



Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

HKV
LIJN IN WATER

stowa

DROOGTESTATISTIEK KNMI'23- KLIMAATSCENARIO'S



RAPPORT

2025
23



ISBN 978.94.6479.114.3



stowa@stowa.nl www.stowa.nl
TEL 033 460 32 00
Stationsplein 89 3818 LE Amersfoort
POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

Publicaties van de STOWA kunt u gratis downloaden via www.stowa.nl/publicaties

COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Auteurs
Vera Glas (HKV)
Michiel Pezij (HKV)
Henk van den Brink (KNMI)

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Frank van der Bolt (Waterschap Aa en Maas)
Marcel Boomgaard (Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier)
Matthijs van den Brink (Rijkswaterstaat- WVL)
Jochem Fritz (Hoogheemraadschap Delfland)
Joost Heijkers (Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden)
Jeroen Hermans (Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier)
Joachim Hunink (Waterschap Aa en Maas)
Helena Pavelkova (Waterschap Limburg)
Jannes Schenkel (Waterschap Noorderzijlvest)
Nicolette van der Tak (Waterschap Rivierenland)
Michelle Talsma (STOWA)
Rudolf Versteeg (Waterschap Zuiderzeeland)
Frank Weerts (Waterschap Rivierenland)

OMSLAGFOTO iStock
VORMGEVING Buro Vormvast
STOWA STOWA 2025-23
ISBN 978.94.6479.114.3

De inhoud van deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden in de publicatie, of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud ervan.

STOWA spant zich in de rechthebbenden van in de uitgave gebruikte afbeeldingen te respecteren conform het auteursrecht. Indien u desondanks van mening bent dat uw rechten in het geding zijn, dan verzoeken wij u contact met ons op te nemen.

TEN GELEIDE

De KNMI'23-klimaatscenario's zijn duidelijk: de Nederlandse zomers worden droger. Om de gevolgen hiervan in kaart te brengen, is antwoord op vragen als 'hoeveel droger wordt het in 2050' en 'hoe vaak gaat droogte optreden in 2100' van groot belang. In dit onderzoek is op basis van de KNMI'23-scenario's droogtestatistiek afgeleid. Met de resultaten van deze studie kunnen waterbeheerders droogte- en zoetwaterbeschikbaarheidsstudies uitvoeren voor hun watersystemen. Daarmee staan ze beter gesteld voor een drogere toekomst.

In 2023 werden de KNMI'23-klimaatscenario's gepubliceerd. Deze scenario's presenteren de nieuwste inzichten over het toekomstige klimaat in Nederland. De verschillende scenario's laten zien dat de Nederlandse zomers steeds droger worden. Dat is merkbaar als droog weer (meteorologische droogte). Deze droogte heeft impact heeft op onze water- en sociaal-economische systemen. De gegevens die ten grondslag liggen aan de KNMI'23-scenario's, zijn zogenoemde RACMO-reeksen. Dit zijn synthetische gegevens die zijn gegenereerd door het Regionaal Atmosferisch Klimaatmodel (RACMO). De RACMO-reeksen bevatten per klimaatscenario 240-jaar aan dag data. Tijdreeksen van deze lengte kunnen in de praktijk lastig worden doorgerekend met rekenintensieve hydraulische- en grondwatermodellen. Daarom is droogtestatistiek afgeleid.

Dit rapport beschrijft de droogtestatistiek van de KNMI'23 klimaatscenario's op basis van verschillende droogteindicatoren. Ook is de ruimtelijke variabiliteit van de droogtestatistiek in kaart gebracht. Om modelstudies op basis van de KNMI'23-scenario's te faciliteren zijn waterschap specifieke karakteristieke jaren afgeleid voor verschillende herhaaltijden. Ook zijn er per waterschap representatieve 30-jarige RACMO-reeksen samengesteld die kunnen worden toegepast in modelstudies. Hiermee kunnen bijvoorbeeld de gevolgen voor de grondwaterstand of wateraanvoerbehoefte in kaart worden gebracht. De data en bijbehorende statistieken zijn beschikbaar via de STOWA-site.

Met de resultaten van dit onderzoek ondersteunen we waterbeheerders om te anticiperen op droger wordende zomers.

Mark van der Werf
Directeur STOWA

SAMENVATTING

AANLEIDING EN DOEL

De KNMI'23-klimaatscenario's geven de nieuwste inzichten in mogelijke toekomstige klimaatverandering voor Nederland. Waterbeheerders hebben een behoefte om deze scenario's te gebruiken in droogte- en zoetwaterbeschikbaarheidsstudies. Omdat de eerder door het KNMI opgeleverde getransformeerde reeksen ongeschikt zijn voor dergelijke studies, is in dit onderzoek onderzocht hoe de oorspronkelijke RACMO-reeksen, 240 jaar per scenario, kunnen worden ingezet voor droogteanalyses.

De studie levert twee typen producten op:

1. Karakteristieke jaren: individuele jaren die representatief zijn voor bepaalde droogte-extremen;
2. Representatieve dertigjarige reeksen: blokken van dertig jaar die de droogtestatistiek zo optimaal mogelijk representeren.

DROOGTEINDICATOREN

De analyse is gebaseerd op meerdere droogteindicatoren die verschillende aspecten van meteorologische droogte beschrijven:

- Maximaal cumulatief neerslagtekort
- Minimale 45-daagse neerslagsom
- Aantal droge dagen
- Minimale zevendaagse rivieraafvoer (Rijn en Maas)

Voor elk scenario is per indicator de statistiek afgeleid, waaronder herhaaltijden op basis van Generalized Extreme Value (GEV)-verdelingen.

RESULTATEN KARAKTERISTIEKE JAREN

De statistiek van de karakteristieke jaren toont dat de kans op droog weer sterk toeneemt in de toekomst. Waar een jaar als 2018 nu gemiddeld eens in de 20 jaar voorkomt, gebeurt dat rond 2050 al eens per 5 jaar, en rond 2100 zelfs elke 2 jaar.

Uit het onderzoek blijkt dat het niet mogelijk is om één enkel karakteristiek jaar te selecteren dat representatief is voor alle indicatoren tegelijk, zeker niet voor extremen. Daarom is besloten karakteristieke jaren te selecteren op basis van het cumulatief neerslagtekort, waarbij we de aanvullende gegevens voor de andere indicatoren (zoals hun herhaaltijd en optreedddatum) ook leveren om toch inzicht te bieden.

De droogtestatistiek varieert aanzienlijk per regio. Zo zijn de verschillen in neerslagtekort tussen noordelijke en zuidelijke gebieden soms meer dan 30%. De patronen blijven grotendeels gelijk bij verschillende klimaatscenario's, wat wijst op structurele regionale kenmerken. Dit betekent dat karakteristieke jaren per waterschap moeten worden bepaald. Voor elk waterschap is daarom een Excelbestand opgesteld met de beschrijving van de karakteristieke jaren.

SELECTIE VAN 30-JARIGE REEKSEN

Daarnaast is per scenario de meest optimale representatieve 30-jarige reeks geselecteerd. Ook hier is de selectie per waterschap gedaan, rekening houdend met de afhankelijkheid van Rijn- of Maasafvoer. De selectie is gebaseerd op de overeenkomst met de statistische verdeling van extremen in de 240-jarige reeks op basis van GEV-fits. Er is gekozen om blokken van 10 jaar te combineren (in totaal 2024 combinaties) om zo de best passende 30 jaar te vinden. Elke 30-jarige reeks bevat gemiddeld:

- 1 extreem van een gebeurtenis die gemiddeld eens per 30 jaar voorkomt;
- 2 extremen van gebeurtenissen die gemiddeld eens per 15 jaar voorkomen;
- 3 extremen van gebeurtenissen die gemiddeld eens per 10 jaar voorkomen;
- Enzovoort.

AANBEVELINGEN VOOR GEBRUIK VAN DE PRODUCTEN

Waterbeheerders wordt aangeraden gebruik te maken van de opleverde producten, maar ook om bewust te zijn van de beperkingen. De RACMO-reeksen bevatten synthetische (niet-historische) weerdata, en weersvariabiliteit tussen jaren kan grote invloed hebben op hydrologische uitkomsten. Onterecht kan dan klimaatverandering als oorzaak worden gezien in plaats van natuurlijke variatie. Daarom bevat het rapport een handreiking voor het gebruik van de gegevens in droogtestudies.

STOWA IN HET KORT

HOE WE WERKEN

STOWA is het kennis- en innovatiecentrum voor regionale waterbeheerders in Nederland; de waterschappen en provincies. We helpen ze met het verkrijgen van nieuwe kennis en inzichten die nodig zijn om de opgaven van de regionale waterbeheerders beter te kunnen uitvoeren. Dat doen we door kennisvragen te formuleren en te selecteren in programmacommissies. We zetten ons onderzoek uit bij een keur aan experts, adviesbureaus, instituten en universiteiten, die we begeleiden tijdens hun werk. We zorgen voor de beschikbaarstelling en verspreiding van de kennis, inzichten en antwoorden aan de gezamenlijke waterbeheerders. We stimuleren de uitwisseling van kennis en ervaringen, via bijeenkomsten, werkgroepen, excursies, conferenties en communities of practice. We werken samen met onder andere ministeries, Rijkswaterstaat, gemeenten, drinkwaterbedrijven.

WAT WE ONDERZOEKEN

Inhoudelijk richt STOWA zich op alle onderdelen van waterbeheer, van waterkering en stedelijk waterbeheer tot waterzuivering en watersystemen. Belangrijke thema's daarbij zijn klimaatadaptatie, waterveiligheid, waterkwaliteit en ecologie, energietransitie en circulaire economie.

De kennisvragen die STOWA beantwoordt liggen meestal op technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied. Onze kennis is altijd gericht op de praktijk van regionale waterbeheerders. Dat is waar we voor staan, als Stichting Toegepast Onderzoek WAterbeheer.

WIE WE ZIJN

STOWA is als kennisorganisatie onafhankelijk, onpartijdig en transparant. De afnemers van onze kennis moeten erop kunnen vertrouwen dat de inhoud van onze rapporten objectief en representatief is. Alleen zo kan onze kennis worden ingezet voor beter waterbeheer en innovaties die antwoord geven op de uitdagingen van vandaag en morgen. Het is aan regionale waterbeheerders zelf te bepalen hoe ze de kennis van STOWA in de praktijk gebruiken. STOWA kan daarbij een rol spelen als adviseur, maar is geen uitvoerder of regisseur.

STOWA is een stichting die de richtlijnen volgt voor organisaties zonder winstoogmerk (RJ-640). In ons jaarverslag is daarom naast de cijfermatige jaarrekening onder meer ook een directieverslag over de stichting, haar activiteiten en kantallen opgenomen.

DROOGTESTATISTIEK KNMI'23- KLIMAATSCENARIO'S

INHOUD

TEN GELEIDE
SAMENVATTING
STOWA IN HET KORT

1	INLEIDING	1
1.1	Aanleiding en doel	1
1.1.1	Aanleiding	1
1.1.2	Probleemstelling	2
1.1.3	Doelstelling	3
1.2	Uitgangspunten en randvoorwaarden	3
1.3	Methodiek en leeswijzer	3
2	DEFINITIE DROOGTEINDICATOREN	5
2.1	De droogteindicatoren	5
2.1.1	Maximaal jaarlijks cumulatief neerslagtekort	5
2.1.2	Minimale 45-daagse neerslagsom per jaar	5
2.1.3	Aantal droge dagen per jaar	6
2.1.4	Minimale zevendaagse Rijn- en Maasafvoer	6
2.2	Correlatie tussen indicatoren	7
3	DROOGTESTATISTIEK PER INDICATOR	8
3.1	Aanpak	8
3.2	Resultaten	9
3.2.1	Maximaal cumulatief neerslagtekort	9
3.2.2	Minimale 45-daagse neerslagsom	10
3.2.3	Aantal droge dagen	11
3.2.4	Minimale zevendaagse afvoer Rijn bij Lobith	12
3.2.5	Minimale zevendaagse afvoer Maas bij Monsin	12
3.3	Karakteristieke jaren voor gecombineerde droogteindicatoren	13
3.4	Onzekerheid van de GEV-fits	15
3.5	Synthese	16

4	RUIMTELIJKE VERSCHILLEN IN DE DROOGTESTATISTIEK	18
4.1	Aanpak	18
4.2	Resultaten	18
	4.2.1 Het maximaal cumulatief neerslagtekort	18
	4.2.2 De minimale 45-daagse neerslagsom	21
	4.2.3 Aantal droge dagen	23
4.3	Synthese	25
5	AFLEIDEN DERTIGJARIGE REEKSEN	27
5.1	Inleiding	27
5.2	Aanpak	27
5.3	Resultaten	30
6	CONCLUSIES EN DISCUSSIE	33
6.1	Conclusies karakteristieke jaren	33
6.2	Conclusies 30-jarige reeksen	34
6.3	Producten	34
6.4	Discussie en aanbevelingen	35
7	HANDREIKING	37
8	REFERENTIES	40
BIJLAGE A	AFHANKELIJKHEID WATERSCHAPPEN VAN RIJN EN MAAS	41
BIJLAGE B	CORRELATIE TUSSEN INDICATOREN	42
BIJLAGE C	KANSVERDELINGSFITS VOOR ALLE SCENARIO'S	43

1

INLEIDING

1.1 AANLEIDING EN DOEL

1.1.1 AANLEIDING

In 2023 zijn de KNMI'23-klimaatscenario's gepubliceerd. Deze scenario's presenteren de nieuwste inzichten met betrekking tot een mogelijk toekomstig klimaat voor Nederland (KNMI, 2024). De scenario's zijn gebaseerd op dezelfde bronnen als de IPCC-scenario's van de Verenigde Naties. Ze vormen een vertaling van de wereldwijde scenario's voor Nederland. KNMI'23 vormt de komende jaren de basis voor onderzoek naar de effecten van klimaatverandering en adaptatie aan die verandering in Nederland. Ze vervangen daarbij de KNMI'14-klimaatscenario's.

De KNMI'23-klimaatscenario's beschrijven de mogelijke verandering van het klimaat voor verschillende zichtjaren in de toekomst. Het voorliggende rapport richt zich op de zichtjaren 2050 en 2100. De mate van klimaatverandering wordt beschreven langs twee assen (KNMI, 2024):

- Uitstoot van CO₂; er zijn lage (L), midden- (M) en hoge (H) uitstootscenario's opgesteld;
- Alle scenario's geven aan dat in de toekomst Nederlandse zomers droger worden en de winters natter. De mate daarvan is onzeker. Daarom bevat elk uitstootscenario twee varianten: (1) een droog scenario (d) waarin winters licht vernatten en zomers sterk verdrogen, en (2) een nat scenario (n) waarin winters sterk vernatten en zomers licht verdrogen.

Er zijn vijftien KNMI'23-klimaatscenario's geconstrueerd. In willekeurige volgorde zijn dit: 2033L, 2050Md, 2050Mn, 2050Hd, 2050Hn, 2100Ld, 2100Ln, 2100Md, 2100Mn, 2100Hd, 2100Hn, 2150Md, 2150Mn, 2150Hd, 2150Hn, waarin het getal staat voor de tijds horizon, de hoofdletter voor de mate van CO₂-emissie (Laag, Midden, Hoog), en de kleine letter voor nat of droog. Elk scenario gaat vergezeld met een controle-reeks, die de periode 1991-2020 beschrijft. Het klimaatsignaal is gedefinieerd als het verschil tussen de scenario-reeks en de controle-reeks.

Elk scenario (en ook elke bijbehorende controle-reeks) beschrijft een periode van 30 jaar, gecentreerd rondom de horizon. Om klimatologische variaties in die periode van 30 jaar te verkleinen, is elke periode van 30 jaar acht keer afgeleid, waarmee elk scenario 240 jaar omvat. Het klimaatsignaal in bijvoorbeeld 2100 wordt dus beschreven door het verschil in de acht perioden die lopen van 2085 tot 2115 ten opzichte van de acht perioden die lopen van 1991 tot 2020.

De controle-reeksen zijn (klimatologisch gezien) niet noodzakelijkerwijs identiek, maar blijken dit na bias-correctie wel te zijn¹. In een eerder onderzoek (Van den Brink, 2023) is afgeleid welke van de 15 controle-reeksen van elk 240 jaar de beste representatie is van het klimaat over de periode 1991-2020. Dit blijkt de controle-reeks te zijn die gerelateerd is aan het 2050Md-scenario. Deze reeks wordt daarom als referentie gebruikt voor het klimaat van

¹ Dit is gecheckt zowel met GumbelpLOTS van de extreme neerslag als met multivariate grootheden zoals PET en rivierafvoeren, zie KNMI (2023).

1991-2020, en noemen we de referentie-reeks. Alle scenario's worden dus vergeleken met de referentie-reeks, en niet langer met de controle-reeks die oorspronkelijk gerelateerd was aan het scenario.

In dit rapport worden de resultaten geïllustreerd met de zichtjaren 2050 en 2100 voor de Lage (L) en Hoge (H) uitstootscenario's. Het afleiden van de karakteristieke jaren en de 30-jarige reeksen is echter ook gedaan voor de Middenscenario's (M) en voor het zichtjaar 2150.

1.1.2 PROBLEEMSTELLING

Waterbeheerders in Nederland, waaronder Rijkswaterstaat en de waterschappen, willen de KNMI'23-klimaatscenario's gebruiken in waterveiligheid- en zoetwaterbeschikbaarheidsstudies. Om de resultaten voor hydraulische analyses met betrekking tot wateroverlast en -veiligheid te kunnen gebruiken, zijn in opdracht van STOWA extreme neerslagstatistieken voor de KNMI'23-klimaatscenario's en afgeleide producten ontwikkeld² (STOWA, 2024).

De in STOWA (2024) opgeleverde producten zijn gericht op wateroverlast door extreme neerslag en zijn niet geschikt om de effecten van meteorologische droogte op watersystemen te verkennen en simuleren. De getransformeerde reeksen onderschatten de duur van droge perioden met orde grootte 50%³. Bij het aanmaken van deze getransformeerde reeksen wordt namelijk uitgegaan van de (duur van de) droogte in historische reeksen. Het advies van het KNMI is dan ook om de getransformeerde reeksen niet te gebruiken voor droogte- en zoetwaterbeschikbaarheidsstudies.

Voor zoetwaterbeschikbaarheidsstudies of onderzoek naar klimaatinvloeden op bodemvocht- en/of hydrologische droogte kan het beste gebruik worden gemaakt van de modelresultaten die ten grondslag liggen aan de KNMI'23-klimaatscenario's. Dit zijn RACMO-reeksen van achtmaal dertig jaar per scenario op dagbasis: in totaal dus 240 jaar per scenario⁴. Deze reeksen kunnen in veel gevallen praktisch gezien niet worden doorgerekend met hydraulische en groundwaterstromingsmodellen, omdat deze modellen erg rekenintensief zijn. Het wordt door waterschappen wel haalbaar geacht om een reeks van dertig jaar door te rekenen met deze modellen, exclusief een initialisatieperiode van vijf jaar.

In overleg met de begeleidingscommissie van STOWA zijn twee methoden voor gebruik van de RACMO-reeksen geïdentificeerd:

- Eén meest representatieve reeks van 30-jarige volledig doorrekenen met grond- en oppervlaktewatermodellen om zo inzicht te bieden in het verwachte watersysteemgedrag gedurende deze periode;
- Het doorrekenen van karakteristieke jaarsituaties. Hierbij kan gedacht worden aan analyses waar bijvoorbeeld een meteorologische droogte die gemiddeld eens in de vijf jaar voorkomt wordt doorgerekend met een grond- of oppervlaktewatermodel.

Voor de eerste methode is er een vertaalslag gemaakt van acht 30-jarige reeksen (240 jaar) naar één meest representatieve 30-jarige reeks per klimaatscenario die bruikbaar is voor zoetwaterbeschikbaarheidsstudies. Voor de tweede toepassing is er een selectie van karakteristieke jaren gemaakt. In deze rapportage beschrijven we de ontwikkeling van deze producten en de statistiek waarmee deze afgeleid zijn.

2 Waaronder langjarige neerslag- en verdampingsreeksen getransformeerd voor de KNMI'23-scenario's.

3 Zie figuur 2.80 in KNMI (2023).

4 RACMO (Regional Atmospheric Climate Model) is een regionaal klimaatmodel met een ruimtelijke resolutie van 12 bij 12 km.

1.1.3 DOELSTELLING

Het doel van deze studie is tweeledig:

1. Het selecteren van jaren uit de 240-jarige reeksen die een karakteristieke situatie beschrijven, zodat deze afzonderlijk door te rekenen zijn. We noemen dit karakteristieke jaren. Dit deel wordt in Hoofdstuk 2 tot en met 4 besproken;
2. Het afleiden van een 30-jarige reeks uit de 240-jarige reeks per KNMI'23-klimaatscenario. Deze 30-jarige reeks beschrijft de trend en spreiding van de 240-jarige reeks zo goed mogelijk. Dit deel wordt in Hoofdstuk 5 besproken.

Bij het afleiden van de karakteristieke jaren focussen we op twee onderzoeks vragen:

- **Kan een enkel karakteristiek jaar geselecteerd worden voor de verschillende droogteindicatoren?** De keuze voor een karakteristiek jaar is gevoelig voor de exacte voorwaarden die opgelegd worden. In deze studie hebben we beoordeeld of en zo ja hoe de verschillende droogteindicatoren gecombineerd kunnen worden om tot een enkel karakteristiek jaar te komen die de statistiek van elke indicator nauwkeurig beschrijft.
- **Kan hetzelfde karakteristieke jaar geselecteerd worden voor heel Nederland?** De KNMI'23-klimaatscenario's zijn gebaseerd op synthetische reeksen die op dagbasis per scenario ruimtelijk verschillen. Dat betekent dat karakteristieke jaren voor meteorologische droogte per regio kunnen verschillen. Voor waterbeheerders zijn deze regionale verschillen van belang. Ook Van Voorst en Van den Brink (2024) benadrukken het belang van ruimtelijke variatie bij het afleiden van droogtestatistieken. In deze studie analyseren we deze variatie en geven we een advies over de aanpak.

1.2 UITGANGSPUNTEN EN RANDVOORWAARDEN

De studie kent de volgende uitgangspunten en randvoorwaarden:

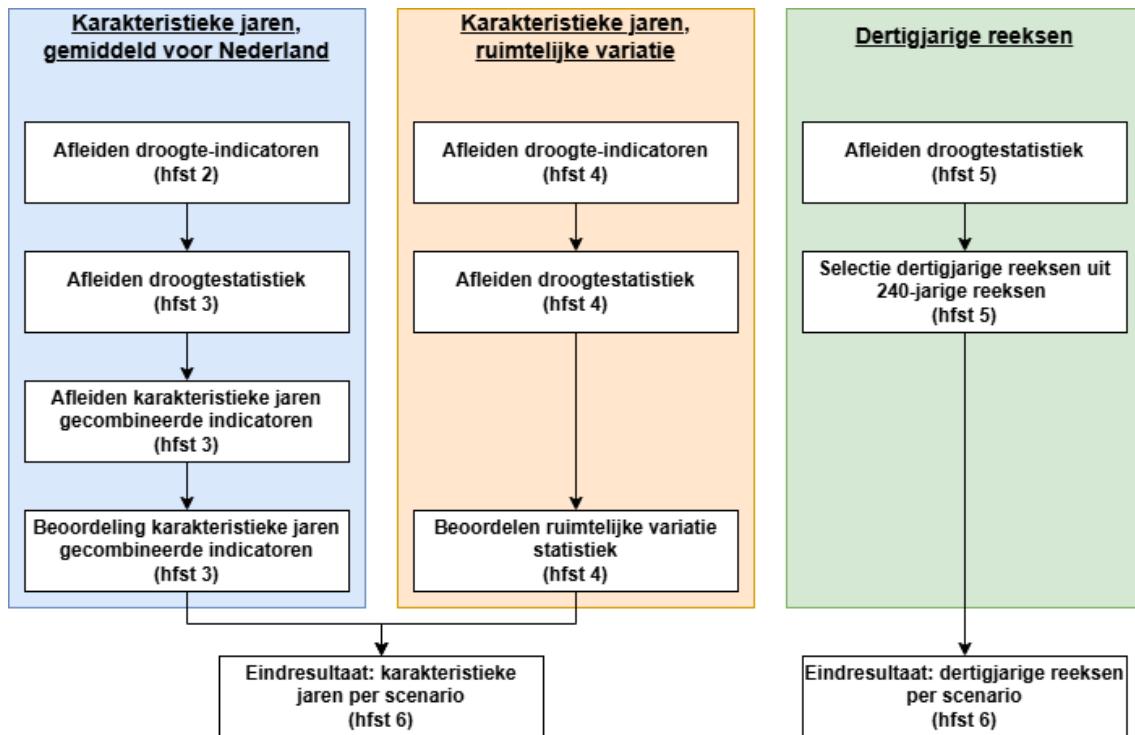
- Dit onderzoek richt zich explicet op meteorologische droogte en dus niet op landbouwkundige of hydrologische droogte. Het verloop van het weer voorafgaand aan een karakteristiek jaar wordt dus niet in acht genomen. Hierdoor kunnen er niet op voorhand karakteristieke jaren geselecteerd worden die leiden tot hydrologische droogte met specifieke herhalingstijden.
- De statistieken zijn bepaald voor het zomerhalfjaar/groeiseizoen dat loopt tussen 1 april tot 1 oktober. Die keuze is gemaakt omdat deze periode overeenkomt met de periode die het KNMI hanteert voor berekening van het cumulatief neerslagtekort;
- We nemen aan dat elk meteorologisch jaar onafhankelijk is van andere jaren. Dat betekent dat we per scenario acht ensembleleden samenvoegen om tot 240 jaar te komen;
- Voor alle KNMI'23-scenario's zijn de karakteristieke jaren en 30-jarige reeksen doorgerekend. De resultaten worden in dit rapport geïllustreerd met de referentie/huidige situatie (1991-2020), en de L- en H- scenario's voor 2050 en 2100.
- Meteorologische droogte kan op verschillende wijzen gekarakteriseerd worden. Daarom zijn de 30-jarige reeksen en de karakteristieke jaren afgeleid op basis van meerdere indicatoren. Deze indicatoren worden toegelicht in Hoofdstuk 2.

1.3 METHODIEK EN LEESWIJZER

De methodiek van deze studie is weergegeven in Figuur 1. Allereerst berekenen we de ruimtelijk gemiddelde indicatorwaarden voor heel Nederland. Daarmee leiden we statistiek en de karakteristieke jaren af. Op basis hiervan beoordelen we of er een enkel karakteristiek jaar afgeleid kan worden door de verschillende droogteindicatoren te combineren.

Vervolgens leiden we de indicatoren per RACMO-rastercel af, dus ruimtelijk verdeeld over Nederland. We leiden de droogtestatistiek per cel af en beoordelen vervolgens de ruimtelijke variatie van de statistiek per indicator. Dat leidt gezamenlijk tot het eindresultaat: de selectie van karakteristieke jaren per scenario waarbij de onderzoeks vragen beantwoord zijn. De afleiding van de 30-jarige reeksen wordt toegelicht in Hoofdstuk 5.

Figuur 1 Methodiek en leeswijzer voor deze studie



2

DEFINITIE DROOGTEINDICATOREN

Dit hoofdstuk beschrijft de meteorologische droogteindicatoren die zijn toegepast in deze studie.

2.1 DE DROOGTEINDICATOREN

Traditioneel gebruiken het KNMI en de waterschappen voornamelijk het cumulatief potentieel neerslagtekort voor het kwantificeren van meteorologische droogte. Deze indicator omvat echter niet alle facetten van meteorologische droogte. Voor verschillende gebruikers kunnen verschillende aspecten van meteorologische droogte van belang zijn. Daarom zijn er in deze studie de volgende droogteindicatoren gebruikt:

- Het maximaal jaarlijks cumulatief neerslagtekort;
- De minimale 45-daagse neerslagsom per jaar;
- Het aantal droge jaren per jaar;
- De minimale zevendaagse afvoeren van Rijn en Maas per jaar.

Door deze variatie in droogteindicatoren wordt getracht recht te doen aan verschillende toepassingssituaties van droogtestatistiek. We benadrukken dat de indicatoren over de maanden van het zomerhalfjaar worden berekend (april tot oktober), ondanks dat er gerefereerd wordt naar jaarlijkse maximale waarden. We lichten in komende paragraaf de definities van de indicatoren toe.

2.1.1 MAXIMAAL JAARLIJKS CUMULATIEF NEERSLAGTEKORT

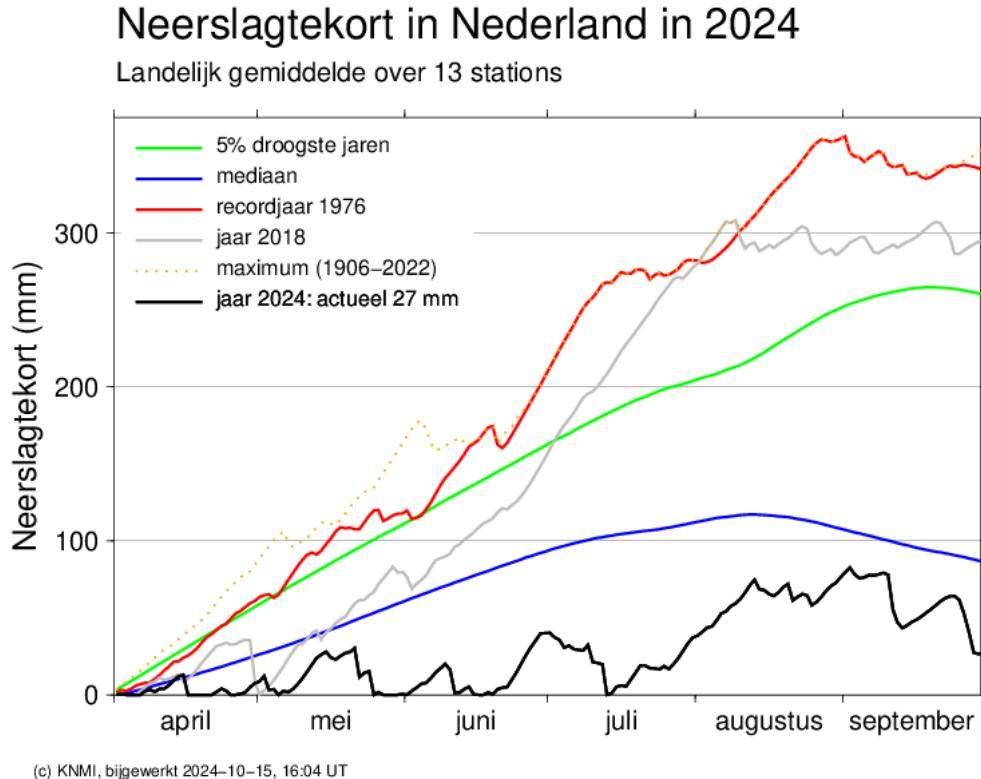
Het maximaal jaarlijks cumulatieve potentiële neerslagtekort is een belangrijke indicator van meteorologische droogte in Nederland. Deze indicator staat ook wel bekend als het doorlopend neerslagtekort. Van de verschillende droogteindicatoren in deze studie is het neerslagtekort de enige indicator die ook verdamping represeneert. Als er meer water verdampst dan dat er aan neerslag valt dan ontstaat er een neerslagtekort. Het potentiële neerslagtekort is door het KNMI gedefinieerd als het verschil tussen de dagelijkse referentiegewasverdamping volgens Makkink en de dagelijkse neerslagsom. De Makkink-verdamping is berekend op basis van de KNMI'23 RACMO-reeksen. Het cumulatieve potentiële neerslagtekort wordt jaarlijks berekend over de periode 1 april tot 1 oktober. Hierbij wordt het tekort op nul gezet indien deze negatief wordt in de cumulatieve som. Er wordt dus geen rekening gehouden met een neerslagoverschot. Als we in dit rapport spreken over het neerslagtekort bedoelen we dit cumulatieve potentiële neerslagtekort. Figuur 2 toont voor historische jaren het jaarlijkse cumulatieve neerslagtekort.

2.1.2 MINIMALE 45-DAAGSE NEERSLAGSOM PER JAAR

De minimale 45-daagse neerslagsom is een maat die inzicht geeft in de lengte van de periode waarin meteorologische droogte optreedt. De som wordt berekend door per dag in het groeiseizoen de neerslagsom te berekenen van de voorafgaande 45 dagen. Dat betekent dat voor de eerste 44 dagen van het groeiseizoen ook de neerslag van de dagen voorafgaand aan het groeiseizoen gebruikt worden. Vervolgens wordt per jaar de minimale waarde van de 45-daagse neerslagsom geselecteerd. We gebruiken dagelijkse sommen van neerslag uit RACMO om deze indicator af te leiden.

Figuur 2

Het landelijk gemiddelde cumulatieve neerslagtekort voor historische jaren op basis van KNMI-observaties



2.1.3 AANTAL DROGE DAGEN PER JAAR

Het aantal droge dagen beschrijft hoeveel dagen van het groeiseizoen geen neerslag is gevallen. Een droge dag is gedefinieerd als een dag met een neerslagsom van minder dan 0.3 mm (STOWA, 2023). Deze grens is zodanig gekozen dat er rekening gehouden wordt met de meetonzekerheid van neerslagstations. In STOWA (2023) is een voorbeelduitwerking van deze indicator voor KNMI-station De Bilt toegelicht. We gebruiken dagelijkse sommen van neerslag uit RACMO om deze indicator af te leiden.

2.1.4 MINIMALE ZEVENDAAGSE RIJN- EN MAASAFVOER

Naast de neerslag en verdamping die in Nederland optreedt, is zoetwatervoorziening in grote delen van Nederland gerelateerd aan instroom van Rijn- en Maaswater. Deze afvoeren worden daarom gezien als proxy voor optreden van meteorologische droogte in de bovenstroomse stroomgebieden van Rijn en Maas⁵. Bijlage A toont een inventarisatie van welk waterschap afhankelijk is van welke rivier. De KNMI'23-klimaatscenario's zijn door Deltares (2023) vertaald naar afvoeren van Rijn en Maas. We gebruiken de bias-gecorrigeerde afvoerreksen uit deze studie. De afvoeren zijn op twee locaties beschikbaar voor alle KNMI'23-scenario's: (1) dagelijkse gesimuleerde Rijnaafvoeren bij Lobith en (2) dagelijks gesimuleerde Maasafvoeren bij Monsin.

De methodiek voor het afleiden van de indicatoren voor Rijn en Maas is identiek. We berekenen per dag de gemiddelde zevendaagse afvoer van de voorafgaande dagen. Vervolgens selecteren we per jaar de minimale zevendaagse afvoer. Deze waarde gebruiken we als indicator. De afgeleide droogtestatistiek en karakteristieke jaren op basis van Rijn en Maas zijn onafhankelijk van elkaar afgeleid en worden gezien als twee losstaande indicatoren in de verdere analyse.

⁵ Beschikbaar via: <https://waterinfo-extra.rws.nl/projecten/@287051/knmi-23-afvoerscenario-rijn-maas/>

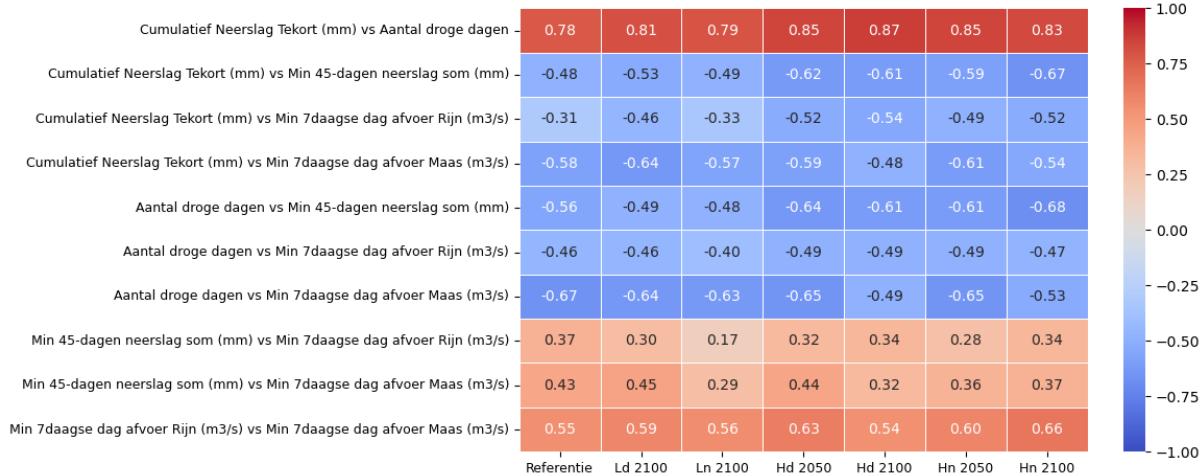
2.2 CORRELATIE TUSSEN INDICATOREN

De droogteindicatoren beschrijven elk een ander aspect van meteorologische droogte. Desondanks is er enig verband tussen de indicatoren. We beoordelen daarom de afhankelijkheid van elke indicator door het bepalen van de correlatie tussen elke indicator per klimaatscenario. Figuur 3 toont de correlatiecoëfficiënten tussen de indicatoren voor de klimaatscenario's. Een correlatiecoëfficiënt varieert tussen -1 en 1. De coëfficiënt is gelijk aan nul als er geen lineair verband is tussen de twee variabelen. Bij een positieve correlatiecoëfficiënt neemt de ene variabele volgens hetzelfde patroon toe als de andere variabelen. Bijvoorbeeld, bij het toenemen van het maximaal cumulatief neerslagtekort neemt het aantal droge dagen ook vaak toe. Bij een negatieve correlatie neemt de ene variabele af en de andere neemt toe. Bijvoorbeeld, als het cumulatief neerslagtekort toeneemt, dan neemt de minimale 45-daagse neerslagsom vaak af. De correlatie is dan negatief.

Bijlage A toont het spreidingsfiguur van deze coëfficiënten voor het huidige klimaat. We observeren het volgende:

- Het cumulatief neerslagtekort en het aantal droge dagen zijn zeer sterk gecorreleerd. De combinaties van de overige indicatoren tonen matige tot sterke correlaties. Dat betekent dat de indicatoren allemaal hoge waarden zullen tonen in droge perioden, maar elk wel andere aspecten van droogte beschrijven;
- De correlaties zijn hoger in de droge scenario's in vergelijking met de natte scenario's. In de droge scenario's verdrogen de zomers sterker dan in de natte scenario's. In de droge scenario's zal de meteorologische droogte dus hoger uitvallen dan in de natte scenario's.

Figuur 3 Correlatiecoëfficiënten voor de droogteindicatoren en klimaatscenario's



3

DROOGTESTATISTIEK PER INDICATOR

3.1 AANPAK

In dit hoofdstuk bespreken we de statistiek en de karakteristieke jaren voor het ruimtelijk gemiddelde van Nederland. Met statistiek bedoelen we hier het afleiden van herhalingstijden van jaarmaxima/-minima op basis van de droogteindicatoren. Vervolgens beantwoorden we de onderzoeksvraag: **kan een enkel karakteristiek jaar geselecteerd worden voor de gecombineerde droogteindicatoren?**

We hebben daarvoor de dagelijkse sommen van neerslag en Makkink referentiegewasverdamping uit RACMO ruimtelijk gemiddeld. Vervolgens zijn de droogteindicatoren, statistiek en karakteristieke jaren op basis van het ruimtelijk gemiddelde afgeleid. De zevendaagse afvoeren van Rijn en Maas zijn niet ruimtelijk gevarieerd, omdat deze gegevens alleen beschikbaar zijn voor de afvoer bij Lobith en Monsin.

We leiden herhalingstijden per indicator af om tot de karakteristieke jaren te komen. We voeren daarbij de volgende stappen uit:

- We sorteren de jaarlijkse indicatorwaarden van hoog naar laag (of vice versa, afhankelijk van de indicator);
- We schatten de onderschrijdfrequenties per indicator op basis van Bernard en Bos-Levenbach (1953):

$$F_i = \frac{i - 0,3}{n + 0,4}$$

Waarbij F_i staat voor de frequentie van het jaarmaximum x_i als een kanswaarde, i voor het rangnummer van de gesorteerde jaarmaxima⁶ (het meest extreme jaarmaximum heeft rangnummer n) en n voor het totaal aantal jaren. In het geval van de RACMO-reeksen is $n=240$;

- We schatten de herhalingstijden T_i in op basis van de frequenties:

$$T_i = \frac{1}{1 - F_i}$$

- We maken voor elk klimaatscenario een fit op basis van de indicatorwaarden. Voor deze fit gebruiken we een GEV-verdeling (Generalized Extreme Value) met maximum likelihood, zoals ook vaak voor het afleiden van neerslagstatistiek wordt gebruikt. We verwijzen naar STOWA (2019) voor een uitgebreide beschrijving van de GEV-verdeling en hoe deze gebruikt kan worden om een kansverdeling te fitten. Deze verdeling kent drie parameters: de vormparameter, de schaalparameter en de locatieparameter. Bij het afleiden van de neerslagstatistiek is, voordat de fit uitgevoerd wordt, de vormparameter per duur vastgezet op basis van statistiek uit metingen (STOWA, 2019). Voor de verschillende droogte-

⁶ Voor minima geldt het omgekeerde

indicatoren zijn er geen gegevens bekend met betrekking tot de vormparameter. Daarom wordt ook deze parameter gefit in deze studie, zie specifieke uitleg daarover in Hoofdstuk 5. Dat betekent wel dat er een additionele vrijheidsgraad is bij het fitten, die we niet kennen bij het afleiden van de neerslagstatistiek.

3.2 RESULTATEN

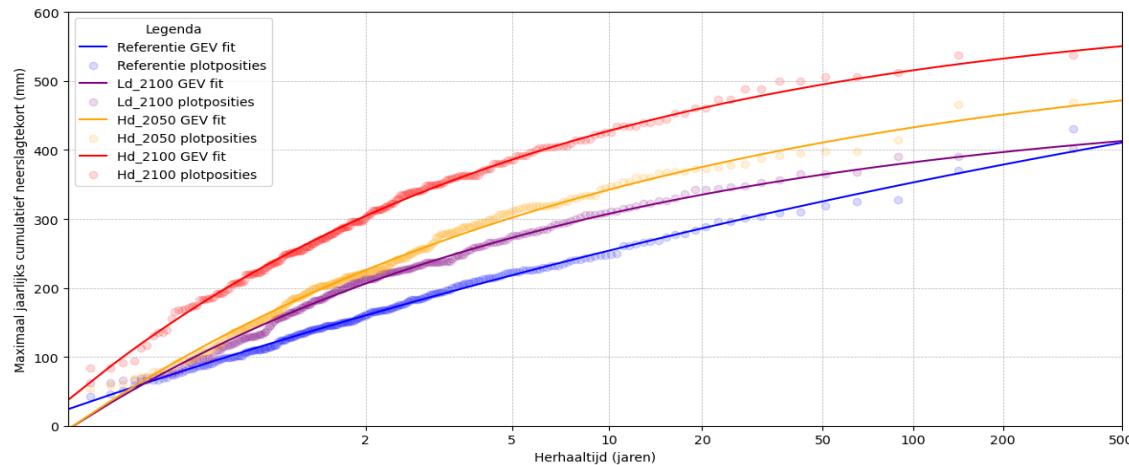
In de komende paragraaf presenteren we de statistiek per indicator ruimtelijk gemiddeld voor Nederland. De ruimtelijke variatie in statistiek wordt toegelicht in Hoofdstuk 4.

3.2.1 MAXIMAAL CUMULATIEF NEERSLAGTEKORT

Figuur 4 toont de herhalingstijden van het maximaal jaarlijks cumulatief neerslagtekort voor vier van de KNMI'23-scenarios. Elk jaar uit de RACMO-reeks vormt één punt per scenario. In het figuur zijn ook de bijbehorende GEV-fits weergegeven. De mate van toename van het cumulatief neerslagtekort verschilt per herhalingstijd. Tabel 1 presenteert de procentuele toename van het maximaal cumulatief neerslagtekort ten opzichte van het referentiescenario voor enkele herhaaltijden. Op basis van de resultaten in Figuur 4 en Tabel 1 observeren we het volgende:

- Het referentiescenario leidt in alle gevallen tot de laagste maximale cumulatieve neerslagtekorten. Dat betekent dat in elk van de toekomstscenario's het maximaal cumulatief neerslagtekort gaat toenemen ten opzichte van de huidige situatie.
- De scenario's met een hoge uitstoot tonen een sterkere toename dan de scenario's met een lage uitstoot en de droge scenario's tonen een sterkere toename dan de natte scenario's. Dit is te verwachten gezien de zomers sterker verdrogen in de droge scenario's dan in de natte scenario's;
- Ook de kans op droogte gaat sterk toenemen. Figuur 2 toont dat het extreem droge jaar 2018 een maximaal cumulatief neerslagtekort van ongeveer 300 mm kende. Figuur 4 toont dat een dergelijk jaar in de huidige situatie gemiddeld eens per twintig jaar voorkomt. Dat beeld gaat sterk veranderen in de toekomst. Rond 2050 kan een droog jaar als 2018 al gemiddeld eens per vier tot tien jaar voorkomen en rond 2100 zelfs gemiddeld eens per twee jaar voorkomen. Je kan stellen dat de droge jaren zoals we die nu kennen mogelijk het nieuwe normaal zijn rond 2100;
- We merken op dat deze statistiek onzekerheden bevat, zeker bij hoge herhalingstijden. Dat betekent dat de afgeleide herhalingstijden voor de bandbreedte T1 tot ongeveer T20 nauwkeuriger zijn dan de herhalingstijden hoger dan ongeveer T20.
- De procentuele toename van het neerslagtekort is met name hoog voor de lage herhalingstijden. Dat laat zien dat niet alleen de droge jaren nog droger gaan worden in de toekomst, maar dat ook gemiddelde jaren een stuk droger gaan worden.

Figuur 4 Maximaal jaarlijks cumulatief neerslagtekort als functie van de geschatte herhalingstijd voor de onderzochte KNMI'23-scenario's (gemiddeld over Nederland)



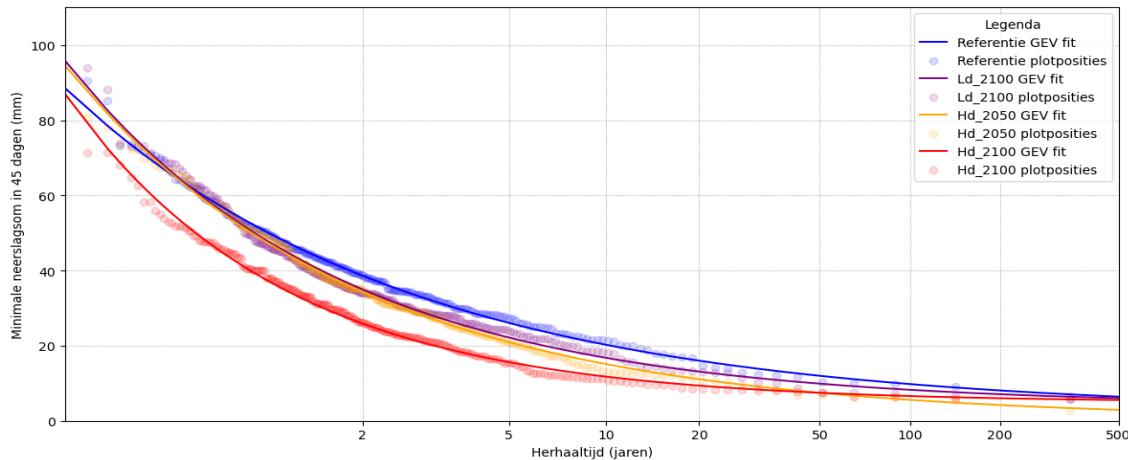
Tabel 1 Procentuele toename van het maximaal cumulatief neerslagtekort in vergelijking met het referentiescenario voor verschillende herhaaltijden en scenario's

Herhaaltijd (jaren)	2050Hd	2050Hn	2100Hd	2100Hn	2100Ld	2100Ln
2	41%	16%	90%	40%	29%	16%
5	38%	18%	77%	37%	25%	15%
10	35%	19%	68%	36%	21%	14%
25	30%	19%	59%	34%	16%	12%
50	26%	19%	52%	33%	12%	10%

3.2.2 MINIMALE 45-DAAGSE NEERSLAGSOM

Figuur 5 toont de herhaaltijden van de minimale 45-daagse neerslagsom voor vier van de KNMI'23-scenarios en daarnaast toont Tabel 2 het procentuele verschil ten opzichte van het referentiescenario. De resultaten presenteren een afname van de minimale 45-daagse neerslagsom aan, zeker in de Hd2050- en Hd2100-scenario's. De percentuele verschillen ten opzichte van het referentiescenario zijn gemiddeld lager dan de percentuele verschillen in Tabel 1 op basis van het neerslagtekort. Daarnaast zijn de absolute verschillen tussen de scenario's het grootst bij herhaaltijden tussen 1 en 10 jaar. Bij de hogere herhaaltijden liggen de indicatorwaarden weer dichterbij elkaar.

Figuur 5 Minimale 45-daagse neerslagsom als functie van de geschatte herhalingstijd voor de onderzochte KNMI'23-scenario's (gemiddeld over Nederland)



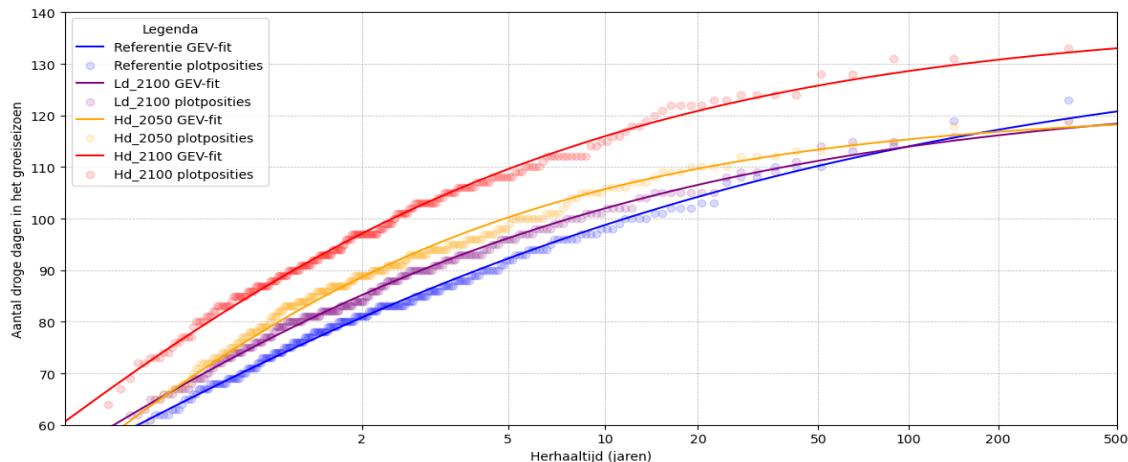
Tabel 2 Procentuele afname in de minimale 45-daagse neerslagsom in vergelijking met het referentiescenario

Herhaaltijd (jaren)	2050Hd	2050Hn	2100Hd	2100Hn	2100Ld	2100Ln
2	-10%	3%	-31%	-1%	-9%	-2%
5	-19%	-3%	-38%	-5%	-14%	-5%
10	-27%	-9%	-43%	-10%	-15%	-6%
25	-40%	-19%	-50%	-23%	-18%	-9%
50	-54%	-32%	-57%	-37%	-20%	-11%

3.2.3 AANTAL DROGE DAGEN

Figuur 6 toont de herhalingstijden van het aantal droge dagen per KNMI'23-scenario en Tabel 3 toont het aantal droge dagen per scenario. In alle scenario's neemt het aantal droge dagen toe ten opzichte van de huidige (referentie) situatie. De duidelijkste toename in droge dagen is zichtbaar voor het Hd2100-scenario. Daarnaast zien we dat het aantal droge dagen per klimaatscenario vooral verschilt voor herhaaltijden onder de 50 jaar.

Figuur 6 Aantal droge dagen als functie van de geschatte herhalingstijd voor de onderzochte KNMI'23-scenario's (gemiddeld over Nederland)

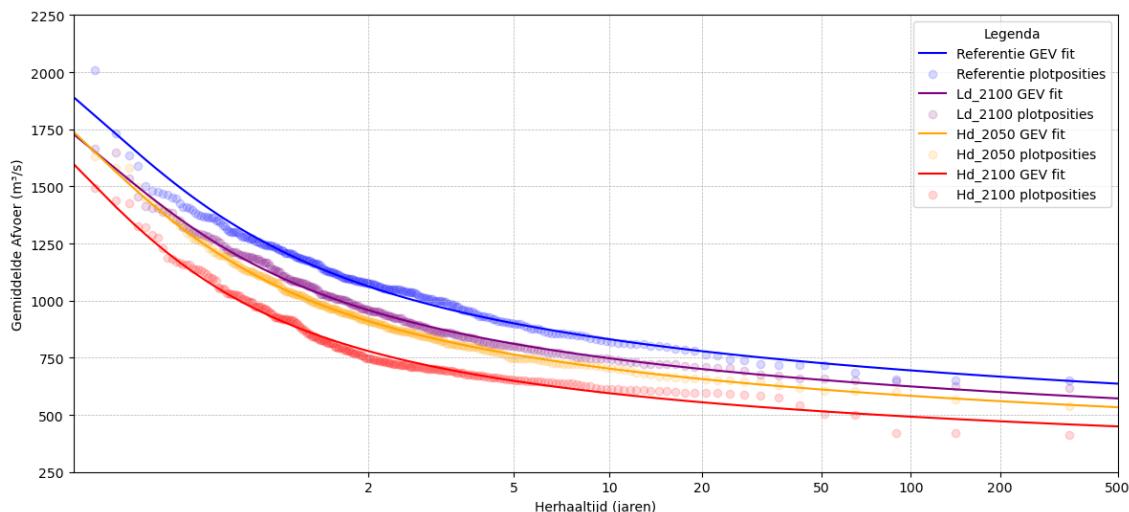


Tabel 3 Aantal droge dagen voor verschillende herhaaltijden

Herhaaltijd (jaren)	Referentie	2050Hd	2050Hn	2100Hd	2100Hn	2100Ld	2100Ln
2	81	89	84	97	87	85	83
5	92	100	96	110	100	96	94
10	99	106	103	116	107	102	100
25	106	111	109	122	115	108	107
50	110	113	113	126	120	111	111

3.2.4 MINIMALE ZEVENDAAGSE AFVOER RIJN BIJ LOBITH

Figuur 7 toont de herhaaltijden van de minimale zevenaarafvoer bij Lobith voor vier KNMI'23-scenario's en Tabel 4 toont het procentuele verschil ten opzichte van het referentiescenario. Deze resultaten laten zien dat we voor toekomstige klimaatscenario's rekening moeten houden met lagere Rijnafvoeren die vaker voor gaan komen. Dat is overeenkomstig met de resultaten van Deltares (2023). Ter illustratie: afvoeren die in de huidige situatie een herhaaltijd hebben van 20 jaar, hebben in het Hd2050-scenario een herhaaltijd van minder dan 5 jaar en in het Hd2100-scenario een herhaaltijd van minder dan 2 jaar.

Figuur 7 Minimale zevenaarafvoer als functie van de geschatte herhalingstijd voor de onderzochte KNMI'23-scenario's**Tabel 4 Procentuele afname van de zevenaarafvoer in vergelijking met het referentiescenario**

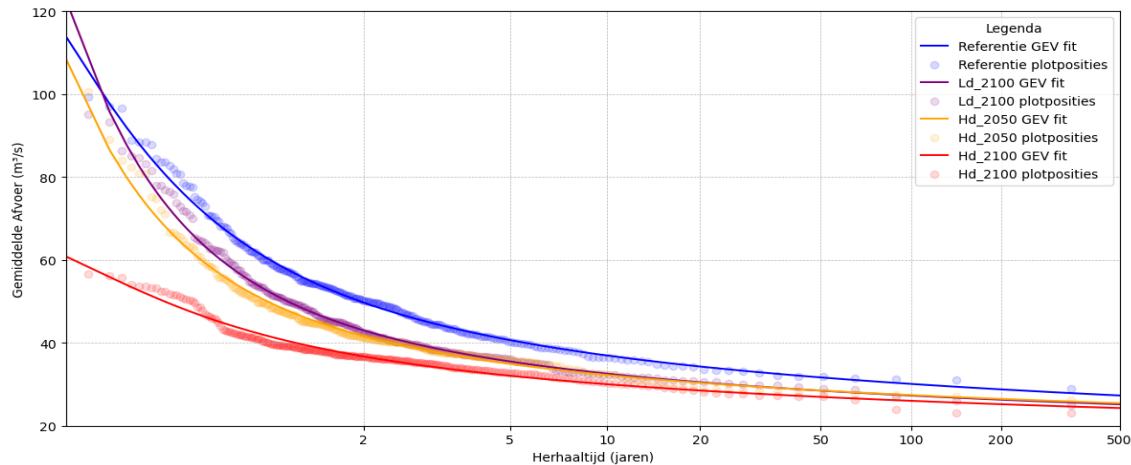
Herhaaltijd (jaren)	2050Hd	2050Hn	2100Hd	2100Hn	2100Ld	2100Ln
2	-14%	-5%	-27%	-14%	-10%	-6%
5	-15%	-7%	-28%	-17%	-10%	-6%
10	-15%	-9%	-28%	-18%	-10%	-7%
25	-16%	-10%	-29%	-19%	-10%	-7%
50	-16%	-11%	-29%	-20%	-10%	-7%

3.2.5 MINIMALE ZEVENDAAGSE AFVOER MAAS BIJ MONSIN

Figuur 8 toont de herhaaltijden van de minimale zevenaarafvoer bij Monsin per KNMI'23-scenario en Tabel 5 toont het procentuele verschil ten opzichte van het referentiescenario.

In lijn met de resultaten van de andere indicatoren laat ook de minimale Maasafvoer een dalende trend zien voor alle toekomstige klimaatscenario's. Daardoor komen afvoeren, die in de huidige situatie een herhaaltijd hebben van twintig jaar, in het Hd2050-scenario al vaker dan eens per tien jaar voor. Voor het Hd2100-scenario zal dit elke vijf jaar voorkomen. In het Hd2100-scenario zien we specifiek een grote afname van afvoer voor lage herhaaltijden.

Figuur 8 Minimale zevendaagse Maasafvoer als functie van de geschatte herhalingstijd voor de onderzochte KNMI'23-scenario's



Tabel 5 Procentuele afname in de zevendaagse Maasafvoer in vergelijking met het referentiescenario

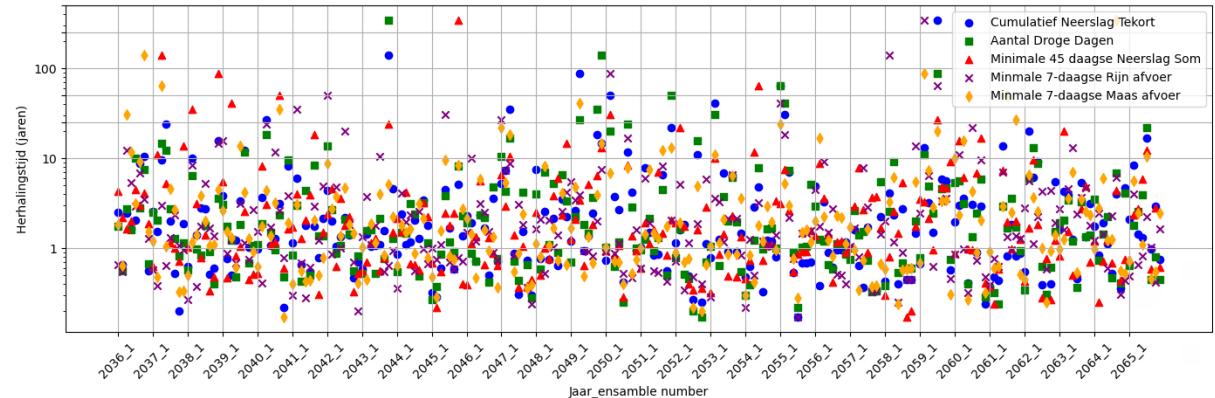
Herhaaltijd (jaren)	2050Hd	2050Hn	2100Hd	2100Hn	2100Ld	2100Ln
2	-16%	-7%	-27%	-15%	-12%	-6%
5	-14%	-8%	-21%	-13%	-13%	-7%
10	-14%	-9%	-18%	-13%	-13%	-7%
25	-13%	-10%	-15%	-12%	-14%	-8%
50	-13%	-10%	-12%	-11%	-14%	-9%

3.3 KARAKTERISTIEKE JAREN VOOR GECOMBINEERDE DROOGTEINDICATOREN

Voorgaande paragrafen beschreven de statistiek per indicator. In Hoofdstuk 2 is met de correlatieanalyse al een eerste inzicht gegeven in de relaties tussen de verschillende droogteindicatoren. In deze paragraaf beschrijven we de toegepaste methode waarmee we trachten karakteristieke jaren af te leiden waarin de verschillende droogteindicatoren worden gerepresenteerd. Figuur 9 toont ter illustratie de afgeleide herhalingstijden per droogteindicator voor alle 240 jaren (8 x 30-jaar) van het Hd2050-scenario. We gebruiken hier een vaste conventie voor het verwijzen naar de RACMO-jaren. Hiervoor gebruiken we een jaar-ensemble-combinatie. Het ensemblenummer verwijst naar één van de acht RACMO-reeksen per scenario.

Figuur 9 toont de spreiding in herhaaltijden per jaar. In deze paragraaf beoordelen we of en zo ja hoe de droogteindicatoren gecombineerd kunnen worden om tot een enkel karakteristiek jaar te komen die de statistiek van elke indicator nauwkeurig beschrijft.

Figuur 9 Visualisatie van de herhalingstijden per indicator voor het Hd2050-scenario



We voeren hierbij de volgende stappen uit:

1. We definiëren een aantal jaren met herhaaltijden die veel gebruikt worden door waterbeheerders als karakteristieke jaren. Dat zijn jaren met de volgende herhalingstijden: T2, T5, T10, T25, T50 en T100;
2. Per RACMO-jaar en voor iedere indicator berekenen we het verschil tussen de geselecteerde herhaaltijd (T_{target}) en de daadwerkelijk afgeleide statistiek ($T_{indicator}$). Hierbij gebruiken we de herhaaltijd op basis van de GEV-fit. We doen dat met een log-functie. Vervolgens sommeren we deze verschillen kwadratisch per jaar. We kunnen dat formaliseren met de volgende formule:

$$\text{Generiek karakteristiek jaar} = \text{Min} \sum_{k=0}^n \log \left(\frac{T_{indicator}}{T_{target}} \right)^2$$

3. Vervolgens bepalen we voor welk jaar uit de 240-jarige reeks het verschil minimaal is. Dat jaar beschrijft op basis van de gecombineerde droogteindicatoren de targetherhaaltijd het beste;
4. Tot slot beoordelen we of het resulterende karakteristieke jaar de statistiek per droogteindicator voldoende nauwkeurig beschrijft.

Tabel 6 toont de resultaten voor het referentiescenario. Voor lage herhalingstijden, zoals een T2 of T5, is het goed mogelijk om tot een enkel karakteristiek jaar te komen die de statistiek van de individuele indicatoren goed beschrijft. Het resulterende T2 karakteristiek jaar is dan 2014_6 en voor een T5 karakteristiek jaar is dat 2015_1. Hoewel de herhalingstijden van de individuele indicatoren niet exact overeenkomen met de gewenste herhalingstijden, zijn de afwijkingen klein.

Dat beeld verandert voor hogere herhalingstijden. De herhalingstijden van de individuele indicatoren wijkt substantieel af van de gewenste herhalingstijden groter dan T5. Er is dus een grote variabiliteit in statistiek van individuele droogteindicatoren gedurende jaren met droog weer.

Daarnaast valt op dat het bepalen van een karakteristiekjaar voor de gewenste herhalingstijden T10 en T25 leidt tot een identiek jaar (2017_3). Ditzelfde zien we voor de herhaaltijden T50 en T100 met als identiek karakteristiek jaar (1991_1). Ook wanneer de Maas- en Rijnaafvoer indicatoren uit de analyse worden gehaald blijkt het afleiden van karakteristieke jaren voor gecombineerde droogteindicatoren bij hogere herhaaltijden lastig.

Tabel 6 Berekende herhalingstijden voor gecombineerde droogteindicatoren voor het referentiescenario

Referentiescenario	Target Herhaaltijd	Karakteristiek Jaar	Herhaaltijd van individuele indicatoren				
			Maximaal cumulatief neerslagtekort	Minimale 45-daagse neerslagsom	Aantal droge dagen	Afvoer Maas	Afvoer Rijn
	2	2014_6	2.2	2	1.6	2	1.9
	5	2002_5	3.3	3.1	4.9	4.9	4
	10	2017_3	7.7	14.9	11.6	10.8	14.3
	25	2017_3	7.7	14.9	11.6	10.8	14.3
	50	1991_1	25.2	125.6	29.9	12.1	296.8
	100	1991_1	25.2	125.6	29.9	12.1	296.8

Deze observaties zijn vergelijkbaar voor de andere klimaatscenario's. Ter illustratie tonen we in de berekende herhalingstijden en karakteristieke jaren voor het Hd2050-scenario. Ook hier zijn vergelijkbare constateringen te maken. Voor lage herhalingstijden is het mogelijk om een gezamenlijk karakteristiek jaar te selecteren. Voor hoge herhalingstijden is dat niet het geval.

Tabel 7 Berekende herhalingstijden voor gecombineerde droogteindicatoren voor het Hd2050-scenario

Hd2050-scenario		Herhaaltijd van individuele indicatoren				
Target Herhaaltijd	Karakteristiek Jaar	Maximaal cumulatief neerslagtekort	Minimale 45-daagse neerslagsom	Aantal droge dagen	Afvoer Maas	Afvoer Rijn
2	2042_3	1.7	2.5	2	2	1.8
5	2053_8	4.3	2.5	3.6	4.2	4.4
10	2050_6	8.3	14	10.5	14.9	17
25	2056_1	26.8	7.6	34	43	19.3
50	2056_1	26.8	7.6	34	43	19.3
100	2059_2	450.9	18.4	44.7	14.4	43.6

3.4 ONZEKERHEID VAN DE GEV-FITS

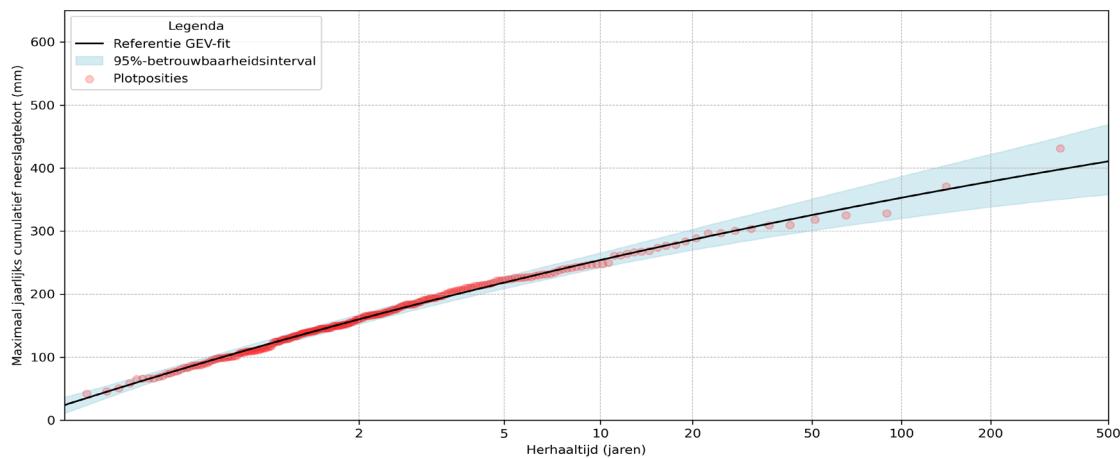
De afgeleide statistiek voor de verschillende droogteindicatoren bevat onzekerheden. Dit is met name het geval bij de hoge herhalingstijden waarvoor weinig observaties beschikbaar zijn. Daarnaast bevatten de 240-jarige RACMO-reeksen identieke jaren. Dit wordt veroorzaakt door de methode die het KNMI heeft toegepast voor het samenstellen van de acht maal dertigjarige RACMO-reeksen. Een uitgebreide beschrijving van deze methode is terug te vinden in KNMI (2023). Identieke jaren in de RACMO-reeksen veroorzaken karakteristieke jaren met identieke waarden voor de droogteindicatoren. Dit vergroot de onzekerheid in de afgeleide statistiek.

Om meer inzicht te krijgen in de aanwezige onzekerheid is de betrouwbaarheid van de afgeleide statistiek in kaart gebracht door middel van bootstrappen. Hierbij wordt de GEV-kansverdeling gefit op basis van 240 gegevenspunten voor elk beschikbaar jaar uit RACMO. Bij bootstrappen wordt de fit 1000 maal uitgevoerd door elke keer 240 willekeurige punten uit de reeks van 240 gegevenspunten te trekken. Hierbij kunnen dezelfde gegevenspunten meerdere malen getrokken worden. Het resultaat toont hoe de statistiek verandert bij het niet gebruiken van een willekeurig aantal gegevenspunten voor het fitten.

Figuur 10 toont voor het huidige klimaat de plotposities zoals deze zijn afgeleid in Hoofdstuk 3 en de gefitte GEV-kansverdeling. Ook is het 95%-betrouwbaarheidsinterval weergegeven op basis van de bootstrappingmethode. De resultaten voor de andere klimaatscenario's zijn vergelijkbaar en zijn weergegeven in bijlage C.

De 95%-betrouwbaarheidsinterval represeneert de onzekerheid in de statistiek. Het is zichtbaar dat de bandbreedte bij hoge herhalingstijden breder wordt, de statistiek is hier onzekerder. Zo is de onzekerheid bij een T5 ongeveer 20 mm en bij een T100 ruim 80 mm.

Figuur 10 Plotposities, GEV-kansverdeling en het 95%-betrouwbaarheidsinterval voor de statistiek van het maximaal cumulatief neerslagtekort in het huidige klimaat



3.5 SYNTHESE

In dit hoofdstuk hebben we antwoord gegeven op de onderzoeksraag: **kan een enkel karakteristiek jaar geselecteerd worden voor de gecombineerde droogteindicatoren?**

We hebben daarvoor eerst per indicator de statistiek afgeleid. Daaruit blijkt dat alle droogte-indicatoren tonen dat het droger gaat worden in de toekomst en dat de kans op droog weer toe gaat nemen. Het is daarbij goed mogelijk dat een droog jaar dat in de huidige situatie gemiddeld eens per twintig jaar voorkomt in de toekomst gemiddeld eens in de vijf (rond 2050) tot twee jaar (rond 2100) gaat voorkomen. Van de verschillende indicatoren laat het maximaal cumulatief neerslagtekort de grootste percentuele verschillen zien.

Vervolgens is beoordeeld of er per scenario een enkel karakteristiek jaar kan worden geselecteerd die de statistiek van de individuele indicatoren voldoende nauwkeurig beschrijft. Dat is mogelijk tot herhalingstijden van ongeveer T5. Voor hogere herhalingstijden leidt de selectie van een enkel karakteristiek jaar tot grote afwijkingen in de statistiek van individuele indicatoren.

We concluderen dat het selecteren van een enkel karakteristiek jaar die de statistiek van individuele droogteindicatoren beschrijft niet mogelijk is.

Op basis van deze conclusie is in samenspraak met de STOWA-begeleidingsgroep besloten om karakteristieke jaren op te leveren op basis van het maximaal cumulatief neerslagtekort. Deze indicator wordt het meest gebruikt door waterbeheerders in droogtestudies. Om ook inzicht te geven in de herhaaltijden van de andere indicatoren, worden de indicatorwaarden en herhaaltijden als aanvullende resultaten meegeleverd. Zo krijgen gebruikers van de karakteristieke jaren wel inzicht in de statistische verdelingen van andere droogteindicatoren.

Uit voorliggende analyse blijkt dat de afgeleide statistiek onzekerheden bevat, zeker in het bereik van hoge herhalingstijden waarvoor weinig observaties beschikbaar zijn.

Tot slot merken we op dat in deze analyse de ruimtelijke verschillen binnen Nederland niet in acht zijn genomen. Het volgende hoofdstuk zal ingaan op deze ruimtelijke verschillen.

4

RUIMTELIJKE VERSCHILLEN IN DE DROOGTESTATISTIEK

4.1 AANPAK

In het voorgaande hoofdstuk is de droogtestatistiek afgeleid per indicator voor een gemiddelde van Nederland. In dit hoofdstuk gaan we in op de ruimtelijke verschillen in Nederland per droogteindicator en beantwoorden de onderzoeksraag: **kan hetzelfde karakteristieke jaar geselecteerd worden voor heel Nederland?** We doen dat niet voor de minimale zevendaagse Rijn- en Maasafvoeren. Deze indicatoren beschrijven immers de afvoer op specifieke locaties in Nederland.

We herhalen daarbij de methodiek om de indicatoren en statistiek af te leiden zoals beschreven in Paragraaf 3.1 en voeren deze per pixel van het RACMO-raster uit. De statistiek is in dit hoofdstuk afgeleid op basis van plotposities en niet op basis van fits. Dat laatste was niet meer mogelijk binnen het tijdspad van dit onderzoek. We vergelijken de ruimtelijke verschillen met de resultaten uit STOWA (2023) over ruimtelijke variatie in neerslagmetingen om zo de nauwkeurigheid in te schatten. Vervolgens beoordelen we in hoeverre de statistiek ruimtelijk varieert voor een aantal veelgebruikte herhalingstijden.

4.2 RESULTATEN

In de volgende paragrafen is de ruimtelijke variatie gevisualiseerd voor de klimaatscenario's per droogteindicatoren.

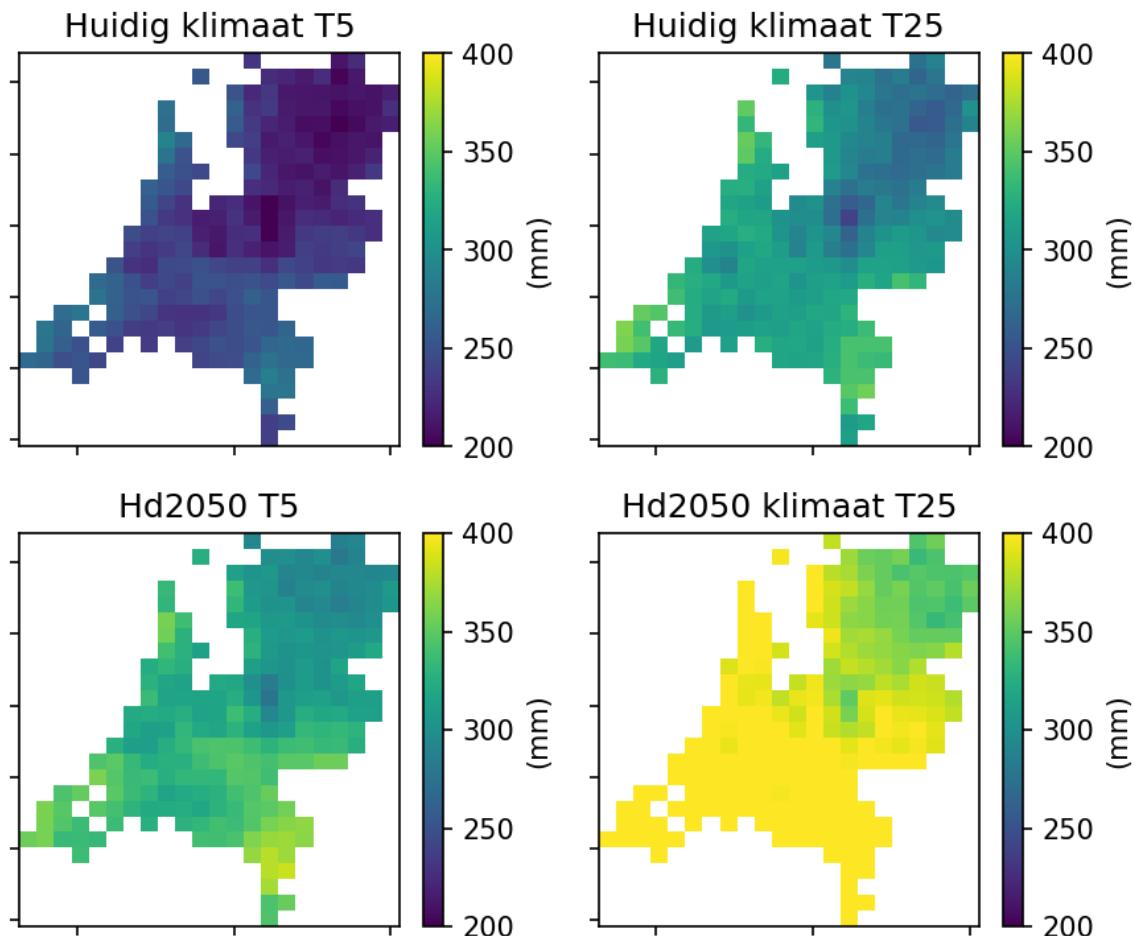
4.2.1 HET MAXIMAAL CUMULATIEF NEERSLAGTEKORT

Figuur 11 toont de ruimtelijke variatie in het maximaal cumulatief neerslagtekort in het huidige klimaat en voor het Hd2050-scenario bij herhalingstijden van vijf en vijfentwintig jaar. De kaarten tonen dat er duidelijke ruimtelijke verschillen zijn in het maximale cumulatieve neerslagtekort voor de getoonde scenario's en herhalingstijden:

- Er is een noord-zuideffect zichtbaar. Gebieden in het noorden kennen lagere neerslagtekorten dan zuidelijke gebieden bij dezelfde herhalingstijden. Dat betekent dat de kans op hogere neerslagtekorten gemiddeld gezien groter is in het zuiden van het land. Hoger gelegen delen van Nederland, zoals de Utrechtse Heuvelrug, de Veluwe en het Limburgse Heuvelland kennen bij vergelijkbare herhalingstijden lagere neerslagtekorten dan in de rest van het land. Dit wordt mogelijk veroorzaakt door orografische effecten waarbij hoogteverschillen effect hebben op de verdeling van neerslag. Ook in het noordoosten van het land zien we lagere neerslagtekorten dan in de rest van het land;
- Hoewel de neerslagtekorten in absolute grootte sterk toenemen in de toekomstscenario's, veranderen de ruimtelijke patronen nauwelijks. Dit beeld is ook zichtbaar voor de andere klimaatscenario's;

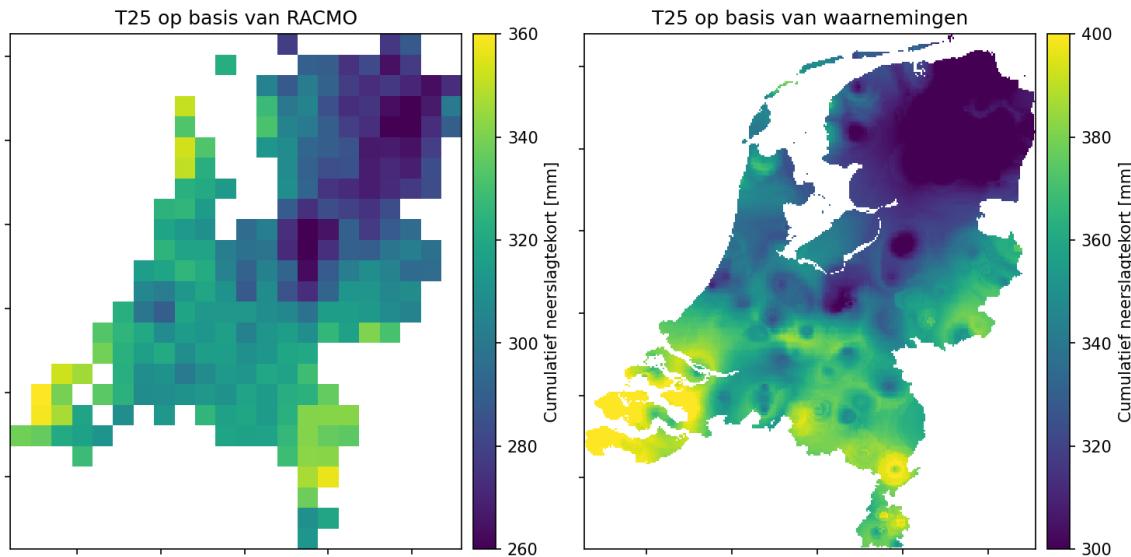
- De ruimtelijke verschillen in maximaal cumulatief neerslagtekort kunnen groot zijn. Bijvoorbeeld, op de Veluwe heeft een T5 Hd2050 situatie een maximaal cumulatief neerslagtekort van ongeveer 280 mm. Voor hetzelfde scenario en met een gelijke herhaaltijd zien we in Limburg een neerslagtekort van ongeveer 375 mm. Dit is een verschil van ruim 30%.

Figuur 11 Ruimtelijke variatie van het maximaal cumulatief neerslagtekort in het huidige klimaat en in het Hd2050-scenario bij herhalingstijden van vijf en vijfentwintig jaar. Het kleurverschil per paneel toont steeds een verschil van 200 mm



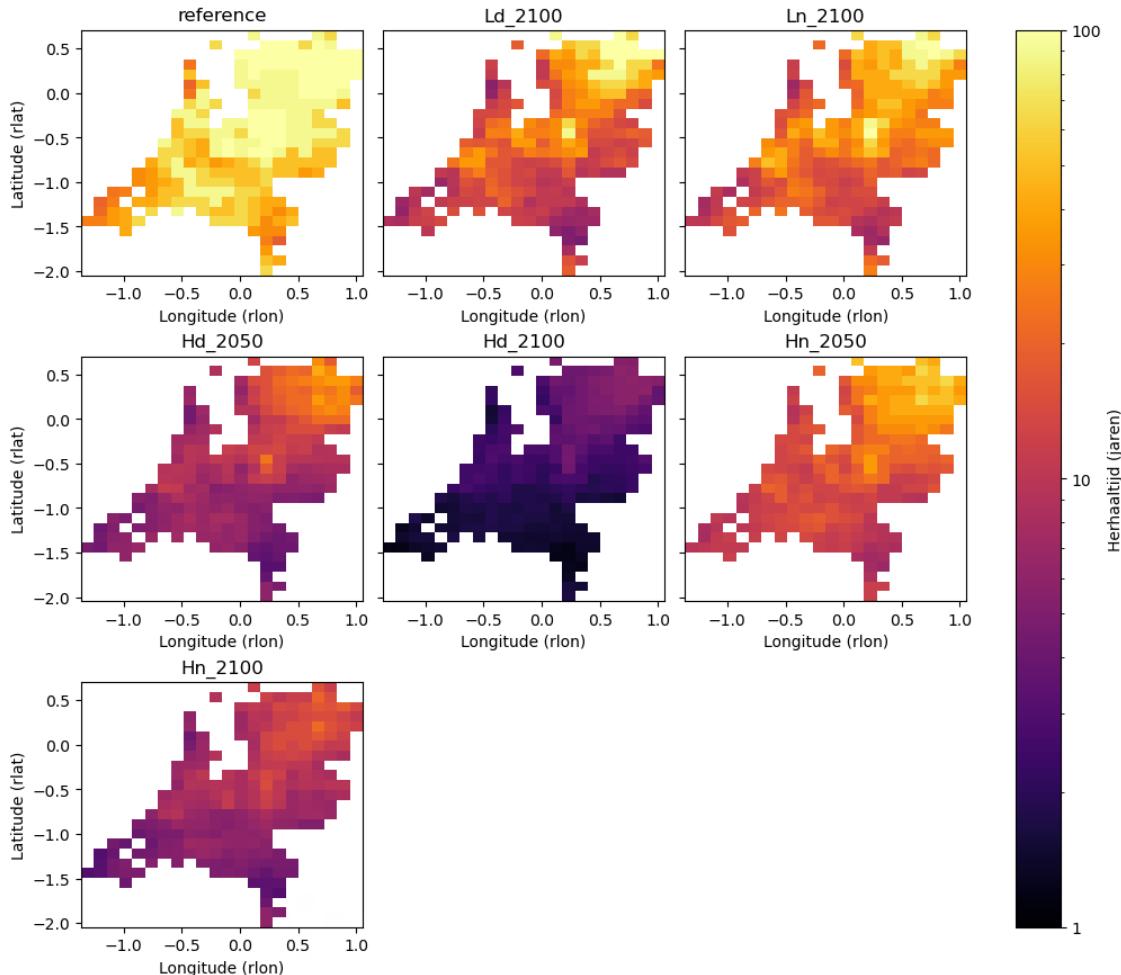
In STOWA (2023) is op basis van gedetrendede neerslag- en verdampingsobservaties statistiek van het maximaal jaarlijks cumulatief neerslagtekort afgeleid. Dat maakt het mogelijk om de RACMO-resultaten te vergelijken met waarnemingen. Figuur 12 toont deze vergelijking voor een herhalingstijd van vijfentwintig jaar.

Figuur 12 Ruimtelijke variatie van het maximale cumulatieve neerslagtekort met een herhalingstijd van 25 jaar voor de huidige situatie op basis van RACMO (links) en waarnemingen, afkomstig uit STOWA (2023) (rechts). Ter verduidelijking van de ruimtelijke verschillen wijken de kleurschalen van beide panelen licht af



Het figuur toont dat de ruimtelijke verdeling van de statistiek voor het maximaal cumulatief neerslagtekort goed overeenkomt tussen de RACMO-gegevens en de observaties. Beide panelen van de figuur laten zien dat het noorden van Nederland en de Veluwe minder droog zijn dan gebieden in Overijssel, Limburg en Zeeland. De gelijkenissen in ruimtelijke patronen tussen de RAMCO-reeksen en de metingen ondersteunt de aanname dat in de RACMO-data de ruimtelijke variatie representatief is voor de realiteit.

Figuur 13 toont in hoeverre herhalingstijden ruimtelijk variëren in verschillende klimaatscenario's voor een maximaal cumulatief neerslagtekort van 350 mm. Ook hier is een grote ruimtelijke variatie zichtbaar. Ter illustratie geven we een voorbeeld voor het referentiescenario. In het noordoosten van het land komt een neerslagtekort van 350 mm nauwelijks voor en kent een hoge herhalingstijd van meer dan 100 jaar. Dat beeld is anders langs de kust en in het zuiden. Daar kan een dergelijk maximaal cumulatief neerslagtekort veel vaker voorkomen: gemiddeld rond de dertig jaar. Een ander voorbeeld is zichtbaar voor het Ld2100-scenario. Een neerslagtekort van 350 mm heeft dan in Zeeland een herhalingstijd van 7 tot 11 jaar. In het noorden van Groningen zijn voor een identiek neerslagtekort herhaaltijden afgeleid tussen de 70 en 100 jaar. Verder benadrukt Figuur 13 opnieuw dat het veranderde klimaat grote gevolgen heeft voor het optreden van meteorologische droogte in Nederland. Een cumulatief neerslagtekort van 350 mm is in het referentiescenario overal in Nederland een extreem droge situatie met herhaaltijden van 30 tot 100 jaar. In de Hd2100 situatie komt ditzelfde neerslagtekort overal in Nederland voor met een herhaaltijd van 1-5 jaar.

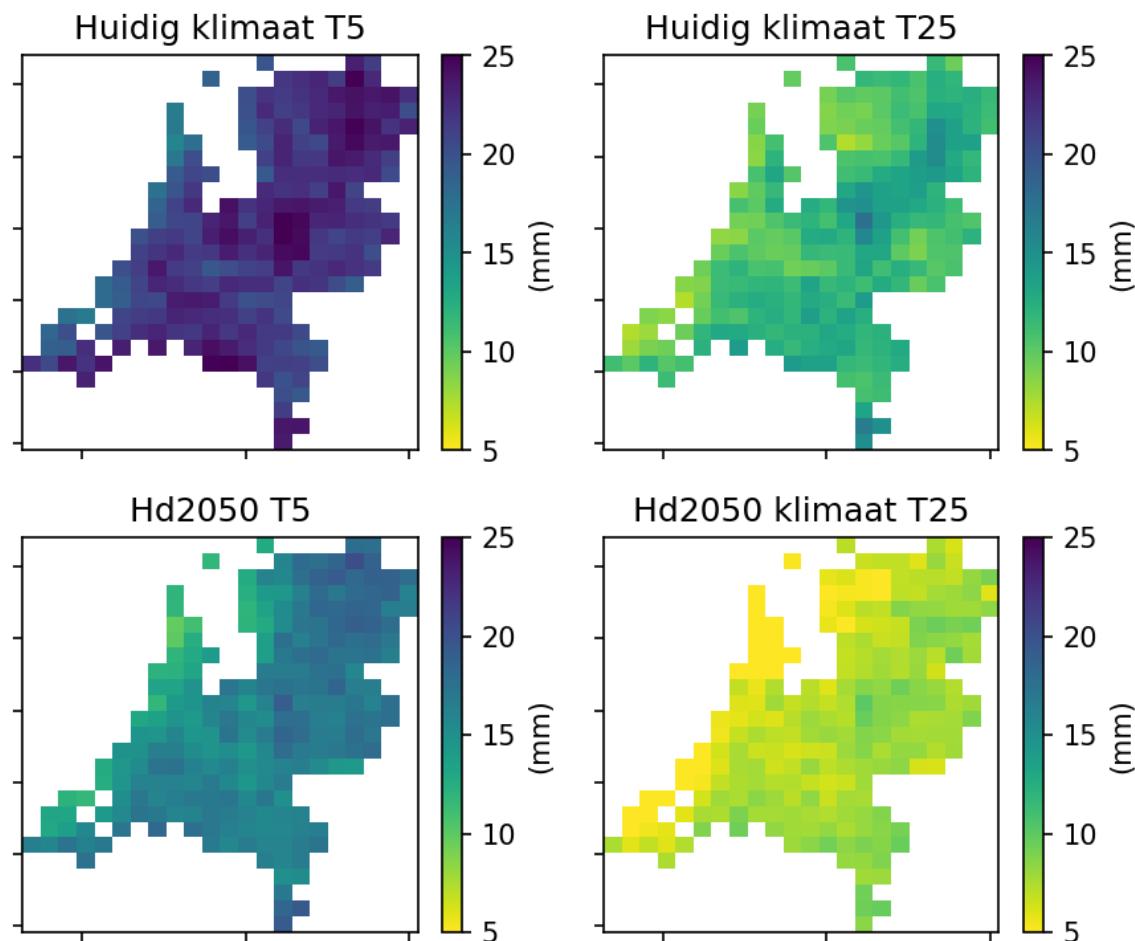
Figuur 13 Ruimtelijke variatie in herhalingstijd per klimaatscenario bij een maximaal cumulatief neerslagtekort van 350 mm

4.2.2 DE MINIMALE 45-DAAGSE NEERSLAGSOM

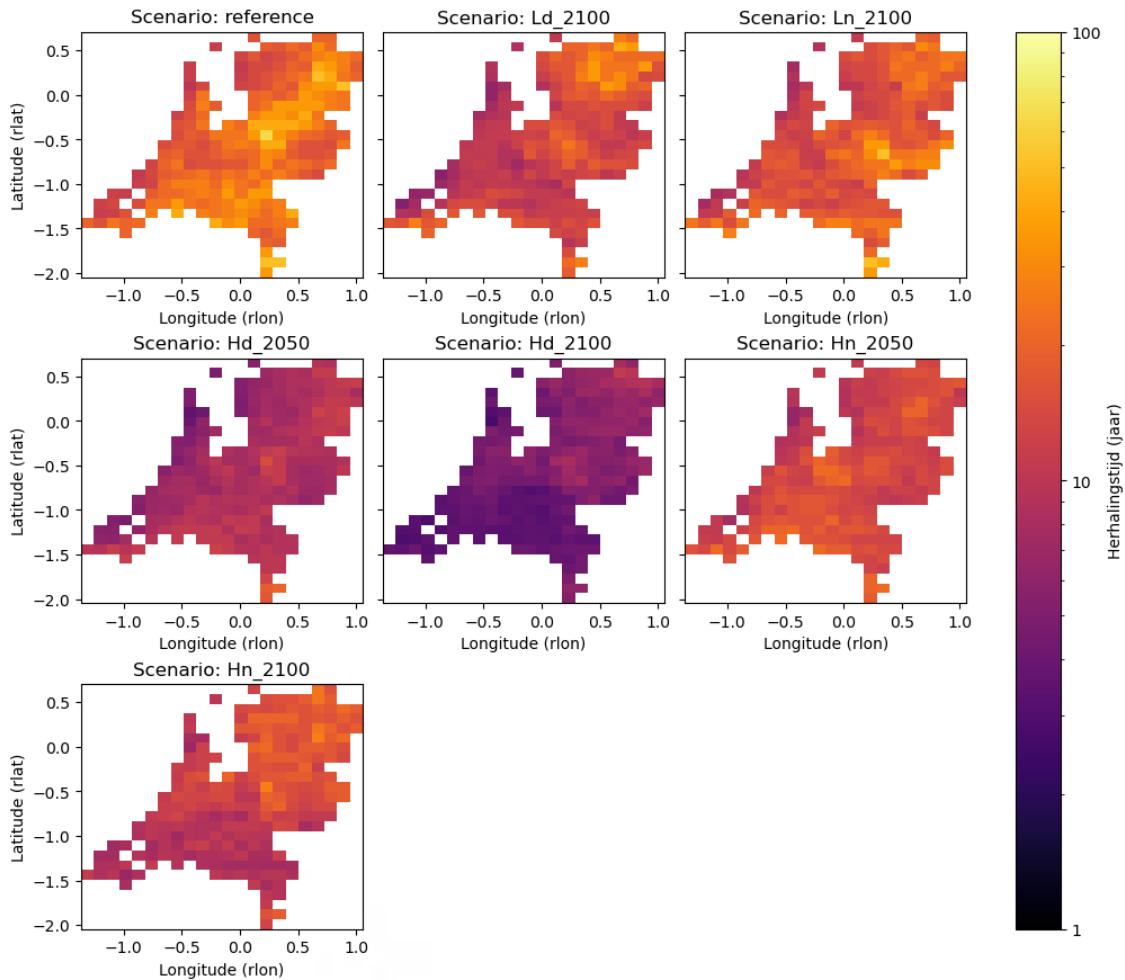
Figuur 14 toont de ruimtelijke variatie in de minimale 45-daagse neerslagsom in het huidige klimaat en voor het Hd2050-scenario bij herhalingstijden van vijf en vijfentwintig jaar. We observeren dat:

- De ruimtelijke variatie is kleiner dan voor het maximaal cumulatief neerslagtekort. Er is een kusteffect zichtbaar. De kustgebieden van Nederland kent lagere 45-daagse neerslagsommen voor een specifieke herhaaltijd dan de meer landinwaarts gelegen gebieden. Daarnaast is opnieuw zichtbaar dat hogergelegen delen, zoals de Veluwe, meteorologisch minder droog is in vergelijken met andere gebieden;
- De ruimtelijke variatie varieert nauwelijks per klimaatscenario;
- De ruimtelijke verschillen vertonen procentueel gezien redelijk grote verschillen. Zo kent de kust van Noord-Holland in een T5-situatie in het huidige klimaat een minimale 45-daagse neerslagsom van ongeveer 17 mm. Op de Veluwe en in Zuid-Brabant stijgen de minimale 45-daagse neerslagsommen naar ongeveer 24 mm. Dit is een verschil van ongeveer 40%.

Figuur 14 Ruimtelijke variatie van de minimale 45-daagse neerslagsom in het huidige klimaat en in het Hd2050-scenario bij herhalingstijden van vijf en vijfentwintig jaar. Het kleurverschil per paneel toont steeds een verschil van 20 mm



Figuur 15 visualiseert de herhalingstijden per klimaatscenario voor een minimale 45-daagse neerslag som van 12 mm. In het figuur zijn opnieuw ruimtelijke verschillen zichtbaar in herhalingstijd. Wel zijn deze verschillen minder groot dan bij het maximaal cumulatief neerslagtekort in Figuur 13.

Figuur 15 Ruimtelijke variatie in herhalingstijd per klimaatscenario bij een minimale 45-dagse neerslagsom van 12 mm

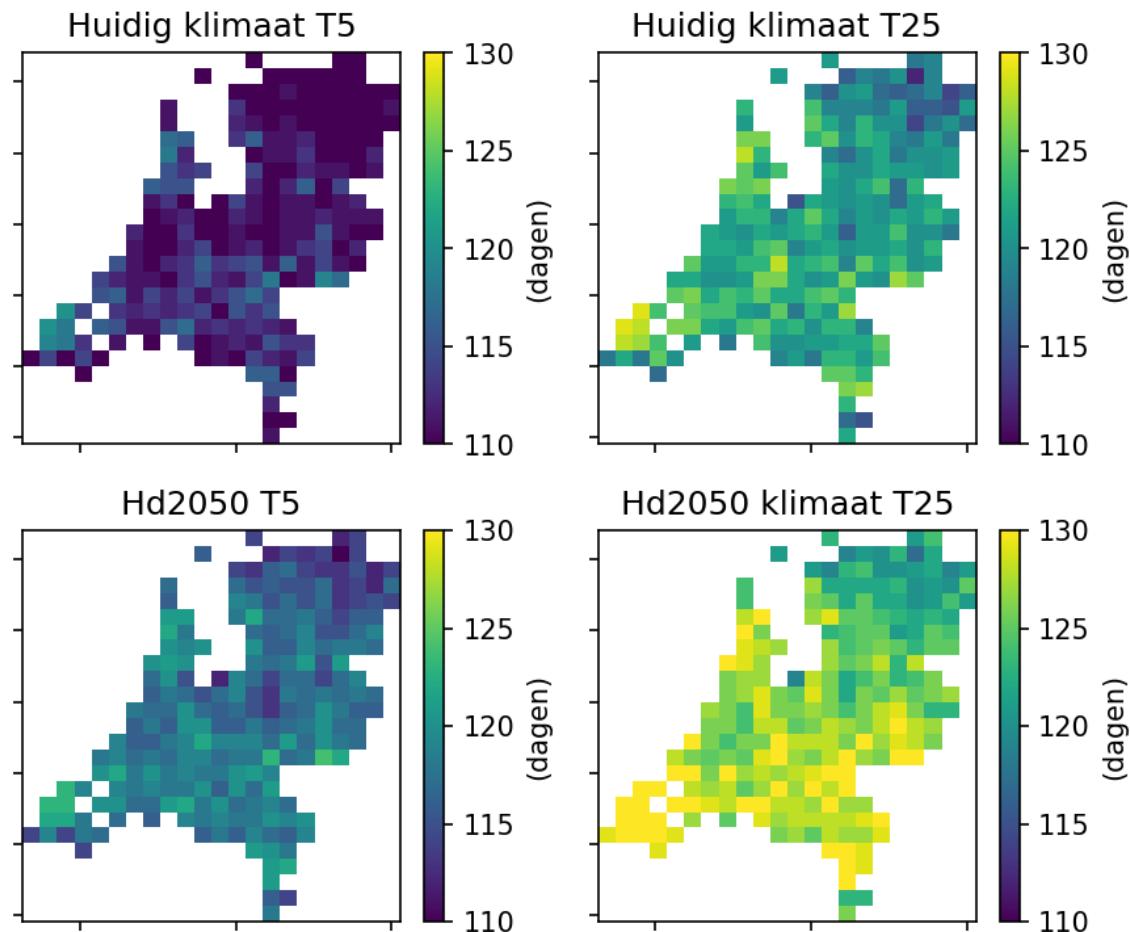
4.2.3 AANTAL DROGE DAGEN

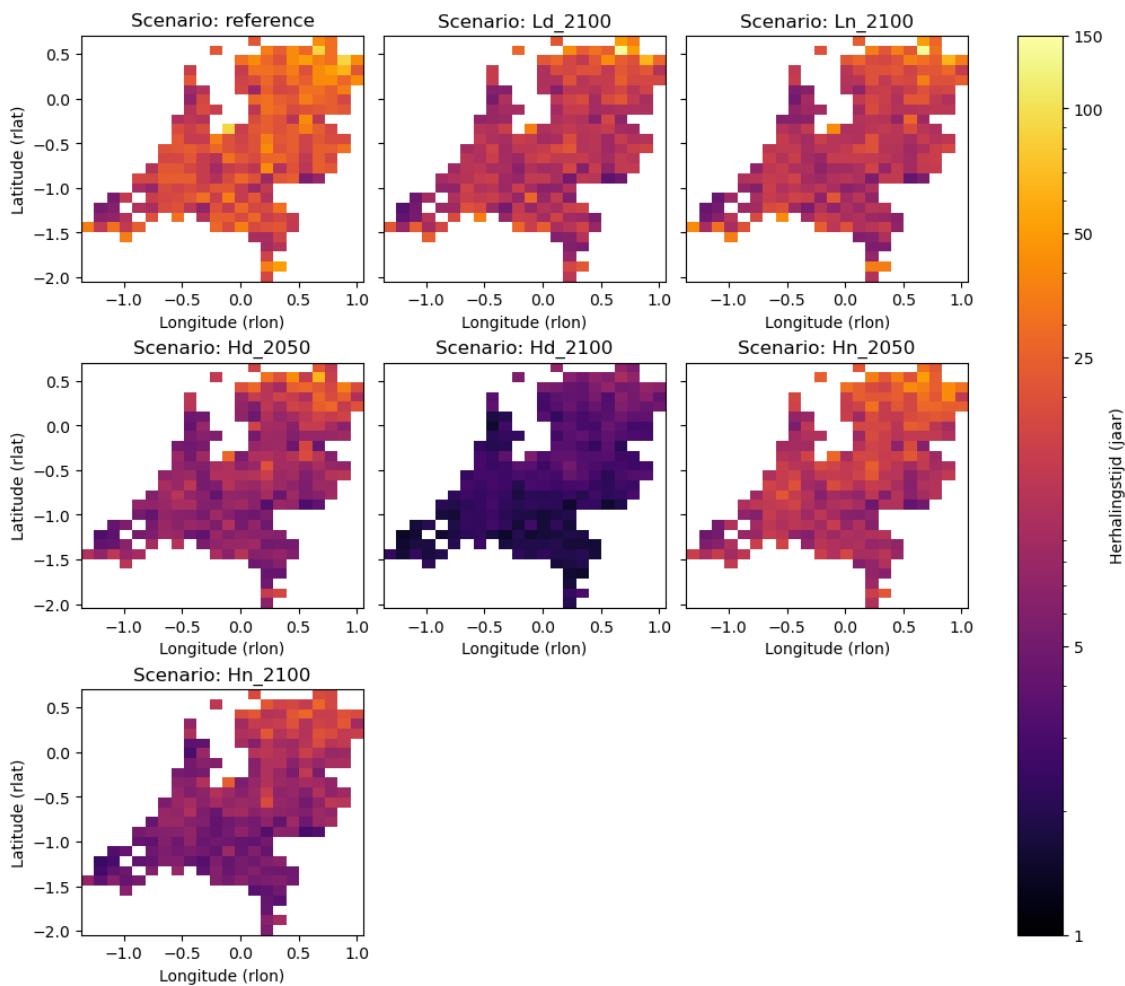
Figuur 16 toont de ruimtelijke variatie in het aantal droge dagen in het huidige klimaat en voor het Hd2050-scenario bij herhalingstijden van vijf en vijfentwintig jaar. We observeren dat:

- Er zijn geen duidelijke ruimtelijke patronen zichtbaar. Mogelijk is een noord-zuideffect te observeren;
- De ruimtelijke variatie varieert nauwelijks per klimaatscenario;

Datzelfde beeld is ook zichtbaar als we de variatie in herhalingstijd per klimaatscenario voor een aantal droge dagen van 120 beschouwen, zie Figuur 17.

Figuur 16 Ruimtelijke variatie van het aantal droge dagen in het huidige klimaat en in het Hd2050-scenario bij herhalingstijden van vijf en vijfentwintig jaar. Het kleurverschil per paneel toont een verschil van 20 dagen



Figuur 17 Ruimtelijke variatie in herhalingstijd per klimaatscenario bij 120 droge dagen

4.3 SYNTHESE

In dit hoofdstuk geven we antwoord op de onderzoeksvraag: **kan hetzelfde karakteristieke jaar geselecteerd worden voor heel Nederland?** Om die vraag te beantwoorden is voor de indicatoren maximaal cumulatief neerslagtekort, minimale 45-daagse neerslagsom en het aantal droge dagen ruimtelijk verdeelde statistiek afgeleid.

We observeren het volgende:

- De ruimtelijke verschillen zijn met name groot voor het maximaal cumulatief neerslagtekort en in mindere mate voor de minimale 45-daagse neerslagsom en in nog mindere mate voor het aantal droge dagen. De verschillen in maximaal cumulatief neerslagtekort kunnen oplopen tot 30%-40%.
- De ruimtelijke variatie van de droogteindicatoren verandert nauwelijks per klimaatscenario. Als gevolg kan met redelijke zekerheid worden geconstateerd dat de ruimtelijke variaties niet toe te schrijven zijn aan statistische ruis.

We concluderen daarom dat karakteristieke jaren ruimtelijk verdeeld afgeleid moeten worden als een regio gebruik wil maken van de regionaal geldende statistiek.

Op basis van deze resultaten is in samenspraak met de STOWA-begeleidingsgroep de keuze gemaakt om de karakteristieke jaren af te leiden per beheergebied van waterschappen. Op deze manier heeft elk waterschap de beschikking over de regionaal correcte statistische informatie. Een nadeel van deze keuze is dat vergelijkingen tussen waterschappen op basis van de karakteristieke jaren niet eenduidig zijn.

5

AFLEIDEN DERTIGJARIGE REEKSEN

5.1 INLEIDING

Elk KNMI'23-scenario bestaat uit 240 jaar. Deze reeksen kunnen in veel gevallen praktisch gezien niet worden doorgerekend met hydraulische en grondwaterstromingsmodellen, omdat deze modellen erg rekenintensief zijn. Het wordt door waterschappen wel haalbaar geacht om een reeks van dertig jaar door te rekenen met deze modellen, exclusief een initialisatieperiode van vijf jaar. Doel van dit hoofdstuk is om te beschrijven hoe voor elk scenario de meest representatieve 30 jaar te selecteren.

5.2 AANPAK

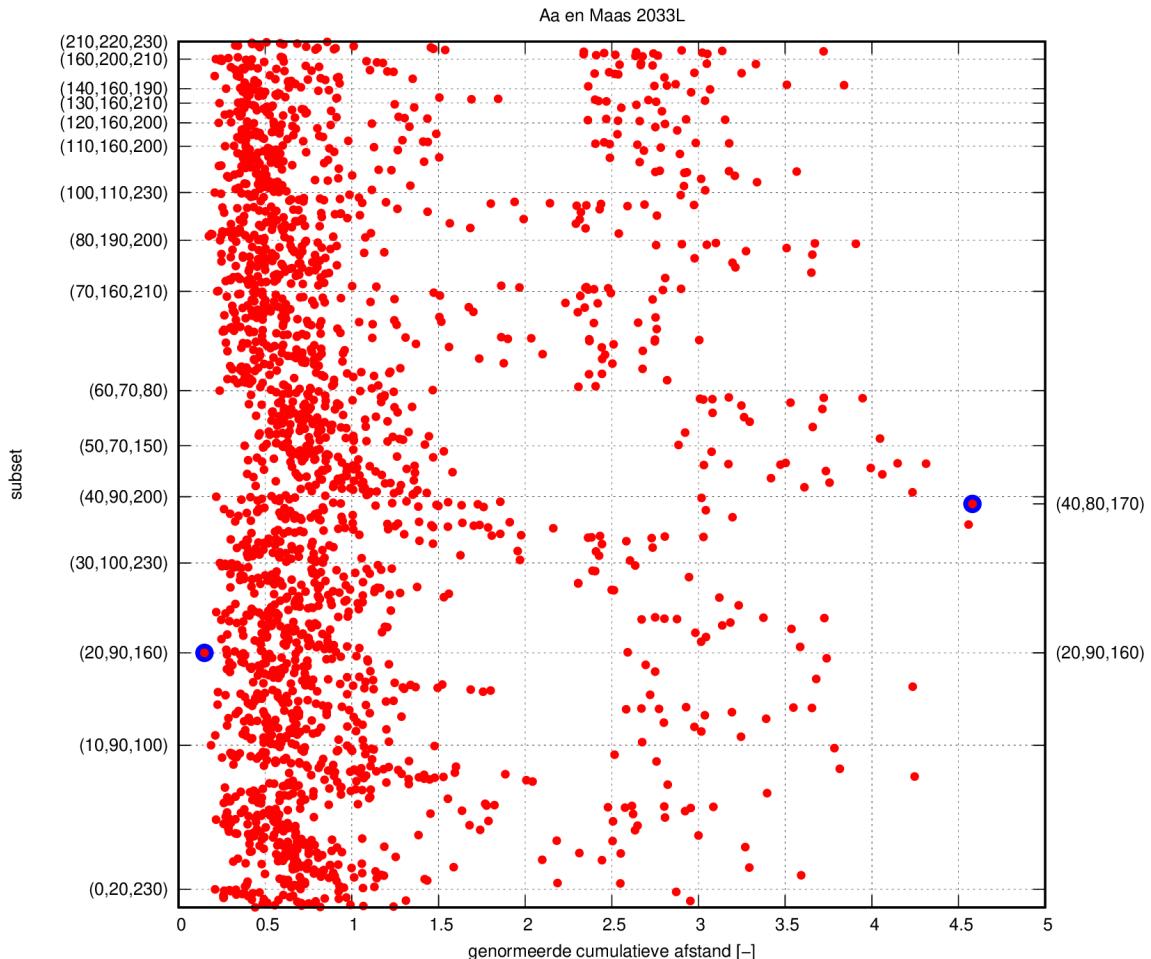
Doel is om voor elk klimaatscenario (en voor de referentiereeks) die deelreeks van 30 jaar te selecteren die zo goed mogelijk de gehele 240-jarige reeks represeneert. Daartoe dienen de volgende overwegingen:

- Elke willekeurige deelreeks van 30 jaar zal voor de gemiddelde grootheden niet noemenswaardig afwijken van het gemiddelde van de 240 jaar. Mogelijke verschillen zullen zich vooral manifesteren in de extremen. Daarbij is voor droogte het maximale cumulatieve neerslagtekort de belangrijkste grootheid. Daarom zal de analyse zich richten op de extremen van het maximale neerslagtekort over het groeiseizoen. Dit is consistent met de methodiek voor de karakteristieke jaren;
- De analyse wordt (net als voor de karakteristieke jaren) gedaan voor elk van de 21 waterschappen apart;
- Elk waterschap is in meer of mindere mate afhankelijk van de afvoer van de Rijn en/of Maas. Daarom wordt, parallel aan het neerslagtekort, ook de minimale zevendaagse afvoer van de Rijn en/of Maas meegenomen. De afhankelijkheid van de rivierafvoer(en) per waterschap is weergegeven in bijlage A.

Het woord kromming is ontleend aan de Gumbelplot, zie Figuur 18: een visuele weergave van de geordende maxima, waarbij de Gumbelverdeling met vormparameter 0 gerepresenteerd wordt als een rechte lijn, en de GEV-verdeling een kromming vertoont, waarbij de mate van kromming afhangt van de vormparameter.

De aanpak is als volgt. Fit een GEV-verdeling aan een specifiek scenario, gebruik makend van de GEV-vormparameter die is afgeleid door een enkele fit door alle gegevenspunten van alle klimaatscenario's. Doel is om die reeks te selecteren die zich qua extremen het dichtst bij deze verdeling bevindt, zie Figuur 19. Anders geformuleerd: er wordt gezocht naar de reeks die zo goed mogelijk één dertigjarig extreem bevat, twee vijftienjarige extremen, drie tienjarige extremen, vijf zesjarige extremen etc.

Figuur 18 Cumulatieve afstanden voor de 2024 combinaties om een dertigjarige set uit de 240-jarige set te construeren met blokken van tien jaar voor het 2033L-scenario voor Waterschap Aa en Maas. De afstanden zijn genormaliseerd met de gemiddelde waarde. De beste set (20, 90, 160) en de minst optimale set (40, 80, 170) zijn blauw omcirkeld. Combinatie (20, 90, 160) betekent dat de jaren 20 t/m 29, 90 t/m 99 en 160 t/m 169 tot de beste dertigjarige reeks leiden



Als maat voor hoe dicht een extreem zich bij de GEV-verdeling bevindt, wordt bepaald wat – volgens de GEV-verdeling – de herhaaltijd is van het extreem. Ook bepalen we de herhaaltijd T_{pp} van het extreem op basis van de plotpositie (volgens Benard en Bos-Levenbach, zie Hoofdstuk 3). Als deze ver afwijkt van de plotpositie van het extreem, dan wordt een penalty aan het extreem toegekend die gelijk is aan:

$$\text{penalty} = (\log(T_{GEV}) - \log(T_{pp}))^2$$

Met daarin T_{GEV} de herhaaltijd volgens de GEV-fit en T_{pp} de herhaaltijd van de plotpositie. Op een Gumbelplot komt dit overeen met het kwadraat van de horizontale afstand tussen het extreem en de GEV-fit, zie Figuur 18. Door deze afstand in de horizontale richting te nemen, ofwel de verhouding van twee herhaaltijden, wordt een grootheid gebruikt die niet alleen dimensieloos is, maar ook genormaliseerd. Hierdoor is deze maat vergelijkbaar voor verschillende grootheden, reekslengetes, etc. Dat geldt niet voor de afstand in de verticale richting, bijvoorbeeld het neerslagtekort of de rivieraafvoer. De afstand in de horizontale richting van het meest extreme geval heeft ook een eenduidige betekenis: de reciproke van de afstand is een maat voor de kans dat het extreem in de gegeven reekslengete aangetroffen wordt.

Daarmee is de cumulatieve penalty Δ te bepalen door:

$$\Delta = \sum_{i=1,h} (x_{i,N} - \tilde{x}_{i,N})^2 + \sum_{r=1,R} (x_{i,r} - \tilde{x}_{i,r})^2$$

waarin er gesommeerd wordt over $h = 30$ hoogste waarden van het neerslagtekort N en de rivier(en) R .

Voor de minimale rivieraafvoeren wordt de GEV-fit toegepast op de logaritme van de afvoerwaarde, omdat dit in een betere fit resulteert.

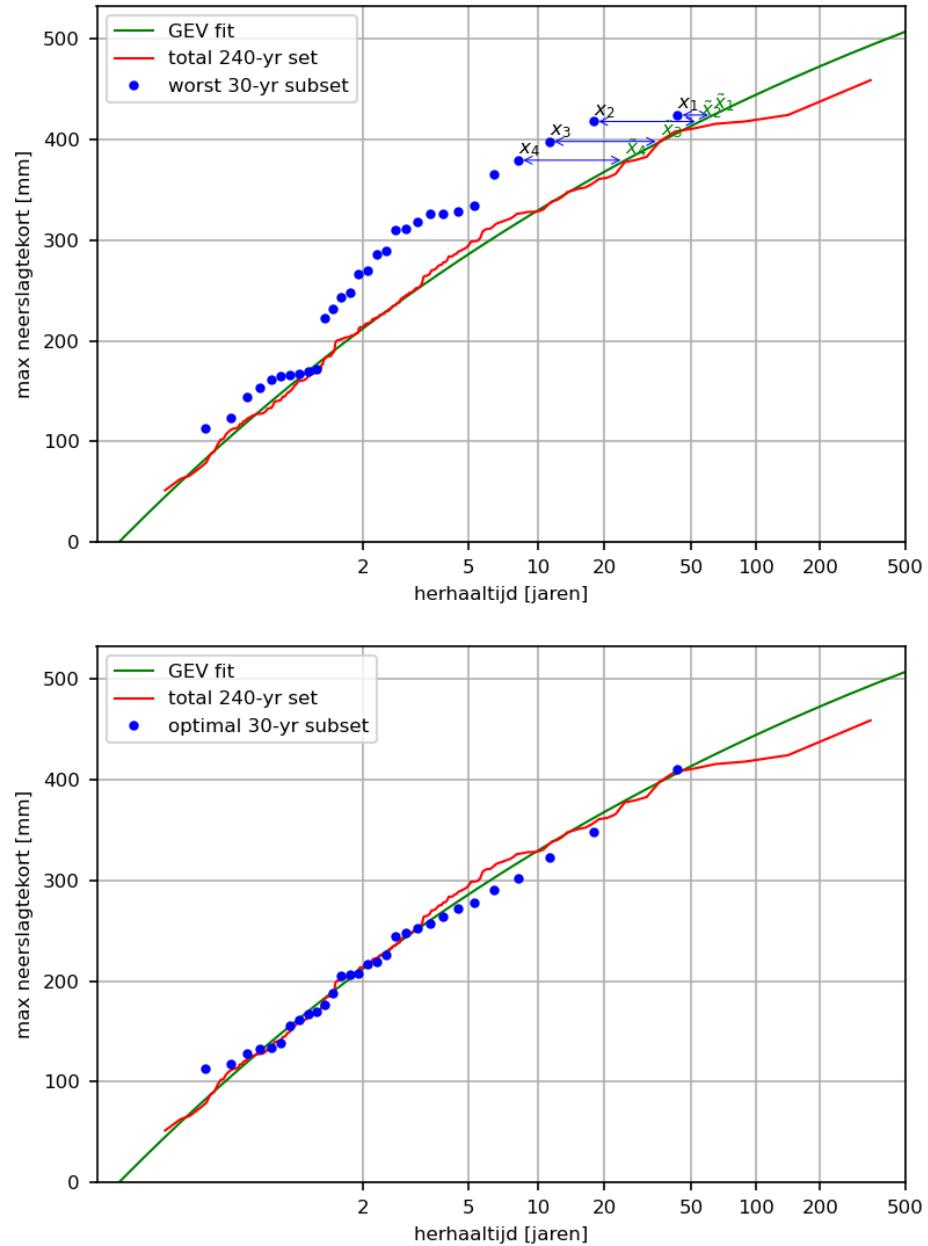
Deze aanpak kan toegepast worden op een willekeurig aantal hoogste extremen in de reeks, bijvoorbeeld op alleen de hoogste waarde, of op de 3, 10 of 30 hoogste waarden. Gekozen is om alle 30 jaarmaxima hierin mee te nemen.

Bovenstaande stappen kunnen herhaald worden voor de gewenste combinatie van waterschap en rivier uit bijlage A. Door de gekwadrateerde afstanden op te tellen kunnen de 30-jarige reeksen vergeleken worden, en degene met de kleinste afstand gekozen worden als optimale reeks.

Door de reeks van 240 jaar niet op te delen in acht reeksen van 30 jaar, maar in 24 reeksen van 10 jaar, en daar drie reeksen uit te kiezen wordt het aantal mogelijke combinaties vergroot van acht naar 2024.⁷

⁷ Het gebruik van kleinere blokken dan 10 jaar levert te veel combinaties op: opdelen van de 240-jarige reeks in 40 reeksen van zes jaar en er daar vijf uit kiezen levert 5757562 combinaties op.

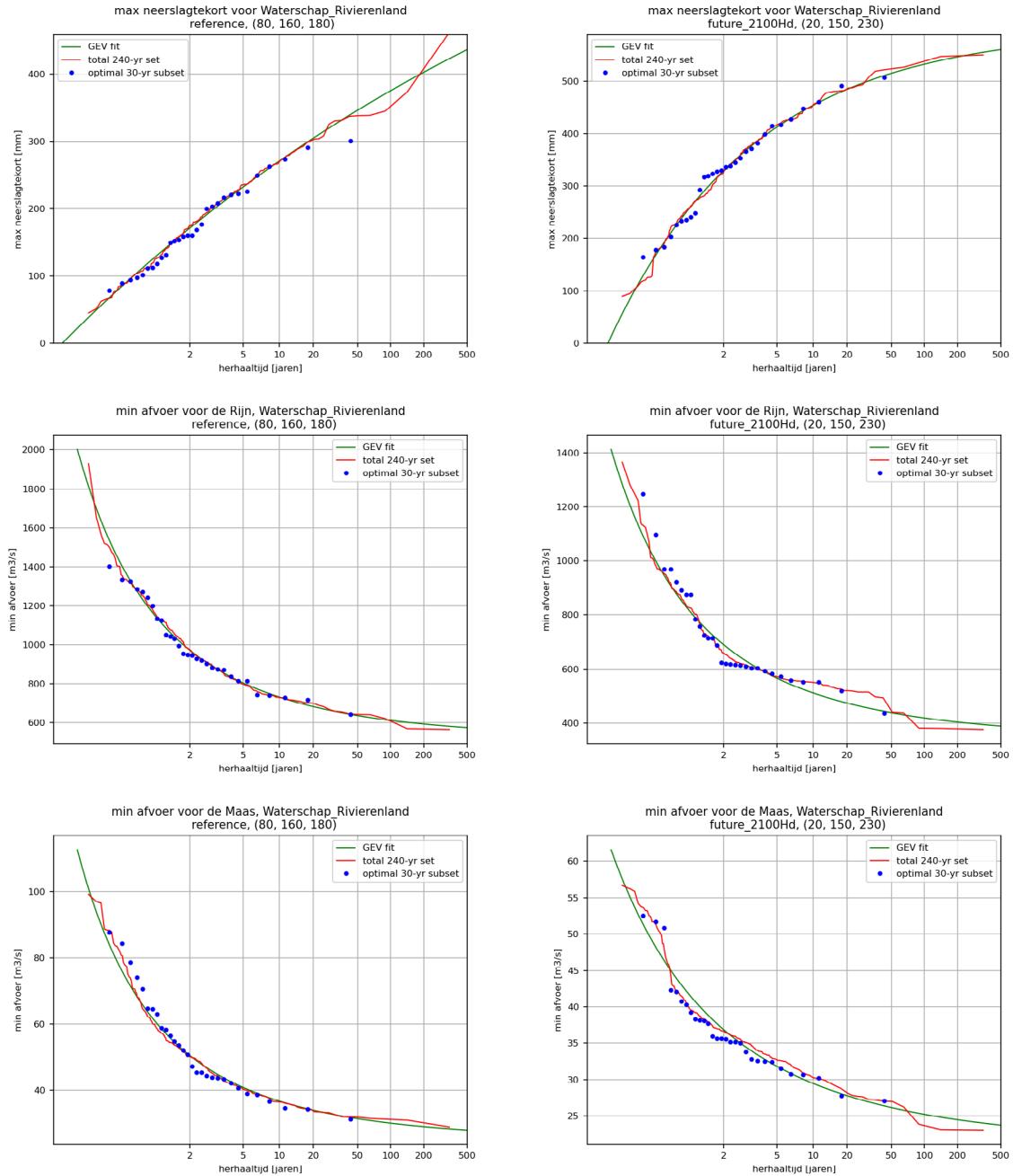
Figuur 19 Gumbelplots voor de minst optimale (boven) en meest optimale (onder) overeenkomst met de klimatologie (groene lijn). Deze groene lijn toont de GEV-fit aan de 240 maxima, in dit geval het maximale cumulatieve neerslagtekort voor Waterschap Aa en Maas in scenario 2033L. De rode lijn toont de 240 jaar voor 2033L en de blauwe punten zijn de 30 jaarmaxima uit de subset. Voor de minst optimale fit zijn voor de vier hoogste punten de afstanden aangegeven als een blauwe pijl tussen de de blauwe plotposities en de GEV-fit. Dit zijn de afstanden zoals gedefinieerd door de eerdergenoemde penalty



5.3 RESULTATEN

Figuur 20 toont voor het referentiescenario en voor het 2100Hd-scenario voor Waterschap Rivierenland de meest optimale fit voor het neerslagtekort en afvoeren van de Rijn en de Maas. In alle plots liggen de blauwe punten behoorlijk goed op de rode lijn, wat aangeeft dat de optimalisatie goed werkt - ook als er gelijktijdig op én het neerslagtekort, én de afvoeren van Rijn en Maas geoptimaliseerd wordt.

Figuur 20 Gumbelplots van het maximale neerslagtekort (boven), de minimale zevenaagse rivieraafvoer voor Rijn (midden) en Maas (onder) voor de referentieperiode (links) en 2100Hd (rechts) voor Waterschap Rivierenland. De rode lijn geeft de 240-jarige set aan. De groene lijn is de GEV-fit. De blauwe punten geven de dertig waarden van de optimale set aan



Tabel 8 toont per waterschap voor een aantal scenario's welke combinaties van tienjarige blokken het meest optimaal zijn. Soms zijn de meest optimale subsets identiek voor waterschappen. Een voorbeeld is zichtbaar voor het 2050Hd-scenario, waar de subset identiek is voor De Stichtse Rijnlanden, Amstel Gooi en Vecht, Noorderzijlvest en Zuiderzeeland.

Tabel 8 Meest optimale combinaties van tienjarige blokken per waterschap voor het referentiescenario, 2033L en 2050Hd.
Combinatie (100,160,230) betekent dat de jaren 100 t/m 109, 160 t/m 169 en 230 t/m 239 tot de beste dertigjarige reeks leiden

Waterschap	Referentie	2033L	2050Hd
Aa en Maas	(100,160,230)	(020,090,160)	(010,020,100)
Brabantse Delta	(040,100,170)	(100,110,230)	(040,090,140)
De Stichtse Rijnlanden	(040,080,230)	(070,170,200)	(020,110,230)
Amstel, Gooi en Vecht	(040,080,230)	(090,150,190)	(020,110,230)
Hollands Noorderkwartier	(050,090,230)	(030,090,190)	(020,070,210)
Delfland	(050,160,200)	(000,170,190)	(020,040,210)
Rijnland	(060,200,230)	(090,150,190)	(040,140,210)
Schieland en de Krimpenerwaard	(080,140,230)	(070,170,200)	(020,040,210)
Vallei en Veluwe	(000,050,230)	(000,070,220)	(020,070,110)
Vechtstromen	(020,060,160)	(000,150,190)	(030,070,210)
De Dommel	(050,160,200)	(010,030,100)	(040,090,140)
Drents Overijsselse Delta	(010,100,150)	(000,070,220)	(040,110,140)
Hollandse Delta	(060,200,230)	(000,170,190)	(040,140,210)
Hunze en Aa's	(020,130,160)	(010,110,140)	(020,030,230)
Limburg	(030,160,200)	(040,090,200)	(020,080,110)
Noorderzijlvest	(000,130,150)	(020,140,200)	(020,110,230)
Rijn en IJssel	(080,160,180)	(000,030,190)	(020,030,070)
Rivierenland	(080,160,180)	(010,110,140)	(040,140,220)
Scheldestromen	(060,090,200)	(030,080,100)	(040,090,140)
Zuiderzeeland	(060,200,230)	(130,200,220)	(020,110,230)
Fryslân	(050,090,230)	(050,070,220)	(070,140,210)

6

CONCLUSIES EN DISCUSSIE

Het doel van deze studie is tweeledig:

1. het selecteren van karakteristieke jaren uit de 240-jarige reeksen van de KNMI'23-klimaatscenario's door het afleiden van statistiek van meteorologische droogte.
2. Het selecteren van de meest representatieve 30-jarige deelreeksen uit de 240-jarige reeksen

6.1 CONCLUSIES KARAKTERISTIEKE JAREN

Bij het selecteren van karakteristieke jaren uit de 240-jarige reeks. Hierbij is specifiek gefocust op de volgende onderzoeks vragen:

- Kan een enkel karakteristiek jaar geselecteerd worden voor de gecombineerde droogte-indicatoren?
- Kan hetzelfde karakteristieke jaar geselecteerd worden voor heel Nederland?

VERANDERING IN METEOROLOGISCHE DROOGTE DOOR KLIMAATVERANDERING

Uit deze studie blijkt dat alle geanalyseerde droogteindicatoren aantonen dat de kans op meteorologische droogte in de toekomst toeneemt. Dit betekent dat jaren met droog weer vaker zullen voorkomen. Waar een droog jaar als 2018 in de huidige situatie gemiddeld eens per twintig jaar optreedt, kan dit in de toekomst mogelijk eens per vijf jaar (rond 2050) tot eens per twee jaar (rond 2100) voorkomen. Kortom, droge zomers zullen steeds vaker voor gaan komen, waarbij de hoogte van de neerslagtekorten ook nog eens gaan toenemen.

KARAKTERISTIEKE JAREN VOOR GECOMBINEERDE DROOGTEINDICATOREN

Daarna hebben we onderzocht of per scenario één representatief jaar kan worden geselecteerd dat de droogtestatistieken van alle indicatoren nauwkeurig weergeeft. Dit blijkt mogelijk voor herhalingstijden tot ongeveer T5. Bij hogere herhalingstijden leidt het gebruik van één enkel karakteristiek jaar tot aanzienlijke verschillen in de herhaaltijd van individuele indicatoren. Op basis hiervan concluderen we dat het niet mogelijk is om één enkel karakteristiek jaar te selecteren dat de herhaaltijd van alle droogteindicatoren represeneert.

RUIMTELIJKE VARIATIE STATISTIEK DROOGTEINDICATOREN

Er zijn aanzienlijke ruimtelijke verschillen zichtbaar in Nederland voor het maximaal cumulatief neerslagtekort en mindere mate voor de minimale 45-daagse neerslagsom en het aantal droge dagen. In sommige gevallen lopen de verschillen in neerslagtekort op tot 30% à 40%. De ruimtelijke variatie van de droogteindicatoren blijft grotendeels gelijk bij verschillende klimaatscenario's. Dit betekent dat deze variaties geen gevolg zijn van statistische ruis, maar structureel van aard zijn. Op basis hiervan concluderen we dat karakteristieke jaren ruimtelijk gespecificeerd moeten worden afgeleid om ervoor te zorgen dat regio's gebruik kunnen maken van de voor hen geldende meteorologische droogtestatistiek.

6.2 CONCLUSIES 30-JARIGE REEKSEN

Bij het selecteren van de meest optimale representatieve 30-jarige reeksen vanuit de 240-jarige reeksen is gefocust op een zo goed mogelijke reproductie van alle herhaaltijden tussen 1 en 30 jaar voor de extreme neerslagtekorten en minimale rivieraafvoeren per waterschap. De keuze om blokken van 10 jaar te kiezen leidt tot voldoende combinaties om een goede optimalisatie uit te voeren. Concreet betekent dit dat zo'n reeks gemiddeld bevat:

- Eén extreem dat gemiddeld eens in de 30 jaar voorkomt;
- Twee extremen die gemiddeld eens in de 15 jaar voorkomen;
- Drie extremen die gemiddeld eens in de 10 jaar voorkomen;
- Enzovoort.

6.3 PRODUCTEN

De gegevensproducten uit deze studie zijn te downloaden via de STOWA-website.

KARAKTERISTIEKE JAREN

Op basis van de conclusies is in overleg met de STOWA-begeleidingsgroep besloten om de karakteristieke jaren te bepalen aan de hand van het maximaal cumulatief neerslagtekort. Deze indicator is het meest gangbaar onder waterbeheerders voor droogtestudies.

Om ook de andere droogteindicatoren inzichtelijk te maken, leveren we aanvullend de bijbehorende indicatorwaarden en herhaaltijden mee. Zo krijgen gebruikers niet alleen zicht op het neerslagtekort, maar ook op de verdeling van andere droogteindicatoren.

De resultaten worden per beheergebied van de waterschappen aangeleverd. Voor elk waterschap is een Excelbestand opgesteld, waarin de gegevens per klimaatscenario zijn ondergebracht in aparte tabbladen. Elk tabblad toont de resultaten van 240 RACMO-jaren voor dat specifieke scenario. In Tabel 9 staat toegelicht wat elke kolom in de Excelbestanden voorstelt. De tabellen zijn gesorteerd op het maximaal cumulatief neerslagtekort, waarbij de jaren met de hoogste herhaaltijd bovenaan staan. De herhaaltijden zijn berekend met behulp van de GEV-fits. Voor zowel het maximaal cumulatief neerslagtekort als de minimale 45-daagse neerslagsom wordt ook de datum van voorkomen vermeld. Hiermee kan worden vastgesteld of de droogte vooral aan het begin of juist aan het eind van het groeiseizoen optrad.

Tabel 9

Kolommen in de oplevering van de karakteristieke jaren per waterschap

Kolommen in oplevering karakteristieke jaren	
ID	
Herhaaltijd Neerslagtekort GEV-fit (jaren)	
Maximaal Cumulatief Neerslagtekort (mm)	
Datum van maximaal neerslagtekort	
Herhaaltijd minimale 45-daagse neerslagsom GEV-fit (jaren)	
Minimale 45-daagse neerslagsom (mm)	
Datum van minimale neerslagsom	
Herhaaltijd aantal droge dagen (jaren)	
Aantal droge dagen	
Gemiddelde minimale 7-daagse Rijnafvoer (m ³ /s)	
Herhaaltijd Rijnafvoer GEV-fit (jaren)	
Gemiddelde minimale 7-daagse Maasafvoer (m ³ /s)	
Herhaaltijd Maasafvoer GEV-fit (jaren)	

DERTIGJARIGE REEKSEN

Voor elk waterschap en elk scenario leveren we combinaties van jaren op die samen de meest optimale representatieve dertigjarige reeks vormen.

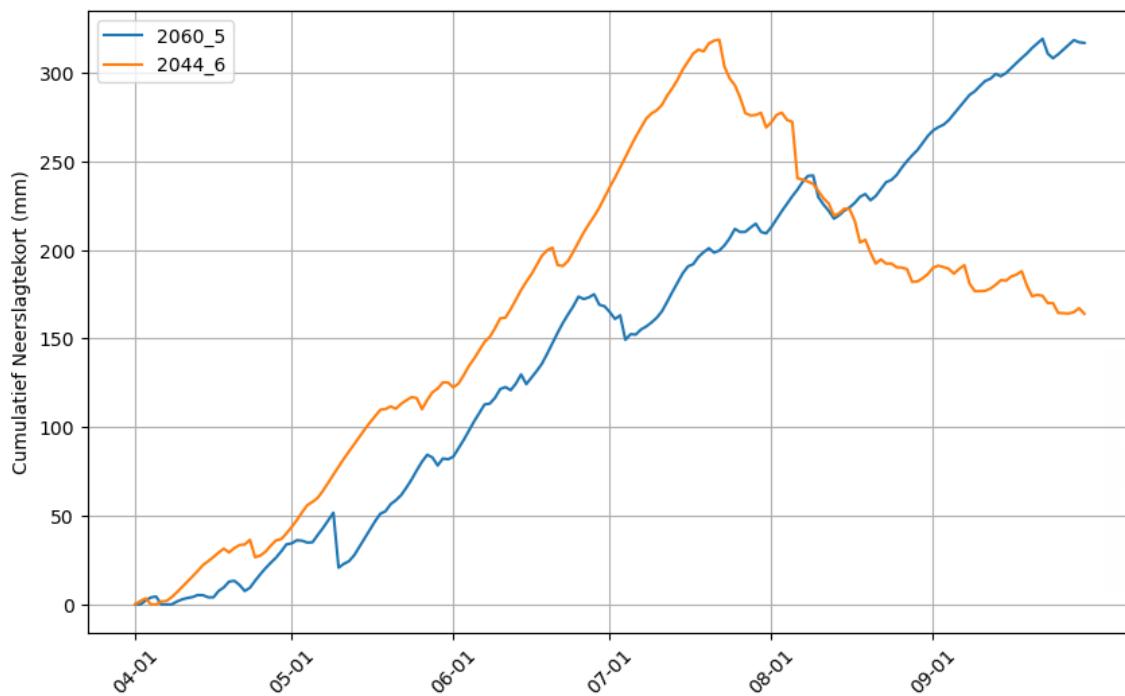
6.4 DISCUSSIE EN AANBEVELINGEN

Het eindresultaat zijn karakteristieke jaren gebaseerd op het maximaal cumulatieve neerslagtekort die per waterschap verschillen. Hierbij moet een gebruiker zich realiseren dat de KNMI'23-klimaatscenario's gebaseerd zijn op RACMO-gegevens. RACMO bevat synthetisch afgeleide weergegevens. Historisch opgetreden weer kan dus niet terug worden gevonden in de KNMI'23-klimaatscenario's. Een gebruiker moet zich hier bewust van zijn.

Daarnaast moet de gebruiker zich bewust zijn van het effect van weervariabiliteit die niet door de droogteindicatoren worden weergegeven. Figuur 21 toont ter illustratie het cumulatief neerslagtekort voor twee jaren van het Hd2050-scenario. De jaren hebben een herhalingstijd van ongeveer vijf jaar (T5.7 en T5.2). Bij gebruik van deze meteorologische reeksen in droogtestudies zal het hydrologisch effect echter sterk verschillen tussen de reeksen. Dat wordt dan niet veroorzaakt door klimaatverandering, maar door variabiliteit in het weer. Bij onjuiste duiding kan een gebruiker dan onterecht veranderingen in hydrologische droogte toekennen aan klimaatverandering.

Om gebruikers te helpen is daarom een handreiking geschreven voor gebruik van de KNMI'23-klimaatscenario's in droogtestudies. Deze handreiking is te vinden achterin dit rapport. Het is noodzakelijk deze handreiking te lezen voordat gebruik gemaakt wordt van de karakteristieke jaren.

Figuur 21 Cumulatief neerslagtekort voor twee jaren in het Hd2050-scenario



We hebben voor het fitten van de kansverdeling de keuze gemaakt om een GEV-verdeling toe te passen. Dat komt omdat die verdeling bij de neerslagstatistiek succesvol wordt toegepast, zie bijvoorbeeld STOWA (2019).

De Haas et al (2025) geeft aan dat het gebruik van extreme neerslag uit RACMO problematisch kan zijn in hydrologische toepassingen. Dit heeft echter geen implicaties voor droogtestudies.

7

HANDREIKING

Deze handreiking is bedoeld voor gebruikers die de KNMI'23-klimaatscenario's willen toepassen in droogtestudies. De gegevensproducten uit deze studie zijn te downloaden via de STOWA-website. De KNMI'23-scenario's geven mogelijke scenario's voor toekomstig weer. Er bestaat behoefte vanuit waterbeheerders deze scenario's te gebruiken voor droogte- en zoetwaterbeschikbaarheidsstudies. Voor studies naar het klimaateffect op de (gevolgen van) neerslagextremen zijn getransformeerde tijdreeksen gepresenteerd door het KNMI. Deze kunnen niet zonder meer worden gebruikt voor droogte- en zoetwaterbeschikbaarheidsstudies, omdat het aantal droge dagen in het toekomstig klimaat verandert en dit niet in de getransformeerde reeksen zit.

Naast getransformeerde tijdreeksen stelt het KNMI de modelresultaten beschikbaar die ten grondslag liggen aan de KNMI'23-klimaatscenario's. Dit zijn reeksen van acht maal dertig jaar aan simulaties met het RACMO EC-EARTH-model per scenario op dagbasis; in totaal 240 jaar per scenario⁸. Het RACMO-model simuleert het weer, maar reproduceert geen specifieke historische weergebeurtenissen. De RACMO-reeksen bevatten dus synthetisch afgeleide weergegevens en historisch opgetreden weer kan niet terug worden gevonden in de KNMI'23-klimaatscenario's.

Wij adviseren de RACMO-reeksen te gebruiken voor droogte- en zoetwaterbeschikbaarheidsstudies. Deze handreiking geeft aan hoe gebruikers dat het beste kunnen doen. Dat doen we aan de hand van een drietrapssrak:

1. Gebruik indien mogelijk de volledige 240 jaar aan RACMO-gegevens per scenario. Vervolgens moeten de resultaten bewerkt worden tot statistiek. In deze studie is een methodiek gebruikt om statistiek af te leiden uit de volledige 240 jaar. Deze methode wordt in dit rapport beschreven en heeft, indien mogelijk, de voorkeur. Het argument hiervoor is dat men moet kijken naar de variabiliteit van het klimaat en niet naar de variabiliteit van het weer. Door resultaten jaar op jaar te vergelijken, kan een gebruiker onterecht concluderen dat verschillen veroorzaakt worden door klimaatverandering en niet door ander weer.

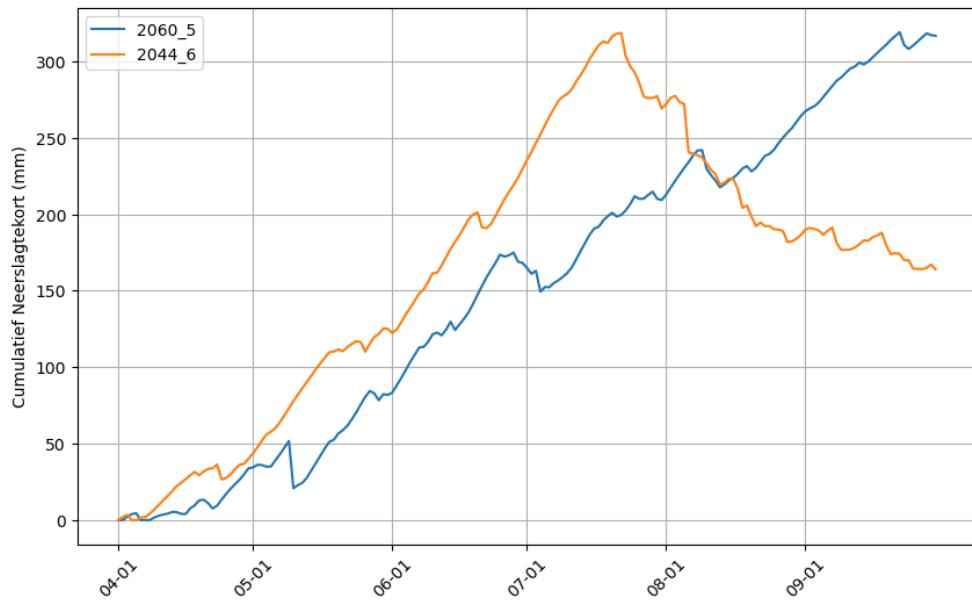
Figuur 22 toont ter illustratie het cumulatief neerslagtekort voor twee jaren van het Hd2050-scenario. Het maximaal cumulatief neerslagtekort heeft in deze beide karakteristieke jaren een herhaaltijd van ongeveer vijf jaar (T5.7 en T5.2). Bij gebruik van deze meteorologische reeksen in droogtestudies zal, door het verschil in timing, het hydrologisch effect echter sterk verschillen tussen de reeksen. Dit wordt niet veroorzaakt door klimaatverandering, maar door variabiliteit in het weer. Figuur 23 laat zien dat verschillen tussen klimaatscenario's met gelijke herhaaltijden niet altijd te verklaren zijn met klimaatverandering, maar ook door variabiliteit in het weer.

⁸ RACMO (Regional Atmospheric Climate Model) is een regionaal klimaatmodel met een ruimtelijke resolutie van 12 bij 12 km.

2. Als het praktisch niet mogelijk is om 240 jaar door te rekenen, gebruik dan de dertigjarige reeksen zoals afgeleid in Hoofdstuk 5 van dit rapport. Opnieuw dienen de resultaten bewerkt te worden tot statistiek en niet jaar op jaar vergeleken worden.
3. Indien het niet wenselijk is om lange berekeningen te maken, kunnen de karakteristieke jaren, zoals afgeleid in Hoofdstuk 3 van deze studie, gebruikt worden in droogtestudies. Hierbij moet een gebruiker goed nagaan of gevonden verschillen worden veroorzaakt door variabiliteit in weer, of daadwerkelijk optreden door klimaatverandering. Het kan verstandig zijn om niet te vertrouwen op het doorrekenen van een enkel karakteristiek jaar. Een geschiktere methodiek is om verschillende karakteristieke jaren met vergelijkbare herhaalstijden door te rekenen met een hydraulisch of hydrologisch model, waarbij de initiële condities van het model variëren van droog naar gemiddeld naar nat. Daarbij geldt dat de initiële condities als additionele stochast behandeld moeten worden.

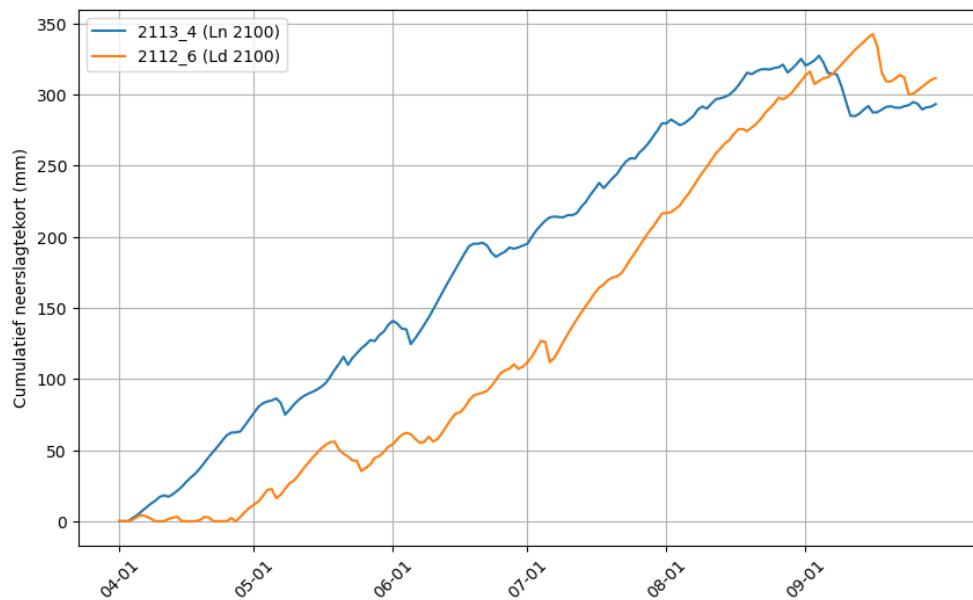
We adviseren gebruikers van de 30-jarige RACMO-reeks en karakteristieke jaren, de volledige rapportage te lezen om goed inzicht te krijgen in de implicaties van de beschikbaar gestelde producten. Daarnaast is het goed te vermelden dat het onderzoek ten grondslag aan deze handreiking zich explicet richt op meteorologische droogte en dus niet op landbouwkundige- of hydrologische droogte.

Figuur 22 Cumulatief neerslagtekort voor twee jaren in het Hd2050-scenario, elk met een maximaal cumulatief neerslagtekort met een herhaaltijd van ongeveer vijf jaar. Het verschil in het moment van optreden van het maximum werkt door in de hydrologische en hydraulische respons



Figuur 23

Cumulatief neerslagtekort voor twee jaren met een T20-herhaaltijd uit verschillende klimaatscenario's. Het is zichtbaar dat het maximaal cumulatief neerslagtekort groter is in het Ld2100 (oranje) jaar. Toch, als je deze jaren zou doorrekenen in met een grondwatermodel zou het Ln2100 (blauwe) jaar waarschijnlijk een stuk droger patroon laten zien. Dit verschil wordt veroorzaakt voor weervariabiliteit en niet het verschil in klimaatscenario



8

REFERENTIES

- **Bernard, A. en Bos-Levenbach, E.C.** (1953) The plotting of observations on probability paper. *Statistica Neerlandica*. Volume 7, p167-173. Verkregen van <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:49577531>
- **Deltares** (2023) Implications of the KNMI'23 climate scenarios for the discharge of the Rhine and Meuse. 11209265-002-ZWS-0003. Verkregen van https://open.rijkswaterstaat.nl/publish/pages/193035/implications_of_the_knmi23_climate_scenarios_for_the_rhine_and_meuse.pdf;
- **De Haas, S., Van Voorst, L. en Van den Brink, H.** (2025) Validation of hourly precipitation extremes in the Regional Atmospheric Climate Model (RACMO) for the Netherlands and surrounding regions, KNMI number: TR-04. <https://www.knmi.nl/research/publications/validation-of-hourly-precipitation-extremes-in-the-regional-atmospheric-climate-model-racmo-for-the-netherlands-and-surrounding-regions>
- **KNMI** (2023) KNMI National Climate Scenarios 2023 for the Netherlands R. van Dorland, J. Beersma, J. Bessembinder, N. Bloemendaal, H. van den Brink M. Brotons Blanes, S. Drijfhout, R. Groenland, R. Haarsma, C. Homan, I. Keizer, F. Krikken, D. Le Bars, G. Lenderink, E. van Meijgaard, J. F. Meirink, B. Overbeek, T. Reerink, F. Selten, C. Severijns, P. Siegmund, A. Sterl, C. de Valk, P. van Velthoven, H. de Vries, M. van Weele, B. Wackers Schreur, K. van der Wiel, Scientific report; WR-23-02.
- **STOWA** (2019) Neerslagstatistiek en -reeksen voor het waterbeheer 2019. STOWA-rapport 2019-19.
- **STOWA** (2023) Droogtestatistiek. Meteo-onderzoek ten behoeve van het waterbeheer. STOWA-rapport 2023-36.
- **STOWA** (2024) Neerslagstatistiek, -reeksen en -gebeurtenissen op basis van de KNMI'23-klimaatscenario's. STOWA-rapport 2024-37.
- **Van Voorst, L en H. van den Brink** (2024) De impact van klimaatscenario's op de warmte- en koudevraag voor de gebouwde omgeving. Technisch rapport TR 24-04.
- **Van den Brink, H.** (2023). Bepaling van de optimale referentie en de optimale subsets voor de knmi'23 klimaatscenario's (Rapport nr. TR-414). KNMI. Verkregen van <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/publicatie/bepaling-van-de-optimale-referentie-en-de-optimale-subsets-voor-de-knmi-23-klimaatscenario-s>

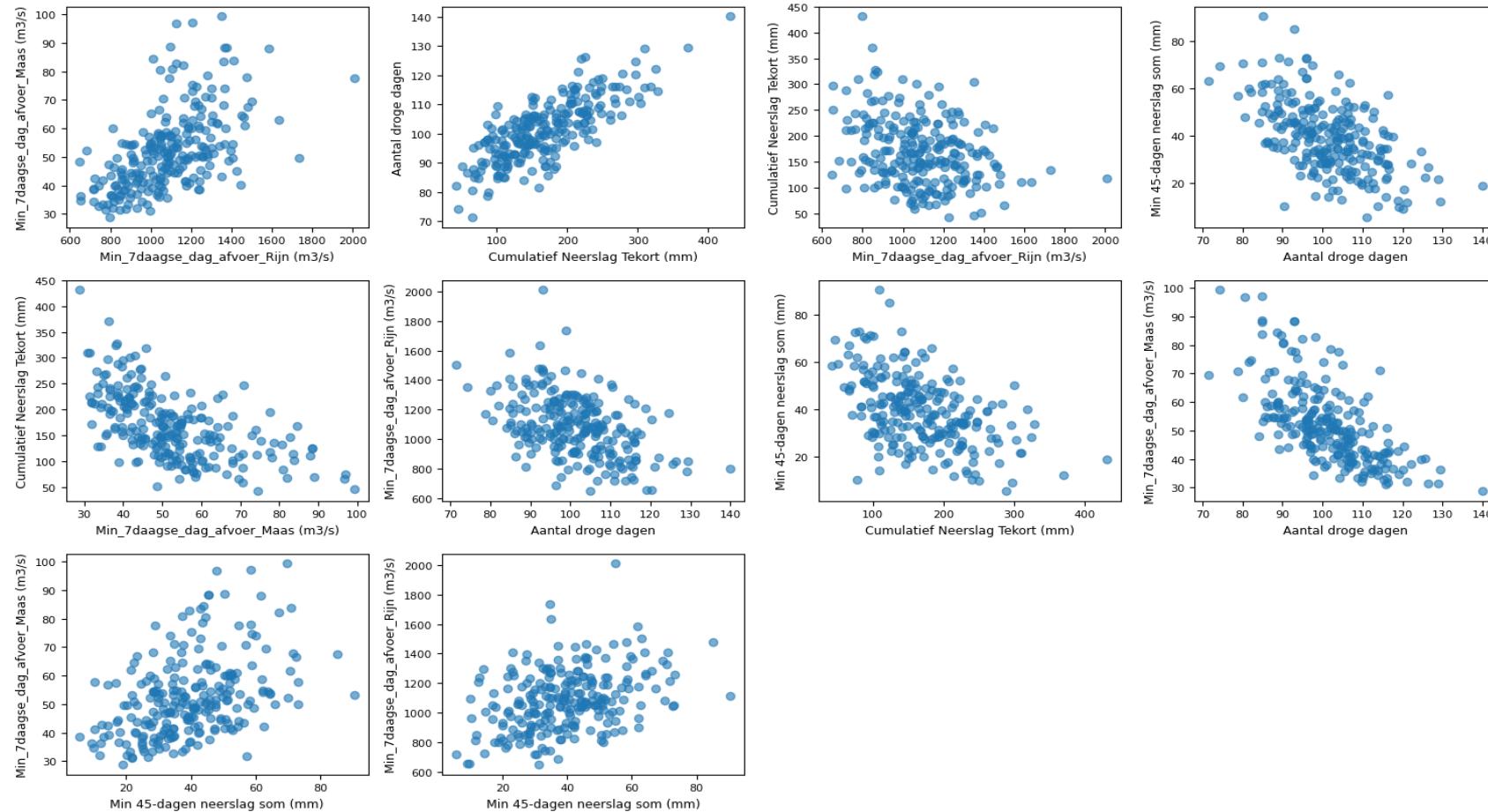
BIJLAGE A

AFHANKELIJKHEID WATERSCHAPPEN VAN RIJN EN MAAS

	Afhangelijk van Rijn	Afhangelijk van Maas	Afhangelijk van Rijn en Maas
Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden			
Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier			
Hoogheemraadschap van Delfland			
Hoogheemraadschap van Rijnland			
Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard			
Waterschap Aa en Maas			
Waterschap Amstel, Gooi en Vecht			
Waterschap Brabantse Delta			
Waterschap De Dommel			
Waterschap Drents Overijsselse Delta			
Waterschap Hollandse Delta			
Waterschap Hunze en Aa's			
Waterschap Limburg			
Waterschap Noorderzijlvest			
Waterschap Rijn en IJssel			
Waterschap Rivierenland			
Waterschap Scheldestromen			
Waterschap Vallei en Veluwe			
Waterschap Vechtstromen			
Waterschap Zuiderzeeland			
Wetterskip Fryslân			

BIJLAGE B**CORRELATIE TUSSEN INDICATOREN**

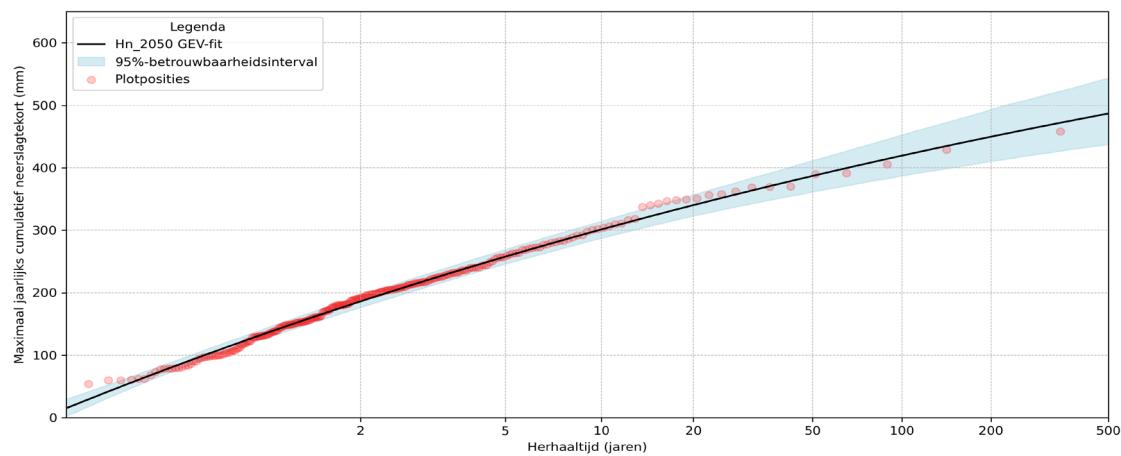
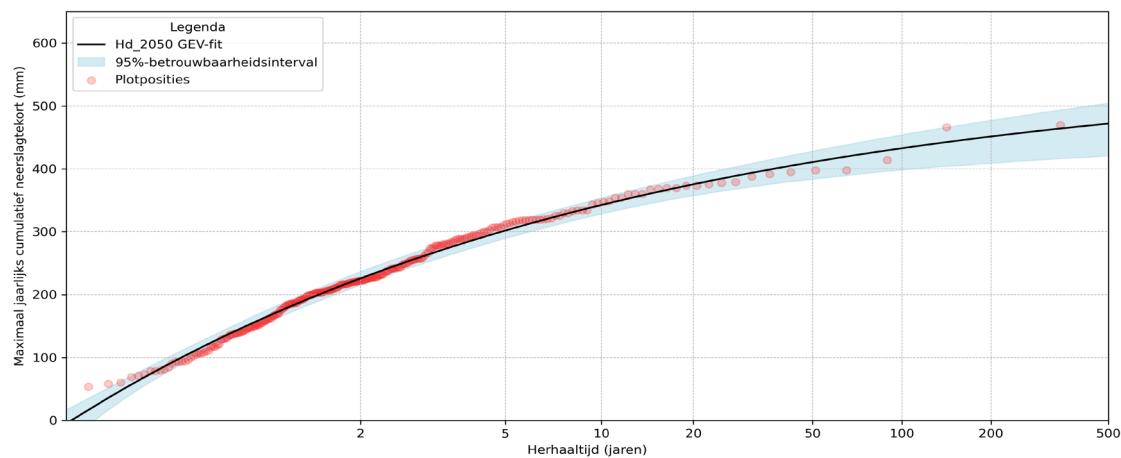
42

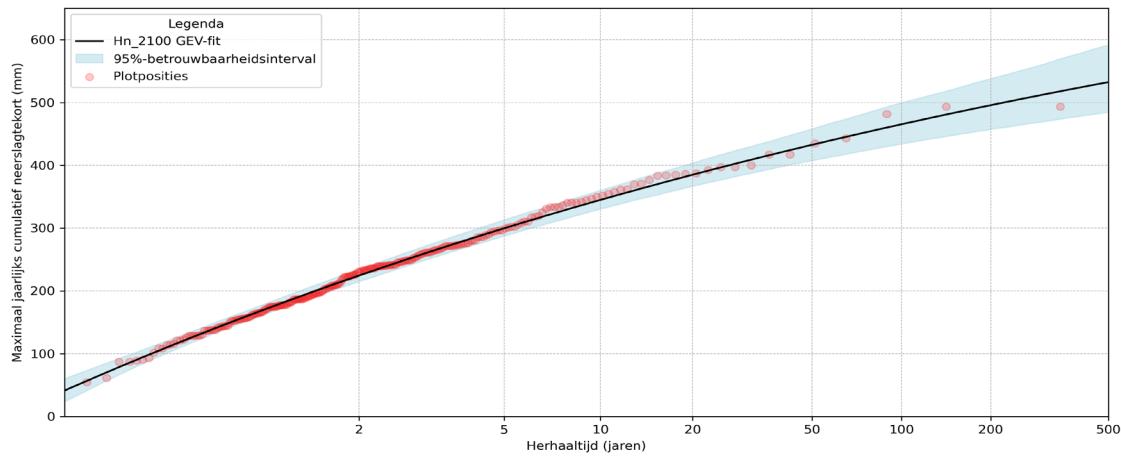
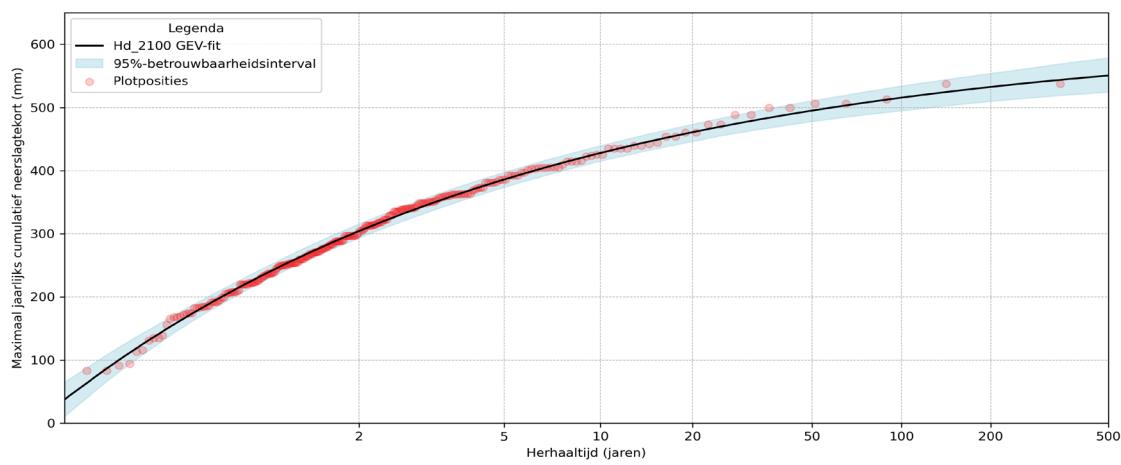


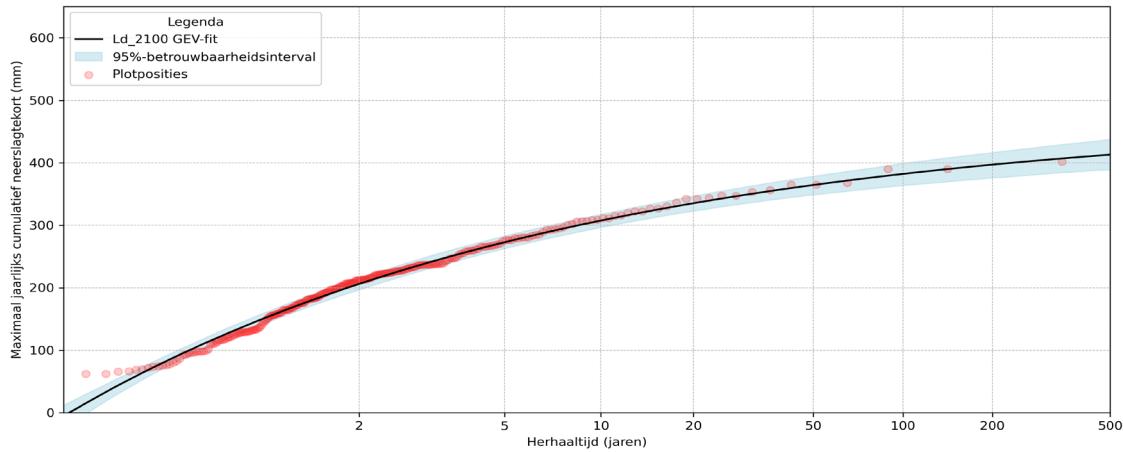
reference

BIJLAGE C

KANSVERDELINGSFITS VOOR ALLE SCENARIO'S

Figuur 25 Kansverdelingsfit voor Hn2050**Figuur 26 Kansverdelingsfit voor Hd2050**

Figuur 27 Kansverdelingsfit voor Hn_2100**Figuur 28 Kansverdelingsfit voor Hd_2100**

Figuur 29 Kansverdelingsfit voor Ld2100**Figuur 30 Kansverdelingsfit voor Ln2100**