



Klimaatscenario's, -kantelpunten en -extremen

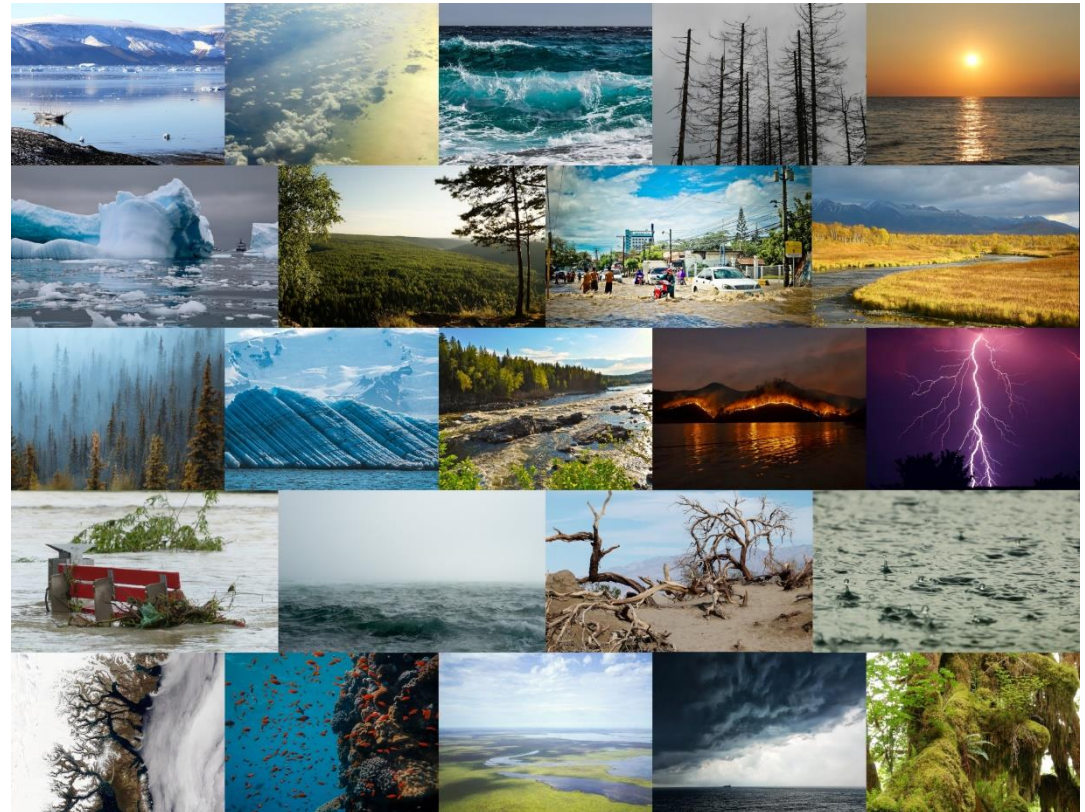
Auteurs: Peter van Thienen, Herbert ter Maat, Gijsbert Cirkel

Samenvatting

Ondanks de enorme inspanning van de wereldwijde gemeenschap van klimaatwetenschappers en hun indrukwekkende en respect afdwingende opbrengsten, lijken we keer op keer te worden verrast door extreem weer en de snelheid waarmee ons klimaat verandert. Deze observaties roepen de vraag op in hoeverre de watersector uit mag blijven gaan van de klimaatscenario's van IPCC en KNMI bij haar strategische beslissingen. Dit trendalert geeft een beschrijving van de meest recente inzichten in de betekenis en beperkingen van voorspellingen van klimaatmodellen en een handreiking hoe hiermee om te gaan.

Consequenties voor u

	Laag	Middel	Hoog	Beknopte uitleg
Impact				grootschalige veranderingen in de watercyclus
Zekerheid				diepe onzekerheid, kans niet te kwantificeren



Afbeeldingen van respectievelijk Lurens, xuuxuu, dimitrisvetsikas1969, Hans, rocchetta6273, SarahNic, Seregei, j_lloa, Natalia_Kollegova, YeshwanthKare, nicos_fotowelt, Larisa-K, sippakorn, ronomore, Hans, Pexels, ArtTower, diego_torres, Wikilmages, shadi6454, LandonParenteau, dexmac en MrsBrown via Pixabay.

Trendbeschrijving en achtergrond

Inleiding

Wie het nieuws volgt, ziet de afgelopen jaren de ene na de andere reportage over extreem weer voorbijkomen: van droogtes tot overstromingen, van ongekend hoge temperaturen in atmosfeer en oceaan tot een ongekend kleine omvang van het Antarctische zeeijs (Carbon Brief, 2023, KNMI, 2023a). Niet alleen voor leken, maar ook voor experts komen deze extremen onverwacht snel. Internationaal uitten klimaatonderzoekers hun verwondering. Zo tekende The Guardian in 2018 uit de mond van Johann Rockström op dat “klimaatverandering eerder en sneller optreedt dan verwacht” (Watts, 2018), en schreef Witze (2022) in Nature naar aanleiding van de hete zomer dat recordtemperaturen zich sneller hebben aangediend dan onderzoekers verwachtten. Ook in Nederland onderkenden Bart van den Hurk (Deltares en IPCC) en Sjoukje Philip (KNMI) in De Volkskrant dat de extremen sneller komen dan zij voor mogelijk hadden gehouden (Bakker, 2023). Hiervoor worden in het betreffende artikel zes verklaringen aangedragen: 1) nog steeds stijgen de wereldwijde emissies van broeikasgassen, terwijl eerdere modellen ervan uitgingen dat deze inmiddels zouden dalen; 2) de moeilijkheid om extremen in klimaatmodellen te krijgen omdat ze weinig of zelfs nog niet voorkomen in de

metingen en dat daardoor hun kans van optreden moeilijk in te schatten is; 3) onderschatting van hitte-extremen in klimaatmodellen door regionale effecten die elkaar kunnen versterken; 4) regionale afwijkingen van de wereldwijde temperatuurstijging worden niet altijd goed voorspeld; 5) het IPCC en haar rapporten zijn conservatief; 6) (ingrijpende) processen zitten niet altijd goed in de klimaatmodellen. Ook de watersector lijkt verrast te zijn geweest door de opeenvolging van droge voorjaren en/of zomers vanaf 2018, hoewel klimaatverandering al lang op zijn radar staat (DWSI, 2010).

Het aspect van processen die niet goed in de klimaatmodellen zitten werd deze zomer onderstreept door nieuwsberichten over de mogelijkheid van het stilvallen van de Atlantische Meridionale Omkiepende (“Overtuning”) Circulatie (AMOC), die voor een plotselinge maar langdurige en sterke temperatuur-daling in Europa zou kunnen zorgen (Borgshoef, 2023). Hierover later meer.

Kortom, ondanks de enorme inspanning van de wereldwijde gemeenschap van klimaatwetenschappers en hun indrukwekkende en respect afdwingende opbrengsten, lijken we nog steeds niet goed in beeld te hebben wat ons veranderende klimaat precies voor ons in petto heeft. Deze observaties roepen de vraag op in

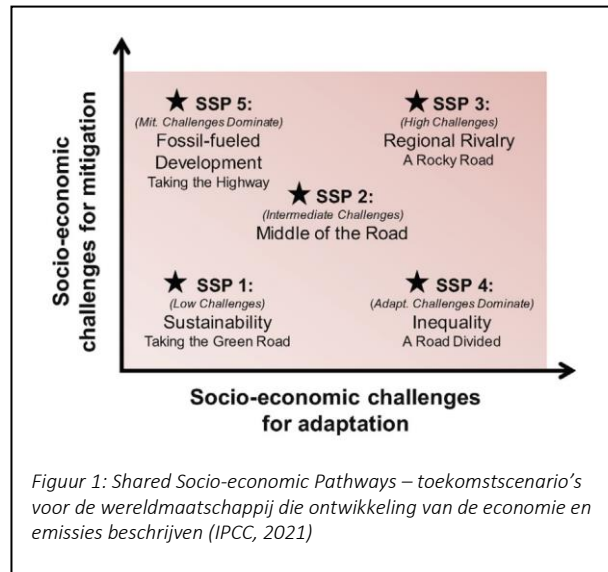
hoeverre de watersector uit mag blijven gaan van de klimaatscenario's van IPCC en KNMI (nieuwe scenario's gepubliceerd in oktober 2023) bij haar strategische beslissingen. Dit trendalert geeft een beschrijving van de meest recente inzichten in de betekenis en beperkingen van voorspellingen van klimaatmodellen en een handreiking hoe hiermee om te gaan.

Drinkwater

De afgelopen jaren kenmerkten zich door droge en hete voorjaren en zomers die gevolgen hebben gehad voor de bedrijfsvoering. Tijdens deze droge hete periodes neemt de (piek)drinkwatervraag toe (Vonk et al., 2017) terwijl tegelijkertijd ook andere gebruikers meer aanspraak doen op het grondwatersysteem (Stofberg et al., 2023; Wolters et al. 2018 a,b). Hierdoor ontstaan knelpunten met vergunningsruimte en verscherping van discussies rond natuureffecten bij grondwaterwinningen. Bij oppervlaktewaterwinningen resulteren hoge temperaturen en lage afvoeren (minder verdunning) in verslechtering van de kwaliteit van het innamewater (Stofberg et al., 2023).

Klimaatmodellen en -scenario's

Om te beginnen schetsen we kort hoe het IPCC, het KNMI en de achterliggende gemeenschap van klimaatwetenschappers tot hun voorspellingen komen.

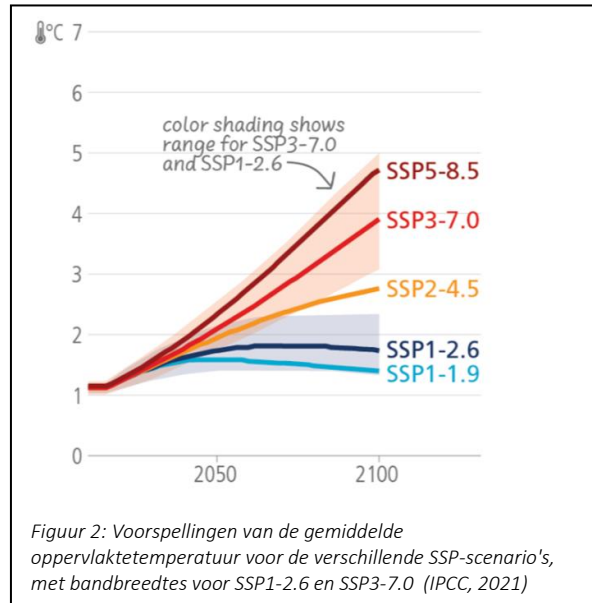


Hierin spelen complexe computermodellen een hoofdrol. Deze modellen bevatten beschrijvingen van zoveel mogelijk relevante processen in de atmosfeer, de oceaan, de ijskappen, het vaste land, etc. Soms zijn deze procesbeschrijvingen gebaseerd op elementaire natuurkunde, soms op vereenvoudigingen hiervan, en soms is het begrip van de processen incompleet, en daarmee ook de beschrijving, of zijn processen in het geheel niet opgenomen. Om te kunnen rekenen met deze procesbeschrijvingen, moeten de betreffende reservoirs (atmosfeer, oceaan) opgedeeld worden in een raster van cellen, waarbinnen parameters als temperatuur, windsnelheid en -richting constant of

constant variërend worden verondersteld. Deze rastercellen hebben doorgaans een grootte van 1-4 x 1-4 graden (ca 100-400 km bij de evenaar; Soares et al., 2023). Processen en structuren die kleiner dan deze afmetingen zijn worden niet gerepresenteerd in de berekeningen, net zoals details kleiner dan een pixel van een computerscherm hierop niet te zien zijn. Dit is dus ook een (noodzakelijke) vereenvoudiging van de werkelijkheid. Met de toenemende computerkracht is het oplossend vermogen (het detail van het raster) met de jaren toegenomen, en door voortschrijdende wetenschap zijn ook de procesbeschrijvingen verbeterd.

De IPCC-rapporten leunen sterk op de resultaten van het zogenaamde Coupled Model Intercomparison Project, waarbinnen klimaatmodellen van diverse onderzoeksgroepen uit de wereld volgens dezelfde vastgestelde regels en uitgangspunten (maar niet per se dezelfde modelvergelijkingen en -parametrisaties) simulaties uitvoeren. Het Zesde Assessmentrapport van het IPCC (IPCC, 2021) gaat uit van de zesde generatie modellen (CMIP6). Hierin worden hetzij CO₂-concentraties en klimaatresponsen berekend resulterend uit voorgeschreven antropogene toevoegingen van CO₂ rekening houdend met uitwisseling tussen de atmosfeer, de oceaan en biosfeer (zogenaamde Earth System Models), hetzij uitsluitend de klimaatrespons op basis van voorgeschreven CO₂-

concentratieverlopen berekend zonder verdere uitwisseling tussen de genoemde reservoirs (Eyring et al., 2016). Dit laatste is van grote betekenis voor het vergelijken van modellen met historische klimaatgegevens. Om de ontwikkeling van het klimaat in de toekomst te modelleren, is het nodig om de zogenaamde forcering van de modellen (de factoren die bepalen hoe de modeltoestand zich ontwikkelt, zoals de emissies van CO₂ en andere broeikasgassen, landgebruik, etc.) voor te schrijven. Hiervoor is een set van scenario's ontwikkeld: de zogenaamde Shared Socio-economic Pathways, ofwel SSP's (Figuur 1). De verschillende scenario's gaan uit van andere ontwikkelpaden voor de wereld op sociaaleconomisch, demografisch en technologisch vlak en daarbij passende keuzes voor de reductie van de uitstoot van broeikasgassen. Voor een uitgebreidere uitleg van de SSP's wordt verwezen naar de Explainer van Carbon Brief (2018). De verschillende modellen uit de CMIP6-suite zijn toegepast op de verschillende SSP-scenario's, waarbij voor ieder SSP-scenario een pluim van temperatuurcurves als functie van de tijd werd verkregen. Deze pluim is vervolgens vertaald naar een onzekerheidsbandbreedte (zie Figuur 2). Deze bandbreedte representeert de variatie tussen de verschillende modellen die het betreffende SSP-scenario hebben doorgerekend.



Biascorrectie

Klimaatmodellen kunnen significant afwijken van historische waarnemingen als deze worden toegepast op historisch en hedendaagse omstandigheden. Deze afwijkingen (in feite fouten) zijn het gevolg van beperkte ruimtelijke resolutie, vereenvoudiging van thermodynamische processen en/of een onvolledig begrip van het globale klimaat. Het gebruik van niet-gecorrigeerde uitkomsten in impactmodellen geeft derhalve onrealistische resultaten. Om deze afwijkingen in klimaatmodellen te ondervangen wordt er daarom

een zogenaamde biascorrectie toegepast – deze stuurt de uitkomsten van klimaatmodellen in de richting van observaties. Om een goede bias-correctie uit te voeren, is het belangrijk om over een goede dataset met waarnemingen te beschikken. Dit betekent dat biascorrectie in principe alleen corrigeert voor processen zoals deze zich in het historische klimaat hebben afgespeeld, en niet voor niet-lineaire veranderingen van deze processen en aanvullende processen in een veranderend klimaat.

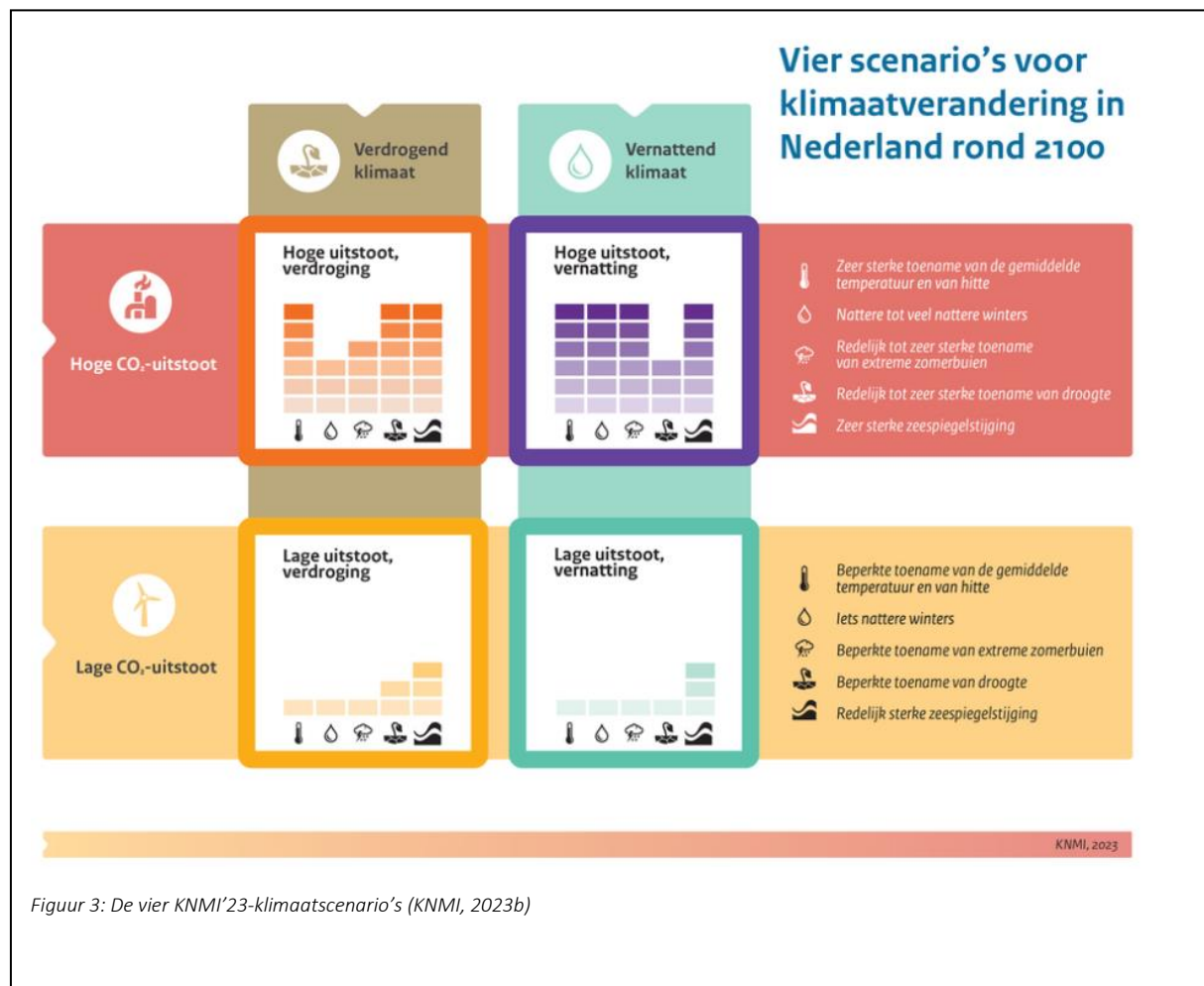
KNMI'23-scenario's

Op 9 oktober 2023 heeft het KNMI nieuwe klimaatscenario's gepresenteerd. Deze volgen de KNMI'14-scenario's op en zijn gebaseerd op de scenario's en berekeningen uit het hierboven genoemde zesde assessmentrapport van het IPCC. De scenarioruimte is opgespannen langs twee assen, namelijk de ontwikkeling van de CO₂-uitstoot (afhankelijk van menselijk handelen, corresponderend met SSP1-2.6 respectievelijk SSP5-8.5 van het IPCC) en de mate van verdroging van de zomers en vernatting van de winters (waarover modelonzekerheid bestaat), zie Figuur 3. Met twee hoekpunten op iedere as worden zo vier scenario's gedefinieerd: Ld (lage uitstoot, veel drogere zomers, iets nattere winters), Ln (lage uitstoot, iets drogere zomers, (veel) nattere winters), Hd (hoge uitstoot, veel drogere zomers, iets nattere winters), Hn (hoge uitstoot, iets

drogere zomers, (veel) nattere winters). Voor professionele gebruikers is hier bovendien nog een set middenscenario's bij gemaakt: Mn en Md (gematigde uitstoot in een natte en droge variant). Doordat de scenario's op een iets andere manier zijn opgebouwd en er andere referentieperioden zijn gebruikt, is een directe vergelijking van temperatuurveranderingen tussen de twee sets scenario's niet heel betekenisvol. De verschillen zijn hoe dan ook beperkt. Wel significant is een toename van de jaarsom van de neerslag in alle scenario's (de droge KNMI'14-scenario's lieten geen toename of zelfs een afname zien). De neerslagtoename is alleen buiten de zomer te zien; zomers worden in alle nieuwe scenario's droger ten opzichte van het historische klimaat. Met deze nieuwe verzameling scenario's hebben de eindgebruikers, waaronder de watersector, een bijgewerkte kijk in hun toekomst beschikbaar gekregen, gevoed met de meest recente inzichten uit de klimaatwetenschappen, ten behoeve van strategische beslissingen omtrent de ontwikkeling van bronnen, het ontwerp van infrastructuur, etc.

Hoe goed hebben klimaatmodellen de ontwikkeling van ons klimaat tot nu toe voorspeld?

Carbon Brief (2017) publiceerde een evaluatie van een reeks mondiale klimaatmodellen gepubliceerd sinds 1973 en vergeleek hun voorspellingen met observaties van wereldgemiddelde oppervlaktetemperaturen. Zij



Figuur 3: De vier KNMI'23-klimaatscenario's (KNMI, 2023b)

concluderen dat deze modellen in het algemeen een goede voorspelling van de gemiddelde opwarming hebben geleverd, sommige iets te hoog, andere iets te laag. Carvalho et al. (2022) maakten een vergelijking tussen CMIP3, CMIP5 en CMIP6 toekomstige temperatuurprojecties en waarnemingen, en concludeerden dat de opwarming van de aarde die wordt voorspeld door alle CMIP's enigszins conservatief is geweest. De waargenomen opwarming ligt dichterbij de bovengrens van de voorspelde opwarming; toekomstige CMIP-klimaatscenario's met hogere broeikasgasemissies lijken daarom de meest realistische. Zij geven wel aan dat interne variabiliteit in het klimaat deze resultaten met een relatief korte waarnemingstijd wellicht vertekent. Carrington (2023) geeft een overzicht van de opeenvolgende IPCC-rapporten vanaf 1992. Hierin is de boodschap van een opwarmende atmosfeer steeds hetzelfde gebleven, en de mate van zekerheid van de invloed van de mens steeds sterker vast komen te staan. Let op dat al deze publicaties schrijven over de *wereldgemiddelde oppervlaktetemperatuur*.

Het is zinvol om daarnaast ook meer regionaal naar de prestatie van de modellen te kijken. Er wordt veelvuldig gebruikt gemaakt van regionale modellen, zoals in het kader van het Coordinated Downscaling Experiment (CORDEX, 2023). Deze modellen kunnen, aangedreven door berekeningen van mondiale modellen, in een



hogere resolutie (0,44° ~ 50 km, 0,22° ~ 25 km, 0,11° ~ 12 km per rastercel, Sørland et al. 2021) de klimaatontwikkeling op regionale schaal doorrekenen. Ook de nieuwe KNMI'23-scenario's steunen op dergelijke regionale modellen (Van Dorland et al, 2023). Uit diverse studies blijkt dat een hogere modelresolutie leidt tot een betere voorspelling van de hydrologische cyclus en optreden van extremen. Deze modellen laten voor Europa weliswaar over het algemeen een goede overeenkomst tussen observaties en simulaties zien, maar er zijn ook systematische onder- en overschattingen die in alle modellen terugkomen: de simulaties zijn te koel, te nat en te winderig (Vautard et al., 2020). Sørland et al. (2021) geven iets meer detail en laten zien dat de op CMIP5 gebaseerde generatie regionale modellen voor Europa in de zomer iets te warm en droog zijn gebleken voor zuid/zuidoost Europa en iets te koel en nat voor noord/noordwest Europa, en iets te nat voor nagenoeg heel Europa in de winter. In beide papers wordt een vergelijking gemaakt met observaties van de periode 1981-2010. Opgemerkt moet worden dat sinds 2010 het klimaat in Europa merkbaar verder veranderd is (EEA, 2023). Op een nog verder ingezoomd niveau, dat van het Iberisch Schiereiland, is te zien dat de opeenvolgende generaties CMIP-modellen steeds beter voorspellingen genereren die overeenkomen met de observaties (periode 1971-2021). Wel blijven ook CMIP6-modellen

het optreden van hoge temperaturen onderschatten en overschatten zij het aantal maanden met een extreem lage of extreem hoge hoeveelheid neerslag (Soares et al., 2023). Deze auteurs adviseren de prestaties van mondiale klimaatmodellen in een regionale context te blijven monitoren.

In het dagelijkse leven ervaren wij doorgaans niet het klimaat maar de instantane expressie daarvan: het weer. Weersomstandigheden variëren op chaotische wijze rondom klimatologische gemiddelden. Het verschuiven van klimatologische gemiddelden (zoals lokale versies van de in Figuur 2 weergegeven wereldgemiddelde oppervlaktetemperatuur) gaat logischerwijze gepaard met een frequenter of minder frequent optreden van omstandigheden die we nu als extreem beschouwen.

Klimaatextremen zoals minimale en maximale temperaturen, aantallen warme, droge en natte dagen en intensiteit van neerslag blijken door CMIP6-modellen goed voorspelbaar te zijn voor de periode 1980-2000 (Kim et al., 2020), met regionale onderschattingen van neerslag in de (sub)tropen en temperatuur op hoge noordelijke breedtegraden. Voor wat betreft hitte gaat de toename in magnitude van extreem weer sindsdien echter sneller dan verwacht. Vautard et al. (2023) beschrijven na een analyse van 273 simulaties van gekoppelde modellen van de meest

recente generatie dat deze modellen mondiale trends over het algemeen goed weergeven, maar dat verreweg de meeste hiervan zomerse hittegolven in Europa onderschatten. Dit schrijven zij toe aan veranderingen in atmosferische circulatie die niet goed uit de modellen naar voren komen. Philip et al. (2023) concluderen eveneens dat recente extreme hitte in Europa systematisch wordt onderschat door de modellen. Ook buiten Europa worden onderschattingen geconstateerd: voor zware regenval in tropische zones is door vergelijking van modelsimulaties met observaties vastgesteld dat de meeste modellen de intensivering ten gevolge van klimaatopwarming onderschatten (Borodina et al., 2021).

Aanwijzingen voor systematische onderschattingen in IPCC-rapporten

Over de jaren heen zijn er verschillende signalen geweest dat de voorspellingen van de IPCC-rapporten aan de voorzichtige kant zijn geweest. Zo schreef Glen Scherer in 2012 in Scientific American dat "het controleren van 20 jaar aan projecties aantoonde dat het Intergovernmental Panel on Climate Change het tempo en de gevolgen van de opwarming van de aarde consequent heeft onderschat". Ook Brysse et al. (2013), Spratt en Dunlop (2018) en Brown (2020) schrijven over systematische onderschattingen van de mate en effecten van klimaatverandering in rapportages van het

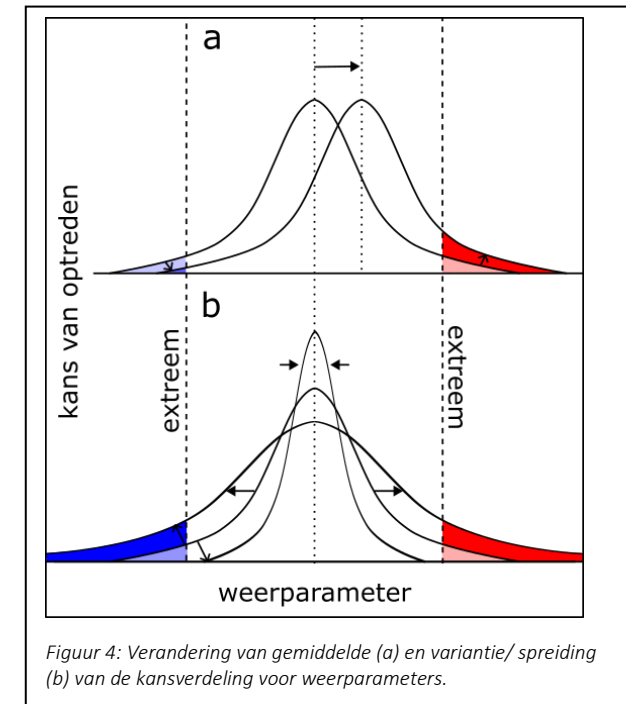


IPCC. Het gaat hierbij niet zozeer om de ontwikkeling van de *werldgemiddelde oppervlaktetemperatuur*, als wel van de *gevolgen* hiervan, zoals de snelheid waarmee poolijs en ijskappen wegsmelten, de oceanen verzuren, en de hittegolven die in de afgelopen jaren zoveel frequenter en intenser lijken te zijn geworden. De genoemde auteurs schrijven deze onderschattingen toe aan de op consensus gerichte benadering van het IPCC en aan voorzichtigheid met het doen van uitspraken bij ontbreken van overweldigend bewijs. Brown (2020) beargumenteert dat deze benadering in het licht van mogelijk existentiële kwesties zoals klimaatverandering niet de meest geschikte is en dat in het onderzoek naar en de communicatie over mogelijke en te verwachten klimaatverandering het voorzorgsprincipe zwaarder zou moeten meewegen. Zoals in de inleiding beschreven zijn er echter ook andere mogelijke oorzaken voor de schijnbaar te voorzichtige voorspellingen te noemen, die meer te maken hebben met de beschikbaarheid van observaties, met de mate van detail van modellen en met de ontwikkeling van de uitstoot.

Weersextremen

Met het veranderende klimaat nemen de temperaturen toe en veranderen neerslagpatronen en -hoeveelheden in Nederland. De extreme recordtemperaturen die bijvoorbeeld in 2019 zijn gemeten, zullen in de loop van de eeuw waarschijnlijk gewoner en meermaals

overtroffen worden (De Vries et al., 2022). De vraag is nog wel hoe de extremen in temperatuur in een toekomstig klimaat zich manifesteren. Als de kansverdeling voor een weerparameter (bijvoorbeeld temperatuur) in zijn geheel verschuift door klimaatopwarming zonder van vorm te veranderen, zal het aantal gebeurtenissen dat we nu extreem noemen toenemen voor warme extremen en afnemen voor koude extremen, doordat de kansverdeling naar rechts over de grenswaarden voor deze extreme gebeurtenissen heen schuift (Figuur 4a). Als ook de vorm van de kansverdeling verandert, neemt de kans toe op extremen aan beide kanten voor een verbreding van de verdeling en af voor een versmalling (Figuur 4b). Opgemerkt moet worden dat kansverdelingen voor bepaalde processen anders of complexer kunnen zijn dan de getoonde normaalverdelingen, evenals de veranderingen daarin. Een goed voorbeeld hiervan is droogte, waarbij ook sprake is van een seizoensafhankelijke relatie met de opwarming. Klimaat simulaties suggereren dat hogere temperaturen vooral worden bepaald door een toename van de temperatuur en hoogstwaarschijnlijk niet door een grotere variabiliteit in temperatuur, oftewel een verbreding van de kansverdeling (Van der Wiel en Bitanja 2021, Siegmund, 2023). Voor extreme neerslag is dit minder duidelijk. Een recente studie van Contzen et al. (2023) laat daarentegen zowel een verschuiving als



een verbreding van de kansverdelingen voor temperatuur zien voor grote delen van de wereld, inclusief Nederland. Bekend is dat neerslag extremer zal worden met langdurige periodes van droogte en regenbuien met een zwaardere intensiteit (vooral in de zomer). Zoals hierboven besproken suggereren observaties echter dat de huidige generatie modellen het optreden van extreme weersomstandigheden (hittegolven, neerslag) onderschat (Vautard et al., 2023,



Soares et al., 2023). Ten slotte moet worden opgemerkt dat modellen ook voorspellen en observaties laten zien dat extremen persistenter (langduriger) worden bij opwarming van de atmosfeer (Pfeiderer et al., 2019, Pradhan et al., 2022).

Straalstroom

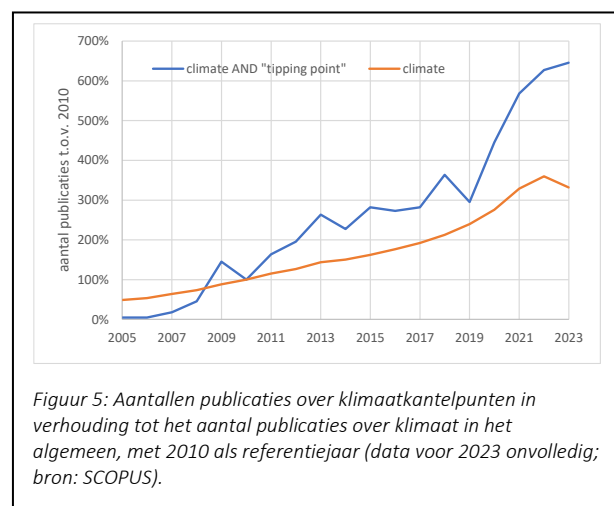
Het weer in Europa wordt sterkt bepaald door de locatie en het stroompatroon van de straalstroom. De straalstroom is een gebied met zeer sterke winden op ongeveer 10 km hoogte in de atmosfeer die al kronkelend van west naar oost stroomt. De straalstroom voert depressies aan met de daarbij horende kou- en warmtefronten. De sterkte van deze straalstroom is afhankelijk van het temperatuurverschil tussen de tropen en de poolgebieden. Door de klimaatverandering warmt de Noordpool meer op dan de tropen. Het gevolg hiervan is dat het temperatuurverschil tussen de polen en de tropen kleiner wordt (hoewel deze verandering afhankelijke van de hoogte is; op grote hoogte kan het verschil zelfs toenemen), waardoor de straalstroom afzwakt. Hoe trager de straalstroom, hoe groter de kans is dat er stationaire golven in de atmosfeer zullen ontstaan. Deze golven zullen ook verder naar het noorden en zuiden komen waardoor de amplitude toeneemt en ze nog moeilijker zullen verplaatsen. Bij deze stationaire golven hoort een sterk geblokkeerd weertype waarbij de atmosfeer ten zuiden van de

Tabel 1: Overzicht van klimaatkantelpunten, met drempelwaarden (minimaal, beste schatting, maximaal), tijdschalen (idem dito), maximale impact op de gemiddelde temperatuur (mondiaal en regionaal) en activatietijd van de kantelementen. Verklaring van gebruikte symbolen: ↻ ineenstorting; ✕ afsterven, (abrupt) verlies; ⚡ abrupte dooi; ▲ geleidelijke dooi; ↗ noordelijke uitbreiding, vergroening; ↘ zuidelijk afsterven; ⚡ verzwakking; ∅ ontleding. Ontleend aan Amstronng McKay et al. (2022).

	Klimaatkantelement [en -punt]	Drempelwaarde (°C)	Tijdschaal (j)	Maximale impact (°C)		Activatie-tijd (j)	
				Mondiaal	Regionaal		
Mondiale kernkantelpunten	GrIS	Groenlandse ijskap [↻]	0,8- 1,5 -3,0	1K- 10k -15K	0,13	0,5 - 3,0	?
	WAIS	West-Antarctische ijskap [↻]	1,0- 1,5 -3,0	500- 2k -13K	0,05	1,0	60
	LABC	Convectie in de Labradorzee [↻]	1,1- 1,8 -3,8	5- 10 -50	-0,5	-3,0	?
	EASB	Oost-Antarctische subglaciale bekkens [↻]	2,0- 3,0 -6,0	500- 2k -10K	0,05	?	200
	AMAZ	Amazonewoud [✕]	2,0- 3,5 -6,0	50- 100 -200	0,1 to 0,2	0,4 - 2	5-50
	PFTP	Boreale Permafrost [↻]	3,0- 4,0 -6,0	10- 50 -300	0,2 to 0,4	~	?
	AMOC	Atlantische Meridionale Circulatie [↻]	1,4- 4,0 -8,0	15- 50 -300	-0,5	-4 - -10	?
	AWSI	Arctisch winterzeeijs [↻]	4,5- 6,3 -8,7	10- 20 -100	0,60	0,6 - 1,2	<10
	EAIS	Oost-Antarctische ijskap [↻]	5,0- 7,5 -10,0	10K-?-?	0,60	2,0	?
Kantelementen met een regionale impact	REEF	Tropische koraalriffen [✕]	1,0- 1,5 -2,0	10	0	0	?
	PFAT	Boreale Permafrost [⚡]	1,0- 1,5 -2,4	100- 300 -300	0,04 - 0,16 per °C	0	?
	BARI	ijs Barentssee [✕]	1,5- 1,6 -1,7	?- 25 -?	0,00	+	?
	GLCR	Berggletsjers [✕]	1,5- 2,0 -3,0	50- 200 -1000	0,08	+	?
	SAHL	Sahel & West-Afrikaanse Moesson [↗]	2,0- 2,8 -3,5	10- 50 -500	0,0	+	?
	BORF	Boreaal woud [↘]	1,4- 4,0 -5,0	50- 100 -?	-0,18 to -0,36	-0,5 - -4	?
	TUND	Boreaal woud [↘]	1,5- 4,0 -7,2	40- 100 -?	0,14 to 0,28	0,5 - 2	?
niet-lineaire feedbacks zonder	PFGT	Boreale Permafrost [▲]	1,0- 1,5 -2,4	100- 300 -300	0,09 - 0,21 per °C	~	0
	ASSI	Arctisch zomerijs [✕]	1,3- 2,0 -2,9	10- 20 -50	0,25	0,25 - 0,5	0
	LAND	Mondiale koolstofput land [↘]	1,0- 2,0 -3,5	?-?-?	0,13 per C	~	0
	PUMP	Oceanische biologische pomp [↘]	N/A- 1,0 -?	?-?-?	0,01 per C	~	0
	MMHD	Mariene Methaanhydraten [∅]	?-~ 2,0 -?	1K- 1000 -5K	<0,5	~	100



straalstroom warm en droog is en ten noorden koud; doordat de golven stationair zijn, is het bijbehorende weer persistent. Kornhuber et al (2019) hebben aangetoond dat er, bij een bepaald golvenpatroon in de hoge atmosfeer, een groot effect op het voorkomen van extremen aan het aardoppervlak verwacht mag worden. Wat betreft het modelleren van dit element in klimaatmodellen, hebben Luo et al (2022) onderzocht dat kleine fouten in klimaatmodellen van de representatie van deze grootschalige golven kan leiden tot grote onderschattingen van de temperatuur en een aan het aardoppervlak. Dit geldt ook voor de gesimuleerde neerslag in de modellen.



Klimaatkantelpunten

Veel processen in het systeem Aarde reageren enigszins voorspelbaar en op een bepaalde manier proportioneel op verstoringen. Zo zorgt iedere verdubbeling van de CO₂-concentratie in de atmosfeer voor een broeikaseffect van enkele graden Celsius (1,8-5,6 in de CMIP6-modellen). Er zijn echter ook processen die bij het overschrijven van een bepaalde drempel (vaak de gemiddelde temperatuur) geactiveerd worden en een grote invloed op het klimaat kunnen uitoefenen: klimaatkantelpunten. Een klimaatkantelpunt kan worden gedefinieerd als "een kritische drempel waarbij een minuscule verstoring de toestand of ontwikkeling van een systeem kwalitatief kan veranderen"; met kantelementen bedoelen we de bijbehorende grootschalige componenten van het systeem Aarde (Lenton et al., 2008). Een goed voorbeeld hiervan is poolijs op de Noordelijke IJszee. Als dit in enige mate wegsmelt, neemt de opname van zonnestraling door de zee toe (ijs reflecteert meer dan water), waardoor er nog meer ijs wegsmelt, waardoor de opwarming verder toeneemt, etc.. Zo'n zichzelf beïnvloedend proces noemen we een feedback of terugkoppeling. Hoewel nog steeds onvolledig en vol onzekerheden, is ons begrip van kantelpunten en -elementen de afgelopen anderhalf decennium aanzienlijk gegroeid. Armstrong McKay et al. (2022) geven een recent overzicht van de huidige stand van kennis. Hun overzicht

van kantelpunten, drempelwaarden, tijdschalen en gevolgen is weergegeven in Tabel 1. Duidelijk wordt uit deze tabel dat we ons voor een aantal kantelpunten al in de gevarezone bevinden.

Toch blijft het voorspellen van hun optreden bijzonder moeilijk. Kantelpunten ontstaan wanneer versterkende feedbacks (meekoppeling zoals het voorbeeld van het zeeijs) het gaan winnen van dempende feedbacks. Of de verstoring uitgroeit tot een kantelpunt hangt af van details van het klimaat in verscheidene variabelen met een ruimtelijke structuur. Daarom is het, zelfs als we de kantelpunten goed kennen en kunnen modelleren, heel moeilijk te voorspellen hoe, waar en wanneer het kantelpunt optreedt, zelfs als alle relevante processen in het model zijn opgenomen (Sybren Drijfhout, pers. comm.).

Onderzoek naar klimaatkantelpunten

Klimaatkantelpunten zijn op de kaart gezet door de groep van Timothy Lenton in Exeter (o.a. Lenton en Schellnhuber, 2007). Sindsdien is het aantal publicaties per jaar op dit vlak gestaag toegenomen en deze groei is in met name de afgelopen jaren versterkt (zie Figuur 5). Er zijn projecten opgestart om klimaatkantelpunten en hun optreden in diverse modellen te bestuderen en vergelijken, zowel in brede zin (TIPMIP; Tipping Point Modelling Intercomparison Project) en gericht op specifieke processen zoals de AMOC (North Atlantic



Hosing Model Intercomparison Project, Jackson et al., 2023). In december 2023 wordt er een *Global Tipping Points Report* gepubliceerd, dat alle tot nu toe beschikbare kennis en inzichten samen moet brengen. Verder is voorgesteld om in de zevende cyclus van de IPCC assessment reports een rapport over klimaatkantelpunten op te leveren (Van der Wel, 2023).

Een kantelement uitgelicht: stilvallen van de AMOC

De primeur kwam op het EGU-congres in april 2023, maar in juli 2023 werd het in *Nature* gepubliceerd: volgens Peter en Susanne Ditlevsen van de Universiteit van Kopenhagen geeft een statistische analyse van (deels gereconstrueerde) metingen aan dat de AMOC waarschijnlijk halverwege de 21^e eeuw (95% betrouwbaarheidsinterval 2025-2095) stil zal vallen. De AMOC, kort voor Atlantische Meridionale Omkiepende Circulatie (Atlantic Meridional Overturning Circulation), maakt onderdeel uit van een wereldwijd netwerk van oppervlakkige en diepe oceaanstromingen die op lange termijn zorgen voor uitwisseling van warmte, CO₂ en nutriënten tussen het oppervlak en de diepe oceaan. De AMOC is het Atlantische deel hiervan, met een noord-zuid (meridionale) richting. In de noordelijke Atlantische Oceaan kiept deze stroming zich om in de zin dat noordwaarts aan het oppervlakte stromend zeewater door afkoeling en verdamping (waardoor de zoutconcentratie en daarmee de dichtheid toeneemt)

naar beneden zinkt en op diepte zuidwaarts terugstroomt. Over een mogelijke vertraging of stilvallen van de AMOC is in het verleden al veel gepubliceerd op basis van modelstudies (bijvoorbeeld Drijfhout, 2015, Jackson, 2015). Het mechanisme hiervoor is een toegenomen instroom van zoet water (bijvoorbeeld door smelt van de Groenlandse ijskap), die zorgt dat de zoutconcentratie in Noord-Atlantisch water lager wordt, waardoor de dichtheid van het zeewater en daarmee de neiging om te zinken afneemt. De AMOC transporteert veel warmte van lagere breedtegraden naar noordwest Europa, waardoor het klimaat hier milder is dan elders op vergelijkbare breedtegraden. Het stilvallen van de AMOC zou dan ook ingrijpende gevolgen hebben voor het klimaat in Europa. Zo laten modelsimulaties een daling van de gemiddelde jaartemperatuur met 1-5 graden, een afname van de neerslag met tot 200 mm/jaar, en een toename van de wind zien (bijv. Jackson et al., 2015, Sgubin et al., 2017, Bellomo et al., 2023). De meest gedetailleerde voorspellingen tot nu toe worden gedaan door Van Westen et al. (2023). Mocht de AMOC stilvallen, en de analyse van deze auteurs laat zien dat het systeem zich deze kant op beweegt, dan kan Londen een afname tot 15 graden van de gemiddelde februaritemperatuur tegemoet zien, en van 4 graden in de zomer. Ook zal door dynamische effecten de zeespiegel in onze regio met ca. 50 cm extra stijgen. Inschattingen van de tijdschaal waarop de AMOC stil zou

kunnen komen te vallen liggen tussen de 15 en 300 jaar (zie Tabel 1). Maar let op: de stroming zwakt al sinds de jaren 1950 af, dus de klok loopt mogelijk al. De studie van Ditlevsen en Ditlevsen (2023) is de eerste die op basis van observaties een voorspelling doet van het stilvallen van de AMOC in deze eeuw (zie kader), mogelijk al binnen één of enkele decennia. Er valt het een en ander af te dingen op deze studie, bijvoorbeeld dat er gebruik wordt gemaakt van gereconstrueerde oppervlaktetemperaturen en dat het statistische model de nodige aannames bevat, maar het stilvallen is zeker mogelijk (Sybren Drijfhout, pers. comm.). Een belangrijke slag om de arm m.b.t. het mogelijke stilvallen is het inzicht uit modelstudies dat wanneer de forcering van een kantelement zeer snel wordt opgelegd in vergelijking tot het natuurlijke tijdsfad van het kantelement zelf, de omslag van de oude naar de nieuwe toestand vertraagd kan worden (Kim et al, 2022), en dat de vroege waarschuwingssignalen zoals die geanalyseerd door Ditlevsen en Ditlevsen (2023) geen herkenbaar signaal geven (Cox, 2023). De toename van het CO₂-gehalte van de atmosfeer en veranderingen in het klimaat voltrekken zich op dit moment op een ongekend tempo, waarmee er dus inderdaad sprake lijkt van een snelle forcering en verminderde bruikbaarheid van de vroege waarschuwingssignalen. Dit betekent niet dat de kanteling niet gaande kan zijn, maar dat we deze moeilijker als zodanig kunnen herkennen; ook is het



mogelijk dat deze door de snelle forcering juist vertraagd is.

Kantelpunten in klimaatmodellen en -scenario's

De activatie van kantelementen, waaronder het stilvallen van de AMOC, gebeurt spontaan in sommige gekoppelde klimaat-oceaanmodellen als gevolg van opwarming. Drijfhout et al. (2015) publiceerden een overzicht van plotselinge verschuivingen en kantelpunten in klimaat simulaties op basis van de CMIP5-modellen. Hierin vonden zij 37 regionale abrupte veranderingen in de oceaan, het zee-ijs, de sneeuwbedekking, de permafrost en de terrestrische biosfeer bij het overschrijden van bepaalde wereldwijde temperatuurstijgingen. Zij merken op dat specifieke gebeurtenissen vaak maar in enkele modellen van de CMIP-5-suite voorkomen. Sindsdien is er veel werk verricht om te begrijpen waarom sommige kantelementen wel of niet in modellen worden geactiveerd. Dit leidt tot de onderkenning dat gekoppelde klimaat-oceaanmodellen en Earth System Models weliswaar een ongelooflijke prestatie zijn in hun complexiteit en vermogen om heel veel aspecten van het klimaat te modelleren en voorspellen, maar desondanks nog steeds hun beperkingen kennen. Zo beschrijven Hewitt et al. (2022) dat de resolutie van gebruikte oceaanmodellen onvoldoende is om kleinschalige processen die bepalend kunnen zijn voor

de dynamica van de AMOC en het smelten van ijs goed op te lossen. Wang et al. (2023) geven een overzicht van het actuele wetenschappelijke kennis- en begripsniveau van 10 kantelementen en de mate waarin de relevante processen door modellen voorspeld kunnen worden. In veel gevallen worden beide aspecten als gemiddeld ("moderate") of minder bestempeld, met uitzondering van het noordelijke zeeijs (hoog respectievelijk gemiddeld tot hoog), en de AMOC, waarvoor het begrip als gemiddeld wordt bestempeld en wordt aangegeven dat het gedrag van de AMOC goed met modellen voorspelbaar lijkt, maar dat er aanzienlijke modelbeperkingen bij zijn. Deze auteurs concluderen echter dat effecten van klimaatkantelpunten waarschijnlijk secundair zullen zijn aan door de mens veroorzaakte opwarming van de aarde. Opgemerkt moet worden dat dit op regionale schaal mogelijk anders ligt.

Wat schrijven het IPCC en het KNMI over klimaatkantelpunten?

In de laatste cyclus van de IPCC-rapportages is voor het eerst duidelijk aandacht gekomen voor klimaatkantelpunten. Gebrek aan overweldigend bewijs leidt tot voorzichtige uitspraken hierover. "Abrupte reacties en omslagpunten van het klimaatstelsel, zoals een sterk toegenomen afsmelting van de ijskap op Antarctica en massale

Kader: vroege waarschuwingssignalen

Brovkin et al. (2021) beschrijven, in navolging van Dakos et al. (2008), vroege waarschuwingssignalen (Early Warning Signals, EWS) als "kwantitatieve indicatoren van de nabijheid van een omslagpunt in een systeem, [door] wiskundige principes van dynamische systemen toe te passen op componenten van het aardsysteem". Zij zoeken vaak naar een toename van de variantie, geïnterpreteerd als verminderde veerkracht, en/of de autocorrelatie, geïnterpreteerd als kritische vertraging, van relevante (gemeten of gereconstrueerde) signalen. Het signaal dat door Ditlevsen en Ditlevsen (2023) wordt geanalyseerd is de zogenaamde AMOC-vingerafdruk, gedefinieerd als de afwijking van de zeeoppervlaktetemperatuur van de subpolaire wervel min tweemaal de wereldgemiddelde afwijking van de zeeoppervlaktetemperatuur. Brovkin et al. (2021) merken op dat de interpretatie van deze signalen niet eenvoudig of eenduidig is "omdat de klimaatvariabiliteit kan veranderen om vele redenen die niets te maken hebben met veranderingen in stabiliteit", vanwege de ruimtelijke complexiteit van het aardoppervlak en de verschillende relevante componenten, en de mogelijkheid van cascade van veranderingen in het klimaatstelsel.



bossterfte, kunnen niet worden uitgesloten (hoge betrouwbaarheid)". Verder: "het paleoklimaat geeft aan dat er omslagelementen bestaan in het klimaatstelsel... Voor mondiale klimaatindicatoren is het bewijs voor abrupte verandering beperkt... Op regionale schaal... kan dit niet worden uitgesloten (hoge betrouwbaarheid)". En met betrekking tot Antarctica: "Er is beperkt bewijs voor resultaten met een lage waarschijnlijkheid en een grote impact". Feitelijk is de kans van dergelijke gebeurtenissen zeer moeilijk in te schatten (niet goed in de modellen, beperkte observaties), zodat er eigenlijk sprake is van een onbekende waarschijnlijkheid. Desalniettemin heeft het KNMI in de KNMI'23-scenario's voor de zeespiegelstijging een drietal aanvullend scenario's opgenomen met verondersteld lage kans en grote impact die verband houden met het kantelement van de West-Antarctische ijskap (WAIS), waarvan de activering tot aanzienlijke extra zeespiegelstijging zou kunnen leiden, in totaal tot 2,5 m in 2100 en daarna nog (veel) meer.

Optreden van snelle en ingrijpende klimatologische veranderingen in de recente geschiedenis

Een andere manier om meer grip te krijgen op kantelpunten is het onderzoeken van van snelle en ingrijpende veranderingen in het klimaat in het "recente" verleden van onze planeet. Brovkin et al.

(2021) geven een overzicht van abrupte veranderingen en omslagpunten over de afgelopen 30.000 jaar in diverse regio's op Aarde. Ook in Nederland zijn in jaarringen van 13.000-jaar oude dennen aanwijzingen gevonden voor een sterke afkoeling én vernatting (Waarlo, 2017). Brovkin et al. (2021) schrijven dat verschillende "abrupte klimaatveranderingen werden geassocieerd met substantiële veranderingen in de AMOC" die verband houden met de interacties tussen de cryosfeer (sneeuw en ijs) en de oceaan. Andere abrupte veranderingen zijn gerelateerd aan het smelten van ijskappen, zeespiegelstijging, opwarming van de oceanen en verschuivingen van moessonregens. Ze laten zien hoe deze veranderingen van invloed waren op menselijke beschavingen door hun sterke invloed op ecosystemen. De belangrijkste les uit hun overzicht is dat zich de afgelopen 30.000 jaar zeker 6 keer een abrupte grootschalige verandering heeft voorgedaan die gepaard ging met grote regionale temperatuurveranderingen (4-16 graden) en veranderingen of verschuivingen in de moessons en dat deze veranderingen zich voltrokken over perioden van maximaal enkele tot een aantal decennia, soms slechts over enkele jaren, alle ten gevolge van natuurlijke factoren (forcering). Deze studie onderstreept dat abrupte veranderingen in ons klimaatstelsel mogelijk zijn. Het Holoceen (de afgelopen 10.000 jaar) wordt vaak als een klimatologisch stabiele periode beschouwd; buiten holocene condities

wordt het activeren van kantelementen waarschijnlijker.

Samenvattend: diepe onzekerheid in klimaatprojecties

Diepe onzekerheid ("deep uncertainty") is een technische term voor de onvoorspelbaarheid van complexe systemen door gebrek aan overeenstemming over uitgangspunten of het juiste voorspelmodel en door (sociale) interacties die de uitkomst beïnvloeden. Hierbij is sprake van gebrek aan overeenstemming over te gebruiken modellen en is er een brede waaier aan mogelijke uitkomsten – deze onzekerheid gaat dus voorbij statistische onzekerheid. Diepe onzekerheid is van toepassing op een aantal van de hierboven beschreven aspecten van klimaatmodellering en daarmee ook op hun uitkomsten als geheel. Het bovenstaande overziend kan worden geconstateerd dat er een aanzienlijke en deels diepe onzekerheid in klimaatmodelvoorspellingen en klimaatscenario's aanwezig is. Klimaatwetenschappers blijken zelf soms verrast te worden door de snelheid en omvang van de veranderingen. Voor een deel is de onzekerheid in voorspellingen expliciet gemaakt. De diepe onzekerheid in de ontwikkeling van de mondiale maatschappij en de uitstoot van broeikasgassen wordt weergegeven door de reeks SSP-scenario's (gedeelte sociaal-economische paden, Figuur 1), die elk expliciet een scenario in de IPCC-suite vormen, en waarvan enkele (SSP1-2.6 en



SSP5-8.5) hun representant hebben in de KNMI'23-scenario's. Hoewel het denkbaar is dat de mondiale maatschappij en de uitstoot zich volgens andere lijnen ontwikkelen, lijken deze scenario's plausible hoekpunten te vormen. De bijhorende ontwikkeling van het klimaat, in eerste instantie weergegeven via de ontwikkeling van de mondiale gemiddelde oppervlaktetemperatuur, volgt door toepassing van klimaatmodellen op de forceringen die deze SSP's voorschrijven. De onzekerheden in en verschillen tussen deze modellen resulteren in een bandbreedte voor de klimaatprojecties die een deel van de modelonzekerheid representeren. Deze bandbreedte volgt uit de modellen, is beschikbaar voor detailstudies, en wordt gerapporteerd voor de SSP1-1.9 t/m SSP5-8.5 scenario's. Veel studies passen echter de gemiddelde resultaten (Tebaldi et al., 2020) van deze simulaties toe (de curves van Figuur 2) en niet die uit de (brede) kansverdeling hieromheen (in Figuur 2 weergegeven voor SSP1-2.6 en SSP3-7.0).

Verder zijn niet (volledig) in deze bandbreedte opgenomen:

- onvolledig begrip en parametrisatie van processen gedeeld door alle modellen (Wang et al., 2023);
- onzekerheden ten gevolge van grenzen aan de modelresolutie (Hewitt et al, 2022).

Beide groepen onzekerheden kunnen resulteren in het verminderd, vertraagd, of niet optreden van de activatie van kantelementen in de klimaatmodellen of het optreden of de intensiteit van andere atmosferische fenomenen, zoals blokkerende weerpatronen, waardoor zij mogelijk onterecht buiten zicht blijven in klimaatscenario's. Beide klassen gebeurtenissen kunnen een grote verandering in regionale weer- en klimaatparameters veroorzaken.

Omdat deze processen niet volledig of adequaat in aardsysteemmodellen zijn opgenomen, kunnen deze modellen ook niet gebruikt worden om hun kans van optreden te kwantificeren. Vaak wordt de expert-inschatting gemaakt dat de kans van optreden laag is, waardoor men spreekt over High-Impact-Low-Likelihood gebeurtenissen. Feitelijk is de kans van optreden van deze gebeurtenissen echter niet bekend. Het mogelijke belang van met name de klimaatkantelpunten wordt onderschreven door de groeiende belangstelling hiervoor in de wetenschappelijke literatuur, het opzetten van op dit onderwerp gerichte projecten, en de voorbereiding van rapporten voor een breder publiek. Ook het optreden van variaties binnen een voorspeld klimaat (oftewel, het dan optredende weer) is aan onzekerheid onderhevig, die voort kan komen uit modelbeperkingen. Het optreden van extreem weer, met name hittegolven, blijkt door de meest recente generaties klimaatmodellen te worden onderschat.

Met zijn opname van het kantelpunt van de West-Antarctische ijskap (WAIS) in de zeespiegelvoorspellingen bij de nieuwe KNMI'23-scenarios onderschrijft dit instituut het belang van het verkennen van scenario's met een lage (of eigenlijk moeilijk kwantificeerbare) waarschijnlijkheid maar ingrijpende consequenties. Zoals hierboven beschreven bestaan er meer van deze scenario's die voor de watersector hoogst relevant kunnen zijn. Hieronder beschrijven wij nader hoe en waarom.



Relevantie

Omgang met klimaatscenario's

Al het bovenstaande leidt in de eerste plaats tot de onderkenning dat klimaatmodellen/ aardsysteem-modellen een ongelooflijke prestatie zijn in hun complexiteit en vermogen om heel veel aspecten van het klimaat te modelleren en voorspellen. We moeten echter ook vaststellen dat 1) deze modellen ook nu nog te veel onzekerheden en lacunes bevatten om er volledig van uit te gaan, 2) dat ook klimaatwetenschappers zich nog steeds laten verrassen door recent extreem weer, en dat het Aardse klimaat in het verleden met enige regelmaat abrupte veranderingen heeft laten zien. Er zit dus nog enige ruimte tussen het gedrag van klimaatmodellen en de hierop gebaseerde scenario's enerzijds en het gedrag van het systeem Aarde anderzijds. Dit betekent niet dat klimaatscenario's zoals die van IPCC en KNMI geen nut hebben. Integendeel: zij geven een duidelijke richting aan waarin we ons volgens de huidige inzichten bewegen. Daarbij bieden ze plausibele toekomstscenario's die enerzijds extra aansporing geven tot mitigatiemaatregelen en anderzijds handvatten bieden voor klimaatadaptatie, en gebruik als zodanig wordt van harte aanbevolen. Het is echter belangrijk te begrijpen dat zij geen *volledige* verzameling van relevante plausibele scenario's bieden.

Tabel 2: Overzicht (globaal, niet uitputtend) van mogelijke effecten op drinkwaterwinning, bereiding en distributie van twee verschillende klassen van klimaatscenario's: 1) klimaatopwarming en (seizoensgebonden) droogte en 2) regionale klimaatafkoeling en (seizoensgebonden) droogte.

Klimaatopwarming & (seizoensgebonden) droogte			Regionale klimaatafkoeling & (seizoensgebonden) droogte		
	Directe effecten	Mitigatie		Directe effecten	Mitigatie
↑ droogte	↓ beschikbaarheid van zoet water ¹	alternatieve bronnen, reservoirs	↑ droogte	↓ beschikbaarheid van zoet water ¹	alternatieve bronnen, reservoirs
	↑ leidingbreuk door grondzetting ⁶			↑ leidingbreuk door grondzetting ⁶	
	↑ binnendringen van verontreinigingen in het grondwater ²			↑ binnendringen van verontreinigingen in het grondwater ²	
	Achteruitgang oppervlaktewaterkwaliteit door concentratie van contaminanten ⁹			Achteruitgang oppervlaktewaterkwaliteit door concentratie van contaminanten ⁹	
↑ zeeniveau	↑ zoutwaterintrusie ¹	aanvulling van aquifer	↑↑ zeeniveau	↑ zoutwaterintrusie ¹	aanvulling van aquifer
	↑ corrosie en degradatie van leidingen ¹			↑ corrosie en degradatie van leidingen ¹	
↑ Temperaturen	↑ oververhitting pompen ¹		↓ temperaturen	↓ efficiëntie van behandelingsprocessen ³	ontwerp, selectie van chemicaliën ³
	↑ corrosie en degradatie van leidingen ¹				
	↑ watervraag ¹	nudging, beprijzing, beperkingen			
	↑ groei van pathogenen ¹	diepere installatie ⁸			
↑ extreme neerslag	↑ uitzetting van de grond en breuken in ondergrondse leidingen ¹		↑ vries-dooicycli	↑ breuk van ondergrondse leidingen ^{1,5,6}	diepere installatie ³
	ruwwater ↑ troebelheid en ↓ pH ¹				
	↑ overstromingsschade ¹	beschermingsmaatregelen overstromingen			
	↑ verontreiniging door overstroming ¹⁰				
↑ natuurbranden	↑ bronvervuiling ⁷				
	↑ schade aan infrastructuur ¹				

¹ Lyle et al. (2023); ² Uhl et al. (2022); ³ Vahala (2016); ⁴ Valdivia-Garcia et al. (2019); ⁵ Bruaset and Sægrov (2018); ⁶ Wols & Van Thienen (2016); ⁷ Paul et al. (2022); ⁸ Agudelo Vera et al. (2020); ⁹ Sjeros et al. (2017); ¹⁰ Stoffberg et al. (2023)



Aanvullende behoeften

Het is voor de watersector belangrijk om ook andere plausibele scenario's te verkennen ten behoeve van planning en dimensionering van bronnen, zuiveringsinstallaties en leidinginfrastructuur. Waterinfrastructuur wordt gebouwd voor vele decennia en ook het realiseren van nieuwe winlocaties en de planning, het ontwerp en de aanleg van infrastructuur kunnen veel tijd vergen. Snel schakelen is moeilijk, en daarom is het essentieel om een zo breed mogelijk beeld te hebben van mogelijke toekomst. Aanvullende plausibele scenario's voor klimaatverandering kunnen aanzienlijk afwijken van de 'gangbare' klimaatscenario's en vullen deze daarmee aan. Hiermee ontstaat een scherper beeld van de grenzen van wat verwacht kan worden (bijvoorbeeld m.b.t. waterbeschikbaarheid en -vraag door het jaar heen) en op welke tijdschaal eventuele adaptatiemaatregelen moeten kunnen worden geïmplementeerd. Zo worden de risico's van maladaptatie, oftewel het aangepast zijn aan niet langer relevante omstandigheden, zoveel mogelijk vermeden.

Vanuit de bovenstaande beschouwing van onzekerheden in klimaatprojecties kunnen er voor de watersector twee klassen van studies worden aanbevolen die bestaande studies t.b.v. adaptatie op basis van gangbare klimaatscenario's aanvullen: 1) uitgaan van de extreme kant van de simulaties die ten grondslag liggen aan de

respectievelijke SSP-scenario's, bijvoorbeeld het 95^e percentiel – het wetenschappelijke rapport bij de klimaatscenario's (Van Dorland et al., 2023) biedt handvatten om de KNMI-scenario's te schalen naar deze meer extreme kant; 2) het beschouwen van aanvullende, meer storyline-achtige scenario's (Sillmann et al., 2021) waarin een of meer kantelementen of andere relevante processen worden geactiveerd.

Waar moet de watersector rekening mee houden?

De bovenstaande beschrijving van kantelementen en andere atmosferische processen en hun mogelijke effecten op het klimaat is verre van compleet. Ten opzicht van de gangbare klimaatscenario's kunnen we echter wel twee klassen van scenario's beschrijven die hun effecten weergeven: 1) verdere opwarming en droogte (mogelijk seizoensgebonden) en 2) afkoeling, droogte (mogelijk seizoensgebonden) en verder versterkte zeespiegelstijging. De eerste groep past bij de rechterkant van de kansverdeling die hoort bij de SSP-scenario's en/of activatie van kantelementen met een positief temperatureffect. De tweede groep past bij het activeren van de kantelementen in de Labradorzee en AMOC. Bij beide groep zijn diverse effecten te verwachten op beschikbaarheid, behandeling en distributie van drinkwater. Een (globaal en niet uitputtend) overzicht van deze effecten en mogelijke mitigerende maatregelen, op basis van de literatuur,

wordt geboden in Tabel 2. Bij alle opwarmingsscenario's moet rekening worden gehouden met frequenter extreem weer. Er lijkt op dit moment in de wetenschappelijke literatuur nog geen overeenstemming te zijn over de vraag hoe groot de toename in extreem weer (frequentie en intensiteit) zal zijn. Wel kunnen in Europa weerblokkades zorgen voor extra droogte en hitte óf extra neerslag, bovenop datgene wat door de klimaatscenario's wordt voorspeld.

Besluitvorming onder diepe onzekerheid

De geboden opsomming van onzekerheden en breed uiteenlopende scenario's kan de indruk wekken dat het voor de watersector onmogelijk is om zich op deze diepe onzekere toekomst voor te bereiden. Dit is echter niet het geval. Ten eerste is het altijd aan te bevelen te onderzoeken welke veranderingen behoorlijk zeker zijn onder verschillende scenario's (zie Tabel 2) en welke noregretmaatregelen kunnen worden genomen, idealiter met de mogelijkheid voor flexibel op- of afschalen op basis van voortschrijdend inzicht over de scenario's.

Ten tweede bestaan er, hoewel het wellicht onmogelijk is om infrastructuur te ontwerpen en bouwen die robuust is onder alle geschetste omstandigheden, wel degelijk verschillende technieken om met deze diepe onzekerheid om te gaan bij het maken van keuzes over aanleg en ontwerp van infrastructuur voor



waterwinning, -productie en -distributie. Bekende voorbeelden zijn Dynamic Adaptive (Policy) Pathways, Flexibel ontwerp (engineering options, real options) en Robust Decision Making. Marchau et al. (2019) geven een overzicht van deze methoden; een introductie wordt geboden op <https://toolkit.climate.gov/course-lessons/decision-making-under-deep-uncertainty-dmdu>. Deze methoden en hun specifieke toepassing op drinkwater vormen het onderwerp van lopend (Water Futures) en gepland (BTO verkennend) onderzoek.

Meer informatie

Heel veel informatie over klimaatkantelpunten is beschikbaar in de vorm van webinars en opnames van online discussies. Deze zijn te vinden op <https://tippingpointseries.confetti.events/>. Dit is een initiatief van enkele internationale netwerken van (klimaat)wetenschappers, waaronder het AIMES project (Analysis, Integration, and Modeling of the Earth System) en het World Climate Research Programme. Daarnaast is veel informatie beschikbaar op <https://global-tipping-points.org/>. Dit initiatief wordt geleid door Prof. Timothy Lenton van de universiteit van Exeter en ondersteund door meer dan 200 mensen van meer dan 90 organisaties uit 26 landen. Hier wordt in december 2023 een *Global Tipping Points Report* gepubliceerd.

Literatuurverwijzingen

- Agudelo-Vera, C.M., Avvedimento, S., Boxall, J. et al. – Drinking water temperature around the globe: understanding, policies, challenges and opportunities – *Water* 12(2020)4, art. no. 1049 – DOI: 10.3390/w12041049
- Armstrong McKay, D. I., Staal, A., Abrams, J. F., Winkelmann, R., Sakschewski, B., Loriani, S., ... & Lenton, T. M. (2022). Exceeding 1.5 C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science*, 377(6611), eabn7950.
- Bakker, M. (2023) Gaat de opwarming sneller dan verwacht? Zes redenen waarom klimaatmodellen de hitte-extremen onderschatten. De Volkskrant. <https://www.volkskrant.nl/kijkverder/v/2023/het-wordt-nu-wel-erg-warm-zes-redenen-waarom-klimaatmodellen-de-hitte-extremen-onderschatten~v824091/>
- Bellomo, K., Meccia, V. L., D'Agostino, R., Fabiano, F., Larson, S. M., von Hardenberg, J., & Corti, S. (2023). Impacts of a weakened AMOC on precipitation over the Euro-Atlantic region in the EC-Earth3 climate model. *Climate Dynamics*, 1-20.
- Borgshoef, L. (2023) Onderzoek: motor oceanstroming kan abrupt tot stilstand komen rond 2050. NRC. <https://www.nrc.nl/nieuws/2023/07/26/motor-grote-oceanstroming-kan-plotseling-uitvallen-a4170613>
- Borodina, A., Fischer, E. M., & Knutti, R. (2017). Models are likely to underestimate increase in heavy rainfall in the extratropical regions with high rainfall intensity. *Geophysical Research Letters*, 44(14), 7401-7409.
- Brown D.A. (2020) Lessons Learned from IPCC's Underestimation of Climate Change Impacts About the Need for a Precautionary Climate Change Science. In: Westra L., Bosselmann K., Fermeiglia M. (eds) *Ecological Integrity in Science and Law*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46259-8_1
- Brovkin, V., Brook, E., Williams, J. W., Bathiany, S., Lenton, T. M., Barton, M., ... & Yu, Z. (2021). Past abrupt changes, tipping points and cascading impacts in the Earth system. *Nature Geoscience*, 14(8), 550-558.
- Brysse, K., Oreskes, N., O'reilly, J., & Oppenheimer, M. (2013). Climate change prediction: Erring on the side of least drama? *Global environmental change*, 23(1), 327-337. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378012001215?via%3Dihub>
- CarbonBrief (2017) Analysis: how well have climate models projected global warming? <https://www.carbonbrief.org/analysis-how-well->



- [have-climate-models-projected-global-warming/](#), bezocht op 19 september 2023.
- CarbonBrief (2018) Explainer: How 'Shared Socioeconomic Pathways' explore future climate change. <https://www.carbonbrief.org/explainer-how-shared-socioeconomic-pathways-explore-future-climate-change/>, bezocht op 21 september 2023.
 - CarbonBrief (2023) State of the climate: 2023 now likely hottest year on record after extreme summer. <https://www.carbonbrief.org/state-of-the-climate-2023-now-likely-hottest-year-on-record-after-extreme-summer/>, bezocht op 19 september 2023.
 - Damian Carrington (2023) From climate change 'certainty' to rapid decline: a timeline of IPCC reports. The Guardian. <https://www.theguardian.com/environment/2023/mar/20/from-climate-change-certainty-to-rapid-decline-a-timeline-of-ipcc-reports>
 - Carvalho, D., Rafael, S., Monteiro, A., Rodrigues, V., Lopes, M., & Rocha, A. (2022). How well have CMIP3, CMIP5 and CMIP6 future climate projections portrayed the recently observed warming. *Scientific Reports*, 12(1), 11983.
 - Contzen, J., Dickhaus, T., & Lohmann, G. (2023). Long-term temporal evolution of extreme temperature in a warming Earth. *Plos one*, 18(2), e0280503.
 - CORDEX (2023) <https://cordex.org/about/what-is-regional-downscaling/>, bezocht op 4 oktober 2023
 - Cox, P. (2023) presentatie in webinar "Managing the risks from climate tipping points", UK Met Office, 26 september 2023, <https://youtu.be/ddyUfBSezmA?t=240>
 - Dakos, V., Scheffer, M., Van Nes, E. H., Brovkin, V., Petoukhov, V., & Held, H. (2008). Slowing down as an early warning signal for abrupt climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(38), 14308-14312.
 - Ditlevsen, P., & Ditlevsen, S. (2023). Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation. *Nature Communications*, 14(1), 4254. <https://www.nature.com/articles/s41467-023-39810-w>
 - Van Dorland, R., J. Beersma, J. Bessembinder, N. Bloemendaal, H. van den Brink M. Brotons Blanes, S. Drijfhout, R. Groenland, R. Haarsma, C. Homan, I. Keizer, F. Krikken, D. Le Bars, G. Lenderink, E. van Meijgaard, J. F. Meirink, B. Overbeek, T. Reerink, F. Selten, C. Severijns, P. Siegmund, A. Sterl, C. de Valk, P. van Velthoven, H. de Vries, M. van Weele, B. Wichers Schreur, K. van der Wiel (2023) KNMI National Climate Scenarios 2023 for the Netherlands. Wetenschappelijk rapport bij de KNMI'23 scenario's. https://cdn.knmi.nl/system/data_center_publication/files/000/071/902/original/KNMI23_climate_scenarios_scientific_report_WR23-02.pdf
 - Drijfhout, S. (2015). Competition between global warming and an abrupt collapse of the AMOC in Earth's energy imbalance. *Scientific reports*, 5(1), 14877.
 - Drijfhout, S., Bathiany, S., Beaulieu, C., Brovkin, V., Claussen, M., Huntingford, C., ... & Swingedouw, D. (2015). Catalogue of abrupt shifts in Intergovernmental Panel on Climate Change climate models. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(43), E5777-E5786.
 - DWSI (2010) Klimaat: waar gaan we als watersector vanuit? Dutch Water Sector Intelligence trendalert.
 - EEA (European Environmental Agency) (2023) Global and European temperatures. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/global-and-european-temperatures>, bezocht op 1 november 2023.
 - Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E.: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geosci. Model Dev.*, 9, 1937-1958, doi:10.5194/gmd-9-1937-2016, 2016.
 - Hewitt, H., Fox-Kemper, B., Pearson, B., Roberts, M., & Klocke, D. (2022). The small scales of the ocean



- may hold the key to surprises. *Nature Climate Change*, 12(6), 496-499.
- 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* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
 - Jackson, L. C., Kahana, R., Graham, T., Ringer, M. A., Woollings, T., Mecking, J. V., & Wood, R. A. (2015). Global and European climate impacts of a slowdown of the AMOC in a high resolution GCM. *Climate dynamics*, 45, 3299-3316.
 - Jackson, L. C., Alastrué de Asenjo, E., Bellomo, K., Danabasoglu, G., Haak, H., Hu, A., et al. (2023). Understanding AMOC stability: the North Atlantic Hosing Model Intercomparison Project. *Geoscientific Model Development*, 16, 1975-1995. doi:10.5194/gmd-16-1975-2023.
 - Kautz, Lisa-Ann, et al. "Atmospheric blocking and weather extremes over the Euro-Atlantic sector—a review." *Weather and climate dynamics* 3.1 (2022): 305-336.
 - Kim, Y. H., Min, S. K., Zhang, X., Sillmann, J., & Sandstad, M. (2020). Evaluation of the CMIP6 multi-model ensemble for climate extreme indices. *Weather and Climate Extremes*, 29, 100269.
 - Kim, S. K., Kim, H. J., Dijkstra, H. A., & An, S. I. (2022). Slow and soft passage through tipping point of the Atlantic Meridional Overturning Circulation in a changing climate. *npj Climate and Atmospheric Science*, 5(1), 13.
 - KNMI (2023a) Noord-Atlantische Oceaan was in de lente nog nooit zo warm. <https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/de-extreem-warme-noord-atlantische-oceaan>, bezocht op 19 september 2023.
 - KNMI (2023b) KNMI'23 klimaatscenario's voor Nederland. https://cdn.knmi.nl/system/data_center_publication_s/files/000/071/901/original/KNMI23_klimaatscenario_gebruikersrapport_23-03.pdf
 - Kornhuber, K., Osprey, S., Coumou, D., Petri, S., Petoukhov, V., Rahmstorf, S., & Gray, L. (2019). Extreme weather events in early summer 2018 connected by a recurrent hemispheric wave-7 pattern. *Environmental Research Letters*, 14(5), 054002.
 - Lenton, T. M., & Schellnhuber, H. J. (2007). Tipping the scales. *Nature Climate Change*, 1(712), 97-98.
 - Lenton, T. M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J. W., Lucht, W., Rahmstorf, S., & Schellnhuber, H. J. (2008). Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the national Academy of Sciences*, 105(6), 1786-1793.
 - Lenton, T. M., Rockström, J., Gaffney, O., Rahmstorf, S., Richardson, K., Steffen, W., & Schellnhuber, H. J. (2019). Climate tipping points—too risky to bet against. *Nature*, 575(7784), 592-595.
 - Luo, F., Selten, F., Wehrli, K., Kornhuber, K., Le Sager, P., May, W., ... & Coumou, D. (2022). Summertime Rossby waves in climate models: Substantial biases in surface imprint associated with small biases in upper-level circulation. *Weather and Climate Dynamics*, 3(3), 905-935.
 - Marchau, V. A., Walker, W. E., Bloemen, P. J., & Popper, S. W. (2019). Decision making under deep uncertainty: from theory to practice (p. 405). Springer Nature.
 - Pflleiderer, P., Schleussner, C. F., Kornhuber, K., & Coumou, D. (2019). Summer weather becomes more persistent in a 2 C world. *Nature Climate Change*, 9(9), 666-671.
 - Philip, S., Kew, S., Vautard, R., Vahlberg, M., Singh, R., Driouech, F., ... & Otto, F. (2023). Extreme April heat in Spain, Portugal, Morocco & Algeria almost impossible without climate change. <https://spiral.imperial.ac.uk/handle/10044/1/103833>
 - Pradhan, P., Seydewitz, T., Zhou, B., Lüdeke, M. K., & Kropp, J. P. (2022). Climate extremes are becoming



- more frequent, co-occurring, and persistent in Europe. *Anthropocene Science*, 1(2), 264-277.
- Scherer, G. (2012) Climate Science Predictions Prove Too Conservative. *Scientific American*. <https://www.scientificamerican.com/article/climate-science-predictions-prove-too-conservative/>, bezocht op 21 september 2023.
 - Sgubin, G., Swingedouw, D., Drijfhout, S., Mary, Y., & Bennabi, A. (2017). Abrupt cooling over the North Atlantic in modern climate models. *Nature Communications*, 8(1), 14375.
 - Siegmund, P. (2023) Nederland warmt vooral op bij gewone temperaturen. <https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/nederland-warmt-vooral-op-bij-gewone-temperaturen>, bezocht op 19 oktober 2023
 - Sillmann, J., Shepherd, T. G., van den Hurk, B., Hazeleger, W., Martius, O., Slingo, J., & Zscheischler, J. (2021). Event-based storylines to address climate risk. *Earth's Future*, 9(2), e2020EF001783.
 - Rosa M.A. Sjerps, Thomas L. ter Laak, Gertjan J.J.G. Zwolsman (2017) Projected impact of climate change and chemical emissions on the water quality of the European rivers Rhine and Meuse: A drinking water perspective, *Science of The Total Environment*, 601–602, 1682-1694, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.250>
 - Soares, P. M., Lemos, G., & Lima, D. C. (2023). Critical analysis of CMIPs past climate model projections in a regional context: The Iberian climate. *International Journal of Climatology*, 43(5), 2250-2270.
 - Sørland, S. L., Brogli, R., Pothapakula, P. K., Russo, E., Van de Walle, J., Ahrens, B., ... & Thiery, W. (2021). COSMO-CLM regional climate simulations in the CORDEX framework: A review. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2021, 1-44.
 - Spratt en Dunlop (2018) What lies beneath. The understatement of existential climate risk. Breakthrough Institute. https://docs.wixstatic.com/ugd/148cb0_a0d7c18a1bf64e698a9c8c8f18a42889.pdf
 - Stofberg, S.F., Engelenburg, J. van, Broers, E. (2023) Klimateffecten op drinkwaterwinningen. BTO 2023.065, KWR, Nieuwegein (te verschijnen)
 - Tebaldi, C., Debeire, K., Eyring, V., Fischer, E., Fyfe, J., Friedlingstein, P., ... & Ziehn, T. (2020). Climate model projections from the scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) of CMIP6. *Earth System Dynamics Discussions*, 2020, 1-50.
 - Vautard, R., Kadyrov, N., Iles, C., Boberg, F., Buonomo, E., Bülow, K., ... & Wulfmeyer, V. (2021). Evaluation of the large EURO-CORDEX regional climate model ensemble. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(17), e2019JD032344.
 - R. Vautard, J. Cattiaux, T. Happé, J. Singh, R. Bonnet, et al.. (2023) Heat extremes in Western Europe are increasing faster than simulated due to missed atmospheric circulation trends. 2023. hal-03937057v, <https://hal.science/hal-03937057v2/document>
 - De Vries, H., I. de Vries en F. Selten (2022) Ieder jaar een verpletterend hitterecord? KNMI klimaatbericht. <https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/ieder-jaar-een-verpletterend-hitterecord>, bezocht op 1 november 2023.
 - Wang, S., Foster, A., Lenz, E. A., Kessler, J. D., Stroeve, J. C., Anderson, L. O., ... & Hausfather, Z. (2023). Mechanisms and impacts of Earth system tipping elements. *Reviews of Geophysics*, 61(1), e2021RG000757.
 - Jonathan Watts (2018) We have 12 years to limit climate change catastrophe, warns UN. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/environment/2018/oct/08/global-warming-must-not-exceed-15c-warns-landmark-un-report>
 - Van der Wel, Narelle (2023) Managing the risks from climate tipping points: research activities. presentatie in webinar “Managing the risks from climate tipping points”, UK Met Office, 26 september 2023, <https://youtu.be/ddyUfBSezmA?t=819>
 - van Westen, R. M., Kliphuis, M., & Dijkstra, H. A. (2023). New Physics-Based Early Warning Signal shows AMOC is on Tipping Course. arXiv preprint arXiv:2308.01688.



- Vonk, E., Cirkel, D.G., Leunk, I., 2017. De gevolgen van klimaatverandering en vakantiespreiding voor de drinkwatervraag. BTO 2017.043, KWR, Nieuwegein.
- Waarlo, N. (2017) Wat heet het 13.000 jaar oude dennenbos uit Leusden ons te vertellen? <https://scientias.nl/13-000-jaar-oude-dennenbos-leusden-vertellen/>, bezocht op 12 oktober 2023.
- Wang, S., Foster, A., Lenz, E. A., Kessler, J. D., Stroeve, J. C., Anderson, L. O., ... & Hausfather, Z. (2023). Mechanisms and impacts of Earth system tipping elements. *Reviews of Geophysics*, 61(1), e2021RG000757.
- van der Wiel, K., & Bintanja, R. (2021). Contribution of climatic changes in mean and variability to monthly temperature and precipitation extremes. *Communications Earth & Environment*, 2(1), 1.
- Witze, A. (2022). Extreme heatwaves: Surprising lessons from the record warmth. *Nature*, 608. <https://www.nature.com/articles/d41586-022-02114-y>
- Wolters, H.A., Hunink, J., Delsman, J., De Lange, G.J., Van den Born, G.J., Reinhard, S., 2018a. Deltascenario's voor de 21e eeuw. Achtergrondrapport over gebruiksfuncties en sectoren. Actualisering 2017. , Deltares, Utrecht.
- Wolters, H.A., Van den Born, G.J., Dammers, E., Reinhard, S., 2018b. Deltascenario's voor de 21e eeuw. Hoofdrapport. Actualisering 2017, Deltares, Utrecht.

Over de geraadpleegde bronnen

Naast wetenschappelijke literatuur, IPCC- en KNMI-rapporten put dit trendalert ook uit publieke media en internetbronnen, met name Carbon Brief (<https://www.carbonbrief.org/>). Dit is een journalistieke website uit het Verenigd Koninkrijk die is gespecialiseerd in de wetenschap en het beleid op het gebied van klimaatverandering. Zij hebben verschillende prijzen gewonnen voor hun journalistiek en datavisualisatie.

Keywords

klimaatverandering, kantelpunten, extremen