

Vergelijking KNMI'23 en KNMI'14 scenario's ten behoeve van stresstesten KBN-HVWN



Vergelijking KNMI'23 en KNMI'14 scenario's ten behoeve van stresstesten KBN-HVWN

Auteur(s)

Anna van den Hoek

Rolien van der Mark

Vergelijking KNMI'23 en KNMI'14 scenario's ten behoeve van stresstesten KBN-HVWN

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	N. Dasburg
Referenties	
Trefwoorden	Vaarwegen, hoofdvaarwegennetwerk (HVWN), klimaatbestendige netwerken (KBN), klimaatscenario's, droogte, doorvaarthoogte, laagwater, hoogwater

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	27-05-2024
Projectnummer	11210314-000
Document ID	11210314-000-ZWS-0001
Pagina's	43
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Anna van den Hoek	
	Rolien van der Mark	

Samenvatting

In oktober 2023 presenteerde het KNMI de nieuwe KNMI'23 klimaatscenario's en op 8 december 2023 zijn ook de bijpassende afvoerscenario's voor de Rijn en de Maas gepubliceerd (Buitink et al., 2023). De huidige stresstesten, die zijn uitgevoerd in het kader van het programma *Klimaatbestendige Netwerken (KBN) – Hoofdvaarwegennetwerk (HVWN)*, zijn gebaseerd op de oude KNMI'14 scenario's. Dit roept daarom de vraag op in hoeverre de nieuwe KNMI'23 scenario's afwijken van de oude scenario's en of de stresstesten geactualiseerd zouden moeten worden.

De KNMI'23 scenario's hebben een andere referentie en methodiek dan de KNMI'14 scenario's. Een één-op-één vergelijking is lastig, omdat de veranderde methodiek ook kan zorgen voor verschillen. Toch zijn delen van de stresstesten opnieuw uitgevoerd met de nieuwe scenario's om het effect te bepalen.

De KNMI'23 scenario's zijn opgebouwd uit verschillende uittootsscenario's voor het klimaat in Nederland, namelijk *hoog* (H), *laag* (L) en *gematigd* (G). Elk uittootsscenario bestaat uit twee varianten: een *nat* (n) scenario waarin winters veel natter zullen worden en zomers licht zullen verdrogen en een *droog* (d) scenario waarin winters iets natter zullen worden en zomers flink zullen verdrogen. De verschillende KNMI'23 scenario's zijn opgesteld voor de zichtjaren 2050, 2100 en 2150.

Stresstest droogte Rijntakken

De richting van de veranderingen is in de nieuwe meest droge klimaatscenario's (Hd-scenario's) vergelijkbaar met de oude Whdry-scenario's: het zal droger worden en grotere extremen zijn nog steeds realistisch in de toekomst. Wel zullen deze extremen zich volgens de KNMI'23 scenario's later voordoen dan volgens de KNMI'14 scenario's. De eerder uitgevoerde stresstest droogte geeft nog steeds een goed beeld van wat we voor de toekomst kunnen verwachten in het meest extreme KNMI'23 scenario, met daarbij de toevoeging dat er meer tijd lijkt te zijn om ons aan te passen. De toename in vaarkosten in het extreme KNMI'23 scenario voor 2150 is zeer vergelijkbaar met het oude scenario voor 2085. Ons advies is daarom om de stresstest niet te actualiseren, en de middelen in te zetten op andere onderdelen en onderzoeksvragen, zoals handelingsperspectieven voor klimaatadaptatie.

De zeer extreme lage afvoer van 550 m³/s is in de stresstest droogte Rijntakken (De Jong, 2020b) destijds niet meegenomen (nooit voorgekomen); 700 m³/s is de laagste afvoer. Tijdens de droogte van 2022 werd duidelijk dat extreem lage afvoeren wel degelijk kunnen optreden (679 m³/s gemeten). De afvoer van 550 m³/s komt in de nieuwe KNMI'23 scenario's voor alle terugkeertijden minder vaak voor dan in de oude KNMI'14 scenario's. Het is daarom niet nodig om deze afvoer toe te voegen aan de stresstest.

Mogelijk kunnen er andere (niet kwantitatief-inhoudelijke) overwegingen of nieuwe wensen zijn om toch te kiezen voor een actualisatie, uitbreiding of aanpassing van de stresstest. Onze indruk is dat actualisatie puur omwille van de nieuwe KNMI scenario's een grote inspanning is die niet tot andere inzichten of conclusies leidt. Bij een identieke uitvoering van de stresstest met als enige aanpassing de geactualiseerde onderschrijdingen per afvoerniveau, blijven de geïdentificeerde knelpunten gelijk en komen er geen nieuwe knelpunten bij later in de tijd.

Stresstest droogte Maas

In de nieuwe KNMI'23 scenario's wordt nog steeds verwacht dat afvoeren tot 44 m³/s (waarbij al keuzes gemaakt moeten gaan worden voor de waterverdeling) in de toekomst vaker zullen voorkomen (KNMI'14 vergelijkbaar met KNMI'23), maar dat extreem lage afvoeren onder 25 m³/s minder waarschijnlijk worden geacht in KNMI'23 dan in KNMI'14. De nieuwe scenario's zijn een stuk gematigder in termen van extreme droogte dan de oude. Dit is ook goed terug te zien in de resultaten van de quick scan naar kwetsbaarheid van sluizen; de nieuwe scenario's laten een duidelijk verminderde kwetsbaarheid zien ten opzichte van de oude scenario's. Born en Maasbracht blijven de meest kwetsbare sluiscomplexen voor beperkte waterbeschikbaarheid door droogte.

De quick scan naar kwetsbaarheid is in deze rapportage geactualiseerd. Ons advies zou zijn om de detailstudie voor Born, Maasbracht en Heel niet te actualiseren, aangezien de situatie niet erger wordt dan in de huidige stresstest.

Stresstest doorvaarthoogte

In de stresstest doorvaarthoogte is Whdry_2085 gebruikt voor de grote rivieren om een eerste indicatie te krijgen van de kwetsbaarheid van het systeem. Het doel was destijds vooral (als quick scan) om de knelpunten vast te stellen. Er is dus niet getest wat het meest extreme scenario is voor de doorvaarthoogte.

In deze kleine studie is eerst gekeken naar de onderschrijdingsduren voor het nieuwe scenario 2100Hd, omdat dit scenario het meest overeen met het oude Whdry_2085 scenario. Echter is niet 2100Hd het meest natte en dus meest extreme KNMI'23 scenario voor hoogwater, maar 2100Hn. Daarom is in deze studie ook gekeken naar scenario 2100Hn. In absolute zin zijn er verschillen tussen de verschillende scenario's, maar de knelpunten zijn overal nog hetzelfde. Voor het bepalen van de knelpunten in het systeem maakt het dus weinig uit welk klimaatscenario gebruikt wordt. Indien verdere verdieping van deze stresstest gewenst is (het was destijds een quick scan naar knelpunten), is het wel aan te bevelen om een natter en dus kritieker scenario mee te nemen, om een betere representatie van de grootte van de maximale impact te krijgen.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond	7
1.2	Doel	7
1.3	Leeswijzer	7
2	Klimaatscenario's	8
2.1	KNMI'23 scenario's	8
2.2	Verschillen tussen methode KNMI'14 en KNMI'23 scenario's	9
2.3	Vergelijking van KNMI'23 met KNMI'14 afvoerscenario's	11
3	Stresstest droogte Rijntakken	13
3.1	Karakteristieke droge jaren	13
3.2	Bepaling van de vaarkosten	15
3.3	Conclusie en advies	17
4	Stresstest droogte Maas	19
4.1	Karakteristieke droge jaren	19
4.2	Kwetsbaarheid van sluizen	22
4.3	Conclusie en advies	22
5	Stresstest doorvaarthoogte	25
5.1	Grote rivieren	25
5.2	Rijn-Maasmonding	30
5.3	Overige wateren	30
5.4	Conclusie en advies	30
6	Conclusies en aanbevelingen	32
7	Referenties	34
A	Verschillende karakteristieke jaren en terugkeertijden Rijntakken	35
B	Vaarkosten in karakteristieke droge jaren	38
C	Verschillende karakteristieke jaren en terugkeertijden Maas	40

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In oktober 2023 presenteerde het KNMI de nieuwe KNMI'23 klimaatscenario's en op 8 december 2023 zijn ook de bijpassende afvoerscenario's voor de Rijn en de Maas gepubliceerd (Buitink et al., 2023). De huidige stresstesten, die zijn uitgevoerd in het kader van het programma *Klimaatbestendige Netwerken (KBN) – Hoofdvaarwegennetwerk (HVWN)*, zijn gebaseerd op de oude KNMI'14 scenario's. De vraag is in hoeverre de nieuwe KNMI'23 scenario's afwijken van de oude scenario's en of de stresstesten herzien zouden moeten worden.

1.2 Doel

Het doel van deze korte studie is:

- Het verkrijgen van inzicht in de impact van de nieuwe KNMI klimaat- en afvoerscenario's op de eerder uitgevoerde stresstests droogte Rijntakken, droogte Maas en doorvaarthoogte.
- Het geven van advies over of een herziening van de stresstests benodigd is en op welke onderdelen.

1.3 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 zal kort uitgelegd worden hoe de verschillende KNMI'23 scenario's eruit zien. Ook zullen de belangrijkste verschillen tussen de KNMI'23 en de KNMI'14 scenario's en de verandering in rivierafvoer van de Rijn en de Maas uiteengezet worden. In Hoofdstuk 3 wordt ingegaan op de stresstest droogte Rijntakken en wordt advies gegeven of deze geactualiseerd moet worden met de nieuwe klimaatscenario's. In Hoofdstuk 4 wordt hetzelfde gedaan, maar dan voor de stresstest droogte Maas. Hoofdstuk 5 gaat in op de impact van de nieuwe KNMI klimaatscenario's op de stresstest doorvaarthoogte. Ten slotte zullen in Hoofdstuk 6 de conclusies en aanbevelingen gegeven worden.

2 Klimaatscenario's

In dit hoofdstuk worden de KNMI'23 scenario's beschreven en vergeleken met de oude KNMI'14 scenario's. Ook wordt kort toegelicht wat de consequenties van de nieuwe scenario's zijn voor de rivierafvoeren in Nederland.

2.1 KNMI'23 scenario's

Het Intergouvernementeel Panel voor Klimaatverandering van de Verenigde Naties (IPCC) publiceerde in maart 2023 het zesde Assessment Synthesis Report (AR6). Het KNMI presenteerde op 9 oktober 2023 de hiervan afgeleide nieuwe Nederlandse klimaatprojecties. Deze KNMI'23 scenario's zijn een vertaling van de wereldwijde IPCC klimaatprojecties naar Nederland.

De KNMI'23 klimaatscenario's bestaan uit twee uitstootscenario's voor het klimaat in Nederland zoals dat zich rond 2050, 2100 en 2150 kan manifesteren, met per uitstootscenario twee varianten 'nat' en 'droog' (zie Figuur 2-1):

- *Een hoog uitstootscenario ('H')*: de uitstoot zal in gelijke mate toenemen tot 2080 en daarna afvlakken. Rond 2100 is de mondiale opwarming dan bijna 5°C.
- *Een laag uitstootscenario ('L')*: de uitstoot zal snel verminderen en broeikasgassen zullen actief verwijderd worden uit de atmosfeer. Dit is in lijn met het klimaatakkoord van Parijs. Rond 2100 is de mondiale opwarming dan 1,7°C. Voor 2050, 2100 en 2150 is de opwarming in dit scenario nagenoeg gelijk, daarom is aangenomen dat de verandering voor 2100 ook representatief is voor zichtjaren 2050 en 2150 en is voor dit scenario alleen de afvoerverandering voor 2100 bepaald.



Figuur 2-1 Vier scenario's voor klimaatverandering in Nederland. Het aantal blokjes staat voor de mate van klimaatverandering rond 2100 ten opzichte van 1991-2020. Bron: KNMI (2023).

Het KNMI ontwikkelde daarnaast ook een gematigd scenario voor specifieke toepassingen, waaronder voor de afvoerscenario's voor de Rijn en de Maas:

- *Een gematigd uitstootscenario ('M')*: de uitstoot zal na een stijging geleidelijk verminderen. Rond 2100 is de mondiale opwarming dan 2,8°C.

In alle KNMI'23 scenario's zal de temperatuur verder stijgen, wat drogere zomers en nattere winters als gevolg heeft. De verschillende klimaatmodellen geven geen eenduidig beeld over hoeveel natter of droger het zal worden. Daarom zijn per uitstootscenario door het KNMI twee varianten gemaakt (zie Figuur 2-1):

- *Een 'nat' scenario ('n')*: winters zullen veel natter worden en zomers zullen licht verdrogen.
- *Een 'droog' scenario ('d')*: winters zullen iets natter worden en zomers zullen sterk verdrogen.

De toekomstige veranderingen in rivierafvoer voor de KNMI'23 scenario's en tijdshorizonten zijn bepaald door Buitink et al. (2023). In Tabel 2-1 is een overzicht van de 14 doorgerekende afvoerscenario's gegeven. Tevens laat de tabel het scenario 2033L zien, wat overeenkomt met de opwarming van 1,5°C zoals afgesproken in het klimaatakkoord van Parijs.

Tabel 2-1 Overzicht van de doorgerekende afvoerscenario's.

Tijdshorizon	Laag	Matig	Hoog
2033	2033L (Parijs)		
2050	2100Ln / 2100Ld	2050Mn / 2050Md	2050Hn / 2050Hd
2100		2100Mn / 2100Md	2100Hn / 2100Hd
2150		2150Mn / 2150Md	2150Hn / 2150Hd

2.2 Verschillen tussen methode KNMI'14 en KNMI'23 scenario's

Er zijn veel verschillen tussen de oude KNMI'14 scenario's en de nieuwe KNMI'23 scenario's wat betreft de methodiek waarmee KNMI en Deltares hun klimaatprojecties en afvoerreksen hebben afgeleid. Tabel 2-2 geeft een overzicht van de belangrijkste verschillen in de methodes voor het afleiden van de scenario's. Enkele van deze verschillen worden onder de tabel nader toegelicht. We kunnen ervan uitgaan dat de nieuwe methodiek, door voortschrijdende inzichten en nieuwe kennis, een verbetering is ten opzichte van de oude methodiek, en dus dat de resultaten betrouwbaarder kunnen worden geacht.

Tabel 2-2 Overzicht van de verschillen in de modelketens die gebruikt zijn voor het bepalen van de KNMI'14 en KNMI'23 afvoerscenario's (KNMI, 2023; Buitink et al., 2023).

Component	KNMI'14	KNMI'23
Klimaatscenario's		
IPCC generatie	AR5	AR6
Klimaatmodel	GCM (alle simulaties beschikbaar via het IPCC)	RCM (EC-EARTH – RACMO)
Lengte van de individuele scenario's	66 jaar	8 ensembles van 30 jaar (die klimaatvariabiliteit binnen een scenario representeren)
Tijdreekscorrectie	Tijdreekstransformatie	Bias-correctie (quantile mapping)
Toekomstige tijdshorizonten	2050, 2085	2050, 2100, 2150

Component	KNMI'14	KNMI'23
Referentieperiode (die de historische condities representeert)	1961-1995	1991-2020 (op basis van RAMCO simulaties met 8 ensembles)
Referentie tijdreeksen	1950-2006 (op basis van meteo observaties)	1991-2020 (8 x 30-jaar tijdreeksen van RAMCO output)
Aantal scenario's	4 per tijdshorizon + extra droog scenario (WHdry)	6 per tijdshorizon

Afvoerscenario's

Hydrologisch model	HBV- lumped	Wflow_sbm – distributed
Initiële condities hydrologische model	Zelfde voor alle toekomst jaren	Op basis van pseudo-continue tijdreeksen, representatief voor het gegeven toekomstjaar

GCM – RCM

De nieuwe scenario's zijn gebaseerd op klimaat simulaties van het *gedownscaled Regional Climate Model* (RCM). De KNMI'14 scenario's maakten gebruik van data van het veel grovere *Global Circulation Model* (GCM).

Scenario's

De vier 'basis' scenario's van KNMI'14 waren gebaseerd op temperatuurstijging (*gematigd* ('G') of *warm* ('W')) en veranderingen in luchtstromingspatronen (*laag* ('l') en *hoog* ('h')). Later werd een extra scenario – Whdry – toegevoegd, omdat het meest extreme scenario (Wh) de natste winter- en droogste zomerafvoeren niet kon representeren.

De zes 'basis' scenario's van KNMI'23 zijn gebaseerd op toekomstige uitstootscenario's (*laag* ('L'), *hoog* ('H') en *gematigd* ('G') en een *nat* ('n') of *droog* ('d') scenario.

Het nieuwe Hd/Hn scenario is in termen van emissies en mate van opwarming vergelijkbaar met het oude Wh(dry) scenario. Het nieuwe Ld/Ln scenario (Parijs) is in termen van emissies veel positiever dan het oude Gl scenario. Vergeleken met KNMI'14 spannen de gekozen uitstootscenario's dus een grotere bandbreedte op in emissies en daarmee in klimaatverandering, waarmee een robuustere risicoafweging gemaakt kan worden. Het nieuwe lage scenario ligt waarschijnlijk te laag in termen van uitstoot, omdat uitstoot van andere bronnen, zoals het ontdooien van permafrost, niet is meegenomen in de klimaatscenario's.

Tijdreekstransformatie – bias-correctie (quantile mapping)

In plaats van het representeren van het toekomstige klimaat door middel van reeksen gebaseerd op metingen, wordt in de nieuwe scenario's het klimaat gerepresenteerd door synthetische reeksen (via de zogenaamde quantile mapping aanpak¹). Hierdoor zijn veranderingen in persistentie (zoals multi-jaar droogtes), in frequentie en intensiteit, die een grote impact kunnen hebben op de hevigheid van hoogwaters en droogtes, aanwezig in de toekomstige scenario's.

¹ Quantile mapping wordt vaak toegepast om systematische biases in klimaat simulaties te corrigeren. Bij quantile mapping worden de kwantielen (bijv. 10^e, 25^e, 50^e, 75^e, 90^e) van zowel waargenomen als gemodelleerde data bepaald. De modeldata kwantielen worden zo aangepast dat ze overeenkomen met die van de meetdata. De aangepaste kwantielen worden toegepast op de hele modeldataset om de bias-gecorrigeerde waarden te krijgen.

HBV – Wflow_sbm

De afvoertijdreeksen voor de KNMI'14 scenario's zijn bepaald met een hydrologisch *lumped* HBV model. Een *lumped* model neemt echter de grote ruimtelijke heterogeniteit in het stroomgebied niet mee en kan dus ook niet profiteren van data met hoge resolutie voor o.a. hoogte, bodemtype en meteorologie. Zijrivieren zijn bijvoorbeeld maar met één punt geschematiseerd. De KNMI'23 afvoerscenario's zijn berekend met het hydrologische model *wflow_sbm*. Dit nieuwe model heeft veel hogere resoluties en kan daardoor rekenen met veel gedetailleerdere randvoorwaarden dan het oude HBV model. Daarom worden de uitkomsten van het *Wflow_sbm* betrouwbaarder geacht.

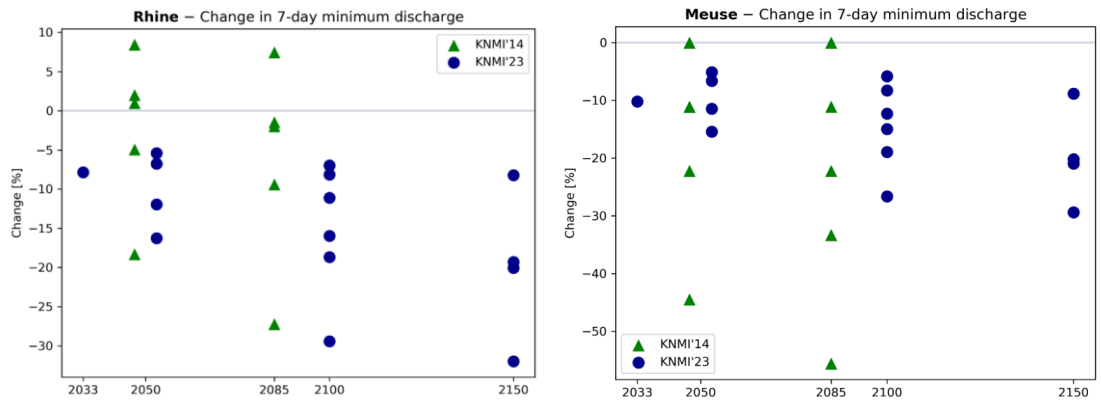
2.3 Vergelijking van KNMI'23 met KNMI'14 afvoerscenario's

In deze paragraaf wordt een samenvatting gegeven van de vergelijking tussen de KNMI'23 afvoerscenario's en die van KNMI'14, zoals gepresenteerd in Buitink et al. (2023). We richten ons in de vergelijking hier op minimum en maximum afvoeren, omdat die van belang zijn voor de stresstests droogte en doorvaarthoogte. Voor een uitvoerige vergelijking wordt verwezen naar Buitink et al. (2023). Omdat er verschillen zijn in de methodiek tussen de nieuwe en oude scenario's en de referentieperiode niet gelijk is, zoals hierboven beschreven, kunnen enkel de trend, snelheid van de verandering en de onderlinge samenhang van de verschillende scenario's met elkaar vergeleken worden (uitgedrukt in procentuele verandering ten opzichte van de referentie). In de onderstaande figuren is steeds de mediaan van de geprojecteerde veranderingen voor een specifiek scenario en een bepaalde tijdshorizon gepresenteerd.

Figuur 2-2 toont de verandering in de 7-daags minimum² afvoer voor de Rijn en de Maas (ten opzichte van de referentie). Dit is een maat voor laagwater, zodat de verschillende scenario's vergeleken kunnen worden. In KBN werken we niet met één "laagwater-afvoer", maar met meerdere afvoerniveaus en het aantal dagen dat die voorkomen of worden onderschreden (zie de volgende hoofdstukken). In de KNMI'14 scenario's zijn voor de 7-daags minimum afvoer voor de Rijn nog verschillen te zien in de richting van verandering (er zijn scenario's met zowel een toename als afname), terwijl voor KNMI'23 alle scenario's een kleinere spreiding vertonen en het in alle scenario's droger wordt. De nieuwe scenario's laten voor de Rijn dus meer overtuigend dan de oude zien dat de lage afvoeren verder gaan afnemen. Tot 2100 is de afname in 7-daags minimum afvoer voor de meest extreme scenario's van zowel KNMI'14 als KNMI'23 ongeveer even groot.

Voor de Maas leiden zowel alle KNMI'14 als alle KNMI'23 afvoerscenario's tot een afname in de 7-daagse minimum afvoer. In de KNMI'23 scenario's is de spreiding echter flink kleiner en is een kleinere afname zichtbaar. Volgens de nieuwe scenario's zou de toekomstige droogte voor de Maas dus minder extreem kunnen zijn.

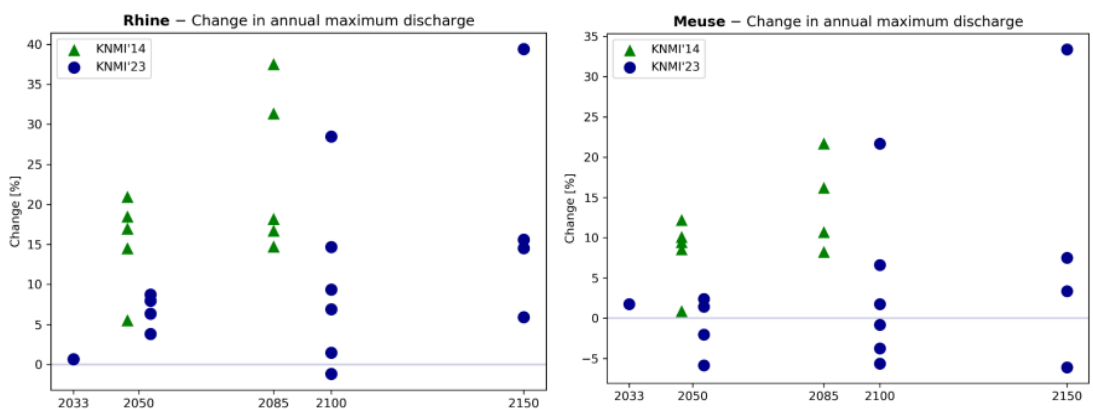
² Deze parameter wordt bepaald als de laagste waarde binnen het jaar van het gemiddelde over 7 achtereenvolgende dagen. Het is een hydrologische statistieke maat die vaak door hydrologen wordt gebruikt, zo ook door Buitink et al. (2023) en bijv. Stahl et al. (2022).



Figuur 2-2 De verandering in de 7-daags minimum afvoer voor de Rijn (links) en de Maas (rechts) voor de verschillende KNMI'14 en KNMI'23 afvoerscenario's (Bron: Buitink et al., 2023).

Figuur 2-3 toont de verandering in de jaarlijkse maximale afvoer voor de Rijn en de Maas. Voor de Rijn is de toename in maximale afvoer voor de KNMI'23 scenario's voor zichtjaar 2100 kleiner dan voor de KNMI'14 scenario's voor 2085. Deze maximale toename in de KNMI'14 scenario's voor 2085 wordt in de nieuwe scenario's pas in 2150 bereikt. Volgens de nieuwe scenario's lijken extreme toenames in maximale afvoer op een later moment bereikt te worden ten opzichte van de oude scenario's. Er lijkt dus meer tijd te zijn om ons aan te passen aan hoge afvoeren.

De KNMI'23 scenario's voor de Maas projecteren een relatief kleinere maximale jaarafvoer dan de KNMI'14 scenario's voor het jaar 2050. Dit suggereert dat de hogere afvoeren wellicht minder toenemen in de nabije toekomst. Alle KNMI'14 scenario's laten een toename in maximale afvoer zien, terwijl voor KNMI'23 er ook scenario's zijn waarbij een afname te zien is. Bij de nieuwe scenario's is er dus meer variatie en dus een grotere bandbreedte waarbinnen de afvoer kan veranderen. De toename in afvoer voor het meest extreme scenario van KNMI'14 voor 2085 is vergelijkbaar met de toename van het meest extreme scenario van KNMI'23 voor 2100. De toename van de maximale afvoer voor KNMI'23 is in 2150 aanzienlijk hoger dan in 2085 en 2100, dus dit suggereert een continue toename in maximale jaarafvoer voor de natte scenario's.



Figuur 2-3 De verandering in de jaarlijkse maximale afvoer voor de Rijn (links) en de Maas (rechts) voor de verschillende KNMI'14 en KNMI'23 afvoerscenario's (Bron: Buitink et al., 2023).

3 Stresstest droogte Rijntakken

In 2020 is een stresstest uitgevoerd voor het project Klimaatbestendige Netwerken (KBN) toegespitst op het Hoofdvaarwegennetwerk (HVWN) om de impact van droogte op de scheepvaart te bepalen (De Jong, 2020b). Onderdeel van deze studie was het bepalen van de vaarkosten per dag voor enkele karakteristieke afvoerniveaus. Vervolgens zijn deze resultaten gebruikt om uit te rekenen wat de vaarkosten zouden zijn in karakteristieke droge jaren in klimaatscenario's met een variabele afvoer, samengesteld uit de afvoerniveaus. De KNMI'14 scenario's die hiervoor gebruikt werden zijn:

- Het huidige klimaat (Ref)
- GI_2050
- GI_2085
- WHdry_2050
- WHdry_2085

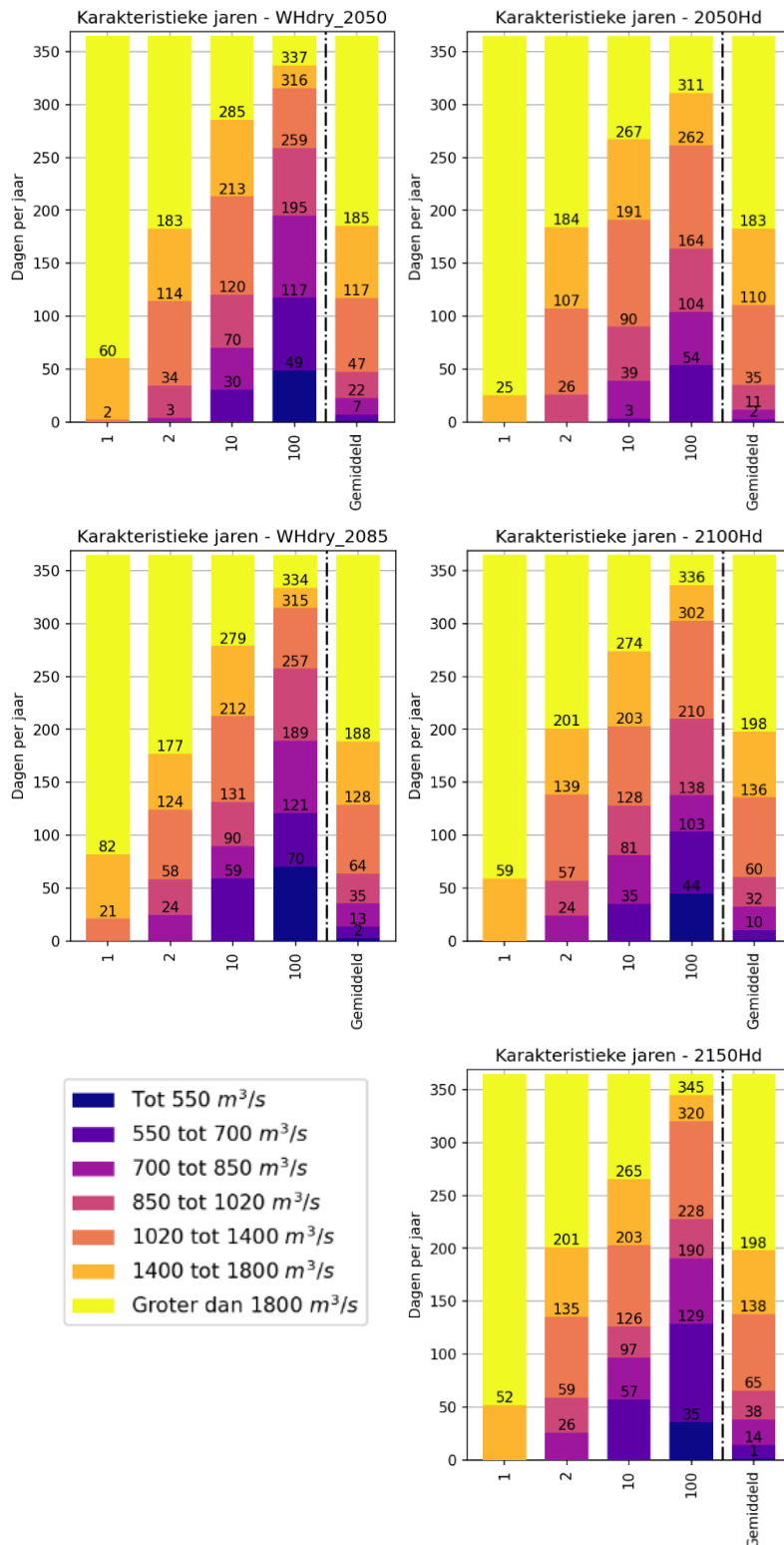
Door de publicatie van de nieuwe klimaatscenario's eind 2023, rijst de vraag of deze stresstest geactualiseerd moet worden of dat de huidige resultaten volstaan. In dit hoofdstuk zal een deel van de stresstest herhaald worden met de nieuwe meest extreme scenario's in termen van droogte (2050Hd, 2100Hd en 2150Hd) en worden deze vergeleken met de meest extreme KNMI'14 scenario's (Whdry_2050 en Whdry_2085). In de onderstaande paragrafen worden kort de te doorlopen stappen toegelicht.

3.1 Karakteristieke droge jaren

Eerder is voor het KBN-onderzoek geanalyseerd hoe karakteristieke droge jaren van verschillende KNMI'14 scenario's zijn opgebouwd uit de 5 afvoerniveaus bij Lobith: 700, 850, 1020, 1400 en 1800 m³/s (De Jong, 2019). In een later stadium is hier een afvoerniveau van 550 m³/s aan toegevoegd (Van der Mark & Van den Hoek, 2023). Deze analyse is opnieuw uitgevoerd voor de nieuwe scenario's 2050Hd, 2100Hd en 2150Hd. In Figuur 3-1 is de opbouw van de karakteristieke droge jaren voor deze drie nieuwe scenario's en voor de oude scenario's WHdry_2050 en WHdry_2085 weergegeven. Op de horizontale as staat de terugkeertijd van onder andere een droog jaar dat eens in de 10 jaar optreedt (T10) en een extreem droog jaar dat eens in de 100 jaar optreedt (T100). Ook is het gemiddelde jaar in elk klimaatscenario opgenomen. In Appendix A zijn zowel de tabel met de verschillende karakteristieke jaren als de figuren van de terugkeertijden van de verschillende afvoerniveaus voor alle vijf de klimaatscenario's weergegeven.

Uit Figuur 3-1 wordt duidelijk dat WHdry_2050 en 2050Hd voor T1, T2 en het gemiddelde jaar behoorlijk overeenkomen. Voor de hogere terugkeertijden is het nieuwe scenario 2050Hd daarentegen een stuk minder extreem dan het oude WHdry_2050 scenario. Wanneer de karakteristieke droge jaren van WHdry_2085 vergeleken worden met die van 2100Hd, is te zien dat het nieuwe scenario (voor vooral de hogere terugkeertijden) minder extreem is qua droogte. Het scenario 2150Hd komt meer in de buurt van het oude WHdry_2085 scenario. Hieruit blijkt dat de richting van de verandering voor de Rijntakken nog steeds hetzelfde is (het zal droger worden, wat ook bleek uit Figuur 2-2) en dat grotere extremen in lage Rijnafvoeren nog steeds realistisch zijn in de toekomst, maar dat ze zich waarschijnlijk verder in de toekomst zullen voordoen. Opgemerkt moet worden dat het aantal dagen dat de afvoer minder is dan 550 m³/s voor 2150Hd lager ligt dan voor 2100Hd. Dit betekent niet gelijk dat het in 2150 minder extreem wordt. De drempelwaarde van 550 m³/s is erg laag, waardoor je een kleine sample size krijgt, die gevoeliger is voor variabiliteit.

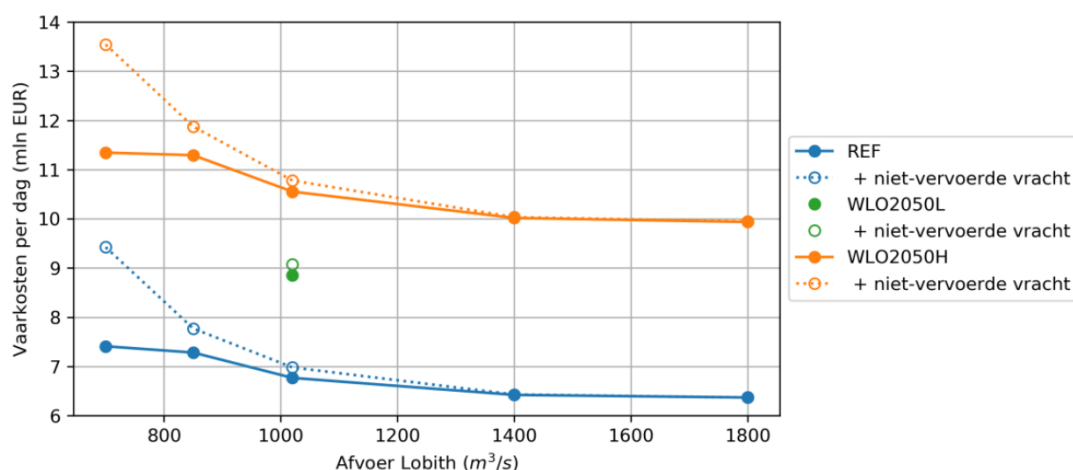
Wanneer je in plaats van 550 m³/s voor bijvoorbeeld 560 m³/s kiest, zou dit al relatief grote veranderingen kunnen veroorzaken. Als er gekeken wordt naar het aantal jaar in de totale reeks van 240 jaar waarbij er een afvoer lager dan 550 m³/s optreedt, dan is dit voor 2100Hd 6 keer en voor 2150Hd 14 keer. Het wordt dus nog steeds droger.



Figuur 3-1 Opbouw van karakteristieke droge jaren in de klimaatscenario's WHdry_2050 en WHdry_2085 (linker figuren) en de klimaatscenario's 2050Hd, 2100Hd en 2150Hd (rechter figuren) met zes afvoerniveaus bij Lobith.

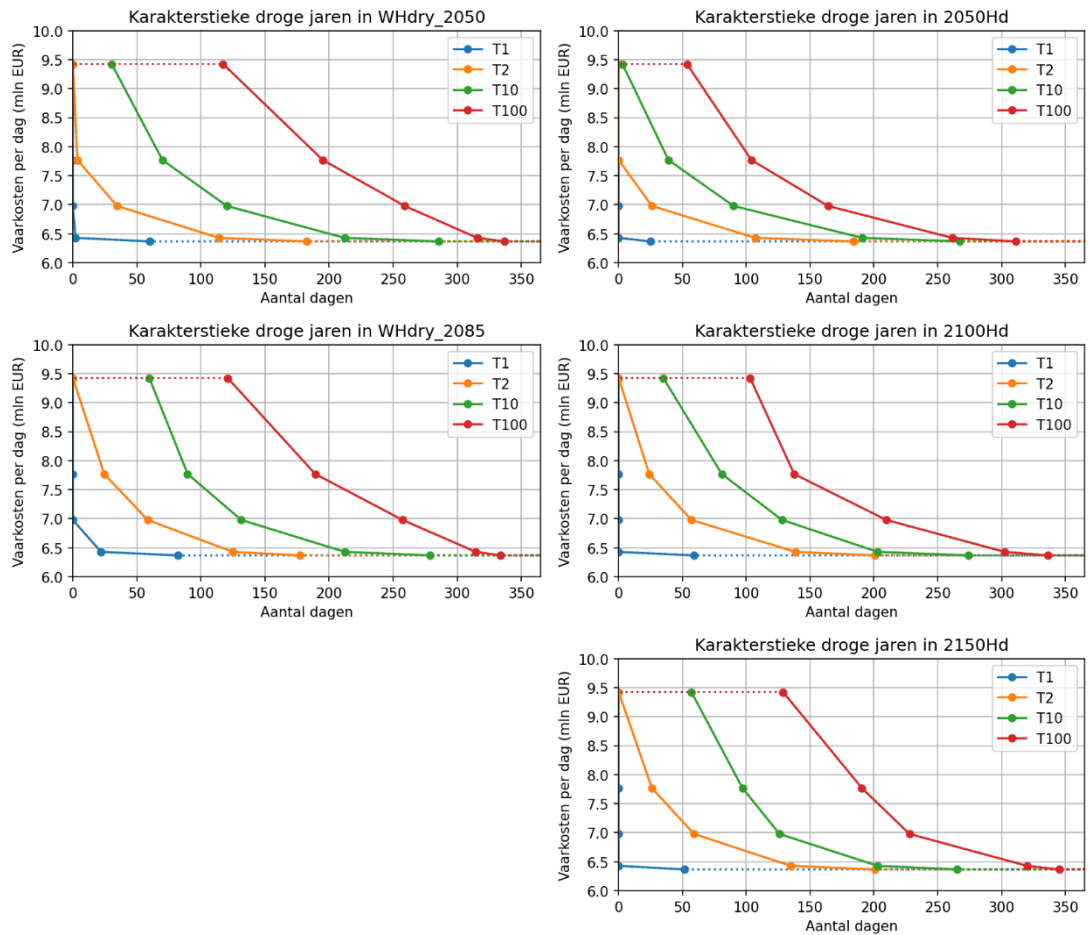
3.2 Bepaling van de vaarkosten

Door net als in De Jong (2020b) de opbouw van de karakteristieke jaren, samengesteld uit de afvoerniveaus, te combineren met de vaarkosten per afvoer (zie Figuur 3-2), kan de onderschrijdingskromme van vaarkosten opgesteld worden (zie Figuur 3-3). Op de horizontale as van Figuur 3-3 staat voor elk karakteristiek droog jaar het aantal dagen gegeven dat bij een afvoerniveau hoort en op de verticale as staan de bijbehorende vaarkosten (inclusief niet-vervoerde vracht). Elke onderschrijdingskromme bestaat uit vijf punten. Deze punten staan voor de vijf verschillende afvoerniveaus bij Lobith (700, 850, 1020, 1400 en 1800 m³/s). De afvoer van 550 m³/s is hier niet meegenomen, omdat de reactie bij afvoeren lager dan 700 m³/s niet is gemodelleerd en de kosten hiervoor dus ook niet bekend zijn (zie Figuur 3-2). Daardoor zijn de curves afgekapt bij ongeveer 9,5 mln. Euro per dag. Met name bij extreme droogte (T100) zal dit een onderschatting van de vaarkosten geven. Tussen de verschillende afvoerniveaus in Figuur 3-3 is geïnterpoleerd (doorgetrokken lijnen) en buiten de maximale waarden wordt de lijn constant geëxtrapoleerd (stippellijn).



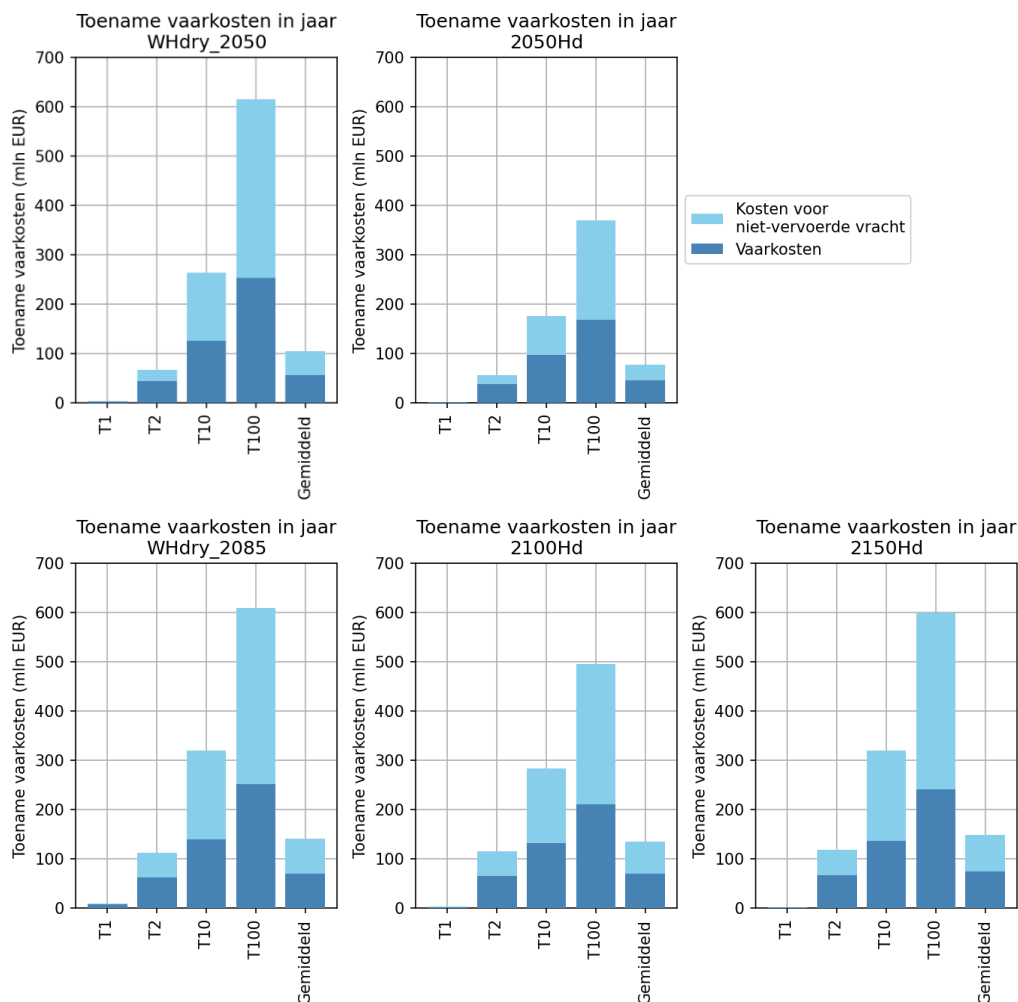
Figuur 3-2 Toename van de dagelijkse vaarkosten bij afnemende afvoer. Ter vergelijking is ook aangegeven hoeveel de vaarkosten toenemen bij economische groei (scenario's WLO2050L en WLO2050H). de gestippelde lijn staat voor de vaarkosten indien ook de kosten voor de niet-vervoerde vracht worden meegenomen (€25 per ton). Bron: De Jong (2020b).

In Figuur 3-3 is te zien dat vergeleken met WHdry_2050 vooral de krommen T10 en T100 van 2050Hd naar links schuiven op de x-as, omdat deze minder extreem zijn in droogte en dus lagere vaarkosten als gevolg hebben. De onderschrijdingskrommen van 2150Hd komen voor de verschillende terugkeertijden redelijk overeen met die van WHdry_2085.



Figuur 3-3 Onderschrijdingskromme van de vaarkosten in karakteristieke droge jaren in het klimaat WHdry_2050 en WHdry_2085 (linker figuren) en het klimaat 2050Hd, 2100Hd en 2150Hd (rechter figuren).

De totale kosten in een karakteristiek droog jaar (het oppervlak onder de grafiek) zijn weergegeven in Figuur 3-4. De vaarkosten van ruim 2 miljard euro die gemaakt worden in een 'nat' jaar waarin de afvoer nooit onder de 1800 m³/s bij Lobith komt, zijn van de totale kosten afgetrokken. Hierdoor wordt de schade aan vaarkosten ten gevolge van droogte duidelijk. Zoals verwacht ligt de toename in kosten voor 2050Hd voor T10 en T100 een stuk lager dan die van WHdry_2050. Voor T10 en T100 is het nieuwe scenario 2050Hd namelijk een stuk minder extreem dan het oude WHdry_2050 scenario (Figuur 3-1). In Figuur 2-2 lagen de scenario's WHdry_2050 en 2050Hd nog redelijk dicht bij elkaar qua verandering in 7-daags minimum afvoer. Het grote verschil in kosten tussen beide scenario's wordt veroorzaakt doordat het in Figuur 2-2 gaat om één gemiddelde minimum afvoer en dus niet over hoe vaak lage afvoeren in een jaar voorkomen. Doordat in WHdry_2050 lage afvoeren vaker voorkomen dan in 2050Hd, liggen de kosten hoger in het WHdry_2050 scenario. De toename in vaarkosten in het scenario 2150Hd is ongeveer gelijk aan de toename in het scenario WHdry_2085. Zoals eerder vermeld, blijft de richting van de veranderingen dus hetzelfde, maar zal de toename in vaarkosten volgens het nieuwe scenario wellicht minder snel verlopen. In Appendix B is de toename in vaarkosten voor het economische scenario WLO2050H voor elk van de vijf klimaatscenario's weergegeven. Deze figuren schetsen eenzelfde beeld als in Figuur 3-4 te zien is.



Figuur 3-4 Toename in vaarkosten in de huidige economie door droogte in karakteristieke droge jaren in verschillende klimaatscenario's met onderscheid in vervoerde en niet vervoerde vracht.

3.3 Conclusie en advies

Uit de bovenstaande analyse en figuren blijkt dat de richting van de verandering in de nieuwe meest droge klimaatscenario's nog steeds hetzelfde is (het zal droger worden) en dat extreme lage afvoeren nog steeds realistisch zijn in de toekomst, maar dat ze zich waarschijnlijk verder in de toekomst zullen voordoen in vergelijking tot de oude 2014 scenario's. De uitgevoerde stresstest geeft nog steeds een goed beeld van wat we voor de toekomst kunnen verwachten in het meest extreme scenario, met daarbij de toevoeging dat er meer tijd lijkt te zijn om ons aan te passen. De toename in vaarkosten in het extreme scenario richting 2150 is zeer vergelijkbaar met het oude scenario voor 2085. Ons advies is daarom om de stresstest niet te actualiseren, en de middelen in te zetten op andere onderdelen en onderzoeksvragen, zoals handelingsperspectieven voor klimaatadaptatie.

De zeer extreme lage afvoer van 550 m³/s is in de stresstest droogte Rijntakken (De Jong, 2020b) destijds niet meegenomen (nooit voorgekomen); 700 m³/s is de laagste afvoer. Tijdens de droogte van 2022 werd duidelijk dat extreem lage afvoeren wel degelijk kunnen optreden (679 m³/s gemeten). De afvoer van 550 m³/s komt in de nieuwe KNMI'23 scenario's voor alle terugkeertijden minder vaak voor dan in de oude KNMI '14 scenario's. Het is daarom niet nodig om deze afvoer toe te voegen aan de stresstest.

Mogelijk kunnen er andere (niet kwantitatief-inhoudelijke) overwegingen of nieuwe wensen zijn om toch te kiezen voor een actualisatie, uitbreiding of aanpassing van de stresstest. Onze indruk is dat actualisatie puur omwille van de nieuwe KNMI scenario's een grote inspanning is die niet tot andere inzichten of conclusies leidt. Bij een identieke uitvoering van de stresstest met als enige aanpassing de geactualiseerde onderschrijdingen per afvoerniveau, blijven de geïdentificeerde knelpunten gelijk en komen er geen nieuwe knelpunten bij later in de tijd.

4 Stresstest droogte Maas

Evenals voor de Rijntakken is voor de Maas een stresstest droogte uitgevoerd. Ten eerste zijn als onderdeel van de stresstest Maas de karakteristieke droge jaren (De Jong, 2020a) afgeleid. Vervolgens is een quick scan uitgevoerd waarin beschouwd wordt welke sluizen in de Maas het meest kwetsbaar zijn voor droogte (Van der Mark & De Jong, 2020). Voor de meest kwetsbare sluizen Born, Maasbracht en Heel is daarna nog een detailstudie uitgevoerd (De Jong & Boschetti, 2021).

Door de publicatie van de nieuwe klimaatscenario's eind 2023, rijst ook voor de Maas de vraag of deze stresstest geactualiseerd moet worden of dat de huidige resultaten volstaan. In dit hoofdstuk zal een deel van de stresstest herhaald worden met de nieuwe klimaatscenario's en worden vergeleken met de oude klimaatscenario's.

4.1 Karakteristieke droge jaren

Voor het afleiden van de karakteristieke droge jaren voor de Maas is dezelfde aanpak gehanteerd als voor het afleiden van de karakteristieke droge jaren voor de Rijntakken. De enige verschillen met de Rijn zijn:

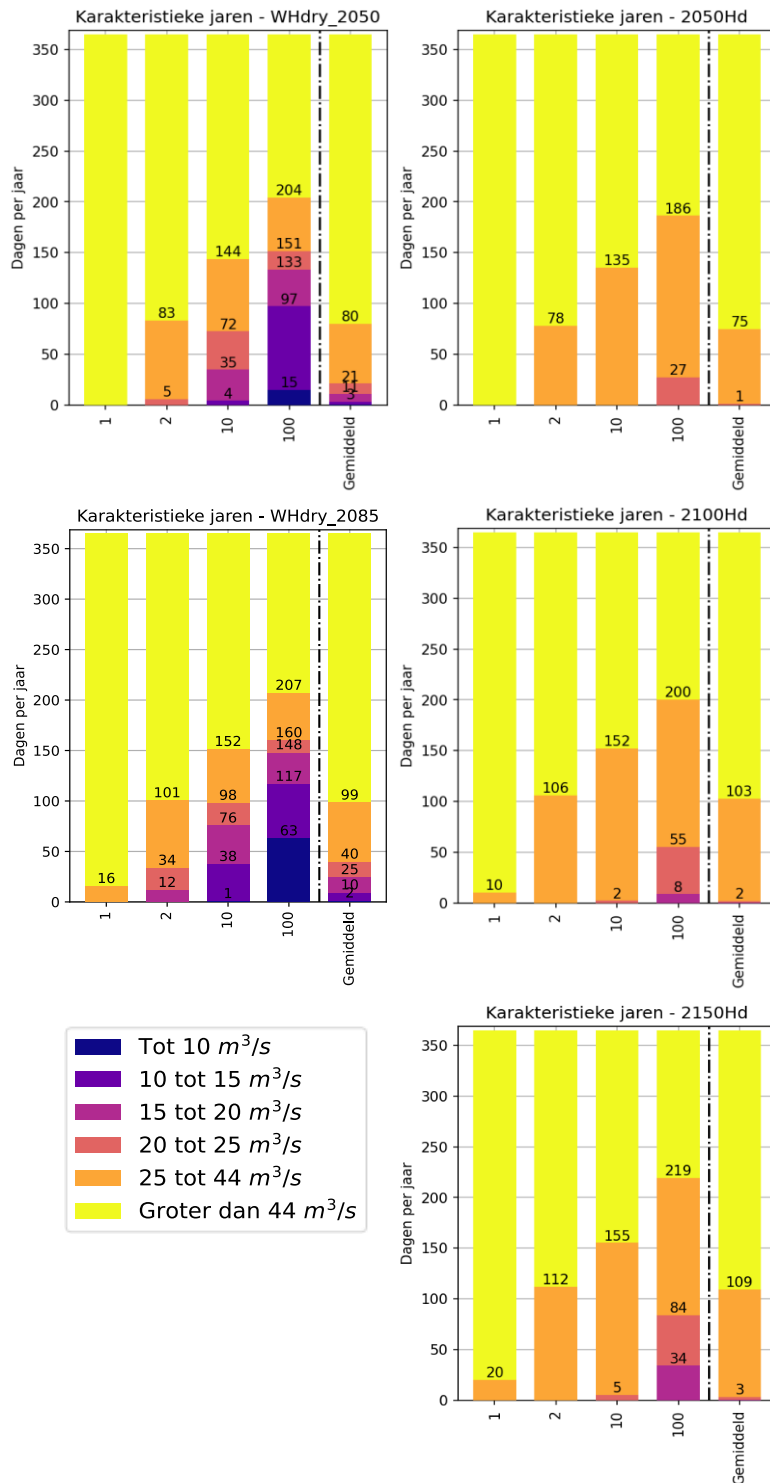
- Het gebruik van andere afvoerniveaus voor de Maas, namelijk: 10, 15, 20, 25 en 44 m³/s.
- Het aanpassen van de afvoerreeks die als input wordt gebruikt. Voor het bepalen van de karakteristieke droge jaren voor de Maas wordt gekeken naar de afvoerreeksen bij St. Pieter. De KNMI klimaatscenario's geven echter de afvoer verder bovenstrooms. Om een vertaling naar St. Pieter te maken is gebruik gemaakt van het verdrag tussen Nederland en Vlaanderen over de verdeling van het Maas-water (Vlaams-Nederlandse Werkgroep Afvoerregulering Maas, 2000).

Voor meer informatie over de keuze van de afvoerniveaus en de doorvertaling van de afvoer bij Monsin (voor KNMI'14) naar St. Pieter wordt verwezen naar De Jong (2020a). De KNMI'23 afvoeren betreffen de 'natuurlijke afvoeren' uit het hydrologisch model aan de grens zonder aftakkingen, en dus vergelijkbaar met de afvoer bij Monsin. Voor een uitgebreidere omschrijving van het bepalen van de karakteristieke droge jaren wordt verwezen naar De Jong (2020b).

De karakteristieke droge jaren voor de Maas zullen in deze paragraaf opnieuw afgeleid worden voor de nieuwe meest extreme scenario's in termen van droogte (2050Hd, 2100Hd en 2150Hd) en deze zullen worden vergeleken met de karakteristieke droge jaren voor de meest extreme KNMI'14 scenario's (Whdry_2050 en Whdry_2085).

In Figuur 4-1 is de opbouw van de karakteristieke droge jaren voor de drie nieuwe scenario's en voor de twee oude scenario's weergegeven. Op de horizontale as staat de terugkeertijd van onder andere een droog jaar dat eens in de 10 jaar optreedt (T10) en een extreem droog jaar dat eens in de 100 jaar optreedt (T100). Ook is het gemiddelde jaar in elk klimaatscenario opgenomen. In Appendix C zijn zowel de tabel met de verschillende karakteristieke jaren als de figuren van de terugkeertijden van de verschillende afvoerniveaus voor alle vijf de klimaatscenario's weergegeven.

Uit Figuur 3-1 wordt duidelijk dat het aantal dagen dat de afvoer groter is dan $44 \text{ m}^3/\text{s}$ bij de scenario's WHdry_2050 en 2050Hd behoorlijk goed overeenkomen. Voor de lagere afvoerniveaus is het nieuwe scenario 2050Hd echter een stuk minder extreem dan het oude WHdry_2050 scenario. Wanneer de karakteristieke droge jaren van WHdry_2085 vergeleken worden met die van 2100Hd en 2150Hd, is eenzelfde beeld te zien. Het aantal dagen met een afvoer groter dan $44 \text{ m}^3/\text{s}$ komt sterk overeen tussen de scenario's, maar de nieuwe scenario's zijn veel minder extreem voor de lagere afvoeren (lager dan $25 \text{ m}^3/\text{s}$), conform de verwachting vanuit Figuur 2-2. Dit geeft aan dat nog steeds verwacht wordt dat afvoeren tot $44 \text{ m}^3/\text{s}$ (waarbij al keuzes gemaakt moeten worden in de waterverdeling) in de toekomst vaker zullen voorkomen (KNMI'14 vergelijkbaar met KNMI'23), maar dat extreem lage afvoeren onder de $25 \text{ m}^3/\text{s}$ minder waarschijnlijk worden geacht in KNMI'23 dan in KNMI'14.



Figuur 4-1 Opbouw van karakteristieke droge jaren in klimaatscenario's WHdry_2050 en WHdry_2085 (linker figuren) en 2050Hd, 2100Hd en 2150Hd (rechter figuren) met vijf afvoerniveaus bij St. Pieter.

4.2 Kwetsbaarheid van sluizen

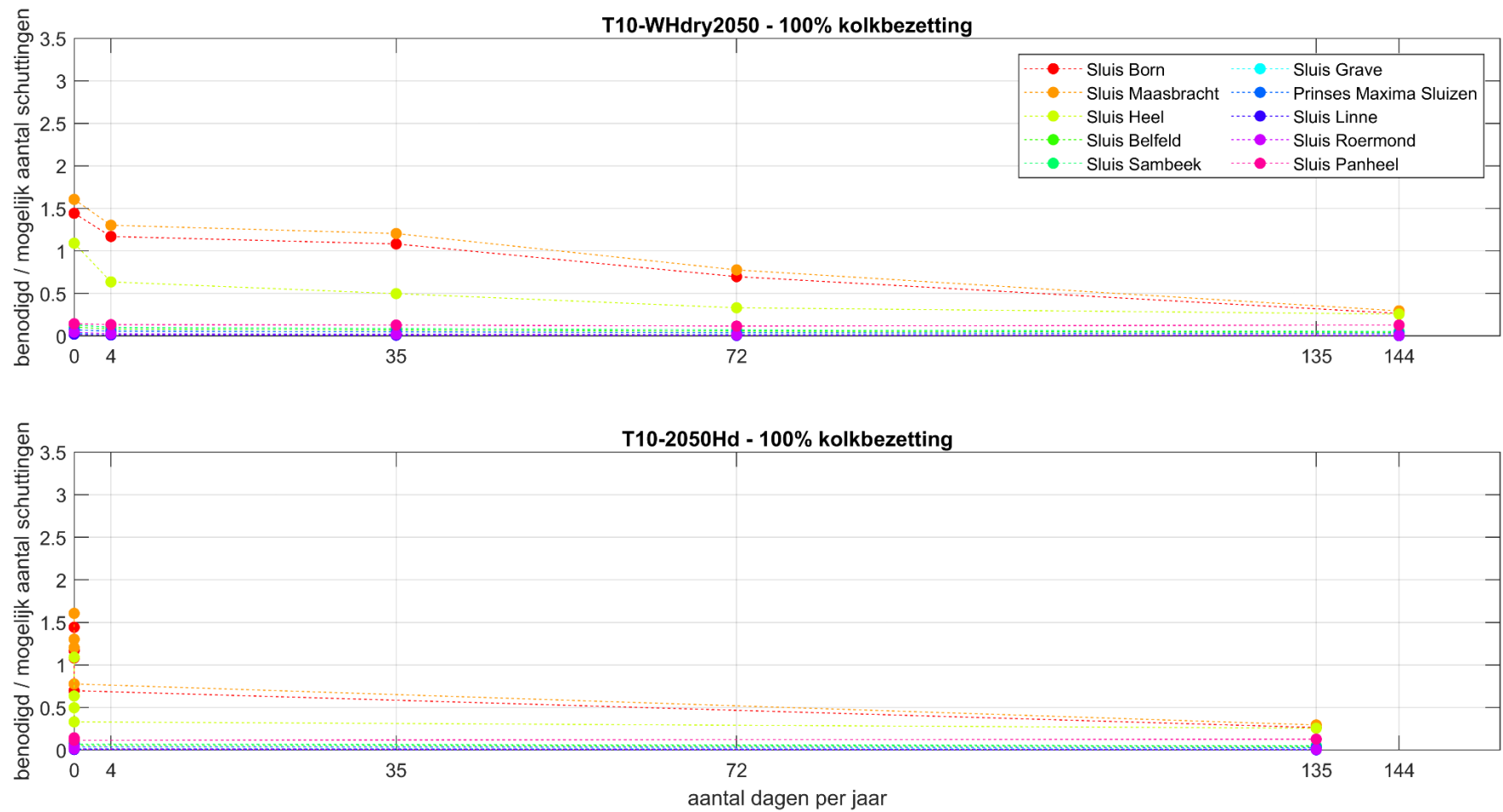
Voor de stresstest droogte Maas is via een quick scan beschouwd welke sluizen in de Maas het meest kwetsbaar zijn voor droogte (Van der Mark & De Jong, 2020). Voor elk van de vijf afvoerniveaus wordt het mogelijke aantal schuttingen vergeleken met het benodigde aantal schuttingen per week. Door een koppeling te maken tussen de vijf afvoerniveaus en het aantal dagen dat die afvoer overschreden wordt, kan in beeld gebracht worden hoeveel dagen per jaar er een probleem is in een bepaald klimaat. Dit is gedaan voor een droog jaar dat eens in de tien jaar wordt overschreden (T10), omdat dit een goede maat is voor ernstige droogte. Voor een uitgebreidere uitleg over deze aanpak wordt verwezen naar Van der Mark & De Jong (2020).

In deze paragraaf wordt dezelfde aanpak opnieuw gevolgd om de KNMI'14 afvoerscenario's (WHdry_2050 en Whdry_2085) te kunnen vergelijken met de KNMI'23 afvoerscenario's (2050Hd, 2100Hd en 2150Hd). In Figuur 4-2 is voor zowel Whdry_2050 als 2050Hd de ratio tussen benodigde en mogelijke schutcycli als functie van het aantal dagen per jaar weergegeven. Wanneer de ratio groter is dan één, is er te weinig water om alle schepen te kunnen schutten. Als we bekijken hoe vaak de ratio > 1 optreedt, dan blijkt uit Figuur 4-2 dat dit voor Whdry_2050 zo'n 52 dagen is voor sluis Maasbracht en 43 dagen voor sluis Born. In het scenario 2050Hd is de ratio nooit groter dan één. Figuur 4-3 toont dat voor Whdry_2085 de ratio voor Born zo'n 81 dagen groter is dan één en voor Maasbracht 86 dagen. Voor de nieuwe scenario's 2100Hd en 2150Hd is de ratio voor Born en Maasbracht zo'n 1 à 2 dagen per jaar groter dan één. In de nieuwe klimaatscenario's zijn de sluizen Born en Maasbracht nog steeds de meest kwetsbare complexen, maar dus een stuk minder kwetsbaar dan met gebruikmaking van de KNMI'14 scenario's. Voor de volledigheid wordt vermeld dat in de analyse (Van der Mark & De Jong, 2020) een aantal aannames gedaan is; de analyse is primair bedoeld om te onderzoeken welke sluiscomplexen het meest kwetsbaar zijn (onderlinge vergelijking); de aantallen dagen kunnen door die aannames afwijken van de realiteit.

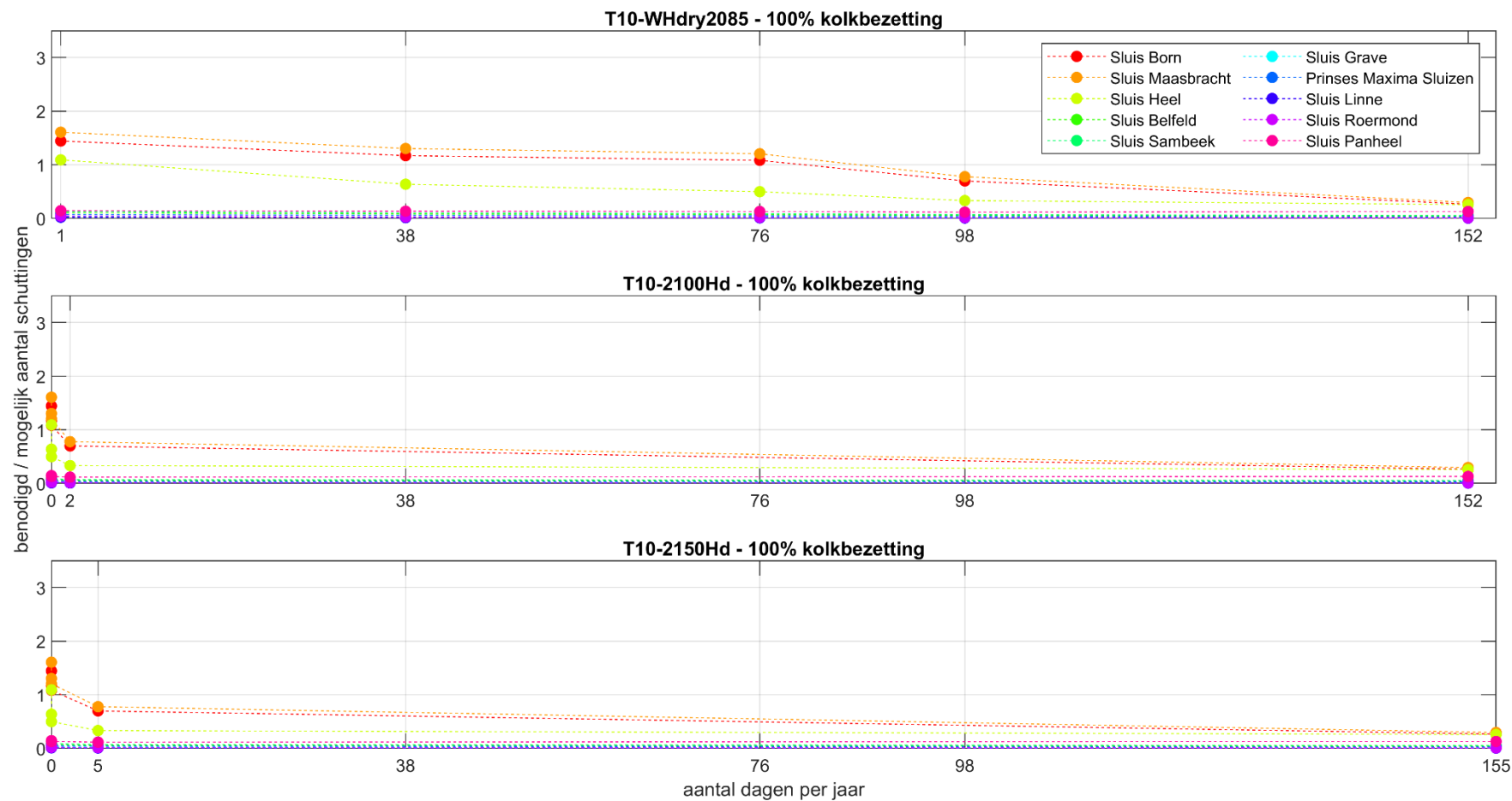
4.3 Conclusie en advies

Uit de bovenstaande analyse blijkt dat in de nieuwe scenario's nog steeds verwacht wordt dat afvoeren tot 44 m³/s (waarbij al keuzes gemaakt moeten gaan worden voor de waterverdeling) in de toekomst vaker zullen voorkomen (KNMI'14 vergelijkbaar met KNMI'23), maar dat extreem lage afvoeren onder 25 m³/s minder waarschijnlijk worden geacht in KNMI'23 dan in KNMI'14. De nieuwe scenario's zijn een stuk gematigder in termen van extreme droogte dan de oude. Dit is ook goed terug te zien in de resultaten van de quick scan naar kwetsbaarheid van sluizen; de nieuwe scenario's laten een duidelijk verminderde kwetsbaarheid zien ten opzichte van de oude scenario's. Born en Maasbracht blijven echter de meest kwetsbare sluiscomplexen voor beperkte waterbeschikbaarheid door droogte.

De quick scan naar kwetsbaarheid is in deze rapportage geactualiseerd. Ons advies zou zijn om de detailstudie voor Born, Maasbracht en Heel niet te actualiseren, aangezien de situatie niet erger wordt dan in de huidige stresstest.



Figuur 4-2 Verhouding tussen benodigd en mogelijk aantal schutcycli als functie van het aantal dagen per jaar voor de sluizen in de Maas op basis van waterbeschikbaarheid. Boven: T10-Whdry_2050, onder: T10-2050Hd. Kolkbezetting is 100%.



Figuur 4-3 Verhouding tussen benodigd en mogelijk aantal schutcycli als functie van het aantal dagen per jaar voor de sluizen in de Maas op basis van waterbeschikbaarheid. Boven: T10-WHdry_2085, midden: T10-2100Hd, onder: T10-2150Hd. Kolkbezetting is 100%.

5 Stresstest doorvaarthoogte

In 2021 is een stresstest uitgevoerd voor de doorvaarthoogte voor de containervaart in het HVWN voor hogere rivierafvoeren en zeespiegelstijging door klimaatverandering (Van der Wijk & De Jong, 2021). In deze stresstest zijn de knelpunten in het systeem geïdentificeerd voor de containervaart. Ook is gekeken naar de grootte van de impact van veranderingen in doorvaarthoogte als gevolg van klimaatverandering. In de stresstest werd gekeken naar drie verschillende gebieden:

- Grote rivieren
- Rijn-Maasmonding
- Overige wateren

Voor elk van deze gebieden wordt in de volgende paragrafen een eerste indicatie gemaakt van het effect van de nieuwe klimaatscenario's op de doorvaarthoogte.

5.1 Grote rivieren

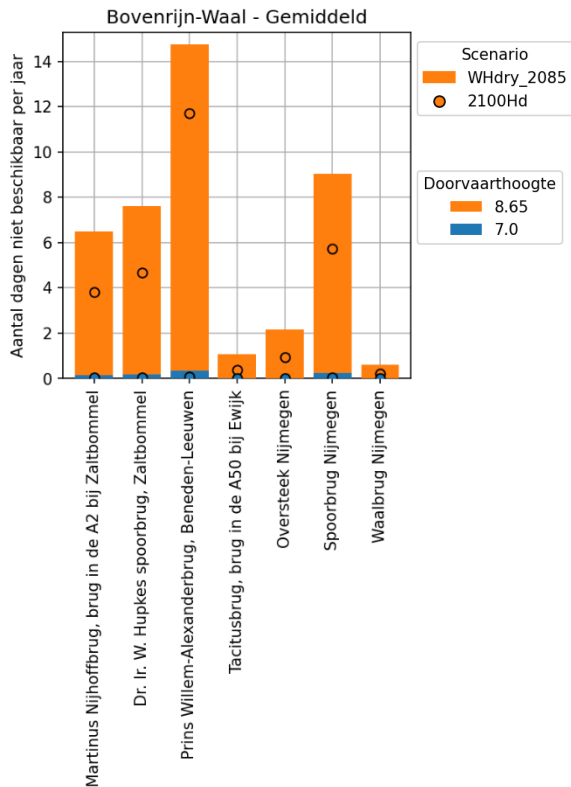
Om de kwetsbaarheid van het systeem te kunnen beoordelen zijn knelpunten bepaald om de beschikbare doorvaarthoogte aan te toetsen. Er is gebruik gemaakt van twee indicatieve waarden voor 3- en 4-laags containervaart:

- 3-laags: 7,00 meter & 8,65 meter;
- 4-laags: 9,10 meter & 11,35 meter.

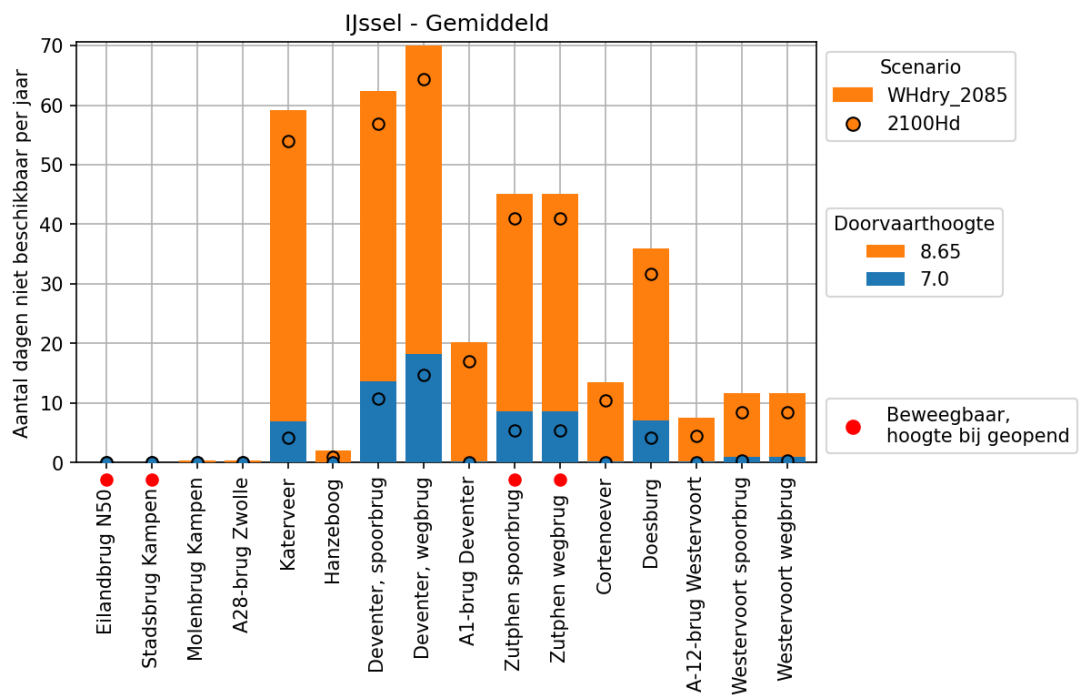
De eerste waarde is de formele eis en de tweede de door de scheepvaartsector gewenste doorvaarthoogte. Afhankelijk van de riviertak is er getoetst met de indicatieve waarden van de 3-laagscontainervaart, de 4-laagscontainervaart of beide.

In de stresstest doorvaarthoogte is destijds om praktische redenen (en voor aansluiting op eerdere stresstesten) gebruik gemaakt van het klimaatscenario Whdry_2085 om een methodiek op te zetten en een eerste indicatie te krijgen van de kwetsbaarheid van het systeem. Er is dus niet getest wat het meest extreme KNMI'14 scenario is voor de doorvaarthoogte (er was mogelijk een natter scenario). In het rapport wordt vermeld dat in een later stadium tussenstappen zouden kunnen worden toegevoegd of andere klimaatscenario's kunnen worden gebruikt.

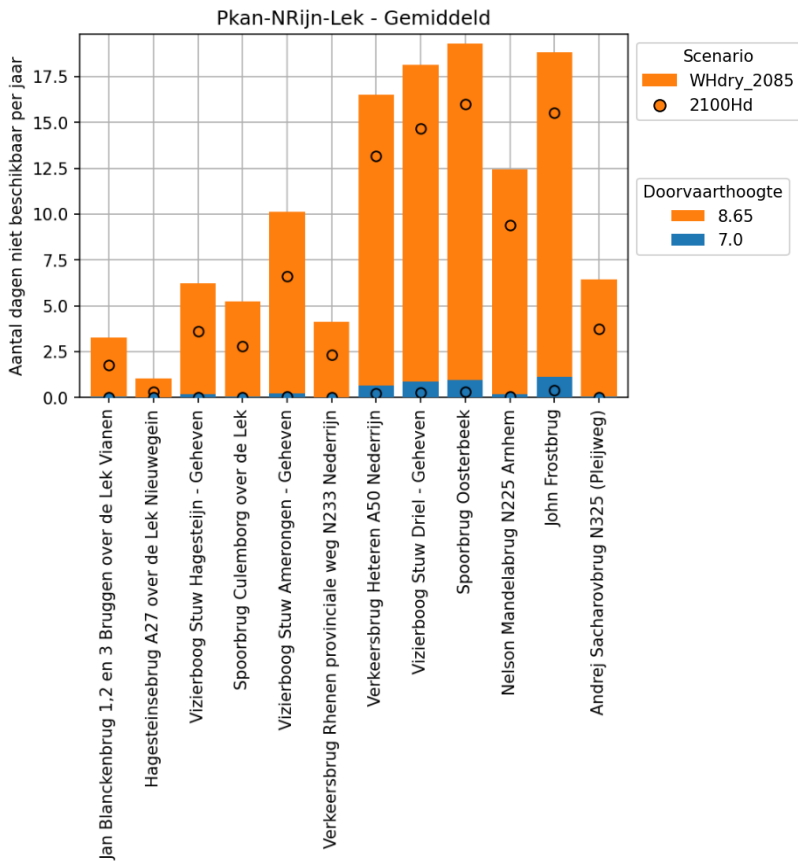
Omdat 2100Hd het meest overeenkomt met het oude Whdry_2085 scenario zullen deze twee eerst met elkaar vergeleken worden. In Figuur 5-1 tot en met Figuur 5-4 zijn de overschrijdingsduren van de doorvaarthoogte voor Whdry_2085 en 2100Hd te vinden voor een gemiddeld jaar voor de bruggen op de Waal, IJssel, Nederrijn-Lek en Maas. Voor elke riviertak is de overschrijdingsduur, het aantal dagen dat een brug niet beschikbaar is, voor het 2100Hd scenario lager dan (of gelijk aan) het oude Whdry_2085 scenario. De grootte van de impact is in het nieuwe scenario dus lager. De knelpunten zijn in het nieuwe scenario onveranderd. Dit resultaat geeft niet direct een aanleiding om de stresstest opnieuw uit te voeren.



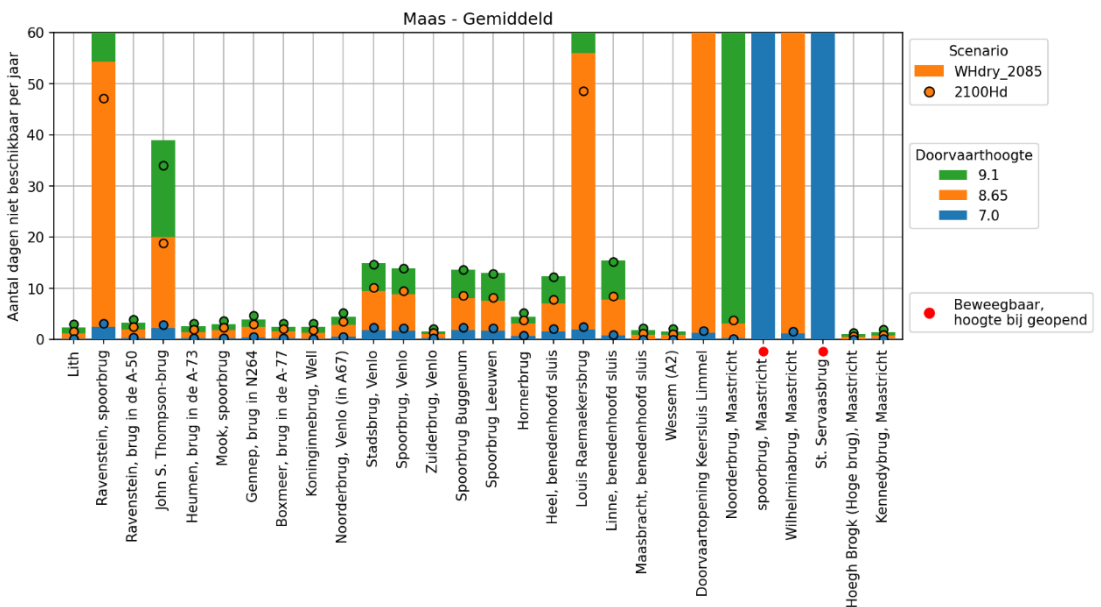
Figuur 5-1 Onderschrijdingsduur doorvaarthoogte voor de bruggen over de Waal voor gemiddelde condities voor het oude klimaatscenario Whdry_2085 (de bars) en het nieuwe klimaatscenario 2100Hd (in bolletjes).



Figuur 5-2 Onderschrijdingsduur doorvaarthoogte voor de bruggen over de IJssel voor gemiddelde condities voor het oude klimaatscenario Whdry_2085 (de bars) en het nieuwe klimaatscenario 2100Hd (in bolletjes). Gemarkeerd zijn de beweegbare bruggen, de berekening is uitgevoerd voor de beschikbare doorvaarthoogte in geopende conditie.

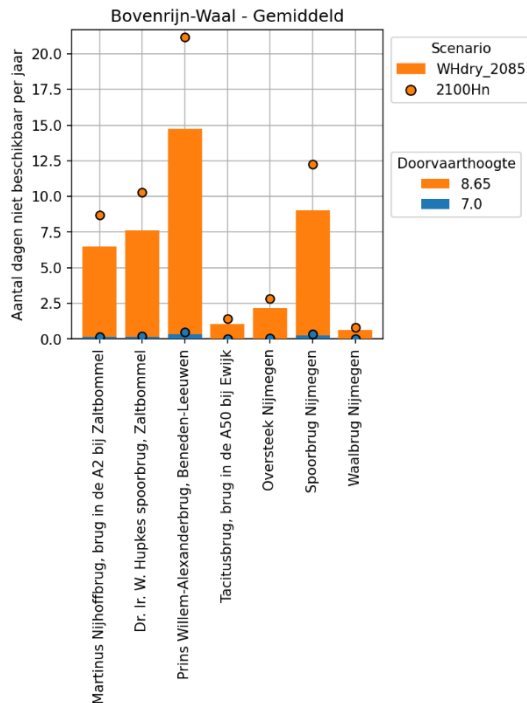


Figuur 5-3 Onderschrijdingsduur doorvaarthoogte voor de bruggen over de Nederrijn-Lek voor gemiddelde condities voor het oude klimaatscenario Whdry_2085 (de bars) en het nieuwe klimaatscenario 2100Hd (in bolletjes).

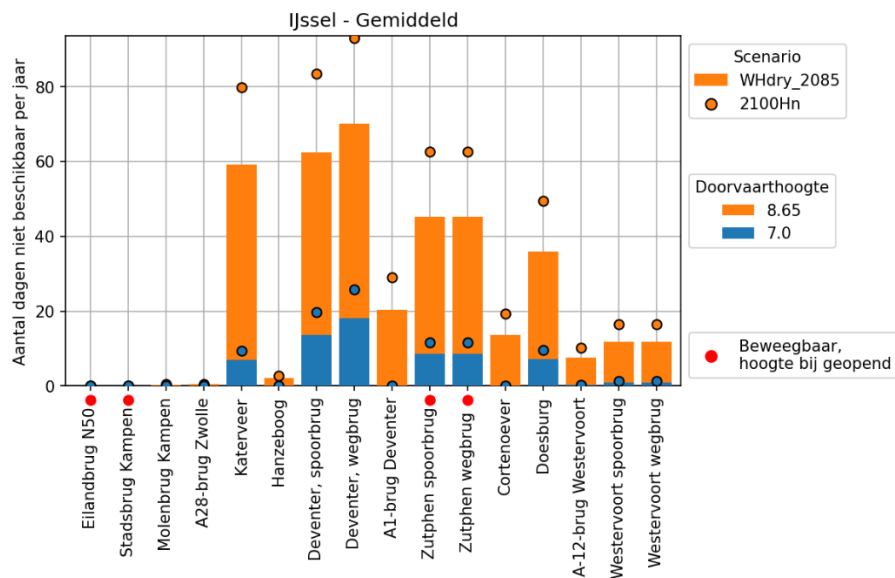


Figuur 5-4 Onderschrijdingsduur doorvaarthoogte voor de bruggen over de Maas voor gemiddelde condities voor het oude klimaatscenario Whdry_2085 (de bars) en het nieuwe klimaatscenario 2100Hd (in bolletjes). Alle balken die tot 60 reiken, lopen door tot 365 dagen: deze doorvaarthoogte is bij die bruggen nooit beschikbaar.

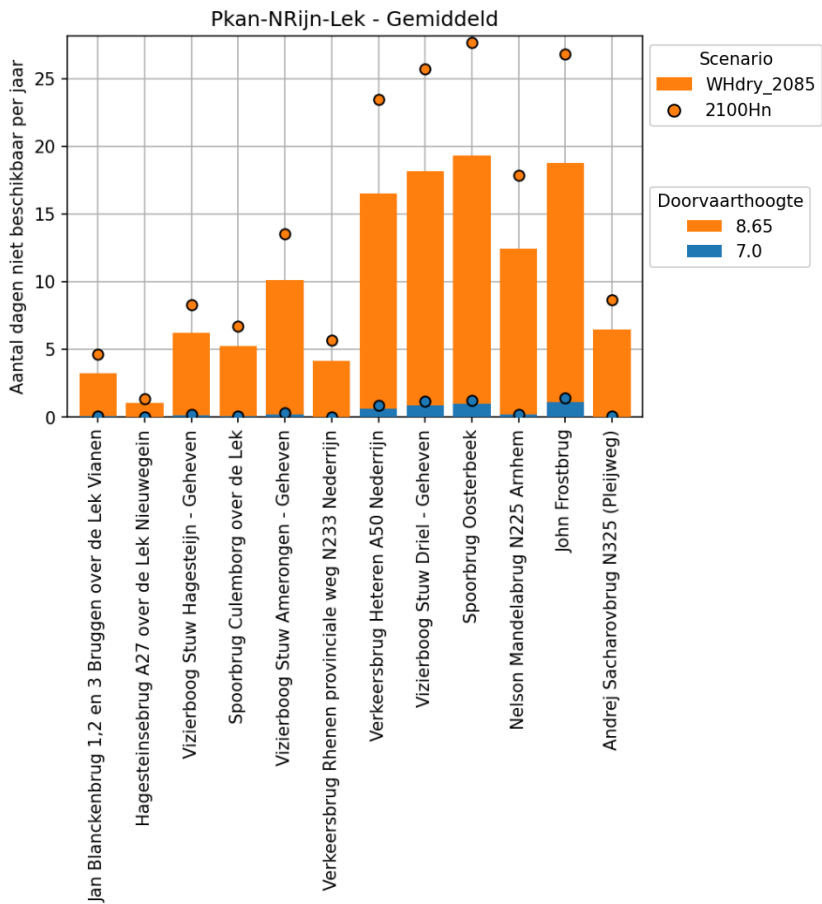
Echter is niet 2100Hd het meest natte en dus meest extreme KNMI'23 scenario voor hoogwater, maar 2100Hn. In Figuur 5-5 tot en met Figuur 5-8 zijn de onderschrijdingsduren voor het scenario 2100Hn te zien. In absolute zin zijn er verschillen zichtbaar (de herhalingstijden zijn veranderd en de onderschrijdingsduren zijn logischerwijs hoger in het 'nattere' 2100Hn scenario voor alle riviertakken), maar de knelpunten zijn niet veranderd. Voor het bepalen van de knelpunten in het systeem maakt het dus niet uit welk klimaatscenario gepakt wordt.



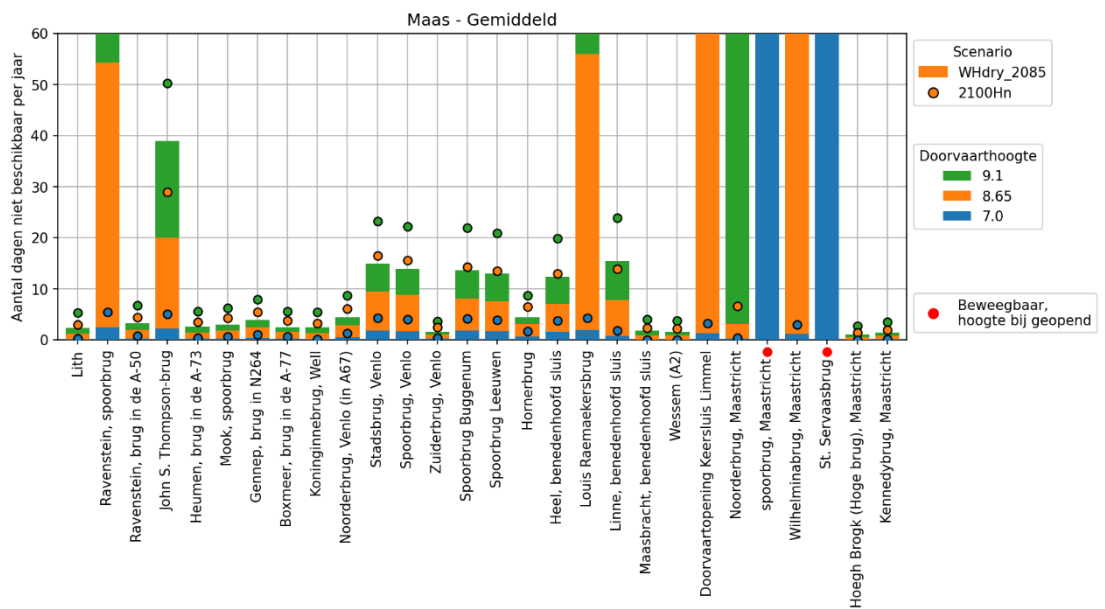
Figuur 5-5 Onderschrijdingsduur doorvaarthoogte voor de bruggen over de Waal voor gemiddelde condities voor het oude klimaatscenario Whdry_2085 (de bars) en het nieuwe klimaatscenario 2100Hn (in bolletjes).



Figuur 5-6 Onderschrijdingsduur doorvaarthoogte voor de bruggen over de IJssel voor gemiddelde condities voor het oude klimaatscenario Whdry_2085 (de bars) en het nieuwe klimaatscenario 2100Hn (in bolletjes). Gemarkerd zijn de beweegbare bruggen, de berekening is uitgevoerd voor de beschikbare doorvaarthoogte in geopende conditie.



Figuur 5-7 Onderschrijdingsduur doorvaarthoogte voor de bruggen over de Nederrijn-Lek voor gemiddelde condities voor het oude klimaatscenario Whdry_2085 (de bars) en het nieuwe klimaatscenario 2100Hn (in bolletjes).



Figuur 5-8 Onderschrijdingsduur doorvaarthoogte voor de bruggen over de Maas voor gemiddelde condities voor het oude klimaatscenario Whdry_2085 (de bars) en het nieuwe klimaatscenario 2100Hn (in bolletjes). Alle balken die niet zichtbaar zijn lopen door tot 365 dagen: deze doorvaarthoogte is bij die bruggen nooit beschikbaar.

5.2 Rijn-Maasmonding

Uit de stresstest doorvaarthoogte (Van der Wijk & De Jong, 2021) is voor de Rijn-Maasmonding gebleken dat voor de meeste bruggen het effect van zeespiegelstijging op de waterstand groter is dan de veranderingen in afvoer. We verwachten daarom dat de nieuwe afvoerscenario's (Buitink et al., 2023) geen of nauwelijks invloed zullen hebben op de doorvaarthoogte in de Rijn-Maasmonding. De invloed van zeespiegelstijging is primair van belang. In de stresstest doorvaarthoogte met zichtjaar 2085 is voor de Rijn-Maasmonding uitgegaan van 1 m zeespiegelstijging. Volgens de KNMI'14 scenario's is de maximale zeespiegelstijging in 2085 80 cm. Er is door Van der Wijk & De Jong (2021) echter 1 m toegepast, omdat er geen simulaties beschikbaar waren voor 80 cm en wel voor 100 cm.

Tabel 5-1 laat zien wat volgens de KNMI'14 en KNMI'23 scenario's de verwachte zeespiegelstijging is. Hieruit valt op te maken dat de zeespiegelstijging (bandbreedte) in de nieuwe Hd/Hn 2100 scenario's iets toeneemt ten opzichte van de oude WL/WH 2085 scenario's. We kunnen ook vaststellen dat toepassing van 1 m zeespiegelstijging in lijn ligt met de nieuwe KNMI'23 scenario's voor 2100. De stresstest doorvaarthoogte Rijn-Maasmonding is daarmee nog actueel.

Tabel 5-1. Zeespiegelstijging voor KNMI'14 en KNMI'23 scenario's. Bron: KNMI.

KNMI'14	2050				2085			
	GL	GH	WL	WH	GL	GH	WL	WH
Zeespiegelstijging bij Noordzeekust tov referentiejaar 1995	+15 tot +30 cm	+15 tot +30 cm	+20 tot +40 cm	+20 tot +40 cm	+25 tot +60 cm	+25 tot +60 cm	+45 tot +80 cm	+45 tot +80 cm
KNMI'23	2050				2100			
	Ld	Ln	Hd	Hn	Ld	Ln	Hd	Hn
Zeespiegelstijging bij Nederlandse kust tov referentieperiode 1995-2014	+24 cm (16 tot 34)	+24 cm (16 tot 34)	+27 cm (19 tot 38)	+27 cm (19 tot 38)	+44 cm (26 tot 73)	+44 cm (26 tot 73)	+82 cm (59 tot 124)	+82 cm (59 tot 124)

5.3 Overige wateren

In de eerder uitgevoerde stresstest is er van uit te gaan dat de doorvaarthoogte in deze gebieden niet noemenswaardig zal veranderen in toekomstige situaties, doordat peilen gehandhaafd zullen blijven. Er is daarom destijds in de stresstest een semi-kwantitatieve analyse uitgevoerd waarmee we nu geen vergelijking kunnen doen. Deze aanname staat in feite los van de keuze voor een klimaatscenario, en de actualisatie van de klimaatscenario's geven geen aanleiding om de aanname te herzien.

5.4 Conclusie en advies

In de stresstest doorvaarthoogte is Whdry_2085 gebruikt voor de grote rivieren om een eerste indicatie te krijgen van de kwetsbaarheid van het systeem. Het doel was destijds vooral (als quick scan) om de knelpunten vast te stellen. Er is dus niet getest wat het meest extreme scenario is voor de doorvaarthoogte.

In deze kleine studie is eerst gekeken naar de onderschrijdingsduren voor het nieuwe scenario 2100Hd, omdat dit scenario het meest overeenkomt met het oude Whdry_2085 scenario. Echter is niet 2100Hd het meest natte en dus meest extreme KNMI'23 scenario voor hoogwater, maar 2100Hn. Daarom is in deze studie ook gekeken naar scenario 2100Hn. In absolute zin zijn er verschillen tussen de verschillende scenario's, maar de knelpunten zijn overal nog hetzelfde. Voor het bepalen van de knelpunten in het systeem maakt het dus weinig uit welk klimaatscenario gebruikt wordt. Indien verdere verdieping van deze stresstest gewenst is (het was destijds een quick scan naar knelpunten), is het wel aan te bevelen om een natter en dus kritieker scenario mee te nemen, om een betere representatie van de grootte van de maximale impact te krijgen.

6 Conclusies en aanbevelingen

Algemeen

De nieuwe KNMI'23 scenario's hebben een andere referentie en methodiek dan de KNMI'14 scenario's. Een één-op-één vergelijking is lastig, omdat de veranderde methodiek ook kan zorgen voor verschillen.

De KNMI'23 scenario's zijn opgebouwd uit verschillende uitstootscenario's voor het klimaat in Nederland, namelijk *hoog* (H), *laag* (L) en *gematigd* (G). Elk uitstootscenario bestaat uit twee varianten: een *nat* (n) scenario waarin winters veel natter zullen worden en zomers licht zullen verdrogen en een *droog* (d) scenario waarin winters iets natter zullen worden en zomers flink zullen verdrogen. De verschillende KNMI'23 scenario's zijn opgesteld voor de zichtjaren 2050, 2100 en 2150.

Stresstest droogte Rijntakken

De richting van de veranderingen is in de nieuwe meest droge klimaatscenario's (Hd-scenario's) vergelijkbaar met de oude Whdry-scenario's: het zal droger worden en grotere extremen zijn nog steeds realistisch in de toekomst. Wel zullen deze extremen zich volgens de KNMI'23 scenario's later voordoen dan volgens de KNMI'14 scenario's. De eerder uitgevoerde stresstest droogte geeft nog steeds een goed beeld van wat we voor de toekomst kunnen verwachten in het meest extreme KNMI'23 scenario, met daarbij de toevoeging dat er meer tijd lijkt te zijn om ons aan te passen. De toename in vaarkosten in het extreme KNMI'23 scenario voor 2150 is zeer vergelijkbaar met het oude scenario voor 2085. Ons advies is daarom om de stresstest niet te actualiseren, en de middelen in te zetten op andere onderdelen en onderzoeksvragen, zoals handelingsperspectieven voor klimaatadaptatie.

De zeer extreme lage afvoer van 550 m³/s is in de stresstest droogte Rijntakken (De Jong, 2020b) destijds niet meegenomen (nooit voorgekomen); 700 m³/s is de laagste afvoer. Tijdens de droogte van 2022 werd duidelijk dat extreem lage afvoeren wel degelijk kunnen optreden (679 m³/s gemeten). De afvoer van 550 m³/s komt in de nieuwe KNMI'23 scenario's voor alle terugkeertijden minder vaak voor dan in de oude KNMI '14 scenario's. Het is daarom niet nodig om deze afvoer toe te voegen aan de stresstest.

Mogelijk kunnen er andere (niet kwantitatief-inhoudelijke) overwegingen of nieuwe wensen zijn om toch te kiezen voor een actualisatie, uitbreiding of aanpassing van de stresstest. Onze indruk is dat actualisatie puur omwille van de nieuwe KNMI scenario's een grote inspanning is die niet tot andere inzichten of conclusies leidt. Bij een identieke uitvoering van de stresstest met als enige aanpassing de geactualiseerde onderschrijdingen per afvoerniveau, blijven de geïdentificeerde knelpunten gelijk en komen er geen nieuwe knelpunten bij later in de tijd.

Stresstest droogte Maas

In de nieuwe KNMI'23 scenario's wordt nog steeds verwacht dat afvoeren tot 44 m³/s (waarbij al keuzes gemaakt moeten gaan worden voor de waterverdeling) in de toekomst vaker zullen voorkomen (KNMI'14 vergelijkbaar met KNMI'23), maar dat extreem lage afvoeren onder 25 m³/s minder waarschijnlijk worden geacht in KNMI'23 dan in KNMI'14. De nieuwe scenario's zijn een stuk gematigder in termen van extreme droogte dan de oude. Dit is ook goed terug te zien in de resultaten van de quick scan naar kwetsbaarheid van sluizen; de nieuwe scenario's laten een duidelijk verminderde kwetsbaarheid zien ten opzichte van de oude scenario's. Born en Maasbracht blijven de meest kwetsbare sluiscomplexen voor beperkte waterbeschikbaarheid door droogte.

De quick scan naar kwetsbaarheid is in deze rapportage geactualiseerd. Ons advies zou zijn om de detailstudie voor Born, Maasbracht en Heel niet te actualiseren, aangezien de situatie niet erger wordt dan in de huidige stresstest.

Stresstest doorvaarthoogte

In de stresstest doorvaarthoogte is Whdry_2085 gebruikt voor de grote rivieren om een eerste indicatie te krijgen van de kwetsbaarheid van het systeem. Het doel was destijds vooral (als quick scan) om de knelpunten vast te stellen. Er is dus niet getest wat het meest extreme scenario is voor de doorvaarthoogte.

In deze kleine studie is eerst gekeken naar de onderschrijdningen voor het nieuwe scenario 2100Hd, omdat dit scenario het meest overeenkomt met het oude Whdry_2085 scenario. Echter is niet 2100Hd het meest natte en dus meest extreme KNMI'23 scenario voor hoogwater, maar 2100Hn. Daarom is in deze studie ook gekeken naar scenario 2100Hn. In absolute zin zijn er verschillen tussen de verschillende scenario's, maar de knelpunten zijn overal nog hetzelfde. Voor het bepalen van de knelpunten in het systeem maakt het dus weinig uit welk klimaatscenario gebruikt wordt. Indien verdere verdieping van deze stresstest gewenst is (het was destijds een quick scan naar knelpunten), is het wel aan te bevelen om een natter en dus kritieker scenario mee te nemen, om een betere representatie van de grootte van de maximale impact te krijgen.

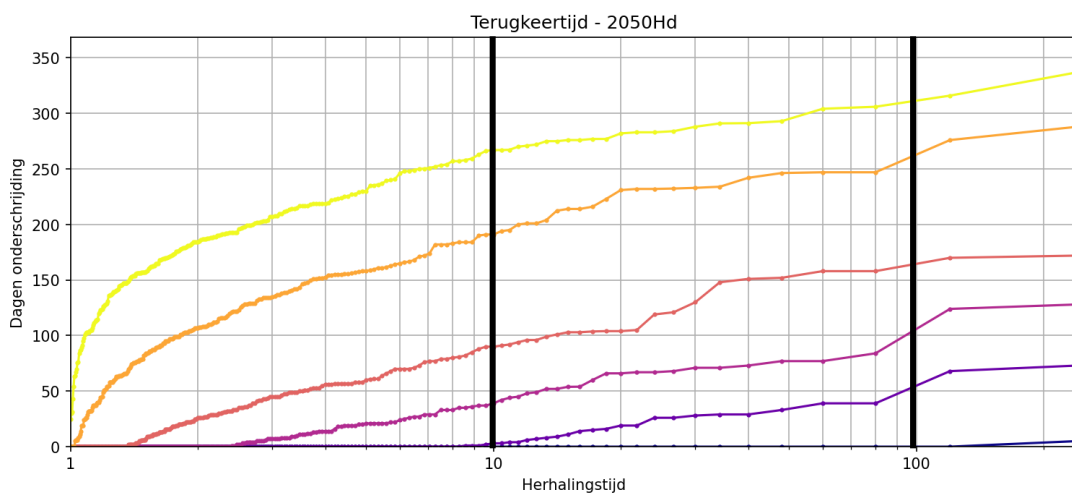
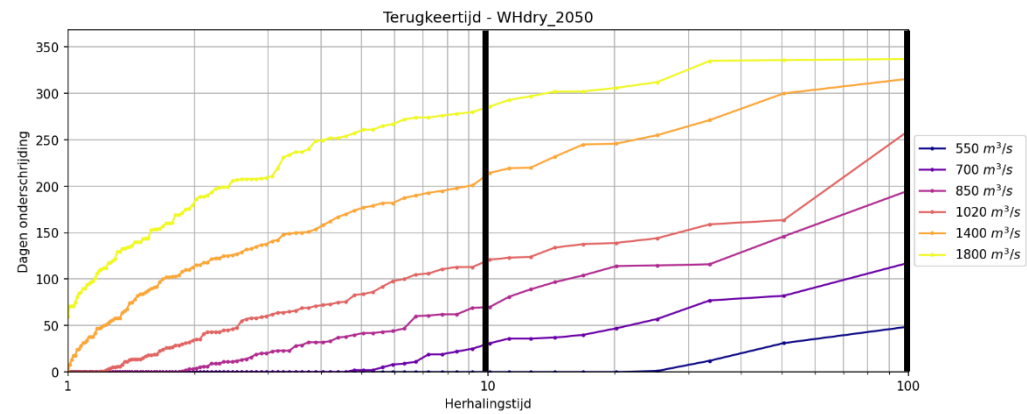
7 Referenties

- Buitink, J., Tsiokanos, A., Geertsema, T., ten Velden, C., Bouaziz, L., & Sperna Weiland, F. (2023). Implications of the KNMI'23 climate scenarios for the discharge of the Rhine and Meuse. Deltares rapport 11209265.
- De Jong, J. S. (2019). KBN: Bedreiging klimaatverandering – Beschrijving karakteristieke droge jaren met stationaire afvoerniveaus. Deltares memo 11203738-005-BGS-0002 versie 1.1, d.d. 14 december 2019.
- De Jong, J. S. (2020a). KBN – Stresstest droogte Maas – Bedreiging: Klimaatverandering. Beschrijving karakteristieke droge jaren met stationaire afvoerniveaus. Deltares memo 11205274-004-BGS-0003 versie 1.0, d.d. 18 juli 2020.
- De Jong, J. S. (2020b). Stresstest Droogte Rijntakken – Impact op de scheepvaart. Deltares rapport 11205274-004-BGS-0009, d.d. 14 december 2020.
- De Jong, J.S. & T. Boschetti (2021). Kwetsbaarheid sluizen Maas voor klimaatverandering. Onderzoek naar de sluizen Born, Maasbracht en Heel in klimaatbestendige netwerken. Deltares rapport 11205274-004-BGS-0017, 19 april 2021.
- KNMI (2023). *KNMI'23-klimaatscenario's*. Geraadpleegd van [KNMI – KNMI'23-klimaatscenario's](#).
- Stahl, K., Weiler, M., van Tiel, M., Kohn, I., Häsler, A., Freudiger, D., Seibert, J., Gerlinger, K., Moretti, G. (2022). Impact of climate change on the rain, snow and glacier melt components of streamflow of the river Rhine and its tributaries. CHR report no. I 28. International Commission for the Hydrology of the Rhine basin (CHR), Lelystad. https://www.chr-khr.org/sites/default/files/chrpublications/ASG-II_Synthese_EN_mit-Links.pdf
- Van der Mark, R. & J. De Jong (2020). Stresstest Droogte Maas – Blootstelling en kwetsbaarheid bij de sluiscomplexen. Deltares memo 11205274-004-BGS-0020 versie 1.1, d.d. 22 december 2020.
- Van der Mark, R. & Van den Hoek, A. (2023). Beschikbare vaarwegafmetingen Waal bij lage afvoeren – Klimaatbestendige Netwerken (KBN) – Hoofdvaarwegennet (HVWN). Deltares rapport 11209214-005-ZWS-0002, d.d. 2 januari 2024.
- Van der Wijk, R. & de Jong, J. S. (2021). Stresstest Doorvaarthoogte Hoofdvaarwegennetwerk – Zeespiegelstijging en rivierafvoeren. Deltares rapport 11205274-004-BGS-0023, d.d. 30 augustus 2021.
- Vlaams-Nederlandse Werkgroep Afvoerregulering Maas (2000). Bijlage gemeenschappelijk Vlaams/Nederlands besparingsscenario. WAM 96.018. uitbr

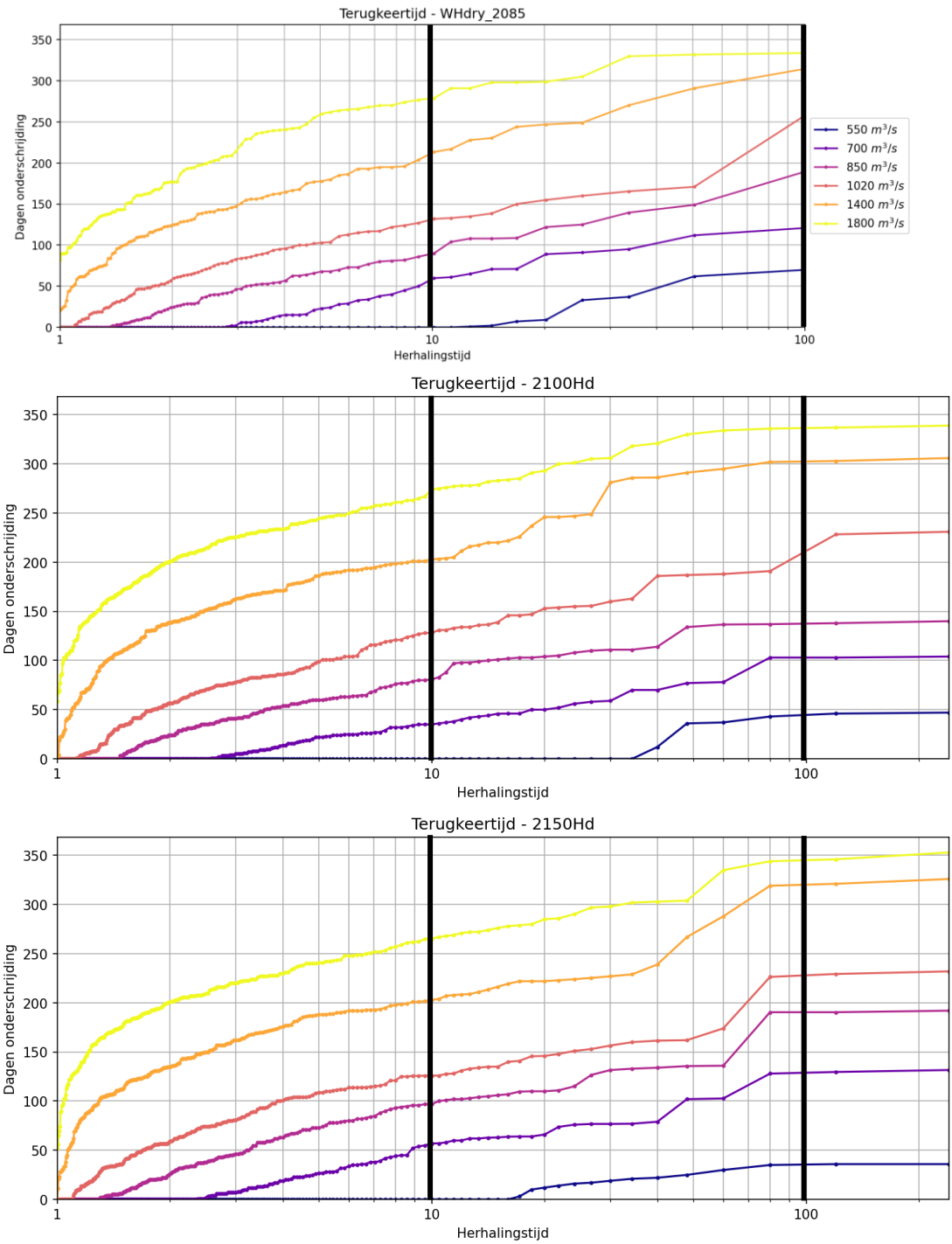
A Verschillende karakteristieke jaren en terugkeertijden Rijntakken

Tabel A.1 Aantal dagen per jaar dat een afvoerniveau wordt onderschreden bij Lobith voor verschillende klimaatscenario's en karakteristieke jaren met verschillende terugkeertijden.

Aantal dagen onderschrijding		Afvoerniveau (m ³ /s)					
Klimaatscenario	Terugkeertijden	550	700	850	1020	1400	1800
WHdry_2050 (KNMI'14)	1	0	0	0	0	2	60
	2	0	0	3	34	114	183
	10	0	30	70	120	213	285
	100	49	117	195	259	316	337
	Gemiddeld	0	7	22	47	117	185
WHdry_2085 (KNMI'14)	1	0	0	0	0	21	82
	2	0	0	24	58	124	177
	10	0	59	90	131	212	279
	100	70	121	189	257	315	334
	Gemiddeld	2	13	35	64	128	188
2050Hd (KNMI'23)	1	0	0	0	0	0	25
	2	0	0	0	26	107	184
	10	0	3	39	90	191	267
	100	0	54	104	164	262	311
	Gemiddeld	0	2	11	35	110	183
2100Hd (KNMI'23)	1	0	0	0	0	0	59
	2	0	0	24	57	139	201
	10	0	35	81	128	203	274
	100	44	103	138	210	302	336
	Gemiddeld	0	10	32	60	136	198
2150Hd (KNMI'23)	1	0	0	0	0	0	52
	2	0	0	26	59	135	201
	10	0	57	97	126	203	265
	100	35	129	190	228	320	345
	Gemiddeld	1	14	38	65	138	198



Figuur A-1 Terugkeertijden van de zes verschillende afvoerniveaus (m^3/s) bij Lobith voor klimaatscenario's WHdry_2050 en 2050Hd.



Figuur A-2 Terugkeertijden van de zes verschillende afvoerniveaus (m^3/s) bij Lobith voor klimaatscenario's WHdry_2085, 2100Hd en 2150Hd.

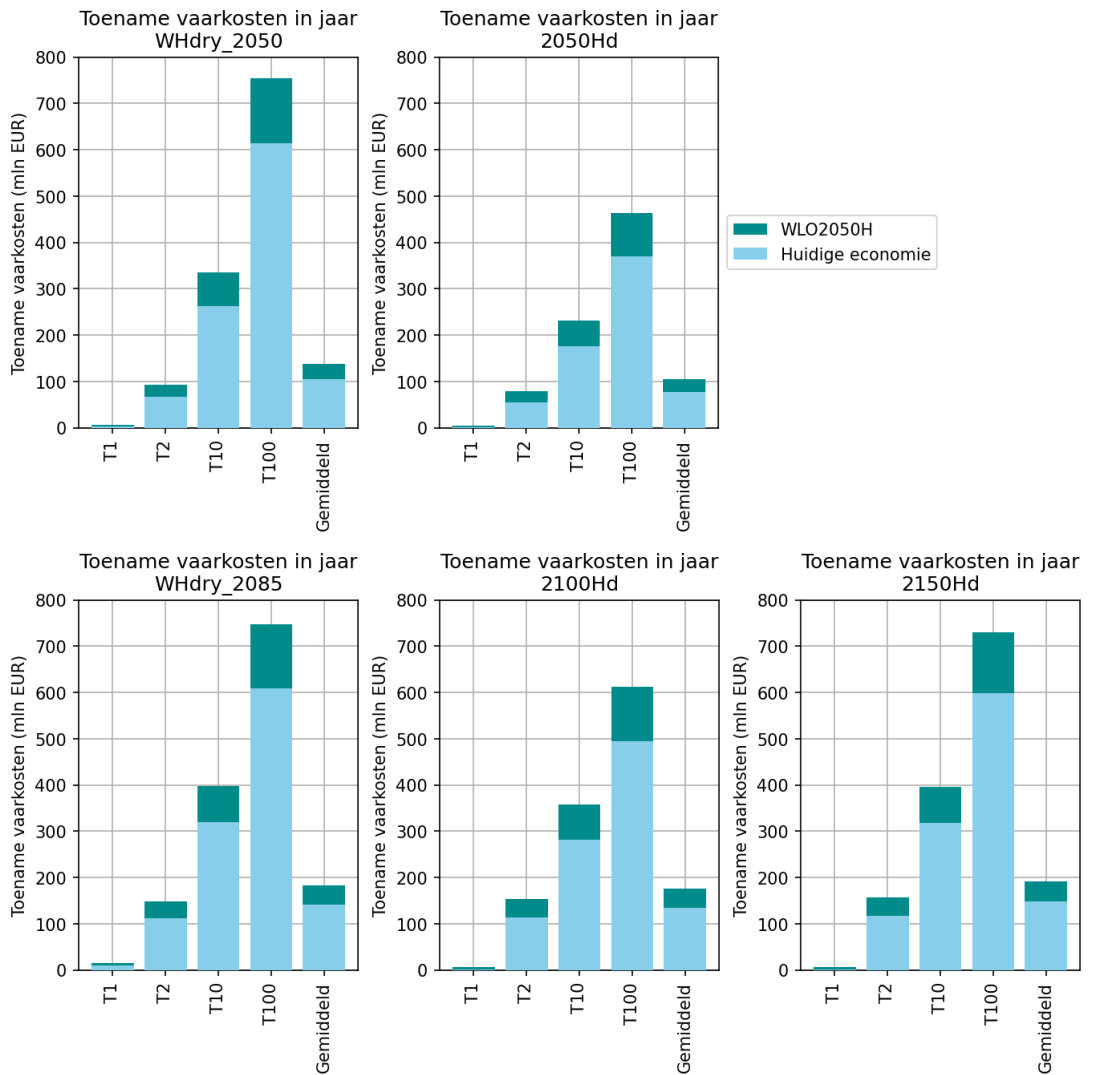
B Vaarkosten in karakteristieke droge jaren

Tabel B.1 Totale vaarkosten (in mln EUR) in alle doorgerekende scenario's.

		T1	T2	T10	T100	Gemiddeld
Huidige economie	Whdry_2050	2327	2391	2587	2939	2429
	Whdry_2085	2333	2435	2643	2933	2465
	2050Hd	2325	2379	2500	2694	2401
	2100Hd	2326	2439	2607	2819	2459
	2150Hd	2326	2442	2643	2923	2473
WLO2050H	Whdry_2050	3633	3720	3961	4380	3765
	Whdry_2085	3642	3775	4023	4373	3808
	2050Hd	3631	3705	3859	4090	3731
	2100Hd	3632	3780	3983	4238	3802
	2150Hd	3632	3783	4022	4357	3819

Tabel B.2 Toename in totale vaarkosten (in mln EUR) in alle doorgerekende scenario's t.o.v. een jaar zonder afvoeren lager dan 1800 m³/s.

		T1	T2	T10	T100	Gemiddeld
Huidige economie	Whdry_2050	2	66	263	614	104
	Whdry_2085	9	111	319	608	140
	2050Hd	1	55	175	369	77
	2100Hd	2	114	282	495	134
	2150Hd	2	117	319	599	148
WLO2050H	Whdry_2050	3	90	332	751	135
	Whdry_2085	12	146	394	743	179
	2050Hd	1	75	229	460	101
	2100Hd	2	150	353	608	172
	2150Hd	2	153	392	727	189

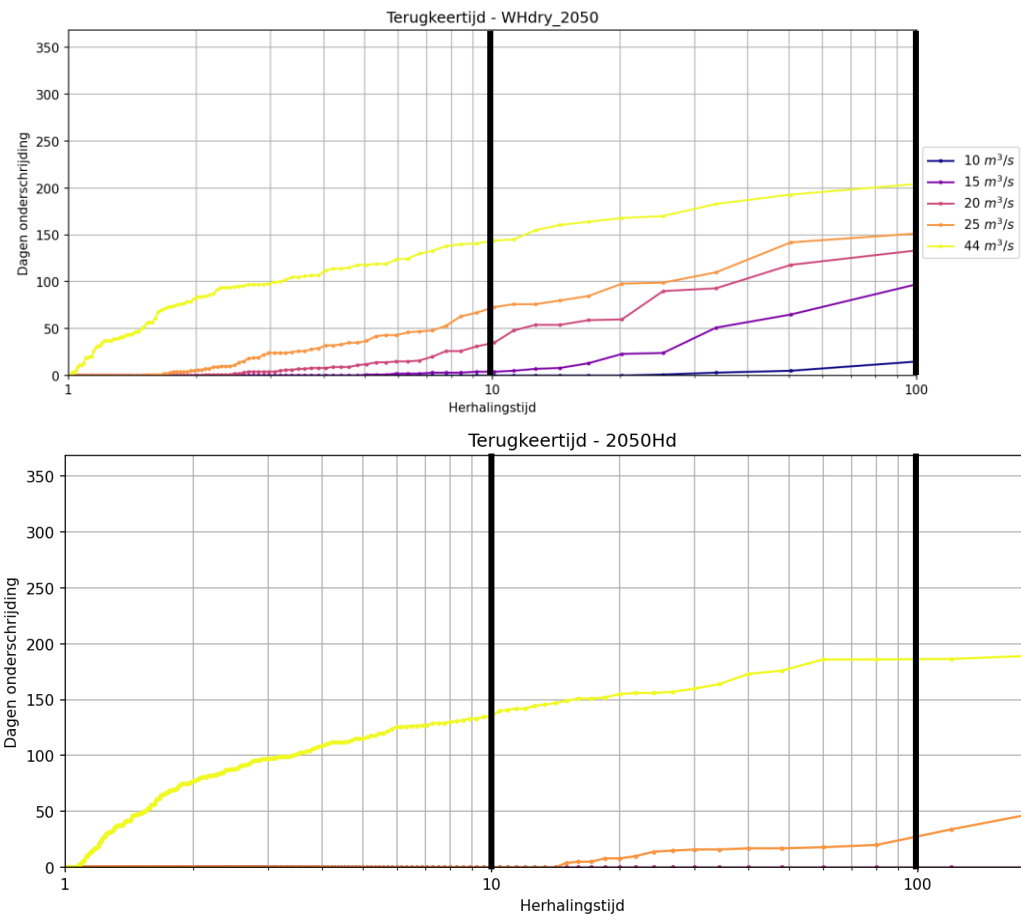


Figuur B-1 Toename in vaarkosten door droogte bij economische groei volgens economisch scenario WLO2050H in karakteristieke droge jaren in verschillende klimaatscenario's met onderscheid in vervoerde en niet vervoerde vracht.

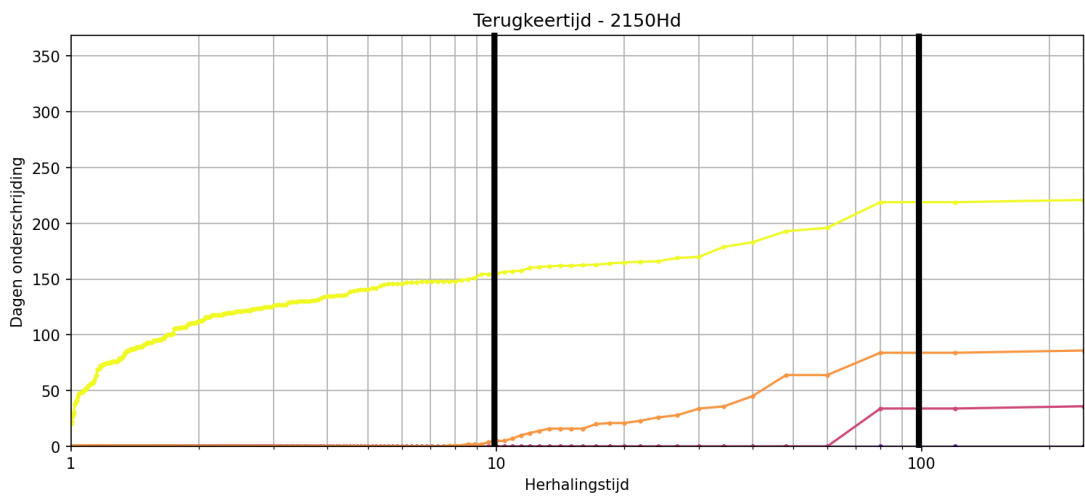
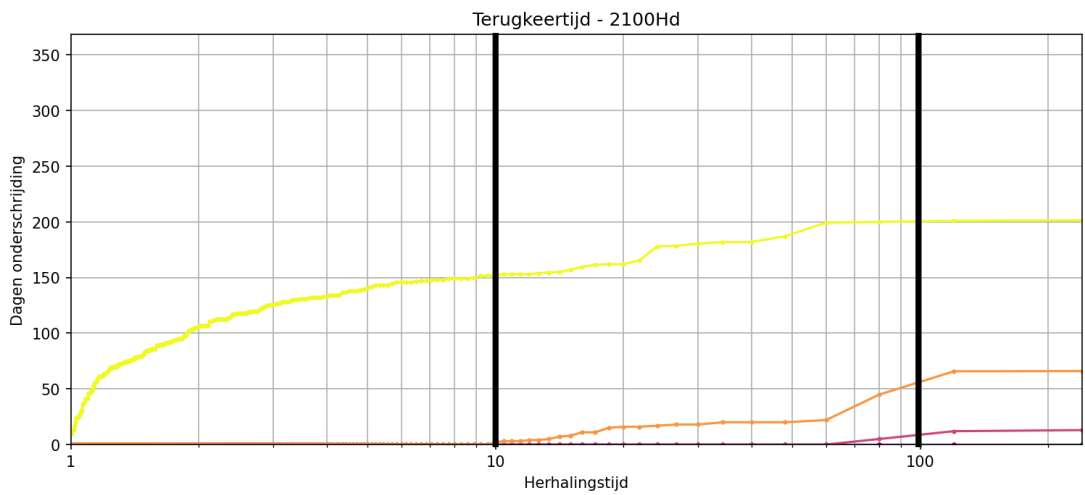
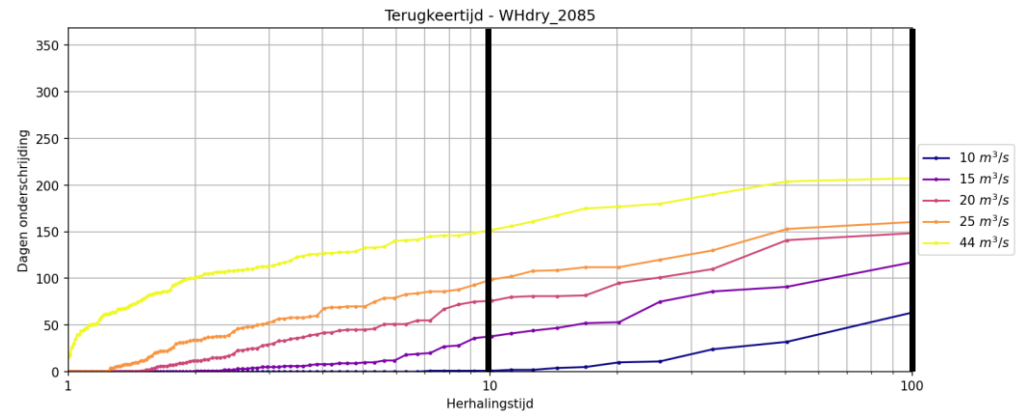
C Verschillende karakteristieke jaren en terugkeertijden Maas

Tabel C.1 Aantal dagen per jaar dat een afvoerniveau wordt onderschreden bij St. Pieter voor verschillende klimaatscenario's en karakteristieke jaren met verschillende terugkeertijden.

Aantal dagen onderschrijding		Afvoerniveau (m ³ /s)				
Klimaatscenario	Terugkeertijden	10	15	20	25	44
WHdry_2050 (KNMI'14)	1	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	5	83
	10	0	4	35	72	144
	100	15	97	133	151	204
	Gemiddeld	0	3	11	21	80
WHdry_2085 (KNMI'14)	1	0	0	0	0	16
	2	0	0	12	34	101
	10	1	38	76	98	152
	100	63	117	148	160	207
	Gemiddeld	2	10	25	40	99
2050Hd (KNMI'23)	1	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	78
	10	0	0	0	0	135
	100	0	0	0	27	186
	Gemiddeld	0	0	0	1	75
2100Hd (KNMI'23)	1	0	0	0	0	10
	2	0	0	0	0	106
	10	0	0	0	2	152
	100	0	0	8	55	200
	Gemiddeld	0	0	0	2	103
2150Hd (KNMI'23)	1	0	0	0	0	20
	2	0	0	0	0	112
	10	0	0	0	5	155
	100	0	0	34	84	219
	Gemiddeld	0	0	0	3	109



Figuur C-1 Terugkeertijden van de zes verschillende afvoerniveaus (m^3/s) bij St. Pieter voor klimaatscenario's WHdry_2050 en 2050Hd.



Figuur C-2 Terugkeertijden van de zes verschillende afvoerniveaus (m^3/s) bij St. Pieter voor klimaatscenario's WHdry_2085, 2100Hd en 2150Hd.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl