

De betekenis van klimaatkantelpunten voor drinkwater

Peter van Thienen, Herbert ter Maat en Sija Stofberg (KWR Water Research Institute)

Klimaatscenario's zijn belangrijk voor waterbedrijven die zich willen voorbereiden op de gevolgen van klimaatverandering. Vanwege de lange levensduur van infrastructuur en lange doorlooptijden van ontwerp en aanleg is ver vooruitkijken noodzakelijk. Niet alle mogelijke ontwikkelingen van het klimaat zijn echter opgenomen in veelgebruikte klimaatscenario's. Voorbeelden hiervan zijn klimaatkantelpunten. Een mogelijke ineenstorting van de Atlantische Meridionale Overkiepende Circulatie (AMOC) voegt een nieuwe klasse klimaatscenario's toe. Voor Europa kan dit aanzienlijke gevolgen hebben over een periode van mogelijk slechts enkele tientallen jaren. Monitoring van vroege waarschuwingssignalen is essentieel, evenals het vergroten van de flexibiliteit van de drinkwatervoorziening.

Klimaatscenario's, zoals die van het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) en het KNMI, zijn belangrijk voor waterbedrijven die zich willen voorbereiden op de gevolgen van klimaatverandering. Vanwege de lange levensduur van infrastructuur en lange doorlooptijden van ontwerp en aanleg van nieuwe infrastructuur is vooruitkijken noodzakelijk. De klimaatscenario's van de wetenschappelijke gemeenschap zijn een wetenschappelijke topprestatie, maar geven desalniettemin niet alle relevante aspecten en ontwikkelingen van het klimaat weer. Klimaatonderzoekers onderkennen dit probleem en stellen aanvullende benaderingen, zoals storylines [1], voor. Daarin wordt een specifieke mogelijke klimaatontwikkeling verhalend beschreven. Veel gebruikers van klimaatscenario's houden hier echter geen rekening mee en zien niet dat de modellen niet alle onzekerheden geven. Dit betekent dat er onverwachte veranderingen in het klimaat mogelijk zijn en een reëel risico kunnen vormen. Dit is vooral zo als bepaalde klimaatelementen, zoals 'kantelpunten', worden geactiveerd die in deze modellen niet goed tot uiting komen.

Klimaatkantelpunten

Veel processen op aarde reageren op een voorspelbare manier op verstoringen. Als de hoeveelheid CO₂ in de lucht bijvoorbeeld verdubbelt, wordt het gemiddeld enkele graden warmer (de schatting is nu tussen 1,8 en 5,6 graden Celsius). Soms kan het overschrijden van een bepaalde drempel (een kantelpunt) in een groot natuurlijk systeem (een kantelement) grote invloed hebben op het klimaat. Een goed voorbeeld van zo'n kantelement is het poolijs op de Noordelijke IJszee. Als dit ijs smelt, absorbeert de zee meer zonlicht (ijs weerkaatst meer zonlicht dan water). Hierdoor smelt er nog meer ijs en wordt het nog warmer, enzovoort. Boven een bepaalde temperatuur (kantelpunt) verloopt een verandering snel en is deze vaak onomkeerbaar.

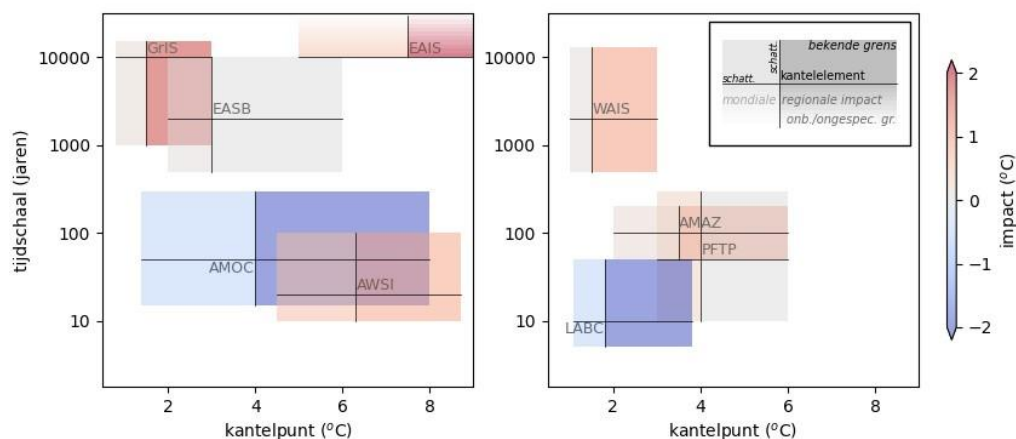
Het begrip van kantelpunten is de laatste tijd flink toegenomen, maar is nog niet compleet. Tabel 1 geeft een recent overzicht van bekende klimaatkantelementen [2]. Afbeelding 1 laat zien wat de bijbehorende kantelpunten zijn en hoe de temperatuur hierdoor kan veranderen (met een kleurschaal). In de blokken wordt de verwachte temperatuur zowel wereldwijd (links) als regionaal (rechts) getoond. Iedere rechthoek in afbeelding 1 vertegenwoordigt een kantelement, waarbij het bereik langs de horizontale as aangeeft bij welke gemiddelde mondiale temperatuurstijging het kantelement zou kunnen worden geactiveerd. Een brede rechthoek betekent dus een grote

onzekerheid. De verticale lijn in de rechthoek geeft aan welke waarde als beste schatting wordt beschouwd. Het bereik van een rechthoek langs de verticale as en de horizontale lijn in de rechthoek geven op dezelfde manier aan wat de tijdschaal van activeren is.

Voor sommige kantelpunten zit de wereld al in de gevarezone, omdat de gemiddelde opwarming wereldwijd de ondergrens voor het kantelpunt nadert of al gepasseerd is.

Tabel 1. Overzicht van klimaatkantelementen. \rightarrow ineenstorting; \times afsterven, (abrupt) verlies; \rightsquigarrow abrupte dooi; \blacktriangle geleidelijke dooi; \rightarrow noordelijke uitbreiding, vergroening; \swarrow zuidelijk afsterven; ∇ verzwakking; \emptyset ontleding. Ontleend aan [2]

MONDIALE KERNKANTELEMENTEN	KANTELEMENTEN	MET	ANDERE	ZICHZELF	VERSTERKENDE
	REGIONALE IMPACT		KLIMAATEFFECTEN		
GrIS Groenlandse ijskap \rightarrow	REEF Tropische koraalriffen \times	PFGT	Boreale Permafrost \blacktriangle		
WAIS West-Antarctische ijskap \rightarrow	PFAT Boreale Permafrost \rightsquigarrow	ASSI	Arctisch zomerijs \times		
LABC Convectie in de Labradorzee \rightarrow	BARI ijs Barentszee \times	LAND	Mondiale koolstofput land ∇		
EASB Oost-Antarctische subglaciale bekkens \rightarrow	GLCR Berggletsjers \times	PUMP	Oceanische biologische pomp ∇		
AMAZ Amazonewoud \times	SAHL Sahel & West-Afrikaanse Moesson \rightarrow	MMHD	Mariene methaanhydraten \emptyset		
PFTP Boreale Permafrost \rightarrow	BORF Boreaal woud \swarrow				
AMOC Atlantische Meridionale Overkiepemde Circulatie \rightarrow	TUND Boreaal woud \rightarrow				
AWSI Arctisch winterzeeijs \rightarrow					
EAIS Oost-Antarctische ijskap \rightarrow					



Afbeelding 1. Overzicht van kantelpunten, tijdschalen en maximale impact op de gemiddelde temperatuur (mondiaal links en regionaal rechts) van de mondiale kernkantelementen uit Tabel 1. De kleur in de rechthoek geeft aan welk gemiddeld temperatuureffect het kantelpunt kan hebben op mondiale (linkerhelft) en regionale (rechterhelft) schaal. Gebaseerd op [2]

Belang voor de drinkwatersector

Er is nog discussie in de klimaatwetenschap hoe belangrijk het is om kantelpunten mee te nemen in klimaatscenario's. Sommige onderzoekers vinden dat er niet genoeg bewijs is om te zeggen dat kantelpunten een grote rol gaan spelen in het klimaat van de komende eeuw. Andere onderzoekers denken dat sommige kantelpunten al bijna bereikt zijn en dat er geen risico's genomen moeten worden vanwege de vele onzekerheden.

De drinkwatersector werkt langzaam en heeft infrastructuur die tientallen jaren, of langer, meegaat. De tijd waarin kantelpunten kunnen optreden, is korter dan de levensduur van deze infrastructuur. Daarom is het belangrijk om kantelscenario's mee te nemen in de besluitvorming. Er moet worden nagedacht over de effecten van het activeren van kantelpunten. Een risicogebaseerde aanpak (kijken naar kans en gevolg) is lastig als er geen goede modellen zijn om de kans te berekenen. Daarom is het nuttig om uit te gaan van mogelijke scenario's zonder daar waarschijnlijkheden aan te verbinden.

Voor de watersector betekent dit dat:

1. de belangrijkste kantelpunten moeten worden geïdentificeerd en in de gaten gehouden;
2. duidelijk moet zijn hoe groot de veranderingen in het watersysteem kunnen zijn en wat de effecten op de infrastructuur en processen kunnen zijn als kantelpunten worden geactiveerd;
3. bekend moet zijn op welke tijdschalen deze veranderingen kunnen plaatsvinden en hoe waterbedrijven zich kunnen aanpassen.

Belangrijke kantelpunten voor Europa

De belangrijkste kantelpunten voor Europa staan in de linkeronderhoek van beide panelen van afbeelding 1. Deze hebben een lage drempelwaarde en treden snel op, met een grote impact (donkere kleuren). Voor Europa gaat het vooral om de AMOC en de Labradorzeeconvectie (LABC).

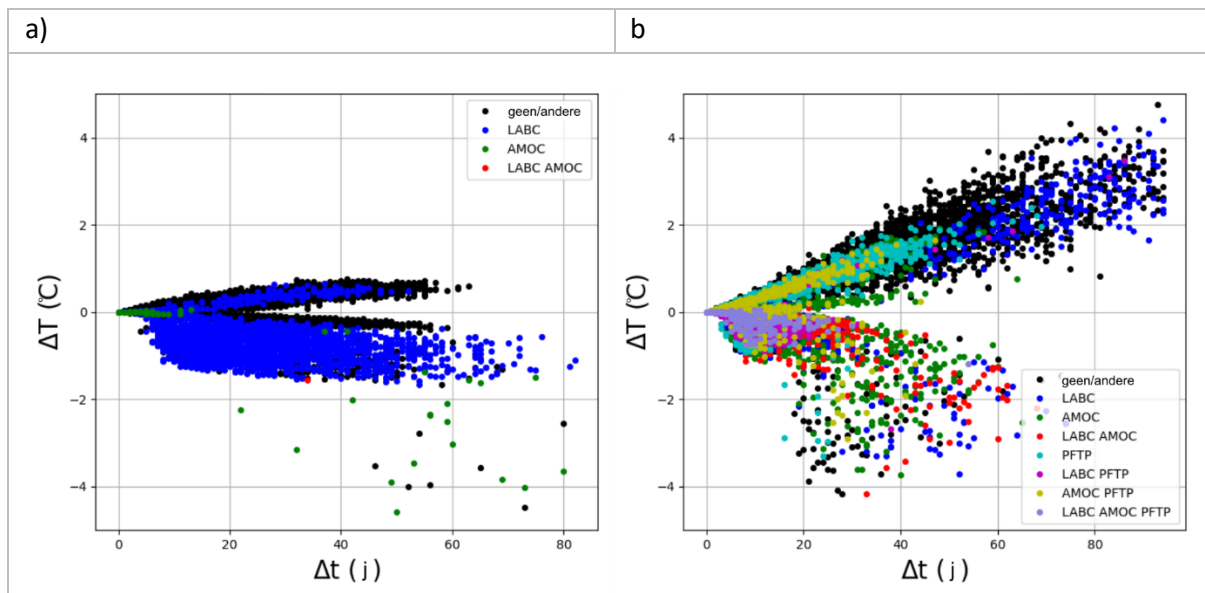
De Atlantische Meridionale Overkiepende Circulatie (AMOC), waar de Golfstroom een element van is, is een onderdeel van een wereldwijd systeem van oppervlakkige en diepe oceaanstromingen. Deze stromingen zorgen op lange termijn voor de uitwisseling van warmte, CO₂ en voedingsstoffen tussen het zeeoppervlak en de diepe oceaan. In de noordelijke Atlantische Oceaan stroomt warm zeewater naar het noorden. Door afkoeling en verdamping wordt dit water zouter en zwaarder, waardoor het naar beneden zinkt en op diepte weer naar het zuiden stroomt (zie [3] voor een uitgebreidere beschrijving). De Labradorzeeconvectie is een deel van deze oeaancirculatie ten westen van Groenland.

Veranderingen in de AMOC en de interactie tussen ijskappen en de oceaan hebben de afgelopen 30.000 jaar grote invloed gehad op ecosystemen en menselijke beschavingen, doordat deze abrupte veranderingen in regionale weerpatronen, de watercyclus en aanvullende zeespiegelstijging kunnen veroorzaken [4].

Plausibele temperaturen, veranderingen en tijdschalen

Om te laten zien wat er in de komende 100 jaar met het klimaat kan gebeuren, is een eenvoudig model gemaakt. Dit model gaat uit van de temperatuurvoorspellingen van de gangbare Shared Socioeconomic Pathways (SSP). De SSP zijn scenario's voor de sociale en economische ontwikkeling van de mondiale samenleving van het IPCC. Het model voegt daar de mogelijkheid en effecten van het activeren van klimaatkantelpunten aan toe. Met een Monte-Carlo methode is berekend wat er gebeurt met de temperatuur als verschillende kantelpunten worden geactiveerd, inclusief de onzekerheden daarbij. Deze temperatuurveranderingen zijn toegepast op de gemiddelde wereldtemperaturen voor de scenario's SSP1-2.6, SSP2-4.5 en SSP5-8.5 van het IPCC [5], [6]. Ook de gerapporteerde onzekerheden in deze voorspellingen zijn in de Monte-Carlosimulaties meegenomen. Op dezelfde manier zijn ook de regionale effecten van de activatie van kantelpunten gemodelleerd. De resultaten van deze simulaties zijn weergegeven in afbeelding 2. Voor Europa laten de resultaten zien dat er in de komende 100 jaar, naast opwarming, ook afkoelingen mogelijk zijn door kantelpunten. Veel

kantelpunten die zorgen voor opwarming werken op een langere tijdschaal. Maar door de activering van de AMOC- en LABC-kantelpunten kunnen afkoelingen van gemiddeld meerdere graden binnen enkele decennia optreden. Let op: afbeelding 2 en het model zijn bedoeld om te laten zien wat mogelijke temperatuurveranderingen en de bijbehorende tijdschalen kunnen zijn, maar geven geen exacte voorspellingen. Daarnaast illustreren zij ook welke kantelementen mogelijk een rol van betekenis zullen spelen in het toekomstige klimaat en in welke mate.



Afbeelding 2. Plausibele gemiddelde temperatuurveranderingen en tijdschalen voor IPCC-klimaatscenario's met toevoeging van de effecten van kantelementen in Europa, voor SSP1-2.6 (links) en SSP5-8.5 (rechts). Voor deze twee scenario's zijn gesimuleerde temperatuurveranderingen weergegeven (met een venster van 5 jaar), ΔT in graden Celsius en Δt in jaren. Voor de meest voorkomende activeringen zijn de betreffende kantelementen met een kleur weergegeven; zwarte stippen tonen situaties waarin andere, minder vaak voorkomende, of geen kantelementen zijn geactiveerd

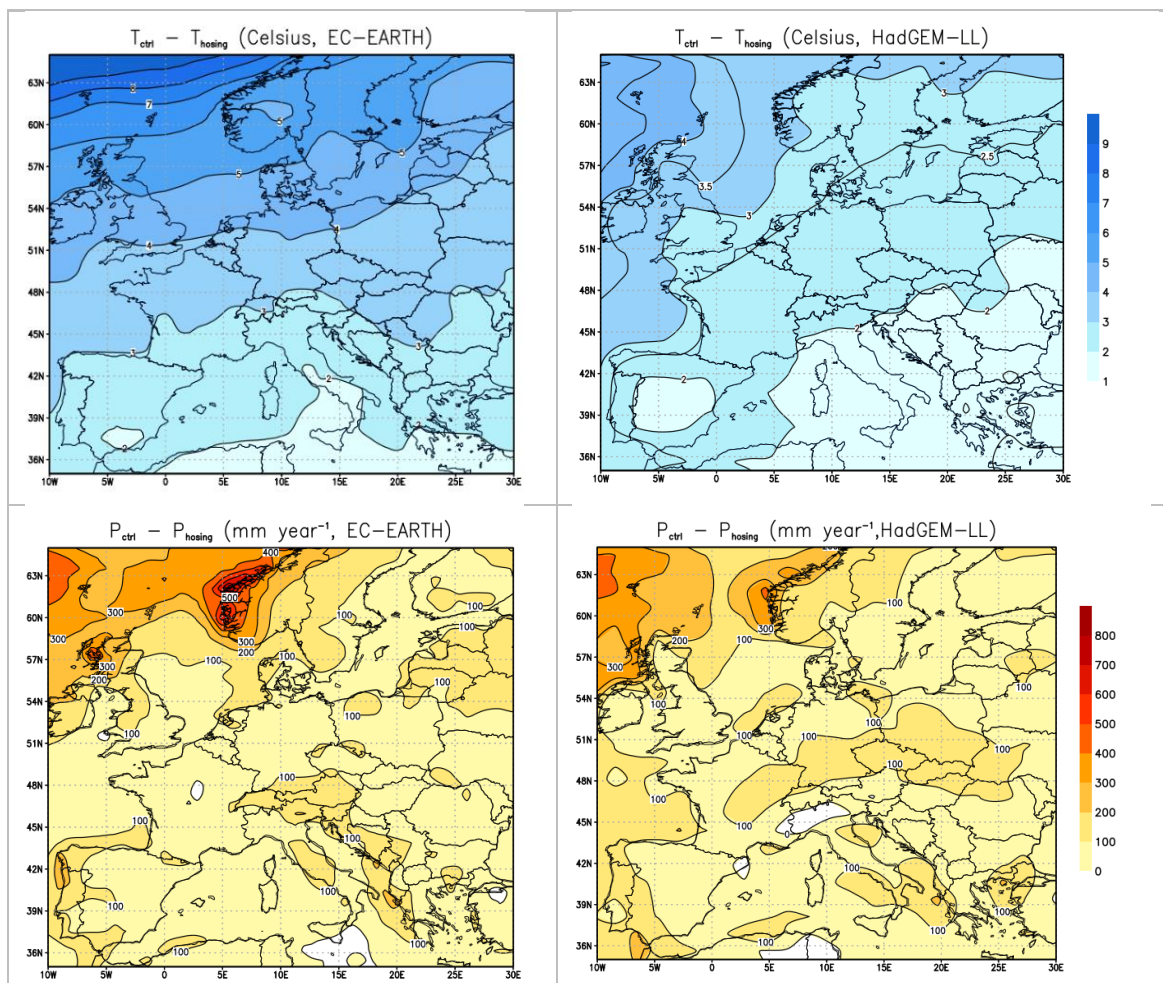
Mogelijkheid van activering van kantelementen in de komende decennia

De simulatieresultaten (zie afbeelding 2) laten zien dat het LABC-element in veel simulaties geactiveerd wordt en dat de AMOC in sommige simulaties instort. De ineenstorting van de convectie in de Labradorzee gebeurt heel snel, binnen 5 tot 50 jaar. Voor de AMOC kan het proces van ineenstorting iets langer duren, namelijk 15 tot 300 jaar [2]. Maar er moet rekening mee worden gehouden dat we misschien al in de overgangsfase zitten. Al sinds de jaren '50 van de vorige eeuw wordt een vertraging van de AMOC gemeld [7], of zelfs sinds het einde van de 19e eeuw [8], en deze vertraging neemt toe sinds de jaren '80 [9]. Hoewel dit nog niet breed geaccepteerd lijkt, voorspellen verschillende auteurs op basis van observaties een waarschijnlijke ineenstorting halverwege deze eeuw [10], [11].

Voor de andere bekende kantelpunten worden voorlopig geen merkbare afwijkingen van de klimaatvoorspellingen verwacht op basis van de SSP-scenario's, omdat ze op langere tijdschalen werken.

Geografische verdeling van AMOC-verzwakkingseffecten in Europa

Met behulp van klimaatmodellen kan worden onderzocht hoe een verzwakking van de AMOC het klimaat van Europa beïnvloedt. Dit is gemodelleerd door in de modellen een grote hoeveelheid zoetwater in de Noord-Atlantische Oceaan toe te voegen. Afbeelding 3 laat als voorbeeld zien hoe de gemiddelde jaarlijkse veranderingen in temperatuur en neerslag als gevolg van een verzwakking van de AMOC (met ongeveer 50%) verdeeld zijn over Europa, voor twee verschillende klimaatmodellen [12], [13]. Beide modellen laten zien dat het effect afneemt naarmate men verder van de Atlantische Oceaan af beweegt, van het noordwesten naar het zuidoosten. Het ene model (EC-Earth3, links) toont over het algemeen meer uitgesproken effecten op temperatuur en neerslag. Het andere model (HadGEM3, rechts) laat uitgestrekte gebieden met verminderde neerslag zien, vooral in Oost-Europa, die verschillen van die in de resultaten van EC-Earth3.



Afbeelding 3. Verschil in temperatuur (°C, bovenste panelen) en neerslag (mm jaar⁻¹, onderste panelen) tussen de controlesimulaties ("ctrl") en simulaties met verzwakte AMOC ('hosing') voor twee verschillende klimaatmodellen EC-EARTH en HadGEM-LL [12], [13]

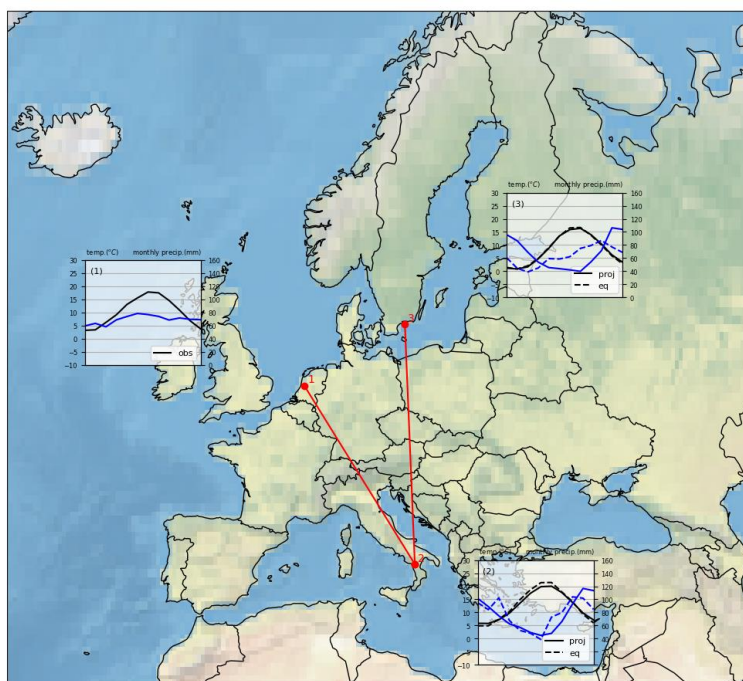
Overzicht van mogelijke effecten

Om de impact van klimaatverandering op de drinkwatervoorziening, -productie en -distributie te evalueren, moeten twee klassen van klimaatontwikkeling worden overwogen. De eerste is in overeenstemming met bestaande IPCC- en KNMI-scenario's en huidige waarnemingen en omvat opwarming en (seizoensgebonden) uitdroging, met intensievere neerslag. De tweede is in lijn met het AMOC/LABC-instortingscenario en laat een aanzienlijke afkoeling van het Europese klimaat zien met enige aanvullende verdroging en extra zeespiegelstijging. Hierbij moet worden opgemerkt dat met name in de wintermaanden de afkoeling sterk kan zijn, veel meer dan de in afbeelding 3 getoonde jaargemiddelden.

Hoewel eventuele afkoeling kan zorgen voor mitigatie van sommige aan opwarming gerelateerde vraagstukken (afname piekwatervraag, verondersteld herstel Alpengletsjers), kunnen er ook nieuwe, koudegerelateerde, uitdagingen optreden:

- meer ijsvorming bij waterinlaatlocaties;
- meer indringing van zoutwater en corrosie van leidingen als gevolg van dynamische zeespiegelstijging;
- extra risico op leidingbreuk door vries-dooicycli;
- verminderde efficiëntie van sommige waterbehandelingsprocessen.

Het grootste effect van deze kantelpunten lijkt echter te zijn dat de beschikbaarheid van zoetwater nog meer onder druk kan komen te staan dan in de reguliere klimaatscenario's. Voor een uitgebreider overzicht van de gevolgen en mogelijke maatregelen, zie [14].



Afbeelding 4. Equivalente klimaatomstandigheden voor Amsterdam voor SSP2-4.5 (stap 1, uitkomend in Zuid-Italië) en SSP2-4.5 plus ineenstorting van de AMOC (stap 2, uitkomend in Zuid-Zweden)

Om goed om te gaan met het bredere bereik aan mogelijke scenario's, lijkt het voor de watersector het beste om de watervoorzieningsystemen zo flexibel mogelijk te maken door maatregelen te nemen die zowel op- als afgeschaald kunnen worden. Hiervoor is nodig:

- een wetgevend kader dat snel handelen mogelijk maakt;
- flexibele betrokkenheid van belanghebbenden en besluitvormingsprocessen;
- modulaire technologieën die op verschillende schalen kunnen worden toegepast;
- een verandering van focus op efficiëntie naar focus op veerkracht.

Er zijn vroege waarschuwingssignalen voor het activeren van kantelpunten geïdentificeerd [10], [11], [15], maar de interpretatie hiervan is niet altijd eenduidig. Het is echter belangrijk dat de watersector nauwlettend in de gaten houdt hoe de klimatologen en oceanografen deze signalen volgen.

Conclusies

Gezien de lange plannings- en implementatietijdschalen en lange levenscycli van de drinkwatervoorzieningsinfrastructuur, is het verstandig voor waterbedrijven om rekening te houden met zowel aspecten van klimaatverandering die helder naar voren komen in bestaande klimaatscenario's, als ook aspecten die de modellen niet goed weergeven. Hieronder vallen onder andere klimaatkantelementen, in het bijzonder de Atlantische Meridionale Overkiepende Circulatie (AMOC) en convectie in de Labradorzee, die in deze analyse de komende decennia de meest relevante voor Europa zijn. Deze klasse van scenario's is tot nu toe beschouwd als *High-Impact, Low-Likelihood*, maar eigenlijk is de kans moeilijk in te schatten.

Door ook naar kantelementen te kijken, worden mogelijke gevolgen van klimaatverandering in termen van gemiddelde oppervlaktetemperatuur in beide richtingen, maar vooral naar beneden, nog groter. Bovendien voegt dit een nieuwe klasse scenario's toe die, tenminste voor Europa, een aanzienlijke afkoeling, extra uitdroging en extra zeespiegelstijging [15] laten zien over een periode van slechts enkele tientallen jaren. Terwijl de watersector goed op de hoogte is van de gevolgen van de opwarming van het klimaat (inclusief de gevolgen voor de beschikbaarheid van water, infrastructuur, zuiveringsprocessen, enz.), is deze tweede klasse onverkend terrein. Het is daarom van groot belang om voortdurend de vroege waarschuwingssignalen te monitoren en de flexibiliteit van de watervoorzieningsystemen te vergroten.

Meer informatie en dankwoord

Dit onderzoek is uitgebreid beschreven in [14]. Dit artikel is een resultaat van het project Water-Futures dat is gefinancierd door de Europese Onderzoeksraad (ERC) in het kader van het Horizon 2020-programma voor onderzoek en innovatie van de Europese Unie (subsidieovereenkomst nr. 951424). Katinka Bellomo en Laura Jackson waren zo vriendelijk om numerieke simulatieresultaten te delen.

Referenties

1. Sillmann et al. (2021). 'Event-based storylines to address climate risk'. *Earth's Future*, 9(2), e2020EF001783.
2. Armstrong McKay et al. (2022). 'Exceeding 1.5 C global warming could trigger multiple climate tipping points'. *Science*, 377(6611), eabn7950.

3. Mokkenstorm, L. en B. Verheggen (2024). *Is het mogelijk dat de Golfstroom plotseling sterk verzwakt?* <https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/is-het-mogelijk-dat-de-golfstroom-plotseling-sterk-verzwakt>, geraadpleegd op 4 maart 2024.
4. Rahmsdorf, S. (2024). 'Is the Atlantic Overturning Circulation approaching a tipping point?' *Oceanography*, vroege vrijgave.
5. Intergovernmental Panel on Climate Change (2021). 'Summary for Policymakers'. In: Masson-Delmotte, V. et al. (eds.). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
6. Fyfe, J. et al. (2021). *Summary for Policymakers of the Working Group I Contribution to the IPCC Sixth Assessment Report - data for Figure SPM.8* (v20210809). NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis, date of citation. doi:10.5285/98af2184e13e4b91893ab72f301790db.
7. Caesar, L. et al. (2018). 'Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation'. *Nature*, 556(7700), 191-196.
8. Dima, M. et al. (2021). 'Early-onset of Atlantic Meridional Overturning Circulation weakening in response to atmospheric CO₂ concentration'. *npj Climate and Atmospheric Science*, 4(1), 27.
9. Zhu, C. et al. (2023). 'Likely accelerated weakening of Atlantic overturning circulation emerges in optimal salinity fingerprint'. *Nature Communications*, 14(1), 1245
10. Ditlevsen, P., & Ditlevsen, S. (2023). 'Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation'. *Nature Communications*, 14(1), 1-12.
11. Smolders, E.J.V. et al. (2024). 'Probability Estimates of a 21st Century AMOC Collapse'. *arXiv:2406.11738*
12. Bellomo, K. et al. (2023). 'Impacts of a weakened AMOC on precipitation over the Euro-Atlantic region in the EC-Earth3 climate model'. *Climate Dynamics*, 1-20.
13. Jackson, L. C. 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.
14. Thienen, P. van et al. (2024). 'Climate tipping points and their potential impact on drinking water supply planning and management in Europe'. *Prisms: Water*, onder review.
15. Westen, R.M. van et al. (2024). 'Physics-based early warning signal shows that AMOC is on tipping course'. *Science Advances*, 10(6), eadk1189.