



KWR Waterwijs

KWRW 2025.072 | November 2025

Statistieken van lage afvoeren onder een veranderend klimaat

Colofon

Statistieken van lage afvoeren onder een veranderend klimaat

Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van KWR Waterwijs, het collectieve drinkwateronderzoeksprogramma van KWR, de waterbedrijven en Vewin.

KWRW 2025.072 | November 2025

Projectnummer

404300-066

Projectmanager

Eric Broers

Opdrachtgever

KWR Waterwijs – Thema Bronnen, Watersysteem en Natuur & Thema Hydroinformatica

Auteurs

Marjolein van Huijgevoort, Peter van Thienen, Gijsbert Cirkel

Kwaliteitsborgers

Ruud Bartholomeus, Niko Wanders (UU)

Verzonden naar

Dit rapport is verspreid onder deelnemers aan het KWR Waterwijs-programma.

Openbaarheid

Dit rapport is openbaar.

Keywords

afvoer, klimaatverandering, extremen, statistiek, droogte

Jaar van publicatie
2025

Meer informatie
Marjolein van Huijgevoort

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl

KWR

November 2025 ©

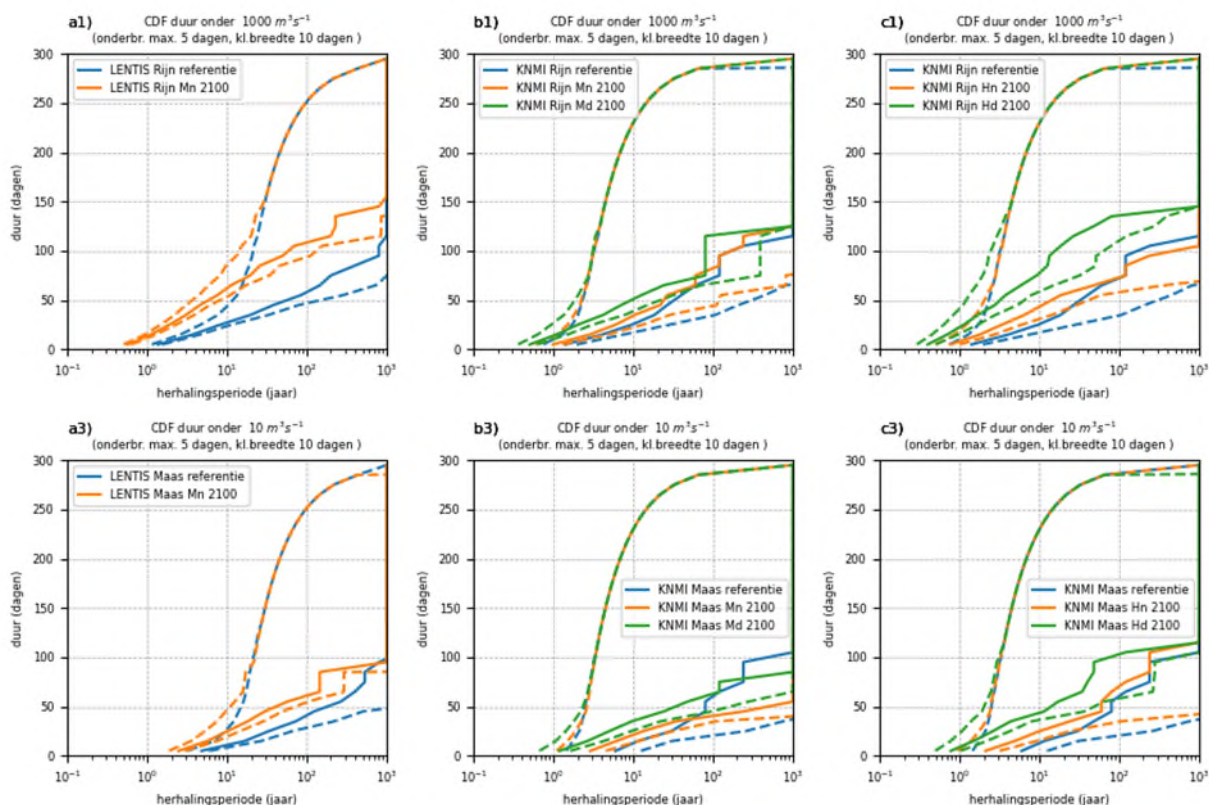
Alle rechten voorbehouden aan de KWR Waterwijs-deelnemers. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier..

Samenvatting

Meer grip krijgen op statistieken lage afvoeren onder een veranderend klimaat

Auteurs

Marjolein van Huijgevoort, Peter van Thienen, Gijsbert Cirkel



Herhalingsperiode voor overschrijding van weergegeven grenswaarden voor de Rijn en Maas met onzekerheidsbandbreedtes op basis van een veronderstelde Poissonverdeling voor het voorkomen van de overschrijdingen.

Aanleiding: Meer grip nodig op extreem lage afvoeren en de gevolgen hiervan

De drinkwaterbedrijven zijn de afgelopen jaren geconfronteerd met 'verrassingen' ten aanzien van de bronkwaliteit (verzilt, antropogene stoffen, microbiologie) en -kwantiteit. Verwacht wordt dat de Rijn en de Maas (maar ook juist de kleinere rivieren) de komende decennia vaker perioden van lage afvoer zullen vertonen als gevolg van klimaatverandering en dat de minimale afvoer mogelijk verder terugloopt. Dit heeft op verschillende manieren gevolgen voor de waterbedrijven, die water aan deze rivieren onttrekken voor de productie van drinkwater. Het voor de drinkwaterproductie beschikbare volume wordt kleiner, en de kwaliteit van het water kan afnemen.

Binnen het Waterwijs-project "Verbeterde Voorspelbaarheid Bronkwaliteit" hebben we gewerkt aan meer inzicht in de verandering in de waterkwaliteit en -kwantiteit als gevolg van klimaatverandering.

Aanpak: Statistieken van lage afvoeren beter begrijpen met large-ensemble data en statistische modellen

Het doel van dit project was het vergroten van het begrip van de statistieken van extreem lage afvoeren onder een veranderend klimaat. De focus lag hierbij op het beter in beeld krijgen van de mogelijkheid, waarschijnlijkheid en duur van perioden met extreem lage afvoeren. Het gebruik van statistische modellen voor het schatten van de extreme waarden is in veel gevallen noodzakelijk, omdat de tijdreeksen van geobserveerde of gesimuleerde afvoeren vaak te kort zijn om extreme waarden goed in te schatten. We hebben daarom verschillende datasets gebruikt voor de toekomstscenario's, waaronder de KNMI'23 klimaatscenario's (Mn, Md, Hn en Hd, KNMI 2023), maar ook large-ensemble data (LENTIS data) waarin lange tijdreeksen (1600 jaar) beschikbaar zijn die de volledige klimaatvariabiliteit omvatten (Muntjewerf et al. 2023b). De LENTIS dataset bestaat uit twee scenario's: 'present-day' ('PD') scenario, gebaseerd op het huidige klimaat en het '+2°C' scenario, gebaseerd op een toename van 2 graden ten opzichte van de huidige gemiddelde temperatuur.

De simulaties op basis van de genoemde klimaatscenario's en large-ensemble data houden geen rekening met discontinue ontwikkelingen van het klimaat, bijvoorbeeld gerelateerd aan klimaatkantelpunten. Om het mogelijke effect van een klimaatkantelpunt te illustreren, is een aanvullend klimaatscenario beschouwd, waarin de AMOC (Atlantic Meridional Overturning Circulation, waar de Golfstroom onderdeel van is) aanzienlijk verzwakt.

Met de genoemde datasets heeft de Universiteit Utrecht de afvoeren van de Rijn (Lobith) en Maas (Eijsden) gesimuleerd met het mondiale hydrologische model PCR-GLOBWB 2 (Sutanudjaja et al. 2018). Op basis van de large-ensemble data zijn verschillende statistische methoden voor het bepalen van de extreem lage afvoeren verkend.

Naast de veranderingen in afvoeren zijn ook de veranderingen in de weersomstandigheden rechtstreeks van belang voor de drinkwatervoorziening. De drinkwatervraag neemt immers toe onder droge en warme omstandigheden, ook is er in deze periodes een grotere druk vanuit andere sectoren op het watersysteem. Indien deze droge, warme periodes in de toekomst vaker samenvallen met periodes met een lage afvoeren, kan dit betekenen dat de drinkwatervoorziening op meerdere vlakken tegelijk voor een uitdaging komt te staan. Daarom hebben we de aangeleverde modelsimulaties gebruikt om te onderzoeken of dit samenvallen van gebeurtenissen inderdaad vaker gaat gebeuren in de toekomst. Als laatste stap is voor kleinere oppervlaktewateren onderzocht of er afvoermodellen beschikbaar zijn die gebruikt kunnen worden voor simulaties met de large-ensemble data.

Resultaten: Kans op langdurig lage rivierafvoeren op Maas en Rijn neemt toe

We zien voor de Maas en in het bijzonder de Rijn een daling in de lage afvoeren in zowel de simulaties op basis van de large-ensemble data als de simulaties op basis van de KNMI'23 scenario's. De exacte afname van de lage afvoeren is hierbij sterk afhankelijk van het gekozen scenario. Zowel bij het +2°C graden scenario van de LENTIS data als bij het Hd-KNMI klimaatscenario komen situaties die in het huidige klimaat als extreem worden gezien, in de toekomst regelmatig voor. Uit de simulaties met de large-ensemble data komt bijvoorbeeld naar voren dat de herhalingstijd van een zevendaagse Rijnafoer onder de 500 m³/s verschuift van 1x per 17 jaar in de referentieperiode naar vaker dan 1x per 3 jaar in het +2°C scenario. Voor de Maas is het beeld uit de simulaties met de large-ensemble dataset en KNMI scenario's minder eenduidig. Er is vooral een afname te zien bij de lagere herhalingstijden, bij de hoge herhalingstijden van 50 jaar of meer is weinig verschil te zien tussen de referentie en de scenario's. Toch zijn de effecten op de Maasafvoer ook van belang. Zo wordt bijvoorbeeld in het Hd scenario voor de Maas een herhalingstijd van minder dan 2 jaar berekend voor een afvoer onder de 10 m³/s, wat betekent dat die situatie in de toekomst normaal kan gaan worden.

De herhalingstijd van langdurige overschrijdingen van (lage) afvoerdrempelwaarden is ook van belang. Hiervoor is de dataset geanalyseerd op periodes van 30, 60, 90 en 120 dagen beneden een bepaalde drempelwaarde. Voor zowel de Rijn als de Maas komt uit de afvoersimulaties een eenduidig beeld naar voren: in een opwarmend klimaat neemt het voorkomen van langdurig lage afvoeren toe. Zeker voor de Rijn zijn de veranderingen aanzienlijk. Zo

neemt volgens de LENTIS-simulaties de mediane herhalingstijd van een nagenoeg ononderbroken periode van 60 dagen met overschrijding van 1000 m³/s bij Lobith af van 114 naar 9 jaar voor het +2°C scenario. De simulaties met KNMI-data laten een vergelijkbare richting zien, ondanks grotere onzekerheid door de kortere dataset. Ook tonen deze simulaties een sterker effect voor de drogere scenario's Md en Hd.

Naast de hier gebruikte simulaties van een AMOC-ineenstorting zijn er nog veel andere mogelijke ineensstortingsscenario's. In dit geval is er sprake van ongeveer een halvering van de intensiteit van de AMOC (feitelijk de volumestroom oceaanwater). De afvoersimulaties met ineensstorting van de AMOC tonen een matige toename van het voorkomen van lage afvoeren aan het begin van een ineensstorting van de AMOC en een afname hiervan tijdens het hoogtepunt. Deze resultaten moeten vooral als illustratief worden beschouwd door de grote onzekerheden.

Niet alleen de lage afvoeren worden extremer, maar ook de perioden met meteorologische droogte en hittegolven nemen toe. Hierdoor neemt ook de kans op het samenvallen van deze gebeurtenissen toe, zeker voor de combinatie met de Rijnafvoer.

Om het inzicht in de statistieken van extreem lage afvoeren te vergroten, zijn verschillende statistieken berekend om het voorkomen van lage afvoeren te beschrijven. De resultaten tonen het belang van lange tijdreeksen voor het berekenen van herhalingstijden, zeker voor relatief zeldzame gebeurtenissen.

Voor de kleinere stroomgebieden in Nederland en Vlaanderen bleek het lastig om afvoermodellen te vinden die rechtstreeks te gebruiken waren binnen dit onderzoek. Voor de Drentsche Aa is een neerslag-afvoermodel beschikbaar gesteld door Waterbedrijf Groningen. Uit de analyse met dit neerslag-afvoermodel blijkt dat bij toepassing van de grootschalige klimaatdata kritisch moet worden gekeken naar de modelinvoer en de representativiteit hiervan voor het te onderzoeken stroomgebied.

Vervolg: Waterkwaliteitsprognoses

Binnen het Waterwijs-project "Verbeterde Voorspelbaarheid Bronkwaliteit" wordt ook onderzoek gedaan naar de waterkwaliteit van het oppervlaktewater. Hiervoor worden relaties opgesteld tussen de concentraties van verschillende stoffen en de afvoer. In het vervolg van het project kunnen de gesimuleerde afvoeren gecombineerd worden met deze relaties om een beeld te krijgen van de waterkwaliteit in de toekomst.

Implementatie: Resultaten beschikbaar via online dashboard voor eigen analyses

De resultaten uit dit rapport zullen samen met de resultaten over de waterkwaliteit weergegeven worden in een online dashboard voor de drinkwaterbedrijven. Drinkwaterbedrijven kunnen de in deze rapportage gepresenteerde statistieken gebruiken bij strategische beslissingen. De datasets zijn beschikbaar voor scenarioanalyse met eigen modellen.

Maatschappelijke impact: Strategische voorbereiding op toenemende kwetsbaarheid van riviergebonden drinkwaterbronnen noodzakelijk

Uit deze studie blijkt dat (extreem) lage rivierafvoeren vaker en langduriger kunnen optreden door klimaatverandering. Dit heeft gevolgen voor de landbouw, energievoorziening, scheepvaart en voor drinkwaterbedrijven die rivierwater gebruiken als bron, zowel via directe inname als via bekkens en oever- of duinfiltratie. In Nederland en Vlaanderen gaat het voor de Rijn om PWN, Waternet, Oasen en in mindere mate Dunea en Vitens (oeverfiltraat). Voor de Maas gaat het om WML, Dunea, Evides en indirect via doorlevering ook om de Watergroep, Farys en Pidpa. Drinkwaterbedrijven moeten zich voorbereiden op langdurigere innamestops door verzilting en verslechterde waterkwaliteit en voor het benedenstroomse deel van de Maas mogelijk ook kwantitatieve innamebeperkingen. Voor de Nederrijn, IJssel en het IJsselmeergebied speelt daarbij dat door

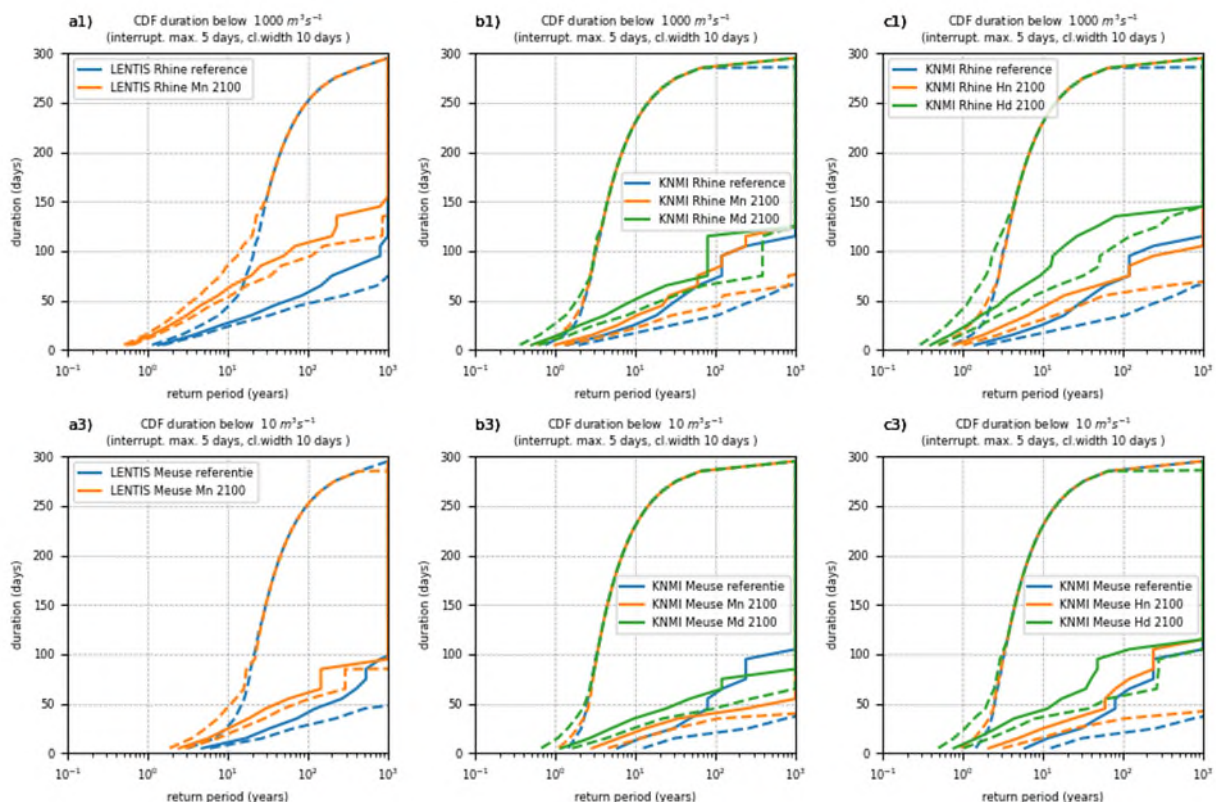
veranderingen in het stroombed van de Rijn er steeds minder water het Pannerdensch kanaal instroomt bij lage afvoer. De waterbeschikbaarheid in het IJsselstroomgebied zal hierdoor verder onder druk komen te staan. De in deze studie berekende afvoerstatistieken zijn als robuust te beschouwen voor wat betreft de interne klimaatvariabiliteit. Ondanks de lange periode voor de simulaties blijven de betrouwbaarheidsintervallen echter regelmatig groot. Let daarbij op dat deze intervallen ook niet de (volledige) onzekerheid in modelparametrisaties en onderliggende klimaatsimulaties vertegenwoordigen. Gezien de breedte van de bepaalde betrouwbaarheidsintervallen én de mogelijkheid van ontwikkelingen die geen onderdeel uitmaken van simulaties of scenario's, zoals een (ander) AMOC-scenario, doen waterbedrijven er verstandig aan om na te denken over en rekening te houden met een brede waaier aan mogelijke afvoerscenario's.

Summary

Strengthening Strategic Insight into Low Flow Statistics under a Changing Climate

Authors

Marjolein van Huijgevoort, Peter van Thienen, Gijsbert Cirkel



Return Periods for Periods below Threshold in the Rhine and Meuse, Including Uncertainty Ranges Based on an Assumed Poisson Distribution of Occurrence

Rationale: Strengthening Control over Extreme Low Flows and Their Impacts is Essential

In recent years, the drinking water companies have been confronted with 'surprises' with regard to the source quality (salinization, anthropogenic substances, microbiology) and quantity. It is expected that the Rhine and the Meuse (but also smaller rivers) will show more periods of low discharge in the coming decades as a result of climate change and that the minimum discharge may decrease further. This has several consequences for the water companies, which extract water from these rivers for the production of drinking water. The available volume of water is reduced, and the quality of the water may decrease. Within the Waterwijs project "Verbeterde Voorspelbaarheid Bronkwaliteit", we are working on more insight into the change in water quality and quantity as a result of climate change.

Approach: Enhancing Understanding of Low Flow Statistics Through the Use of Large-ensemble Data

The aim of this project is to increase the understanding of the statistics of extremely low discharges under a changing climate. The focus is on getting a better picture of the possibility, probability and duration of periods with

extremely low discharges. The use of statistical models for estimating extreme values is necessary in many cases, because time series of observed or simulated discharges are often too short to estimate extreme values properly. In this study, we therefore use various datasets for future scenarios, including the KNMI'23 climate scenarios (Mn, Md, Hn and Hd, KNMI 2023), but also large-ensemble data (LENTIS data) which provide long time series (1600 years) that cover the full climate variability (Muntjewerf et al. 2023b). The LENTIS dataset consists of two scenarios: the 'present-day' ('PD') scenario, based on the current climate and the '+2°C' scenario, based on an increase of 2°C compared to the current average temperature.

The KNMI climate scenarios and large-ensemble data do not take into account discontinuous climate developments, for example related to climate tipping points. To illustrate the effect of a climate tipping point, an additional climate scenario is considered in which the AMOC (Atlantic Meridional Overturning Circulation) weakens considerably.

With the mentioned datasets, the discharges of the Rhine (Lobith) and Meuse (Eijsden) were simulated by Utrecht University with the global hydrological model PCR-GLOBWB 2 (Sutanudjaja et al. 2018). Based on the large-ensemble data, various statistical methods for determining the extremely low discharges are explored.

In addition to changes in discharges, changes in weather conditions also influence the drinking water companies. After all, the demand for drinking water increases under dry and warm conditions, and there is also greater pressure from other sectors on the water system during these periods. If these dry, warm periods coincide with periods of low discharges more often in the future, this could mean that drinking water companies will face a challenge in several areas at the same time. That is why we use the supplied model simulations to investigate whether this coincidence of events will indeed happen more often in the future. As a final step, it was investigated whether discharge models are available for smaller rivers that can be used for simulations with the large-ensemble data.

Findings: Increased Likelihood of Prolonged Low Flows in the Meuse and Rhine

For the Meuse and in particular the Rhine, we see a decrease in low discharges in both the simulations based on the large-ensemble data and the simulations based on the KNMI'23 scenarios. The exact decrease in the low discharges depends strongly on the chosen scenario. Both in the +2°C scenario of the LENTIS data and in the Hd-KNMI climate scenario, situations that are seen as extreme in the current climate will occur regularly in the future. The simulations with the large-ensemble data show, for example, that the return period of a seven-day Rhine discharge below 500 m³/s shifts from 1x every 17 years in the reference period to more than 1x every 3 years in the +2°C scenario. For the Meuse, the picture from the simulations with the large-ensemble dataset and KNMI scenarios is less clear. A decrease can be seen mainly for the shorter return periods, while for the longer return periods of 50 years or more, little difference can be seen between the reference and the scenarios. Nevertheless, the effects on the Meuse discharge are also important. For example, in the Hd scenario for the Meuse, a return period of less than 2 years is calculated for a discharge below 10 m³/s, which means that this situation may become normal in the future.

The return period of long-term exceedances of (low) discharge threshold values is also important. To this end, the dataset was analysed for periods of 30, 60, 90 and 120 days below a certain threshold value. For both the Rhine and the Meuse, the discharge simulations show an unambiguous picture: in a warming climate, the occurrence of long-term low discharges increases. The changes are particularly significant for the Rhine. For example, according to the LENTIS simulations, the median return period of an almost uninterrupted period of 60 days with a discharge below 1000 m³/s at Lobith decreases from 114 to 9 years for the +2°C scenario. The simulations with KNMI data, despite greater uncertainty due to the shorter dataset, show a similar direction, with a stronger effect for the drier scenarios Md and Hd.

The simulations of an AMOC collapse used are one of many possible collapse scenarios. In this case, there is about a halving of the intensity of the AMOC (actually the volume flow of ocean water). The AMOC collapse discharge simulations show a moderate increase in the occurrence of low discharges at the beginning of an AMOC collapse and a decrease during the peak. Because of the high uncertainties related to this tipping point, these results should be seen as illustrative.

Not only low discharges are becoming more extreme, but also periods of meteorological drought and heat waves are increasing. This also increases the chance of these events coinciding, especially for the Rhine.

To increase the insight into the statistics of extremely low discharges, various statistics have been calculated to describe the occurrence of low discharges. The results show the importance of long time series for calculating return periods, especially for relatively rare events.

For the smaller river basins in the Netherlands and Flanders, it turned out to be difficult to find models that could be used directly within this study. A rainfall-runoff model has been made available for the Drentsche Aa by Waterbedrijf Groningen. The analysis with this rainfall-runoff model shows that when applying large-scale climate data, the input and its representativeness for the river basin to be studied must be critically examined.

Next Steps: Water Quality Forecasting

Within the Waterwijs project "Verbeterde Voorspelbaarheid Bronkwaliteit", research is also being carried out into the water quality of surface water. To this end, relationships are established between the concentrations of different substances and the discharge. In the continuation of the project, the simulated discharges can be combined with these relationships to get a picture of the water quality in the future.

Implementation: Results Available via Online Dashboard for Independent Analysis

The results from this report, together with the results on water quality, will be displayed in an online dashboard for the drinking water companies. The presented statistics can be used for strategical decisions. Datasets from this report are available for scenario analyses with models of the drinking water companies.

Societal Impact: Strategic Preparation for Increasing Vulnerability of River-Based Drinking Water Sources is Essential

This study shows that (extremely) low river discharges may occur more frequently and persist longer due to climate change. This has implications for agriculture, energy supply, navigation, and drinking water companies that rely on river water—whether through direct intake, reservoirs, or bank and dune filtration. In the Netherlands and Flanders, the Rhine is a source for PWN, Waternet, Oasen, and to a lesser extent Dunea and Vitens (bank filtration). The Meuse is relevant for WML, Dunea, Evides, and indirectly for De Watergroep, Farys, and Pidpa through water delivery agreements. Drinking water companies must prepare for longer intake interruptions due to salinization and deteriorating water quality. In the downstream section of the Meuse, quantitative intake restrictions may also become necessary. For the Lower Rhine, IJssel, and IJsselmeer region, changes in the Rhine's flow path mean that less water enters the Pannerdensch Kanaal during low discharge periods, putting water availability in the IJssel basin under further pressure. The discharge statistics calculated in this study are considered robust with respect to internal climate variability. However, despite the long simulation period, confidence intervals remain wide. These intervals do not fully represent uncertainties in model parameterizations or underlying climate simulations. Given the breadth of these intervals—and the possibility of developments not included in current simulations or scenarios (e.g., an alternative AMOC scenario)—it is prudent for water companies to consider and prepare for a wide range of possible discharge scenarios.

Inhoud

1	Inleiding	11
1.1	Achtergrond	11
1.2	Doel en leeswijzer	12
2	Basisdata en simulaties	13
2.1	Large-ensemble data	13
2.2	KNMI'23 scenario's	16
2.3	Discontinue klimaatscenario's: AMOC collapse	17
3	Methode	19
3.1	Statistieken extreem lage afvoeren	19
3.2	Bepaling van onzekerheidsintervallen	20
3.3	Samenvallende gebeurtenissen	21
3.4	Drentsche Aa	23
4	Resultaten	24
4.1	Herhalingstijden lage afvoeren	24
4.2	Onderschrijdingen van afvoerdrempelwaarden	25
4.3	Samenvallende gebeurtenissen	30
4.4	Simulatie Drentsche Aa met LENTIS data	31
5	Discussie en conclusies	33
5.1	Herhalingstijden lage afvoeren	33
5.2	Onderschrijdingen van afvoerdrempelwaarden	33
5.3	Robuustheid van de bevindingen en onzekerheden, AMOC-collapse als voorbeeld	34
5.4	Samenvallende gebeurtenissen	34
5.5	Statistieken extreem lage afvoeren	34
5.6	Kleinere stroomgebieden	35
5.7	Implicaties voor de drinkwaterbedrijven	35
6	Referenties	39
I	Toetsing distributies onderschrijdingsduren	43
II	Onderschrijdingsduur	49
III	Klimaatkantelpunten en weersextremen	56
IV	Informatie en consistentietests klimaat- en afvoersimulaties ineenstorting AMOC	60

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De drinkwaterbedrijven zijn de afgelopen jaren geconfronteerd met ‘verrassingen’ ten aanzien van de bronkwaliteit (verziltig, antropogene stoffen, microbiologie) en -kwantiteit. Binnen het Waterwijs-project “Verbeterde Voorspelbaarheid Bronkwaliteit” werken we aan meer inzicht in de verandering in de waterkwaliteit en -kwantiteit als gevolg van klimaatverandering. Als eerste stap daarvoor richten we ons op de gevolgen van klimaatverandering op de afvoeren van de Rijn en Maas. Daarnaast is onderzocht welke analyses mogelijk zijn voor kleinere oppervlaktewateren, zoals de Drentsche Aa.

Verwacht wordt dat de Rijn en de Maas (maar ook juist de kleinere rivieren) de komende decennia als gevolg van de klimaatverandering vaker perioden van lage afvoer zullen vertonen en dat de minimale afvoer mogelijk verder terugloopt. Dit heeft op verschillende manieren gevolgen voor de waterbedrijven, die water aan deze rivieren onttrekken voor de productie van drinkwater. Het voor de drinkwaterproductie beschikbare volume wordt kleiner, en de kwaliteit van het water kan afnemen door de concentratie van een vergelijkbare hoeveelheid bovenstrooms geëmitteerde stoffen in een kleiner volume (Sjerps et al. 2017). Tevens kan door zware (zomer)buien afspoeling van op land opgehoopte stoffen optreden en kunnen riooloverstorten naar het rivierwater plaatsvinden. Daarnaast is de afvoer ook van belang voor het tegengaan van de zoutindringing landinwaarts.

In dit rapport onderzoeken we de statistieken van extreme afvoeren voor de Rijn (Lobith) en Maas (Eijsden). De focus ligt hierbij op het beter in beeld krijgen van de mogelijkheid, waarschijnlijkheid en duur van perioden met extreem lage afvoeren. Het gebruik van statistische modellen voor het schatten van de extreme waarden is in veel gevallen noodzakelijk, omdat de tijdreeksen van geobserveerde of gesimuleerde afvoeren vaak te kort zijn om extreme waarden goed in te schatten. Het gebruik van statische modellen, zoals bijvoorbeeld, de gegeneraliseerde extreme waardenverdeling (GEV) heeft echter ook nadelen, aangezien een bepaalde kansverdeling aangenomen wordt. Van der Wiel et al. (2019) laten de beperkingen van de GEV zien op basis van large-ensemble data voor 2000 jaar. We maken daarom in dit onderzoek gebruik van verschillende datasets voor de toekomstscenario's. Waarbij de stap gemaakt wordt van een (klimaat)scenario gebaseerde aanpak (Sjerps et al. 2017, Van der Krogt et al. 2022), waarin enkele plausibele toekomstbeelden worden beschouwd met een tijdreeks van beperkte duur, naar een large-ensemble-gebaseerde aanpak (Van der Wiel et al. 2019, Hauswirth et al. 2023, Muntjewerf et al. 2023b), waarin tijdreeksen beschikbaar zijn die de volledige klimaatvariabiliteit omvatten. Op basis van de large-ensemble data, doorgerekend door Universiteit Utrecht (UU), worden verschillende methoden voor het bepalen van de extreem lage afvoeren verkend. De resultaten uit de simulaties met de large-ensemble data¹ worden vergeleken met de gesimuleerde afvoeren gebaseerd op de KNMI'23 klimaatscenario's. Hierbij wordt ook gekeken naar het belang van lange tijdreeksen zoals beschikbaar in de large-ensemble data.

Scenario's voor ons veranderende klimaat, zoals gegenereerd door de wetenschappelijke gemeenschap en opgenomen in IPCC-rapporten en hun regionale en nationale afgeleiden, zijn een cruciale bron voor waterbedrijven wereldwijd die zich moeten voorbereiden op de toekomst. Er zijn meerdere onzekerheidsaspecten aan deze scenario's die moeten worden beschouwd in de context van dit rapport. Aan de ene kant gaat het hierbij om mogelijke discontinue ontwikkelingen van het klimaat, bijvoorbeeld gerelateerd aan klimaatkantelpunten. Om het mogelijke effect van een klimaatkantelpunt te illustreren, wordt er in dit rapport een aanvullend klimaatscenario beschouwd, waarin de AMOC (Atlantic Meridional Overturning Circulation, waar de Golfstroom onderdeel van is) aanzienlijk verzwakt. Dit leidt tot een kouder en droger klimaat in Europa. Een meer gedetailleerde beschrijving van

¹ Dataset met lange meteorologische tijdreeksen (1600 jaar) die de volledige klimaatvariabiliteit omvatten

klimaatkantelpunten, de AMOC en consequenties van een ineenstorting daarvan zijn beschreven in Bijlage II en daarin genoemde bronnen. Aan de andere kant gaat het om het vermogen van de modellen waarop de scenario's zijn gebaseerd om extremen adequaat te voorspellen. Tot nog toe blijken klimaatmodellen zowel de frequentie als de intensiteit van extreme weersgebeurtenissen te onderschatten. Beide aspecten mogen niet uit het oog worden verloren wanneer resultaten van deze modellen worden geïnterpreteerd en beslissingen hierop gebaseerd en waarschuwen voor een te strikte kwantitatieve interpretatie van modelresultaten.

Naast de veranderingen in afvoeren zijn ook de veranderingen in de weersomstandigheden rechtstreeks van belang voor de drinkwatervoorziening. De drinkwatervraag neemt immers toe onder droge en warme omstandigheden, ook is er in deze periodes een grotere druk vanuit andere sectoren op het watersysteem. Indien deze droge, warme periodes in de toekomst vaker samenvallen met periodes met een lage afvoeren, kan dit betekenen dat de drinkwatervoorziening op meerdere vlakken tegelijk voor een uitdaging komt te staan. Daarom gebruiken we de door de UU uitgevoerde modelsimulaties om te onderzoeken of dit samenvallen van gebeurtenissen inderdaad vaker gaat gebeuren in de toekomst. Als laatste stap is voor kleinere oppervlaktewateren onderzocht of er afvoermodellen beschikbaar zijn die gebruikt kunnen worden voor simulaties met de large-ensemble data.

1.2 Doel en leeswijzer

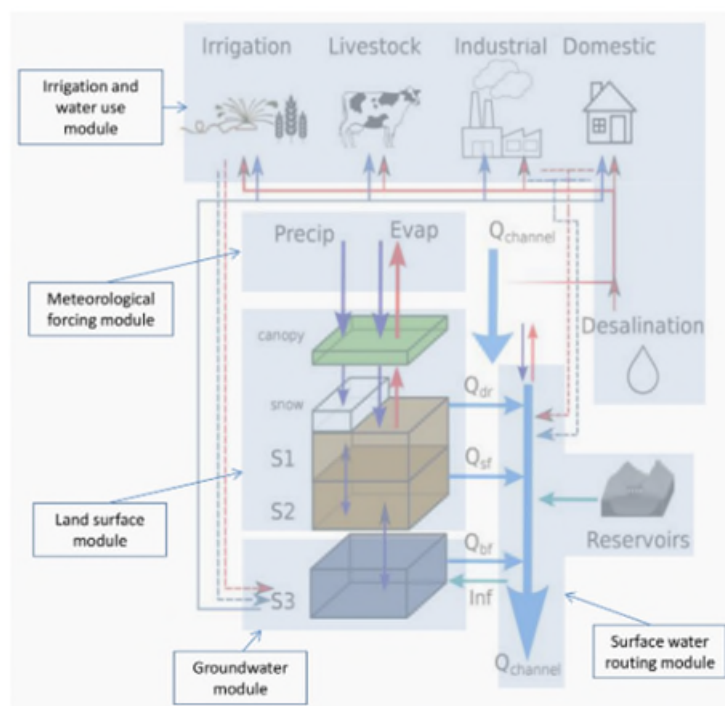
Het doel van dit project is het vergroten van het begrip van de statistieken van extreem lage afvoeren onder een veranderend klimaat. Voor het bepalen van de lage afvoeren en het analyseren van het samenvallen van gebeurtenissen zijn verschillende datasets gebruikt, namelijk simulaties gebaseerd op de large-ensemble data, simulaties gebaseerd op de KNMI'23 scenario's en simulaties voor een discontinu klimaatscenario (stilvallen AMOC). De datasets worden beschreven in Hoofdstuk 2. Om aan te tonen wat voor mogelijkheden er zijn voor het bepalen van lage afvoeren zijn er meerdere statistische methoden gebruikt in dit rapport om inzicht te geven in extreme afvoeren. Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van de methoden, waarbij de beschrijving beknopt en technisch is. De resultaten van de analyses voor de lage afvoeren en de samenvallende gebeurtenissen voor de Rijn en Maas worden weergegeven in Hoofdstuk 4. Voor de kleinere oppervlaktewateren bleek alleen voor de Drentsche Aa een neerslag-afvoer model beschikbaar voor deze analyse. De resultaten daarvan zijn ook opgenomen in hoofdstuk 4. In Hoofdstuk 5 worden de resultaten bediscussieerd en staan de conclusies van het onderzoek.

2 Basisdata en simulaties

Voor het bepalen van de lage afvoeren en het analyseren van het samenvallen van gebeurtenissen zijn verschillende datasets gebruikt, namelijk simulaties gebaseerd op de large-ensemble data, simulaties gebaseerd op de KNMI'23 scenario's en simulaties voor een discontinu klimaatscenario (AMOC collapse). Voor het opstellen van de datasets is samengewerkt met Universiteit Utrecht. De gebruikte datasets worden in dit hoofdstuk beknopt beschreven.

2.1 Large-ensemble data

We gebruiken modelsimulaties voor de afvoer bij Lobith en Eijsden uit het mondiale hydrologische model PCR-GLOBWB 2 (Sutanudjaja et al. 2018)². Deze modelsimulaties zijn beschikbaar gesteld door de Universiteit Utrecht. PCR-GLOBWB simuleert de waterbalans op een 0.5° grid (ongeveer 50x50 km) en is uitgebreid beschreven in Sutanudjaja et al. (2018). In Figuur 2-1 is PCR-GLOBWB schematisch weergegeven. Voor het genereren van de afvoerreeksen zijn als invoerdata neerslag, luchttemperatuur en referentieverdamping gebruikt uit de KNMI-LENTIS large-ensemble dataset zoals berekend met klimaatmodel EC-Earth3 op een resolutie van 80*80 km (Muntjewerf et al. 2023b).



Figuur 2-1 Overzicht van de belangrijkste componenten in PCR-GLOBWB-2, waarbij S_1 , S_2 is berging bodemvocht, S_3 is berging grondwater, Q_{dr} is oppervlakkige afvoer, Q_{sf} is interflow, Q_{bf} is basisafvoer en Inf is infiltratie vanuit oppervlaktewater naar het grondwater. Figuur overgenomen uit Sutanudjaja et al. (2018)

Er zijn twee verschillende afvoerscenario's berekend op basis van de LENTIS dataset. De scenario's in de LENTIS dataset bestaan ieder uit 160*10 jaar aan simulaties, waarmee dus in totaal 1600 jaar aan afvoersimulatie wordt verkregen voor ieder scenario (Muntjewerf et al. 2023b). Voor deze verdeling van simulaties is gekozen, omdat er in de periode van 10 jaar zelf geen signaal van klimaatverandering optreedt en er wordt aangenomen dat een

² <https://globalhydrology.nl/research/models/pcr-globwb-2-0/>

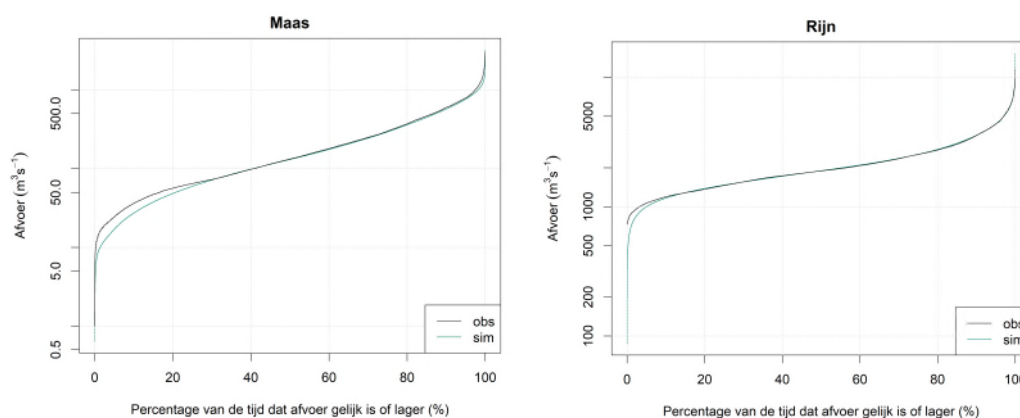
periode van 1600 jaar lang genoeg is om de verdeling van klimaatvariabiliteit weer te geven (Muntjewerf et al. 2023b). Het eerste scenario 'present-day' ('PD', Huidig klimaat) is gebaseerd op de mondiale gemiddelde oppervlaktetemperatuur van het huidige klimaat (de periode 2000-2009). Het tweede scenario gaat uit van een toename van 2 graden ten opzichte van de huidige gemiddelde temperatuur ('+2°C'). Dit scenario is gebaseerd op de jaren 2075-2084 van het Shared Socioeconomic Pathway 2-4.5 scenario (het SSP2-4.5 scenario, een toekomstscenario gebruikt in IPCC rapporten), omdat deze selectie het best een toename van 2 graden ten opzichte van de gekozen periode voor het huidige klimaat weergeeft (Muntjewerf et al. 2023b). Het gaat hier niet om een extreem scenario, als de uitstoot niet verminderd wordt, zullen de veranderingen extremer zijn dan in het gekozen scenario. De gesimuleerde afvoeren zijn gecorrigeerd (ofwel bias-correctie) op basis van de gemeten afvoeren (hierna 'observaties') in een referentieperiode van 1991-2020 met de kwantielcorrectie gelijkwaardig aan die in de Deltascenario's (Droppers en Wanders 2024, Janssen et al. 2024). Dat betekent dat de simulatieresultaten zijn getransformeerd op dezelfde manier als nodig is om simulaties van de referentieomstandigheden te laten passen op geobserveerde waarden; hiermee wordt gecorrigeerd voor een bepaalde categorie afwijkingen in modelsimulaties.

De duurlijnen voor de afvoer van de Maas en de Rijn gesimuleerd voor het 'present-day' scenario en gebaseerd op observaties in de referentieperiode (1991-2020) geven een overzicht van hoge en lage gesimuleerde waarden na bias-correctie (Figuur 2-2). Daarnaast zijn de percentielwaarden voor de laagste 10, 5 en 1% (resp. Q10, Q5 en Q1) waarden bepaald uit de afvoerreeksen (Tabel 2-1). De afvoerregimes van Maas en Rijn voor de twee scenario's en de observaties zijn weergegeven in Figuur 2-3 en Figuur 2-4. Opvallend is vooral de toenemende variatie in Rijnaflow in zomer en herfst, waarbij ook fors lagere afvoeren kunnen voorkomen bij 2 graden temperatuurstijging tot 2100.

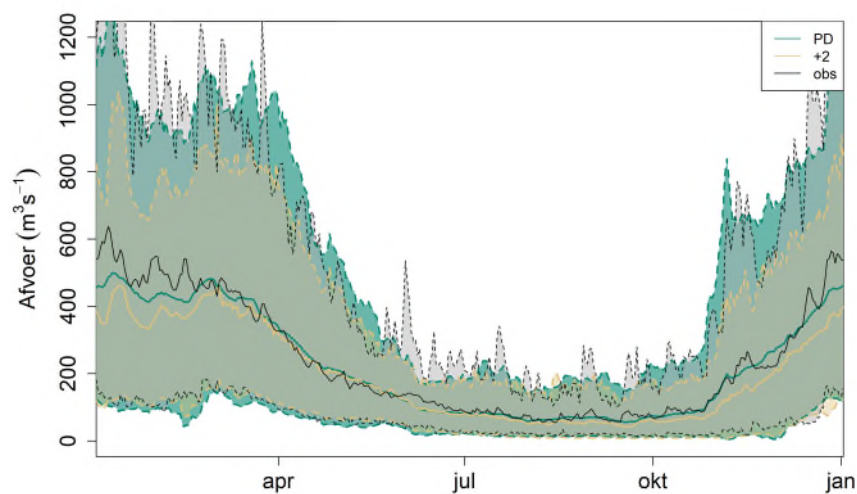
De gesimuleerde afvoeren voor de Rijn liggen dichterbij de observaties dan de simulaties voor de Maas; dit komt overeen met eerdere analyses van Droppers en Wanders (2024). Voor de Maas worden de lage afvoeren onderschat in het 'present day' scenario ten opzichte van de observaties. Dit kan veroorzaakt worden doordat menselijke ingrepen zoals keuzes in het waterbeheer en lozingen niet exact meegenomen worden in het mondiale model. Ook voor de Rijn is in de simulaties een onderschatting zichtbaar bij de extreem lage afvoeren (Q1), maar de Q5 en Q10 waarden komen goed overeen met de observaties (Tabel 2-1). Verder valt op dat bij de Rijn een groter verschil gesimuleerd wordt dan in de Maas tussen het 'present day' en '+2 graden' scenario, vooral in Q5 en Q95 waarden in de zomer en herfst (Figuur 2-4). Zoals gebruikelijk bij scenarioanalyse richt deze studie zich niet zozeer op exacte reproductie van afvoeren, maar op verschillen tussen huidige en toekomstscenario's.

Tabel 2-1 Drempelwaarden ($m^3 s^{-1}$) Rijn en Maas uit de gesimuleerde afvoerreeksen voor het 'present-day' scenario na bias-correctie (sim) en observaties (obs) uit de referentieperiode.

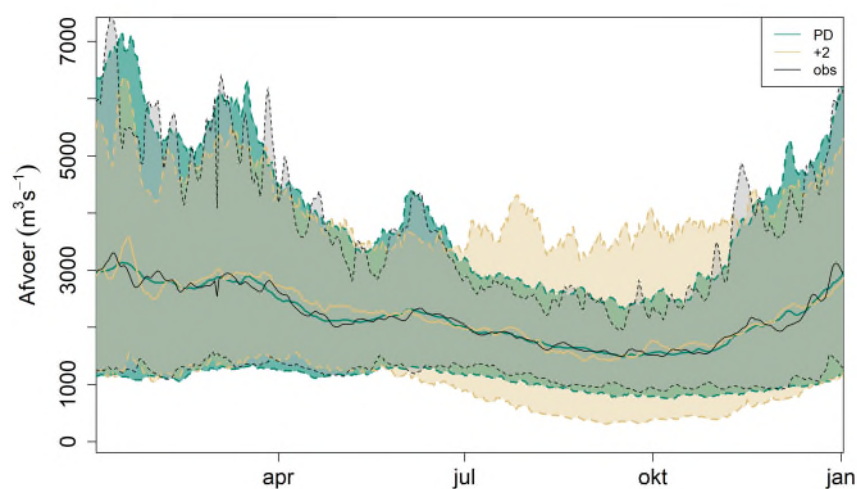
		Q10	Q5	Q1
Rijn	Sim	1167.5	1000.6	700.2
	Obs	1193.4	1066.9	880.2
Maas	Sim	27.2	17.0	9.1
	Obs	36	24.1	15



Figuur 2-2 Duurlijn voor afvoer in de Maas (links) en de Rijn (rechts) voor het 'present-day' scenario na bias-correctie (sim) en gebaseerd op observaties (obs) in de referentieperiode (1991-2020).



Figuur 2-3 Afvoerregime voor de Maas bepaald uit de gemiddelde afvoeren voor de ensembles voor huidig klimaat (present day PD), +2 graden en de observaties (obs) in de referentieperiode (1991-2020). De gekleurde banden en stippellijnen geven het 5^{de} en 95^{ste} percentiel aan voor de ensembledata en de observaties (grijs).



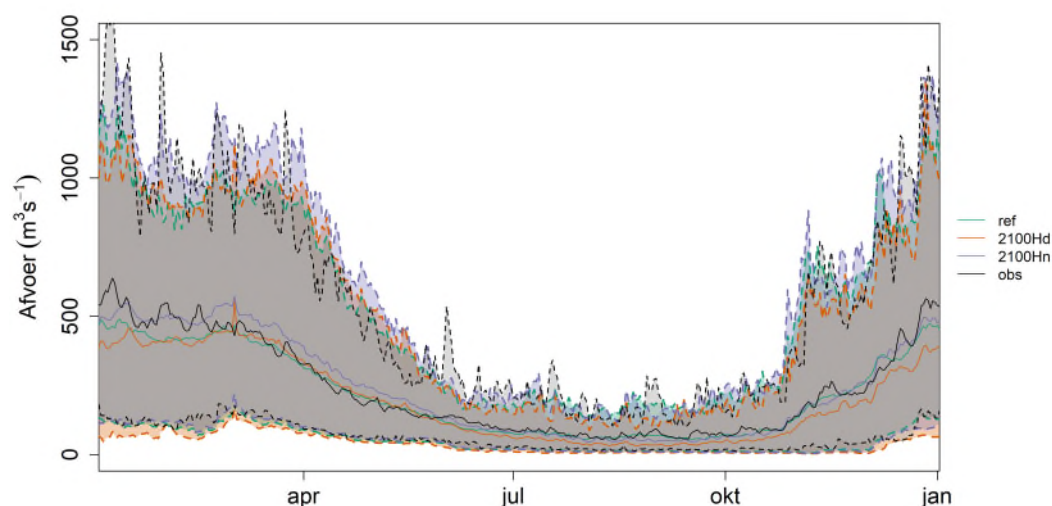
Figuur 2-4 Afvoerregime voor de Rijn bepaald uit de gemiddelde afvoeren voor de ensembles voor huidig klimaat (PD), en +2 graden en de observaties (obs) in de referentieperiode (1991-2020). De gekleurde banden en stippellijnen geven het 5^{de} en 95^{ste} percentiel aan voor de ensembledata en de observaties (grijs).

2.2 KNMI'23 scenario's

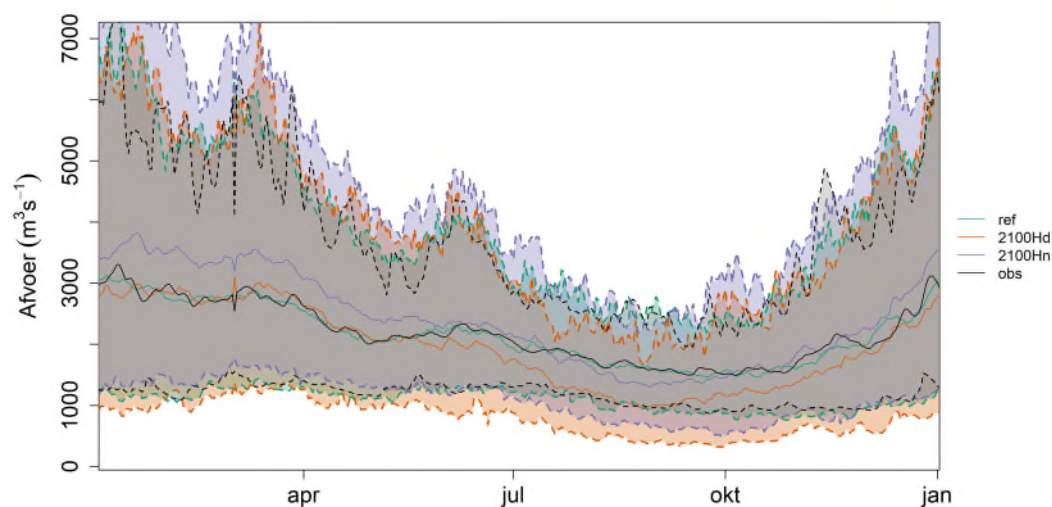
Het KNMI heeft in 2023 klimaatscenario's uitgebracht voor Nederland (KNMI 2023). Deze klimaatscenario's zijn gebaseerd op verschillende emissiescenario's (Hoog, Laag, Gemiddeld) en voor meerdere periodes (bijv. 2050, 2100). Daarnaast is voor elk emissiescenario en elke periode een droge (d) en een natte (n) variant uitgebracht. Voor elke variant zijn 8 tijdreeksen van 30 jaar beschikbaar, dus in totaal 240 jaar aan simulaties per scenario. De Universiteit Utrecht heeft ook voor deze scenario's de afvoeren voor de Rijn en Maas gesimuleerd met PCR-GLOBWB2 (Droppers en Wanders 2024) en beschikbaar gesteld voor deze studie.

Het afvoerregime voor de observaties, de gesimuleerde referentieperiode en gesimuleerde scenario's is weergegeven in Figuur 2-5 en Figuur 2-6. We kijken hier wederom naar de bias-gecorrigeerde afvoerreeksen voor de Maas en de Rijn voor de referentieperiode en het droge en natte scenario met hoge emissies voor 2100 (2100Hd en 2100Hn). Er is gekozen voor deze scenario's, omdat die de meest extreme verschillen in de afvoeren laten zien. In de latere analyses worden ook de midden scenario's meegenomen (2100Md en 2100Mn).

De simulaties in de referentieperiode komen opnieuw beter overeen met de observaties voor de Rijn dan voor de Maas. Voor beide rivieren geldt dat de lage afvoeren extremer worden in de scenario's, waarbij het droge scenario zoals verwacht tot de laagste afvoeren leidt.



Figuur 2-5 Afvoerregime voor de Maas bepaald uit de gemiddelde afvoeren voor de KNMI-scenario's voor de referentie (1991-2020), 2100Hn en 2100Hd en observaties in de referentieperiode (1991-2020). De gekleurde banden en stippellijnen geven het 5^{de} en 95^{ste} percentiel aan.



Figuur 2-6 Afvoerregime voor de Rijn bepaald uit de gemiddelde afvoeren voor de KNMI-scenario's voor de referentie (1991-2020), 2100Hn en 2100Hd en de observaties in de referentieperiode (1991-2020). De gekleurde banden en stippellijnen geven het 5^{de} en 95^{ste} percentiel aan.

2.3 Discontinue klimaatscenario's: AMOC collapse

Zoals aangegeven in de inleiding zijn klimaatprojecties omgeven met onzekerheid. Onderdeel hiervan zijn mogelijke discontinue ontwikkelingen van het klimaat. Om het mogelijke effect van een klimaatkantelpunt te illustreren, is in dit rapport een aanvullend klimaatscenario beschouwd, waarin de AMOC (Atlantic Meridional Overturning Circulation, waar de Golfstroom onderdeel van is) aanzienlijk verzwakt. Dit leidt tot een kouder en droger klimaat in Europa. Numerieke modellen vormen een hulpmiddel om de effecten van een ineenstorting van de AMOC op het Europese klimaat met de vereiste mate van detail te bestuderen. In het bijzonder worden hiervoor vaak zogenaamde *hosing experiments* gebruikt. In deze numerieke experimenten wordt een gestage instroom van zoet water in de noordelijke Atlantische Oceaan in het model opgelegd om het model in de richting van een AMOC-uitstorting te sturen. Deze aanpak werd ook gebruikt in onder andere de volgende artikelen: Bellomo et al. (2023), Jackson et al. (2023) en Van Westen et al. (2024). De resultaten van deze simulaties kunnen vervolgens als input voor een afvoermodel worden gebruikt. Door zijn ruwe simulatieresultaten van de hosingexperimenten verstrekt. Let op dat bij deze simulaties geen ensembles zijn doorgerekend, maar per scenario (referentie en verstoord) slechts één run van 150 jaar. Binnen deze periode van 150 jaar kiezen wij voor de analyse geschikte perioden van 30 jaar. De simulatieresultaten omvatten controleruns (voor pre-industriële omstandigheden: forcing representatief voor 1850) en verstoorde experimenten met verschillende hoeveelheden spreiwater (0.1, 0.3 en 0.5 Sverdrup = $10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$).

Zoals eerder aangegeven vertonen klimaatmodellen over het algemeen een bias in vergelijking met waarnemingen. Dit is al lange tijd bekend en er zijn veel zogenaamde bias correctie (B-C) methoden ontwikkeld om simulatieresultaten te corrigeren voor deze vertekeningen. Dinh en Aires (2023) geven een recent overzicht van methodologieën met de nadruk op hun toepassing in impactstudies. De toegepaste methoden voor B-C op de resultaten van de spoelexperimenten worden beschreven in Tabel 2-2, waarbij de benadering van Van der Wiel et al. (2019) wordt overgenomen. De methoden in deze benadering zijn algemeen gebruikt, relatief eenvoudig en hun toepassing draagt bij aan de herbruikbaarheid van de biasgecorrigeerde simulatieresultaten in andere projecten die dezelfde benadering toepassen. Merk op dat voor alle velden de biascorrectie op maandbasis worden berekend met lineaire interpolatie tussen de maandmiddens om discontinuïteiten aan de maandgrenzen te voorkomen.

Biascorrectiefactoren worden verkregen door een vergelijking tussen de controleruns (omstandigheden of 'forcings' voor het jaar 1850) en de vroegst beschikbare historische dataset met voldoende geografische dekking,

namelijk ERA5 (Hersbach et al. 2023) voor de periode 1940-1969 voor temperatuur en verdamping, en W5E5v2.0³ (ISIMIP, 2025) voor de neerslag, afzonderlijk voor elk knooppunt van het simulatieraster van de resultaten van het *hosing experiment*. De reden dat voor de neerslag vanuit W5E5v2.0 is gekozen, is dat de ERA5-dataset voor neerslag teveel motregen heeft en W5E5v2.0 hiervoor gecorrigeerd is met behulp van stationsdata. De biasgecorrigeerde data zijn vervolgens door de UU gebruikt voor afvoersimulaties met PCR-GLOBWB.

Tabel 2-2: Methoden voor biascorrectie die in dit project zijn toegepast op de output van *hosing experiments*.

Veld	Methode
Temperatuur	lineaire offset
Neerslag	correctie voor droge dagen, gevolgd door lineaire schaling, zodat het vertekend gecorrigeerde signaal hetzelfde aantal maandelijkse natte dagen heeft als de waarnemingen en de totale maandelijkse neerslag behouden blijft
Verdamping	lineaire schaling

³ <https://www.isimip.org/gettingstarted/input-data-bias-adjustment/details/114/>

3 Methode

3.1 Statistieken extreem lage afvoeren

3.1.1 Continue verdelingen voor afvoerreeksen

Voor het beschrijven van de statistieken van afvoerreeksen is reeds lang bekend dat veelgebruikte kansverdelingen als de normaalverdeling niet volstaan voor een adequate beschrijving van het optreden van extremen aan beide kanten van de distributie. Om een betere beschrijving hiervan te krijgen, zijn aanvullende verdelingen ontwikkeld of specifiek toegepast op hydrologische tijdreeksen, zoals de gegeneraliseerde extreme-waardenverdeling (generalized extreme value, GEV).

Deze laatste is gebaseerd op extreme-waardentheorie (Extreme value theory), welke het limietgedrag van niet-ontaarde kansverdelingen van vectoren van componentgewijze maxima (of minima) van willekeurige variabelen bestudeert (Salvadori 2013). Anders gezegd: extreme-waardentheorie gaat over het verkennen van het optreden van gebeurtenissen aan de randen van kansverdelingen; daar waar het aantal waarnemingen per definitie beperkt is.

De gegeneraliseerde extreme-waardenverdeling (GEV) is als volgt gedefinieerd (Tallaksen en Laaha 2023):

$$F_X(x) = \exp \left\{ - \left[1 - \frac{\kappa(x - \xi)}{\alpha} \right]^{1/\kappa} \right\}$$

Hierin worden gebruikt de locatieparameter ξ , de schaalparameter α en de vormparameter κ . De GEV biedt een gegeneraliseerde beschrijving van 3 typen kansverdelingen, waarvan type I (de Gumbelverdeling, $\xi=0$) het meest relevant is voor hydrologische problemen. Echter, ook type III (Weibullverdeling, $\xi<0$) wordt gebruikt voor parameters die geen negatieve waarde kunnen krijgen.

Voor de toepassing op de lage afvoeren van de Rijn en Maas zijn eerst de 7-daagse laagste afvoeren per jaar voor de volledige periode bepaald voor elk scenario. Voor deze laagste afvoeren wordt vervolgens de GEV geschat. Hieruit kunnen de herhalingstijden van de laagste afvoeren bepaald worden.

Het gebruik van statistische modellen voor het schatten van de extreme waarden is in veel gevallen noodzakelijk, omdat de tijdreeksen van geobserveerde of gesimuleerde afvoeren vaak te kort zijn om extreme waarden goed in te schatten. Het gebruik van statische modellen zoals de GEV heeft echter ook nadelen, aangezien een bepaalde kansverdeling aangenomen wordt. Van der Wiel et al. (2019) laten de beperkingen van de GEV zien op basis van large-ensemble data voor 2000 jaar. Bij het gebruik van de large-ensemble data is het mogelijk om een empirische distributie te gebruiken voor het bepalen van de extreme waarden. De herhalingstijden voor lage afvoeren zijn daarom ook rechtstreeks bepaald uit de large-ensemble data met een empirische verdeling. De onzekerheidsmarges voor de herhalingstijden zijn bepaald met behulp van bootstrapping (Van der Wiel et al. 2019) (paragraaf 3.2.1).

3.1.2 Discrete verdelingen voor voorkomens van afvoerdrempelwaarde overschrijdingen

In praktische zin wordt voor het bepalen van de kans op voorkomen van overschrijdingen van een bepaald gebied, vaak uitgegaan van maxima in de observaties binnen begrensde perioden in een meetreeks (bijvoorbeeld jaarlijks: AMS of Annual Maxima Series), of van over-/overschrijdingen van een voorgeschreven grenswaarde (POT: peak over threshold of TUT: through under threshold) (Camuffo et al. 2020). Voortbouwend op een benadering die

oorspronkelijk is gepresenteerd door Önöz en Bayazit (2002) beschouwen we in dit rapport het aantal overschrijdingen per jaar van een voorgeschreven drempelwaarde gedurende een periode van een voorgeschreven minimale duur voor afvoer als een discrete variabele. Met andere woorden, we tellen hoe vaak de afvoer gedurende een jaar onder een drempelwaarde komt voor een periode die minimaal een voorgeschreven aantal dagen lang is. Hierbij kunnen optioneel korte onderbrekingen van deze overschrijdingsperiode genegeerd worden. Er zijn verschillende discrete kansverdelingen in gebruik die mogelijk passend zijn om dit gedrag mee te modelleren.

Poissonverdeling

De Poissonverdeling is een discrete kansverdeling die wordt gekenmerkt door het gelijk zijn van het gemiddelde en de variantie. De eerste aanname bij het fitten van data aan een Poissonverdeling is dat deze data een proces representeren dat zich constant in de tijd afspeelt, dat wil zeggen dat de kans op het optreden van een gebeurtenis (zoals een overschrijding van een afvoerdrempelwaarde) ieder jaar hetzelfde is. Aan deze voorwaarde wordt in principe voldaan als de simulaties gebaseerd zijn op gelijkblijvende klimatologische omstandigheden (scenario's present day PD en +2C), maar niet in de observaties, omdat deze zich in de context van een reeds veranderend klimaat hebben voorgedaan.

De tweede aanname is dat de gebeurtenissen onafhankelijk van elkaar optreden. Voor overschrijdingen van afvoerdrempelwaarden die zich slechts eenmaal per meerdere jaren voordoen, lijkt dit een redelijke aanname. Voor gebeurtenissen die zich meerdere malen per jaar of meerdere jaren achtereenvolgens voordoen, is het denkbaar dat achtereenvolgende overschrijdingen aan elkaar gerelateerd zijn, dat zij onderdeel zijn van eenzelfde langdurige droogte, of dat het riviersysteem bij het tweede voorkomen zich nog niet heeft hersteld van het eerste.

Negatieve binomiale verdeling

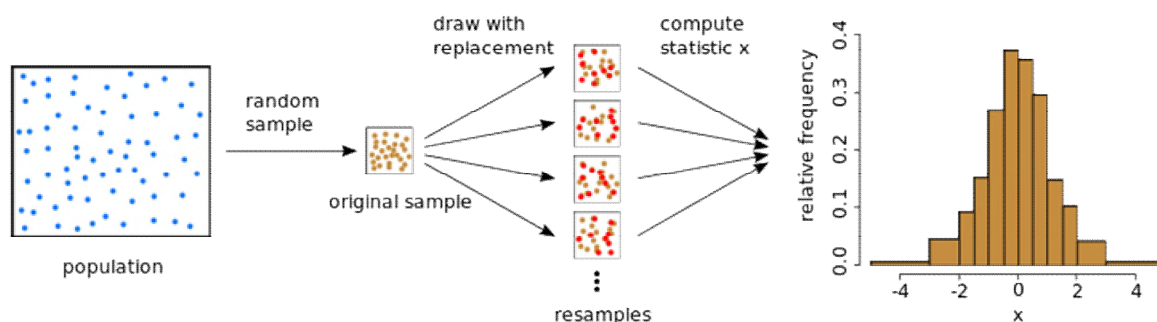
In de praktijk is bij veel processen de variantie (iets of veel) groter dan het gemiddeld. De mate waarin dit het geval is, wordt weergegeven door de zogenaamde dispersieratio, die is gedefinieerd als het quotiënt van de variantie en het gemiddelde. De negatieve binomiale verdeling beschrijft de uitkomst van een reeks experimenten waarin steeds de kans van het optreden van een bepaalde gebeurtenis gelijk en onafhankelijk van eerdere voorkomens is. Hij is in die zin vergelijkbaar met de Poissonverdeling, met dien verstande dat de negatieve binomiale verdeling wel een parameter bevat die de spreiding beschrijft.

In Hoofdstuk 4 wordt onderzocht in welke mate de voor de geanalyseerde data bepaalde overschrijdingen passen bij deze discrete kansverdelingen.

3.2 Bepaling van onzekerheidsintervallen

3.2.1 Bootstrapping van modelresultaten

Bootstrapping is een veelgebruikte methode die wordt toegepast op (grote hoeveelheden) simulaties, waarbij betrouwbaarheidsintervallen worden verkregen door de grotere set waarnemingen (of simulaties in dit geval) te bemonsteren en de statistiek van de submonsters te beschrijven (Efron en Tibshirani 1993, Wikipedia 2024). Dit is schematisch weergegeven in Figuur 3-1. Op een dergelijke manier hebben Van der Wiel et al. (2019) bijvoorbeeld 95%-betrouwbaarheidsintervallen van rivierafvoeren bepaald op basis van een ensemble dat 2000 jaar gesimuleerd klimaat bevat (400 runs van 5 jaar).



Figuur 3-1: Schematische weergave van de bootstrapping-methode (door Biggerj1 en Marsupilami https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Illustration_bootstrap.svg)

Een belangrijk aandachtspunt bij toepassing van de bootstrapping-methode is dat de werkelijke kansverdeling van de data geen “zware staarten” heeft (*heavy-tailed*), hetgeen tot een onbetrouwbare schatting van de variantie, en daarmee het gezochte betrouwbaarheidsinterval, kan leiden (Athreya en Hinkley 1987).

3.2.2 Discrete statistische kansverdelingen

Voor de Poissonverdeling kan een betrouwbaarheidsinterval worden bepaald op basis van de χ^2 -verdeling als kwantielfunctie. Hiermee worden de onder- (n_{lower}) en bovengrens (n_{upper}) voor een $(1-\alpha)$ -betrouwbaarheidsinterval als volgt beschreven:

$$n_{lower} = \frac{1}{2} \chi^2\left(\frac{\alpha}{2}; 2k\right)$$

$$n_{upper} = \frac{1}{2} \chi^2\left(1 - \frac{\alpha}{2}; 2k + 2\right)$$

Hierin is k het aantal vrijheidsgraden (waarnemingen).

Voor de negatieve binomiale verdeling is geen exacte formulering van de kwantielfunctie beschikbaar; er bestaan echter verschillende manieren om deze numeriek te benaderen (Khurshid et al. 2005). Hetzelfde geldt ook voor de GEV (Dupuis en Field 1998). In het onderstaande tonen wij aan dat de Poissonverdeling een adequate beschrijving geeft en passen wij de hier beschreven bijpassende formulering voor het betrouwbaarheidsinterval toe.

3.3 Samenvallende gebeurtenissen

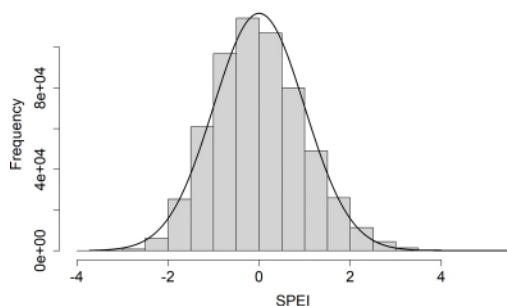
We gebruiken de klimaatscenario's en de hieraan gekoppelde afvoersimulaties om te onderzoeken of warme, droge periodes (met daardoor een toename in watervraag) en periodes met lage afvoeren in de toekomst vaker gaan samenvallen. De verschillende gebeurtenissen (hitte, meteorologische droogte en afvoeren) worden hiervoor afzonderlijk gedefinieerd.

3.3.1 Meteorologische droogte

Voor het definiëren van een meteorologische droogte is gebruik gemaakt van een gestandaardiseerde index voor het neerslagtekort (neerslag - referentieverdamping), de SPEI (Vicente-Serrano et al. 2010). De SPEI kan bepaald worden voor verschillende geaccumuleerde perioden, bijvoorbeeld in het geval van neerslag om de invloed van droge dagen te middelen over een langere tijdsperiode. We hebben hier gekozen voor een periode van 30 dagen. De SPEI op een bepaalde dag is dus gebaseerd op het gemiddelde neerslagtekort in de voorgaande 30 dagen.

De eerste stap voor het berekenen van de SPEI is het schatten van een kansverdeling op de dagelijkse data. We hebben hier de normale verdeling gefit. De geschatte kansverdeling wordt vervolgens gebruikt om de

kansdichtheid te schatten voor een bepaalde hydrologische gebeurtenis. De kansdichtheidsfunctie kan vervolgens worden omgezet naar een standaardnormale verdeling (Figuur 3-2). Voor het bepalen van de index waarden voor de toekomstscenario's is de verdeling gebruikt die geschat is op basis van de simulaties voor het huidige klimaat. Voor het bepalen van de periodes met meteorologische droogte zijn alle waarden onder de -1.5 geselecteerd (Tabel 3-1).



Figuur 3-2. Voorbeeld van de verdeling van SPEI-waarden gebaseerd op data van het neerslagtekort gefit met een normaalverdeling en omgezet naar de standaardnormaal verdeling.

Tabel 3-1 Classificatie van droogte gebaseerd op de waarde van de gestandaardiseerde index en bijbehorende waarschijnlijkheden (Lloyd-Hughes en Saunders 2002).

Waarde van index	Categorie	Waarschijnlijkheid %
2 of meer	Extreem nat	2.3
1.5 tot 1.99	Zeer nat	4.4
1.0 tot 1.49	Matig nat	9.2
0 tot 0.99	Enigszins nat	34.1
0 tot -0.99	Enigszins droog	34.1
-1.0 tot -1.49	Matig droog	9.2
-1.5 tot -1.99	Zeer droog	4.4
-2 of minder	Extreem droog	2.3

3.3.2 Hitte

In de ensembles is alleen de gemiddelde temperatuur per dag beschikbaar en niet de maximumtemperatuur. De officiële definitie van een hittegolf van het KNMI is gebaseerd op de maximumtemperatuur en kunnen we hier dus niet toepassen. Daarom wordt hier gesproken over een warme dag als de temperatuur hoger is dan het 95^{ste} percentiel in de periode met het huidige klimaat. Het 95^{ste} percentiel voor het huidige klimaat is 20°C.

Uit eerder onderzoek blijkt dat het drinkwaterverbruik toeneemt vanaf een maximumtemperatuur van 17°C (Cirkel et al. 2005). Bij een gemiddelde temperatuur van boven de 20°C zal er dus zeker een toename in het drinkwaterverbruik plaatsvinden.

3.3.3 Lage afvoeren

Voor de definitie van een lage afvoer is hier gekozen voor het 5^{de} percentiel van de afvoerreksen voor het huidige klimaat als drempelwaarde. De verschillende percentiel waarden voor het huidige klimaat voor de Rijn en de Maas worden gegeven in Tabel 2-1.

3.4 Drentsche Aa

Voor de Drentsche Aa is een neerslag-afvoermodel beschikbaar gesteld door Waterbedrijf Groningen dat specifiek gekalibreerd is voor lage afvoeren (Voortman en Vonk 2022). Het model is een GR4J-model (Perrin et al. 2003), wat betekent dat het een neerslag-afvoer model met vier parameters is. Het model berekent de afvoer gebaseerd op neerslag en referentieverdamping. Hierbij wordt aangenomen dat het watersysteem niet verandert in de toekomst. Veranderingen door watermanagement of aanpassingen aan landgebruik worden dus niet meegenomen.

Vanuit de large-ensemble data zijn ook de neerslag en referentieverdamping voor De Bilt beschikbaar (Muntjewerf et al. 2023a). Deze meteorologische data zijn als invoer gebruikt voor het neerslag-afvoer model. Hiermee zijn voor de verschillende scenario's ('present-day', '+2°C') simulaties gedaan voor de Drentsche Aa.

4 Resultaten

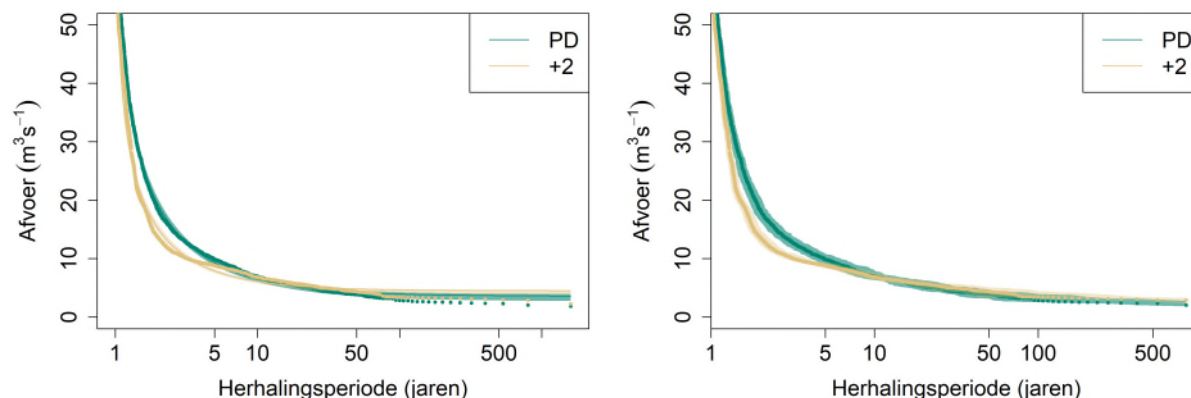
4.1 Herhalingstijden lage afvoeren

4.1.1 Large-ensemble data

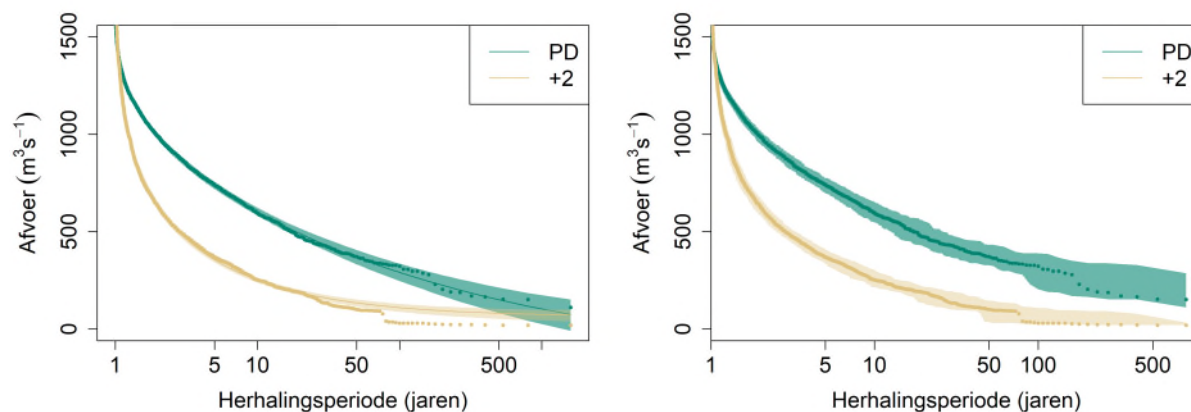
De herhalingstijden voor lage afvoeren zijn bepaald aan de hand van de GEV en een empirische verdeling voor Eijsden en Lobith voor alle scenario's (Figuur 4-1 en Figuur 4-2). De onzekerheidsmarges voor de empirische verdeling zijn gebaseerd op bootstrapping en groter dan de onzekerheid voor de GEV. Uit de figuren blijkt dat de extreme afvoeren met een herhalingstijd van 100 jaar of hoger overschat worden door de GEV, zeker voor Eijsden en in het +2°C scenario voor de Rijn.

Voor de Maas is het verschil tussen de referentie en het +2°C scenario het grootst voor de lage afvoeren met een herhalingstijd tot 10 jaar. Deze afvoeren nemen af in het +2°C scenario. Zevendaagse afvoeren onder de 10 m³/s komen vaker voor in het Mn toekomstscenario. Voor afvoeren met grotere herhalingstijden zijn de verschillen kleiner en lijken de bijbehorende afvoeren voor het +2 °C scenario zelfs iets hoger te zijn.

Voor de Rijn zijn de verschillen tussen de referentie en het +2°C scenario veel groter dan voor de Maas. De lage afvoeren voor de Rijn nemen bij alle herhalingstijden af. Afvoeren onder de 500 m³/s komen in de referentieperiode ongeveer 1 x per 17 jaar voor, maar in het +2°C scenario vaker dan 1x per 3 jaar.



Figuur 4-1 Herhalingstijden voor Eijsden voor de verschillende scenario's gebaseerd op GEV (links) en een empirische verdeling (rechts). De doorgetrokken lijnen in de linker figuur geven de verdeling gebaseerd op GEV, de stippellijnen geven de empirische verdeling. De gekleurde banden geven de onzekerheidsmarges weer.

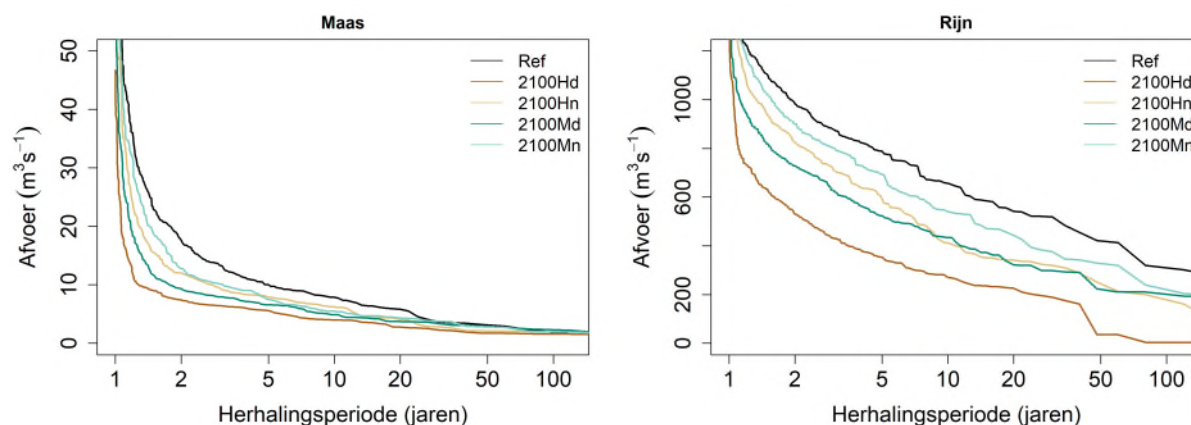


Figuur 4-2 Herhalingstijden voor Lobith voor de verschillende scenario's gebaseerd op GEV (links) en een empirische verdeling (rechts). De doorgetrokken lijnen in de linker figuur geven de verdeling gebaseerd op GEV, de stippellijnen geven de empirische verdeling. De gekleurde banden geven de onzekerheidsmarges weer.

4.1.2 KNMI'23 scenario's

Voor de lage afvoeren gesimuleerd met de KNMI'23 scenario's zijn ook herhalingstijden bepaald (Figuur 4-3) voor de natte en droge scenario's voor het midden en hoge emissie scenario. Ondanks de korte tijdreeksen die beschikbaar zijn (240 jaar), zijn in dit geval empirische verdelingen gebruikt vanwege de eerder getoonde afwijkingen van de GEV. De getoonde hogere herhalingstijden zijn echter erg onzeker door de korte tijdreeks.

De toekomstige 7-daagse laagste afvoer wordt extremer in beide rivieren en in alle beschouwde scenario's. Voor de Rijn treden afvoeren die in de referentieperiode slechts 1 keer per 100 jaar voorkomen in de periode 2100 met het Hd scenario ongeveer 1 keer per 5 jaar op. De verwachting is dus dat de huidige extreme waarden veel gebruikelijker worden in de toekomst. Ook voor de nattere scenario's Mn en Hn is een afname in de laagste afvoeren zichtbaar. Voor de Rijn geldt voor alle scenario's (Mn, Md, Hn en Hd) dat de afvoer afneemt voor elke herhalingsperiode. De afvoer neemt dus af voor extreem lage afvoeren, maar ook voor meer gebruikelijke lage afvoeren. Bij de Maas is vooral een afname te zien bij de lagere herhalingstijden, bij de hoge herhalingstijden van 50 jaar of meer is weinig verschil te zien in de toekomst. De afvoeren bij deze herhalingstijden zijn al zeer laag in het referentiescenario en de berekening van deze herhalingstijden voor de korte tijdreeks is erg onzeker. In het Hd scenario wordt voor de Maas een herhalingstijd van minder dan 2 jaar gegeven voor een afvoer onder de $10 \text{ m}^3/\text{s}$, wat betekent dat die situatie in de toekomst normaal kan gaan worden.



Figuur 4-3 Herhalingstijden op basis van empirische verdelingen voor de 7-daagse laagste afvoer voor de Maas (links) en de Rijn (rechts) voor de referentieperiode en de KNMI'23 scenario's Hd, Hn, Md, Mn voor 2100.

4.2 Onderschrijdingen van afvoerdrempelwaarden

4.2.1 LENTIS-data en KNMI'23 klimaatscenario's

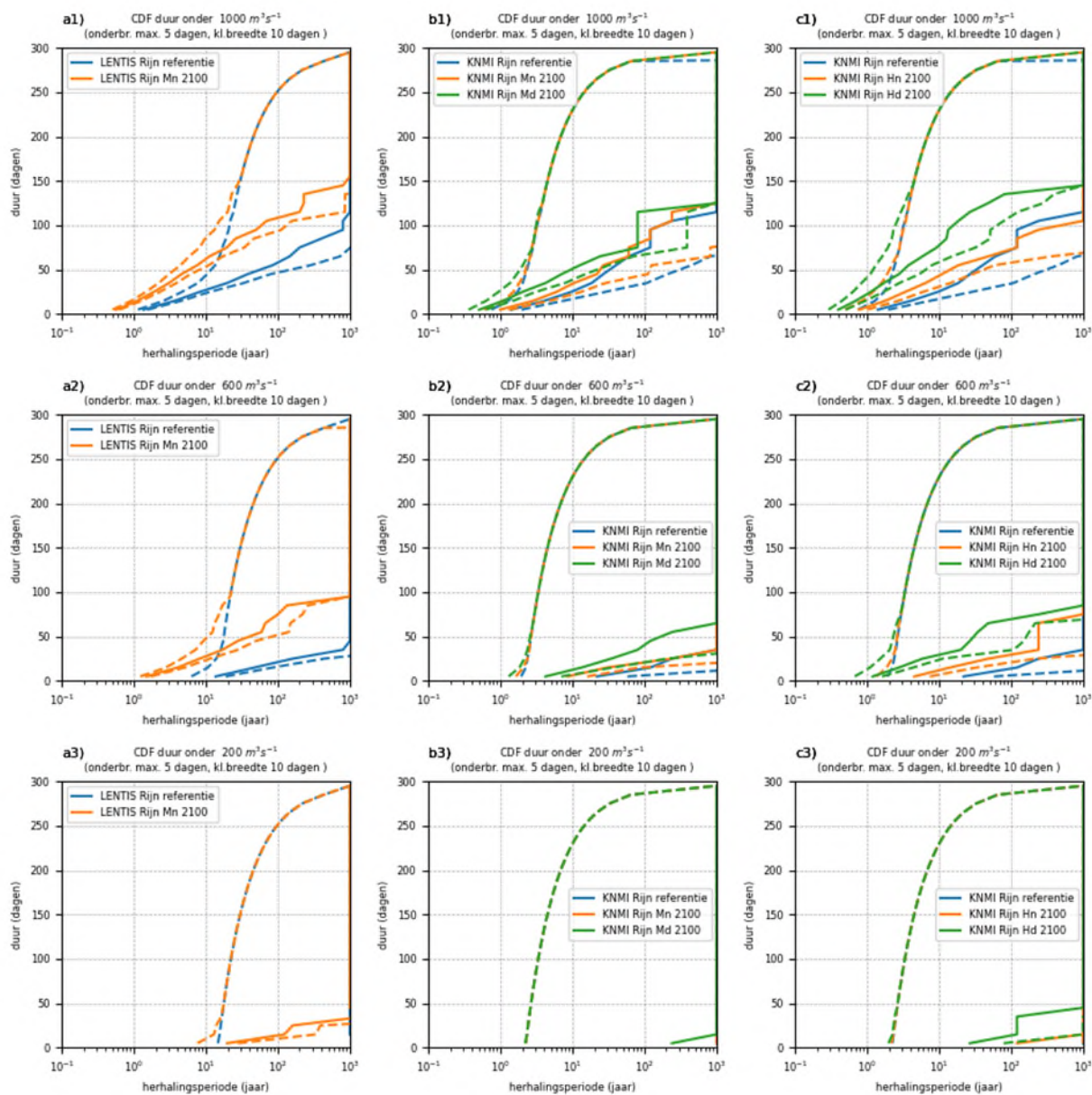
Voor een reeks minimale onderschrijdingsduren is het aantal voorkomens per jaar geturfd in de afvoersimulaties voor zowel de LENTIS large-ensemble scenario's als de KNMI-scenario's. Hierop zijn Poisson- en negatieve binomiale verdeling gefit. De resultaten van deze analyse zijn weergegeven in Bijlage I. De fits voor beide verdelingen liggen erg dicht bij elkaar en doorstaan de χ^2 -toets, die wordt gebruikt om vast te stellen of populaties dan wel verdelingen van elkaar verschillen. De p-waarden bij deze toets, weergegeven in de bijlage, laten zien dat zowel de Poisson- als de negatieve binomiale verdeling een adequate beschrijving van de data geven. Op basis hiervan wordt in de verdere analyse het betrouwbaarheidsinterval bepaald uitgaande van de Poissonverdeling, zoals beschreven in paragraaf 3.2.2. Let hierbij op dat de bepaling van de betrouwbaarheidsintervallen onafhankelijk per punt op de curve is gebeurd. Extra betrouwbaarheid komt voort uit de samenhang en regelmaat van het patroon van de curve. Deze is echter lastig kwantitatief te bepalen.

Figuur 4-4 geeft weer, voor de simulatieresultaten voor de scenario's Mn, Md, Hn, en Hd en referentieberekeningen, wat de herhalingsperiode is van het optreden van afvoer minder dan respectievelijk 1000, 800 en $600 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ voor de Rijn. Figuur 4-5 geeft ditzelfde weer voor de Maas voor afvoeren minder dan

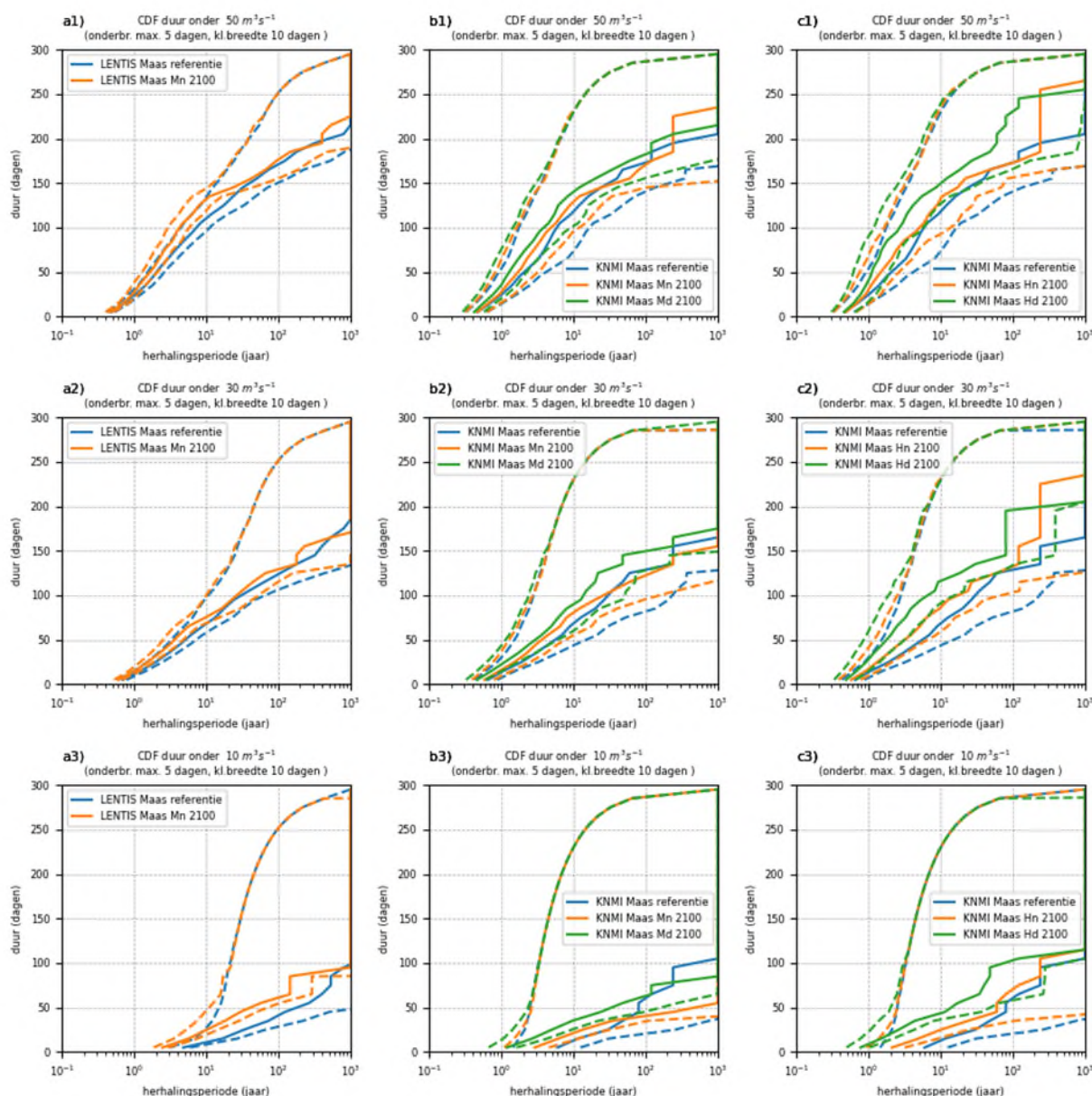
respectievelijk 50, 30 en 10 m³s⁻¹. In alle gevallen zijn ook de bijbehorende betrouwbaarheidsintervallen (95%) weergegeven.

Deze figuren laten zich als volgt lezen. Kijken we naar de eerste grafiek van Figuur 4-4, linksboven, dan zien we op de horizontale as de herhalingsperiode staan van een overschrijding van een drempelwaarde voor de rivierafvoer voor een minimale duur die op de verticale as is weergegeven. De curves in de grafiek geven dus weer hoe lang je gemiddeld kunt wachten op de terugkeer van een periode van een bepaalde minimale duur met een afvoer die kleiner is dan een bepaalde waarde. Voor de Rijn voor het huidige klimaat (referentie in Figuur 4-4a1, blauw) zien we dus dat een (nagenoeg) ononderbroken overschrijding van ca. 60 dagen van een afvoer van 1000 m³s⁻¹ een herhalingsperiode van ongeveer 100 jaar heeft. In de LENTIS-simulaties voor het Mn-scenario ('+2C' scenario, Figuur 4-4a1, oranje) is dit teruggelopen naar respectievelijk ongeveer 10 jaar. De verwachting is dus dat langdurige periodes met lage Rijnafvoer aanzienlijk vaker voorkomen. Ook voor de Maas is een verschuiving zichtbaar van de verwachtingswaarde naar vaker voorkomende langdurig lage afvoeren.

Met name voor de langere overschrijdingsduren zijn de marges erg breed door het geringe aantal observaties in de datasets. Voor de scenario's Mn, Md, Hn, en Hd is er zoals te verwachten een duidelijke verschuiving naar kortere herhalingsperiodes voor langere periodes met overschrijding van de drempelwaarden te zien. Deze ontwikkeling is sterker voor de drogere scenario's Md en Hd in vergelijking met de nattere Mn en Hn scenario's. In Bijlage II zijn analyseresultaten voor een groter aantal drempelwaarden en overschrijdingsduren opgenomen in de vorm van figuren en tabellen.



Figuur 4-4 Herhalingsperiode voor overschrijding van weergegeven grenswaarden voor de Rijn met onzekerheidsbandbreedtes (stippellijnen) op basis van een veronderstelde Poissonverdeling voor het voorkomen van de overschrijdingen voor simulaties (gekleurd).

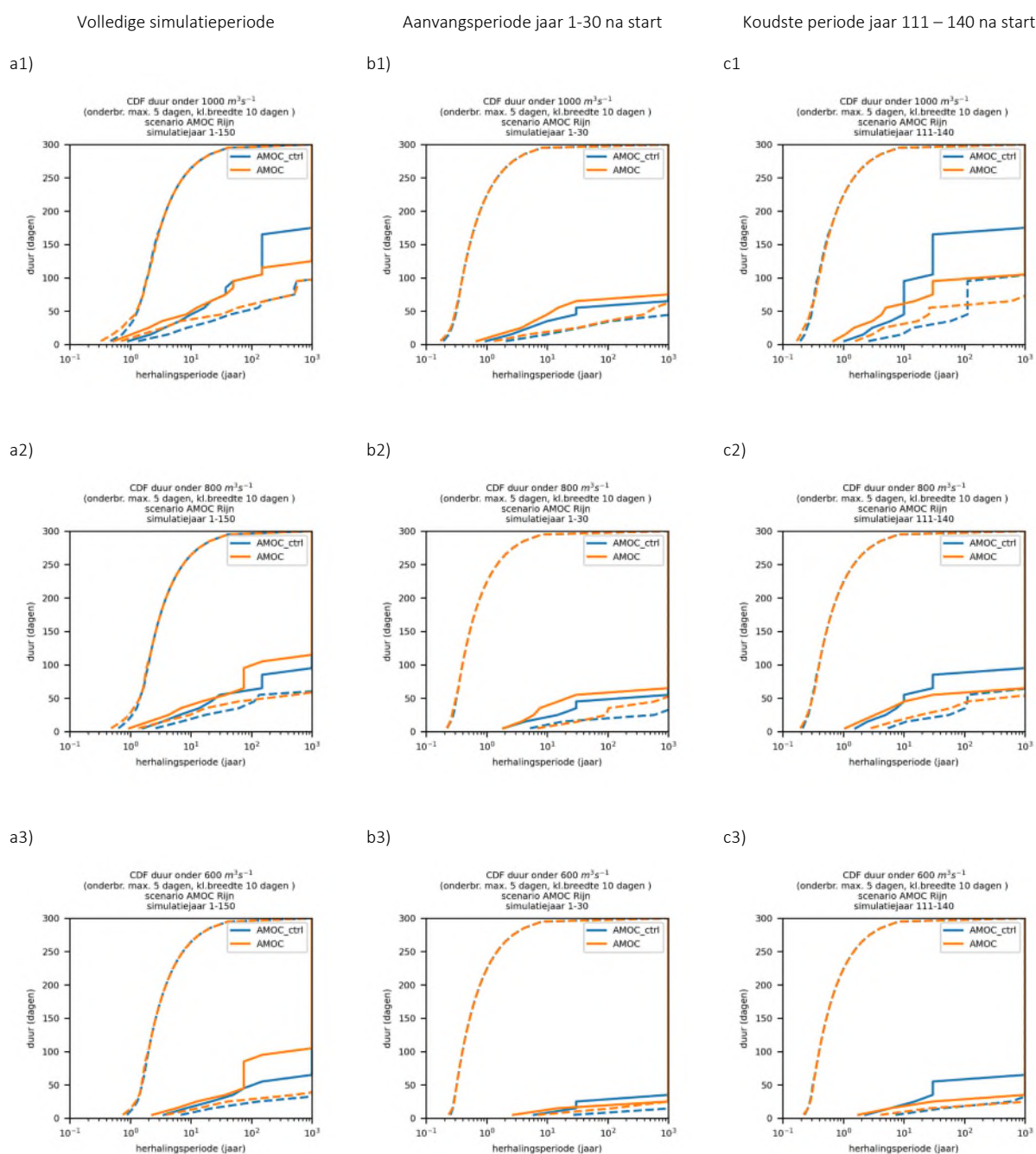


Figuur 4-5 Herhalingsperiode voor overschrijding van weergegeven grenswaarden voor de Maas met onzekerheidsbandbreedtes op basis van een veronderstelde Poissonverdeling voor het voorkomen van de overschrijdingen.

4.2.2 Ineenstorting AMOC

De in de vorige paragraaf beschreven analyse is ook uitgevoerd op de dataset met afvoersimulaties voor de Rijn die aangedreven zijn door een klimaatsimulatie waarbij ineenstorting van de AMOC wordt gesimuleerd. Een beschrijving van deze klimaatsimulatie en consistentietests voor de hierop gebaseerde afvoersimulaties zijn opgenomen in Bijlage IV. De klimaatsimulatie laat een duidelijk verloop in de tijd zien: aan het begin van het experiment begint de sterkte van de AMOC af te nemen, en daarmee ook de temperatuur in Europa; ruim 100 jaar later is de afname van de AMOC intensiteit voltooid en breekt een periode van circa 4 decennia met minimale intensiteit, en daarmee maximale afkoeling in Europa, aan. Zowel voor de aanvangsperiode (eerste 30 jaar na start) als de koudste periode (simulatiejaren 111 – 140 na start) zijn de herhalingsperiodes van de afvoeroverschrijdingen weergegeven in Figuur 4-6.

Vanwege beperkingen en bias in de gebruikte modellen is een vergelijking tussen de afvoer in onverstoorde (geen ineenstorting van de AMOC) en verstoorde (met ineenstorting) simulaties met dezelfde modelset het meest betekenisvol. In deze vergelijking zien we dat de verschillen in Rijnaflow klein lijken te zijn. Met name in de late, koele periode zien we dat het voorkomen van langere perioden van lage afvoer toeneemt. De verschuivingen zijn echter beperkt vergeleken met de berekende (aanzienlijke) afname van temperatuur en neerslag voor Centraal- en West-Europa. In de modelsimulaties wordt een geringere hoeveelheid neerslag door het jaar heen gecompenseerd door een geringere verdamping die gepaard gaat met de lagere optredende temperaturen. Wij benadrukken dat dit slechts één van een reeks mogelijke AMOC-ineenstortingsscenario's betreft, waarbij de intensiteit van de circulatie met ca. 50% terugloopt.



Figuur 4-6 Herhalingsperiode voor overschrijding van weergegeven grenswaarden voor de Rijn met onzekerheidsbandbreedtes op basis van een Poissonmodel, voor simulatiere resultaten over de volledige simulatieperiode (a), aan het begin van een ineenstorting van de AMOC (b) en gedurende de koudste periode van de simulatie (c).

Bij het bestuderen van de effecten van een verzwakking van de AMOC hebben we ons vooralsnog beperkt tot de Rijn. Het gaat bij deze studie namelijk niet zozeer om het voorspellen van absolute afvoeren, als wel om het illustreren dat een dergelijk scenario veel effect kan hebben. Er zijn vele varianten van een verzwakking of ineenstorting van de AMOC denkbaar anders dan het door ons beschouwde scenario met een circa halvering van de intensiteit van de AMOC. Alle varianten hebben andere klimaat- en hydrologische effecten. Een uitbreiding van deze analyse naar aanvullende AMOC-scenario's en rivieren (inclusief de Maas) zal een beter beeld geven van de totale bandbreedte van plausibele afvoeren.

4.3 Samenvallende gebeurtenissen

Vanwege de definities die we hanteren voor lage afvoeren (Q5) en meteorologische droogte (SPEI1 < -1.5) (zie par. 3.3) komen deze gebeurtenissen per definitie 5% van de tijd (lage afvoer) of rond de 5% van de tijd (droogte) voor in het 'present-day' scenario (Tabel 4-1). De combinatie van lage afvoeren en droogte komt veel minder vaak voor, omdat extreme meteorologische droogte, hier bepaald met data representatief voor De Bilt, niet altijd op hetzelfde moment voorkomt als extreem lage afvoeren (1.18% voor de Rijn en 1.03% voor de Maas) en de combinatie van lage afvoeren en hitte nog minder vaak (0.47% voor de Rijn en 0.74% voor de Maas). Het is zeer uitzonderlijk in het huidige klimaat dat lage afvoeren, droogte en hitte tegelijk optreden (0.17%, ofwel gedurende 994 dagen in 1600 jaar voor de Rijn en 0.25%, ofwel gedurende 1461 dagen in 1600 jaar voor de Maas).

Vervolgens is onderzocht hoe het voorkomen van deze samenhangende gebeurtenissen verandert bij +2°C temperatuurstijging. Hiervoor hebben we gebruik gemaakt van de 1600 jaar LENTIS data. Uit de gesimuleerde data bij +2°C temperatuurstijging blijkt dat lage afvoeren, meteorologische droogte en hitte alle vaker voorkomen (Tabel 4-2). Ook de kans op voorkomen van combinaties van gebeurtenissen neemt toe; gecombineerde lage afvoeren en droogte nemen toe naar 1.92% in de Rijn en 1.22% in de Maas. De combinatie van lage afvoeren, droogte en hitte komt 0.89% van de tijd voor in de Rijn en 0.61% van de tijd in de Maas. Deze laatste combinatie komt dus een factor 2.44 vaker voor de Maas en maar liefst een factor 5.24 voor de combinatie met Rijnafvoer. De kans dat lage rivierafvoeren samenvallen met een hoge (drink)watervraag en druk op andere bronnen neemt dus fors toe.

Tabel 4-1 Aantal dagen met meteorologische droogte (SPEI-1 waarden onder -1.5), lage afvoer (Q5) en hitte voor het huidige klimaat in percentages van de totale reeksen (1600 jaar). Q= alle afvoeren boven het 5^{de} percentiel, Q_{laag}= afvoeren onder 5^{de} percentiel, P+ET=geen meteorologische droogte, P+ET_{droog}= meteorologische droogte, T_{warm}=gemiddelde temperatuur boven 20°C

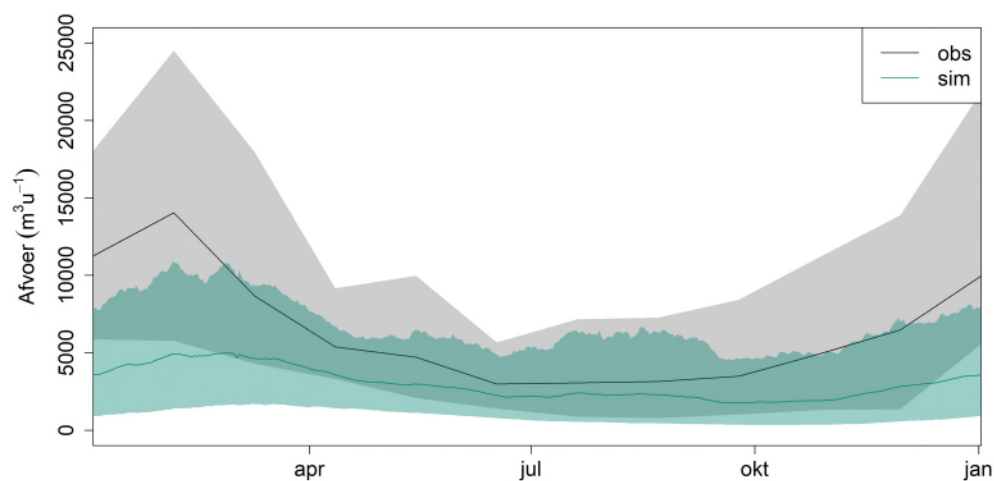
	Rijn			Maas		
	Q	Q _{laag}	Q _{laag} en P+ET _{droog}	Q	Q _{laag}	Q _{laag} en P+ET _{droog}
P+ET	90.62%	3.82%	-	90.47%	3.97%	-
P+ET _{droog}	4.38%	1.18%	-	4.53%	1.03%	-
T _{warm}	4.53%	0.47%	0.17%	4.26%	0.74%	0.25%

Tabel 4-2 Aantal dagen met meteorologische droogte (SPEI-1 waarden onder -1.5), lage afvoer (Q95) en hitte voor het scenario +2 graden in percentages van de totale reeksen (1600 jaar). Q= alle afvoeren boven het 5^{de} percentiel van het huidige klimaat, Q_{laag}= afvoeren onder 5^{de} percentiel van het huidige klimaat, P+ET=geen meteorologische droogte, P+ET_{droog}= meteorologische droogte, T_{warm}=gemiddelde temperatuur boven 20°C

	Rijn			Maas		
	Q	Q _{laag}	Q _{laag} en P+ET _{droog}	Q	Q _{laag}	Q _{laag} en P+ET _{droog}
P+ET	80.18%	10.93%	-	85.19%	5.92%	-
P+ET _{droog}	6.97%	1.92%	-	7.67%	1.22%	-
T _{warm}	10.52%	3.13%	0.89%	11.72%	1.93%	0.61%

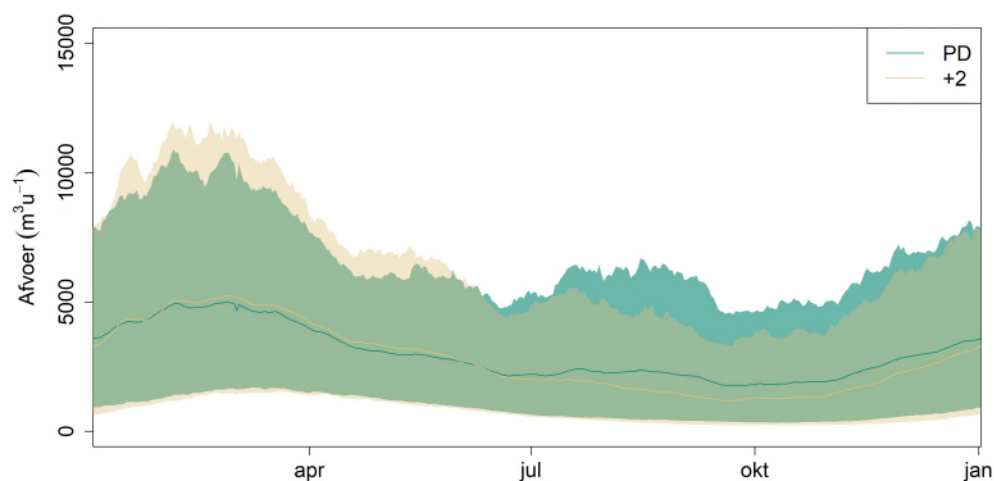
4.4 Simulatie Drentsche Aa met LENTIS data

Aanvullend op de simulaties voor Rijn en Maas is met het neerslag-afvoer model voor de Drentsche Aa de afvoer gesimuleerd met de meteorologische data uit de LENTIS large-ensemble dataset. Het gaat hierbij om meteorologische data voor De Bilt. Vergeleken met de geobserveerde afvoer in de periode 1992-2021 is de gesimuleerde afvoer voor het 'present-day' scenario lager, met name in de herfst en winter (Figuur 4-7). Het model is gekalibreerd op lage afvoeren, waardoor deze perioden met hoge afvoeren minder goed gesimuleerd worden. Daarnaast is de periode waarop het present-day scenario is gebaseerd niet gelijk aan de periode met beschikbare afvoermetingen en zijn de large-ensemble data voor De Bilt in plaats van lokale metingen in het stroomgebied van de Drentsche Aa. Het is daarom vooral interessant om naar de verschillen tussen het present day en +2°C scenario te kijken.



Figuur 4-7 Gemiddelde geobserveerde afvoer (m^3/u) over de periode 1992-2021 en gesimuleerde afvoeren voor het 'present day' scenario. De banden geven het 5^e en 95^{ste} percentiel weer.

In het +2°C scenario neemt de gemiddelde afvoer licht toe in de winter en lente, en af in de zomer en herfst (Figuur 4-8). Vooral tijdens de droge maanden wordt de afvoer dus lager.

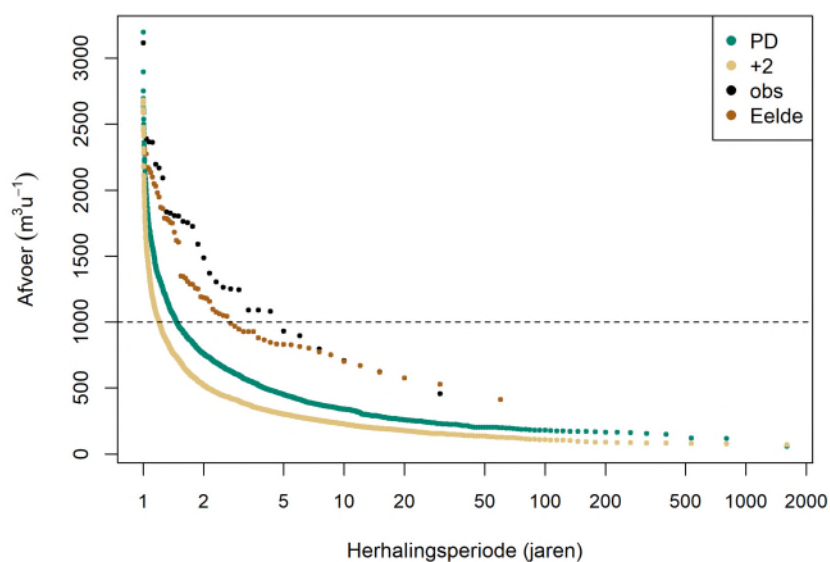


Figuur 4-8 Gemiddelde afvoer (m^3/u) voor de Drentsche Aa gebaseerd op modelsimulaties voor de twee scenario's. De gekleurde banden geven het 5^e en 95^{ste} percentiel van de afvoersimulaties weer.

De herhalingstijden voor de lage afvoeren voor de verschillende scenario's, de observaties en een modelrun met meteorologische gegevens van Eelde (1965-2024) zijn weergegeven in Figuur 4-9. Hierbij worden alleen de herhalingstijden gebaseerd op de empirische verdeling weergegeven, vanwege de eerder getoonde beperkingen

van de andere verdelingen. De herhalingstijden voor de observaties zijn gebaseerd op de minimale afvoer per jaar, voor de simulaties zijn de herhalingstijden bepaald voor de 7-daagse minimum afvoer.

Bij een afvoer onder de $1000 \text{ m}^3/\text{u}$ treedt er een innametekort op voor de drinkwaterproductie bij de Punt, dit omdat normaliter in de zomer $1000 \text{ m}^3/\text{u}$ wordt ingenomen (de Wit et al. 2023). In de huidige situatie treedt dit ongeveer 1 keer per 5 jaar op (Rijkkema 2024). Het model onderschat de afvoer voor deze herhalingsperiodes in alle simulaties wat voornamelijk samenhangt met het ontbreken van gedetailleerde lokale meteorologische input. De simulaties met meteorologische data van Eelde benaderen de observaties het beste, maar onderschatten de afvoer nog steeds (herhalingstijd van afvoeren onder $1000 \text{ m}^3/\text{u}$ onder de eens per 3 jaar). In de simulaties met large ensemble data wordt de afvoer in het 'present day' scenario nog verder onderschat en komen afvoeren onder de $1000 \text{ m}^3/\text{u}$ vaker dan één keer in de twee jaar voor, bij $+2^\circ\text{C}$ komen lage afvoeren nog vaker voor. De large ensemble data zijn zonder verdere correctie dus niet geschikt voor een klein stroomgebied als de Drentsche Aa.



Figuur 4-9 Herhalingstijden voor de lage afvoeren voor de scenario's (present day (PD), $+2$ graden), de observaties en simulaties met meteorologische gegevens van Eelde. De zwarte stippellijn geeft een afvoer van $1000 \text{ m}^3/\text{u}$ aan; de afvoer waaronder een innametekort ontstaat.

5 Discussie en conclusies

5.1 Herhalingstijden lage (7-daagse) afvoeren

We zien voor de Maas (Eijsden) en in het bijzonder de Rijn (Lobith) een daling in de lage afvoeren in zowel de simulaties op basis van de large-ensemble data (LENTIS data) als de simulaties op basis van de KNMI'23 scenario's. De exacte afname van de lage afvoeren is hierbij sterk afhankelijk van het gekozen scenario. Situaties, die in het huidige klimaat als extreem worden gezien, komen in de toekomst regelmatig voor in het +2°C scenario van de LENTIS data en in het Hd-KNMI klimaatscenario. Uit de simulaties met de large-ensemble data komt bijvoorbeeld naar voren dat de herhalingstijd van een zevendaagse Rijnafoer bij Lobith onder de 500 m³/s verschuift van 1x per 17 jaar in de referentieperiode naar vaker dan 1x per 3 jaar in het +2°C scenario.

Voor de Maas bij Eijsden is het beeld uit de simulaties met de large ensemble dataset en KNMI scenario's minder eenduidig. Lage afvoeren met een relatief lage herhalingstijd (vaker dan eens per 10 jaar) komen in het +2°C scenario vaker voor. Bij de Maas is vooral een afname te zien bij de lagere herhalingstijden, bij de hoge herhalingstijden van 50 jaar of meer is weinig verschil te zien tussen de referentie en de scenario's. De afvoeren bij deze herhalingstijden zijn namelijk al zeer laag in het referentiescenario en de berekening van deze herhalingstijden is zeker voor de relatief korte tijdreeksen van de KNMI-scenario's erg onzeker. Toch zijn de effecten op de Maasafvoer ook van belang. Zo wordt bijvoorbeeld in het Hd scenario voor de Maas een herhalingstijd van minder dan 2 jaar berekend voor een afvoer onder de 10 m³/s, wat betekent dat die situatie in de toekomst normaal kan gaan worden.

5.2 Onderschrijdingen van afvoerdrempelwaarden

Belangrijker dan lage afvoeren an sich, is de herhalingstijd van langdurige onderschrijdingen van (lage) afvoerdrempelwaarden. Hiervoor is de dataset geanalyseerd op periodes van 30, 60, 90 en 120 dagen beneden een bepaalde drempelwaarde. Voor zowel de Rijn (Lobith) als de Maas (Eijsden) komt uit de afvoersimulaties een eenduidig beeld naar voren: in een opwarmend klimaat neemt het voorkomen van langdurig lage afvoeren toe. Zeker voor de Rijn zijn de veranderingen aanzienlijk. Zo neemt volgens de LENTIS-simulaties de mediane herhalingstijd van een nagenoeg ononderbroken periode van 60 dagen met onderschrijding van 1000 m³/s bij Lobith af van 114 naar 9 jaar voor het LENTIS +2°C scenario. Opvallend hierbij is het relatief smalle betrouwbaarheidsinterval (5-14 jr) behorende bij bovengenoemde herhalingstijd op basis van het LENTIS +2°C scenario. De mediane herhalingstijd van een 60 daagse periode met onderschrijding van 10 m³/s voor de Maas bij Eijsden neemt af van 333 jaar in de referentie naar 101 jaar in het LENTIS +2°C scenario. Hierbij geldt hoe langer de periode met onderschrijding, hoe groter de spreiding in de berekende herhalingstijden omdat deze gebeurtenissen steeds zeldzamer worden in de dataset.

De simulaties met KNMI-data laten een vergelijkbare richting zien, ondanks grotere onzekerheid door de kortere dataset. Ook tonen deze simulaties een sterker effect voor de drogere scenario's Md en Hd. De verwachting is dus dat langdurige periodes met lage Rijnafoer aanzienlijk vaker voorkomen.

Al in de huidige situatie treedt bij afvoeren onder de 1000 m³/s bij Lobith verzilting op van de monding van de Hollandse IJssel (Huisman et al., 2018). Uitgaande van het LENTIS +2°C scenario zal langdurige onderschrijding en verzilting van de monding van de Hollandse IJssel dus elke 10 jaar voorkomen in plaats van elke 100 jr. Hoewel niet onderzocht in deze studie zal de kans op verzilting van de Rijnmond door zeespiegelstijging verder toenemen. Ook voor de Maas is een verschuiving zichtbaar naar vaker voorkomende langdurig lage afvoeren.

5.3 Robuustheid van de bevindingen en onzekerheden, AMOC-collapse als voorbeeld

Vanwege het feit dat er 1600 jaar aan simulatieresultaten ten grondslag ligt aan de analyse met de LENTIS-data, zijn de gevonden statistieken als robuust te beschouwen voor wat betreft de interne klimaatvariabiliteit. Deze wordt weergegeven door de betrouwbaarheidsintervallen in de getoonde figuren. Ondanks de lange periode voor de simulaties blijven de betrouwbaarheidsintervallen groot. Let daarbij op dat deze intervallen ook niet de (volledige) onzekerheid in modelparametrisaties en onderliggende klimaatsimulaties vertegenwoordigen. Deze onzekerheden zouden verder teruggebracht kunnen worden door kalibratie van de hydrologische modellen en het gebruik van meerdere klimaatmodellen. Ter illustratie van een van deze onzekerheden in de klimaatsimulaties tonen de afvoersimulaties met ineenstorting van de AMOC (Figuur 4-6) een matige *toename* van het voorkomen van lage afvoeren aan het begin van een ineenstorting van de AMOC en een *afname* hiervan tijdens het hoogtepunt. Hierbij moet echter wel worden opgemerkt dat de duur van de onderliggende simulatieperioden zodanig kort is (30 jaar) dat interne klimaatvariabiliteit een groot stempel op deze resultaten kan drukken. Dit wordt ook uitgedrukt door de getoonde betrouwbaarheidsintervallen, die nog breder zijn dan de eerdere set op basis van 1600 jaar aan simulaties.

Naast de hier gebruikte simulaties van een AMOC-ineenstorting zijn er nog veel andere mogelijke ineenstortingsscenario's. In dit geval is er sprake van ongeveer een halvering van de intensiteit van de AMOC (feitelijk de volumestroom oceaanaanwater). Andere simulaties, van andere onderzoeksgroepen, laten een kleinere of nog grotere afname zien, over een kortere of nog langere tijdsduur. Daarom moeten de hier gepresenteerde resultaten vooral als illustratief worden beschouwd.

Gezien de breedte van de bepaalde betrouwbaarheidsintervallen én de mogelijkheid van ontwikkelingen die geen onderdeel uitmaken van simulaties of scenario's, zoals een (ander) AMOC-scenario, doen waterbedrijven er verstandig aan om na te denken over en rekening te houden met een brede waaier aan mogelijke afvoerscenario's.

5.4 Samenvallende gebeurtenissen

Niet alleen de lage afvoeren worden extremer, maar ook de perioden met meteorologische droogte en hittegolven nemen toe. Hierdoor neemt ook de kans op het samenvallen van deze gebeurtenissen toe. Dat zou kunnen betekenen dat periode met een verminderde waterbeschikbaarheid op de grote rivieren samenvalt met een verhoogde (drink)watervraag en druk op grondwaterbronnen. Onze analyse laat zien dat de kans op deze relatief zeldzame gebeurtenissen toeneemt, zeker voor de combinatie met de Rijnafvoer. Hoewel brondiversificatie een verstandige adaptatiestrategie is voor omgang met onzekere rivierafvoeren, moet dus ook rekening worden gehouden met gebeurtenissen waarbij andere bronnen gelijktijdig onder druk komen te staan bij een hoge drinkwatervraag.

5.5 Statistieken extreem lage afvoeren

Het doel van dit project was om het inzicht in de statistieken van extreem lage afvoeren te vergroten. Daarvoor zijn in dit rapport verschillende statistieken berekend om het voorkomen van lage afvoeren te beschrijven. Datasets zijn in de regel beperkt tot enkele tientallen tot honderden jaren waardoor niet zonder meer duidelijk is hoe goed statistieken zeldzame gebeurtenissen beschrijven. De lange tijdreeksen van de large-ensemble data maakten het mogelijk om betrouwbaar empirische distributies te bepalen voor 7 daagse lage afvoeren. Deze empirische distributies zijn vervolgens vergeleken met GEV distributies die vaak gebruikt worden om herhalingstijden van extreme afvoeren te berekenen. Uit de vergelijking blijkt dat het gebruik van een GEV-verdeling kan leiden tot een overschatting van de lage afvoeren voor hoge herhalingstijden. Dit toont het belang van het gebruik van large ensemble datasets voor uitspraken over veranderingen van relatief zeldzame gebeurtenissen.

Voor het bepalen van het betrouwbaarheidsinterval van de onderschrijdingsintervallen van drempelwaarden zijn verschillende verdelingen gefit. In deze studie bleken zowel de Poisson- als de negatieve binomiale verdeling een adequate beschrijving van de data te geven.

5.6 Kleinere stroomgebieden

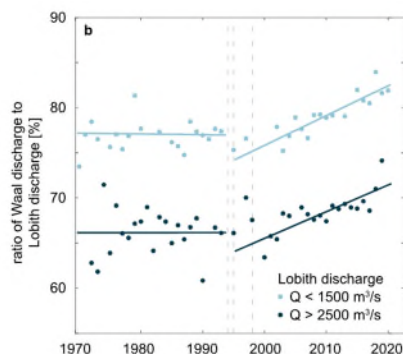
Voor de kleinere stroomgebieden in Nederland en Vlaanderen bleek het lastig om afvoermodellen te vinden die rechtstreeks te gebruiken waren binnen dit onderzoek. Voor de Drentsche Aa is een neerslag-afvoermodel beschikbaar gesteld door Waterbedrijf Groningen. Uit de analyse met dit neerslag-afvoermodel blijkt dat het toepassen van de beschikbare large ensemble data tot een onderschatting van de afvoeren leidt. Dit wordt veroorzaakt door afwijkingen van de meteorologische data in de LENTIS-dataset met lokale meteorologische condities specifiek voor het Drentse Aa gebied. De resolutie van de LENTIS-data is dus onvoldoende verfijnd voor toepassing voor op regionale stroomgebieden als de Drentsche Aa. Bij toepassing van de grootschalige klimaatdata moet dus kritisch worden gekeken naar de invoer en de representativiteit hiervan voor het te onderzoeken stroomgebied.

5.7 Implicaties voor de drinkwaterbedrijven

5.7.1 Verlaagde Rijnafvoer

De afvoer van de Rijn en de verdeling van deze afvoer over de verschillende Rijntakken in Nederland is van belang voor vijf drinkwaterbedrijven: Oasen, PWN, Waternet, Dunea en Vitens. De manier waarop Rijnwater gewonnen wordt en hoe kwetsbaar de winningen zijn voor lage afvoeren op de Rijn is zeer verschillend. In deze paragraaf gaan we eerst kort in op de verdeling van water over de verschillende Rijntakken tijdens droogte en hoe deze verdeling aan het veranderen is. Vervolgens bespreken we kort welke risico's er zijn als gevolg van lage afvoeren voor de drinkwatervoorziening en hoe deze kunnen veranderen op basis van de berekende afvoerstatistieken onder een veranderend klimaat.

Cruciaal voor de verdeling van Rijnwater over Nederland is het verdeelwerk bij de Pannerdensch Kop. Hier splitst de Rijn zich in de Waal en het Pannerdensch Kanaal. Vooral vanuit waterveiligheidsoogpunt is het verdeelwerk zo ingericht dat het Rijndebiet zich verdeelt in 1/3 van het debiet via het Pannerdensch Kanaal en 2/3 via de Waal. Vervolgens splitst het debiet in het Pannerdensch kanaal zich bij de IJsselkop in een verhouding 2/9 – 1/9 over Nederrijn en IJssel. Het gaat hierbij om een verdeling die bij lage afvoeren in de praktijk niet haalbaar is en daarnaast aan het veranderen is ten gunste van de Waalafvoer. Bij lage Rijnafvoeren ($< 1500 \text{ m}^3/\text{s}$) lag de verhouding tot halverwege de jaren '90 van de vorige eeuw op ca. 77% via de Waal en 23% via het Pannerdensch Kanaal (Blom et al. 2024). Inmiddels is deze verhouding verder verschoven naar ca. 83% via de Waal en 17% via het Pannerdensch Kanaal. Consequentie van deze verandering is dat het bij lage afvoeren steeds moeilijker wordt om voldoende water richting Nederrijn en IJssel(meer) te laten stromen.



Figuur 5-1 Afvoer over de Waal als percentage van de afvoer bij Lobith (Blom et al., 2024). De verticale getippelde lijnen zijn hoogwaters in de jaren '90 van de vorige eeuw.

Bij afvoeren onder 2600 m³/s wordt met behulp van de stuw bij Driel zo lang mogelijk 30 m³/s naar de Nederrijn en 285 m³/s naar de IJssel gelaten (Rijkswaterstaat 2023). Onder 1600 m³/s worden deze debieten niet meer gehaald. Bij een Lobith afvoer van ca. 900 m³/s neemt de afvoer naar Nederrijn en IJssel af naar respectievelijk 20 en 144 m³/s. Bij een verder dalende Rijnaivoer zal de afvoer op het Pannerdensch kanaal uiteindelijk nagenoeg nul worden. Dit was in 2022 het geval bij een Rijnaivoer van 700 m³/s. Het Amsterdam-Rijnkanaal is voor de wateraanvoer afhankelijk van water uit de Nederrijn en in mindere mate de Lek, zowel direct via de sluiscomplexen als via de Kromme Rijn en Vecht. Om verzilting tegen te gaan wordt een debiet van 10 m³/s aangehouden op het Amsterdam- Rijnkanaal. Tijdens extreme droogte treedt de Kleinschalige Water Aanvoer (KWA) in werking waarbij water met 3 m³/s uit het Amsterdam-Rijnkanaal wordt onttrokken om verzilting en schade in West-Nederland tegen te gaan. Bij Rijnaivoeren onder ca. 1200 m³/s gaan de Bernardsluizen open en beweegt het peil in het stuwpand Amerongen-Hagestein mee met het Waalpeil. Consequentie hiervan is dat de reistijd van een verontreinigingsgolf vanaf Lobith via Waal en Betuwepand naar de innamepunten van Waternet aanzienlijk korter wordt dan via de Nederrijn (Van Mazijk et al. 2009).

In het draaiboek hanteert de Landelijke Commissie Waterverdeling (LCW) een aantal criteria voor opschaling die betrekking hebben op de Rijnaivoer. Bij een Rijnaivoer bij Lobith tussen 1000 en 1400 m³/s (zie Tabel 5-1) wordt opgeschaald naar niveau 1 (dreigend watertekort). Opschaling naar niveau 2 'daadwerkelijk watertekort' vindt o.a. plaats als de IJsselaivoer te laag is om verdamping in het IJsselmeergebied te compenseren (afvoer bij Olst < 250 m³/s) of de KWA onvoldoende water kan aanvoeren voor verziltingsbestrijding in West-Nederland.

Tabel 5-1 Criteria Rijnaivoer voor opschaling naar niveau 1 'dreigend watertekort'

Maand	Rijnaivoer bij Lobith (etmaalgemiddeld m ³ /s)
September – April	1000
Mei	1400
Juni	1300
Juli	1200
Augustus	1100

Lage afvoeren op de Rijntakken hebben een verschillende impact op de waterbedrijven. Voor Vitens is voornamelijk vooral het peil op de IJssel bij Zwolle van belang. Als dit peil jaargemiddeld meer dan 5 cm daalt door langdurig verlaagde afvoer dan neemt het aandeel verontreinigd stedelijk water in de winning Engelse werk toe en moet de capaciteit van deze winning worden verlaagd. Mogelijk neemt de impact in de toekomst toe als Vitens direct water gaat innemen uit de IJssel. Oasen wint Lekwater via oeverfiltratie. Het belangrijkste risico voor Oasen is langdurige verzilting van de monding van de Lek door lage afvoeren. Door de reistijdverdeling naar de winningen vlakken zoutpieken uit en wordt de jaargemiddelde chloridenorm nog niet overschreden in de huidige situatie. Bij langdurige lage afvoeren neemt niet alleen de zoutindringing vanuit zee toe, maar neemt ook de verdunning af waardoor het risico op verzilting voor de winningen Hendrik-Ido-Ambacht, Lekkerkerk, Nieuw-Lekkerland en Ridderkerk toeneemt. Voor alle oevergrondwaterwinningen geldt dat langdurige lage afvoeren door de indikking zullen resulteren in verhoogde concentraties van persistente mobiele verontreinigingen vanuit het rivierwater. Voor het innamepunt van Dunea bij Bergambacht zijn concentratiepieken (zowel zout als omv's) van belang. Nog belangrijker is de vraag of deze samenvallen met pieken op de Maas (innamepunt Afgedamde Maas) omdat dan niet geschakeld kan worden tussen beide innamepunten. Voor Waternet (innamepunten Nieuwegein en Nieuwersluis) is vooral afname van de waterkwaliteit bij verlaagde Rijnaivoer van belang. Daarnaast kan bij onvoldoende doorspoeling van het Amsterdam-Rijnkanaal (<10 m³/s bij Weesp) verzilting optreden. Bij ingebruikname van WAAG⁴ wordt bovenstaande ook van belang voor Vitens en PWN. Voor PWN is het ter

⁴ <https://waag.mett.nl/>

voorkoming van verzilting en afname van de waterkwaliteit bij inname punt Andijk van belang dat er voldoende water via de IJssel naar het IJsselmeer stroomt.

Berekende afvoeroverschrijdingen zijn getoetst aan bovenstaande knikpunten in het watersysteem. In het LENTIS referentiescenario komt overschrijding van een Lobith afvoer van 1000 m³/s gedurende een maand gemiddeld eens in de 13 jaar voor. Langduriger overschrijding (2, 3 of zelfs 4 maanden) is met gemiddelde herhalingstijden van respectievelijk 114, 600 en >1000 jaar zeldzaam tot extreem zeldzaam. In het LENTIS +2°C scenario is de herhalingstijd sterk afgenomen en komen langdurige afvoeren waarbij verzilting kan optreden van innamepunt Bergambacht en de oeverfiltraatwinningen van Oasen aanzienlijk vaker voor. Overschrijdingsduren met een lengte van 60 dagen met een gemiddelde herhalingstijd van 9 jaar zijn niet zeldzaam meer waardoor het risico op verzilting verder toeneemt. Voor de innamepunten in het Lekkanaal en Amsterdam Rijnkanaal betekent dit verder dat verontreinigingsgolven gedurende langere periodes de innamepunten sneller zullen bereiken.

Een situatie waarbij langdurig (gedurende 30 dagen) geen water meer in het Pannerdensch Kanaal en dus naar Nederrijn en IJssel stroomt is nu nog zeer zeldzaam met een herhalingstijd van 480 jaar (30 d < 600 m³/s). Het LENTIS +2°C scenario laat zien dat dit in 2100 gemiddeld elke 12 jaar kan gaan voorkomen. Hoewel aanzienlijk onzekerder neemt ook de kans op nog langdurigere overschrijdingen toe. Dit heeft flinke consequenties voor het IJsselpeil en dus voor Engelse werk, maar vooral ook voor het op peil en zoet houden van het IJsselmeer. Ook is het de vraag of bij dergelijke lage afvoeren voldoende water kan worden aangevoerd naar het Amsterdam Rijnkanaal en Lek via het Betuwepand.

5.7.2 Verlaagde Maasafvoer

De afvoer van de Maas is van direct belang voor de drinkwaterproductie van WML, Dunea en Evides. Indirect via doorlevering door water-link is de afvoer van de Maas ook van belang voor Farys, de Watergroep en Pidpa. Maaswater wordt zowel via bekkens en oeverfiltratie als direct ingenomen. Het Maaswater wordt zowel in België als in Nederland via sluizen en stuwen verdeeld over een stelsel van kanalen en de gemeenschappelijke Maas. Over de verdeling van Maaswater zijn daarom uitgebreide afspraken gemaakt tussen Nederland en België. Het uitgangspunt is een gezamenlijke verantwoordelijkheid voor de Gemeenschappelijke Maas (=Grensmaas) en een gelijk gebruik van water voor economische doeleinden. Een deel van het in België afgetapte water stroomt via de Zuid-Willemsvaart naar Nederland.

Het verdrag geeft de volgende verdeling van het water aan:

- Bij een Maasafvoer bij Luik (Monsin) tussen 100 en 60 m³/s is het Vlaams en Nederlands gebruik maximaal 25 m³/s. De rest van het water gaat naar de Gemeenschappelijke Maas;
- Bij een Maasafvoer bij Luik (Monsin) tussen de 60 en 30 m³/s blijft de voeding van de Gemeenschappelijke Maas op 10 m³/s. De rest van het water wordt gelijkelijk verdeeld.
- Bij een Maasafvoer (Monsin) onder de 30 m³/s worden de drie onderdelen (Vlaams gebruik, Nederlands gebruik en Gemeenschappelijke Maas) gelijkelijk gekort.

Bij een Maasafvoer bij St. Pieter kleiner dan 25 m³/s (opschaling LCM naar niveau 1) is de Maasafvoer bij Luik 30 m³/s en stroomt ca. 4.9 m³/s naar het Albertkanaal en de Kempische kanalen, 5 m³/s op het Julianakanaal en 10 m³/s op de Grensmaas. In het referentiescenario van de LENTIS dataset komt een overschrijding van 30 m³/s gedurende 30 dagen gemiddeld eens per 2 jaar voor. In het +2°C scenario komt dit minimaal 1 keer per jaar voor. Ook langduriger overschrijdingen komen vaker voor, hoewel de verandering minder extreem is dan bij de Rijn. Op basis van de LENTIS data komt nagenoeg geen afvoer (<10 m³/s) op de Maas gedurende 30 dagen gemiddeld eens per 53 jaar voor in het referentiescenario. In het +2°C scenario is dit afgenomen naar eens per 14 jaar. In deze situatie kan de bijdrage van zijtakken, lozingen en grondwater op de afvoer de Maasafvoer bij de grens overstijgen en is de bijdrage van deze fluxen op de Maaswaterkwaliteit aanzienlijk. Ook wordt bij deze afvoer water evenredig

verdeeld tussen Maasbocht en Lateraalkanaal, waaruit door WML bij Heel water wordt onttrokken. Op dit moment ontvangt het Lateraalkanaal nog voldoende water uit de Roer. Kwantitatief is hierdoor op dit moment altijd voldoende water. Hoe deze aanvoer zich ontwikkelt als de bruinkoolwinning wordt beëindigd (stoppen lozing bemalingswater, vullen groeves) is nog onduidelijk.

Voor Dunea (Andelse Maas/Brakel) en Evides (Gat aan de Kerksloot) gelden afvoerafhankelijke afspraken over waterinname. Als de afvoer bij Lith kleiner wordt dan $25 \text{ m}^3/\text{s}$, is overleg nodig tussen Dunea en de waterbeheerder. Voor Evides geldt dat bij een Maasafvoer onder $33 \text{ m}^3/\text{s}$ de inname bij Gat aan de Kerksloot (gemiddeld $6,3 \text{ m}^3/\text{s}$) wordt gereduceerd, zodat zo lang mogelijk $25 \text{ m}^3/\text{s}$ overblijft voor de scheepvaart op de Amer (Wuijts et al. 2013). Innamestops op beide innamepunten hangen in de regel samen met verontreiniging door antropogene stoffen. Innamestops als gevolg van een te lage afvoer hebben bij Evides slechts enkele malen plaatsgevonden. Tijdens lage Maasafvoeren is het water bij de innamepunten van Evides en Dunea voor minstens de helft afkomstig van zijrivieren en effluentlozingen. Dit heeft gevolgen voor de waterkwaliteit, maar kan met lage Maasafvoeren in combinatie met samenvallende meteorologische droogte ook de waterbeschikbaarheid doen afnemen. De kans hierop neemt volgens onze analyse toe.

6 Referenties

- Alley, R. B., J. Marotzke, W. D. Nordhaus, J. T. Overpeck, D. M. Peteet, R. A. Pielke, R. T. Pierrehumbert, P. B. Rhines, T. F. Stocker, L. D. Talley en J. M. Wallace (2003). "Abrupt Climate Change." *Science* **299**(5615): 2005-2010 DOI: 10.1126/science.1081056.
- Armstrong McKay, D. I., A. Staal, J. F. Abrams, R. Winkelmann, B. Sakschewski, S. Loriani, I. Fetzer, S. E. Cornell, J. Rockström en T. M. Lenton (2022). "Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points." *Science* **377**(6611) DOI: 10.1126/science.abn7950.
- Athreya, K. B. en D. V. Hinkley (1987). BOOTSTRAP OF THE MEAN IN THE INFINITE VARIANCE CASE. *Vol. 2 Mathematical Statistics Theory and Applications*. Berlin, Boston, De Gruyter: 95-98.
- Bellomo, K., V. L. Meccia, R. D'Agostino, F. Fabiano, S. M. Larson, J. von Hardenberg en S. Corti (2023). "Impacts of a weakened AMOC on precipitation over the Euro-Atlantic region in the EC-Earth3 climate model." *Climate Dynamics* **61**(7): 3397-3416 DOI: 10.1007/s00382-023-06754-2.
- Blom, A., C. Ylla Arbós, M. K. Chowdhury, A. Doelman, M. Rietkerk en R. M. J. Schielen (2024). "Indications of Ongoing Noise-Tipping of a Bifurcating River System." *Geophysical Research Letters* **51**(22): e2024GL111846 DOI: 10.1029/2024GL111846.
- Boers, N., M. Ghil en T. F. Stocker (2022). "Theoretical and paleoclimatic evidence for abrupt transitions in the Earth system." *Environmental Research Letters* **17**(9): 093006 DOI: 10.1088/1748-9326/ac8944.
- Borodina, A., E. M. Fischer en R. Knutti (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 DOI: 10.1002/2017GL074530.
- Brovkin, V., E. Brook, J. W. Williams, S. Bathiany, T. M. Lenton, M. Barton, R. M. DeConto, J. F. Donges, A. Ganopolski, J. McManus, S. Praetorius, A. de Vernal, A. Abe-Ouchi, H. Cheng, M. Claussen, M. Crucifix, G. Gallopin, V. Iglesias, D. S. Kaufman, T. Kleinen, F. Lambert, S. van der Leeuw, H. Liddy, M.-F. Loutre, D. McGee, K. Rehfeld, R. Rhodes, A. W. R. Seddon, M. H. Trauth, L. Vanderveken en Z. Yu (2021). "Past abrupt changes, tipping points and cascading impacts in the Earth system." *Nature Geoscience* **14**(8): 550-558 DOI: 10.1038/s41561-021-00790-5.
- Camuffo, D., A. della Valle en F. Becherini (2020). "A critical analysis of the definitions of climate and hydrological extreme events." *Quaternary International* **538**: 5-13 DOI: 10.1016/j.quaint.2018.10.008.
- CarbonBrief. (2017). "Analysis: how well have climate models projected global warming? ." Retrieved 19 september 2023, from <https://www.carbonbrief.org/analysis-how-well-have-climate-models-projected-global-warming/>.
- Carvalho, D., S. Rafael, A. Monteiro, V. Rodrigues, M. Lopes en A. Rocha (2022). "How well have CMIP3, CMIP5 and CMIP6 future climate projections portrayed the recently observed warming." *Scientific Reports* **12**(1): 11983 DOI: 10.1038/s41598-022-16264-6.
- Cirkel, D. G., P. Baggelaar en A. Doomen (2005). *Klimaatverandering en grondwaterwinning Effecten van klimaatverandering op drinkwaterverbruik en grondwaterdynamiek*. Nieuwegein, KWR.
- Collins, M., M. Sutherland, L. Bouwer, S. Cheong, T. Frölicher, H. Jacot Des Combes, M. Koll Roxy, I. Losada, K. McInnes en B. Ratter (2022). *Extremes, abrupt changes and managing risks. IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate*, Cambridge University Press: 589-655.
- CORDEX. (2023). Retrieved 4 oktober 2023, from <https://cordex.org/about/what-is-regional-downscaling/>.
- de Wit, J. A., A. H. van Loon en S. Rijpkema (2023). *Diepinfiltratie en terugwinning van oppervlaktewater voor impactreductie bij vergroting drinkwaterproductie. Een verkenning voor winlocatie De Punt*. Nieuwegein, KWR: 44. <https://livelink.kwrwater.nl/livelink/livelink.exe/Open/70829354>.
- Dinh, T. L. A. en F. Aires (2023). "Revisiting the bias correction of climate models for impact studies." *Climatic Change* **176**(10): 140 DOI: 10.1007/s10584-023-03597-y.
- Ditlevsen, P. en S. Ditlevsen (2023). "Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation." *Nature Communications* **14**(1): 4254 DOI: 10.1038/s41467-023-39810-w.
- Drijfhout, S. (2015). "Competition between global warming and an abrupt collapse of the AMOC in Earth's energy imbalance." *Scientific Reports* **5**(1): 14877 DOI: 10.1038/srep14877.
- Droppers, B. en N. Wanders (2024). *Evaluatie van modelonzekerheid en bias-correctie in afvoersimulatie op basis van de KNMI'23 klimaatscenario's*, Utrecht University.

- Dupuis, D. J. en C. A. Field (1998). "A Comparison of confidence intervals for generalized extreme-value distributions." *Journal of Statistical Computation and Simulation* **61**(4): 341-360 DOI: 10.1080/00949659808811918.
- Efron, B. en R. J. Tibshirani (1993). "An introduction to the bootstrap." *Monographs on statistics and applied probability* **57**(1): 1-436.
- European Environmental Agency. (2023). "Global and European temperatures." Retrieved 1 november 2023, from <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/global-and-european-temperatures>.
- Hauswirth, S. M., K. van der Wiel, M. F. P. Bierkens, V. Beijk en N. Wanders (2023). "Simulating hydrological extremes for different warming levels—combining large scale climate ensembles with local observation based machine learning models." *Frontiers in Water* **5** DOI: 10.3389/frwa.2023.1108108.
- Hersbach, H., B. Bell, P. Berrisford, G. Biavati, A. Horányi, J. M. Sabater, J. Nicolas, C. Peubey, R. Radu, I. Rozum, D. Schepers, A. Simmons, C. Soci, D. Dee en J.-N. Thépaut (2023). "ERA5 monthly averaged data on pressure levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)."
- Hewitt, H., B. Fox-Kemper, B. Pearson, M. Roberts en D. Klocke (2022). "The small scales of the ocean may hold the key to surprises." *Nature Climate Change* **12**(6): 496-499 DOI: 10.1038/s41558-022-01386-6.
- Jackson, L. C., E. Alastrué de Asenjo, K. Bellomo, G. Danabasoglu, H. Haak, A. Hu, J. Jungclaus, W. Lee, V. L. Meccia, O. Saenko, A. Shao en D. Swingedouw (2023). "Understanding AMOC stability: the North Atlantic Hosing Model Intercomparison Project." *Geosci. Model Dev.* **16**(7): 1975-1995 DOI: 10.5194/gmd-16-1975-2023.
- Jackson, L. C., R. Kahana, T. Graham, M. A. Ringer, T. Woollings, J. V. Mecking en R. A. Wood (2015). "Global and European climate impacts of a slowdown of the AMOC in a high resolution GCM." *Climate Dynamics* **45**(11): 3299-3316 DOI: 10.1007/s00382-015-2540-2.
- Janssen, G. M. C. M., I. America, R. J. M. Meeusen, C. F. v. Strien, G. F. Prinsen, E. M. Mes, I. F. Marth, O. M. Weiler en A. C. Bijlsma (2024). Vertaling van de Deltascenario's 2024 naar invoer voor het Nationaal Water Model, Deltares.
- Khurshid, A., M. I. Ageel en R. A. Lodhi (2005). "On confidence intervals for the negative binomial distribution." *Revista Investigación Operacional* **26**(1): 59-70.
- Kim, S.-K., H.-J. Kim, H. A. Dijkstra en S.-I. An (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 DOI: 10.1038/s41612-022-00236-8.
- KNMI (2023). KNMI'23-klimaatsscenario's voor Nederland. KNMI. De Bilt. **KNMI-Publicatie 23-03**.
- Kornhuber, K., S. Osprey, D. Coumou, S. Petri, V. Petoukhov, S. Rahmstorf en L. Gray (2019). "Extreme weather events in early summer 2018 connected by a recurrent hemispheric wave-7 pattern." *Environmental Research Letters* **14**(5): 054002 DOI: 10.1088/1748-9326/ab13bf.
- Lenton, T. M., H. Held, E. Kriegler, J. W. Hall, W. Lucht, S. Rahmstorf en H. J. Schellnhuber (2008). "Tipping elements in the Earth's climate system." *Proceedings of the National Academy of Sciences* **105**(6): 1786-1793 DOI: 10.1073/pnas.0705414105.
- Lenton, T. M., D. I. A. McKay, S. Loriani, J. F. Abrams, S. J. Lade, J. F. Donges, M. Milkoreit, T. Powell, S. R. Smith, C. Zimm, J. E. Buxton, E. Bailey, L. Laybourn, A. Ghadiali en J. G. Dyke (2023). The Global Tipping Points Report 2023. Exeter, UK, University of Exeter. <https://hal.umontpellier.fr/hal-04548845>.
- Lloyd-Hughes, B. en M. A. Saunders (2002). "A drought climatology for Europe." *International journal of climatology* **22**(13): 1571-1592.
- Luo, F., F. Selten, K. Wehrli, K. Kornhuber, P. Le Sager, W. May, T. Reerink, S. I. Seneviratne, H. Shiogama, D. Tokuda, H. Kim en D. Coumou (2022). "Summertime Rossby waves in climate models: substantial biases in surface imprint associated with small biases in upper-level circulation." *Weather Clim. Dynam.* **3**(3): 905-935 DOI: 10.5194/wcd-3-905-2022.
- McCarthy, G. D. en L. Caesar (2023). "Can we trust projections of AMOC weakening based on climate models that cannot reproduce the past?" *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **381**(2262): 20220193 DOI: 10.1098/rsta.2022.0193.
- Muntjewerf, L., R. Bintanja, T. Reerink en K. Van der Wiel (2023a). KNMI-LENTIS large ensemble time slice dataset description, Zenodo. DOI: 10.5281/zenodo.7573137.
- Muntjewerf, L., R. Bintanja, T. Reerink en K. van der Wiel (2023b). "The KNMI Large Ensemble Time Slice (KNMI-LENTIS)." *Geosci. Model Dev.* **16**(15): 4581-4597 DOI: 10.5194/gmd-16-4581-2023.
- Önöz, B. en M. Bayazit (2002). "Troughs under threshold modeling of minimum flows in perennial streams." *Journal of Hydrology* **258**(1): 187-197 DOI: 10.1016/S0022-1694(01)00562-5.

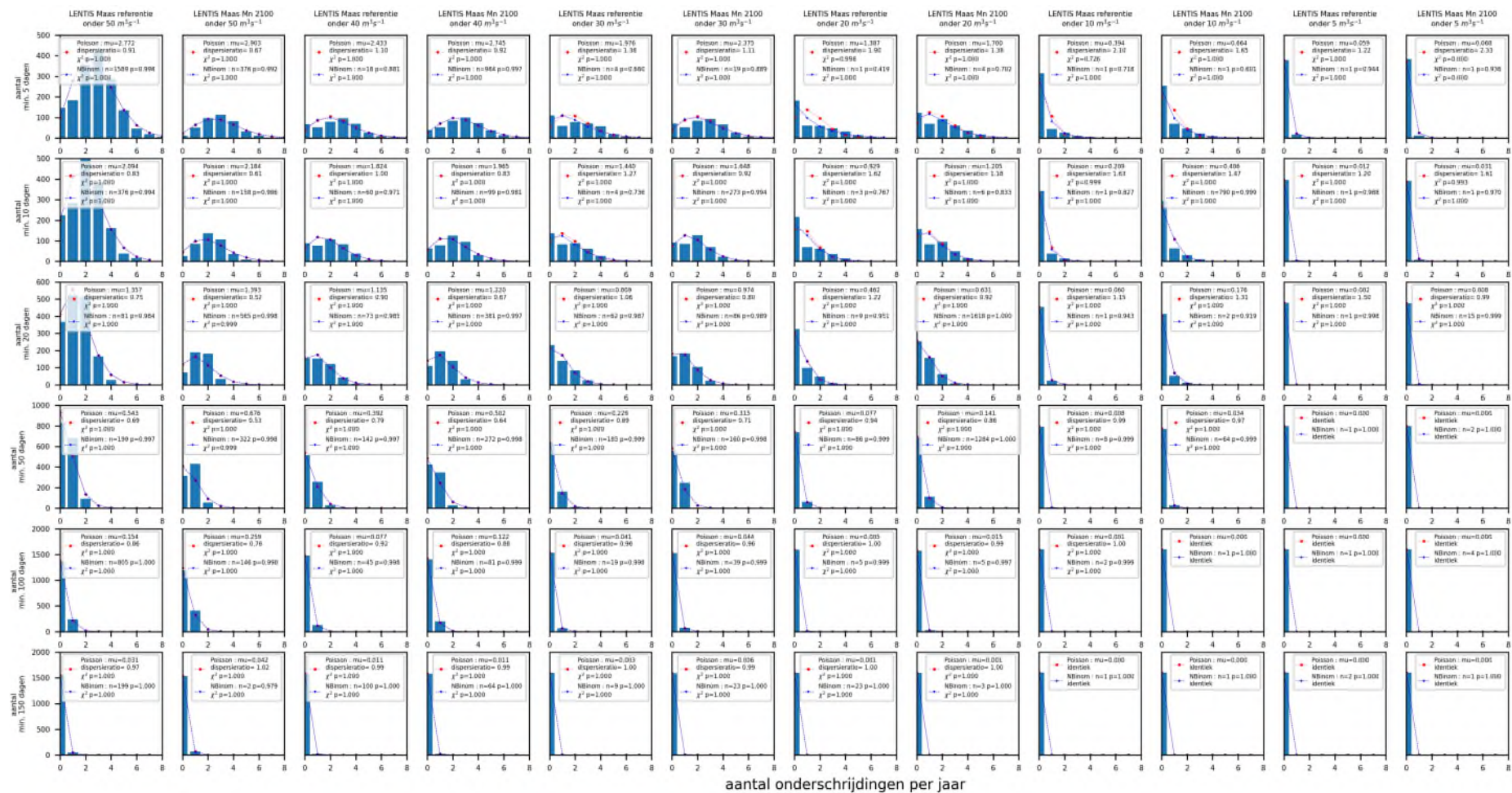
- Peng, Q., S.-P. Xie, D. Wang, R. X. Huang, G. Chen, Y. Shu, J.-R. Shi en W. Liu (2022). "Surface warming-induced global acceleration of upper ocean currents." *Science Advances* **8**(16): eabj8394 DOI: 10.1126/sciadv.abj8394.
- Perrin, C., C. Michel en V. Andréassian (2003). "Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation." *Journal of Hydrology* **279**(1): 275-289 DOI: 10.1016/S0022-1694(03)00225-7.
- Petrova, I. Y., D. G. Miralles, F. Brient, M. G. Donat, S.-K. Min, Y.-H. Kim en M. Bador (2024). "Observation-constrained projections reveal longer-than-expected dry spells." *Nature* **633**(8030): 594-600 DOI: 10.1038/s41586-024-07887-y.
- Pfleiderer, P., C.-F. Schleussner, K. Kornhuber en D. Coumou (2019). "Summer weather becomes more persistent in a 2 °C world." *Nature Climate Change* **9**(9): 666-671 DOI: 10.1038/s41558-019-0555-0.
- Philip, S., S. Kew, R. Vautard, M. Vahlberg, R. Singh, F. Driouech, R. Lguensat, C. Barnes en F. Otto (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., T. Seydewitz, B. Zhou, M. K. B. Lüdeke en J. P. Kropp (2022). "Climate Extremes are Becoming More Frequent, Co-occurring, and Persistent in Europe." *Anthropocene Science* **1**(2): 264-277 DOI: 10.1007/s44177-022-00022-4.
- Rahmstorf, S. (2024). "IS THE ATLANTIC OVERTURNING CIRCULATION APPROACHING A TIPPING POINT?" *Oceanography* **37**(3): 16-29.
- Rijkswaterstaat (2023). Operationeel Watermanagement Rijntakken. <https://iplo.nl/publish/pages/188985/watersystemen-rijntakken.pdf>.
- Rijkpema, S. (2024). Inschatting verandering voorkomen van lage afvoeren Drentsche Aa door klimaatsverandering, Waterbedrijf Groningen.
- Salvadori, G. (2013). Extreme Value Theory. *Encyclopedia of Natural Hazards*. P. T. Bobrowsky. Dordrecht, Springer Netherlands: 310-311.
- Sjerps, R. M. A., T. L. ter Laak en G. 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 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.250.
- Soares, P. M. M., G. Lemos en D. C. A. Lima (2023). "Critical analysis of CMIPs past climate model projections in a regional context: The Iberian climate." *International Journal of Climatology* **43**(5): 2250-2270 DOI: 10.1002/joc.7973.
- Sørland, S. L., R. Brogli, P. K. Pothapakula, E. Russo, J. Van de Walle, B. Ahrens, I. Anders, E. Bucchignani, E. L. Davin, M. E. Demory, A. Dosio, H. Feldmann, B. Früh, B. Geyer, K. Keuler, D. Lee, D. Li, N. P. M. van Lipzig, S. K. Min, H. J. Panitz, B. Rockel, C. Schär, C. Steger en W. Thiery (2021). "COSMO-CLM regional climate simulations in the Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX) framework: a review." *Geosci. Model Dev.* **14**(8): 5125-5154 DOI: 10.5194/gmd-14-5125-2021.
- Sutanudjaja, E. H., R. van Beek, N. Wanders, Y. Wada, J. H. C. Bosmans, N. Drost, R. J. van der Ent, I. E. M. de Graaf, J. M. Hoch, K. de Jong, D. Karssenbergh, P. López López, S. Peßenteiner, O. Schmitz, M. W. Straatsma, E. Vannamettee, D. Wisser en M. F. P. Bierkens (2018). "PCR-GLOBWB 2: a 5 arcmin global hydrological and water resources model." *Geosci. Model Dev.* **11**(6): 2429-2453 DOI: 10.5194/gmd-11-2429-2018.
- Tallaksen, L. M. en G. Laaha (2023). Chapter 6 - Frequency analysis**This chapter builds upon: Tallaksen, L.M., Madsen, H., Hisdal, H., 2004. Hydroclimatology, Chapter 6. in: Tallaksen, L.M., Van Lanen, H.A.J. (eds), Hydrological Drought. Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater. Developments in Water Science, 48, Elsevier Science B.V., pp. 199-271. *Hydrological Drought (Second Edition)*. L. M. Tallaksen and H. A. J. van Lanen, Elsevier: 233-304.
- Van der Krogt, W., B. Becker en H. Boisgontier (2022). Low river discharge of the Meuse – A Meuse River basin water management modelling study using RIBASIM, Deltares and RIWA Meuse.
- Van der Wiel, K., N. Wanders, F. M. Selden en M. F. P. Bierkens (2019). "Added Value of Large Ensemble Simulations for Assessing Extreme River Discharge in a 2 °C Warmer World." *Geophysical Research Letters* **46**(4): 2093-2102 DOI: 10.1029/2019GL081967.
- Van Dorland, R., J. Beersma, J. Bessembinder, N. Bloemendaal, H. van den Brink, M. Brotons Blanes, S. Drijfhout, R. Haarsma, I. Keizer, F. Krikken, D. Le Bars, G. Lenderink, E. van Meijgaard, J. F. Meirink, T. Reerink, F. Selden, C. Severijns, P. Siegmund, A. Sterl, B. Overbeek, H. de Vries, B. Wichers Schreur en K. van der Wiel (2023). KNMI National Climate Scenarios 2023 for the Netherlands KNMI number: WR-23-02: 365 https://cdn.knmi.nl/system/data_center_publications/files/000/071/902/original/KNMI23_climate_scenarios_scientific_report_WR23-02.pdf

- Van Mazijk, A., T. Olsthoorn en S. Van Duijvenbode (2009). "Het Betuwepand en het stoftransport in Lek en Amsterdam-Rijnkanaal bij lage Rijnafvoeren." *Stromingen* **15**(3): 19-28.
- Van Thienen, P., H. ter Maat en D. G. Cirkel (2023). Trenderalert Klimaatscenario's, -kantelpunten en -extremen. Nieuwegein, KWR: 20. <https://livelink.kwrwater.nl/livelink/livelink.exe/Open/71122706>.
- Van Thienen, P., H. ter Maat en S. Stofberg (2025). "Climate tipping points and their potential impact on drinking water supply planning and management in Europe." *Cambridge Prisms: Water* **3**: e3 DOI: 10.1017/wat.2024.14.
- Van Westen, R. M., M. Kliphuis en H. A. Dijkstra (2024). "Physics-based early warning signal shows that AMOC is on tipping course." *Science Advances* **10**(6): eadk1189 DOI: 10.1126/sciadv.adk1189.
- Vautard, R., J. Cattiaux, T. Hap  , J. Singh, R. Bonnet, C. Cassou, D. Coumou, F. D'Andrea, D. Faranda, E. Fischer, A. Ribes, S. Sippel en P. Yiou (2023). "Heat extremes in Western Europe increasing faster than simulated due to atmospheric circulation trends." *Nature Communications* **14**(1): 6803 DOI: 10.1038/s41467-023-42143-3.
- Vicente-Serrano, S. M., S. Beguer  a en J. I. López-Moreno (2010). "A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index." *Journal of climate* **23**(7): 1696-1718.
- Voortman, B. en E. Vonk (2022). Laagwatervoorspelling Drentsche Aa, Moisture Matters en StellaSpark.
- Weijer, W., W. Cheng, S. S. Drijfhout, A. V. Fedorov, A. Hu, L. C. Jackson, W. Liu, E. L. McDonagh, J. V. Mecking en J. Zhang (2019). "Stability of the Atlantic Meridional Overturning Circulation: A Review and Synthesis." *Journal of Geophysical Research: Oceans* **124**(8): 5336-5375 DOI: 10.1029/2019JC015083.
- Weldeab, S., R. R. Schneider, J. Yu en A. Kylander-Clark (2022). "Evidence for massive methane hydrate destabilization during the penultimate interglacial warming." *Proceedings of the National Academy of Sciences* **119**(35): e2201871119 DOI: 10.1073/pnas.2201871119.
- Wikipedia. (2024). "Bootstrapping (statistics)." Retrieved 29 maart 2024, from [https://en.wikipedia.org/wiki/Bootstrapping_\(statistics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Bootstrapping_(statistics)).
- Wuijts, S., E. Van der Grinten, E. Meijers, C. I. Bak-Eijsberg en J. J. G. Zwolsman (2013). Impact klimaat op oppervlaktewater als bron voor drinkwater: Van knelpunten naar maatregelen, RIVM. **609716007**.
- Wunderling, N., J. F. Donges, J. Kurths en R. Winkelmann (2021). "Interacting tipping elements increase risk of climate domino effects under global warming." *Earth Syst. Dynam.* **12**(2): 601-619 DOI: 10.5194/esd-12-601-2021.

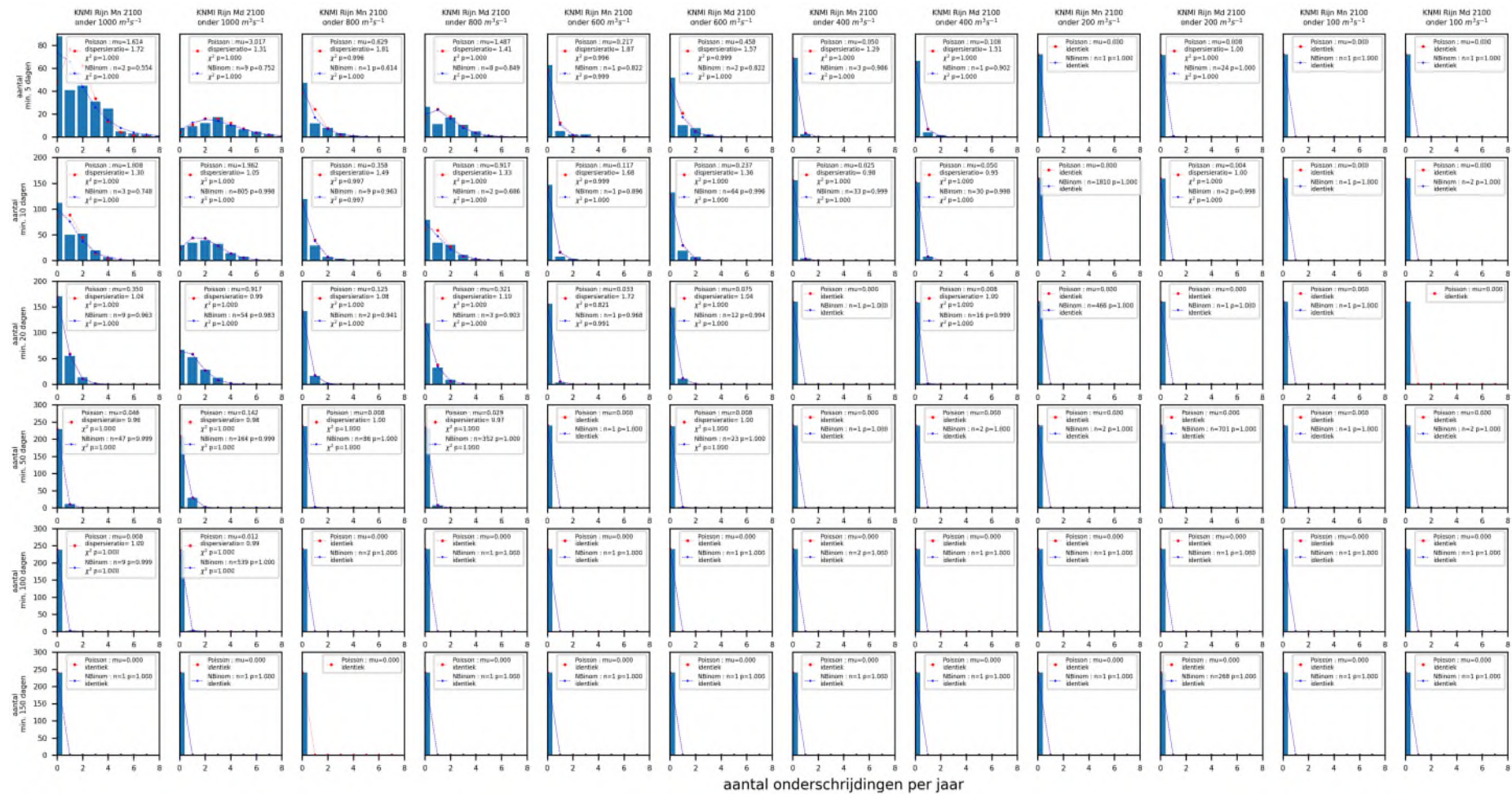
I Toetsing distributies onderschrijdingsduren



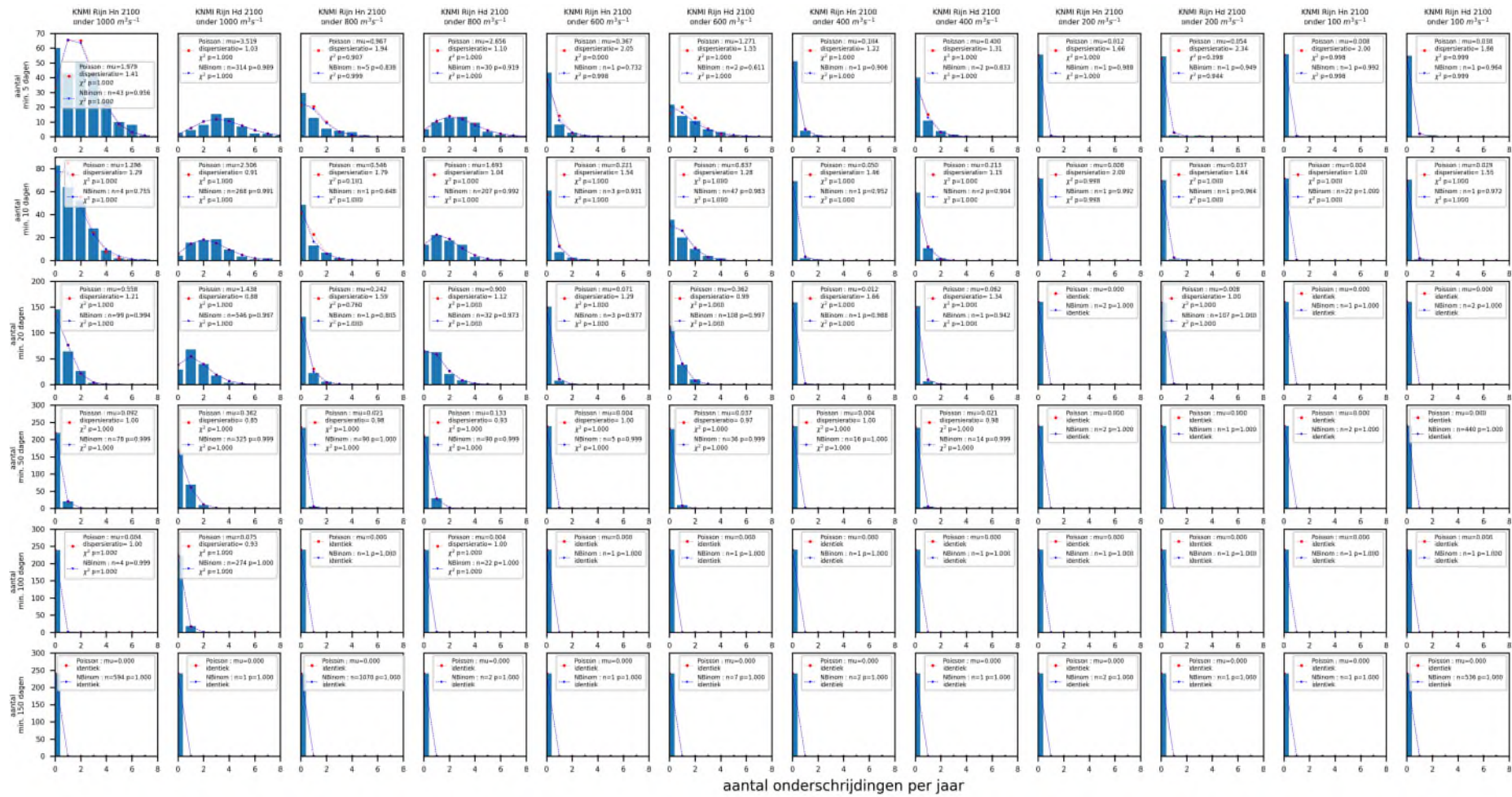
Figuur I-1 Statistieken van voorkomens van overschrijdingen van geselecteerde drempelwaarden voor de Rijn in de simulaties met LENTIS-data voor overschrijdingsduren van minimaal 5 tot minimaal 150 dagen, voor drempelwaarden van 1000, 800, 600, 400, 200 en 100 m³s⁻¹, voor scenario Mn in 2100 en de referentieberekening.



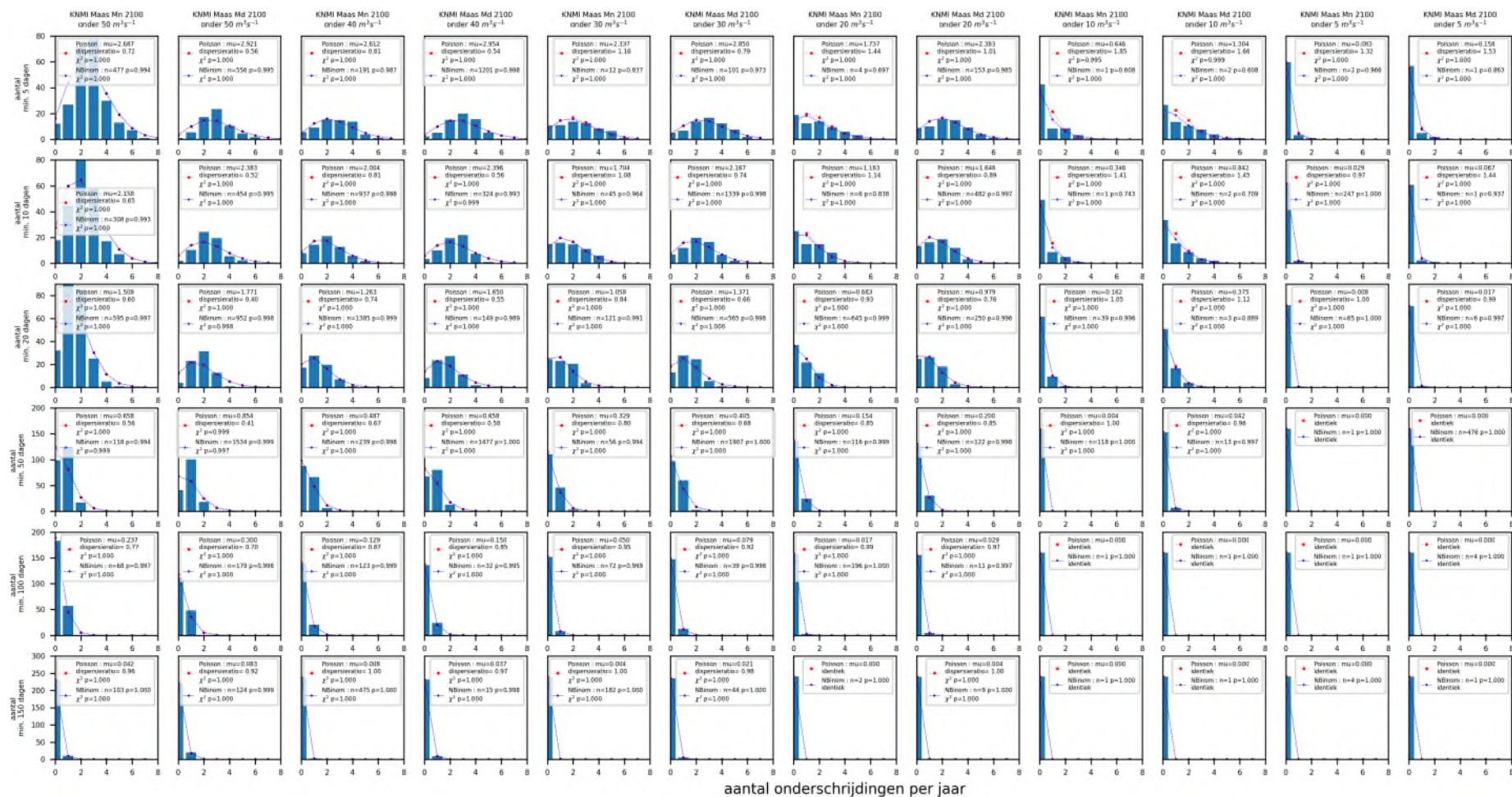
Figuur I-2 Statistieken van voorkomens van overschrijdingen van geselecteerde drempelwaarden voor de Maas in de simulaties met LENTIS-data voor overschrijdingsduren van minimaal 5 tot minimaal 150 dagen, voor drempelwaarden van 1000, 800, 600, 400, 200 en 100 m³s⁻¹, voor scenario Mn in 2100 en de referentieberekening.



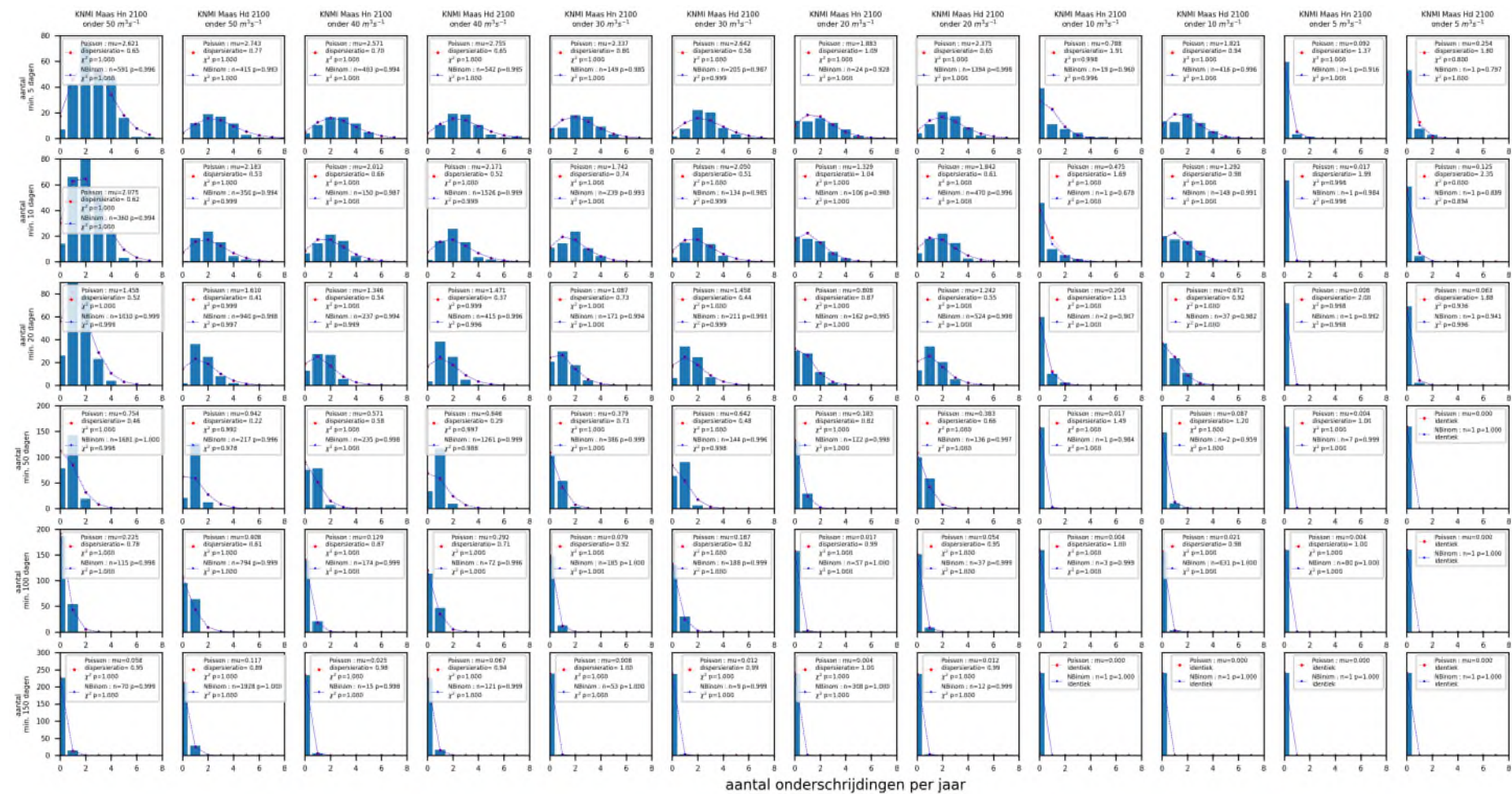
Figuur I-3 Statistieken van voorkomens van onderschrijdingen van geselecteerde drempelwaarden voor de Rijn in de simulaties op basis van KNMI-scenario's voor onderschrijdsduren van minimaal 5 tot minimaal 150 dagen, voor drempelwaarden van 1000, 800, 600, 400, 200 en 100 m³s⁻¹, voor scenario's Md en Mn in 2100 en de referentieberekening.



Figuur I-4 Statistieken van voorkomens van overschrijdingen van geselecteerde drempelwaarden voor de Rijn in de simulaties op basis van KNMI-scenario's voor overschrijdingsduren van minimaal 5 tot minimaal 150 dagen, voor drempelwaarden van 1000, 800, 600, 400, 200 en 100 m³s⁻¹, voor scenario's Hd en Hn in 2100 en de referentieberekening.



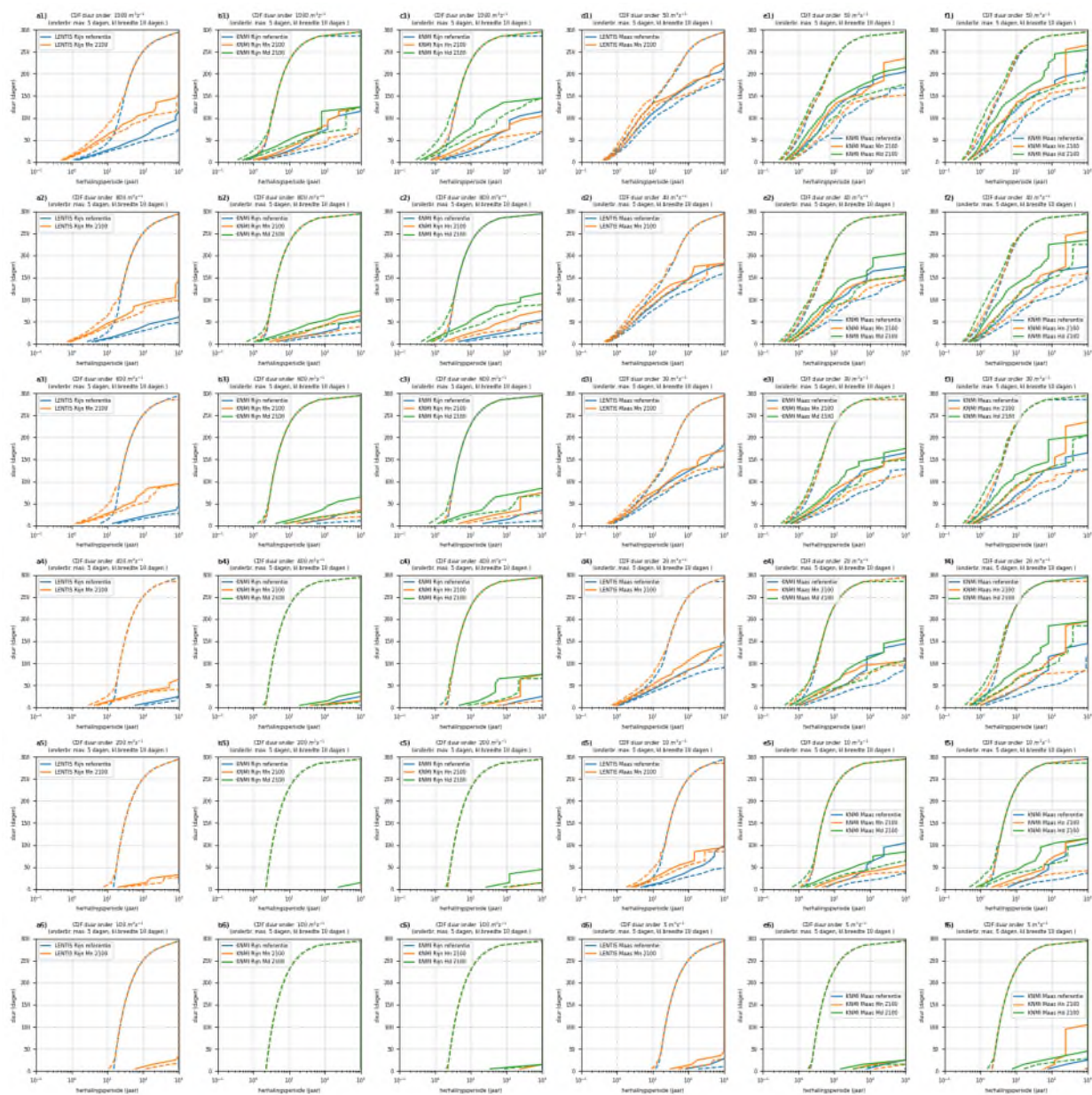
Figuur I-5: Statistieken van voorkomens van overschrijdingen van geselecteerde drempelwaarden voor de Maas in de simulaties op basis van KNMI-scenario's voor overschrijdursduren van minimaal 5 tot minimaal 150 dagen, voor drempelwaarden van 1000, 800, 600, 400, 200 en 100 m³s⁻¹, voor scenario's Md en Mn in 2100 en de referentieberekening.



Figuur I-6 Statistieken van voorkomens van overschrijdingen van geselecteerde drempelwaarden voor de Maas in de simulaties op basis van KNMI-scenario's voor overschrijdingsduren van minimaal 5 tot minimaal 150 dagen, voor drempelwaarden van 1000, 800, 600, 400, 200 en 100 m³/s⁻¹, voor scenario's Hd en Hn in 2100 en de referentieberekening.

II Onderschrijdingsduur

Figuur II-1 toont gemiddelde onderschrijdingsduren en 95%-betrouwbaarheidsintervallen (Poisson-proces-gebaseerd) voor een groot aantal drempelwaarden dan in het hoofdrapport.



Figuur II-1 Herhalingsperiode voor overschrijding van weergegeven grenswaarden voor de Rijn en de Maas met onzekerheidsbandbreedtes op basis van een Poissonmodel.

Tabel II-1: Uit de analyse resulterende herhalingstijden voor lage afvoeren van de Maas met statistische onder- en bovengrens voor alle beschouwde simulaties voor overschrijdingsduren van 30, 60, 90 en 120 dagen.

Drempelwaarde (m³/s)	model	overschrijdingsduur (dagen)	herhalingstijd (jaar)	ondergrens	bovengrens
50	LENTIS Maas referentie	30	1	0	1
50	LENTIS Maas referentie	60	2	1	3
50	LENTIS Maas referentie	90	5	3	8
50	LENTIS Maas referentie	120	14	7	26
50	LENTIS Maas Mn 2100	30	1	0	1
50	LENTIS Maas Mn 2100	60	2	1	2
50	LENTIS Maas Mn 2100	90	3	2	4
50	LENTIS Maas Mn 2100	120	7	4	10
30	LENTIS Maas referentie	30	2	1	3
30	LENTIS Maas referentie	60	7	4	11
30	LENTIS Maas referentie	90	20	8	39
30	LENTIS Maas referentie	120	85	16	316
30	LENTIS Maas Mn 2100	30	1	1	2
30	LENTIS Maas Mn 2100	60	4	3	6
30	LENTIS Maas Mn 2100	90	19	8	36
30	LENTIS Maas Mn 2100	120	55	14	129
10	LENTIS Maas referentie	30	53	10	142
10	LENTIS Maas referentie	60	333	16	>1000
10	LENTIS Maas referentie	90	666	19	>1000
10	LENTIS Maas referentie	120	>1000	24	>1000
10	LENTIS Maas Mn 2100	30	14	6	21
10	LENTIS Maas Mn 2100	60	101	14	197
10	LENTIS Maas Mn 2100	90	572	19	>1000
10	LENTIS Maas Mn 2100	120	>1000	24	>1000
50	KNMI Maas referentie	30	1	0	2
50	KNMI Maas referentie	60	2	1	6
50	KNMI Maas referentie	90	4	1	13
50	KNMI Maas referentie	120	10	2	40
50	KNMI Maas Mn 2100	30	1	0	1
50	KNMI Maas Mn 2100	60	2	0	4
50	KNMI Maas Mn 2100	90	3	1	8
50	KNMI Maas Mn 2100	120	7	2	21
50	KNMI Maas Md 2100	30	0	0	1
50	KNMI Maas Md 2100	60	1	0	2
50	KNMI Maas Md 2100	90	3	1	6

<i>Drempelwaarde (m3/s)</i>	<i>model</i>	<i>onderschrijdingsduur (dagen)</i>	<i>herhalingsstijd (jaar)</i>	<i>ondergrens</i>	<i>bovengrens</i>
50	KNMI Maas Md 2100	120	5	1	15
30	KNMI Maas referentie	30	2	1	4
30	KNMI Maas referentie	60	7	1	25
30	KNMI Maas referentie	90	23	2	171
30	KNMI Maas referentie	120	54	3	365
30	KNMI Maas Mn 2100	30	1	0	3
30	KNMI Maas Mn 2100	60	5	1	13
30	KNMI Maas Mn 2100	90	16	2	67
30	KNMI Maas Mn 2100	120	90	3	>1000
30	KNMI Maas Md 2100	30	1	0	2
30	KNMI Maas Md 2100	60	4	1	10
30	KNMI Maas Md 2100	90	10	2	35
30	KNMI Maas Md 2100	120	20	2	72
10	KNMI Maas referentie	30	39	2	505
10	KNMI Maas referentie	60	100	2	>1000
10	KNMI Maas referentie	90	240	3	>1000
10	KNMI Maas referentie	120	>1000	3	>1000
10	KNMI Maas Mn 2100	30	23	2	69
10	KNMI Maas Mn 2100	60	>1000	2	>1000
10	KNMI Maas Mn 2100	90	>1000	3	>1000
10	KNMI Maas Mn 2100	120	>1000	3	>1000
10	KNMI Maas Md 2100	30	7	1	15
10	KNMI Maas Md 2100	60	84	2	634
10	KNMI Maas Md 2100	90	>1000	3	>1000
10	KNMI Maas Md 2100	120	>1000	3	>1000
50	KNMI Maas referentie	30	1	0	2
50	KNMI Maas referentie	60	2	1	6
50	KNMI Maas referentie	90	4	1	13
50	KNMI Maas referentie	120	10	2	40
50	KNMI Maas Hn 2100	30	0	0	1
50	KNMI Maas Hn 2100	60	1	0	3
50	KNMI Maas Hn 2100	90	3	1	8
50	KNMI Maas Hn 2100	120	7	2	23
50	KNMI Maas Hd 2100	30	0	0	1
50	KNMI Maas Hd 2100	60	1	0	2
50	KNMI Maas Hd 2100	90	2	0	4

<i>Drempelwaarde (m3/s)</i>	<i>model</i>	<i>onderschrijdingsduur (dagen)</i>	<i>herhalingstijd (jaar)</i>	<i>ondergrens</i>	<i>bovengrens</i>
50	KNMI Maas Hd 2100	120	3	1	8
30	KNMI Maas referentie	30	2	1	4
30	KNMI Maas referentie	60	7	1	25
30	KNMI Maas referentie	90	23	2	171
30	KNMI Maas referentie	120	54	3	365
30	KNMI Maas Hn 2100	30	1	0	2
30	KNMI Maas Hn 2100	60	4	1	10
30	KNMI Maas Hn 2100	90	11	2	34
30	KNMI Maas Hn 2100	120	43	3	472
30	KNMI Maas Hd 2100	30	1	0	1
30	KNMI Maas Hd 2100	60	2	1	4
30	KNMI Maas Hd 2100	90	4	1	9
30	KNMI Maas Hd 2100	120	13	2	42
10	KNMI Maas referentie	30	39	2	505
10	KNMI Maas referentie	60	100	2	>1000
10	KNMI Maas referentie	90	240	3	>1000
10	KNMI Maas referentie	120	>1000	3	>1000
10	KNMI Maas Hn 2100	30	17	1	64
10	KNMI Maas Hn 2100	60	70	2	>1000
10	KNMI Maas Hn 2100	90	240	3	>1000
10	KNMI Maas Hn 2100	120	>1000	3	>1000
10	KNMI Maas Hd 2100	30	3	1	6
10	KNMI Maas Hd 2100	60	25	2	163
10	KNMI Maas Hd 2100	90	48	2	278
10	KNMI Maas Hd 2100	120	>1000	3	>1000

Tabel II-2: Uit de analyse resulterende herhalings tijden voor lage afvoeren van de Rijn met statistische onder- en bovengrenzen voor alle beschouwde simulaties voor onderschrijdingsduren van 30, 60, 90 en 120 dagen.

Drempelwaarde (m3/s)	model	onderschrijdingsduur (dagen)	herhalings tijd (jaar)	ondergrens	bovengrens
1000	LENTIS Rijn referentie	30	13	6	22
1000	LENTIS Rijn referentie	60	114	14	506
1000	LENTIS Rijn referentie	90	600	19	>1000
1000	LENTIS Rijn referentie	120	>1000	24	>1000
1000	LENTIS Rijn Mn 2100	30	2	1	3
1000	LENTIS Rijn Mn 2100	60	9	5	14
1000	LENTIS Rijn Mn 2100	90	37	11	78
1000	LENTIS Rijn Mn 2100	120	214	20	851
600	LENTIS Rijn referentie	30	480	14	3519
600	LENTIS Rijn referentie	60	>1000	18	>1000
600	LENTIS Rijn referentie	90	>1000	21	>1000
600	LENTIS Rijn referentie	120	>1000	24	>1000
600	LENTIS Rijn Mn 2100	30	12	5	19
600	LENTIS Rijn Mn 2100	60	62	12	144
600	LENTIS Rijn Mn 2100	90	566	19	629
600	LENTIS Rijn Mn 2100	120	>1000	24	>1000
200	LENTIS Rijn referentie	30	>1000	16	>1000
200	LENTIS Rijn referentie	60	>1000	18	>1000
200	LENTIS Rijn referentie	90	>1000	21	>1000
200	LENTIS Rijn referentie	120	>1000	24	>1000
200	LENTIS Rijn Mn 2100	30	880	15	>1000
200	LENTIS Rijn Mn 2100	60	>1000	18	>1000
200	LENTIS Rijn Mn 2100	90	>1000	21	>1000
200	LENTIS Rijn Mn 2100	120	>1000	24	>1000
1000	KNMI Rijn referentie	30	14	1	67
1000	KNMI Rijn referentie	60	50	2	634
1000	KNMI Rijn referentie	90	120	3	>1000
1000	KNMI Rijn referentie	120	>1000	3	>1000
1000	KNMI Rijn Mn 2100	30	8	1	20
1000	KNMI Rijn Mn 2100	60	43	2	472
1000	KNMI Rijn Mn 2100	90	120	3	>1000
1000	KNMI Rijn Mn 2100	120	620	3	>1000
1000	KNMI Rijn Md 2100	30	3	1	5
1000	KNMI Rijn Md 2100	60	18	2	50

<i>Drempelwaarde (m3/s)</i>	<i>model</i>	<i>onderschrijdingsduur (dagen)</i>	<i>herhalingsjijd (jaar)</i>	<i>ondergrens</i>	<i>bovengrens</i>
1000	KNMI Rijn Md 2100	90	80	2	387
1000	KNMI Rijn Md 2100	120	540	3	693
600	KNMI Rijn referentie	30	620	2	>1000
600	KNMI Rijn referentie	60	>1000	2	>1000
600	KNMI Rijn referentie	90	>1000	3	>1000
600	KNMI Rijn referentie	120	>1000	3	>1000
600	KNMI Rijn Mn 2100	30	620	2	>1000
600	KNMI Rijn Mn 2100	60	>1000	2	>1000
600	KNMI Rijn Mn 2100	90	>1000	3	>1000
600	KNMI Rijn Mn 2100	120	>1000	3	>1000
600	KNMI Rijn Md 2100	30	57	2	1682
600	KNMI Rijn Md 2100	60	620	2	>1000
600	KNMI Rijn Md 2100	90	>1000	3	>1000
600	KNMI Rijn Md 2100	120	>1000	3	>1000
200	KNMI Rijn referentie	30	>1000	2	>1000
200	KNMI Rijn referentie	60	>1000	2	>1000
200	KNMI Rijn referentie	90	>1000	3	>1000
200	KNMI Rijn referentie	120	>1000	3	>1000
200	KNMI Rijn Mn 2100	30	>1000	2	>1000
200	KNMI Rijn Mn 2100	60	>1000	2	>1000
200	KNMI Rijn Mn 2100	90	>1000	3	>1000
200	KNMI Rijn Mn 2100	120	>1000	3	>1000
200	KNMI Rijn Md 2100	30	>1000	2	>1000
200	KNMI Rijn Md 2100	60	>1000	2	>1000
200	KNMI Rijn Md 2100	90	>1000	3	>1000
200	KNMI Rijn Md 2100	120	>1000	3	>1000
1000	KNMI Rijn referentie	30	14	1	67
1000	KNMI Rijn referentie	60	50	2	634
1000	KNMI Rijn referentie	90	120	3	>1000
1000	KNMI Rijn referentie	120	>1000	3	>1000
1000	KNMI Rijn Hn 2100	30	4	1	10
1000	KNMI Rijn Hn 2100	60	33	2	208
1000	KNMI Rijn Hn 2100	90	180	3	>1000
1000	KNMI Rijn Hn 2100	120	>1000	3	>1000
1000	KNMI Rijn Hd 2100	30	1	0	2
1000	KNMI Rijn Hd 2100	60	4	1	11

<i>Drempelwaarde (m3/s)</i>	<i>model</i>	<i>onderschrijdingsduur (dagen)</i>	<i>herhalingsstijd (jaar)</i>	<i>ondergrens</i>	<i>bovengrens</i>
1000	KNMI Rijn Hd 2100	90	12	2	51
1000	KNMI Rijn Hd 2100	120	37	3	200
600	KNMI Rijn referentie	30	620	2	>1000
600	KNMI Rijn referentie	60	>1000	2	>1000
600	KNMI Rijn referentie	90	>1000	3	>1000
600	KNMI Rijn referentie	120	>1000	3	>1000
600	KNMI Rijn Hn 2100	30	144	2	>1000
600	KNMI Rijn Hn 2100	60	240	2	>1000
600	KNMI Rijn Hn 2100	90	>1000	3	>1000
600	KNMI Rijn Hn 2100	120	>1000	3	>1000
600	KNMI Rijn Hd 2100	30	12	1	59
600	KNMI Rijn Hd 2100	60	41	2	196
600	KNMI Rijn Hd 2100	90	>1000	3	>1000
600	KNMI Rijn Hd 2100	120	>1000	3	>1000
200	KNMI Rijn referentie	30	>1000	2	>1000
200	KNMI Rijn referentie	60	>1000	2	>1000
200	KNMI Rijn referentie	90	>1000	3	>1000
200	KNMI Rijn referentie	120	>1000	3	>1000
200	KNMI Rijn Hn 2100	30	>1000	2	>1000
200	KNMI Rijn Hn 2100	60	>1000	2	>1000
200	KNMI Rijn Hn 2100	90	>1000	3	>1000
200	KNMI Rijn Hn 2100	120	>1000	3	>1000
200	KNMI Rijn Hd 2100	30	120	2	990
200	KNMI Rijn Hd 2100	60	>1000	2	>1000
200	KNMI Rijn Hd 2100	90	>1000	3	>1000
200	KNMI Rijn Hd 2100	120	>1000	3	>1000

III Klimaatkantelpunten en weersextremen

Discontinue klimaatscenario's: AMOC collapse

Significante en snelle afwijkingen van deze klimaatscenario's - die toch al met een zekere mate van onzekerheid zijn omgeven - zijn mogelijk, vooral wanneer er kantelementen in het klimaat optreden die niet zijn opgenomen in of voortkomen uit gekoppelde modellen voor de globale circulatie/oceaan en het aardsysteem. Terwijl er een brede wetenschappelijke consensus bestaat over de oorzaken, processen en algemene gevolgen van antropogene klimaatverandering, is er veel minder overeenstemming over het belang en de mogelijke invloed van kantelementen op het klimaat op aarde. De huidige generatie van state-of-the-art modellen is gerapporteerd als inadequaats voor het bestuderen van de interacties van kantelpunten en hun impact op de algehele stabiliteit van ons klimaat (Wunderling et al. 2021, Hewitt et al. 2022, McCarthy en Caesar 2023), ook al ontstaat hun activering soms of kan deze worden geïnduceerd (bijv. Drijfhout 2015, Jackson et al. 2015, Bellomo et al. 2023, Jackson et al. 2023). Van paleoklimaat proxy's leveren echter substantieel bewijs voor het herhaaldelijk voorkomen van snelle klimaatveranderingen in het verleden van de aarde (bijv. Alley et al. 2003), die in verband kunnen worden gebracht met de activering van kantelpunten (Brovkin et al. 2021, Boers et al. 2022, Weldeab et al. 2022). Collins et al. (2022) merken op dat "het moeilijk is om de waarschijnlijkheid van abrupte klimaatgebeurtenissen te beoordelen [maar] het zijn fysisch plausibele gebeurtenissen die grote gevolgen kunnen hebben voor ecosystemen en samenlevingen en onomkeerbaar kunnen zijn."

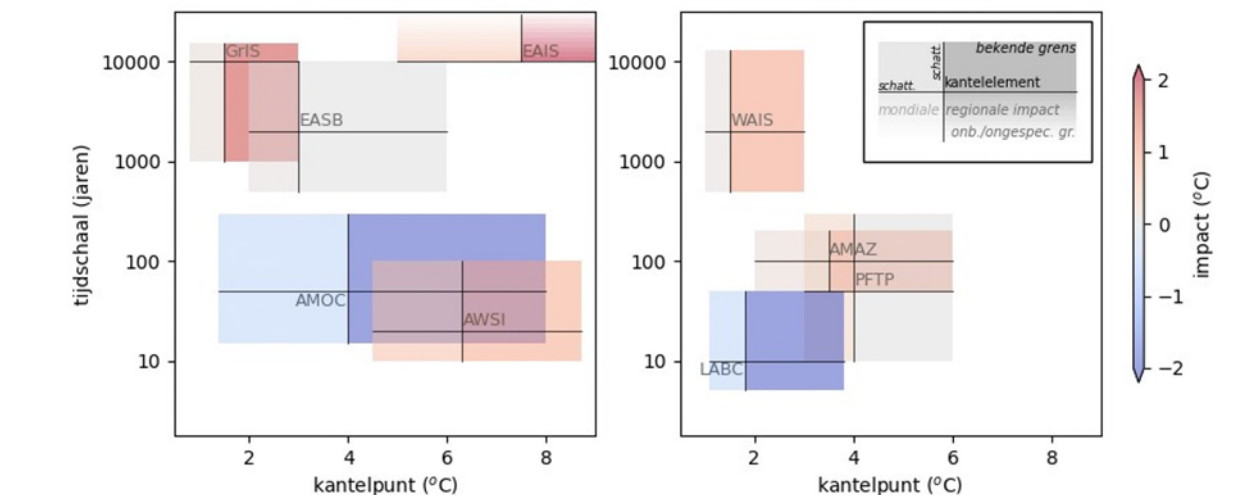
Klimaatkantelementen en -punten

Een kantelpunt 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 aardsysteem (Lenton et al. 2008). Ons begrip van kantelpunten en kantelementen is de afgelopen anderhalf decennium aanzienlijk gegroeid (Lenton et al. (2023) geeft het meest actuele overzicht), maar is nog steeds onvolledig en er zijn nog veel onzekerheden. Armstrong McKay et al. (2022) geven een recent overzicht van kantelpunten, drempelwaarden, tijdschalen en gevolgen, dat is samengevat in Tabel III-1 en Figuur III-1.

De kantelementen die het meest relevant zijn voor Europa bevinden zich in de linkerbenedenhoek (lage drempelwaarde, korte tijdschaal) van Figuur III-1 en hebben een grote impact (intensere kleur): voor Europa zijn dit met name de AMOC en Labrador Sea Convection (LABC). De AMOC, kort voor Atlantic Meridional Overturning Circulation, is onderdeel van een wereldwijd netwerk van oppervlakkige en diepe oceaanstromingen die zorgen voor langdurige uitwisseling van warmte, CO₂ en voedingsstoffen tussen het oppervlak en de diepe oceaan. In de Noord-Atlantische Oceaan kantelt deze stroming in die zin dat noordwaarts stromend oppervlaktezeewater naar beneden zakt door afkoeling en verdamping (waardoor de zoutconcentratie en dus de dichtheid toeneemt) en op diepte weer zuidwaarts stroomt. De Labradorzee convectie is een gekoppeld onderdeel van de oceaancirculatie ten westen van Groenland. Aangezien het LABC-systeem kleiner is en verder van Europa af ligt, beschouwen we een mogelijke ineenstorting van de AMOC als het primaire kantelement waarmee rekening moet worden gehouden. Voor de andere bekende kantelementen, buiten LABC en AMOC, wordt niet verwacht dat de gerapporteerde tijdschalen en magnitudes (Figuur III-1) in de komende decennia zullen leiden tot aanzienlijke afwijkingen van de op het SSP gebaseerde klimaatprojecten.

Tabel III-1: Overzicht van klimaatkantelementen. Verklaring van gebruikte symbolen: ➡ ineenstorting; ✕ afsterven, (abrupt) verlies; ⚡ abrupte dooi; ▲ geleidelijke dooi; ↗ noordelijke uitbreiding, vergroening; ↘ zuidelijk afsterven; ↯ verzwakking; ∅ ontleding. Ontleend aan Armstrong McKay et al. (2022). Tabel overgenomen uit Van Thienen et al. (2024).

Mondiale kernkantelementen		Kantelementen met regionale impact		Andere zichzelf versterkende klimaateffecten	
GrIS	Groenlandse ijskap ➡	REEF	Tropische koraalriffen ✕	PFGT	Boreale Permafrost ▲
WAIS	West-Antarctische ijskap ➡	PFAT	Boreale Permafrost ⚡	ASSI	Arctisch zomerijs ✕
LABC	Convectie in de Labradorzee ➡	BARI	ijs Barentssee ✕	LAND	Mondiale koolstofput land ↯
EASB	Oost-Antarctische subglaciale bekkens ➡	GLCR	Berggletsjers ✕	PUMP	Oceanische biologische pomp ↯
AMAZ	Amazonewoud ✕	SAHL	Sahel & West-Afrikaanse Moesson ↗	MMHD	Mariene methaanhydraten ∅
PFTP	Boreale Permafrost ➡	BORF	Boreaal woud ↘		
AMOC	Atlantische Meridionale Overkiepende Circulatie ➡	TUND	Boreaal woud ↗		
AWSI	Arctisch winterzeeijs ➡				
EAIS	Oost-Antarctische ijskap ➡				



Figuur III-1 Overzicht van kantelpunten, tijdschalen en maximale invloed op de gemiddelde temperatuur (links: mondiaal en rechts: regionaal) voor de mondiale kernkantelementen uit tabel III-1. Elke rechthoek vertegenwoordigt een kantelpunt; het bereik langs de horizontale as vertegenwoordigt de onzekerheid over de mondiale gemiddelde temperatuurstijging waarbij het kantelpunt zou kunnen worden geactiveerd. De verticale lijn binnen de rechthoek geeft aan welke waarde als de beste schatting wordt beschouwd. Het bereik van een rechthoek langs de verticale as en de horizontale lijn binnen de rechthoek geven op dezelfde manier de onzekerheid en beste schatting van de tijdschaal van activering aan. De kleuren van de rechthoek geven het gemiddelde temperatuureffect aan dat het kantelpunt kan geven op wereldschaal (linkerhelft) en regionale schaal (rechterhelft). Harde randen geven bekende grenzen aan, zachte randen onbekende of ongespecificeerde grenzen. Gebaseerd op Armstrong McKay et al. (2022). Figuur overgenomen uit Van Thienen et al. (2024).

Consequenties van AMOC collapse

Uit analyse van recente waarnemingen is bekend dat de AMOC sinds de jaren 1950 (of misschien al langer) verzwakt. Numerieke modellen laten ook een verzwakking zien bij een opwarmende atmosfeer (Peng et al. 2022). Afgelopen zomer verscheen er zelfs een publicatie die op basis van statistische analyse voorspelt dat de AMOC tussen 2025 en 2095 zal instorten (Ditlevsen en Ditlevsen 2023). Andere onderzoekers waarschuwen ook dat de AMOC op het punt staat om te kantelen (Weijer et al. 2019, Rahmstorf 2024, Van Westen et al. 2024). Toch blijft het extreem moeilijk om te voorspellen wanneer dit zal gebeuren. Veranderingen in de AMOC en de interactie

tussen ijskappen en de oceaan hebben de afgelopen 30.000 jaar een grote invloed gehad op ecosystemen en menselijke beschavingen (Brovkin et al. 2021). Model simulaties door Bellomo et al. (2023) en Jackson et al. (2023) laten zien dat voor een afname in de AMOC sterkte van ongeveer 50%, de gemiddelde jaarlijkse temperatuur 1-3 °C kan dalen in het Middellandse Zeegebied, 2-4 °C in Centraal en West Europa, en 2-6 °C of meer in Noord Europa, en 4-9 °C of meer in IJsland. Ook worden er verminderingen van de jaarlijkse neerslag tot 200 mm/jaar voorspeld voor het grootste deel van Zuid- en Centraal-Europa, met sterkere verminderingen in West-Noorwegen, Schotland en boven de noordelijke Atlantische Oceaan (Van Thienen et al. 2025). Deze getallen zijn allemaal uitgedrukt in vergelijking met ongestoorde controlesimulaties. Simulaties van Van Westen et al. (2024) die uiteindelijk een min of meer volledige uitschakeling van de AMOC laten zien, voorspellen navenant sterkere effecten in het Europese klimaat: gemiddelde jaarlijkse temperaturen dalen met ongeveer 3-4°C voor Wenen, 7°C voor Londen en meer dan 10°C voor Reykjavik, waarbij de gemiddelde zomertemperatuurdalingen mild zijn in vergelijking met de veel sterkere temperatuurdalingen in de winter. Deze auteurs vinden ook een dynamisch zeeniveau-effect als gevolg van de ineenstorting van de AMOC van +70-100 cm over grote delen van de noordelijke Atlantische Oceaan, ongeveer +50 cm in de Noordzee en ongeveer +30 cm in de Middellandse Zee. Merk op dat de voorspelde temperatuurveranderingen de antropogene temperatuurstijgingen meer dan teniet zullen doen, vooral in de winter, en meer droogtes en extreme weersomstandigheden met zich mee zullen brengen.

Klimaatmodellen en extremen

De hier volgende bespreking van het vermogen van klimaatmodellen tot het voorspellen van verschillende weersextremen die een relatie hebben tot de neerslagbalans is ontleend aan Van Thienen et al. (2023) met enkele aanpassingen en toevoegingen.

CarbonBrief (2017) publiceerde een evaluatie van een reeks mondiale klimaatmodellen gepubliceerd sinds 1973 en vergeleek hun voorspellingen met observaties van wereldgemiddelde oppervlaktetemperaturen. Zij 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 dicht bij 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. Let op dat 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. 2023). 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 (European Environmental Agency 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.

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. 2022), 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. 2017). Ten slotte moet worden opgemerkt dat modellen ook voorspellen en observaties laten zien dat extremen persistenter (langduriger) worden bij opwarming van de atmosfeer (Pfleiderer et al. 2019, Pradhan et al. 2022). Dit hangt onder andere samen met de straalstroom. Het weer in Europa wordt sterk 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 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.

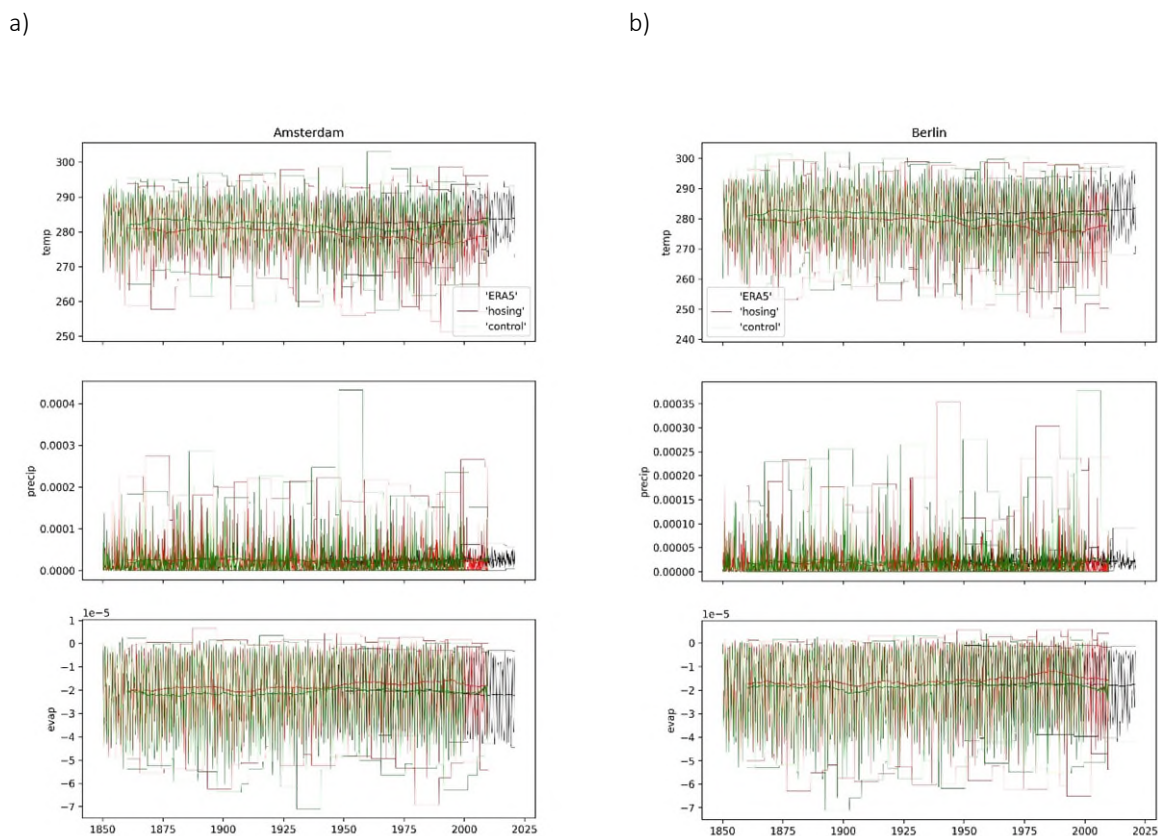
Onderzoek van Petrova et al. (2024) bevestigt dat klimaatmodellen de duur van de langste jaarlijkse droogte (longest annual dry spell, LAD) regionaal aanzienlijk onderschatten, hoewel de verschillen voor (Zuid-) Europa beperkt lijken te zijn.

Aanvullende informatie

Voor meer informatie, zie het BTO Trendalert Klimaatscenario's, -kantelpunten en -extremen (BTO 2023.083) of het artikel *Climate tipping points and their potential impact on drinking water supply planning and management in Europe* (Van Thienen et al., 2025).

IV Informatie en consistentietests klimaat- en afvoersimulaties ineenstorting AMOC

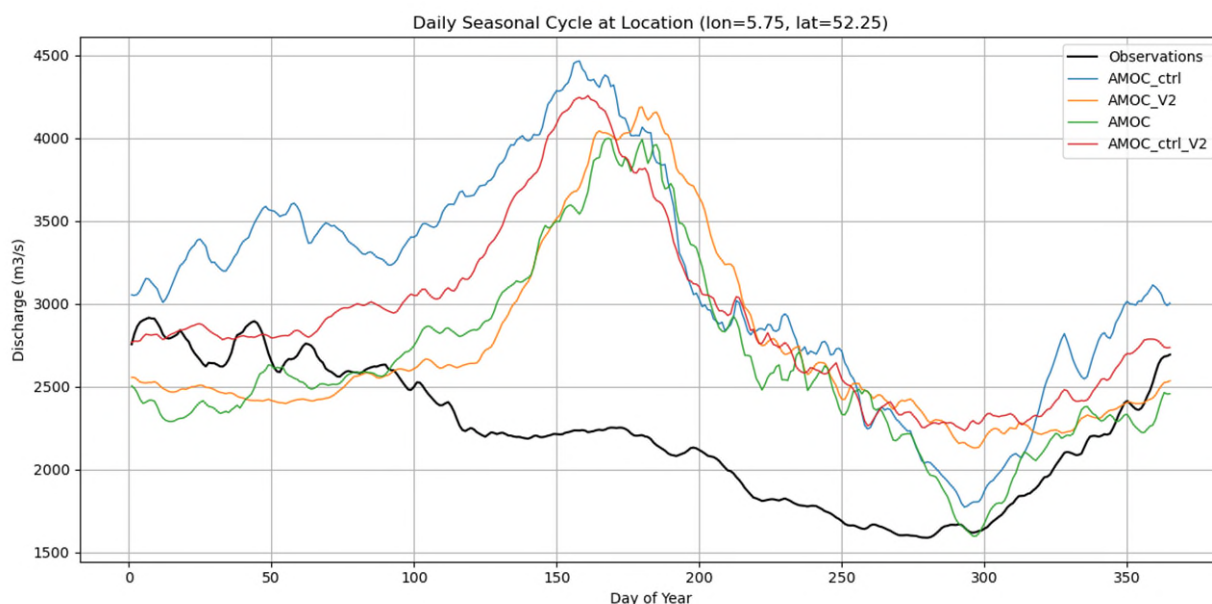
Figuur IV-1 toont tijdreeksen voor gemiddelde temperatuur, neerslag en verdamping in de simulaties van Bellomo et al. (2023) voor zowel de simulatie zonder (*control*) als met (*hosing*) ineenstorting van de AMOC.



Figuur IV-1 Tijdreeksen voor gemiddelde weerparameters in de AMOC-simulaties van Bellomo et al. (2023) voor Amsterdam en Berlijn. Van boven naar beneden zijn getoond: temperatuur, neerslag en verdamping, inclusief 10-jarige minimale en maximale waarden, voor historische observaties (zwart), controlesimulatie (groen, geen ineenstorting AMOC) en ineenstortingssimulatie (rood). De simulaties gebruiken als startjaar 1850. In het vervolg spreken wij over jaren sinds de start van de simulaties.

Figuur IV-2 toont de gemiddelde afvoer per dag van het jaar in de gesimuleerde rivierafvoer. Hierbij zijn twee sets simulaties opgenomen, steeds met een onverstoorde run (CTRL, geen AMOC collapse) en een verstoorde run met AMOC collapse: een met gebruik van ERA5-neerslagwaarden voor de biascorrectie (AMOC en AMOC_CTRL) en een met gebruik van ISIMIP-neerslagwaarden voor de biascorrectie (AMOC_V2 en AMOC_CTRL_V2, zie paragraaf 2.3). De laatstgenoemde geven de meest vertrouwenwekkende resultaten. Te zien is dat de afvoer in de winter lager is in de verstoorde run dan in de controlerun, en ook dat de piek van de afvoer door sneeuwsmelt ca. een maand later optreedt.

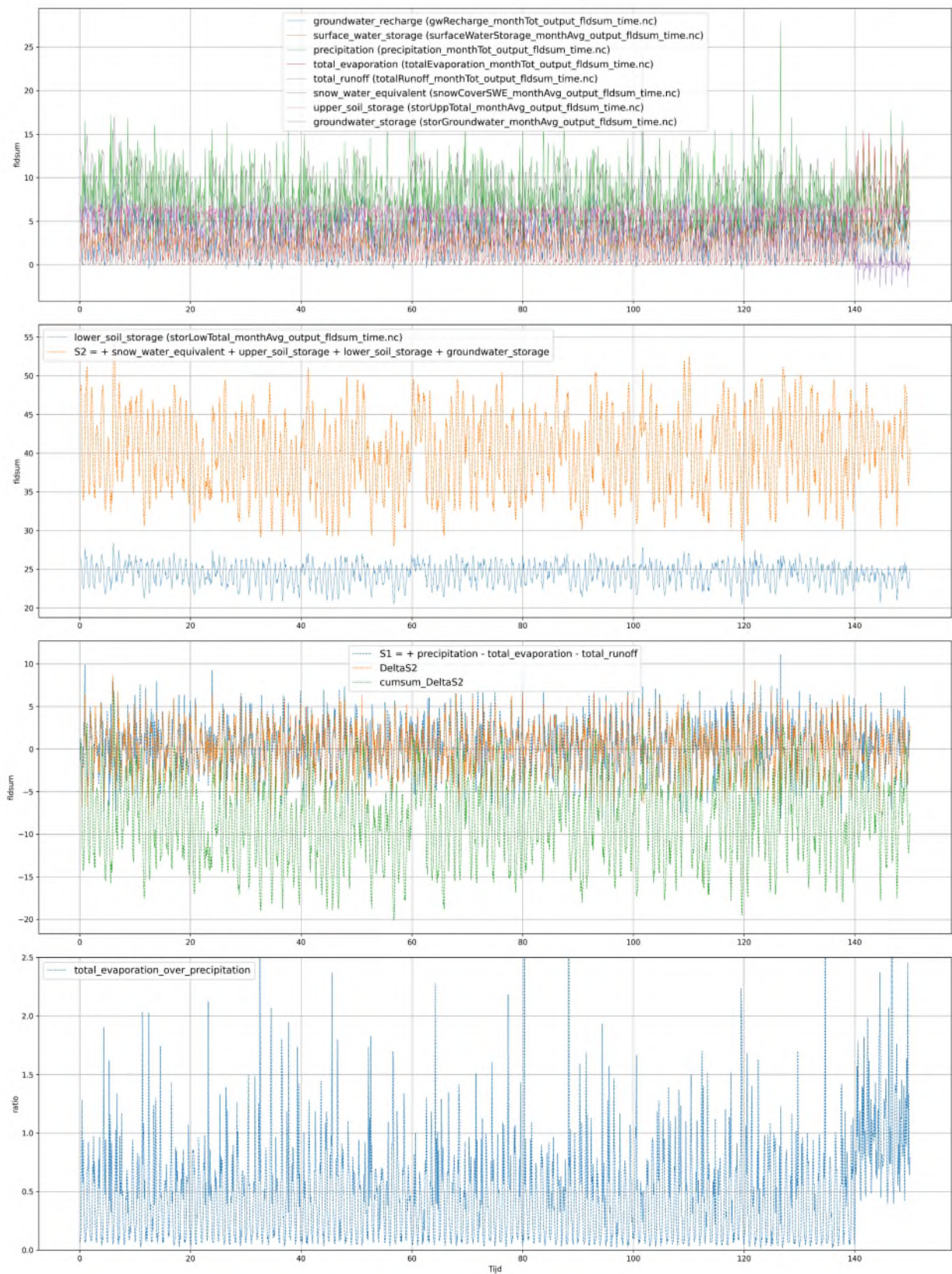
Overigens tonen ook de controlesimulaties een redelijk groot verschil in de lente- en zomermaanden met de historische observaties. Daarom is het betekenisvoller om te kijken naar de verschillen tussen de verstoorde en controleruns dan naar de absolute waarden van de simulatieresultaten te kijken.



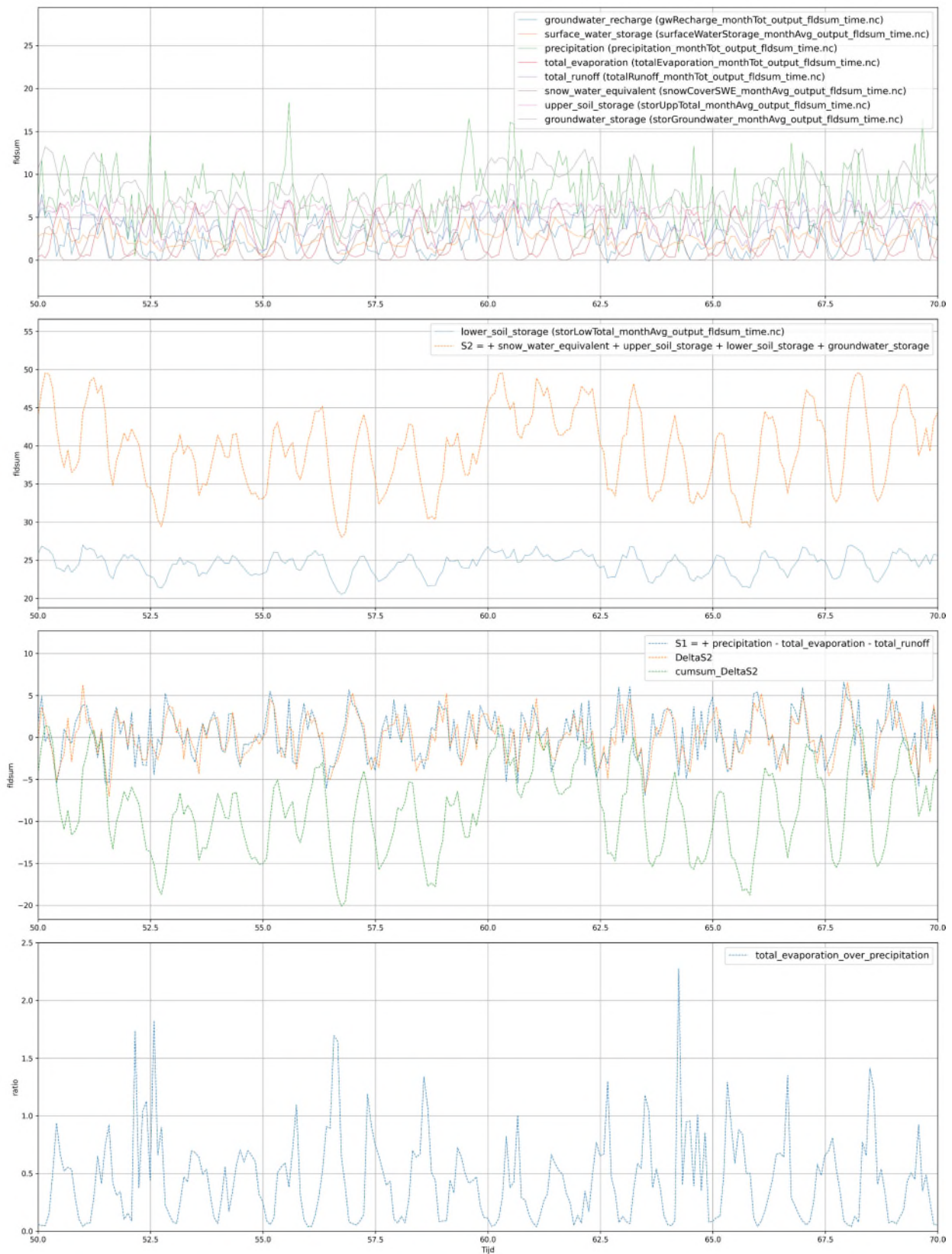
Figuur IV-2 Gemiddelde afvoer per dag van het jaar voor de gesimuleerde rivierafvoeren voor de Rijn. AMOC (groen) en AMOC_CTRL (blauw) tonen respectievelijk de waarden in een AMOC-collapse bij gebruik van ERA5-neerslagwaarden voor de biascorrectie; AMOC_V2 en AMOC_CTRL_V2 tonen deze bij gebruik van ISIMIP-neerslagwaarden voor de biascorrectie (zie paragraaf **Error! Reference source not found.**). Tevens is er vergelijking zijn historische observaties in zwart weergegeven.

Figuur IV-3 en Figuur IV-4 tonen tijdreeksen voor diverse modelparameters en -reservoirs. Van belang hierbij is de constatering dat de waterbalans grosso modo sluitend is: verschillen in het totaal van neerslag, verdamping en afspoeling (S_1) worden gereflecteerd in veranderingen in opslag (ΔS_2), zie Figuur IV-3c en Figuur IV-4c. Verder is relevant te melden dat de cumulatieve som van de verandering in opslag geen drift toont – er is sprake van een stabiele balans op de lange termijn. Beide observaties ondersteunen het vertrouwen in de modelresultaten.

Tabel IV-1 toont numerieke waarden behorende bij de herhalingscycli voor diverse onderschrijfsduren die zijn weergegeven in Figuur 4-6.



Figuur IV-3 Tijdreeksen voor de oppervlaktesom voor het gesimuleerde gebied van diverse modelparameters (a,b), balansen (b,c) en verhouding tussen neerslag en verdamping (d), volledige simulatieperiode.



Figuur IV-4 Tijdreeksen voor de oppervlaktesom voor het gesimuleerde gebied van diverse modelparameters (a,b), balansen (b,c) en verhouding tussen neerslag en verdamping (d), ingezoomd op de periode 1900-1925 t.b.v. leesbaarheid.

Tabel IV-1: Uit de analyse resulterende herhalingstijden voor lage afvoeren van de Rijn voor de AMOC_ctrl- en AMOC-scenario's met statistische onder- en bovengrens voor alle beschouwde simulaties voor overschrijdingsduren van 30, 60, 90 en 120 dagen.

Tijdsvenster	Drempelwaarde (m ³ /s)	Simulatie	Overschrijdingsduur (dagen)	Herhalingstijd (jaar)	Ondergrens	Bovengrens
jaar 1-150	600	AMOC_ctrl Rijn	30	35	1	>1000
jaar 1-150	600	AMOC_ctrl Rijn	60	575	1	>1000
jaar 1-150	600	AMOC_ctrl Rijn	90	>1000	1	>1000
jaar 1-150	600	AMOC_ctrl Rijn	120	>1000	2	>1000
jaar 1-150	600	AMOC Rijn	30	25	1	276
jaar 1-150	600	AMOC Rijn	60	75	1	>1000
jaar 1-150	600	AMOC Rijn	90	112	1	>1000
jaar 1-150	600	AMOC Rijn	120	>1000	2	>1000
jaar 1-30	600	AMOC_ctrl Rijn	30	515	0	>1000
jaar 1-30	600	AMOC_ctrl Rijn	60	>1000	0	>1000
jaar 1-30	600	AMOC_ctrl Rijn	90	>1000	0	>1000
jaar 1-30	600	AMOC_ctrl Rijn	120	>1000	0	>1000
jaar 1-30	600	AMOC Rijn	30	>1000	0	>1000
jaar 1-30	600	AMOC Rijn	60	>1000	0	>1000
jaar 1-30	600	AMOC Rijn	90	>1000	0	>1000
jaar 1-30	600	AMOC Rijn	120	>1000	0	>1000
jaar 111-140	600	AMOC_ctrl Rijn	30	22	0	889
jaar 111-140	600	AMOC_ctrl Rijn	60	515	0	>1000
jaar 111-140	600	AMOC_ctrl Rijn	90	>1000	0	>1000
jaar 111-140	600	AMOC_ctrl Rijn	120	>1000	0	>1000
jaar 111-140	600	AMOC Rijn	30	515	0	>1000
jaar 111-140	600	AMOC Rijn	60	>1000	0	>1000
jaar 111-140	600	AMOC Rijn	90	>1000	0	>1000
jaar 111-140	600	AMOC Rijn	120	>1000	0	>1000
jaar 1-150	700	AMOC_ctrl Rijn	30	21	1	259
jaar 1-150	700	AMOC_ctrl Rijn	60	112	1	>1000
jaar 1-150	700	AMOC_ctrl Rijn	90	>1000	1	>1000
jaar 1-150	700	AMOC_ctrl Rijn	120	>1000	2	>1000
jaar 1-150	700	AMOC Rijn	30	12	1	61
jaar 1-150	700	AMOC Rijn	60	75	1	>1000
jaar 1-150	700	AMOC Rijn	90	112	1	>1000
jaar 1-150	700	AMOC Rijn	120	>1000	2	>1000
jaar 1-30	700	AMOC_ctrl Rijn	30	30	0	>1000
jaar 1-30	700	AMOC_ctrl Rijn	60	>1000	0	>1000
jaar 1-30	700	AMOC_ctrl Rijn	90	>1000	0	>1000

jaar 1-30	700	AMOC_ctrl Rijn	120	>1000	0	>1000
jaar 1-30	700	AMOC Rijn	30	18	0	616
jaar 1-30	700	AMOC Rijn	60	>1000	0	>1000
jaar 1-30	700	AMOC Rijn	90	>1000	0	>1000
jaar 1-30	700	AMOC Rijn	120	>1000	0	>1000
jaar 111-140	700	AMOC_ctrl Rijn	30	18	0	616
jaar 111-140	700	AMOC_ctrl Rijn	60	30	0	>1000
jaar 111-140	700	AMOC_ctrl Rijn	90	>1000	0	>1000
jaar 111-140	700	AMOC_ctrl Rijn	120	>1000	0	>1000
jaar 111-140	700	AMOC Rijn	30	10	0	309
jaar 111-140	700	AMOC Rijn	60	>1000	0	>1000
jaar 111-140	700	AMOC Rijn	90	>1000	0	>1000
jaar 111-140	700	AMOC Rijn	120	>1000	0	>1000
jaar 1-150	800	AMOC_ctrl Rijn	60	90	1	>1000
jaar 1-150	800	AMOC_ctrl Rijn	90	575	1	>1000
jaar 1-150	800	AMOC_ctrl Rijn	120	>1000	2	>1000
jaar 1-150	800	AMOC Rijn	30	5	1	13
jaar 1-150	800	AMOC Rijn	60	56	1	>1000
jaar 1-150	800	AMOC Rijn	90	75	1	>1000
jaar 1-150	800	AMOC Rijn	120	>1000	2	>1000
jaar 1-30	800	AMOC_ctrl Rijn	30	22	0	889
jaar 1-30	800	AMOC_ctrl Rijn	60	>1000	0	>1000
jaar 1-30	800	AMOC_ctrl Rijn	90	>1000	0	>1000
jaar 1-30	800	AMOC_ctrl Rijn	120	>1000	0	>1000
jaar 1-30	800	AMOC Rijn	30	6	0	98
jaar 1-30	800	AMOC Rijn	60	515	0	>1000
jaar 1-30	800	AMOC Rijn	90	>1000	0	>1000
jaar 1-30	800	AMOC Rijn	120	>1000	0	>1000
jaar 111-140	800	AMOC_ctrl Rijn	30	6	0	79
jaar 111-140	800	AMOC_ctrl Rijn	60	20	0	649
jaar 111-140	800	AMOC_ctrl Rijn	90	515	0	>1000
jaar 111-140	800	AMOC_ctrl Rijn	120	>1000	0	>1000
jaar 111-140	800	AMOC Rijn	30	4	0	38
jaar 111-140	800	AMOC Rijn	60	515	0	>1000
jaar 111-140	800	AMOC Rijn	90	>1000	0	>1000
jaar 111-140	800	AMOC Rijn	120	>1000	0	>1000
jaar 1-150	900	AMOC_ctrl Rijn	30	7	1	30
jaar 1-150	900	AMOC_ctrl Rijn	60	25	1	369
jaar 1-150	900	AMOC_ctrl Rijn	90	100	1	>1000
jaar 1-150	900	AMOC_ctrl Rijn	120	150	2	>1000

jaar 1-150	900	AMOC Rijn	30	3	0	7
jaar 1-150	900	AMOC Rijn	60	29	1	845
jaar 1-150	900	AMOC Rijn	90	75	1	>1000
jaar 1-150	900	AMOC Rijn	120	575	2	>1000
jaar 1-30	900	AMOC_ctrl Rijn	30	22	0	889
jaar 1-30	900	AMOC_ctrl Rijn	60	>1000	0	>1000
jaar 1-30	900	AMOC_ctrl Rijn	90	>1000	0	>1000
jaar 1-30	900	AMOC_ctrl Rijn	120	>1000	0	>1000
jaar 1-30	900	AMOC Rijn	30	6	0	98
jaar 1-30	900	AMOC Rijn	60	515	0	>1000
jaar 1-30	900	AMOC Rijn	90	>1000	0	>1000
jaar 1-30	900	AMOC Rijn	120	>1000	0	>1000
jaar 111-140	900	AMOC_ctrl Rijn	30	5	0	169
jaar 111-140	900	AMOC_ctrl Rijn	60	10	0	395
jaar 111-140	900	AMOC_ctrl Rijn	90	22	0	889
jaar 111-140	900	AMOC_ctrl Rijn	120	30	0	>1000
jaar 111-140	900	AMOC Rijn	30	2	0	15
jaar 111-140	900	AMOC Rijn	60	22	0	889
jaar 111-140	900	AMOC Rijn	90	>1000	0	>1000
jaar 111-140	900	AMOC Rijn	120	>1000	0	>1000
jaar 1-150	1000	AMOC_ctrl Rijn	30	5	1	15
jaar 1-150	1000	AMOC_ctrl Rijn	60	19	1	147
jaar 1-150	1000	AMOC_ctrl Rijn	90	43	1	536
jaar 1-150	1000	AMOC_ctrl Rijn	120	150	2	>1000
jaar 1-150	1000	AMOC Rijn	30	2	0	5
jaar 1-150	1000	AMOC Rijn	60	16	1	111
jaar 1-150	1000	AMOC Rijn	90	50	1	561
jaar 1-150	1000	AMOC Rijn	120	575	2	>1000
jaar 1-30	1000	AMOC_ctrl Rijn	30	7	0	73
jaar 1-30	1000	AMOC_ctrl Rijn	60	515	0	>1000
jaar 1-30	1000	AMOC_ctrl Rijn	90	>1000	0	>1000
jaar 1-30	1000	AMOC_ctrl Rijn	120	>1000	0	>1000
jaar 1-30	1000	AMOC Rijn	30	4	0	63
jaar 1-30	1000	AMOC Rijn	60	22	0	889
jaar 1-30	1000	AMOC Rijn	90	>1000	0	>1000
jaar 1-30	1000	AMOC Rijn	120	>1000	0	>1000
jaar 111-140	1000	AMOC_ctrl Rijn	30	4	0	36
jaar 111-140	1000	AMOC_ctrl Rijn	60	10	0	112
jaar 111-140	1000	AMOC_ctrl Rijn	90	10	0	112
jaar 111-140	1000	AMOC_ctrl Rijn	120	30	0	>1000

jaar 111-140	1000	AMOC Rijn	30	2	0	10
jaar 111-140	1000	AMOC Rijn	60	10	0	309
jaar 111-140	1000	AMOC Rijn	90	30	0	>1000
jaar 111-140	1000	AMOC Rijn	120	>1000	0	>1000