer een risico is, activeert het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), op basis van de KNMI-weersverwachting, het Nationaal Hitteplan. Dit hitteplan bevat richtlijnen en adviezen voor het algemene publiek en voor professionals in de gezondheidszorg, zoals huisartsen, verpleegkundigen en verzorgers. Het doel is om het risico op gezondheidsproblemen door hitte te verminderen, met name voor kwetsbare groepen zoals ouderen, jonge kinderen, chronisch zieken en mensen met een beperkte mobiliteit.

Het weer van de toekomst

De hittegolf van juli 2019 in een warmer klimaat

Hittegolven hebben veel impact op de maatschappij. Na intense warmte overdag volgen vaak tropische nachten. In de stedelijke omgeving kan het meer dan 5°C warmer worden dan in het buitengebied. Nu al komen hittegolven veel vaker voor dan vroeger. In een warmer klimaat zet deze toename door. Hierdoor worden zomers zoals 2018 en 2019, die in het huidige klimaat 'extreem' waren, steeds normaler. Drie factoren bepalen de impact van een hittegolf: de intensiteit, de duur en de ruimtelijke omvang. In een warmer klimaat nemen alle drie toe, terwijl het aantal 'afkoeldagen' (met temperaturen onder de 25°C) juist afneemt. Met behulp van een regionaal klimaatmodel hebben we berekend hoe de warmste hittegolf ooit in Nederland er in een warmer klimaat uit zou zien. Tijdens deze hittegolf werd op 25 juli 2019 het nationale hitterecord met ruim 2°C gebroken (40,7°C Gilze-Rijen). Deze hittegolf was extreem, ook in het huidige warmere klimaat. Rond 1900 waren zulke hoge temperaturen in Nederland vrijwel onmogelijk (ref. 2); tegenwoordig is de kans op zulke hitte hier eens in de 50 tot 100 jaar.

Als de hittegolf van juli 2019 zou optreden in een mondiaal 2°C warmer klimaat dan nu (figuren 10 en 11), zijn dit waarschijnlijk de consequenties:

- Temperatuurmaxima bereiken waarden tussen 42,5 en 45°C op veel plekken in Nederland.
- Het 'hittegolfgetal' (som van temperaturen boven 30°C) verdubbelt.
- Het gebied met temperaturen boven 40°C wordt veel groter.
- Door de hogere temperaturen duurt de hittegolf langer, vooral in scenario's met sterke uitdroging.

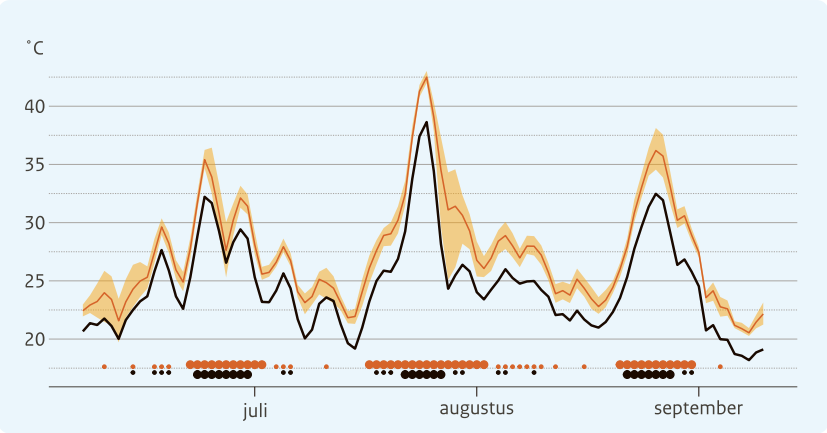
In een 4°C warmer klimaat zijn temperaturen in de stad tot 50°C niet uit te sluiten en zou de zomer van 2019 vrijwel één continue hittegolf zijn geweest.

Code oranje voor hitte

Het KNMI geeft weerwaarschuwingen af bij extreem weer. Bij code oranje voor hitte geldt minimaal één van de volgende criteria: drie dagen op rij met een maximumtemperatuur van 34°C of hoger, twee dagen op rij met een maximumtemperatuur van 36°C of hoger, of één dag met een maximumtemperatuur van 38°C of hoger. In de referentieperiode 1991-2020 kwam dit in De Bilt één keer voor, op 24-26 juli 2019. Rond 2050 komt dit in De Bilt in de Ln-, Ld-, Hn- en Hd-scenario's respectievelijk 2, 4, 5 en 8 keer per 30 jaar voor, en rond 2100 respectievelijk 2, 4, 25 en 66 keer.

Maximumtemperatuur in Zuidoost-Nederland

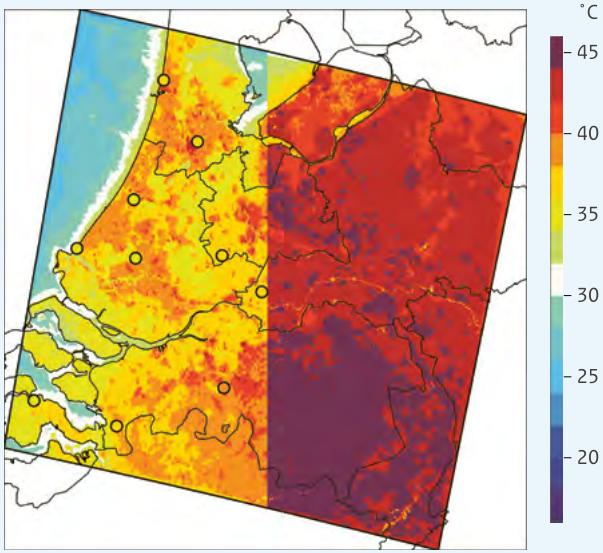
Hittegolven worden heter en duren langer



Figuur 10. Driedaags-gemiddelde maximumtemperatuur in de zomer van 2019 boven Zuidoost-Nederland in het huidige klimaat (zwart) en in een 2°C warmer klimaat (oranje). De grote stippen markeren hittegolfdagen.

Extreme hitte: nu (2019) en in een warmer klimaat

Op veel plaatsen meerdere dagen ruim boven de 40°C



Figuur 11. Gemiddelde maximumtemperatuur op 24-26 juli 2019, uit waarnemingen (stippen) en regionale klimaatsimulaties voor het huidige klimaat (linkerhelft) en voor een 2°C warmer klimaat (rechterhelft).



Marc Bruxelle / Shutterstock.com

Neerslag

Grootschalige neerslag ontstaat als warme en koude lucht samenkomen. De warme, lichte lucht stijgt dan op tot boven de koude, zware lucht, koelt af en regent uit. Ook kleinschalige neerslag, zoals zomerbuien, ontstaat doordat warme, lichte lucht omhoog beweegt, afkoelt en uitregent. De oorzaak van het opstijgen is in het laatste geval echter anders, namelijk opwarming van lucht nabij de grond door de zon.

De hoeveelheid waterdamp in de lucht neemt toe met ongeveer 7% per graad opwarming. Maar dan moet er wel genoeg water beschikbaar zijn om te verdampen. Dat is in de zomer niet altijd het geval, omdat de bodem dan is uitgedroogd. Een toename van de hoeveelheid neerslag volgt vaak op een toename van de hoeveelheid vocht in de atmosfeer. Verandert de overheersende windrichting, en daarmee de aanvoer van droge of vochtige lucht, dan kan de hoeveelheid neerslag zowel af- als toenemen.

In alle klimaatscenario's neemt de winterneerslag verder toe

Ontwikkelingen tot nu

Sinds 1906 is de jaarlijkse neerslag in Nederland met ongeveer 20% toegenomen (figuur 12, donkerblauwe trendlijn). Alle seizoenen zijn natter geworden, vooral de winter. De jaarlijkse neerslag is vooral toegenomen in de jaren 80 en 90 van de vorige eeuw. Natuurlijke variaties in de neerslag zijn groot.

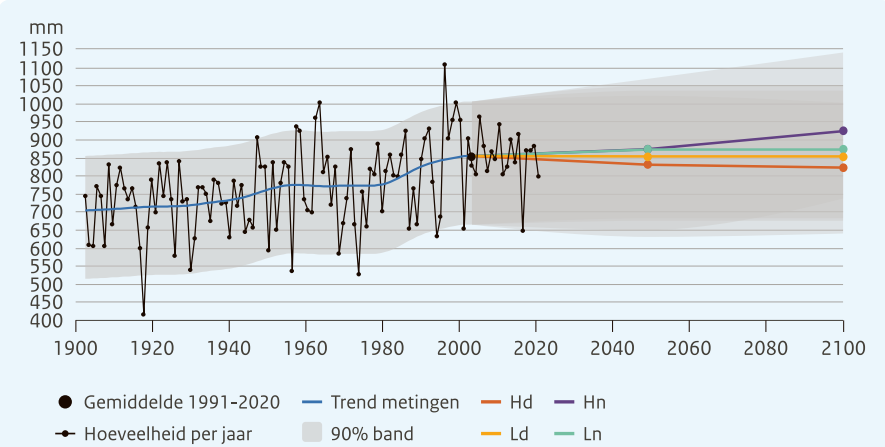
Ontwikkelingen in de toekomst

In alle vier de klimaatscenario's neemt de neerslag in de winter verder toe (figuur 13). In beide L-scenario's is de neerslag rond 2100 gelijk aan die rond 2050, omdat in deze twee scenario's de opwarming in die twee perioden hetzelfde is. De toename van de winterneerslag ten opzichte van nu (1991-2020) is in 2100 het kleinst (+4%) in het Ld-scenario en het grootst (+24%) in het Hn-scenario. In de toekomstige winters waait de wind gemiddeld vaker dan nu uit het westen, vooral in het Hn-scenario, waardoor meer vochtige lucht wordt aangevoerd vanaf de Noord-Atlantische Oceaan (figuur 6).

In de afgelopen decennia nam de zomerneerslag toe. In drie van de vier klimaatscenario's neemt de zomerneerslag echter af, het meest (-29%) in het Hd-scenario. De zomerneerslag neemt af doordat er vaker droge, continentale lucht uit het oosten wordt aangevoerd. Dat de wind vaker uit het oosten waait, heeft twee oorzaken: veranderingen van de zeewatertemperatuur westelijk van Ierland, en een sterke opwarming van Zuid-Europa.

Jaarlijkse neerslag

De jaarlijkse neerslaghoeveelheid verandert weinig



Figuur 12. Jaarlijkse neerslaghoeveelheid, landelijk gemiddeld: waarnemingen (zwart) en de vier KNMI'23-klimaatscenario's (2050 en 2100, in vier kleuren).

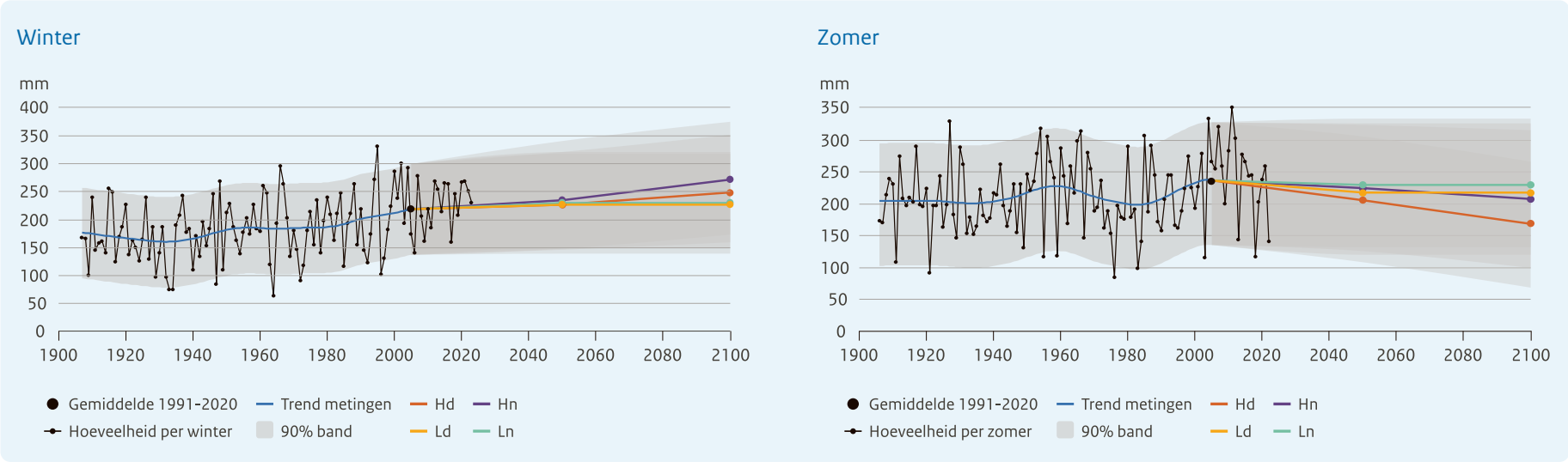
In de lente en de herfst neemt de neerslag toe, maar minder dan in de winter. De toename is het grootst in het Hn-scenario. De winter, de lente en de herfst worden dus natter en de zomer wordt droger, vooral in de H-scenario's. De verandering van de jaarneerslag varieert van -3% in het Hd-scenario tot +8% in het Hn-scenario in 2100.

In de H-scenario's neemt in het grootste deel van West-Europa de winterneerslag toe en neemt de zomerneerslag af (figuur 14). De toename in de winter is vrijwel overal even groot; de afname in de zomer kent grotere ruimtelijke verschillen en is het grootst in het zuiden en het westen.

In alle klimaatscenario's neemt de zomerneerslag af

Winter- en zomerneerslag

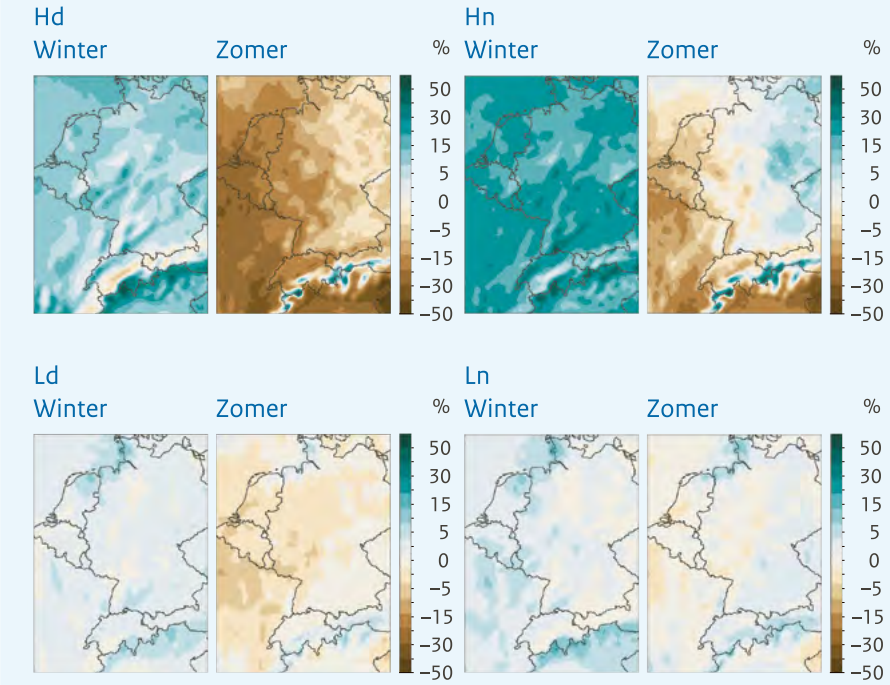
Meer neerslag in de winter, minder in de zomer



Figuur 13. Neerslaghoeveelheid in Nederland in de winter (links) en de zomer (rechts), landelijk gemiddeld: waarnemingen (zwart) en de vier KNMI'23-klimaatscenario's (2050 en 2100, in vier kleuren).

Neerslagverandering in West-Europa

Meer neerslag in de winter, minder in de zomer

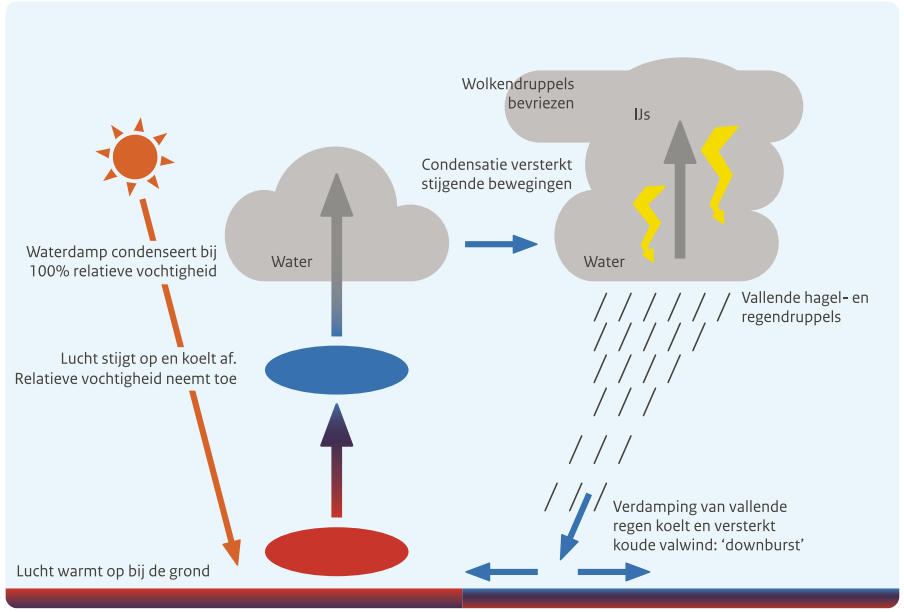


Figuur 14. Neerslagverandering in West-Europa in de winter en de zomer rond 2100, volgens de vier KNMI'23-klimaatscenario's.

Zomerbuien, hagel en onweer

Buien ontstaan wanneer er een groot temperatuurverschil is tussen het aardoppervlak en de lucht erboven (figuur 15). We noemen de atmosfeer dan instabiel. Na een warme zomerdag, als de onderste luchtlagen flink zijn opgewarmd, stijgt deze warme lucht op en koelt daarbij af. Als er voldoende waterdamp in de stijgende lucht zit, condenseert een deel hiervan tot waterdruppeltjes. Een wolk bestaat uit een grote hoeveelheid van zulke waterdruppeltjes. We spreken van een buienwolk (cumulonimbus) als de top van de wolk zo hoog reikt dat de bovenkant niet uit waterdruppels bestaat, maar uit ijsdeeltjes. Hevige buien gaan vaak gepaard met windstoten, hagel en onweer.

Zomerbuien



Figuur 15. Vorming en ontwikkeling van zomerbuien.

Meer of minder buien in de toekomst?

Of het aantal buien toeneemt als Nederland in de toekomst een warmer klimaat heeft, hangt af van verschillende factoren. Sommige bevorderen buienvorming, andere gaan deze juist tegen.

In een warmer klimaat bevat de atmosfeer meer waterdamp. Hierdoor valt er meer neerslag uit een bui. Meer waterdamp in de atmosfeer betekent ook dat er meer condensatiewarmte vrijkomt, waardoor de lucht sneller kan opstijgen en uitregenen. Anderzijds geven klimaatmodellen aan dat de lucht boven in de atmosfeer meer opwarmt dan de lucht aan het aardoppervlak. Daardoor wordt de atmosfeer stabieler, wat het opstijgen juist afremt. De toename in condensatiewarmte heeft een groter effect, waardoor extreme buien in de toekomst vaker voorkomen.

Extreme buien komen in de toekomst vaker voor

Heeft lucht een lage relatieve vochtigheid, dan kunnen pas op grotere hoogte wolkendruppels ontstaan. Bij een lage relatieve vochtigheid – die in de zomer vaker optreedt als gevolg van klimaatverandering – ontstaan dus minder snel buien.

Bij een lagere relatieve luchtvochtigheid zal een relatief groot deel van de neerslag verdampen voordat het aardoppervlak is bereikt. Door verdamping koelt de lucht af, die daardoor zwaarder wordt en neerwaarts beweegt. De kans op valwinden neemt hierdoor toe. Aan het aardoppervlak spreidt de dalende koude lucht zich uit en tilt zo de daar aanwezige lucht op. Daardoor kunnen nieuwe buien ontstaan.

Extreme neerslag

Tot voor kort waren klimaatmodellen te grofmazig om individuele buien weer te geven. Een nieuwe generatie klimaatmodellen doet dat wel en geeft bovendien een veel betere weergave van de waargenomen extreme neerslag. Omdat deze modellen zo fijnmazig zijn vergen ze erg veel rekenkracht, en blijven de resultaten beperkt tot een klein gebied rondom Nederland. Ook is er nog maar een vrij klein aantal toekomstbeelden doorgerekend. De scenario's voor veranderingen in extreme neerslag (figuur 16) zijn daarom berekend door de uitkomsten van zulke fijnmazige modellen te combineren met de uitkomsten van grofmazige modellen. Dit is gedaan voor scenario's passend bij een droger en bij een natter toekomstbeeld voor jaarneerslag in Nederland. Elk scenario heeft een bandbreedte die gebaseerd is op de spreiding in fijnmazige klimaatmodellen. Nieuw ten opzichte van de KNMI'14-klimaatscenario's is ook dat veranderingen in zeldzame, zeer extreme neerslag zijn berekend, met herhalingstijden tot 1000 jaar.

De grootste hagelstenen worden vermoedelijk nóg groter

In de toekomst neemt het aantal lichte zomerse buien af. Het aantal zware buien met veel neerslag neemt toe. Er vindt dus een verschuiving plaats van lichte naar zwaardere (er valt meer regen uit de bui) en intensere (er valt meer regen in een bepaalde tijd) buien.

Hagel, windstoten en onweer

Informatie over toekomstig onweer, hagel en windstoten is maar zeer beperkt beschikbaar. Uit recent onderzoek blijkt dat toenames in deze grootheden onzekerder zijn dan eerder gedacht. Doordat er meer waterdamp in de atmosfeer zit, worden stijgbewegingen versterkt, waardoor de grootste hagelstenen vermoedelijk nóg groter worden. En doordat er meer neerslag verdampt, kunnen windstoten en valwinden bij buien sterker worden. Of het in Nederland ook vaker gaat bliksemen, is onzeker.

Extreme neerslag

Meer extreme neerslag per dag en per uur



Figuur 16. Bandbreedte van procentuele veranderingen van extreme dag- en uurneerslag in de zomer, volgens de hoge KNMI'23-klimaatscenario's rond 2100.

Droogte en verdamping

Droogte treedt op als er minder neerslag valt dan normaal, als er meer water verdampt dan gebruikelijk, of beide. Dan ontstaat een watertekort met problemen voor de veiligheid (uitdrogende/verzwakkende waterkeringen), landbouw, binnenvaart, woonomgeving, waterkwaliteit en natuur. Vooral langdurige en langjarige droogtes veroorzaken zulke effecten, zoals in 2018, 2019, 2020 en 2022 (figuur 17, links).

In de herfst en winter valt er meer neerslag dan er water verdampt. In de zomer is dit andersom, waardoor een neerslagtekort ontstaat. Neerslag en verdamping fluctueren sterk van jaar tot jaar, waardoor systematische trends moeilijk te bepalen zijn. De laatste decennia zijn vooral april en mei droger geweest, met name in het binnenland. Dit is deels toe te schrijven aan hogere temperaturen (door klimaatverandering) en deels aan meer zonneschijn (door een afname van de luchtvervuiling).

Extreme droogte

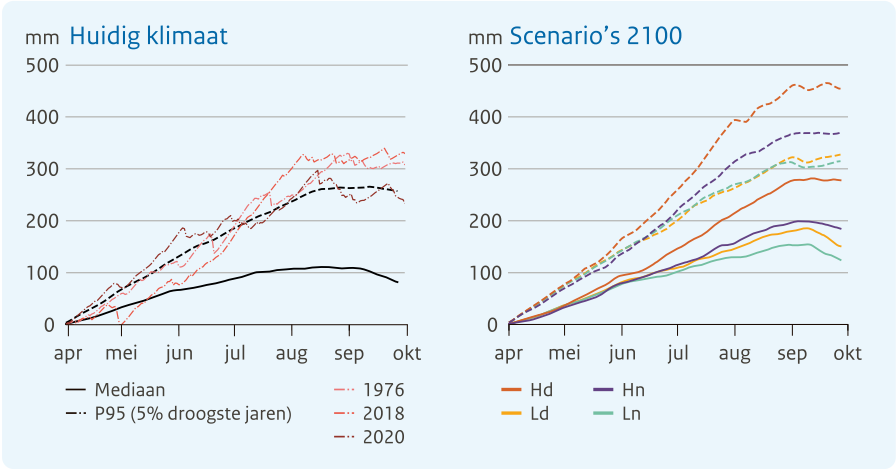
In Nederland neemt de kans op (extreme) droogte toe, met name in het hoge uitstootscenario, droog (Hd) (figuur 17, rechts). In dit droogste scenario is een gemiddelde zomer in de toekomst ongeveer even droog als een extreem droge zomer nu.

> Volgens het warme, droge scenario is een gemiddelde zomer rond 2100 ongeveer even droog als een extreem droge zomer nu

Nederland ligt in het gebied met afnemende zomerneerslag, terwijl hogere temperaturen de verdamping doen toenemen. Neerslag en verdamping worden beïnvloed door veranderingen in de luchtcirculatie. Westenwinden voeren doorgaans vochtige lucht aan, wat leidt tot meer neerslag. Oostenwinden voeren droge lucht aan, wat leidt tot meer verdamping, met name in de zomer. De verwachting is dat het neerslagtekort in Nederland sterk zal toenemen, vooral in het zuiden (figuur 18).

Neerslagtekort nu en rond 2100

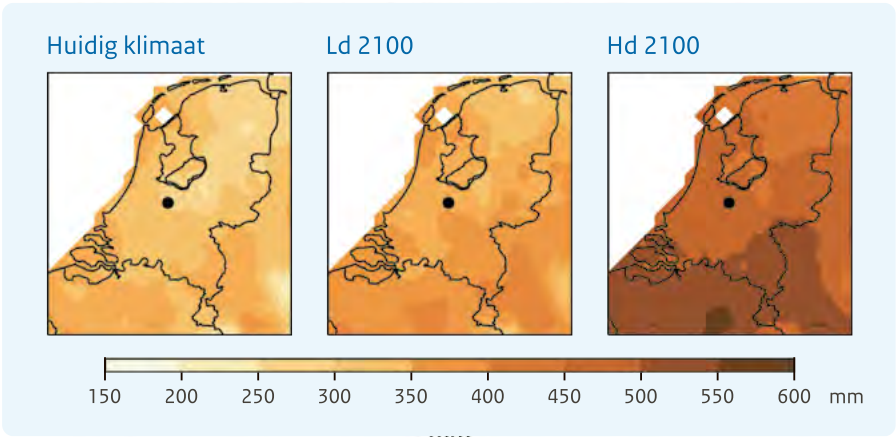
Neerslagtekort neemt toe



Figuur 17. Doorlopend cumulatief neerslagtekort in De Bilt in het huidige klimaat (1991-2020) (links) en rond 2100 voor de vier KNMI'23-klimaatscenario's (rechts). Stippellijnen tonen de 5% droogste jaren.

Maximaal neerslagtekort nu en rond 2100

Maximaal neerslagtekort neemt toe



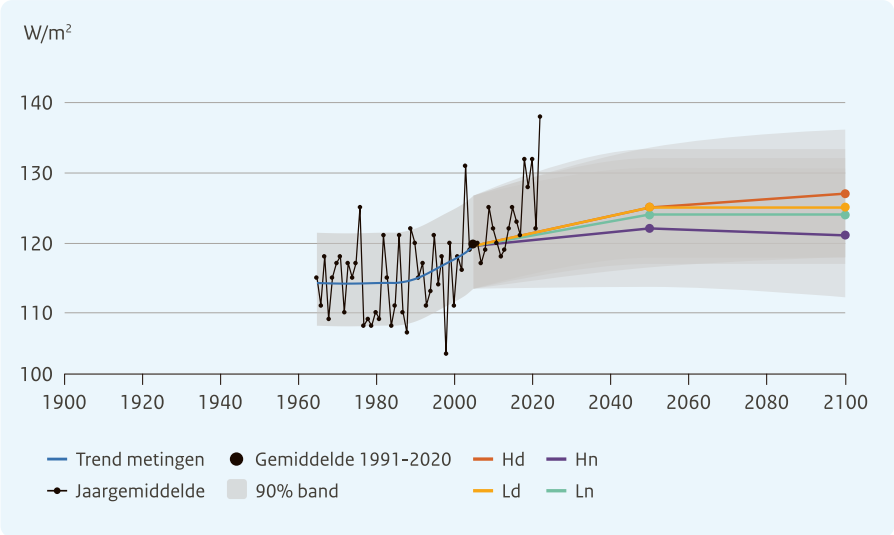
Figuur 18. Het maximale neerslagtekort in de 5% droogste jaren in het huidige klimaat en in de twee droge KNMI'23-klimaatscenario's rond 2100. Zwarte stip: De Bilt (figuur 17).

Zonnestraling en wolken

Wolken houden zonnestraling tegen en bepalen daarom hoeveel straling de aarde bereikt. In het algemeen geldt: hoe dikker een wolk is, hoe meer zonnestraling hij terugkaatst. Gerekend over een heel jaar is het in Nederland aan de kust zonniger dan in het binnenland. Dit komt doordat er in de buurt van het relatief koele zeewater in de lente en zomer minder wolken ontstaan.

Zonnestraling wordt ook teruggekaatst door aerosolen, zwevende deeltjes in de atmosfeer (bijvoorbeeld luchtvervuiling), die invloed hebben op het ontstaan van wolken. Omdat de lucht in Europa sinds de jaren 80 van de vorige eeuw steeds schoner werd, nam het aantal aerosolen af. In diezelfde periode nam ook de bewolking af en werden wolken dunner en dus doorschijnender. Hierdoor nam de hoeveelheid doorgelaten zonnestraling met ongeveer 4 W/m^2 (4%) per decennium toe (figuur 19). Dit droeg bij aan de opwarming in Nederland.

Jaargemiddelde zonnestraling



Figuur 19. Jaargemiddelde zonnestraling in Nederland sinds 1965, landelijk gemiddeld: waarnemingen (zwart) en de vier KNMI'23-klimaatscenario's (2050 en 2100, in vier kleuren).

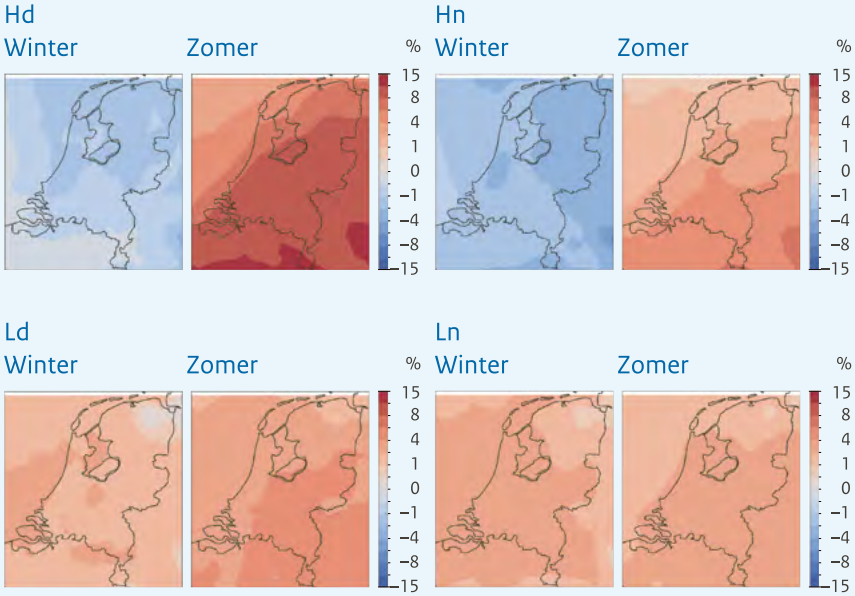
Zonnestraling neemt nog iets verder toe

Naar verwachting wordt de lucht in de toekomst nog iets schoner, vooral in het lage uitstootscenario waarin de hoeveelheid aerosolen langzaam blijft afnemen. Hierdoor neemt de gemiddelde zonnestraling nog iets toe ten opzichte van de periode 1991-2020 (figuur 19), hoewel de natuurlijke jaar-op-jaar variaties groot zijn (vooral de afgelopen jaren zijn bovengemiddeld zonnig geweest).

In de hoge uitstootscenario's is er een duidelijk verschil tussen droog en nat: in het droge scenario (Hd) neemt de zonnestraling het meest toe, met name in het zuiden van het land (figuur 20) en in de zomer. Dit komt door meer wolkeloze dagen – het gevolg van een toename van relatief droge oostenwinden. In de winter neemt de zonnestraling juist af, door meer westenwinden en meer bewolking. In de natte scenario's is er minder verschil tussen zomer en winter.

Hoeveelheid zonnestraling

Meer zon in de zomer



Figuur 20. Verandering van de hoeveelheid zonnestraling in de winter en de zomer rond 2100, bij de vier KNMI'23-klimaatscenario's.

Wind, storm en windstoten

Lage windsnelheden kunnen de luchtkwaliteit verslechteren en het ontstaan van mist bevorderen. Windturbines leveren minder energie bij lage windsnelheden. Hoge windsnelheden kunnen leiden tot onveilige omstandigheden, zoals omvallende bomen of stormvloeden. Die kunnen ontstaan als er op de Noordzee langdurig een harde noordwestenwind waait. Windsnelheden zijn niet constant, zeker niet als het hard waait. Tijdens windstoten, die maar enkele seconden duren, kan de windsnelheid meer dan twee keer zo hoog zijn als de gemiddelde wind. Daarnaast kunnen tijdens hevige buien op kleine schaal windstoten en valwinden ontstaan. Dat zal ook in de toekomst zo blijven.

De in Nederland boven land waargenomen windsnelheden dalen licht sinds ongeveer 1990 (figuur 21). Op de Noordzee is deze trend niet te zien. Waarschijnlijk wordt de daling boven land veroorzaakt door een toename van de ruwheid van het aardoppervlak – een gevolg van verstedelijking.

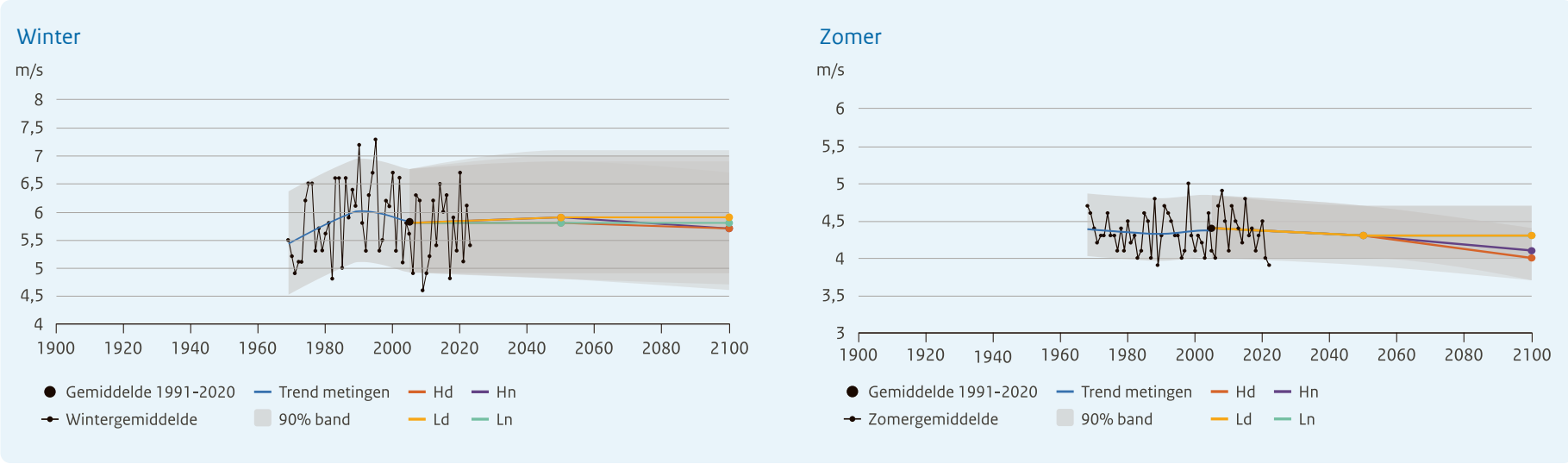
Gevaarlijke wind

Het grootste gevaar van harde wind is dat deze stormvloeden kan veroorzaken. Ook de duur en richting van de wind spelen daarbij een belangrijke rol. Voor Nederland is stormachtige noordwestenwind het gevaarlijkst. Het verwachte aantal dagen met wind uit deze richting met een gemiddelde snelheid van minstens 14 m/s (windkracht 7 of meer) vertoont een kleine afname (figuur 22). Voor de windsnelheid zelf wordt nauwelijks of geen verandering verwacht. Toekomstige stormen zullen dus het water niet hoger boven de gemiddelde zeespiegel opstuwen dan nu, maar de gemiddelde zeespiegel zal wel hoger zijn.

> De extra wateropzet tijdens stormen zal niet hoger zijn dan nu. Het gevaar voor de kustveiligheid komt alleen door de zeespiegelstijging

Windsnelheid in winter en zomer

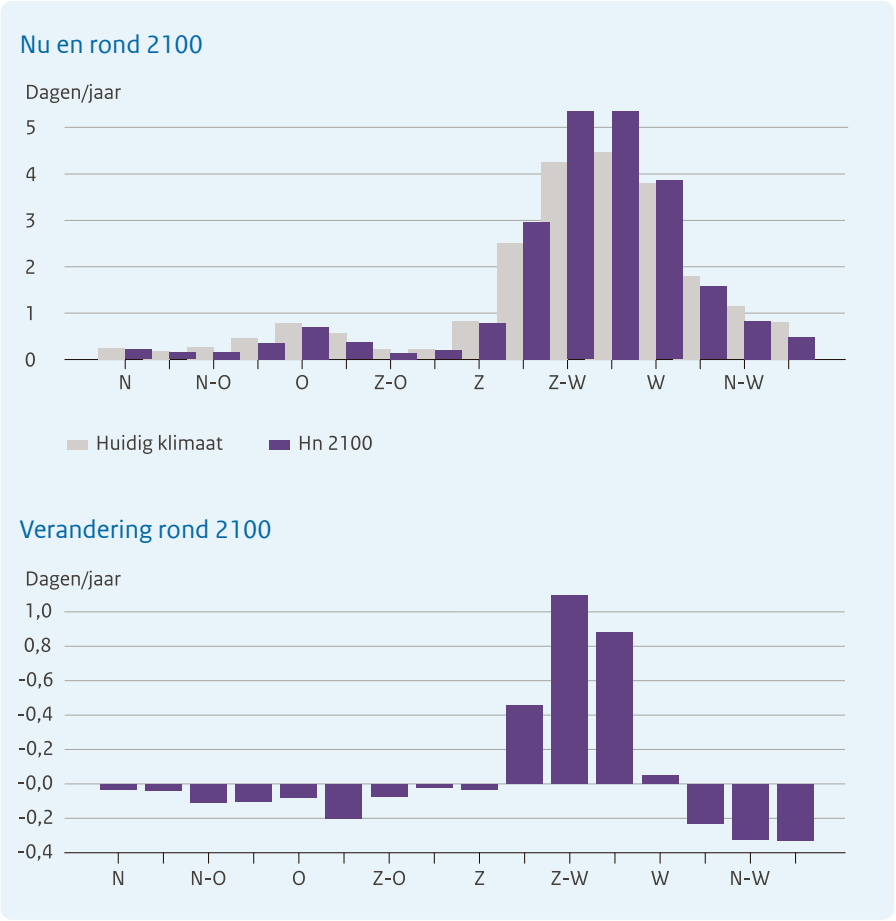
De gemiddelde windsnelheid verandert nauwelijks



Figuur 21. Gemiddelde windsnelheid in de winter (links) en de zomer (rechts) op station Schiphol: waarnemingen (zwart) en de vier KNMI'23-klimaatscenario's (2050 en 2100).

Windrichting nu en rond 2100

Minder dagen met harde noordwestenwind



Figuur 22. Dagen per jaar met windsnelheid in K13 (Noordzee, 53,2°N, 3,2°O) met meer dan 14 m/s, bij verschillende windrichtingen in 1991-2020 en in het Hn-scenario rond 2100 (boven), en verschil tussen deze twee (onder).

Zicht en mist

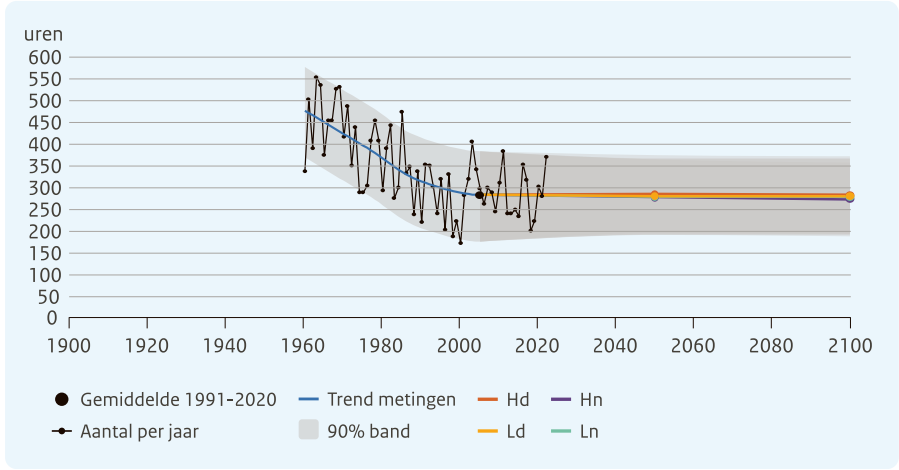
Mist bestaat uit kleine, in de lucht zwevende waterdruppeltjes vlak boven de grond. Deze druppeltjes ontstaan rondom aerosolen. Meteorologen spreken van ‘mist’ als het zicht minder is dan 1000 meter. Mist kan het weg-, scheepvaart- en vliegverkeer hinderen.

In Nederland onderscheiden we verschillende soorten mist. Het meest voorkomend is stralingsmist, die ontstaat als de onderste luchtlagen door uitstraling van warmte sterk afkoelen, waarbij de lucht met vocht verzadigd raakt. Soms ontstaat mist tijdens horizontale luchtverplaatsing, vooral nabij de kust als warme, vochtige lucht vanaf de Noordzee over een kouder landoppervlak stroomt. Ten slotte zien we ’s zomers geregeld grondmist boven relatief koude wateroppervlakken en vochtige graslanden. Mist komt in het binnenland vaker voor dan aan de kust.

De afgelopen decennia nam het aantal uren (dichte) mist overal in Nederland sterk af (ongeveer 50% in 40 jaar). Dit komt doordat de lucht schoner is geworden: omdat er minder stofdeeltjes zijn, ontstaan waterdruppeltjes minder gemakkelijk. Naar verwachting neemt de luchtvervuiling deze eeuw nog iets verder af. Hierdoor wordt de kans op mist nog wat kleiner, maar veranderende meteorologische omstandigheden spelen hierbij waarschijnlijk ook een rol. Schattingen van het optreden van mist in de toekomst[1] zijn gebaseerd op de vorming van stralingsmist tijdens perioden met weinig wind en veel vocht nabij het aardoppervlak. Modelresultaten laten zien dat het aantal weersituaties waarin (dichte) mist kan ontstaan in alle seizoenen nauwelijks zal veranderen door klimaatverandering. Wel is een lichte afname van (dichte) mist mogelijk door verdere verbeteringen van de luchtkwaliteit, maar deze afname zal veel kleiner zijn dan die gedurende de afgelopen 40 jaar (figuur 23).

Mist

Mist neemt nauwelijks verder af



Figuur 23. Aantal uren mist (minder dan 1 km zicht) per jaar in De Bilt: waarnemingen (zwart) en de vier KNMI’23-klimaatscenario’s (2050 en 2100).



1 Zie www.knmi.nl/klimaatscenarios voor de uitgebreide tabel met veranderingen voor de KNMI’23-klimaatscenario’s, inclusief getallen voor mist.

Zeespiegelstijging

Sinds het begin van de jaartelling is de hoogte van de zeespiegel wereldwijd nauwelijks veranderd, totdat deze in de loop van de 19e eeuw begon te stijgen. Sinds 1900 bedraagt de stijging ongeveer 20 cm (1,7 mm/jaar). In de laatste 50 jaar is er sprake van een versnelling: ongeveer 2,3 mm/jaar in de periode 1971-2018, en 3,7 mm/jaar in de periode 2006-2018. De zeespiegelstijging versnelt nog steeds.

Zeespiegelstijging voor de Nederlandse kust

Sinds 1890 steeg de zeespiegel ten opzichte van het Nieuw Amsterdams Peil (NAP) met 25 cm (gemiddeld over 130 jaar is dit ruim 1,9 mm/jaar, figuur 24). Hierbij is rekening gehouden met het effect van bodemdaling, dat verantwoordelijk is voor ongeveer een kwart van de relatieve zeespiegelstijging (nabij meetstation Delfzijl is de bodemdaling als gevolg van de gaswinning aanzienlijk groter). Veranderingen van de regionale zeespiegel worden ook beïnvloed door natuurlijke variaties in windsnelheid en -richting, die de mate van opstuwing voor de kust bepalen. Als we hiervoor corrigeren, is een versnelling zichtbaar: 2,9 mm/jaar in de periode 1993-2021 ten opzichte van 1,8 mm/jaar in de periode 1890-1993. In vergelijking met de KNMI-klimaatscenario's uit 2014 (ref. 3) en het Klimaatsignaal uit 2021 (ref. 4) komen de huidige scenario's (figuur 24) nauwkeuriger overeen met de waarnemingen over de afgelopen 30 jaar, omdat we tegenwoordig een beter begrip hebben van de processen die regionale verschillen in zeespiegel veroorzaken.

> Door verbeterde zeespiegelscenario's komen modeluitkomsten tegenwoordig beter overeen met waarnemingen

Toekomstige stijging van het zeeniveau

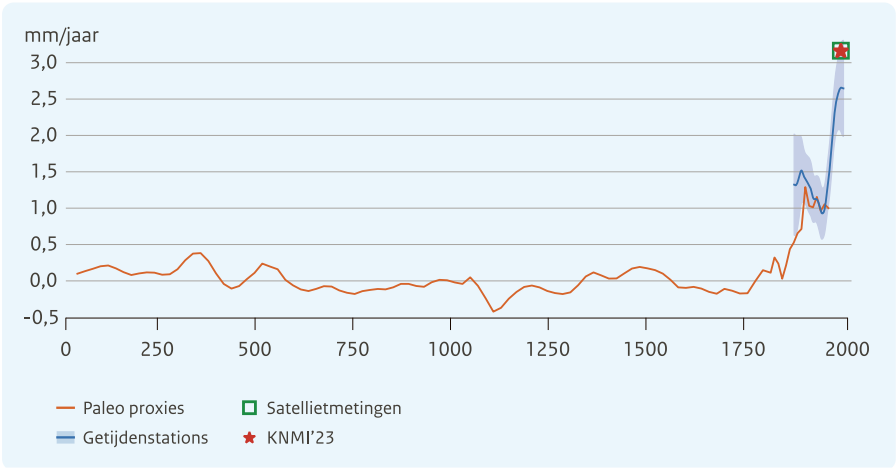
Afhankelijk van de hoeveelheid broeikasgassen die nog wordt uitgestoten, wordt voor de Nederlandse kust rond 2050 een verdere zeespiegelstijging verwacht van 16-34 cm in het lage, en tot 19-38 cm in het hoge uitstootscenario. Rond 2100 zal de stijging in het lage uitstootscenario 26-73 cm bedragen, en 59-124 cm in het hoge uitstootscenario (figuur 25). De bovengrens van de zeespiegelstijging rond 2100 kan tot 2,5 m oplopen als onzekere processen, zoals het instabiel worden van de Antarctische IJskap, al vóór 2100 optreden.

> In het lage uitstootscenario stijgt de zeespiegel tot 2100 redelijk sterk (26-73 cm), bij een hoge uitstoot nog meer (59-124 cm)

Zelfs als de uitstoot van broeikasgassen nu onmiddellijk zou stoppen, stijgt de zeespiegel hoe dan ook door. En niet alleen deze eeuw, maar ook nog honderden jaren daarna. Dit komt doordat de traag reagerende ijskappen niet in evenwicht zijn met het huidige klimaat. Zelfs als de temperatuur gelijk blijft, zullen ze verder slinken. De snelheid en mate waarin de zeespiegel verder stijgt hangen dus af van de mate waarin klimaat en landijs in de komende eeuw uit evenwicht worden gebracht. Hierbij speelt de totale hoeveelheid uitgestoten broeikasgassen een allesbepalende rol.

Het gevolg hiervan is dat zelfs in het lage uitstootscenario de zeespiegel voor de Nederlandse kust na 2150 waarschijnlijk meer dan een meter is gestegen. In het hoge uitstootscenario wordt deze stijging eerder bereikt.

Snelheid zeespiegelstijging voor de Europese kust



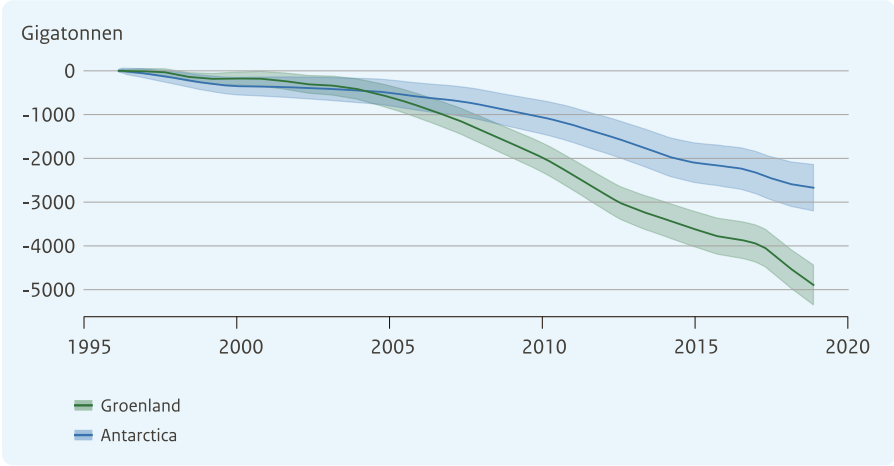
Figuur 24. Snelheid van de zeespiegelstijging in de afgelopen 2000 jaar voor de Europese kust volgens verschillende methodes. Paleo proxies zijn schattingen uit bijvoorbeeld koralen en archeologische informatie.

De ijskappen op Groenland en Antarctica slinken steeds sneller (figuur 26). Tussen 2009 en 2018 was het massaverlies respectievelijk zeven en vier keer zo groot als tussen 1992 en 2001. Bij een wereldgemiddelde opwarming van meer dan 2°C wordt de toekomst van Antarctica erg onzeker. De drijvende ijsplaten die het landijs van Antarctica omringen, zullen dan deze eeuw grotendeels verdwijnen, waarna het landijs sneller naar de kust beweegt en er meer afkalft.

Zelfs als de uitstoot sterk wordt verminderd, zal de zeespiegel voor de Nederlandse kust met meer dan een meter stijgen

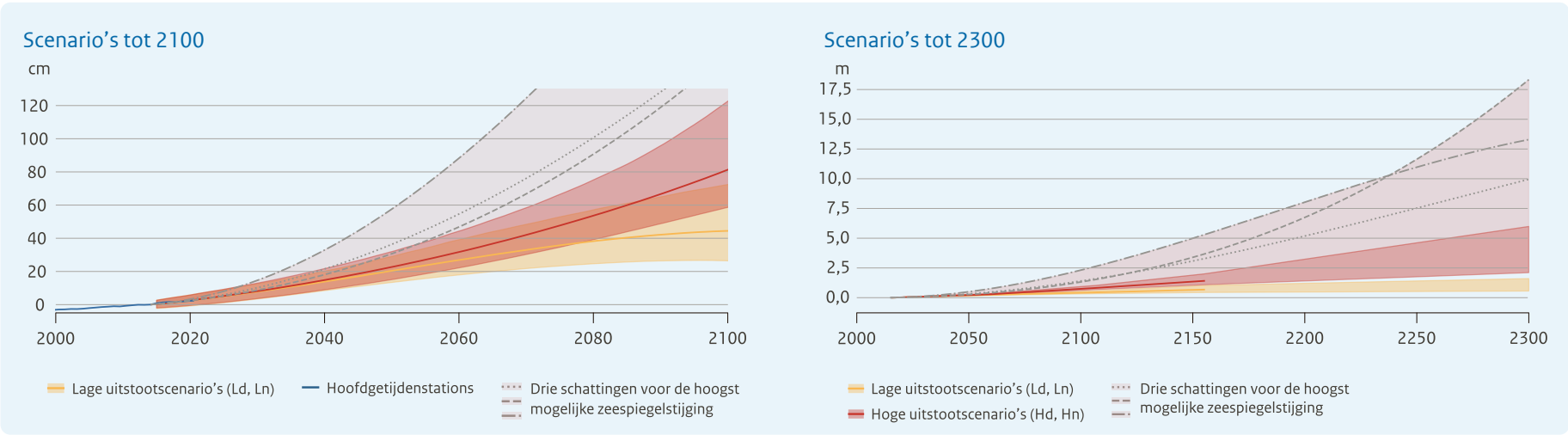
Omdat het smelten van de Groenland IJskap relatief weinig bijdraagt aan de zeespiegelstijging voor de Nederlandse kust, wordt het zeeniveau in onze regio in de verre toekomst vrijwel volledig bepaald door de snelheid waarmee de Antarctische IJskap massa verliest. Volgens het hoge uitstootscenario bedraagt de zeespiegelstijging rond 2300 2 tot 6 meter. Als ook onzekere ijskap-processen op Antarctica worden meegenomen, kan dit oplopen tot meer dan 17 meter (figuur 25).

Massaverlies ijskappen Groenland en Antarctica sinds 1990



Figuur 26. Massaverandering van de ijskappen van Groenland en Antarctica in de afgelopen drie decennia.

Zeespiegel bij Nederland



Figuur 25. Scenario's tot 2100 en 2300 van het zeeniveau bij Nederland t.o.v. het huidige niveau (mediaan en 90%-band), inclusief drie schattingen van de hoogst mogelijke zeespiegelstijging (stippellijnen in lichtroze band).

Hoe warm is het in Nederland als de wereld 1,5°C is opgewarmd?

In het Klimaatakkoord van Parijs is afgesproken de mondiale opwarming te beperken tot ruim onder 2°C ten opzichte van het pre-industriële niveau (1850-1900), met maximaal 1,5°C als streven. Deze getallen gelden voor een gemiddelde over een periode van 20 jaar. De kans is groot dat in de komende 5 jaar een enkel jaar al boven de 1,5°C opwarming uitkomt. Op basis van klimaatmodellen verwacht het IPCC dat 1,5°C opwarming van een 20-jaar gemiddelde mogelijk al bereikt wordt rond 2033. Een sterke reductie van de uitstoot en het op grote schaal verwijderen van CO_2 uit de atmosfeer zullen nodig zijn om de opwarming om te buigen en in 2100 weer uit te komen op 1,5°C.

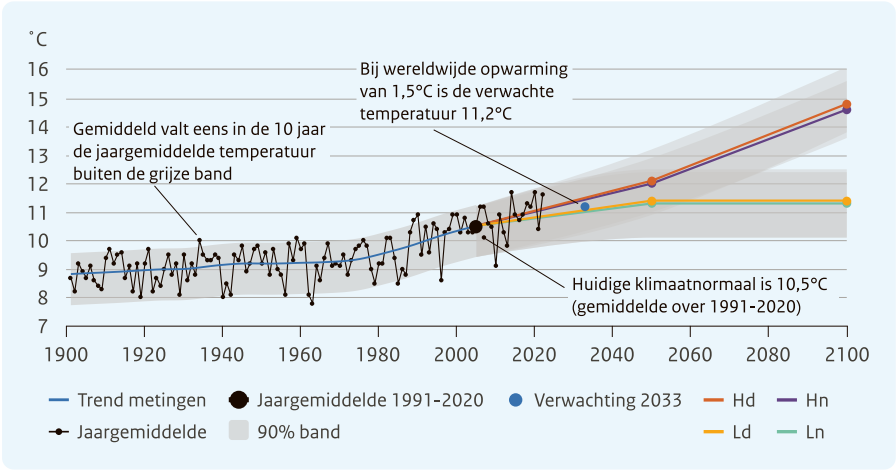
De KNMI'23-klimaatscenario's beschrijven de klimaatverandering ten opzichte van de meest recente referentieperiode (1991-2020). In deze periode bedroeg de mondiale opwarming 0,9°C ten opzichte van 1850-1900. We verwachten tussen de meest recente klimaatnormaal en 2033 dus nog een extra mondiale opwarming van 0,6°C, waarvan 0,3°C inmiddels gerealiseerd is.

Het gemiddelde aantal zomerse dagen in De Bilt neemt rond 2033 toe met 25%

We hebben uitgerekend hoe het Nederlandse klimaat eruitziet in 2033, op dezelfde manier als we gedaan hebben voor 2050 en 2100. De jaargemiddelde temperatuur in Nederland zal rond 2033 0,7°C hoger zijn dan in de referentie-periode: 11,2 ± 0,2°C (figuur 27, blauwe stip). Het gemiddeld aantal zomerse dagen in De Bilt neemt toe met 25%, het aantal ijsdagen neemt af met 20%.

Opwarming Nederland rond 2033

11,2°C in De Bilt als wereld 1,5°C is opgewarmd



Figuur 27. Jaargemiddelde temperatuur in De Bilt: waarnemingen (zwart) en de vier KNMI'23-klimaatscenario's (2050 en 2100, in vier kleuren), inclusief de verwachte temperatuur rond 2033 (blauwe stip).



Klimaatscenario's voor de BES-eilanden

Bonaire, Sint Eustatius en Saba zijn drie bijzondere gemeenten van Nederland, die bekend staan als de BES-eilanden. Voor deze eilanden in het Caribisch gebied maken we klimaatscenario's voor temperatuur, neerslag, wind en zeespiegelstijging. Daarnaast kijken we naar de veranderingen in orkanen vanwege hun grote impact. De waargenomen klimaatverandering voor de BES-eilanden is eerder beschreven (ref. 4 en ref. 5).

Ontwikkelingen in de toekomst

Voor de BES-eilanden zijn er, net als voor Nederland, vier klimaatscenario's: Hoge uitstoot, droog (Hd) en nat (Hn) en Lage uitstoot, droog (Ld) en nat (Ln). We gebruiken dezelfde methode als voor Nederland, maar kijken naar het natte en droge seizoen in plaats van naar de zomer en winter.

Neerslag en temperatuur

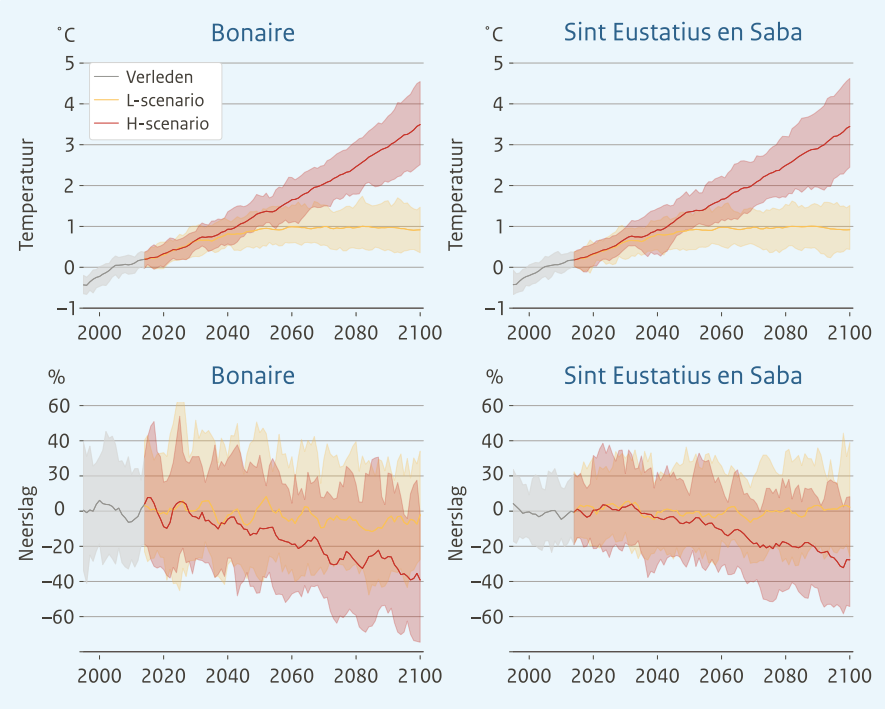
In de vier klimaatscenario's voor de BES-eilanden nemen de temperatuur en de windsnelheid toe, terwijl de neerslag afneemt. In het lage-uitstoot scenario stijgt de temperatuur tot 2050 en blijft daarna gelijk. De neerslag neemt enigszins af. In het hoge-uitstoot scenario blijft de temperatuur stijgen en neemt de neerslag meer af (figuur 28). Rond 2100 is er meer opwarming in de natte scenario's en in het natte seizoen, terwijl de verdroging het sterkst is in de droge scenario's en in het droge seizoen. Rond 2050 zijn deze verschillen kleiner (tabel 3). Voor Bonaire zien we een sterkere toename van de windsnelheid in de droge scenario's en in het natte seizoen. Voor Sint Eustatius en Saba is die toename geringer. Het toekomstige klimaat van het Caribisch gebied vertoont meer overeenkomsten met El Niño, met minder neerslag en een hogere windsnelheid.

> Bij een lage uitstoot kan Bonaire rond 2100 een redelijk sterke zeespiegelstijging verwachten (31-78 cm), bij hoge uitstoot is dat nog meer (55-127 cm)

Er is echter een verschil tussen de waarnemingen en modelberekeningen. Waar de modellen wijzen op een El Niño, lijken de waarnemingen juist richting een La Niña te gaan. Bij een La Niña is er meer neerslag en minder wind. Dit verschil wordt nog niet volledig begrepen, mogelijk ligt het voor een deel aan natuurlijke variabiliteit. Het verschil kan invloed hebben op de klimaatscenario's voor het Caribisch gebied. Het is dus mogelijk dat de neerslag de komende decennia minder afneemt dan de modellen aangeven. Voor de BES-eilanden geldt net als voor Nederland dat de verschillen in opwarming tussen de hoge en lage uitstootscenario's vooral worden bepaald door de verschillen in mondiale uitstoot. Dit betekent dat klimaatbeleid gericht op het verminderen van de uitstoot een groot verschil kan maken voor het toekomstige klimaat van de BES-eilanden.

Neerslag en temperatuur op de BES-eilanden

De BES-eilanden worden warmer en droger



Figuur 28. Toekomstige verandering (t.o.v. 1991-2014) van de jaargemiddelde temperatuur en neerslag op Bonaire en Sint Eustatius en Saba, bij het lage (geel) en hoge (rood) uitstootscenario (mediaan en 90%-band).

Kerncijfers voor de BES-eilanden

Bonaire

Seizoen	Variabele	Indicator	Klimaat 1991-2020 = referentie-periode	**2050** (2036-2065)				**2100** (2086-2115)			
				Ld	**Ln**	**Hd**	**Hn**	**Ld**	**Ln**	**Hd**	**Hn**
Jaar	Zeespiegel	gemiddelde niveau	0 cm [1]	+23 (14 tot 34) cm	+23 (14 tot 34) cm	+25 (16 tot 37) cm	+25 (16 tot 37) cm	+48 (31 tot 78) cm	+48 (31 tot 78) cm	+81 (55 tot 127) cm	+81 (55 tot 127) cm
	Zeespiegel	tempo van de verandering	4 mm/jaar [1]	+2 (1 tot 6) mm/jaar	+2 (1 tot 6) mm/jaar	+4 (2 tot 8) mm/jaar	+4 (2 tot 8) mm/jaar	-1 (-1 tot 4) mm/jaar	-1 (-1 tot 4) mm/jaar	+11 (5 tot 24) mm/jaar	+11 (5 tot 24) mm/jaar
	Temperatuur	gemiddelde	28,5°C	+0,8°C	+0,8°C	+1,2°C	+1,3°C	+0,7°C	+0,7°C	+3,0°C	+3,3°C
	Neerslag	hoeveelheid	514 mm	-8%	0%	-15%	-2%	-7%	0%	-48%	-11%
	Wind	gemiddelde windsnelheid [2]	7,8 m/s	+2%	+1%	+3%	+1%	+2%	0%	+11%	+4%
Natte seizoen	Temperatuur	gemiddelde	28,9°C	+0,8°C	+0,8°C	+1,3°C	+1,3°C	+0,7°C	+0,7°C	+3,1°C	+3,4°C
	Neerslag	hoeveelheid	346 mm	-6%	2%	-13%	0%	-5%	+2%	-48%	-12%
	Wind	gemiddelde windsnelheid [2]	7,6 m/s	+3%	+1%	+5%	+1%	+2%	+1%	+14%	+5%
Droge seizoen	Temperatuur	gemiddelde	27,8°C	+0,8°C	+0,8°C	+1,2°C	+1,3°C	+0,7°C	+0,7°C	+2,9°C	+3,2°C
	Neerslag	hoeveelheid	169 mm	-12%	-3%	-20%	-5%	-11%	-3%	-48%	-7%
	Wind	gemiddelde windsnelheid [2]	8,0 m/s	+1%	0%	+2%	+1%	+1%	0%	+7%	+3%

Sint Eustatius en Saba

Seizoen	Variabele	Indicator	Klimaat 1991-2020 = referentie-periode	**2050** (2036-2065)				**2100** (2086-2115)			
				Ld	**Ln**	**Hd**	**Hn**	**Ld**	**Ln**	**Hd**	**Hn**
Jaar	Zeespiegel	gemiddelde niveau	0 cm [1]	+21 (13 tot 32) cm	+21 (13 tot 32) cm	+23 (14 tot 34) cm	+23 (14 tot 34) cm	+46 (29 tot 76) cm	+46 (29 tot 76) cm	+78 (50 tot 126) cm	+78 (50 tot 126) cm
	Zeespiegel	tempo van de verandering	3 mm/jaar [1]	+3 (1 tot 7) mm/jaar	+3 (1 tot 7) mm/jaar	+4 (2 tot 8) mm/jaar	+4 (2 tot 8) mm/jaar	0 (-1 tot 6) mm/jaar	0 (-1 tot 6) mm/jaar	+12 (6 tot 26) mm/jaar	+12 (6 tot 26) mm/jaar
	Temperatuur	gemiddelde	27,8°C	+0,8°C	+0,8°C	+1,2°C	+1,3°C	+0,7°C	+0,7°C	+3,0°C	+3,2°C
	Neerslag	hoeveelheid	1034 mm	-6%	+3%	-12%	+2%	-5%	+3%	-44%	-8%
	Wind	gemiddelde windsnelheid [2]	7,0 m/s	0%	0%	+1%	0%	0%	0%	+4%	+2%
Natte seizoen	Temperatuur	gemiddelde	28,5°C	+0,8°C	+0,8°C	+1,3°C	+1,3°C	+0,7°C	+0,7°C	+3,0°C	+3,3°C
	Neerslag	hoeveelheid	730 mm	-7%	+5%	-14%	+4%	-6%	+4%	-48%	-7%
	Wind	gemiddelde windsnelheid [2]	6,9 m/s	0%	+1%	+1%	+1%	0%	+1%	+4%	+2%
Droge seizoen	Temperatuur	gemiddelde	26,8°C	+0,8°C	+0,8°C	+1,2°C	+1,2°C	+0,7°C	+0,7°C	+3,0°C	+3,1°C
	Neerslag	hoeveelheid	304 mm	-3%	-3%	-8%	-5%	-3%	-3%	-34%	-9%
	Wind	gemiddelde windsnelheid [2]	7,1 m/s	0%	-1%	+1%	-1%	0%	-1%	+5%	+2%

Tabel 3. De getallen voor klimaatverandering voor de zeespiegel, temperatuur, neerslag, en wind op Bonaire (p. 37) en Sint Eustatius en Saba (p. 38). Natte seizoen: mei-november; droge seizoen: december-april.

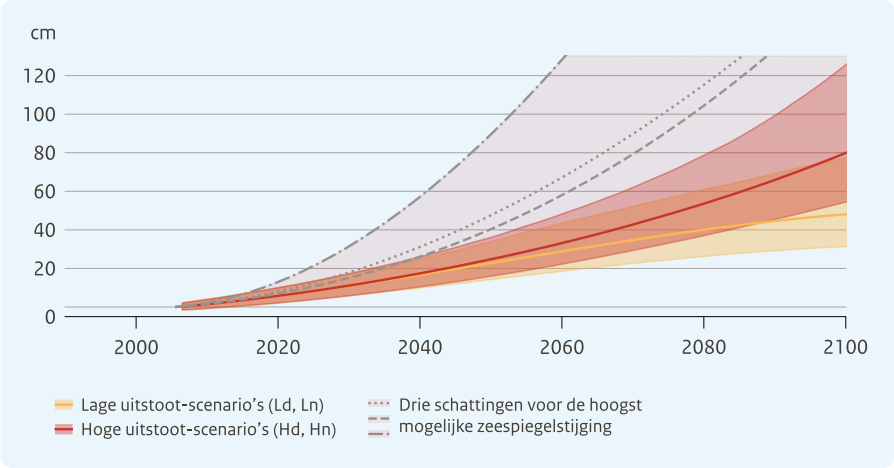
1 De referentieperiode voor zeespiegel is 1995-2014. Het gemiddelde zeespiegelniveau is in deze periode op 0 gezet.

2 Op het drukniveau van 925 hPa, ongeveer 800 m boven zeeniveau.

Zeespiegelstijging

Zeespiegelstijging vormt vooral een bedreiging voor het laaggelegen Bonaire. Op Bonaire stijgt de zeespiegel met 3,7 mm per jaar (ongeveer het wereld-gemiddelde), en bij Sint Eustatius en Saba met 3,0 mm per jaar. Naar verwachting is de zeespiegel bij Bonaire rond 2050 gestegen met 14-34 cm (lage uitstoot-scenario) of 16-37 cm (hoge uitstootscenario). Rond 2100 bedraagt de stijging 31-78 cm (lage uitstootscenario) tot 55-127 cm (hoge uitstootscenario) (figuur 29). De bovengrens kan oplopen tot 3,4 meter als onzekere processen, zoals het instabiel worden van de Antarctische ijskap, al vóór 2100 optreden. Voor Sint Eustatius en Saba wordt iets minder zeespiegelstijging verwacht dan voor Bonaire.

Zeespiegel bij Bonaire tot 2100



Figuur 29. Scenario's voor 2100 van het zeeniveau bij Bonaire t.o.v. het huidige niveau (mediaan en 90%-band), inclusief drie schattingen van de hoogst mogelijke zeespiegelstijging (stippellijnen in lichtroze band).

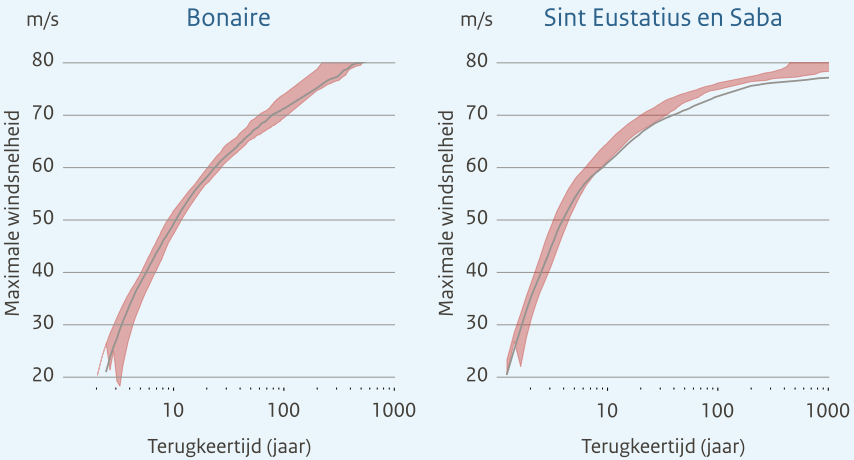
Orkaanfrequentie

Orkanen behoren tot de gevaarlijkste weerfenomenen in de regio. Tijdens een orkaan waait het extreem hard, valt er veel regen en kunnen hoge golven, stormvloeden en aardverschuivingen optreden. Voor de periode 2015-2050 berekenen we de herhalingstijd van verschillende windsnelheden nabij de BES-eilanden (figuur 30). Dit doen we met een statistisch model dat orkanen berekent, uitgaande van karakteristieken van toekomstige orkanen. De zo berekende herhalingstijden zijn voor Bonaire ongeveer twee keer zo lang als die voor Sint Eustatius en Saba. Dit komt doordat veel orkanen ten noorden van Bonaire langstrekken, terwijl Sint Eustatius en Saba vaker op de route van een orkaan liggen. De veranderingen van de herhalingstijden zijn de komende decennia klein. Alleen voor orkanen van de zwaarste categorie wordt verwacht dat die op Sint Eustatius en Saba vaker zullen voorkomen: eens in de 20 tot 34 jaar in de toekomst (2015-2050), tegenover eens in de 39 jaar nu (1980-2017).

> Op Sint Eustatius en Saba neemt de kans op zware orkanen met veel neerslag in de toekomst toe

Herhalingstijden van orkanen

In de toekomst vaker orkanen van de zwaarste categorie



Figuur 30. Herhalingstijden van windsnelheden binnen 250 km van de BES-eilanden, nu (1980-2017, grijs) en in de toekomst (2015-2050, rood) bij het hoge uitstootscenario.

Het weer van de toekomst

Orkanen als Irma (2017) in een warmer klimaat

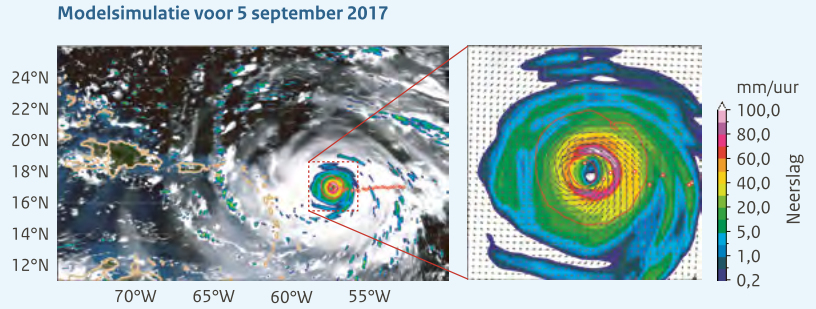
In september 2017 werden Sint Maarten en andere bovenwindse eilanden getroffen door orkaan Irma. Voor zover bekend was dit de eerste keer dat een orkaan van de hoogste categorie (windsnelheden ≥ 70 m/s) deze eilanden trof. In het toekomstige klimaat kunnen orkanen sterker worden doordat de temperatuur van het zeewater toeneemt.

Mondiale klimaatmodellen zijn doorgaans te grofmazig om individuele orkanen na te bootsen. Door de resultaten van een grofmazig mondiaal klimaatmodel te gebruiken als randvoorwaarde voor een fijnmazig regionaal klimaatmodel, lukte het toch om orkanen in het huidige en toekomstige klimaat in detail na te bootsen.

Ook historische orkanen zoals Irma kunnen met zo'n regionaal klimaat-model worden nagebootst, door als randvoorwaarde de waargenomen toestand van de atmosfeer en de oceaan te gebruiken. De op deze manier gesimuleerde orkaan Irma (figuur 31) heeft een duidelijk oog, met daarin vrijwel geen neerslag en weinig wind. Rondom het oog ligt, tussen de twee rode cirkels, een gebied met windsnelheden met orkaankracht en hoge neerslagintensiteit. De gesimuleerde windsnelheid en neerslagintensiteit komen goed overeen met waarnemingen.

Met hetzelfde regionale model zijn ook toekomstige veranderingen van windsnelheid en neerslag tijdens orkanen bestudeerd. Hieruit blijkt dat de zwaarste orkanen in de toekomst waarschijnlijk gepaard gaan met hogere maximale windsnelheden en hogere maximale neerslagintensiteiten (figuur 32). De impact van de zwaarste orkanen neemt daardoor toe, maar het is niet duidelijk of orkanen vaker zullen voorkomen.

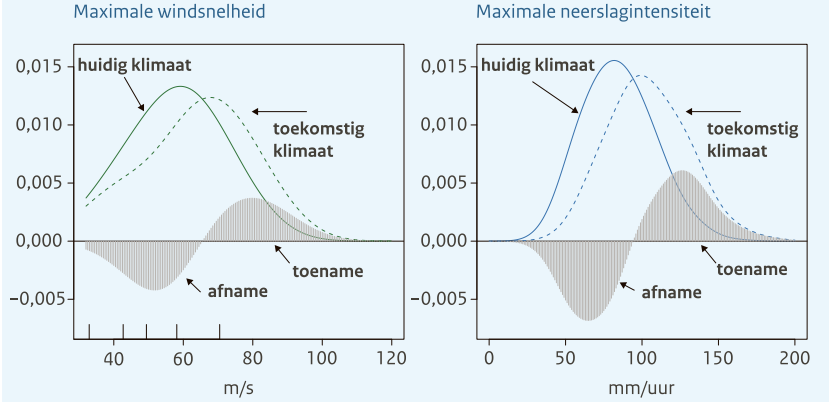
Orkaan Irma (2017)



Figuur 31. Orkaan Irma nadert het Caribisch gebied: overzicht en detailbeeld. Wit in het linker beeld toont de bewolking, andere kleuren de hoeveelheid neerslag per uur, pijlen de windsnelheid. De rode stippellijn toont de baan van de orkaan.

Windsnelheid en neerslag in orkanen

Meer wind en meer neerslag bij de zwaarste orkanen



Figuur 32. Kansverdeling van de maximale windsnelheid en de maximale neerslagintensiteit in orkanen, in het huidige klimaat (doorgetrokken lijn) en in een 3,4°C warmer klimaat (gestreepte lijn), en het verschil.



KNMI'23-klimaatscenario's in de praktijk
11 impact cases

De komende pagina's tonen 11 impact cases. Verschillende instituten hebben aan de hand van de KNMI'23-klimaatscenario's een aantal gevolgen van klimaatverandering in beeld gebracht. Meer informatie over het toepassen van de klimaatscenario's in de praktijk is beschikbaar op: www.knmi.nl/klimaatscenarios

Het Planbureau voor de Leefomgeving zal samen met diverse kennisinstellingen een nieuwe herijking van de klimaatrisico's voor Nederland publiceren. Tabel 4 geeft alvast de belangrijkste risico's voor Nederland op basis van de voorgaande herijking, maar in lijn met de KNMI'23-klimaatscenario's.

Risico's van klimaatverandering voor Nederland

Sectoren	Risico's
Kusteffecten	De zeespiegelstijging heeft consequenties voor het waterveiligheidsbeleid en voor het waterbeheer. Bij dat laatste gaat het bijvoorbeeld om een toenemende behoefte aan zandsuppletie, en om een toenemende watervraag om zoutindringing tegen te gaan. Door de zeespiegelstijging neemt de overstromingskans toe. En daarmee ook de risico's voor mens, omgeving en economie.
Rivieren en wateroverlast	Door toename van de neerslag in de winter stijgen rivierafvoeren en neemt de kans op overstroming van de Rijn, de Maas en kleinere rivieren toe. Omdat het vaker en heviger regent, neemt de kans op wateroverlast toe.
Watervoorraad	Droogte zal vaker leiden tot watertekort. Bij een watertekort moet worden bekeken hoe het schaarse water wordt verdeeld over de functies drinkwater, natuurbeheer, landbouw en scheepvaart.
Waterkwaliteit	Doordat de temperatuur van het oppervlaktewater stijgt, verandert ook de ecologie van het water. Oppervlaktewater is dan minder geschikt voor drinkwaterproductie. Er ontstaat vaker blauwalg in plassen en meren, waardoor deze niet geschikt zijn om in te zwemmen.
Gezondheid	Doordat de temperatuur stijgt, vermindert de sterfte in de winter, maar in de zomer nemen de overlast en sterfte als gevolg van hitte en smog toe. De blootstelling aan uv-straling neemt toe, waardoor de kans op huidkanker stijgt. Ook neemt het aantal 'allergiedagen' toe door verlenging van het pollenseizoen. Voor infectieziekten worden de grootste veranderingen verwacht bij ziekten die worden overgedragen door vectoren, zoals teken en muggen.
Mobiliteit	Door een toename van extreme neerslag neemt de verkeershinder in de zomer toe; door afnemende vorst is er minder kans op gladde wegen en vorstschade, maar er is wel een grotere kans op spoorvorming tijdens hittegolven. Door hogere ('s winters) en lagere ('s zomers) afvoeren van de grote rivieren wordt de scheepvaart beperkt.
Energie	De behoefte aan energie voor verwarmen neemt af, maar er wordt waarschijnlijk meer energie gebruikt voor koeling; omdat rivierwater warmer wordt, neemt de beschikbaarheid van koelwater voor elektriciteitsproductie af.
Landbouw	Landbouwopbrengsten kunnen door een toename van extreem weer bedreigd worden; vooral droge jaren kunnen voor lagere gewasopbrengsten zorgen. Verzilting heeft in laag-Nederland gevolgen voor gevoelige teelten zoals bollen en bomen.
Natuur	De risico's zijn het grootst voor ecosystemen die afhankelijk zijn van neerslag, zoals heidevelden, graslanden en hoogveen. Toename van warmteminnende en afname van koudeminnende plant- en diersoorten. Hierdoor is er kans op een mismatch in voedselketen. Door klimaatverandering neemt de kans op natuurbranden toe.
Recreatie	Het aantal recreatiedagen neemt toe door hogere temperaturen. Het aantal schaatsdagen neemt af en de kans op extreem weer bij grote evenementen neemt toe.

Tabel 4. Risico's van klimaatverandering voor Nederland deze eeuw. Met dank aan het Planbureau voor de Leefomgeving, op basis van: ref. 6 en 7, nas-adaptatietool.nl.

Veranderingen in temperatuurgerelateerde sterfte

Lisbeth Hall, Danny Houthuijs, Maciek Strak (RIVM)



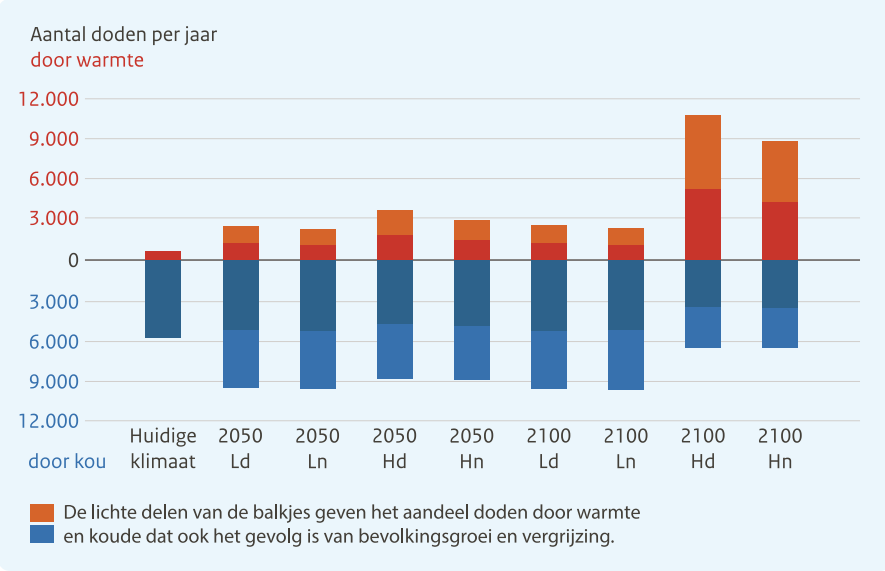
Aanhoudend warm weer en hittegolven leiden tot een toename van gezondheidsklachten, slaapproblemen en vroegtijdige sterfte, vooral onder ouderen en chronisch zieken. Het risico op sterfte is het hoogst bij extreme hitte en extreme koude, maar loopt al op bij kleine afwijkingen van de 'optimale' temperatuur. In Nederland treedt de minste sterfte op bij een gemiddelde dagelijkse temperatuur rond de 17°C.

Door klimaatverandering neemt in de toekomst het aantal sterfgevallen gerelateerd aan warmte toe en gerelateerd aan koude af (figuur 33). De bevolkingsomvang neemt in de toekomst toe. Omdat ook het aandeel ouderen stijgt, groeit de groep mensen die kwetsbaar is voor extreme temperaturen. In het huidige klimaat hebben we meer sterfgevallen gerelateerd aan koude (5800 gevallen per jaar) dan aan warmte (660 gevallen per jaar). Rond 2100 is dit mogelijk omgedraaid: in het hoge uitstootscenario (Hd) zijn er meer doden gerelateerd aan warmte (11.000 gevallen per jaar) dan aan koude (6600 gevallen per jaar). Bij een hoge uitstoot van broeikasgassen (Hd) overlijden rond 2100 ruim 8000 mensen meer vroegtijdig aan warmte dan bij een lage uitstoot (Ld). Ongeveer de helft van de toekomstige temperatuurgerelateerde sterfte is mede het gevolg van de bevolkingsgroei en de vergrijzing.

In de berekeningen is geen rekening gehouden met gewenning aan hitte of met adaptatiemaatregelen zoals meer bomen en meer zonwering.

Sterfte gerelateerd aan temperatuur

Meer warmte-gerelateerde sterfte en minder koude-gerelateerde sterfte



Figuur 33. Gemiddeld aantal sterfgevallen in Nederland per jaar gerelateerd aan warmte en aan koude in het huidige klimaat (1991-2020), en voor het klimaat rond 2050 en 2100 voor de KNMI'23-klimaatscenario's.

Hittestress in Amsterdam

Nabil Tanouti, Pam Geven (gemeente Amsterdam)

Osdorp Noord, vergroend



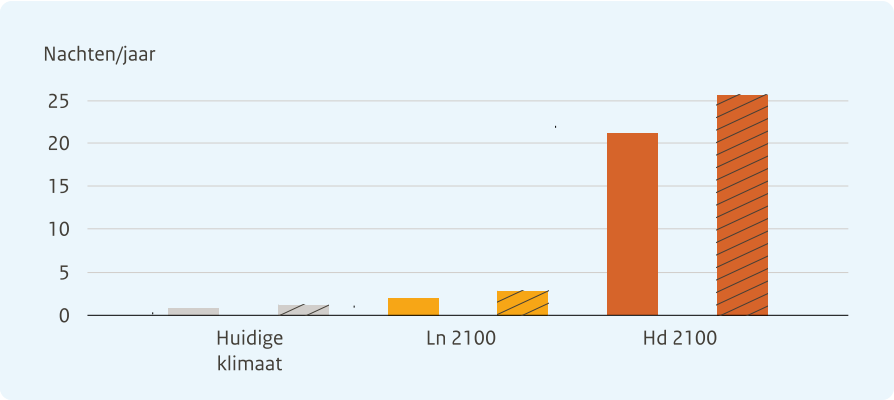
Hittestress in de stad kan ongezonde situaties en zelfs extra sterfte opleveren, met name voor kwetsbare groepen als ouderen en jonge kinderen. Niet alleen het veranderende klimaat, maar ook de inrichting van de openbare ruimte, de mate van kwetsbaarheid en het aanpassingsvermogen van bewoners in de stad bepalen in hoeverre hoge temperaturen tot gezondheidsrisico's leiden.

De Amsterdamse buurt Osdorp Noord heeft een relatief hoog risico op hittestress, doordat de wijk veel (semi-)hoogbouw en wegen heeft. De bewoners zijn vaak geen eigenaar van hun woning en dus niet direct verantwoordelijk om maatregelen te nemen aan het pand.

De KNMI'23-klimaatscenario's laten zien dat het aantal tropische nachten per jaar in Osdorp Noord rond 2100 toeneemt van 1 (nu), naar 2 in het lage uitstootscenario (Ln) tot 26 (in het hoge uitstootscenario (Hd) (figuur 34). Door het hitte-eilandeffect zijn er meer tropische nachten in de stad dan in de buitengebieden. Om de hitte in Amsterdam tegen te gaan, plant de gemeente meer groen aan, onder andere op daken, gevels, looproutes en pleintjes. Deze aanplant zorgt voor natuurlijke koeling. Verder is samenwerking belangrijk, bijvoorbeeld met woningcorporaties, scholen en kinderdagverblijven om zo huizen en scholen leefbaar en gezond te houden bij hitte.

Tropische nachten in Amsterdam en daarbuiten

Veel meer tropische nachten in het hoge klimaatscenario



Figuur 34. Het aantal tropische nachten rond 2100 in de zomer (minimumtemperatuur minstens 20°C) in Osdorp Noord (gearceerd) en buiten Amsterdam (niet gearceerd), berekend met de Ln- en Hd-klimaatscenario's. Het stadseffect (ref. 8) is meegenomen.

Natuurbrandgevaar neemt ook in Nederland toe

Cathelijne Stoof, Hugo Lambrechts (Wageningen University & Research)[1]

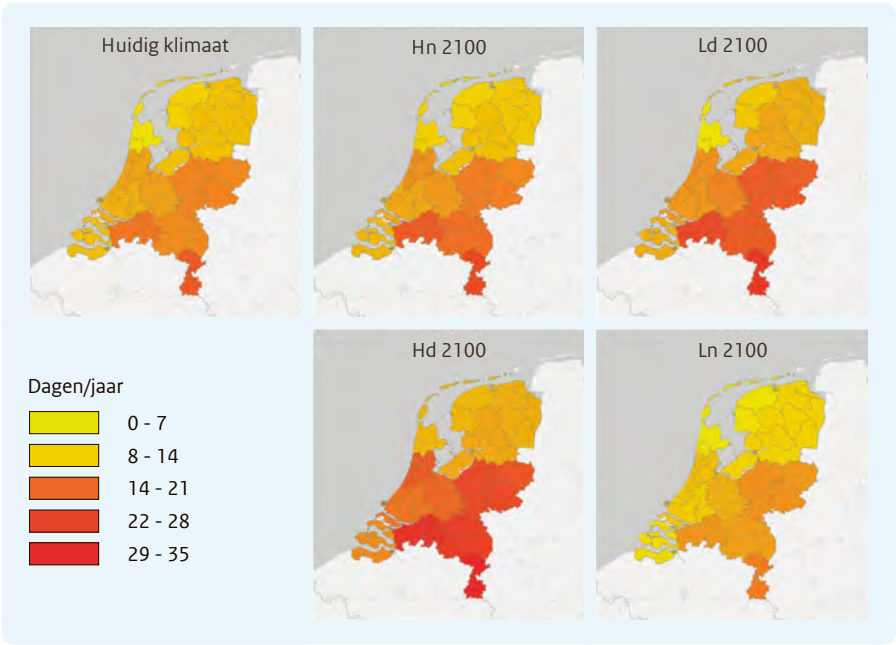
Hoewel je bij natuurbranden eerder aan Zuid-Europa denkt dan aan Nederland, vinden er in ons land nu al zo'n 550 branden per jaar plaats, waarbij in totaal zo'n 440 hectare verbrandt (ref. 9). Al zijn deze branden meestal klein, ze leiden toch tot grote uitdagingen. Natuurbranden komen vaak tegelijkertijd voor, ze zijn niet te bestrijden met technieken voor gebouwbranden en het bewustzijn van dit risico is in Nederland laag. Bovendien bestaat er voor de preventie en bestrijding van natuurbranden in ons land geen beleid. Natuurbrandrisico's worden niet alleen beïnvloed door het weer (bijvoorbeeld droogte en wind), maar ook door de plantengroei en het landschapsbeheer. De impact op de omgeving varieert (figuur 35).



Figuur 35. Factoren die het natuurbrandrisico beïnvloeden.

Figuur 36 laat zien hoe het aantal dagen met gunstige meteorologische condities voor het ontstaan van branden (natuurbrandgevaar) in de toekomst kan veranderen. Of en hoeveel het aantal dagen met natuurbrandgevaar daalt of stijgt, verschilt per klimaatscenario: in het Ln-scenario neemt het aantal dagen tot 2100 met 25% af; in het Hd-scenario neemt het met 300% toe. Zuid(oost)-Nederland heeft zowel nu als in alle klimaatscenario's de meeste dagen met natuurbrandgevaar. Naar verwachting wordt het natuurbrandseizoen langer, duren de branden langer en zijn ze intenser.

Aantal dagen met natuurbrandgevaar per jaar
Sterkste toename in het hoge uitstootscenario, droge variant



Figuur 36. Aantal dagen per jaar met natuurbrandgevaar (meteorologisch gunstige omstandigheden voor branden) nu en rond 2100, volgens de vier KNMI'23-klimaatscenario's, berekend door Wageningen University (ref. 10).

1 Dit onderzoek is gefinancierd door: European Union Horizon 2020 research and innovation programme (grant agreement 860787 en 101037419).

Invloed van meer zonnestraling op de elektriciteitsproductie

Martien Visser (Energieopwek.nl)

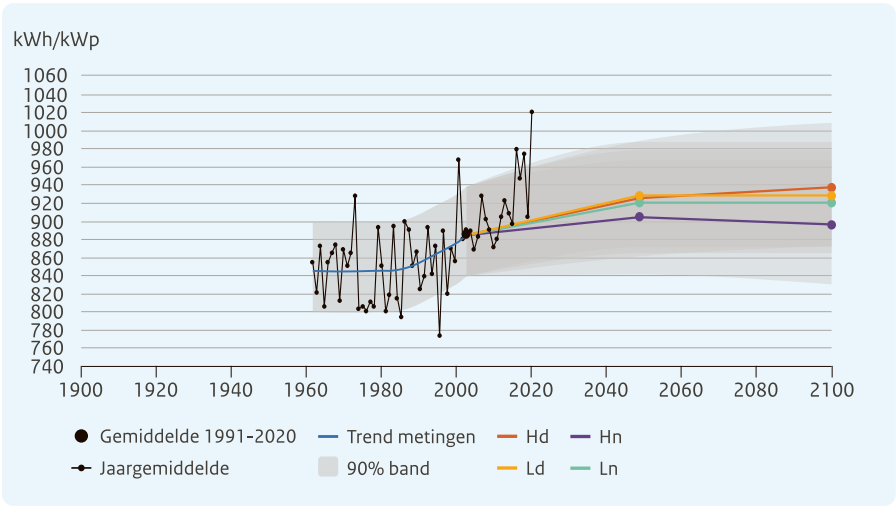


Het aantal zonnepanelen in Nederland groeit. 15% van alle in Nederland verbruikte elektriciteit was in 2022 afkomstig van zonnepanelen (bron: CBS). Deze groei is hard nodig, omdat het elektriciteitsverbruik gaat stijgen, onder andere voor elektrisch rijden en elektrisch verwarmen, en Nederland af wil van het gebruik van fossiele energiebronnen voor elektriciteitsproductie. Omdat zonnepanelen meer elektriciteit produceren naarmate er meer zonnestraling is, is een toename van de hoeveelheid zon gunstig voor de productie van duurzame elektriciteit.

Zonnepanelen hebben op dit moment per stuk een vermogen van ongeveer 0,4 kWp. Bedraagt de zonne-energieopbrengst in een jaar 880 kWh/kWp, zoals gemiddeld in de afgelopen 30 jaar (figuur 37) het geval was, dan produceert één paneel 352 kWh (= 0,4 x 880) per jaar. Met acht panelen produceer je evenveel elektriciteit als een gemiddeld Nederlands huishouden jaarlijks verbruikt. De zonnestraling is in de afgelopen 30 jaar geleidelijk toegenomen en de laatste jaren waren meer dan gemiddeld zonnig. Dit leverde recordopbrengsten op, zoals in 2022, toen zo'n paneel 408 kWh (= 0,4 x 1020) opleverde. Volgens de KNMI'23-klimaatscenario's blijft de hoeveelheid zonnestraling hoog in vergelijking met eind vorige eeuw. En dat geldt dus ook voor de opbrengst van zonnepanelen. Records zoals in 2022 blijven ook in de toekomst uitzonderlijk.

Zonne-energie

Opbrengst blijft vergelijkbaar met die rond 2000



Figuur 37. Jaarlijkse energieopbrengst in Nederland van een standaardeenheid van zonnepanelen sinds 1965 tot 2022 en voor het toekomstige klimaat volgens de vier KNMI'23-klimaatscenario's.

Invloed van extreem weer op gewasopbrengst

Puck Mulders (TU Eindhoven), Pytrik Reidsma (Wageningen University & Research)

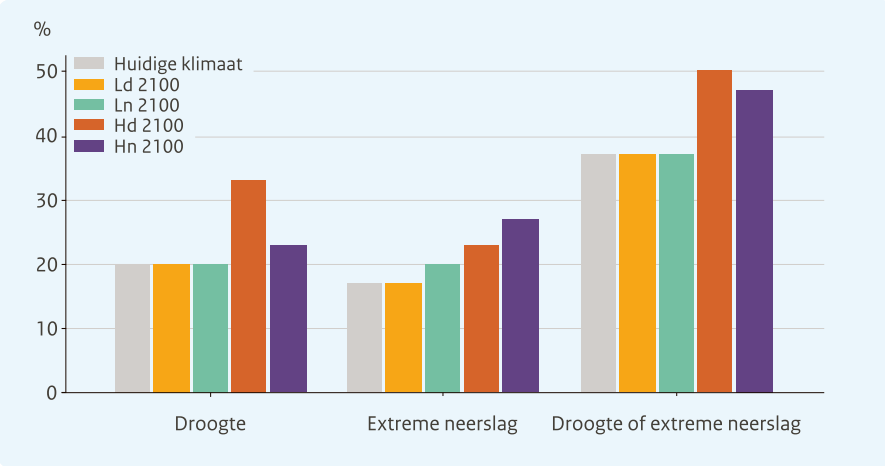


Extreem weer leidt tot grote verliezen in aardappelopbrengst. Uit gedetailleerde bedrijfsdata op zandgronden blijkt dat bij extreme neerslag (meer dan 45 mm op een dag of meer dan 60 mm in drie dagen, gecombineerd met gedurende drie weken neerslag op meer dan 75% van de dagen (ref. 11)) de opbrengst met 36% vermindert, doordat de aardappels gaan rotten. Bij droogte (minder dan 10 mm neerslag in 30 dagen) is het opbrengstverlies 13%. In de periode 1991-2020 was er in 37% van de jaren dergelijk extreem weer, met extreme neerslag in 17% en droogte in 20% van de jaren (figuur 38).

In de toekomst nemen de percentages toe. In 2100 blijft het aantal weersextremen onder de L-scenario's ongeveer hetzelfde, maar bij de H-scenario's is in ongeveer de helft van de jaren sprake van extreem weer, met extreme neerslag in 23-27% en droogte in 23-33% van de jaren. Ook zijn er vaker jaren met beide extremen. Om opbrengstverliezen te verminderen zijn adaptatiestrategieën noodzakelijk, zoals de ontwikkeling van rassen die beter bestand zijn tegen droogte en extreme regenval. Daarnaast zijn aangepaste gewasrotaties en selectieve toediening van organische stof nodig, om de infiltratie en het vasthouden van bodemwater te verbeteren.

Extreem weer nu en rond 2100

Vaker extreem weer in de hoge uitstootscenario's



Figuur 38. Percentage jaren met extreem weer in het huidige klimaat en volgens de vier KNMI'23-klimaatscenario's rond 2100.

Meer stranddagen, meer strandvakanties in eigen land?

Bas Amelung (Wageningen University & Research),
Valentina Zelada (University of Chile)

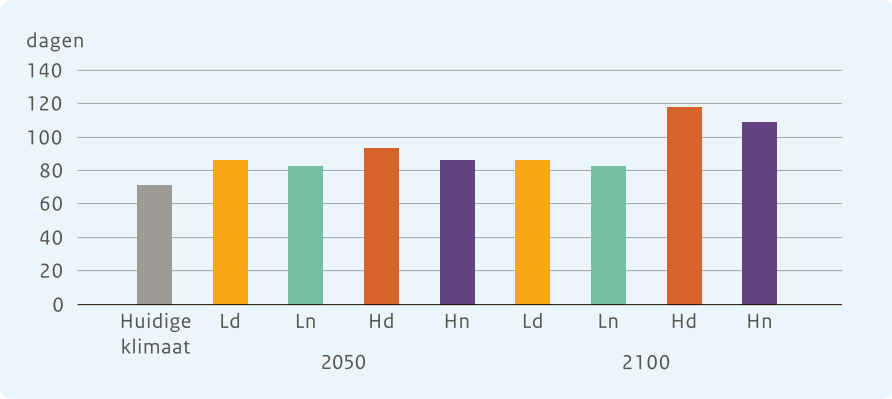


In de afgelopen 30 jaar had Vlissingen jaarlijks ongeveer 71 dagen met goed strandweer (figuur 39). In deze periode groeide het aantal goede stranddagen van 60 naar ruim 80 per jaar. Deze toename zet in alle klimaatscenario's door, maar de mate waarin, verschilt. In de lage uitstootscenario's stijgt het aantal goede stranddagen tot 2050 met zo'n 15 dagen per jaar, waarna het stabiliseert. In de hoge uitstootscenario's neemt het aantal goede stranddagen toe tot bijna 120 in 2100. De temperatuurstijging speelt daarbij de belangrijkste rol, gevolgd door de toename van de hoeveelheid zonnestraling.

Meer goede stranddagen kunnen ertoe leiden dat meer mensen kiezen voor een (strand)vakantie in eigen land. Dat is gunstig voor horecaondernemingen aan het strand. Klimaatverandering heeft ook negatieve gevolgen voor strandtoerisme, bijvoorbeeld smallere stranden door zeespiegelstijging. En voor alle toerisme geldt dat warmer weer een hoger risico geeft op watertekorten, en op huidkanker doordat de bescherming door wolken afneemt en mensen vaker zomers gekleed naar buiten gaan.

Strandweer

Meer dagen met goed strandweer



Figuur 39. Aantal dagen per jaar met goede weersomstandigheden voor strandtoerisme in Vlissingen in het huidige en toekomstige klimaat volgens de vier KNMI'23-klimaatscenario's (HCI-B score minstens 80; ref. 12).

Zoetwatervoorziening vanuit het blauwe hart van Nederland

Herbert Bos (namens platform IJsselmeergebied)



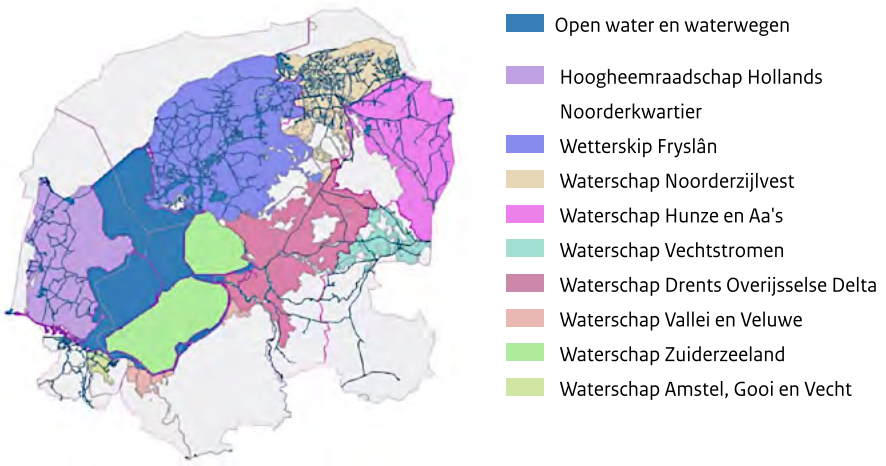
Rijkswaterstaat en bouwconsortium Levvel – Topview Luchtfotografie

Het IJsselmeergebied ('het blauwe hart van Nederland') is van cruciaal maatschappelijk belang voor de noordelijke helft van ons land. Het heeft drie hoofdfuncties: hoogwaterberging voor waterveiligheid, waterbuffer voor zoetwatervoorziening tijdens droogte en ecologisch systeem als basis voor biodiversiteit. Het gebied is ook van grote waarde voor bijvoorbeeld scheepvaart, drinkwater, recreatie, landbouw, visserij, cultuurhistorie, zandwinning en energie. Deze functies en waarden staan soms op gespannen voet met elkaar.

De KNMI'23-klimaatscenario's laten zien dat de drie hoofdfuncties van het IJsselmeergebied onder druk staan. Eerder onderzoek liet bijvoorbeeld zien dat de huidige zoetwaterbuffer, het IJsselmeer, rond 2050 eens per 5 jaar ontoereikend zal zijn bij het meest extreme klimaatscenario (ref. 13). Volgens de nieuwste klimaatscenario's is dat waarschijnlijk vaker.

In alle scenario's neemt het neerslagtekort in de lente en zomer toe. Dit betekent minder wateraanvoer naar het blauwe hart en tegelijk een grotere ecologische en economische watervraag vanuit het IJsselmeergebied. Door klimaatverandering ontstaat er – sneller dan tot nu toe werd gedacht – een zoetwatertekort voor natuur, landbouw, industrie en overige watervragers in het voorzieningengebied (figuur 40). Om de functie van zoetwaterbuffer toekomstbestendig te maken, moeten in het IJsselmeergebied verschillende maatregelen genomen worden: vergroting van de aanvoer, vermindering van de vraag en optimalisering van de buffer.

Wateraanvoer vanuit het IJsselmeer

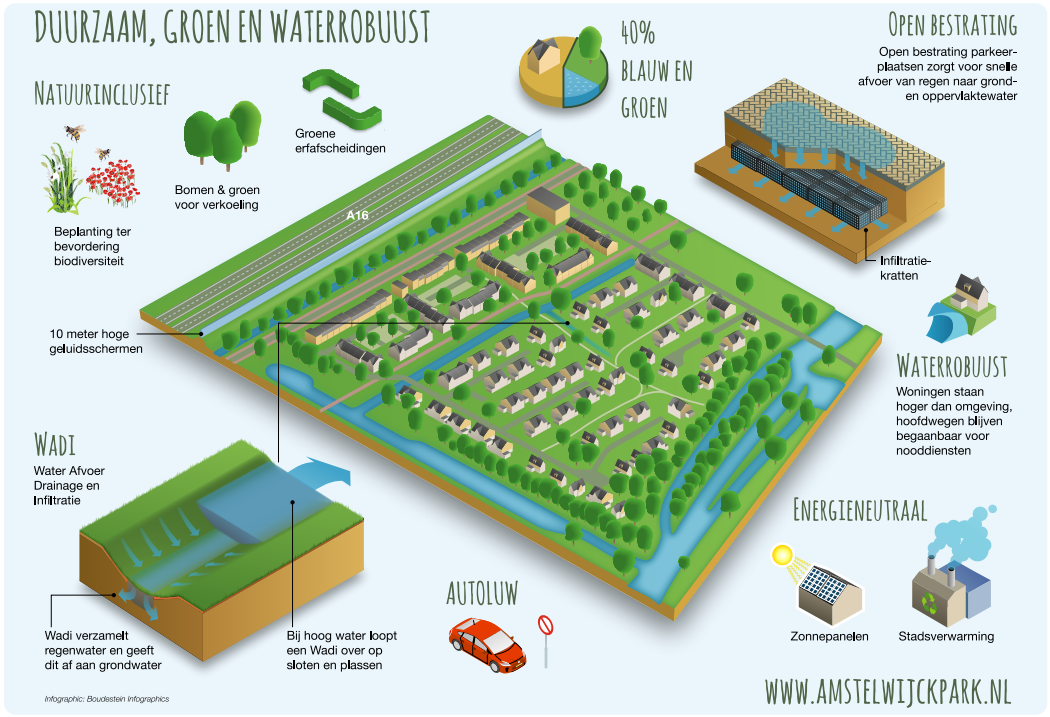


Figuur 40. Voorzieningengebied IJsselmeer; voeding van zoet water uit het IJsselmeergebied naar de negen omliggende waterschappen. Bron: Bestuursovereenkomst waterverdeling regio IJsselmeergebied.

Klimaatbestendig bouwen

Dana Huibers (gemeente Dordrecht)

Klimaatadaptatie in Dordrecht





Figuur 41. Klimaatadaptief ontwikkelplan voor de wijk Amstelwijck in Dordrecht.

Dordrecht krijgt er 11.000 nieuwe woningen bij en wil tegelijkertijd een groene en gezonde stad zijn. In de wijk Amstelwijck gaat de bouw van circa 800 woningen bijvoorbeeld gepaard met aandacht voor natuur en klimaat (figuur 41). 40% van de ruimte wordt ingericht met groen en water. De betrokken bouwbedrijven, projectontwikkelaars, overheden en financiers ondertekenden het Convenant Klimaatadaptief Bouwen van Zuid-Holland. Door te ontwikkelen en te bouwen volgens de hierin vastgelegde eisen hebben hevige regenval en hitte hier straks minder impact dan in reguliere woonwijken. Ook bewoners spelen een actieve en belangrijke rol: ze zijn verplicht hun voortuin gedeeltelijk groen te houden en krijgen tips om de tuin natuurvriendelijk op te zetten. Zo werken alle betrokkenen samen aan een toekomstbestendige groenblauwe wijk.

Ook aan de slag met klimaatadaptief bouwen?

Sinds maart 2023 kunnen bouwpartijen gebruik maken van de landelijke Maatlat groene klimaatadaptieve gebouwde omgeving, zie www.klimaatadaptatienederland.nl.

Minder kans op schade aan bloesem door afname late voorjaarsvorst

Lucas Hulsman, Oscar Hartogensis (Wageningen University & Research)



In een opwarmend klimaat stijgt ook de lentetemperatuur en komt vegetatie eerder in bloei. Bloesem is echter kwetsbaar voor vorst en die kan in de lente nog optreden, zelfs nog best laat. Het is onzeker of de laatste vorst even snel vervroegt als de bloei.

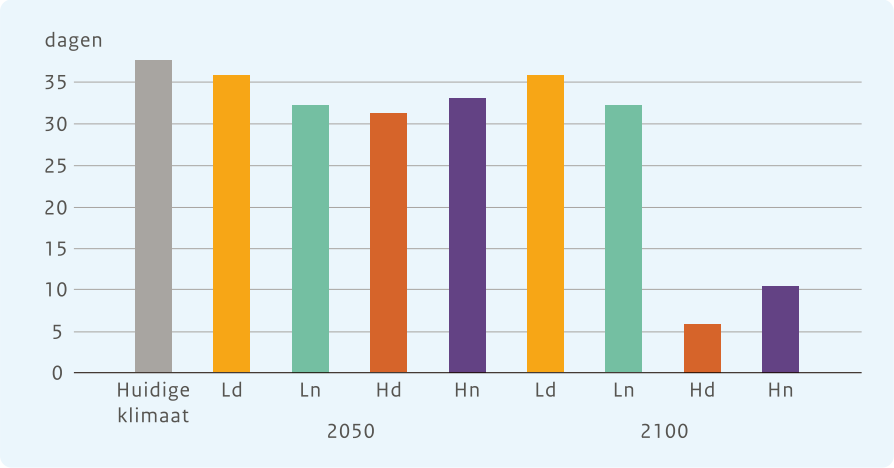
Bloeit vegetatie vóór de laatste voorjaarsvorst, dan spreken we van een zogeheten ‘valse lente’. Metingen laten inderdaad zien dat kersenbomen vroeger bloeien dan voorheen. En ook al vervroegt ook de laatste voorjaarsvorst, toch is het aantal valse lentes sinds 1980 iets toegenomen.

Volgens de KNMI’23-klimaatscenario’s neemt in Nederland zowel het aantal als de duur van valse lentes in de toekomst af. Dit komt doordat ook de vorstkans later in het voorjaar sterk afneemt als gevolg van hogere temperaturen in Noordoost-Europa, waar de kou bij ons in die periode vandaan komt. De gemiddelde duur van een valse lente in Wageningen is nu 38 dagen per jaar (figuur 42). Vooral de hoge uitstootscenario’s laten voor de toekomst een flinke afname zien naar 6-10 dagen rond 2100.

Binnen Europa verschilt de gemiddelde duur van de valse lente. In Zuid-Scandinavië en de Baltische staten neemt deze bijvoorbeeld sterk toe, omdat daar de laatste nachtvorst minder snel vervroegt.

Duur van de valse lente

Grootste afname in de hoge uitstootscenario’s



Figuur 42. Gemiddeld aantal dagen per jaar tussen de eerste kersenbloesem en laatste nachtvorst in Wageningen in het huidige en toekomstige klimaat en volgens de vier KNMI’23-klimaatscenario’s (ref. 14).

Agrariërs anticiperen met water- en bodembeheer op droogte en extreme neerslag

Marco Arts en Bas Worm (Waterschap Vechtstromen)

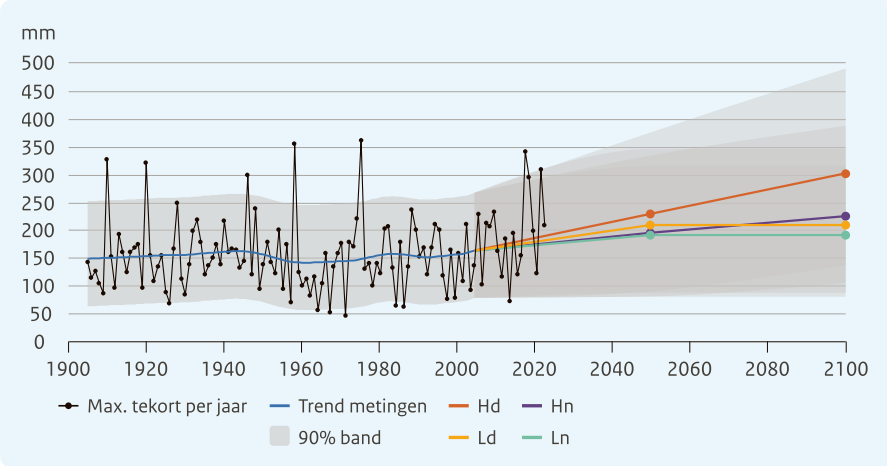


In het noordoostelijkste puntje van Twente ligt buurschap Breklenkamp. Dit agrarische zandlandschap met ingesleten beekdalen heeft de afgelopen droge jaren veel te lijden gehad. De beken en vennen stonden lang droog, er was geen beregening mogelijk en kolossale bomen stierven af. Ook hevige neerslag zorgde voor problemen. Meerdere keren per jaar lopen de laaggelegen percelen onder water. Waterschap Vechtstromen overlegt nauw met de inwoners in het beheergebied om zo veel mogelijk water vast te houden. Agrariërs en burgers zijn zich ervan bewust dat droogte nu én in de toekomst een probleem is. Ze leren wat ze, in samenwerking met het waterschap, zelf kunnen bijdragen aan het klimaatrobuuster maken van het gebied. Er zijn al verschillende maatregelen genomen, zoals het plaatsen van stuwen en aangepast peilbeheer (gericht op vasthouden van water), het verbeteren van het waterbergend vermogen van de bodem (duurzaam bodembeheer) en het aanpassen van de teelt met kruidenrijk, diepwortelend grasland. Ook meet het waterschap continu waterstanden en bodemvochtgehaltes, ter ondersteuning van het aangepast waterbeheer.

Volgens de nieuwe klimaatscenario's neemt zowel de kans op droogte (figuur 43) als de kans op extreme neerslag toe. En daarmee ook de noodzaak van beheermaatregelen en samenwerking met betrokkenen.

Maximaal neerslagtekort april-september

Toenemende droogte



Figuur 43. Maximaal neerslagtekort in Twente: waarnemingen (zwart) en de vier KNMI'23-klimaatscenario's (2050 en 2100, in vier kleuren).

Oosterscheldekering moet vaker dicht

Robert Vos, Wilbert Huibregtse (Rijkswaterstaat)



Bij een stijgende zeespiegel zal de Oosterscheldekering vaker moeten sluiten. Sinds de afronding van de bouw van de Oosterscheldekering 35 jaar geleden zijn er zo'n dertig sluitingen geweest, wat neerkomt op ongeveer één sluiting per jaar. Zoals de KNMI'23-klimaatscenario's laten zien, stijgt de zeespiegel de komende decennia nog verder door. Als gevolg hiervan neemt het aantal sluitingen per jaar aan het eind van deze eeuw toe naar drie in het lage uitstootscenario tot twintig in het hoge uitstootscenario (figuur 44).

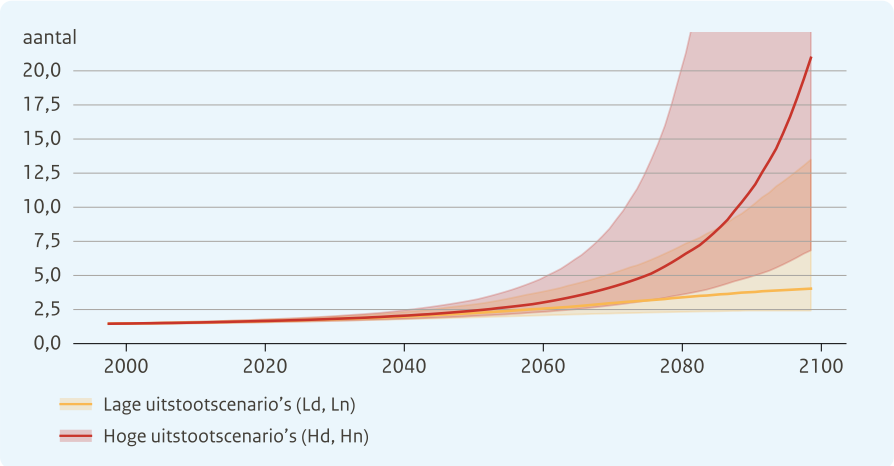
Meer sluitingen leiden tot hogere (golf)belastingen op de Oosterscheldekering. Hierdoor slijten sommige onderdelen sneller en moeten ze eerder worden vervangen. Onderhoudswerkzaamheden nemen dus toe in aantal en omvang, terwijl er minder mogelijkheid is voor het uitvoeren van werkzaamheden. Onderhoud is namelijk niet mogelijk bij hoge waterstanden en golfhoogtes.

Door de zeespiegelstijging wordt het onderhoudsseizoen, dat nu van april tot oktober loopt, korter. Om onderhoud te kunnen uitvoeren zodra het weer dit toelaat, wordt er gewerkt aan nauwkeuriger voorspellingsmodellen voor weer, waterstanden en golven. De kans wordt echter steeds groter dat onderhoudswerkzaamheden afgebroken moeten worden vanwege hoge waterstanden en golfhoogtes. Als gevolg daarvan is de stormvloedkering dan tijdelijk niet operationeel en moet (deels) gesloten blijven.

Meer sluitingen zijn niet alleen problematisch voor het onderhoud, maar ook schadelijk voor het kwetsbare ecosysteem van de Oosterschelde.

Sluitingen van de Oosterscheldekering

Aantal sluitingen per jaar neemt deze eeuw toe



Figuur 44. Aantal sluitingen van de Oosterscheldekering, gebaseerd op berekeningen van het zeeniveau in twee KNMI'23-klimaatscenario's en de aanname dat het sluitpeil van de kering, drie meter boven NAP, gelijk blijft.


Marc Scholts

KNMI’23 en KNMI’14 vergeleken

De wetenschappelijke inzichten in het IPCC-rapport uit 2021 (ref. 1), waarop de KNMI'23-klimaatscenario's zijn gebaseerd, bouwen voort op die in het vorige IPCC-rapport, dat de basis vormde voor de KNMI'14-klimaatscenario's (ref. 3). De KNMI'23-klimaatscenario's zijn gebaseerd op de meest actuele en fijnmazige klimaatmodellen en gegevens. De belangrijkste veranderingen in de KNMI'23-scenario's ten opzichte van de scenario's uit 2014:

- De scenario's zijn direct gekoppeld aan de uitstootscenario's en daarmee aan klimaatbeleid.
- De scenario's kijken verder vooruit: tot 2150. Voor zeespiegel tot 2300.
- De veranderingen zijn gegeven ten opzichte van het meest recente referentieniveau voor het klimaat in Nederland: 1991-2020.
- De scenario's geven een sterkere toename van droogte aan.
- Voor de zeespiegelstijging zijn de inzichten over de bijdrage van Antarctica verbeterd; we geven ook schattingen voor het hoogst mogelijke zeespiegelniveau in de toekomst.
- De toename van extreme zomerbuien is beter onderbouwd. De toename van de meest extreme buien blijft onveranderd hoog, de toename van minder extreme buien, die een paar keer per jaar voorkomen, is minder hoog dan in de KNMI'14-scenario's.
- De scenario's geven aanvullende informatie over hoge temperaturen.
- De scenario's beschrijven ook de toekomstige klimaatverandering op de BES-eilanden.

Zie tabel 5 voor een schematisch overzicht van verschillen tussen de twee sets klimaatscenario's.

Mede vanwege de droogteproblematiek van de afgelopen jaren gaven gebruikers van de klimaatscenario's aan dat de omgang met waterschaarste een van de belangrijkste uitdagingen is voor de toekomst. Daarom is er bij de KNMI'23-klimaatscenario's voor gekozen om de scenario's niet alleen onder te verdelen naar hoge uitstoot (H) en lage uitstoot (L), maar om ook twee varianten (d en n) door te rekenen waarin de mate van verdroging in de zomer en van neerslagtoename in de winter verschilt.

In de KNMI'14-klimaatscenario's hanteerden we twee andere varianten (gebaseerd op veranderingen van luchtstromingspatronen), maar die waren niet direct gekoppeld aan droogte en hadden geen samenhang tussen de seizoenen, zoals nu. In de KNMI'14-klimaatscenario's neemt de jaarneerslag daardoor in alle scenario's toe; in de KNMI'23-klimaatscenario's zijn er scenario's met een afname en scenario's met een toename van de jaarneerslag. Door de keuze voor droge en natte varianten heeft de temperatuurverandering in de lage en hoge uitstootscenario's een kleinere bandbreedte dan in 2014.

Verschillen tussen de KNMI'14- en de KNMI'23-klimaatscenario's

Thema	KNMI'14	KNMI'23
Uitstoot van broeikasgassen (sociaal-economische scenario's)	Gebaseerd op matige en hoge uitstoot: RCP4.5 en RCP8.5	Directe koppeling met lage en hoge uitstoot: SSP1-2.6 (behorend bij het Klimaatakkoord van Parijs) en SSP5-8.5
Jaargemiddelde temperatuur	Bandbreedte groter rond 2050	Door meenemen van het Parijs-akkoord in 2100 minder opwarming in lage uitstootscenario
Jaarneerslag	Toename in alle scenario's	Toename of afname
Extreme neerslag per uur/dag	Eerste schattingen op basis van waarnemingen en klimaatmodellen	Beter onderbouwd met klimaatmodellen met hoge resolutie
Zeespiegel	Geen rekening gehouden met mogelijk extreme zeespiegelstijging	Extra schattingen voor de hoogst mogelijke zeespiegelstijging (lage waarschijnlijkheid, hoge impact)
BES-eilanden	-	Voor het eerst gemaakt
Referentieperiode	1981-2010	1991-2020
Tijdshorizonten	2030 - 2050 - 2085	2033 (1,5°C) - 2050 - 2100 - 2150 2300 (voor zeespiegel)
Basisinformatie voor impactstudies	Alleen getransformeerde tijdreeksen	Getransformeerde en bias gecorrigeerde tijdreeksen

Tabel 5. Schematisch overzicht van de verschillen tussen de KNMI'14- en de KNMI'23-klimaatscenario's

Zie www.knmi.nl/klimaatscenarios voor een tabel waarin de verschillen zijn doorgerekend.



Achtergrond-informatie

Definitie klimaatscenario

Een klimaatscenario is een aannemelijk en samenhangend beeld van het toekomstige klimaat, opgesteld om de mogelijke gevolgen van door de mens veroorzaakte klimaatverandering te onderzoeken (IPCC). Zo'n scenario is geen voorspelling van het toekomstige klimaat en er kan evenmin een waarschijnlijkheid aan worden toegekend.

Huidige stand van de wetenschap

De KNMI'23-klimaatscenario's brengen de wetenschappelijke klimaatkennis van dit moment in beeld. Als basis dienden het nieuwste IPCC-rapport (2021) en KNMI-onderzoek met een focus op Nederland. Naast de waargenomen trends en nieuwe kennis over klimaatprocessen vormen modelberekeningen een essentieel onderdeel van de klimaatscenario's. KNMI heeft gekozen voor een set van vier klimaatscenario's.

Bij het selecteren van deze vier scenario's hanteerde het KNMI de volgende criteria: geloofwaardigheid (voltrekt de toekomstige klimaatverandering in Nederland zich waarschijnlijk binnen de grenzen van de vier klimaatscenario's en zijn de scenario's elk op zich samenhangend?), relevantie (zijn de scenario's geschikt voor hun doel?) en helderheid (zijn de scenario's duidelijk beschreven?). Een internationale adviescommissie begeleidde de ontwikkeling van de KNMI'23-klimaatscenario's. Keuzes kwamen tot stand in overleg met een klankbordgroep van stakeholders en gebruikers van klimaatscenario's.

Shared Socioeconomic Pathways (SSP's)

Om de uitkomsten van de diverse klimaatmodellen te kunnen vergelijken, maken klimaatonderzoekers gebruik van sociaal-economische scenario's (Shared Socioeconomic Pathways, SSP's). Deze SSP's beschrijven demografische, sociaal-economische en technologische ontwikkelingen in de toekomst, en verschillen van elkaar in de uitstoot van broeikasgassen en aerosolen en in het landgebruik. In het eerste deel van het zesde assessmentrapport over de fysische basis van het klimaatsysteem beschrijft het IPCC de uitkomsten op basis van vijf SSP's. Deze vijf SSP's hebben een breed bereik. Ze variëren van een scenario met ambitieus klimaatbeleid conform het Klimaatakkoord van Parijs (1,5°C, SSP1-1.9) tot een scenario waarin de uitstoot blijft toenemen (SSP5-8.5). Omdat vooral de hoeveelheid broeikasgassen in de atmosfeer bepalend is voor de mondiale temperatuurverandering, geeft een scenario met lage uitstoot minder opwarming dan een scenario met hoge uitstoot. Welk uitstootscenario gevolgd wordt, en wat dit betekent voor de opwarming, is dus afhankelijk van het mondiale klimaatbeleid. Verschillen in opwarming tussen deze sociaal-economische scenario's spelen vooral op de lange termijn, na 2050, een grote rol.

Wetenschappelijke onzekerheid

Behalve onzekerheid over het mondiale klimaatbeleid is er ook wetenschappelijke onzekerheid over de mate waarin het klimaatsysteem reageert op een verandering van het broeikasgasgehalte in de atmosfeer. Dit uit zich op mondiale schaal door onzekerheid over de wereldgemiddelde opwarming. De klimaatgevoeligheid – de toename in wereldgemiddelde temperatuur behorende bij een verdubbeling van de hoeveelheid CO_2 in de lucht – wordt nu geschat op +2,5 tot +4,0°C, en is nu nauwkeuriger bekend dan in het vorige IPCC-rapport uit 2013.

Op meer regionale schaal spelen onzekerheden in klimaatprocessen een zo mogelijk nog grotere rol. In de zomer zijn de processen rond neerslag, bodemvocht, bewolking en straling onzeker. Deze processen kunnen aanleiding geven tot een positieve feedback. Bijvoorbeeld: droge bodems leiden tot minder bewolking en neerslag en tot meer instraling, en derhalve tot hogere temperaturen waardoor de bodem nóg verder uitdroogt. Deze processen hebben op hun beurt weer invloed op de ligging van hoge- en lagedrukgebieden. Ook deze ligging, en de daarmee gemoeide atmosferische stromingen, vertonen langjarige schommelingen.

In principe is onzekerheid over het toekomstige klimaat te verkleinen door meer onderzoek te doen naar de werking van het klimaatsysteem en door betere klimaatmodellen te ontwikkelen. Echter, het klimaat vertoont ook onvoorspelbaar gedrag. Deze natuurlijke variaties – die het gevolg zijn van de wisselwerking tussen atmosfeer, oceanen, land en ijskappen – komen op alle tijdschalen voor en zorgen ervoor dat er zelfs voor een 30 jaar-periode behoorlijke verschillen kunnen zijn. We kunnen de invloed van deze natuurlijke variaties schatten door verschillende modelsimulaties uit te voeren, met als enige verschil een kleine verstoring van de begintoestand. Na een tiental jaren geven deze simulaties verschillende uitkomsten. Temperatuurveranderingen door klimaatverandering (de trend) zijn in de nabije

toekomst al snel groter dan natuurlijke variaties van de temperatuur (de ruis). Dit geldt in het algemeen niet voor veranderingen van de neerslag en de wind. Zo kan de natuurlijk variatie in de gemiddelde winterneerslag gedurende 30 jaar ongeveer 10% zijn. Dit betekent dat de ene 30 jaar-periode 10% natter of droger kan uitvallen dan de andere.

Waargenomen veranderingen zijn ook een combinatie van trend en ruis. Het is zeer lastig om deze twee van elkaar te scheiden. Daardoor is het moeilijk om modellen goed te evalueren op basis van waargenomen trends. Dat een model klimaatprocessen juist weergeeft, betekent nog niet dat het ook trends goed weergeeft. En een model dat een waargenomen trend wél goed weergeeft, is niet per se een betrouwbaar model.

Modelberekeningen

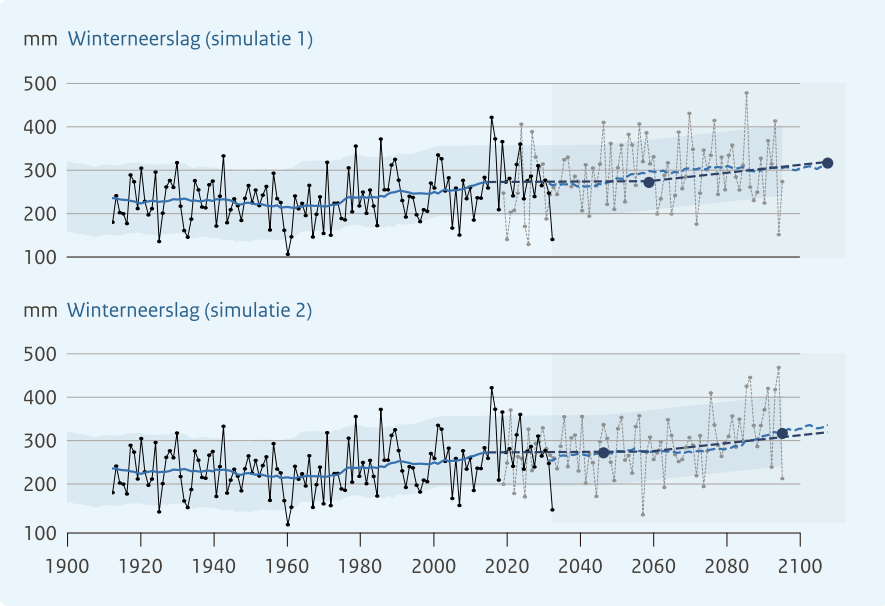
Voor het maken van de klimaatscenario's zijn de uitkomsten van 33 verschillende klimaatmodellen geanalyseerd. Daarnaast zijn er aanvullende berekeningen uitgevoerd met de KNMI-klimaatmodellen EC-Earth3 en RACMO2. Daarbij is meer dan 8000 jaar aan klimaatdata voor Nederland geproduceerd, met een ruimtelijke resolutie van ongeveer 10 km. Voor elk van de vier KNMI'23-klimaatscenario's zijn acht modelberekeningen van 30 jaar geselecteerd. Hierbij is gebruikgemaakt van een scenario-onderscheid op basis van de wereldwijde uitstoot van broeikasgassen en de verandering van de jaarlijkse neerslag. De spreiding van de jaarlijkse neerslag in de modelberekeningen, die ook door het IPCC zijn gehanteerd, is gebruikt om de RACMO2-berekeningen te selecteren. De beschikbaarheid van meerdere berekeningen voor elk scenario maakte het bovendien mogelijk om het signaal (klimaatverandering) te onderscheiden van de ruis (natuurlijke variaties). Naast deze modelberekeningen is voor een aantal indicatoren, waaronder neerslagextremen, gebruikgemaakt van aanvullende informatie uit waarnemingen en modellen met zeer hoge resolutie. Voor gedetailleerde informatie over de gevolgde methode wordt verwezen naar het wetenschappelijk rapport (ref. 15).

Schommelingen, sprongen en toevallige weersextremen

Behalve een duidelijk door menselijke activiteiten veroorzaakte opwarming, tonen de waarnemingen ook schommelingen door natuurlijke variabiliteit op alle tijdschalen. Door een samenloop van omstandigheden kunnen verschillende ontwikkelingen (klimaatverandering en natuurlijke variatie) elkaar versterken en leiden tot 'sprongen' in waargenomen extremen. Een voorbeeld is het verbreken van het oude hitterecord (38,6°C in Warnsveld op 23 augustus 1944) met maar liefst meer dan 2°C (40,7°C in Gilze-Rijen op 25 juli 2019). Door een combinatie van extreme droogte en een krachtig hogedrukgebied met zonovergoten weer werd op die dag alle zonne-energie omgezet in opwarming van het aardoppervlak en de lucht daarboven.

Klimaatmodellen houden rekening met de grilligheid door natuurlijke variaties. In de zestien simulaties van de winterneerslag in Nederland in de referentieperiode (1991-2020) zien we bijvoorbeeld forse uitschieters (figuur 45). Daardoor kan de waargenomen neerslaghoeveelheid in een specifiek jaar flink afwijken van de trend op lange termijn.

Natuurlijke variaties



Figuur 45. Berekende variaties in winterneerslag. De toekomst is berekend met twee simulaties voor hetzelfde klimaatscenario (lichtblauwe stippellijn). Donkerblauw: gemiddelde van alle simulaties gebruikt voor dit scenario.

Processen die niet zijn meegenomen in klimaatmodellen

Klimaatmodellen beschrijven steeds beter de fysische, chemische en biologische processen die van belang zijn voor het klimaat en werken met steeds meer ruimtelijk detail. Toch kan een aantal processen nog niet goed worden gesimuleerd. Dit komt door een gebrek aan voldoende nauwkeurige metingen, door onvoldoende ruimtelijke resolutie en doordat natuurlijke verstoringen zoals sterke vulkaanuitbarstingen niet zijn te voorspellen. Zo is het versneld afkalven van de Antarctische ijskap nog niet goed te modelleren. Dit geldt ook voor veranderingen van grootschalige oceaanstromingen. Van belang daarvoor is de hoeveelheid water die in de Noord-Atlantische Oceaan naar grotere diepte zinkt. Dit gebeurt op een relatief kleine schaal en heeft invloed op de sterkte van de Golfstroom. Volgens klimaatmodellen zal de Golfstroom in de loop van deze eeuw gemiddeld verzwakken, maar de mate waarin is erg onzeker. Ook bestaat er onzekerheid over het ontdooien van permafrost, waarbij CO_2 en methaan kunnen vrijkomen. Deze processen en gebeurtenissen kunnen wel benoemd worden, maar niet of nauwelijks getalsmatig worden uitgedrukt. Sommige klimaatmodellen gaan ervan uit dat vulkaanuitbarstingen in de toekomst even vaak voorkomen als in de 20e eeuw. Maar omdat dit verschijnsel onvoorspelbaar is, kan een verandering van de frequentie leiden tot een afname van de snelheid waarmee het klimaat opwarmt. Grote vulkaanuitbarstingen kunnen namelijk gedurende enkele jaren voor afkoeling zorgen.

Klimaatgevoeligheid en terugkoppelingen in het klimaatsysteem

Het lage uitstootscenario gaat uit van ambitieus klimaatbeleid (Klimaatakkoord van Parijs). Het hoge uitstootscenario gaat uit van een toename van de uitstoot in het huidige tempo tot 2080 en daarna pas een afvlakking. Dit is waarschijnlijk een overschatting van de CO_2- uitstoot, omdat veel broeikasgasbeperkende maatregelen al in gang zijn gezet. Toch bestaat nog steeds de mogelijkheid dat de temperatuurveranderingen, die voor het hoge uitstootscenario (H) zijn berekend met de beste schatting van klimaatgevoeligheid, uitkomen. Zo kan de meest waarschijnlijke opwarming van 4,9°C rond 2100 met SSP5-8.5 ook in het minder hoge uitstootscenario SSP3-7.0 bereikt worden als de klimaatgevoeligheid hoog blijkt. Bovendien kunnen terugkoppelingen in het klimaatsysteem leiden tot extra natuurlijke emissies, bijvoorbeeld door ontbossing, doordat oceanen minder broeikasgassen opnemen, of doordat er broeikasgassen vrijkomen bij het ontdooien van permafrost. Klimaatmodellen houden bij het berekenen van CO_2-concentraties in de SSP's nog onvoldoende rekening met deze terugkoppelingen. De klimaatverandering in Nederland zal zich dan ook zeer waarschijnlijk voltrekken ergens tussen de L- en H-scenario's in.

Drie schattingen van de grootst mogelijke zeespiegelstijging

Er bestaat nog geen wetenschappelijke consensus over de snelheid waarmee de zeespiegel in de toekomst maximaal zou kunnen stijgen bij een scenario met een hoge uitstoot. Drie methodes zijn gebruikt om die snelheid te schatten:

1) *Physical evidence discussion*. Deze methode bestaat uit het organiseren van een open discussie tussen klimaatwetenschappers en zeespiegeldeskundigen over de grootste zeespiegelstijging die fysisch nog plausibel is (ref.16).

2) *Marine Ice Cliff Instability model*. In deze methode gebruikten we het resultaat van een numeriek model dat de fysische mechanismen modelleert van Marine Ice Cliff Instability in Antarctica (ref.17).

3) *Structured Expert Judgement*. Deze methode maakt gebruik van een enquête onder de meest vooraanstaande glaciologen van de wereld. Bij het invullen hoefden zij hun standpunten niet te bespreken en hun schattingen van de Antarctische en Groenlandse bijdragen aan de zeespiegelstijging niet te motiveren met behulp van fysieke mechanismen (ref.18), wat deze methode minder conservatief maakt dan de 'Physical evidence discussion').

Elke methode resulteerde in een schatting van de hoogst mogelijk zeespiegelstijging. De kans dat zo'n schatting wordt overschreden kunnen we niet berekenen, maar uitgaande van de eigenschappen van deze methodes en een vergelijking met de basisscenario's, vermoeden we dat deze kans, onder het hoge uitstootscenario, 0 tot 5% bedraagt. Bij een lagere uitstoot is de kans kleiner.

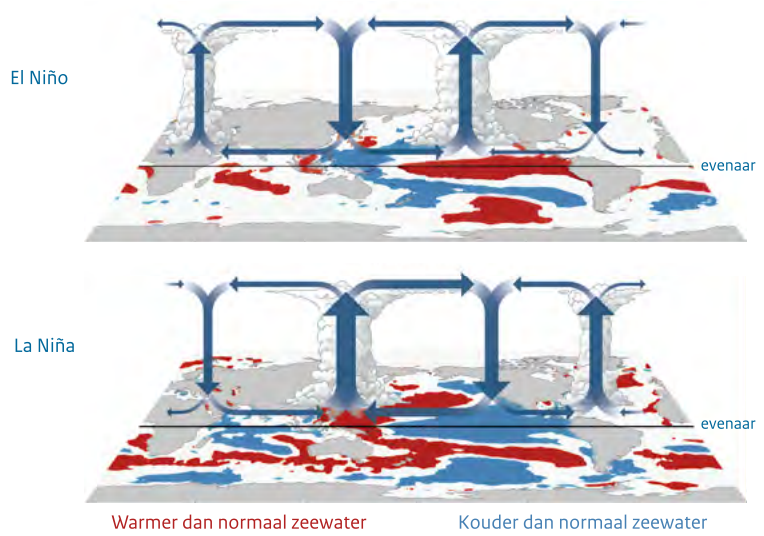
Achtergrond van de klimaatscenario's voor de BES-eilanden

Voor de klimaatscenario's voor de BES-eilanden zijn dezelfde mondiale klimaatmodellen en methodes gebruikt als voor Nederland. Toch is er een verschil. Om de informatie van de mondiale modellen naar Nederland te vertalen is een regionaal klimaatmodel gebruikt, terwijl deze vertaalslag voor de BES-eilanden op statistische wijze is gedaan. Uit de resultaten van de 29 beschikbare modellen voor Caribisch Nederland hebben we een groep van tien natte en een groep van tien droge modellen geselecteerd, waarin de neerslag tot 2100 respectievelijk het meest toe- en afneemt. De relatief grofmazige gemodelleerde tijdreeksen van de temperatuur en de neerslag, zijn met behulp van meetreeksen nabij de BES-eilanden nabewerkt tot toekomstige reeksen. Voor de BES-eilanden zélf zijn er geen goede meetreeksen, daarom hebben we alternatieven gebruikt: voor de temperatuur was dat een zogeheten heranalyse met een weermodel; voor de neerslag waren dat meetreeksen voor Curaçao (80 km van Bonaire) en Sint Maarten (50 km van St. Eustatius en Saba).

Net als voor Nederland presenteren we het toekomstige klimaat voor de BES-eilanden apart per seizoen. Terwijl in Nederland vooral de temperatuur bepaalt welk seizoen het is, is dat op de BES-eilanden de neerslag. Daarom maken we voor Caribisch Nederland onderscheid tussen het natte seizoen (mei-november) en het droge seizoen (december-april).

El Niño en La Niña zijn klimaatpatronen rondom de evenaar in de Grote Oceaan. Zij hebben invloed op de wereldwijde luchtstromingen die worden aangedreven door schommelingen van de zeewatertemperatuur in de tropische Grote Oceaan. Bij La Niña is de zeewatertemperatuur in het oosten lager dan normaal. Boven het westen van de oceaan en boven het Caribisch gebied stijgt de lucht; boven het midden van de oceaan daalt de lucht (figuur 46). Daartussen zijn er in de lagere en hogere luchtlagen oosten- of westenwinden. Deze zogeheten Walker-circulatie is bij La Niña naar het westen verschoven. Waar de lucht stijgt, zoals in het Caribisch gebied, valt veel neerslag; waar de lucht daalt, valt weinig neerslag. Bij El Niño warmt het oosten van de oceaan op, waardoor de Walker-circulatie naar het oosten verschuift. De lucht stijgt boven het midden van de oceaan en daalt boven het Caribisch gebied. Hierdoor is er op de BES-eilanden bij El Niño minder neerslag dan bij La Niña.

Walker-circulatie en zeewatertemperatuur



Figuur 46. Veranderingen van de wind rond de evenaar (Walker-circulatie) en zeewatertemperatuur tijdens El Niño (boven) en La Niña (onder). Bron: KNMI/NOAA.

Verklarende woordenlijst

Groeiseizoen: april tot en met september.

Herhalingstijd: de gemiddelde tijd tussen twee gebeurtenissen waarbij een bepaalde waarde (bijvoorbeeld 50 mm neerslag in één dag) overschreden wordt. Deze herhalingstijd kan bepaald worden voor een groot gebied (bijv. heel Nederland) of voor een specifieke locatie. Lokale herhalingstijden zijn in het algemeen veel langer dan gebiedsherhalingstijden.

Hitte-eilandeffect: het fenomeen dat door een sterkere opwarming overdag en een slechtere afkoeling 's nachts, de temperatuur in stedelijk gebied gemiddeld hoger is dan in het omliggende landelijk gebied.

Hittegolf: opeenvolging van minimaal vijf zomerse dagen (maximumtemperatuur 25,0°C of hoger) in De Bilt, waarvan er zeker drie tropisch (maximumtemperatuur 30,0°C of hoger) zijn.

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change, het internationale klimaatpanel van de Verenigde Naties.

Klimaatakkoord van Parijs: internationaal verdrag dat is gesloten tijdens de klimaatconferentie in Parijs in 2015, waarbij is afgesproken om de opwarming van de aarde te beperken tot maximaal 2°C en te streven naar niet meer verhoging dan 1,5°C.

Klimaatgevoeligheid: de mondiale temperatuurstijging bij een verdubbeling van het CO_2-gehalte.

Klimaatscenario: consistent en aannemelijk beeld van een mogelijk toekomstig klimaat, gebaseerd op kennis van het verleden en aannames over de uitstoot van broeikasgassen, bedoeld om verkennende studies uit te voeren naar de effecten van klimaatverandering.

Natuurlijke variaties: variaties van het klimaat rondom het langjarig gemiddelde, veroorzaakt door de vele complexe processen en interacties in het klimaatsysteem.

Neerslagtekort: de hoeveelheid potentiële verdamping minus de hoeveelheid neerslag, gesommeerd van 1 april tot en met 30 september.

Referentieperiode: tijdreeks die dient als vergelijking voor huidige of toekomstige perioden. Meestal wordt hiervoor een periode van 30 jaar genomen. Voor de KNMI'23-klimaatscenario's is de referentieperiode 1991-2020.

SSP: Shared Socioeconomic Pathways. SSP's hebben een nummer, dat wordt gevolgd door een getal dat (bij benadering) de stralingsforcering in W/m^2 in 2100 weergeeft. De nummering loopt van 1, het duurzame pad, tot en met 5, het pad met veel uitstoot van broeikasgassen. In dit rapport worden SSP1-2.6 als het lage, en SSP5-8.5 als het hoge scenario aangeduid.

Tijdshorizon: jaar of periode in de toekomst waarvoor een scenario wordt gemaakt.

Uitstootscenario: aannemelijke waarde van de mogelijke toekomstige uitstoot van broeikasgassen en aerosolen, gebaseerd op een coherente en intern consistente set van demografische, sociaal-economische en technologische ontwikkelingen, inclusief klimaatbeleid.

Vector: een organisme, bijvoorbeeld een teek of mug, dat ziekteverwekkers of parasieten kan overbrengen van de ene gastheer (dier of plant) naar de andere.

Winter: december, januari, februari.

Winterhalfjaar: oktober tot en met maart.

Zomer: juni, juli, augustus.

Zomerhalfjaar: april tot en met september.

Referenties

1. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

2. World Weather Attribution, 2019: Human contribution to the record-breaking July 2019 heatwave in Western Europe.

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

4. KNMI, 2021: KNMI Klimaatsignaal'21: Hoe het klimaat in Nederland snel verandert, KNMI, De Bilt, 72 pp.

5. Le Bars, D., 2022: Past and future sea level around the BES islands. KNMI Technical report; TR-397.

6. PBL, 2015: Aanpassen aan klimaatverandering – Kwetsbaarheden zien, kansen grijpen, Planbureau voor de leefomgeving, Den Haag, rapport 1454.

7. Noordhoff Atlasproducties/KNMI, 2021: De Bosatlas van weer en klimaat. ISBN 9789001278458.

8. Theeuwes, N.E., Steeneveld, G.-J., Ronda, R.J. and Holtslag, A.A.M., 2017: A diagnostic equation for the daily maximum urban heat island effect for cities in northwestern Europe. Int. J. Climatol., 37: 443-454.

9. Stoof, CR., Kok, E., Cardil, A., Van Marle, M. (accepted): In temperate Europe, fire is already here. AMBIO.

10. Lambrechts, H.A., Sooijs, R.D.H., Paparrizos, S., Ludwig, F., Stoof, C.R. (under review): Increasing wildfire danger in the Netherlands due to climate change. International Journal of Wildland Fire.

11. Schaap, B.F., Blom-Zandstra, M., Hermans, C.M.L. et al., 2011: Impact changes of climatic extremes on arable farming in the north of the Netherlands. Reg Environ Change 11, 731–741.

12. Rutty, M., Scott, D., Matthews, L., Burrowes, R., Trotman, A., Mahon, R. and Charles, A., 2020: An Inter-Comparison of the Holiday Climate Index (HCI:Beach) and the Tourism Climate Index (TCI) to Explain Canadian Tourism Arrivals to the Caribbean. Atmosphere 11, 412.

13. Pouwels, J., America, I., Delsman, J., Mens, M., 2021: Stresstest voor het Deltaprogramma Fase II: het effect van nieuwe inzichten en onzekerheden op knelpunten in de zoetwatervoorziening, Deltares.

14. Hulsman, L.M., Batošová, L., Van der Schrier, G., Hartogensis, O.K. and Trnka, M. (under review): Exploring false spring trends in Europe, Geophys. Res. Lett.

15. KNMI wetenschappelijk rapport, 2023: KNMI national climate scenarios 2023 for the Netherlands, KNMI, De Bilt, WR 23-02.

16. Wal, R.S.W., Nicholls, R., Behar, D., McInnes, K., Stammer, D., Lowe, J., Church, J., DeConto, R., Fettweis, X., Goelzer, H., Haasnoot, M., Haigh, I., Hinkel, J., Horton, B., James, T., Jenkins, A., LeCozannet, G., Levermann, A., Lipscomb, W., White, K., 2022: A High-End Estimate of Sea Level Rise for Practitioners. Earth's Future 10.

17. DeConto, R.M., Pollard, D., Alley, R.B. et al., 2021: The Paris Climate Agreement and future sea-level rise from Antarctica. Nature 593, 83–89.

18. Bamber, J. L., et al., 2019: Ice sheet contributions to future sea-level rise from structured expert judgment, Proceedings of the National Academy of Sciences 116(23), pp. 11195-11200.

Kerncijfers voor vijf locaties

Locaties	Indicator	Klimaat 1991-2020 = referentieperiode	2050 (2036-2065)				2100 (2086-2115)			
			Ld	Ln	Hd	Hn	Ld	Ln	Hd	Hn
De Bilt 	Aantal zomerse dagen (max temp ≥ 25°C) per jaar	28 dagen	41	39	52	45	41	39	93	84
	Aantal tropische dagen (max temp ≥ 30°C) per jaar	5,0 dagen	9,4	8,5	13	10	9,4	8,5	35	25
	Aantal vorstdagen (min temp < 0°C) per jaar	53 dagen	39	40	33	30	39	40	11	10
	Aantal ijsdagen (max temp < 0°C) per jaar	6,4 dagen	3,7	3,9	3,1	3,2	3,7	3,9	0,4	0,4
De Kooy 	Aantal zomerse dagen (max temp ≥ 25°C) per jaar	11 dagen	15	15	20	18	15	15	48	44
	Aantal tropische dagen (max temp ≥ 30°C) per jaar	1,3 dagen	2,1	2,1	2,9	2,4	2,1	2,1	8,4	6,9
	Aantal vorstdagen (min temp < 0°C) per jaar	35 dagen	25	26	22	20	25	26	7,0	7,0
	Aantal ijsdagen (max temp < 0°C) per jaar	5,9 dagen	3,8	3,6	3,0	2,8	3,8	3,6	0,6	0,4
Eelde 	Aantal zomerse dagen (max temp ≥ 25°C) per jaar	24 dagen	38	37	43	39	38	37	80	72
	Aantal tropische dagen (max temp ≥ 30°C) per jaar	5,1 dagen	9,6	9,4	12	9,4	9,6	9,4	28	21
	Aantal vorstdagen (min temp < 0°C) per jaar	63 dagen	48	49	42	40	48	49	16	15
	Aantal ijsdagen (max temp < 0°C) per jaar	9,2 dagen	5,2	5,1	5,0	4,4	5,2	5,1	0,8	0,4
Vlissingen 	Aantal zomerse dagen (max temp ≥ 25°C) per jaar	17 dagen	26	24	34	30	26	24	74	67
	Aantal tropische dagen (max temp ≥ 30°C) per jaar	2,3 dagen	4,4	3,9	7,0	5,3	4,4	3,9	19	15
	Aantal vorstdagen (min temp < 0°C) per jaar	20 dagen	12	13	11	9,0	12	13	1,0	1,0
	Aantal ijsdagen (max temp < 0°C) per jaar	3,3 dagen	1,5	1,7	1,1	1,4	1,5	1,7	0,0	0,0
Maastricht 	Aantal zomerse dagen (max temp ≥ 25°C) per jaar	36 dagen	55	52	64	56	55	52	108	99
	Aantal tropische dagen (max temp ≥ 30°C) per jaar	7,7 dagen	16	14	20	16	16	14	52	41
	Aantal vorstdagen (min temp < 0°C) per jaar	51 dagen	41	41	32	30	41	41	13	12
	Aantal ijsdagen (max temp < 0°C) per jaar	7,8 dagen	4,3	4,0	3,9	3,3	4,3	4,0	0,2	0,4

Tabel 6. KNMI'23-scenariotabel voor vijf locaties. De scenariogetallen zijn het gemiddeld aantal dagen per jaar rond 2050 en rond 2100.

Colofon

Publicatiedatum
9 oktober 2023

Auteurs
Janette Bessembinder, Richard Bintanja, Rob van Dorland, Carine Homan, Bernadet Overbeek, Frank Selten, Peter Siegmund

Eindredactie
Bernadet Overbeek, Rob van Dorland

Dit rapport is gebaseerd op
KNMI wetenschappelijk rapport, 2023: KNMI national climate scenarios 2023 for the Netherlands, KNMI, De Bilt, WR 23-02. Auteurs
Jules Beersma, Janette Bessembinder, Nadia Bloemendaal, Henk van den Brink, Marta Brotons Blanes, Rob van Dorland, Sybren Drijfhout, Rob Groenland, Rein Haarsma, Carine Homan, Iris Keizer, Folmer Krikken, Dewi Le Bars, Geert Lenderink, Erik van Meijgaard, Jan Fokke Meirink, Bernadet Overbeek, Thomas Reerink, Frank Selten, Camiel Severijns, Peter Siegmund, Andreas Sterl, Cees de Valk, Peter van Velthoven, Hylke de Vries, Michiel van Weele, Ben Wichers Schreur, Karin van der Wiel

Overige KNMI-bijdragen van
Maarten van Aalst, Joost van Amerongen, Jitske Burgers, Josine Camps, Emma Daniels, John Douros, Charlotte Fijnaut, Annemarie Hoogendoorn, Twan van Noije, Gerard van der Schrier, Lex Snijders, Alessandro Spinuso, Werenfried Spit, Natalie Theeuwes, Bert van Ulft, Leon van Voorst

Externe review
Bart van den Hurk (Deltares), Albert Klein Tank (Met Office Hadley Centre)

Tekstredactie
Lijn43, Utrecht

Grafische vormgeving
Today, Utrecht

Druk
Xerox

Oplage
2000 exemplaren

Postadres
Postbus 201
3730 AE De Bilt

Website
www.knmi.nl/klimaat
www.knmi.nl/klimaatscenarios

Aan dit rapport kan als volgt worden gerefereerd
KNMI, 2023: KNMI'23-klimaatscenario's voor Nederland, KNMI, De Bilt, KNMI-Publicatie 23-03.

Erratum – 9 oktober 2023
In deze digitale versie is ten opzichte van de gedrukte versie de volgende aanpassing gedaan:

- Figuur 29. De scenario's voor 2100 voor Bonaire zijn weergegeven in plaats van een herhaling van figuur 25 voor Nederland.



www.knmi.nl/klimaatscenarios