

Stresstest Doorvaarthoogte Hoofdvaarwegennet

Zeespiegelstijging en rivierafvoeren



Stresstest Doorvaarthoogte Hoofdvaarwegennet
Zeespiegelstijging en rivierafvoeren

Auteur(s)

Remi van der Wijk

Jurjen de Jong

Stresstest Doorvaarthoogte Hoofdvaarwegennet

Zeespiegelstijging en rivierafvoeren



Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Dhr. Frederik Vinke
Referenties	11205274-004-BGS-0021
Trefwoorden	Doorvaarthoogte, klimaatbestendig, containers, binnenvaart, vaarwegennetwerk, klimaatverandering

Documentgegevens

Versie	6.0
Datum	30-08-2021
Projectnummer	11205274-004
Document ID	11205274-004-BGS-0023
Pagina's	104
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Remi van der Wijk	
	Jurjen de Jong	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
6.0	Remi van der Wijk	Aukje Spruyt	Remon Pot	
				

Samenvatting

De gevolgen van het veranderende klimaat worden steeds zichtbaarder in het hoofdwatersysteem. Om deze gevolgen zoveel mogelijk te beperken is het zaak om tijdig actie te ondernemen. Hiervoor is het noodzakelijk om de knelpunten in het systeem te kennen en de impact van klimaatverandering te doorgronden.

In deze studie is een stresstest uitgevoerd voor de doorvaarthoogte voor de containervaart in het Hoofdvaarwegennet (HVWN) voor hogere rivierafvoeren en zeespiegelstijging door klimaatverandering. Beperkingen in de doorvaarthoogte leiden er toe dat er minder containers kunnen worden vervoerd. Dit leidt tot economische schade voor de transportsector en bedrijven die afhankelijk zijn van vervoer over water.

In de stresstest zijn de knelpunten in het systeem geïdentificeerd voor de containervaart. Daarnaast is er gekeken hoe groot de impact is van veranderingen in doorvaarthoogte als gevolg van klimaatverandering. Tevens is er een kwalitatief overzicht gegeven van de verwachte gevolgen voor de transportsector.

De knelpunten zijn bepaald voor twee indicatieve waarden, één die de formele eis beschrijft voor de doorvaarthoogte en één die de door de scheepvaartsector gewenste doorvaarthoogte weergeeft.

Hieronder zijn per riviertak de verandering in beperkingen in doorvaarthoogte beschreven als gevolg van klimaatverandering voor deze indicatieve waarden:

- De herhalingstijd voor beperkingen (~1 dag per jaar) aan de 4-laagscontainervaart op de Waal en Nederrijn/Lek gaat van eens in de 50 à 100 jaar naar eens in de 10 jaar. Tijdens een T = 10 jaar is het gedurende het jaar 10% van de tijd niet mogelijk om meer dan 4 lagen containers mee te nemen (in plaats van 6% in de huidige situatie).
- Op de IJssel zal door klimaatverandering 2 weken in plaats van 1 week in het jaar de formele eis niet worden gehaald met een herhalingstijd van 2 jaar.
- De beperkingen in doorvaarthoogte op de Maasroute nemen met 4 – 6 dagen toe als gevolg van klimaatverandering bij de herhalingstijden van 10, 50 en 100 jaar.
- In de Rijn-Maasmonding zal het voor de helft van het jaar niet mogelijk zijn om méér dan 4 lagen containers te vervoeren als gevolg van één meter zeespiegelstijging. Enkele bruggen zullen met enige regelmaat (ca. 7 dagen in het jaar) ook niet voldoende doorvaarthoogte hebben voor 4-laagscontainervaart.

Op de Waal zal het verschil in doorvaarthoogte door klimaatverandering leiden tot een extra verlies in containers van 400 (gemiddeld jaar), 900 (eens in de 10 jaar) en 1600 (eens in de 50 jaar) TEU per jaar op een totale goederenstroom van 2 mln TEU per jaar.

De afname in beschikbare doorvaarthoogte door klimaatverandering kan leiden tot de volgende reacties/maatregelen:

- I. Vracht wordt niet of later vervoerd;
- II. Er wordt een alternatieve route gezocht;
- III. De brug wordt vaker geopend;
- IV. Er worden meer schepen ingezet om de lading te vervoeren;
- V. Er vindt een modal shift plaats;
- VI. De infrastructuur wordt aangepast;

- VII. Er wordt meer ballast ingenomen;
- VIII. Met behulp van betere informatie wordt optimaal gebruik gemaakt van de beschikbare doorvaarthoogte.

Of deze reacties of maatregelen waarschijnlijk en haalbaar zijn dient nog nader onderzocht te worden. Hierbij dient ook gekeken te worden naar de invloed van deze maatregelen buiten de scheepvaartsector. Het openen van een brug zorgt bijvoorbeeld voor langere wachttijden voor weg- en spoorverkeer en weegt daarmee mogelijk niet op tegen de baten voor de scheepvaartsector.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	9
1.1	Aanleiding	9
1.2	Doel	10
1.3	Aanpak	10
1.4	Projectteam	11
2	Waterstanden en doorvaarthoogte	12
2.1	Waterstanden	12
2.1.1	Grote rivieren	12
2.1.2	Rijn-Maasmonding	12
2.2	Klimaatscenario	13
2.2.1	Zeespiegelstijging	13
2.2.2	Afvoeren	13
3	Containervaart	14
3.1	Formele eisen en praktijk	14
3.2	Doorvaarthoogte per vaarweg	15
3.3	Indicatieve waarden	16
3.4	Blootstelling op de Waal aan onvoldoende doorvaarthoogte	16
4	Overschrijdingsduur waterstanden	19
4.1	Grote rivieren	19
4.1.1	Afvoeren	19
4.2	Rijn-Maasmonding	20
4.2.1	Historische jaren	20
4.2.2	Waterstandsduurlijnen	21
4.3	Overige wateren	22
5	Risico op onvoldoende doorvaarthoogte	23
5.1	Grote rivieren	23
5.1.1	Waal	26
5.1.2	IJssel	27
5.1.3	Nederrijn/Lek	28
5.1.4	Maas	29
5.2	Rijn-Maasmonding	31
5.2.1	Historische jaren	31
5.2.2	Geïdealiseerde waterstandsduurlijnen	34
5.3	Overige wateren	37
5.4	Conclusie	37

6	Gevolgen van afname in doorvaarthoogte	39
6.1	Impact	39
6.2	Reacties	40
6.2.1	Niet of later varen	40
6.2.2	Omvaren	41
6.2.3	Brug open	41
6.2.4	Meer schepen	42
6.2.5	Andere vervoersmethoden	42
6.3	Maatregelen	42
6.3.1	Aanpassen infrastructuur	42
6.3.2	Ballasten	42
6.3.3	Informatievoorziening	42
7	Discussie	43
8	Conclusie	45
9	Referenties	48
A	Onderschrijdingsduur Rivieren	49
A.1	Aantal dagen per herhalingsstijd (barplot)	49
A.1.1	Waal (1, 2, 10, 50 & 100, gem)	49
A.1.2	IJssel (1, 2, 10, 50 & 100, gem)	56
A.1.3	Nederrijn/Lek (1, 2, 10, 50 & 100, gem)	59
A.1.4	Maas (1, 2, 10, 50 & 100, gem)	65
A.2	Resultaten in tabelvorm	67
A.3	Langsdoorsnede beschikbare doorvaarthoogte bij gegeven afvoer	70
B	Overschrijdingsduur historische jaren Rijn-Maasmonding	75
C	Onderschrijding doorvaarthoogte Rijnmaasmonding	78
C.1	Onderschrijdingsduur	78
C.2	Staafdiagrammen	80
C.3	Resultaten in tabelvorm	82
D	Onderzoek oorzaak doorvaarthoogte	84
E	Pegelstanden Duitsland	89
F	Eerder gestuurde memo bepaling bedreiging en blootstelling	90
F.1	Inleiding	90
F.2	Bedreiging	90
F.2.1	Zeespiegelstijging – Rijn-Maasmonding	90
F.2.1.1.	Nationaal Water Model	90
F.2.1.2.	Frequentiecurven	91
F.2.2	Hoge rivierafvoeren	92
F.3	Blootstelling	93
F.3.1	Brughogtes	93

F.3.2	Containervaart	94
F.3.2.1.	Percentiefiguren doorvaarhoogte	94
F.3.2.2.	Indicatieve waarde afweging	98
F.4	Samenvatting	99
G	Bruggen Rijn-Maasmonding	101
H	Bruggen Grote Rivieren	102

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Het klimaat verandert en de gevolgen daarvan worden steeds duidelijker merkbaar. De actualiteit onderstreept dat: de droogte van 2018, de hitte in de zomer van 2019 en de afvoerpiek op de Maas van 2021 laten weer nieuwe verrassingen zien in snelheid en extremiteit. Om de gevolgen hiervan voor Nederland zoveel mogelijk te beperken moeten maatregelen tijdig worden genomen.

In de Deltabeslissing Ruimtelijke Adaptatie (2014) hebben het Rijk, de provincies, gemeenten en waterschappen de gezamenlijke ambitie vastgelegd dat Nederland in 2050 klimaatbestendig en waterrobuust is ingericht. Om dit te bereiken moet klimaatbestendig en waterrobuust inrichten in 2020 onderdeel zijn van beleid en handelen om beter om te kunnen gaan met een onzekere toekomst.

Ook het Rijk heeft zich gecommitteerd aan de doelen voor het inrichten van klimaatbestendige en waterrobuuste netwerken die hun beoogde functies kunnen blijven vervullen. Dit geldt voor alle assets van het Rijk, waaronder het Hoofdwegennet (HWN), het Hoofdvaarwegennet (HVWN) en het Hoofdwatersysteem (HWS), waar het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) eigenaar van is, en in opdracht beheerd worden door Rijkswaterstaat (RWS) als uitvoeringsorganisatie. Dit houdt in dat klimaatbestendige aanleg (MIRT), beheer en onderhoud (B&O) en vervanging en renovatie (V&R) van de netwerken zo snel mogelijk de nieuwe norm wordt.

In het Deltaplan Ruimtelijke Adaptatie (DPRA) uit 2018 worden zeven ambities van alle betrokken overheden beschreven om de doelstellingen uit de Deltabeslissing te kunnen realiseren volgens de systematiek: weten-willen-werken. De eerste drie ambities van DPRA ('Kwetsbaarheden in beeld brengen', 'Risicodialoog voeren en strategie opstellen' en 'Uitvoeringsagenda opstellen') zijn essentieel om concrete stappen te kunnen zetten in bewustwording en plannen van adaptatiemaatregelen. Dit moet leiden tot een uitvoerings- en investeringsagenda.

Dit document presenteert de resultaten van de stresstest voor de doorvaarthoogte in het HVWN voor hogere rivierafvoeren en zeespiegelstijging door klimaatverandering. Uit deze stresstest volgt ruimtelijk inzicht in kwetsbaarheden en de doorvertaling naar risico's voor de scheepvaart, nog zonder waardeoordeel. Per riviertraject worden de kwetsbaarheden en risico's bepaald om variabiliteit in gebruik en gedrag mee te wegen in de stresstest. Of deze kwetsbaarheden en risico's daadwerkelijk een probleem vormen en maatregelen vergen, wordt tijdens de interne en externe risicodialogen besproken¹.

¹ De interne risico dialogen zullen worden uitgevoerd tussen IenW en RWS. De externe risicodialogen zijn met gebiedspartners (regionale overheden en andere net(werk)beheerders) binnen de werkregio's DPRA en partijen uit de scheepvaartsector.

1.2 Doel

Het doel van de stresstest is om de knelpunten en gevoeligheid in het systeem voor containervaart te bepalen door te kijken naar de doorvaarthoogte. De doorvaarthoogte op de vaarwegen bepaalt namelijk voor een groot deel hoeveel containers er kunnen worden vervoerd. Hiervoor dienen de volgende onderzoeksvragen beantwoord te worden:

- 1 Hoe kunnen zeespiegelstijging en hoge rivierafvoer negatieve effecten hebben op de scheepvaart?
- 2 Hoe vaak en hoe lang zijn er negatieve effecten voor de doorvaarthoogte in het HVWN door klimaatverandering?
- 3 Waar in het HVWN zijn de knelpunten in het systeem?
- 4 Wat zijn de verwachte gevolgen voor de scheepvaart?

1.3 Aanpak

Aan het begin van het project is gezamenlijk met Rijkswaterstaat een methodiek opgesteld. Deze bevat de volgende stappen:

- 1 **Bepaling bedreiging:** het bepalen van de toenemende waterstand als gevolg van hogere rivierafvoeren en/of zeespiegelstijging op waterwegen (inclusief een frequentie van het voorkomen van de waterstand). Een vertaling (combinatie van waterstand en brughoogte) naar de doorvaarthoogte (inclusief kans op voorkomen van de doorvaarthoogte) bij alle bruggen in de huidige en toekomstige (met klimaatverandering) situatie.
- 2 **Bepaling blootstelling:** wat is de locatie van de vaste en beweegbare bruggen? Welke routes zijn er beschikbaar voor de scheepsklassen in het hoofdvaarwegensysteem? Wat is het belang van deze bruggen voor de containervaart², is er een uitspraak te doen over de waarde van de bruggen³ voor het vaarwegennetwerk?
- 3 **Bepaling kwetsbaarheid:** er wordt geen fysieke schade verwacht aan de infrastructuur, dit is vergelijkbaar met de gevolgen van lagere rivierafvoeren. Daarentegen zijn er door de verminderde doorvaarthoogte wel gevolgen voor de gebruikers van de vaarweg. Het gevolg van een kleinere doorvaarthoogte is dat schepen minder containers kunnen meenemen. Gevolg is dat voor dezelfde hoeveelheid lading meer scheepsbewegingen nodig zijn, en hierdoor de transportkosten stijgen. Andere effecten kunnen zijn dat beweegbare bruggen vaker of langer open moeten of dat schepen zelfs voor een omvaarroute kiezen (langere vaartijden). Ook kan een reverse modal shift van containervervoer optreden. Naast deze gevolgen zijn er ook zogenaamde indirecte gevolgen die bijdragen aan de kwetsbaarheid van het systeem, zoals het uitvallen van productieprocessen door het niet op tijd aankomen van goederen.
- 4 **Bepaling risico:** de combinatie van bedreiging, blootstelling en kwetsbaarheid beschrijft het risico als gevolg van klimaatveranderingseffecten. Het risico wordt beschreven in de rapportage door de combinatie van de voorgaande elementen samen te voegen en te wegen.

² Doorvaarthoogte is ook van belang voor speciaal transport over water (bijvoorbeeld machines), omdat dit een beperkt onderdeel is van transport over water wordt er in deze studie geen rekening mee gehouden.

³ Het belang en de waarde van de bruggen wordt in deze studie uitgedrukt in TEU, in een later stadium kunnen deze resultaten worden gebruikt om de economische schade verder uit te werken.

Bovenstaand stappenplan wordt in dit rapport niet in de genoemde volgorde beschreven. Dit komt doordat het duiden van de blootstelling (stap 2) ook gevolgen heeft voor de herhalingstijden van de waterstanden (stap 1). Globaal is er te zeggen dat hoofdstukken 2 en 4 de bedreiging beschrijven. In hoofdstuk 3 komt de blootstelling aan de orde. De hoofdstukken 5 en 6 geven de kwetsbaarheid van het systeem weer. Alle onderdelen samen vormen het risico en de uitkomst van de stresstest in hoofdstukken 7 en 8.

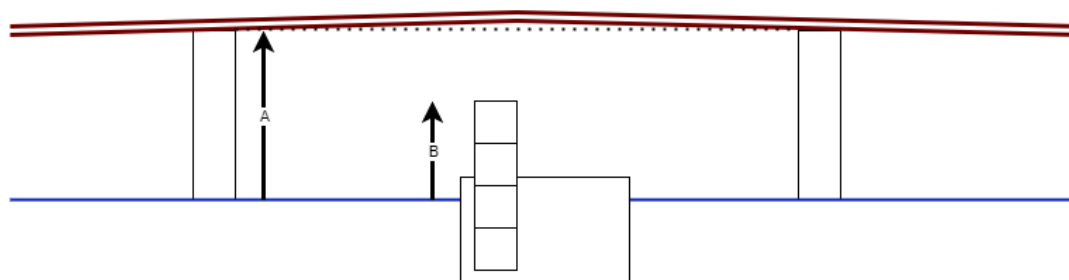
1.4 Projectteam

Het werk is uitgevoerd door Remi van der Wijk en Jurjen de Jong. Jurjen is tevens deelprojectleider van het deelproject Klimaatbestendige Netwerken – Hoofdvaarwegennet. Aukje Spruyt is verantwoordelijk voor de review.

Vanuit Rijkswaterstaat was Frederik Vinke de projectleider van dit onderdeel. Verder hebben Roelof Weekhout, Pascal Witmer, Nathaly Dasburg en Milou Wolters bijgedragen aan dit project.

2 Waterstanden en doorvaarthoogte

De doorvaarthoogte is het verschil tussen de brughoogte (onderkant van de brug) en de waterstand. In deze studie wordt er in eerste instantie van uitgegaan dat de brug gesloten is, hoewel een beperking in doorvaarthoogte in enkele gevallen is op te lossen met het opengaan van de brug. Voor de bruggen in Nederland is de minimale brughoogte (stippelijijn in Figuur 2-1) genomen binnen de vaargeul zoals deze ook wordt getoond in de databases van Rijkswaterstaat⁴. In deze studie wordt het verschil tussen de brughoogte en de waterstand de *beschikbare doorvaarthoogte* genoemd.



Figuur 2-1 Concept van doorvaarthoogte (pijl A) aangegeven voor een theoretische brug (inclusief een werving in het brugdek) Voor een schip met 4 lagen containers is de benodigde doorvaarthoogte aangegeven met pijl B.

2.1 Waterstanden

De waterstand in het hoofdwatersysteem varieert op verschillende tijdschalen en door verschillende factoren. In de rivieren stijgt de waterstand als gevolg van het toenemen van de afvoer terwijl dichterbij zee het getij een rol gaat spelen. In kanalen en meren is de aansturing van kunst- en regelwerken een sterk bepalende factor voor de waterstand. In de onderstaande paragrafen wordt per gebied aangegeven hoe de waterstand voor de grote rivieren en de Rijn-Maasmonding is gebruikt in de analyse om de beschikbare doorvaarthoogte te bepalen. Voor elk van de gebieden geldt dat de variatie in waterstanden beschouwd wordt over één jaar om gevolgen beter te kunnen duiden.

2.1.1 Grote rivieren

Voor elk van de riviertakken (Rijn en Maas) zijn zogenaamde betrekkinglijnen beschikbaar. Deze lijnen geven aan welke waterstand correspondeert met een bepaalde afvoer. Deze is vervolgens te vertalen naar een waterstandsduurlijn door te kijken hoeveel dagen per jaar deze afvoer voorkomt. Voor de hogere afvoeren wordt de herhalingsperiode in jaren gegeven in de betrekkinglijnen.

2.1.2 Rijn-Maasmonding

In de Rijn-Maasmonding is de waterstand afhankelijk van het getij, windopzet en rivierafvoer. Voor een periode van 100 jaar is een combinatie van voorgekomen condities doorberekend met een numeriek 1D model (SOBEK-RE)⁵. Hierdoor is voor het gehele gebied een gesimuleerde waterstand beschikbaar voor verschillende condities. Deze waterstanden bevatten dus zowel de variatie van het getij, effect van historische windopzet en rivierafvoer.

⁴ <https://vaarweginformatie.nl/frp/main/#/geo/map?viewport=50.923813;0.384521;53.051120;9.613037>

⁵ SOBEK_RE_NDB_1_1_0

2.2 Klimaatscenario

Voor alle gebieden wordt gekeken naar de invloed van klimaatverandering op de waterstanden. In deze studie is gekeken naar het verwachte klimaat van 2085 om een eerste indicatie te krijgen van de kwetsbaarheid van het systeem. In een later stadium kunnen tussenstappen of andere klimaatscenario's worden gebruikt. De exacte bron van de verschillende factoren is verschillend en wordt hieronder nader toegelicht.

2.2.1 Zeespiegelstijging

Binnen het Nationaal Water Model is voor 100 jaar de waterstanden in Nederland uitgerekend met een referentie scenario en verschillende klimaatscenario's. In de Rijn-Maasmonding wordt er gebruik gemaakt van een apart SOBEK model om ook zoutverspreiding te modelleren. Binnen dit project wordt er gebruik gemaakt van de resultaten van dit model. Er is niet voor de gehele 100 jaar resultaten van WH2085 met 80 centimeter zeespiegelstijging beschikbaar. Er is wel een 100-jarige reeks met WH2050 en 1 meter zeespiegelstijging beschikbaar. Dit komt er op neer dat er een meer extreem scenario voor de zeespiegelstijging wordt gebruikt in deze studie maar met iets minder extreme afvoeren. Voor de meeste bruggen is het effect van zeespiegelstijging op de waterstand groter dan de afvoer, op de Waal/Boven Merwede is dit niet het geval.

2.2.2 Afvoeren

Voor de afvoeren van de rivieren is ook een 100-jarige reeks beschikbaar voor zowel de referentie als de klimaatscenario's. Deze afvoer is vervolgens te vertalen naar een overschrijdingsduur per jaar. Met de eerder genoemde betrekkinglijnen is de afvoer te koppelen aan een waterstand per brug. In deze studie wordt gebruik gemaakt van de afvoer uit het WH2085_dry scenario.

3 Containervaart

Containervaart neemt een steeds belangrijkere rol in bij het vervoer over water. Los van de diepgang hebben schepen een containercapaciteit die wordt uitgedrukt in *Twenty Foot Equivalent Units* (TEU)⁶. Containers worden opgestapeld in lagen waarbij de capaciteit per laag afhankelijk is van de scheepsdimensies. De meeste grote binnenvaartschepen hebben de mogelijkheid om de stuurhut omhoog te zetten zodat de containers ruim boven het ruim uit kunnen komen (vanaf 2 lagen). In de praktijk komt het er op neer dat de meeste schepen van de laatste generatie ten minste 4 lagen containers kunnen laden (waarvan 2 boven het ruim). De 5 en 6-laagscontainervaart is zeldzamer en voorbehouden aan de laatste generatie van schepen voor korte afstanden. Daarnaast worden er steeds meer High Cube containers meegenomen waardoor de schepen met dezelfde hoeveelheid lagen containers hoger boven het water uitsteken (Wijbenga, 2019). De hoogte van de containers boven het water wordt in dit rapport de *scheepshoogte* of *benodigde doorvaarthoogte* genoemd (Figuur 2-1).

3.1 Formele eisen en praktijk

De Centrale Commissie voor de Rijnvaart (CCR) heeft als formele eis een doorvaarthoogte van 9.10 m boven de hoogst bevaarbare waterstand (ook wel Maatgevend Hoogwater voor de Scheepvaart, MHWS) vastgesteld, gebaseerd op geladen schepen met 4-laagscontainervaart. De definitie voor de MHWS is verschillend tussen de rivieren en kanalen, maar dat neemt niet weg dat de 9,10 meter een minimaal gewenste doorvaarthoogte is tot hoge afvoeren.

Deze eis is opgesteld direct na de tweede wereldoorlog en is door metingen in de afgelopen jaren getoetst aan de praktijk (Brolsma, 2015). Uit de metingen komen de volgende kentallen met betrekking tot de benodigde doorvaarthoogte voor 3 en 4-laagscontainervaart uitgedrukt in onderschrijdingspercentages (voor stilliggende schepen, inclusief 30 cm veiligheidsmarge):

- 3 lagen, 50% | 7,70 m 90% | 8,50 m 95% | 8,65 m
- 4 lagen, 50% | 10,0 m 90% | 11,05 m 95% | 11,20⁷ m

Het verschil tussen de formele eisen en de praktijk (9,1 m t.o.v. 11,20 m) komt door het grotere aandeel van High-Cube containers die 30 centimeter hoger zijn dan normale containers. Daarnaast is de aanname van volledig geladen containers niet realistisch in de praktijk. In andere woorden, de containerschepen zijn vaker minder diep beladen waardoor de schepen hoger in het water liggen.

Ter indicatie is in hetzelfde rapport ook een overzicht gegeven van de verdeling van het aantal lagen containers op de Waal om het belang van hogere doorvaarthoogtes aan te geven:

- 2-lagen: **16%**
- 3-lagen: **53%**
- 4-lagen: **26%**
- 5-lagen: **5%**

⁶ Een twintigvoet container is het standaard formaat van één van de twee veel voorkomende containers. Veertigvoet containers zijn de andere standaard containers en zijn per stuk 2 TEU.

⁷ Zoals is genoemd in de kamerbrief (Wijbenga, 2019) omtrent High Cube containers wordt als richtgetal 11,35 meter genomen

Er is dus aan te nemen dat 30% van de containervaart met ten minste 4 lagen containers wordt uitgevoerd.

3.2 Doorvaarthoogte per vaarweg

Voor de beoordeling van de kwetsbaarheid per brug zijn gegevens nodig van de verdeling in doorvaarthoogtes van de schepen per brug (de blootstelling). Metingen (zoals door Brolsma) zijn hiervoor niet beschikbaar, waardoor een inschatting is gemaakt van de doorvaarthoogtes op basis van gegevens uit IVS90. Hierbij is gebruik gemaakt van IVS-database en routekeuze in BIVAS.

Per riviertak is, op basis van de BIVAS database (2014), de verdelingsfunctie bepaald van het aantal containerlagen en de scheepshoogte op basis van de geregistreerde hoeveelheid containers per schip. Dit is gedaan op basis van vergelijking 3.1. Op basis van eerdere bevindingen (zie bijlage F, (Wijk, 2020)) wordt in deze vergelijking gebruik gemaakt van enkel high cube containers (2.896 m), een constructiehoogte van de bodem van schepen van 50 cm en een veiligheidsmarge van 30 cm. In de formules is geen rekening gehouden met de inzinking van een varend schip (squat; dit is afhankelijk van de relatieve stroomsnelheid en kan oplopen tot 0.5 m).

Vergelijking 3.1: Berekening scheepshoogte o.b.v. IVS

$$containerLagen = afgerond \uparrow \left(\frac{aantalContainers [TEU]}{containers_per_laag} \right)$$

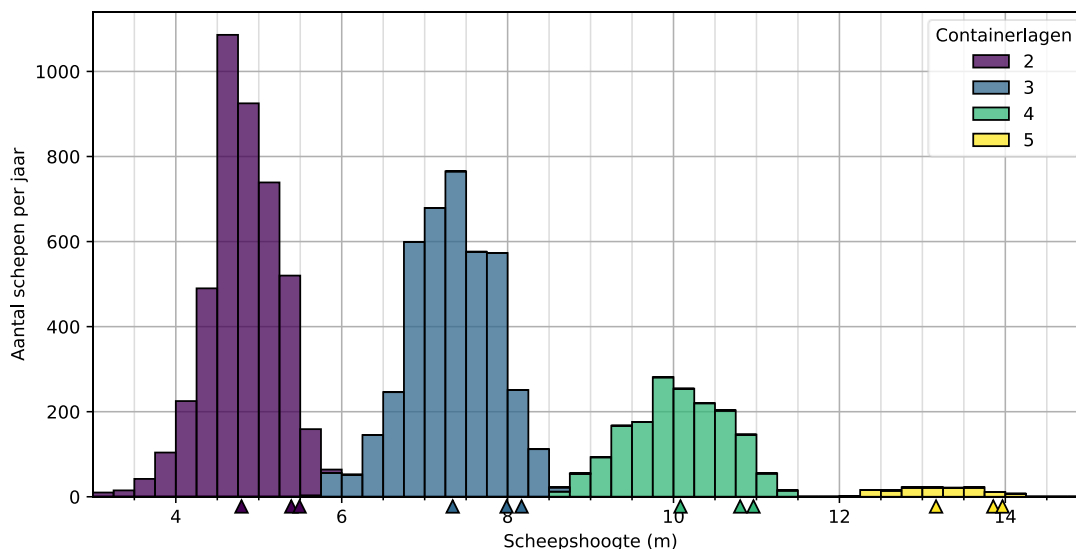
$$containers_per_laag = \left(\frac{0.9 * scheepsLengte - 10}{6.2} \right) * \left(\frac{scheepsBreedte - 1.5}{2.45} \right)$$

NB: containerLagen beschrijft het minimaal aantal benodigde lagen om de containers mee te voeren.

$$scheepsHoogte = containerLagen * containerhoogte - scheepsDiepgang + veiligheidsmarge + constructiehoogte_bodem$$

Bij toepassing van deze rekenmethode komen de resultaten beter in de buurt van de metingen uit paragraaf 3.1. Nog steeds resulteert deze benadering in een onderschatting van de hogere percentielen. Het berekende 95% percentiel voor 3 lagen is 8,2 m (t.o.v. 8,65 m) en voor 4 lagen 11,0 m (t.o.v. 11,2 m). Dit kan zowel veroorzaakt worden door aannames in de rekenmethode (zoals de constructiehoogte van de bodem), als door aannames of onnauwkeurigheden in de meetmethode in Brolsma (2015) (zoals de correctie voor squat).

De verdeling van de schepen in het aantal containerlagen komt wel goed overeen tussen metingen (Brolsma, 2015) en berekende doorvaarthoogte.



Figuur 3-1 De verdeling in berekende scheepshoogte op basis van IVS90 (en BIVAS) ter hoogte van Nijmegen. Met markeringen (driehoek) zijn de percentielen 50% (mediaan), 90%, 95% gegeven per aantal containerlagen.

3.3 Indicatieve waarden

Voor de beoordeling van de kwetsbaarheid helpt het om de beschikbare doorvaarthoogte te toetsen aan de afgesproken, indicatieve waarden. In overleg met Rijkswaterstaat is besloten om gebruik te maken van twee indicatieve waarden voor 3- en 4-laagscontainervaart. Afhankelijk van de vaarwegklasse van het water wordt het aantal gewenste containerlagen gekozen. De waarden zijn:

- 3-laags: 7,00 meter & 8,65 meter
- 4-laags: 9,10 meter & 11,35 meter (Wijbenga, 2019)

De eerste waarde geeft de formele eis weer en de ondergrens van de benodigde doorvaarthoogte. De tweede waarde is de maximale waarde voor dat aantal lagen containers gebaseerd op lege High-Cube containers. Ofwel, als deze doorvaarthoogte beschikbaar is, moet alle containervaart met die hoeveelheid lagen mogelijk zijn. In deze rapportage wordt dit ook vertaald naar de volgende consequenties voor 4-laags containervaart:

- Als de lage indicatieve waarde wordt overschreden is zo goed als alle 4-laags en hogere containervaart onmogelijk;
- Als de hoge indicatieve waarde wordt overschreden is in ieder geval alle containervaart boven de 4^e laag onmogelijk, vanaf dat moment zullen er ook beperkingen ontstaan voor 4-laags containervaart als de doorvaarthoogte verder afneemt.

3.4 Blootstelling op de Waal aan onvoldoende doorvaarthoogte

In deze paragraaf worden de gegevens uit eerdere paragrafen gecombineerd om een schatting te geven van de blootstelling per jaar voor de Waal. Deze schatting is bedoeld om later de impact beter in te kunnen schatten voor de beperkingen in doorvaarthoogte.

Totaal containertransport per jaar

Er wordt gemiddeld 2 miljoen TEU aan containers per jaar vervoerd over de Waal volgens de gegevens uit IVS90 (verkregen uit de BIVAS database), overeenkomend met 5500 TEU per dag.

- Volgens de metingen bestaat 26% uit 4-laagscontainervaart en 5% uit 5-containervaart (paragraaf 3.1);
- Dit resulteert in 600.000 (31%) en 100.000 (5%) TEU dat per jaar wordt vervoerd door schepen met respectievelijk ten minste 4- en 5-lagen containers.

Blootstelling door beperkingen in doorvaarthoogte (inschattingen uit metingen)

Als de benodigde doorvaarthoogte wordt onderschreden kunnen schepen nog altijd varen met minder containerlagen. Bij 5-laagscontainervaart kan nog steeds 4 lagen vervoerd worden (een reductie van maximaal 20%) en bij 4-laagscontainervaart nog steeds 3 lagen (een reductie van maximaal 25%).

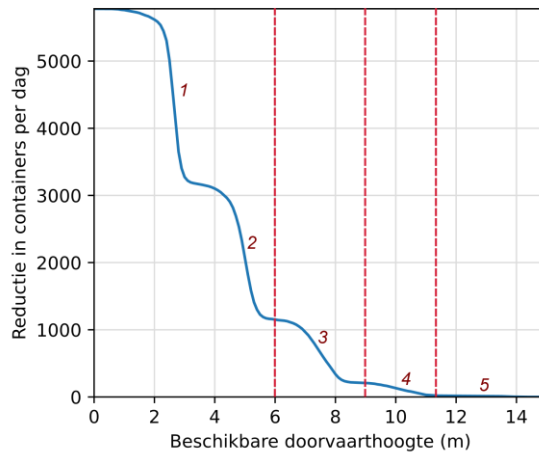
- Als de beschikbare doorvaarthoogte lager is dan 11,35 m (de hoge indicatieve waarde voor 4-laags containervaart) is alle 5-laags containervaart niet mogelijk en resulteert dit op jaarbasis in 20.000 TEU (20% van 100.000) dat niet meer met hetzelfde aantal reizen vervoerd kan worden.
- Als de beschikbare doorvaarthoogte lager is dan 9,1 m (de lage indicatieve waarde voor 4-laags containervaart) is ook zo goed als alle 4-laags containervaart niet meer mogelijk en resulteert dit in 150.000 TEU (25% van 600.000) dat niet op dezelfde manier meer vervoerd kan worden.

Uitgaande van een gelijke verdeling van containervaart over het hele jaar leidt dit voor de lage indicatieve waarde tot een afname van 411 TEU per dag en voor de hoge indicatieve waarde tot 55 TEU per dag.

Blootstelling per dag op basis van IVS-database

Deze rekenmethode is herhaald voor de IVS-database (uit paragraaf 3.2). Figuur 3-2 geeft het gemiddeld aantal containers per dag dat minder meegenomen kan worden, uitgaande van een gelijk aantal schepen. Door de grote spreiding in de scheepshoogten is de reductie gelijkmatiger verspreid. De indicatieve waarden (overeenkomend met de maxima uit de verdelingsfunctie) zijn hierin terug te herkennen als het eind van de dalende delen in deze curve. Bij 11,35 m zal de eerste 4-laags containervaart worden beïnvloed, maar is het vooral het wegvallen van alle 5-laags containervaart dat we in de figuur aflezen (gemiddeld 20 containers per dag). Vergelijkbaar is bij 8,65 m (maximum hoogte voor 3-laags containervaart) vooral de eerste grotere reductie in containers te zien door het wegvallen van alle 4-laags containervaart (oplopend tot 200 containers per dag) en dat vanaf ongeveer 6 m ook alle 3 laags containervaart stopt (oplopend tot 1200 containers per dag) waarbij opgemerkt dient te worden dat dit een uitzonderlijke situatie is.

Deze getallen wijken af van de inschatting uit metingen (20 en 200 t.o.v. 55 en 411 containers per dag). Dit wordt vooral veroorzaakt doordat niet altijd alle containerlagen helemaal gevuld hoeven te zijn en daardoor de reductie in aantal containers minder kan zijn dan 20% of 25%.



Figuur 3-2 Kwetsbaarheid door onvoldoende doorvaarhoogte (op dagbasis), uitgedrukte in de gemiddelde reductie te transporteren containers (bij gelijke vloot). Berekend op basis van de IVS-database (zie paragraaf 3.2). Met stippellijnen zijn de in de tekst genoemde indicatieve waarden aangenomen. Ieder nummer geeft de containerlaag die bij iedere gradiënt beperkt wordt.

4 Overschrijdingsduur waterstanden

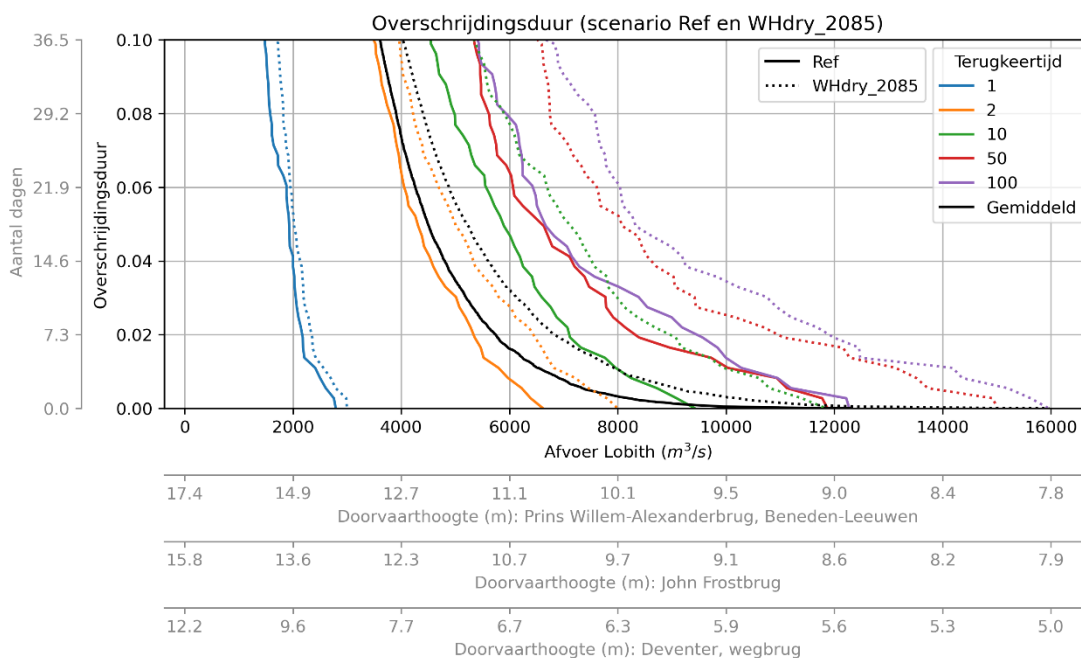
De doorvaarthoogte wordt beschouwd over een jaar. Met behulp van de indicatieve waarden wordt gekeken hoeveel dagen/uren in het jaar de benodigde doorvaarthoogte niet beschikbaar is.

Om de impact van beperkingen in doorvaarthoogte goed in te schatten is alleen het bepalen van de verandering in waterstand onder klimaatverandering niet alleen voldoende. Er moet ook een indicatie zijn van de herhalingsstijl van de waterstanden om de frequentie van het overschrijden van een bepaalde waterstand te bepalen. Dit wordt op een andere manier gedaan voor de Rijn-Maasmonding dan de grote rivieren door de combinatie van factoren die op verschillende tijdschalen speelt.

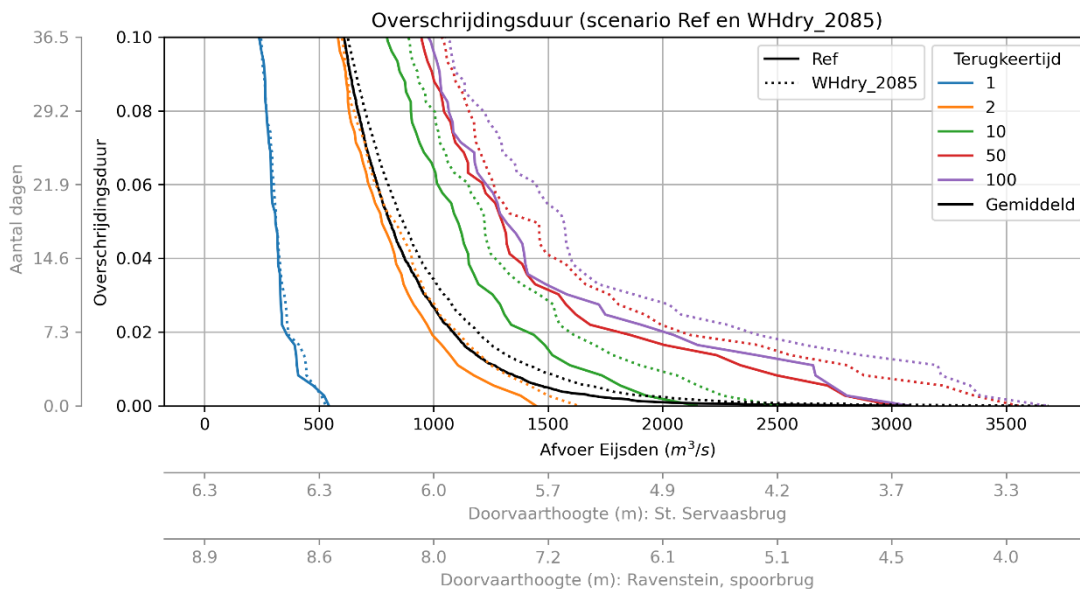
4.1 Grote rivieren

4.1.1 Afvoeren

Figuur 4-1 en Figuur 4-2 geven de overschrijdingsduur voor de Rijn en Maas voor verschillende afvoeren per jaar gekoppeld aan de doorvaarthoogte bij enkele bekende knelpunten. Elke afvoer heeft zijn eigen herhalingsstijl, waarbij in deze studie wordt gekeken naar de herhalingsstijl van 1, 2, 10, 50 en 100 jaar. Dit is bepaald op basis van de 100-jarige reeks waarbij voor elk jaar een overschrijdingsduurlijn is gemaakt. De uiteindelijke afvoeren die hieronder zijn weergegeven zijn een combinatie van alle verschillende jaren waarbij de corresponderende herhalingsstijl wordt genomen. Voor een herhalingsstijl van 100 jaar komt dit er dus op neer dat voor elke stap van de overschrijdingsduurlijn de kans op de maximale waarde uit de 100-jarige reeks wordt genomen. De afvoerlijn is hierdoor niet te koppelen aan een historisch jaar, maar is een fictieve combinatie van de verschillende jaren.



Figuur 4-1 Overschrijdingsduur (en aantal dagen) voor de Rijnafvoer voor verschillende herhalingsstijden, ook gerelateerd aan de doorvaarthoogte bij de Pr. Willem-Alexanderbrug (Waal), John Frostbrug (Nederrijn), Deventer wegburg (IJssel).



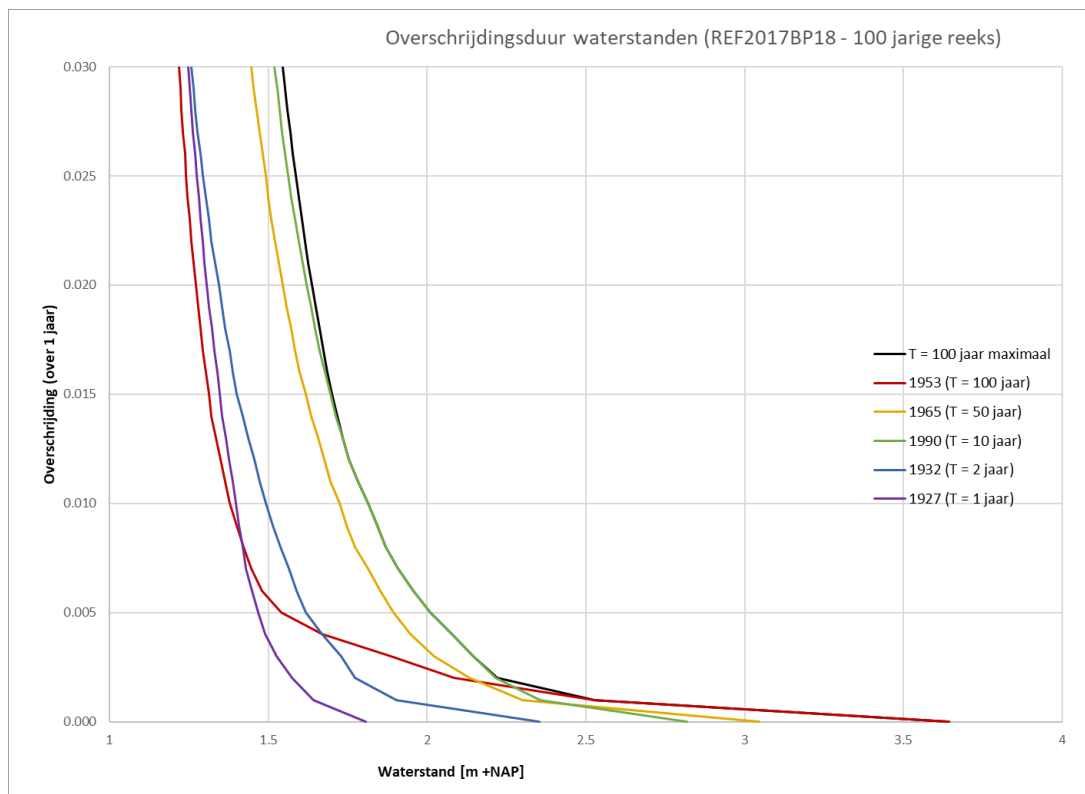
Figuur 4-2 Overschrijdingsduur (en aantal dagen) voor de Maasafvoer voor verschillende herhalingstijden, ook gerelateerd aan de doorvaarthoogte bij de St. Servaasbrug (Maastricht) en spoorbrug bij Ravenstein (bij Grave).

4.2 Rijn-Maasmonding

4.2.1 Historische jaren

In Figuur 4-3 is de waterstandsduurlijn te zien voor Rotterdam voor enkele interessante jaren op basis van de 100 jarige reeks uit het Nationaal Water Model (REF2017BP18). Deze interessante jaren zijn gekozen op basis van terugkeertijd van de maximale voorgekomen waterstand in dat jaar. Deze terugkeertijd is enkel indicatief, vanwege twee redenen. Ten eerste hoeft het jaar waarin de maximale waterstand bij bijvoorbeeld Rotterdam voorkomt niet gelijk te zijn aan het jaar van de maximale waterstand bij andere locaties. Het tweede probleem is zichtbaar in Figuur 4-3. De minimale doorvaarthoogte in een jaar hangt weliswaar af van de maximale waterstand, maar de indicatieve waarden kunnen bij lagere waterstanden onderschreden worden met mogelijk een hele andere terugkeertijd. Zo wordt de 2 meter waterstand bij Rotterdam in het jaar met de meest extreme waterstand minder vaak overschreden dan in het jaar met de herhalingstijd van 50, 10 en 2 jaar. Er is hierdoor niet echt sprake van een herhalingstijd van 100, 50, 10, 2 of 1 jaar voor deze jaren voor alle doorvaarthoogtes. In de paragraaf 4.2.2 wordt daarom een andere aanpak toegepast om de terugkeertijd en overschrijdingsduur bij de indicatieve waarden te bepalen met inbegrip voor de genoemde uitdagingen. De jaren gepresenteerd in deze paragraaf worden nog steeds gebruikt in de analyse om begrip te krijgen voor het systeem.

Op basis van de historische tijdreeksen van de waterstanden van deze jaren is gekeken hoe de benodigde doorvaarthoogte wordt onderschreden binnen een jaar. Hiermee kan het effect van het onderschrijden beter worden geduïd. Een kortdurende onderschrijding zou immers beter hanteerbaar kunnen zijn dan een langdurige onderschrijding van de benodigde doorvaarthoogte.

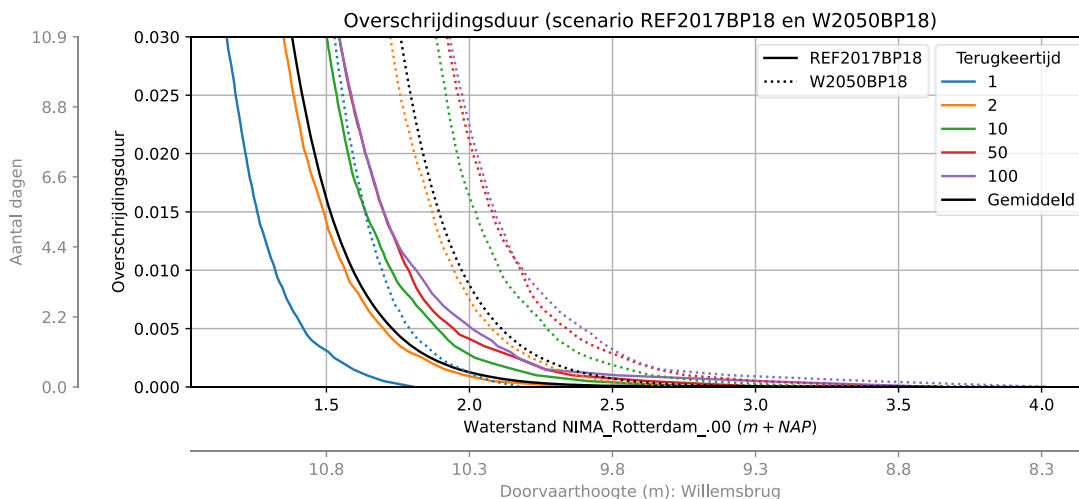


Figuur 4-3 Overschrijdingsduur waterstand Rotterdam op basis van de 100-jarige reeks. De figuur is afgeknipt bij een overschrijdingsduur van maximaal 3%.

4.2.2 Waterstandsduurlijnen

Zoals in Figuur 4-3 duidelijk werd kunnen duurlijnen van individuele jaren elkaar doorkruisen. De herhalingstijd die berekend is voor een jaar (bijv. 1953) op basis van de maximale waterstand, kan een andere herhalingstijd van een overschrijdingsduur hebben bij andere waterstandsniveaus. Voor een nauwkeurigere berekening van de terugkeertijd van overschrijdingen is het daarom nodig om de koppeling met individuele jaren los te laten en voor iedere waterstand te berekenen hoe vaak deze in ieder jaar wordt overschreden en op basis daarvan de herhalingstijd te bepalen. De resulterende overschrijdingsduurkromme per terugkeertijd is dan een combinatie van de overschrijdingsduren van alle jaren.

Een voorbeeld van de overschrijdingsduur met deze berekening is gegeven in Figuur 4-4. Dit voorbeeld is gegeven voor Rotterdam en ter interpretatie is ook de bijbehorende doorvaarthoogte bij de Willemsbrug toegevoegd. Uit dit voorbeeld blijkt ook dat er weinig verschil is tussen de mediaan (T2; de middelste waarde van de 100 jaar) en het gemiddelde. Ook blijkt (evenals in voorgaande paragraaf) een sterke toename in de waterstand bij een kleine onderschrijdingsduur: bij waarden lager dan 0.002 (minder dan 1 dag per jaar) neemt de steilheid van de curve toe. Deze hogere waterstanden (en lage doorvaarthoogte) zijn dus in dit voorbeeld van relatief korte duur. Of dit een aansluitende periode (van 1 dag) of meerdere korte perioden (bijvoorbeeld 24 perioden van 1 uur) betreft, valt bij deze geïdealiseerde methode niet te achterhalen. Hiervoor is juist de analyse op basis van de historische jaren (zie paragraaf 4.2.1) nodig.



Figuur 4-4 De overschrijdingsduur per waterstand (en daaraan gekoppeld de doorvaarthoogte) bij de Willemsbrug Rotterdam (rekenpunt NIMA_Rotterdam_.00). De figuur is afgeknipt bij een overschrijdingsduur van maximaal 3%.

4.3 Overige wateren

Er zijn een aantal peilgereguleerde wateren waar de waterstand min of meer constant is. Dit zijn meestal kanalen waar (spui)sluizen er voor zorgen dat het peil in stand wordt gehouden. Voorbeelden van peilgereguleerde wateren zijn het Amsterdam-Rijnkanaal, Midden-Limburgse en Brabantse Kanalen, Schelde-Rijnkanaal en het Lemmer-Delftzijlkanaal. Ook de meren (Zeeuwse, Marker-, IJssel- en Veluwerandmeren) zijn in principe peilgereguleerd maar kunnen meer variëren door windopzet. Op deze wateren is de doorvaarthoogte dus min of meer constant, maar in praktijk wel dicht bij kritische waarden en daardoor soms meer beperkend voor de containervervaart.

Als laatste is er nog een water wat normaal in open verbinding staat met de zee en dat is het kanaal van Zuid-Beveland via de open verbinding met de Oosterschelde. Dit water is alleen semi-gereguleerd door de Oosterscheldekering welke sluit op het moment dat de waterstand te hoog wordt. Dit betekent dat de maximale waterstand, en daarmee minimale doorvaarthoogte, afhankelijk is van het sluiten van de Oosterscheldekering.

5 Risico op onvoldoende doorvaarthoogte

In dit hoofdstuk wordt er gekeken naar het risico op onvoldoende doorvaarthoogte. Het hoofdstuk is gesplitst in drie paragrafen waarin elk van de verschillende gebieden wordt besproken. Er wordt afgesloten met een concluderende paragraaf.

Dit risico wordt bepaald met behulp van de volgende scenario's en herhalingstijden in dit project die worden besproken in onderstaande paragrafen:

- Afvoer Rijn & Maas
 - Referentie – REF2018_BP18
 - Klimaatscenario – Whdry_2085
 - Herhalingstijden: 1, 2, 10, 50, 100 & gemiddeld
- Waterstanden Rijn-Maasmonding
 - Referentie – REF2018_BP18
 - Klimaatscenario – Wh_2050 met 1m zeespiegelstijging
 - Herhalingstijden: 1, 2, 10, 50, 100 & gemiddeld
 - Historische jaren: 1953, 1965, 1990, 1932 en 1927

De brughogtes zijn van alle bruggen zijn in samenwerking met RWS verzameld. Het resultaat hiervan is te vinden in bijlage G en H. Hierbij is de brughoogte van een gesloten brug genomen. De uitzondering hierop zijn de hefbruggen op de rivieren, daar is de brughoogte genomen van de volledig geopende brug.

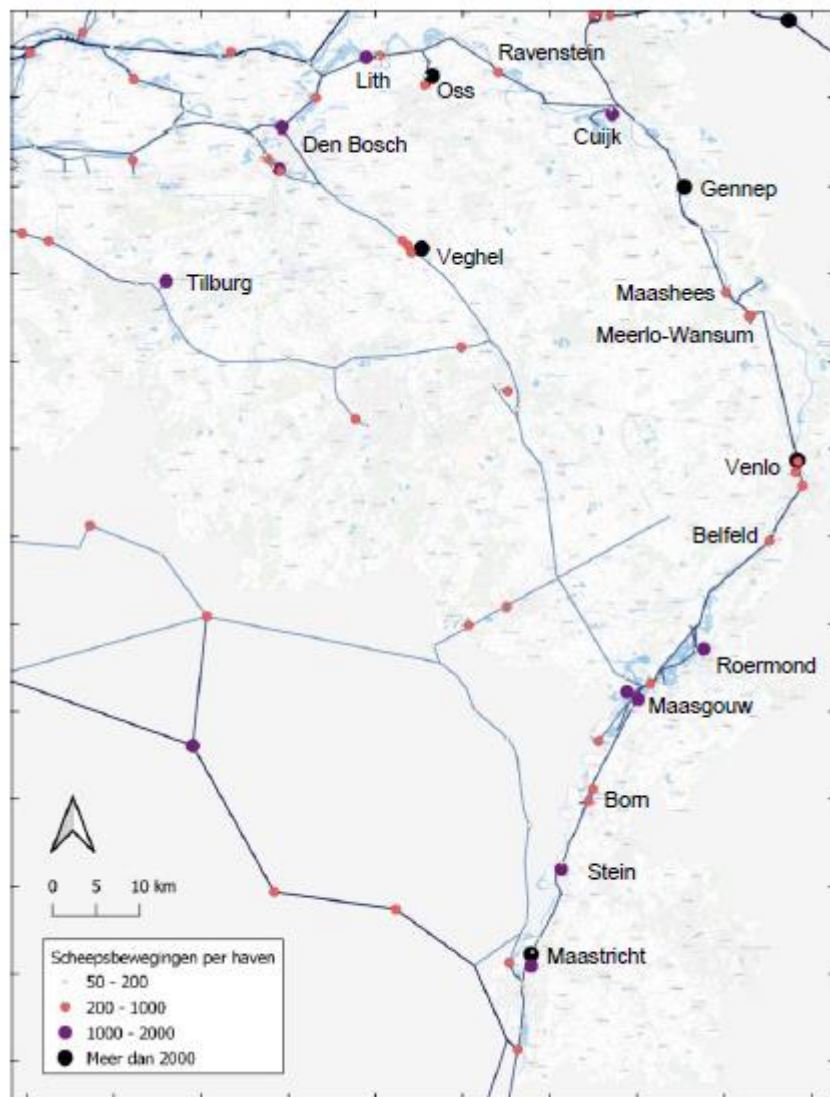
5.1 Grote rivieren

In Bijlage A zijn de onderschrijdingsduren voor alle bruggen over de rivieren en voor de verschillende herhalingstijden te vinden met behulp van barplots, tabellen en een langsdoorsnede. In de volgende paragrafen wordt per riviertak/corridor gekeken naar de verandering in doorvaarthoogte als gevolg van klimaatverandering. Hierbij worden de onderschrijdingswaarden van de knelpunten besproken omdat deze bepalend zullen zijn voor de beschikbare doorvaarthoogte.

Voor de Maas zijn er drie trajecten gedefinieerd in dit onderzoek. De beschikbare doorvaarthoogte is sterk verschillend per traject en (daarmee) de hoeveelheid containervaart. Uit de Stresstest Droogte Maas (van der Mark, 2020) is gebleken dat een groot deel van de grotere schepen via het Maas-Waalkanaal varen tot maximaal sluis Born. De grootste havens voor containervaart bevinden zich tussen het Maas-Waalkanaal en Born. Op basis van deze informatie zijn de volgende trajecten gedefinieerd (havens te vinden in Figuur 5-1) in de stresstest:

- Oost-westcorridor tussen Lith⁸ (inclusief stuw) en Cuijk (tot de ingang van het Maas-Waalkanaal);
- Maasroute tussen ingang Maas-Waalkanaal en sluis Born;
- Bovenstroomse deel Maas tussen Born en de grens met België.

⁸ Het riviertraject stroomafwaarts van Lith is deels getijgedomineerd en daarmee opgenomen in de Rijn-Maasmonding methodiek



Figuur 5-1 Aantal scheepsbewegingen per haven voor de Maas, figuur 2-7 uit (van der Mark, 2020)

Samengevat zijn per riviertak⁹ de volgende knelpunten te definiëren:

- | | | |
|------------------------------|--|-------------------------|
| • Prins Willem-Alexanderbrug | | Waal |
| • Deventer wegbrug | | IJssel |
| • Stadsbrug Venlo | | Maas: Maasroute |
| • Ravenstein spoorbrug | | Maas: Oost-westcorridor |
| • Oosterbeek spoorbrug | | Nederrijn/Lek |

Hierbij wordt opgemerkt dat de beschikbare doorvaarhoogte bij de vizierbogen van de stuwen op de Nederrijn/Lek wordt overschat vanwege de kromming in de bogen. De verwachting is dat de doorvaarhoogte met ongeveer 2 meter wordt overschat. Hierdoor zou het goed mogelijk kunnen zijn dat de stuw bij Driel in geheven toestand het knelpunt vormt op de Nederrijn/Lek. De precieze beschikbare doorvaarhoogte is afhankelijk van de precieze stand van de stuw (hoek) en de benodigde padbreedte voor schepen. Dit kan het beste worden gedaan in een aparte studie waar vaarroutes in meegenomen kunnen worden.

⁹ De beschikbare doorvaarhoogte stroomopwaarts van het Julianakanaal is erg laag door de (historische) stadsbruggen in het centrum van Maastricht.

Daarnaast is voor de bruggen bij Kampen, Zutphen en Maastricht er van uitgegaan dat deze open gaan. Deze bruggen hebben ook in geopende toestand een maximale hoogte (hefbrug). Met name de brug bij Kampen is erg laag in gesloten toestand en zal dan ten allen tijde een knelpunt vormen. Ofwel, de waarden bij bovengenoemde bruggen is de maximaal beschikbare doorvaarthoogte, in geopende toestand.

In Tabel 5.1 staan per riviertak de afvoeren bij Lobith (Rijntakken) of Eijsden (Maas) waarbij de indicatieve waarden (4-laags op Waal/Nederrijn/Lek | 3-laags op de IJssel/Maas) ten minste 20 dagen per jaar worden onderschreden. Hierbij dient opgemerkt te worden dat vanaf een afvoer van 7000 m³/s bij Lobith delen van de Rijn waarschijnlijk gestremd worden ten behoeve van de nautische veiligheid (Bijlage E). Op de Maas zal op een gegeven moment scheepvaart ook niet mogelijk zijn door de hoge stroomsnelheden, vanaf welk moment dit een rol speelt is niet formeel vastgelegd.

In Tabel 5.2 is per knelpunt op elke riviertak, voor de verschillende terugkeertijden, de onderschrijdingsduur weergegeven voor een jaar. Doordat er wordt gewerkt met fictieve jaren is niet precies te zeggen hoe lang aaneengesloten de beschikbare doorvaarthoogte wordt onderschreden. Er is wel een schatting te geven op basis van de systeemwerking (afvoergolven). Hierbij zullen de afvoergolven op de Rijn langer duren en meer gerelateerd zijn aan het hoogwaterseizoen. Op de Maas zijn de afvoergolven korter van duur maar komen deze sneller en vaker voor. Globaal gezien kan de volgende indeling worden gemaakt:

- 0 – 7 dagen zal waarschijnlijk aaneengesloten worden onderschreden binnen één afvoergolf.
- 7 – 30 dagen kan één aangesloten periode vormen tijdens het hoogwaterseizoen, maar kan ook samenhangen met meerdere afvoergolven. Hierdoor zijn er per jaar meerdere periodes waarbij enkele dagen de doorvaarthoogte wordt onderschreden.
- 30 – 90 dagen zal samenhangen met meerdere lange aaneengesloten periodes van onderschrijding. Dit komt er op neer dat tijdens het hoogwaterseizoen (oktober – april) lange periodes zullen zijn waarop er niet voldoende doorvaarthoogte beschikbaar is.
- 90 – 180 dagen leidt er toe dat tijdens het hoogwaterseizoen vrijwel de gehele tijd niet voldoende doorvaarthoogte beschikbaar is.
- > 180 dagen resulteert in beperkingen gedurende het gehele jaar. Afvoergolven in de zomer kunnen dan ook leiden tot een beperking in doorvaarthoogte.

Tabel 5.1 Afvoer bij Lobith/Eijsden waarbij de indicatieve waarde wordt onderschreden bij het knelpunt op de betreffende riviertak.

	11,35 m	9,1 m	8,65 m	7,0 m
Waal	5.580 m ³ /s	11.545 m ³ /s		
Nederrijn/Lek	5.098 m ³ /s	10.204 m ³ /s		
IJssel			2.995 m ³ /s	5.220 m ³ /s
Maasroute			1.095 m ³ /s	1.710 m ³ /s

Tabel 5.2 Onderschrijdingsduur voor de verschillende terugkeertijden per knelpunt op elke riviertak. De achtergrondkleur correspondeert met de hierboven genoemde indeling van onderschrijdingsduur per jaar (volgorde: wit, grijs, oranje, rood, paars).

	Terugkeertijd	1		2		10		50		100	
		Ref	WH85	Ref	WH85	Ref	WH85	Ref	WH85	Ref	WH85
Waal	9,1	0	0	0	0	0	1	1	7	2	8
	11,35	0	0	5	13	22	32	30	46	34	50
IJssel	7	0	0	9	16	26	38	39	56	44	59
	8,65	0	0	54	66	123	124	166	156	186	172
Nederrijn/Lek	9,1	0	0	0	0	0	4	4	9	4	12
	11,35	0	0	10	17	27	40	40	57	50	64
Maasroute	7	0	0	0	0	3	6	8	12	10	12
	8,65	0	0	4	7	19	23	26	32	27	33
	9,1	0	0	9	13	26	32	39	45	41	45
Oost-westcorridor	7	0	0	0	0	4	7	9	13	11	14
	8,65	2	1	53	50	95	95	114	114	117	115
	9,1 ¹⁰	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365

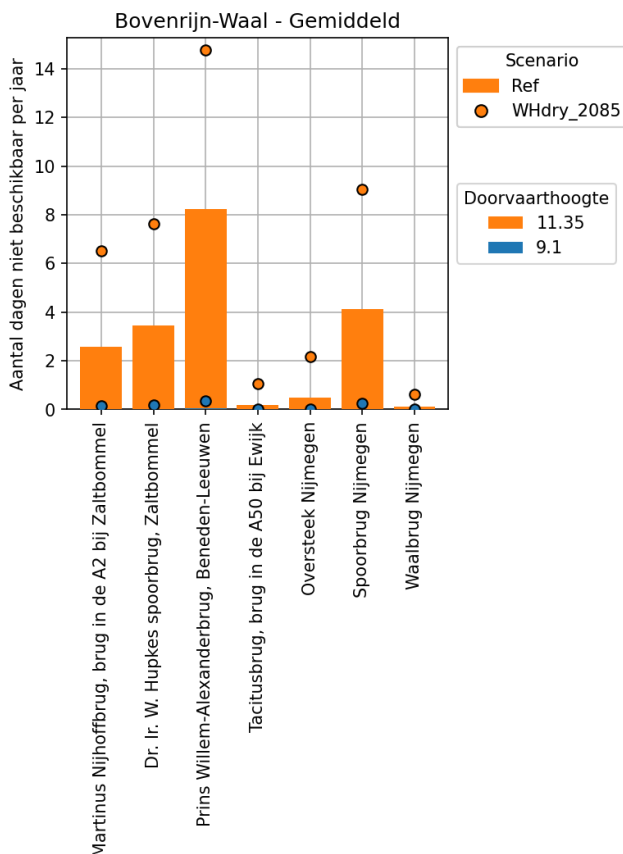
5.1.1 Waal

In Figuur 5-2 is de onderschrijdingsduur te vinden voor een gemiddeld jaar voor de bruggen over de Waal. In bijlage A is de onderschrijdingsduur bij een gegeven herhalingstijd (100, 50, 10, 2 en 1) te vinden. In Tabel 5.2 zijn de onderschrijdingsduren voor het knelpunt op de Waal (Prins Willem-Alexanderbrug) weergegeven.

Op de Waal is er in het huidige klimaatscenario, vanaf een herhalingstijd van 2 jaar, voor het eerst een overschrijding van de hoge indicatieve waarde (11,35 meter) waar te nemen bij de Prins Alexanderbrug. Het gaat dan nog om enkele dagen over een heel jaar. Dit loopt op naar 10% over het hele jaar (ca. 30 dagen) bij een herhalingstijd van 100 jaar. Met de klimaatverandering neemt de onderschrijding met ongeveer 10 – 15 dagen toe wat er toe leidt dat de procentuele toename bij de lage herhalingstijden het hoogste is.

De laagste indicatieve waarde wordt onderschreden vanaf een herhalingstijd van 50 jaar in het huidige klimaatscenario. Dit blijft beperkt tot 1 – 2 dagen per jaar voor de twee hoogste herhalingstijden. Dit verandert naar 7 – 8 dagen in het toekomstige klimaatscenario. Tevens wordt de doorvaarthoogte voor de lage indicatieve waarde al vanaf een herhalingstijd van 10 jaar onderschreden met het toekomstige klimaatscenario. Voor de interpretatie hiervan zie de opsomming bij paragraaf 5.1.

¹⁰ Met de hoogte van de brug en het streefpeil is de beschikbare doorvaarthoogte 8,95 meter bij de spoorbrug van Ravenstein



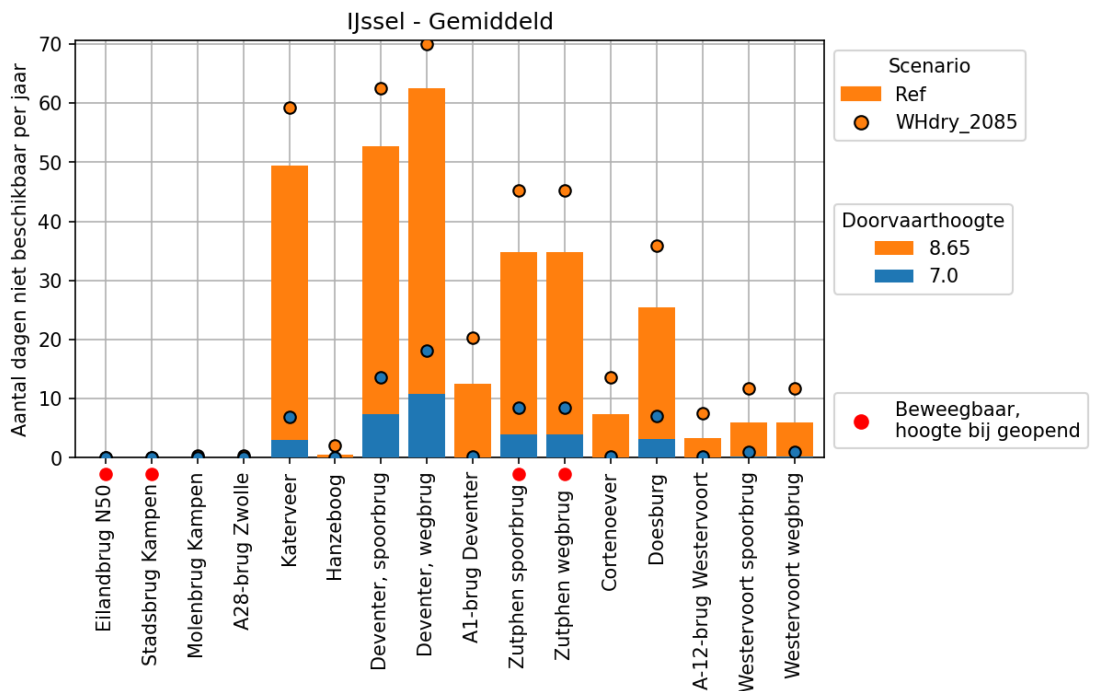
Figuur 5-2 Onderschrijdingsduur doorvaartheogte voor de bruggen over de Waal voor gemiddelde condities voor het huidige klimaatscenario en het toekomstige scenario (in bolletjes).

5.1.2 IJssel

In Figuur 5-3 is de onderschrijdingsduur te vinden voor een gemiddeld jaar voor de bruggen over de IJssel. In bijlage A is de onderschrijdingsduur bij een gegeven herhalingsstijd (100, 50, 10, 2 en 1) te vinden. In Tabel 5.2 zijn de onderschrijdingsduren voor het knelpunt op de IJssel (Deventer, wegbrug) weergegeven.

Op de IJssel is er bij het knelpunt Deventer wegbrug vanaf een herhalingsstijd van 2 jaar al een onderschrijding van meer dan 15% over het gehele jaar voor de hoge indicatieve waarde (8,65 meter) in het huidige klimaatscenario. Dit loopt op naar 50% bij de hogere herhalingsstijden. Het komt er dus op neer dat al vrij snel 3-laagscontainervaart met High-Cube containers niet mogelijk is voor een groot deel van het jaar in de referentie situatie. Het klimaatscenario verandert hier vrij weinig aan bij hoge terugkeertijden, al neemt de onderschrijdingsduur bij een herhalingsstijd van 2 jaar met zo'n 10 dagen toe.

De lage indicatieve waarde wordt ook al onderschreden bij een herhalingsstijd van 2 jaar, al gaat het hier om 4 – 8 dagen per jaar. Dit neemt toe tot 40 dagen bij een herhalingsstijd van 100 jaar. Door de hogere afvoeren in het toekomstige klimaatscenario neemt de onderschrijding 7 tot 15 dagen toe, waarbij de toename in onderschrijdingsduur groter is bij hogere herhalingsstijden. Relatief gezien neemt de onderschrijding meer toe bij lagere herhalingsstijden (2x) ten opzichte van de hogere herhalingsstijden (1.3x).



Figuur 5-3 Onderschrijdingsduur doorvaarhoogte voor de bruggen op de IJssel voor gemiddelde condities voor het huidige klimaatscenario (staafdiagram) en het toekomstige scenario (bolletjes). Gemarkeerd zijn de beweegbare bruggen, de berekening is uitgevoerd voor de beschikbare doorvaarhoogte in geopende conditie.

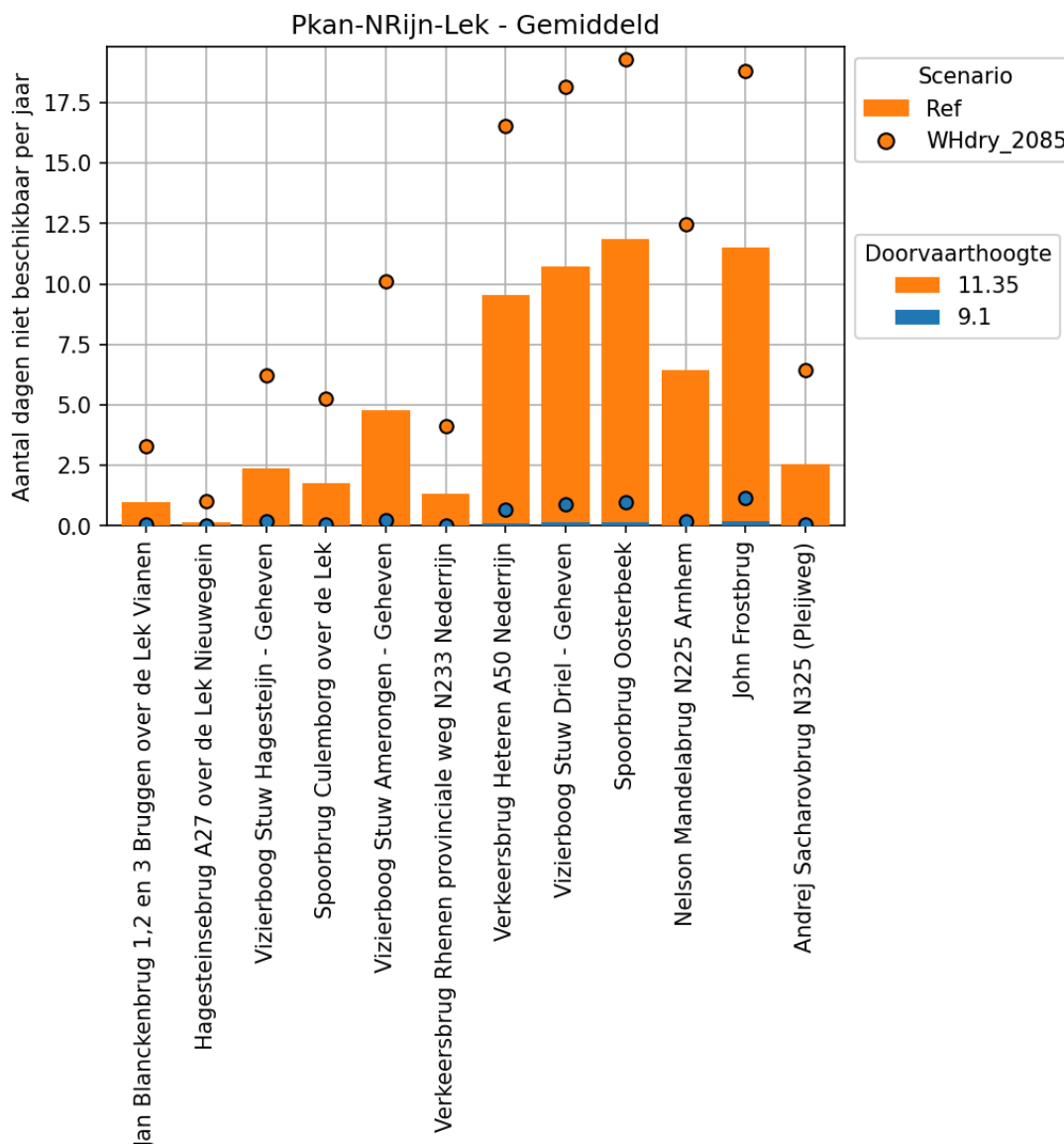
5.1.3 Nederrijn/Lek

In Figuur 5-4 is de onderschrijdingsduur te vinden voor een gemiddeld jaar voor de bruggen over de Nederrijn/Lek. In bijlage A is de onderschrijdingsduur bij een gegeven herhalingstijd (100, 50, 10, 2 en 1) te vinden. In Tabel 5.2 zijn de onderschrijdingsduren voor het knelpunt op de Nederrijn/Lek (Spoorbrug, Oosterbeek) weergegeven.

De knelpunten bevinden zich allemaal in het bovenstroomse deel van de Nederrijn. Dit deel van de rivier zou omzeild kunnen worden door via het Betuwepand naar de Waal te varen. Het grootste knelpunt op dit traject (spoorbrug Oosterbeek) is ook meer beperkend dan het knelpunt op de Waal waardoor omvaren een plausibele optie is.

De onderschrijdingsduur is vergelijkbaar met die van de Waal. Zo is ook hier vanaf een herhalingstijd van 2 jaar voor het eerst een onderschrijding te zien voor de hoge indicatieve waarde. Bij hogere herhalingstijden (50 – 100 jaar) neemt dit toe tot 10-14% van het gehele jaar. De relatieve toename in onderschrijdingsduur als gevolg van het klimaatscenario is het grootst bij lagere herhalingstijden.

Net als op de Waal wordt de laagste indicatieve waarde onderschreden vanaf een herhalingstijd van 50 jaar. Bij snelle klimaatverandering in 2085 gebeurt dit al bij een herhalingstijd van 10 jaar.



Figuur 5-4 Onderschrijdingsduur doorvaarhoogte voor de bruggen op de Nederrijn-Lek voor gemiddelde condities voor het huidige klimaatscenario (staafdiagram) en het toekomstige scenario (bolletjes).

5.1.4 Maas

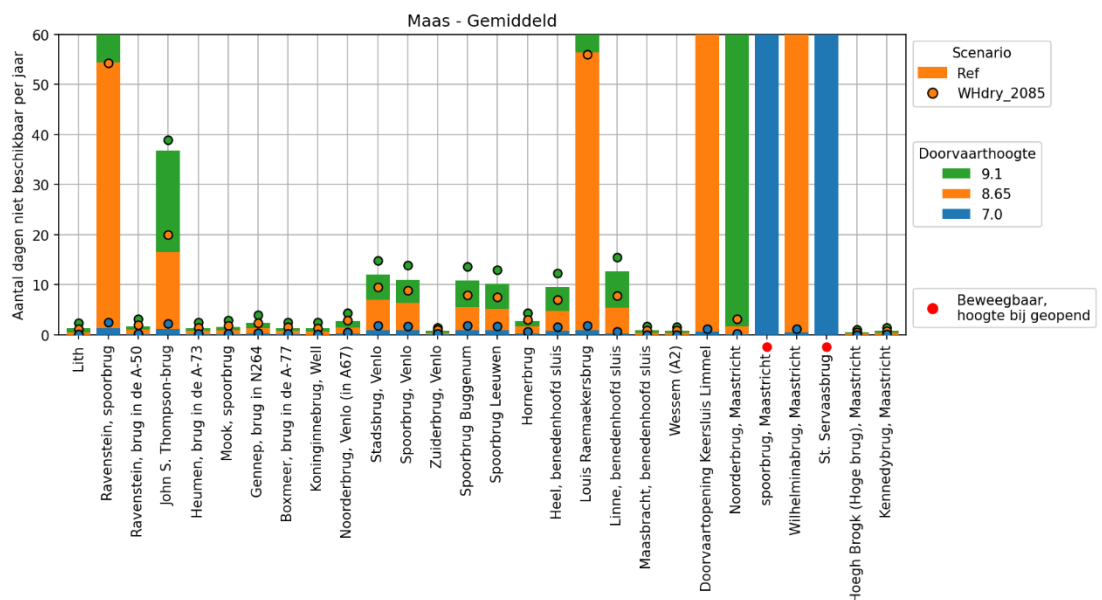
In Figuur 5-5 is de onderschrijdingsduur te vinden voor een gemiddeld jaar voor de bruggen over de Maas. In bijlage A is de onderschrijdingsduur bij een gegeven herhalingsduur (100, 50, 10, 2 en 1) te vinden. In Tabel 5.2 zijn de onderschrijdingsduren voor de twee knelpunten van de twee belangrijkste routes (Maasroute en Oost-west corridor) op de Maas weergegeven.

De Maas heeft de volgende knelpunten voor de drie verschillende trajecten:

- Het meest bovenstroomse traject vanaf Maastricht tot en met Born heeft een beperkte beschikbare doorvaarhoogte. Tegelijkertijd is de hoeveelheid containervaart op dit traject beperkt en over het algemeen ook minder dan 3 lagen¹¹.

¹¹ Omdat de gehele Maas in één keer wordt doorgerekend is ook de lage indicatieve waarde van 4-lagen containers doorgerekend.

- Op dit traject is er al vrij snel een beperking in de beschikbare doorvaarthoogte waarbij waarden hoger dan 8,65 meter vrijwel het gehele jaar worden onderschreden bij meerdere bruggen. Hier verandert het klimaatscenario maar weinig aan. Dit betekent dat 3-laagscontainervaart met High Cube containers amper mogelijk is. Er zijn enkele bruggen die open kunnen waarbij de indicatieve waarde van 7 meter ook vrijwel het hele jaar wordt onderschreden. Hierdoor is containervaart wel mogelijk maar zal de brug vaak open moeten.
- De onderschrijdingsduur neemt met 2-3 dagen toe voor 3-laagscontainervaart vanaf een herhalingstijd van 2 jaar voor het toekomstige klimaatscenario.
- Het traject tussen Born en Grave (~Maasroute) wordt meer gebruikt voor containervaart vanwege de terminal stroomafwaarts van Venlo en bij Born. Op dit traject vormt de stadsbrug bij Venlo het knelpunt. Veel van de containervaart vaart een deel van de route over de Waal, om via het Maas-Waalkanaal naar de Maas te varen.
 - De beperking in doorvaarthoogte is, vergeleken met de andere trajecten op de Maas, redelijk beperkt in het huidige klimaatscenario. Met een herhalingstijd van 100 jaar is de onderschrijdingsduur 10 dagen voor 3-laagscontainervaart (7 meter) en 41 dagen voor 4-laagscontainervaart. (9,1 meter) Dit neemt toe met 4 dagen (T = 2), 6 dagen (T = 10), 6 dagen (T = 50) en 4 dagen (T = 100) door het toenemen van de afvoer voor 4-laagscontainervaart. Het resultaat is een onderschrijdingsduur van 13, 26, 39 en 45 dagen.
- Stroomafwaarts van Grave (Oost-westcorridor) zijn meerdere knelpunten, waaronder de brug bij Ravenstein. De stuw bij Lith geldt alleen als knelpunt bij hogere afvoeren, als de stuw open is gezet en deze gebruikt moet worden door de scheepvaart. Voor dit traject geldt dat de meeste schepen met een hogere scheepshoogte gebruik zullen maken van de Waal en het Maas-Waalkanaal.
 - 4 laags containervaart met high cube containers is niet mogelijk op dit traject, met het streefpeil bij lage afvoeren is er 8,95 meter beschikbaar bij de spoorbrug van Ravenstein. Met 3 lagen containers is het mogelijk om het gehele jaar over dit traject te varen tot een herhalingstijd van 10 jaar in het huidige klimaat. Dan zijn er enkele dagen per jaar beperkingen in de doorvaarthoogte. Dit neemt met 4 dagen toe door het klimaatscenario.



Figuur 5-5 Onderschrijdingsduur doorvaarthoogte voor de bruggen op de Maas voor gemiddelde condities, gelimiteerd op 60 dagen voor het huidige klimaatscenario (staafdiagram) en het toekomstige scenario (bolletjes). Alle balken die niet zichtbaar zijn lopen door tot 365 dagen: deze doorvaarthoogte is bij die bruggen nooit beschikbaar.

5.2 Rijn-Maasmonding

In deze paragraaf wordt de onderschrijding van de doorvaarthoogte gepresenteerd voor de historische jaren (5.2.1) en geïdealiseerde waterstandsduurlijnen (5.2.2) voor de Rijn-Maasmonding. Er wordt vooral gekeken naar de knelpunten op de verschillende trajecten. Er wordt met behulp van de historische jaren gekeken hoe het systeem zich gedraagt en hoe lang een bepaalde waarde wordt onderschreden. De resultaten zijn te vinden in bijlage C. In bijlage D wordt de invloed van verschillende parameters op een rij gezet. Net als bij de rivieren zijn de onderschrijdingsduren per jaar te vertalen naar een schatting van aaneengesloten periode. Hierbij dient opgemerkt te worden dat verder stroomopwaarts de invloed van het getij afneemt, hierdoor zal een vergelijkbare overschrijdingsduur verder stroomopwaarts langer aaneengesloten zijn ten opzichte van bruggen dicht bij de zee. Globaal gezien kan de volgende indeling worden gemaakt:

- < 1 dag hangt samen met hoge stormopzet en zal leiden tot een onderschrijding van de doorvaarthoogte gedurende 1 of meerdere getijperiodes;
- 1 – 7 dagen per jaar hangt samen met een vaker voorkomende stormopzet. Als gevolg hiervan zullen er meerdere periodes zijn per jaar waarin enkele uren aaneengesloten de doorvaarthoogte wordt onderschreden;
- 7 – 30 dagen per jaar is het waarschijnlijk dat geregeld de doorvaarthoogte wordt onderschreden. Dit zal dan enkele uren per getijperiode zijn afhankelijk van de totale onderschrijding over het gehele jaar.
- 30 – 90 dagen per jaar zal zo goed als elke getijperiode de doorvaarthoogte worden onderschreden. Met 90 dagen per jaar zal gemiddeld 3 uur per getijperiode de doorvaarthoogte worden onderschreden.
- > 90 dagen zal de onderschrijding per getijperiode steeds meer toenemen. Met 180 dagen per jaar zal tijdens de hele vloedperiode de doorvaarthoogte worden onderschreden.

5.2.1 Historische jaren

In Tabel 5.3 is de onderschrijdingsduur in aantal dagen voor de laagste brug van elke riviertak in het Rijn-Maasmondingsgebied getoond voor de 5 historische jaren (§4.2.1). De waarden van de overige bruggen zijn te vinden in bijlage B.

Op de knelpunten op de Nieuwe en Oude Maas neemt de onderschrijdingsduur van de beschikbare doorvaarthoogte sterk toe als gevolg van 1 meter zeespiegelstijging. De helft van het jaar is een scheepshoogte van 11,35 meter dan niet mogelijk bij de bruggen over de Nieuwe en Oude Maas. Dit is ook zichtbaar in Figuur 5-6 en Figuur 5-7 waar de minimaal beschikbare doorvaarthoogte per getijperiode is getoond voor twee indicatieve jaren (1953 en 1990). Het komt er op neer dat vrijwel elke getijperiode er een periode voorkomt waarin deze doorvaarthoogte wordt onderschreden. De onderschrijding van de 9,1 meter waarde is afhankelijk van het optreden van een storm. Door de zeespiegelstijging neemt de kans op het onderschrijden van deze waarde wel toe maar blijft het beperkt tot één of enkele getijperiodes over het gehele jaar. De uitzondering hierop is de spoorbrug bij Dordrecht die over het gehele jaar 1965 20 dagen minder dan 9,1 meter doorvaarthoogte beschikbaar heeft. Schepen die via Rotterdam richting de Waal varen zullen deze brug kunnen omzeilen door te varen over de Nieuwe Maas, Noord en Beneden Merwede.

Een opmerking bij bovenstaande knelpunten is dat de Botlekbrug op de Oude Maas in de huidige situatie beide indicatieve waarden vrijwel het gehele jaar onderschrijdt en dat daardoor de brug geregeld geopend moet worden.

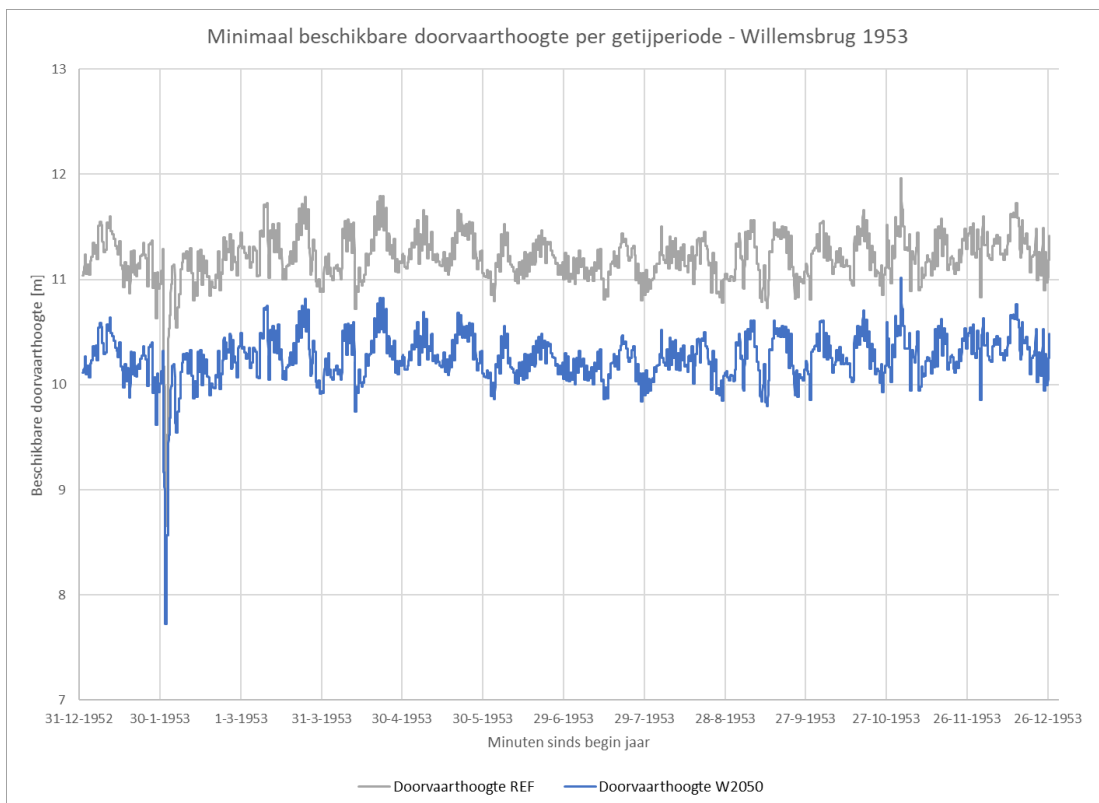
De Moerdijkbrug en brug bij Keizersveer¹² kunnen in de huidige situatie het gehele jaar niet voldoen aan een doorvaarthoogte van 11,35 meter. Het komt ook geregeld voor dat de 9,1 meter waarde wordt onderschreden. Met 1 meter zeespiegelstijging wordt ook deze laatste waarde vrijwel het gehele jaar onderschreden, het kan echter zijn dat het gebruikte model het effect van zeespiegelstijging overschat.

De Merwedebrug van de A27 vormt het knelpunt op de Rijncorridor. Deze is in de huidige situatie al geregeld te laag voor schepen met High-Cube containers of meer dan 4 lagen containers. Het effect van zeespiegelstijging is daarentegen relatief beperkt (de brug ligt relatief ver bovenstrooms) en leidt tot een beperkte toename in onderschrijdingsduur.

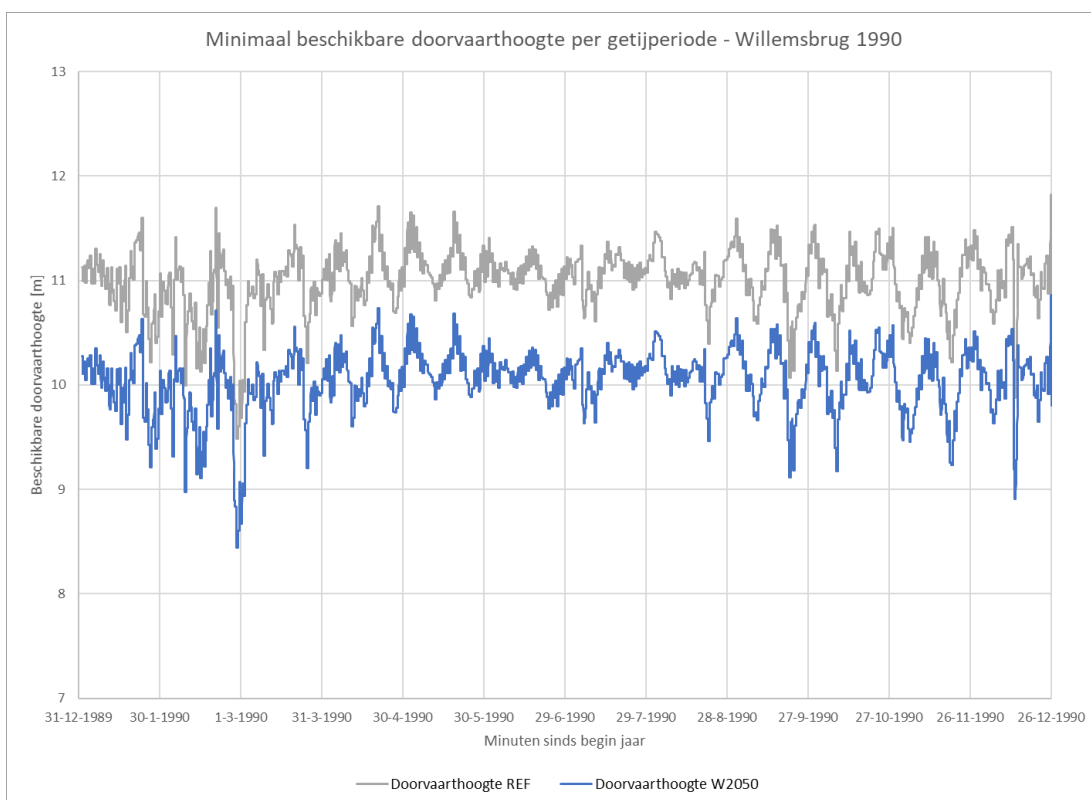
Tabel 5.3 Onderschrijdingsduren van de knelpunten in de Rijn-Maasmonding voor verschillende indicatieve jaren met een achtergrondkleur gebaseerd op de onderverdeling in 5.2 (volgorde: wit, grijs, oranje, rood, paars). Vaste bruggen zijn onderstreept. Een hogere toename in onderschrijding resulteert in een rodere kleur in de tabel. Voor Keizersveer is gebruik gemaakt van de bestaande brughoogte en niet de brughoogte na de renovatie

Brug	referentie jaar	Referentie		W2050 1m stijging		Verschil	
		11.35 m	9.1 m	11.35 m	9.1 m	11.35 m	9.1 m
Hartelbrug (Hartelkanaal)	1953	82.22	0.17	271.68	0.81	189.46	0.63
	1965	101.92	0.00	289.17	0.87	187.25	0.87
	1990	108.76	0.00	289.49	1.33	180.73	1.33
	1932	83.60	0.00	275.40	0.19	191.80	0.19
	1927	86.62	0.00	282.25	0.00	195.63	0.00
Spijkenissebrug (Oude Maas)	1953	6.47	0.01	151.63	0.34	145.16	0.33
	1965	21.63	0.00	174.20	0.12	152.58	0.12
	1990	28.04	0.00	174.33	0.09	146.30	0.09
	1932	10.33	0.00	156.64	0.00	146.31	0.00
	1927	9.10	0.00	156.88	0.00	147.78	0.00
Willemsbrug (Nieuwe Maas)	1953	5.95	0.10	136.98	0.41	131.03	0.31
	1965	19.79	0.00	156.33	0.23	136.55	0.23
	1990	25.83	0.00	156.18	0.25	130.35	0.25
	1932	8.89	0.00	141.06	0.00	132.17	0.00
	1927	7.63	0.00	141.56	0.00	133.93	0.00
Spoorbrug Dordrecht (Oude Maas)	1953	355.22	0.35	359.64	2.15	4.42	1.80
	1965	363.67	0.58	363.67	21.89	0.00	21.31
	1990	363.57	0.00	363.57	8.15	0.00	8.15
	1932	356.53	0.00	360.69	2.58	4.16	2.58
	1927	364.23	0.00	364.23	0.02	0.00	0.02
Moerdijkbrug spoor (Hollands Diep)	1953	365.01	2.65	365.01	316.13	0.00	313.48
	1965	365.01	13.15	365.01	312.89	0.00	299.74
	1990	365.01	13.87	365.01	344.13	0.00	330.26
	1932	366.01	4.30	366.01	320.32	0.00	316.02
	1927	365.01	0.13	365.01	327.74	0.00	327.62
Merwedebrug A27 (Boven Merwede)	1953	28.74	0.00	47.33	0.87	18.59	0.87
	1965	189.94	26.56	198.11	27.50	8.17	0.94
	1990	39.64	5.86	47.80	7.19	8.16	1.33
	1932	40.38	1.96	56.49	7.19	16.11	5.24
	1927	105.41	0.00	116.33	0.00	10.92	0.00
Keizersveer (Bergsche Maas)	1953	365.01	6.19	365.01	359.08	0.00	352.89
	1965	365.01	36.51	365.01	357.45	0.00	320.94
	1990	365.01	42.73	365.01	359.35	0.00	316.62
	1932	366.01	22.03	366.01	357.18	0.00	335.15
	1927	365.01	9.02	365.01	359.38	0.00	350.36

¹² Op basis van de huidige brughoogte, de verhoging als gevolg van de renovatie Hooipolder is niet meegenomen.



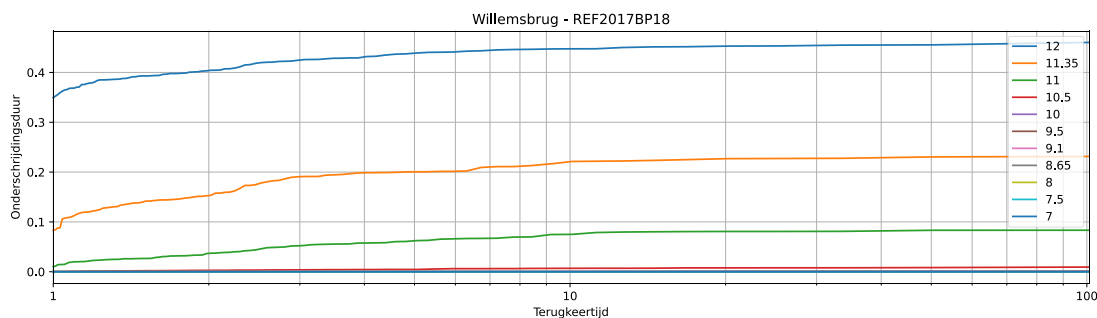
Figuur 5-6 Minimaal beschikbare doorvaarthoogte per getijperiode voor het indicatieve jaar 1953 bij de Willemsbrug.



Figuur 5-7 Minimaal beschikbare doorvaarthoogte per getijperiode voor het indicatieve jaar 1990 bij de Willemsbrug.

5.2.2 Geïdealiseerde waterstandsduurlijnen

In hoofdstuk 4.3 is de methode beschreven waarmee de overschrijdingskromme van de waterstand is bepaald per herhalingstijd van een jaar. In deze paragraaf wordt deze informatie gecombineerd met de brughoogten voor het bepalen van de onderschrijding van de indicatieve waarden van de doorvaarthoogte. Dit is weergegeven in Figuur 5-8 voor de Willemsbrug. Omdat we nu niet kijken naar waterstand, maar naar doorvaarthoogte spreken we hier over de onderschrijdingsduur: hoe vaak is de doorvaarthoogte lager dan een gegeven niveau. Hieruit blijkt dat de doorvaarthoogte voor hoge herhalingstijden (rechts in de figuur) nauwelijks vaker wordt onderschreden dan bij herhalingstijden van 10 jaar. Oftewel, de bedreiging doorvaarthoogte is in de Rijn-Maasmonding niet gevoelig voor extremen.



Figuur 5-8 Onderschrijdingsduur van verschillende doorvaarthoogtes bij verschillende herhalingstijden voor de Willemsbrug in het referentie scenario (logaritmische as).

Deze analyse van de over- en onderschrijdingsduur krommes is uitgevoerd voor iedere brug in de Rijn-Maasmonding. Hieruit blijkt hoe vaak de doorvaarthoogte bij iedere brug in een gemiddeld jaar, of bij een specifieke herhalingstijd wordt onderschreden. Dit is gegeven in Figuur 5-9 voor de herhalingstijden 2 (boven) en 10 jaar (onder). In deze figuur zijn voor alle bruggen vier overschrijdingsniveaus gegeven. Voor de bruggen langs de Hollandse IJssel¹³ zijn de laagste niveaus van belang (7,0 en 8,65 m) voor de rest van de Rijnmaasmonding gelden de hogere niveaus (9,1 en 11,35 m) (zie ook hoofdstuk 3.3). De resultaten van deze figuur zijn in tabelvorm gegeven in Bijlage D.

Uit de analyse van de doorvaarthoogte van de Rijnmaasmonding in het huidige klimaat wordt het volgende geconcludeerd voor de huidige situatie:

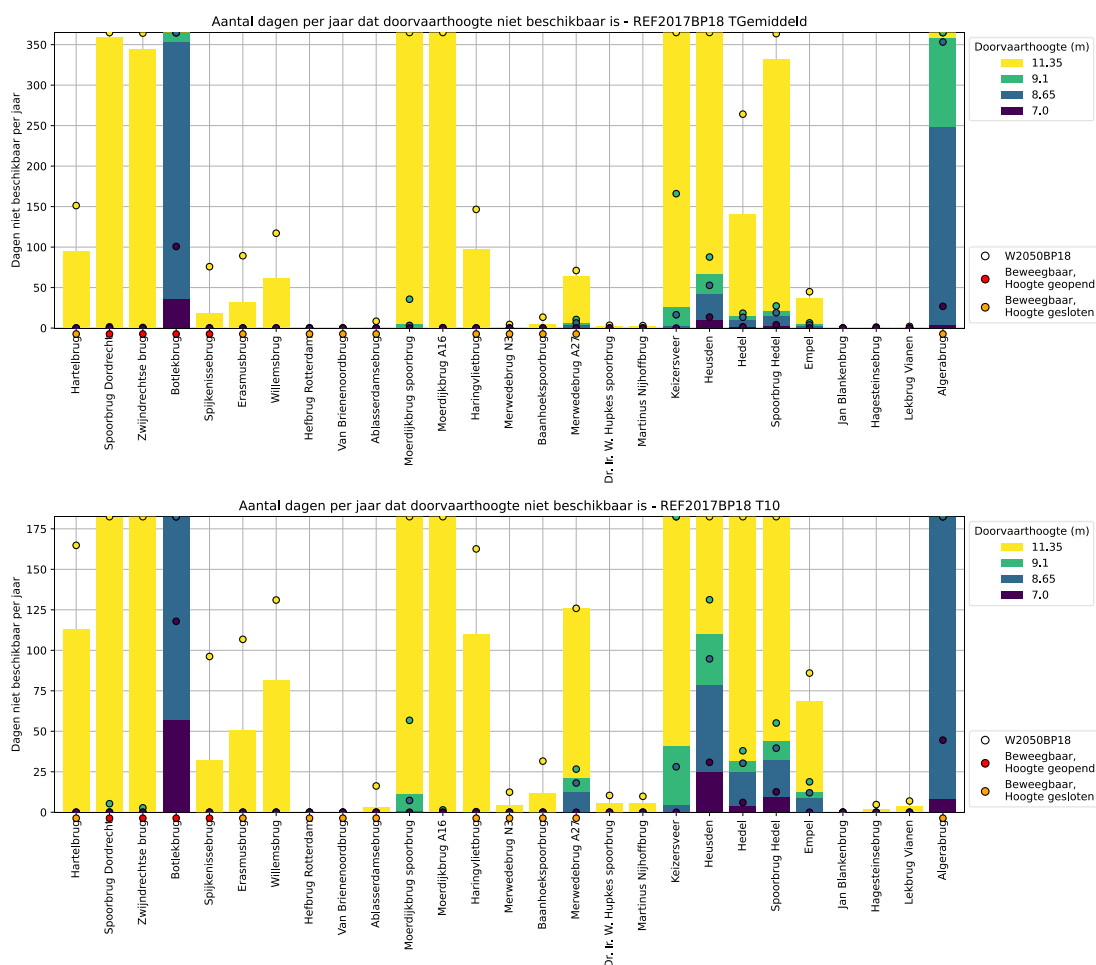
- In een gemiddeld jaar zijn er 8 bruggen die nooit beperkend zijn voor een doorvaarthoogte van 11,35 m en 2 bruggen die minder dan 2 dagen (48 uur) beperkend zijn. Daarna neemt het aantal dagen met dagen waarop een hoogte van 11,35 m mogelijk is toe (in 7 bruggen) vanaf de Spijkenissebrug (20 dagen) tot de Merwedeburg A27 (140 dagen). Voor de laatste 10 bruggen is een hoogte van 11,35 m het hele jaar niet mogelijk.
- Van de bruggen met altijd-beperkende problemen kunnen de bruggen bij Moerdijk, bruggen Heusden, en Keizersveer niet geopend worden en is de hoogte altijd limiterend.
- Bij een herhalingstijd van 10 jaar (T10) is grotendeels hetzelfde beeld zichtbaar, met voor iedere brug meer dagen met onvoldoende hoogte. Bij de Merwedeburg A27 is het hele jaar onvoldoende hoogte. Dat zal met de nieuw aan te leggen brug niet wezenlijk veranderen, al zal de minimale doorvaarthoogte binnen de openingen iets toenemen (10 centimeter) door het nieuwe ontwerp.

¹³ Deze bruggen worden beheerd door de provincie Zuid-Holland.

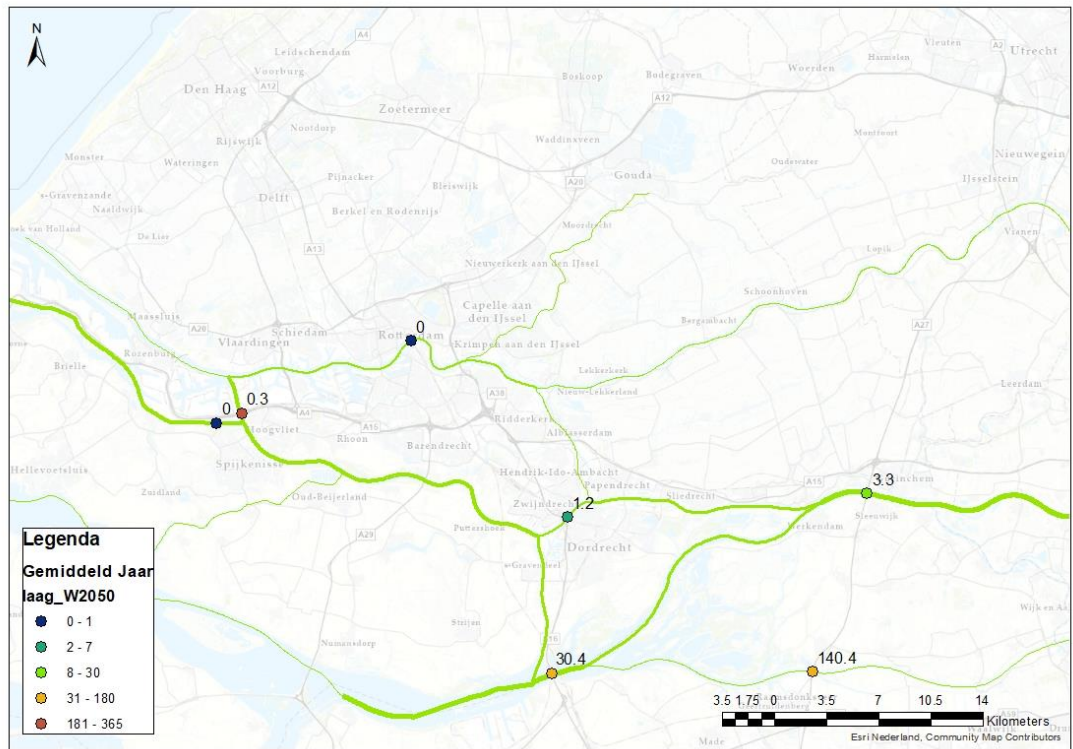
In dezelfde figuur is met markeringen aangegeven hoe de hoogte verandert in het klimaatscenario W2050 (een zeespiegelstijging van 100 cm):

- In een gemiddeld jaar neemt het aantal dagen onderschrijding van de doorvaarthoogtes bij vrijwel alle bruggen toe. Deze toenames zijn bij de monding in de orde grootte van 50 dagen en nemen bij de bovenrivieren af tot enkele dagen.
- De brug bij Keizersveer valt op, doordat een doorvaarthoogte van 9,1 m bijna het hele jaar niet meer haalbaar is.

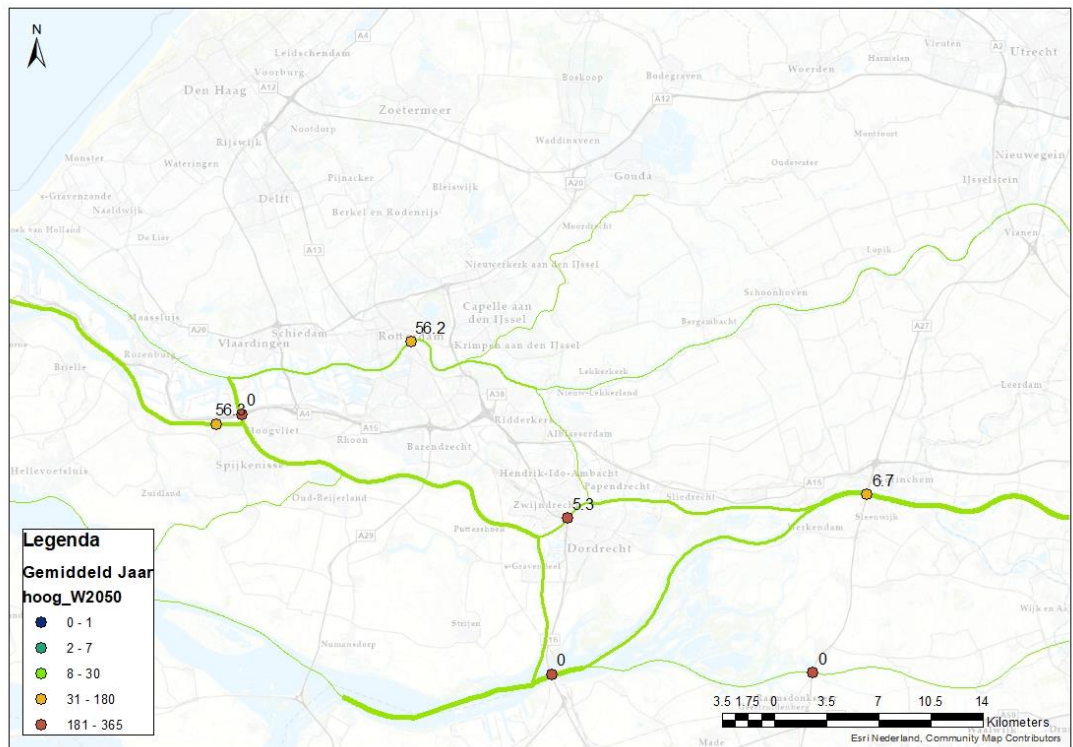
In Figuur 5-10 en Figuur 5-11 zijn de onderschrijdingsduren voor het klimaatscenario en toename in onderschrijdingsduur ruimtelijk weergegeven voor een gemiddeld jaar. De knelpunten (Moerdijkbrug, Spoorburg Dordrecht, Heusden en Merwedeburg A27) zijn duidelijk zichtbaar voor beide indicatieve waarden. De toename in onderschrijdingsduur is groter rondom Rotterdam en Spijkenisse doordat hier de invloed van de zee hoger is.



Figuur 5-9 Aantal dagen dat de doorvaarthoogte niet beschikbaar is, voor een gemiddeld jaar (boven) en een herhalingstijd van 10 jaar (T10, onder). De niveaus 7 en 8,65 zijn enkel van toepassing op de Hollandse IJssel (Algerbrug). De markeringen geven het aantal dagen onderschrijding in scenario W2050BP18 waarbij de kleurcodering gelijk is aan de staafdiagram. De rode markeringen geven aan dat een brug geopend kan worden. Ondanks dat de Willemsbrug niet geopend kan worden is er scheepvaartverkeer mogelijk door de Koningshaven dankzij de Hefbrug, de Erasmusbrug gaat alleen op gezette tijden open.



Figuur 5-10 Onderschrijdingsduur lage indicatieve waarde (9,1 meter) Rijn-Maasmondung voor absolute duur over een gemiddeld jaar (kleurcode in bollen) en toename (getal naast de brug) ten opzichte van de referentie.



Figuur 5-11 Onderschrijdingsduur hoge indicatieve waarde (11,35 meter) Rijn-Maasmondung voor absolute duur over een gemiddeld jaar (kleurcode in bollen) en toename (getal naast de brug) ten opzichte van de referentie.

5.3 Overige wateren

In dit rapport wordt aangenomen dat de waterstand gelijk blijft in toekomstige situaties in de kanalen en meren. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat een kleine verandering in peil al snel leidt tot een beperking in doorvaarthoogte door de kleine marges. Door zeespiegelstijging en hogere rivierafvoeren kan dit leiden tot een meer uitdagend waterbeheer en dienen er andere maatregelen genomen te worden om het peil in stand te houden. Daarnaast zou door klimaatverandering de intensiteit en frequentie van stormen kunnen toenemen. De precieze impact van klimaatverandering op de stormfrequentie is nog niet zeker en wordt daarom in deze studie niet meegenomen. Er is redelijkerwijs van uit te gaan dat de doorvaarthoogte in deze gebieden niet noemenswaardig zal veranderen in toekomstige situaties.

Er is een uitzondering te noemen op bovenstaande alinea en dat is het Volkerak-Zoommeer en Schelde-Rijnkanaal. Door de hogere rivierafvoer zal de noodberging vaker worden ingezet en stijgt hierdoor het peil in deze wateren vaker. Hoe vaak de noodberging in toekomstige situaties precies wordt ingezet en wat hiervan de gevolgen zijn voor de scheepvaart is nog niet helemaal zeker. De inzet van de noodberging is gekoppeld aan hoge waterstanden die niet vaak voorkomen.

5.4 Conclusie

In deze paragraaf worden de belangrijkste gevolgen van het toekomstige klimaatscenario op een rij gezet per gebied (Rijntakken, Maas en Rijn-Maasmonding). Dit gaat deels over de toename in het aantal onderschrijdingsdagen, maar ook over de totale onderschrijding voor de verschillende herhalingstijden.

Op zowel de Waal als Nederrijn/Lek is het in het nieuwe klimaatscenario minder vaak mogelijk om 5 – 6 lagen containers te vervoeren. Met een herhalingstijd van 10 jaar is het 10% van het jaar niet mogelijk om meer dan 4 lagen containers te vervoeren in plaats 6% van het jaar in de huidige situatie. Daarnaast zal er eens in de 10 jaar een beperking van enkele dagen per jaar zijn voor 4-laagscontainervaart, dit is nu nog eens in de 50/100 jaar.

Op de IJssel is 3-laagscontainervaart met High-Cube containers voor 15% van het jaar met een herhalingstijd van 2 jaar niet mogelijk in de huidige situatie. Dat zal met het toekomstige klimaatscenario oplopen naar 20% van het jaar. Op dit moment is 1 week in het jaar (bij T = 2 jaar) 3-laagscontainervaart niet mogelijk, dat verdubbelt naar 2 weken in het toekomstige klimaatscenario.

Op de Maas neemt bovenstrooms van Venlo de onderschrijdingsduur met 2-3 dagen toe voor 3-laagscontainervaart vanaf een herhalingstijd van 2 jaar voor het toekomstige klimaatscenario. Op het traject tussen Venlo en Grave neemt de onderschrijdingsduur met 4, 6 en 8 dagen toe bij de herhalingstijden van 10, 50 en 100 jaar. Op het traject tussen Grave en Lith neemt de onderschrijdingsduur met 4 dagen toe door het klimaatscenario vanaf een herhalingstijd van 10 jaar.

In de Rijn-Maasmonding rondom Rotterdam (Nieuwe en Oude Maas) is in een gemiddeld jaar met 1 meter zeespiegelstijging 75 tot 117 dagen in het jaar een scheepshoogte van 11,35 meter niet meer mogelijk zonder de bruggen te moeten openen. In de jaren met een herhalingstijd van 50 en 100 jaar zal enkele uren per jaar ook 9.1 meter doorvaarthoogte niet meer mogelijk zijn door de zeespiegelstijging.

De Moerdijkbrug is nu al voor een scheepshoogte van 11,35 meter een knelpunt en wordt tientallen dagen per jaar niet te passeren voor 4-laagscontainervaart door de extra zeespiegelstijging in een gemiddeld jaar.

De Merwedebrug bij Gorinchem wordt met enige regelmaat in het jaar niet toegankelijk voor 4-laagscontainervaart. In totaal gaat het om 10 dagen onderschijding in een gemiddeld jaar. De bruggen op de Bergsche Maas zijn erg gevoelig voor zeespiegelstijging, mogelijk wordt het effect van zeespiegelstijging overschat op het Haringvliet.

6 Gevolgen van afname in doorvaarthoogte

Dit hoofdstuk gaat over de gevolgen van afname in doorvaarthoogte. Hiervoor wordt er begonnen met een schatting van impact (6.1) en vervolgens gekeken naar de mogelijke reacties (6.2) en maatregelen (6.3).

6.1 Impact

Ter indicatie wordt er in dit hoofdstuk op basis van de uitkomsten van paragraaf 3.4 en 5.3 een indicatie gegeven voor het aantal containers dat niet meer vervoerd kan worden door het toenemen van de waterstand in het toekomstige klimaatscenario. In deze rekensom wordt er gekeken naar de Waal omdat hier de grootste hoeveelheid containers wordt vervoerd en het aandeel van 4- en 5-laagscontainervaart beter bekend is. De resultaten zijn bedoeld om de mogelijke gevolgen en reacties beter in te schatten.

In paragraaf 3.4 is op basis van metingen een schatting gemaakt van het aantal containers dat per dag niet vervoerd kan worden als de indicatieve waarden worden onderschreden, waarbij is aangenomen dat deze containerlaag bij alle containervaart vervalt bij overschrijding van de indicatieve waarde. Voor de lage indicatieve waarde (8,65 m, 3-laags) was dit 411 TEU per dag, voor de hoge indicatieve waarde (11,35 m, 4-laags) was dit 55 TEU per dag. Op basis van de berekende hoogte uit de IVS-database, volgde een functie van het verlies in vervoerscapaciteit van containers per dag (Figuur 3-2). Door deze blootstelling te vermenigvuldigen met het aantal dagen dat de indicatieve waarden worden onderschreden, wordt het risico (of de impact) berekend.

Gestart wordt met een handmatige berekening van dit risico. Bij een terugkeertijd van eens in de 50 jaar zijn de overschrijdingsduren van beide indicatieve waarden voor het huidige klimaat 1 en 30 dagen. Hierdoor kan 2061 TEU ($1 \times 411 + 30 \times 55$) niet worden vervoerd. Met het snelle klimaatscenario (WH 2085) neemt de overschrijdingsduur toe naar 6 en 50 dagen, waardoor de impact toe neemt naar 5216 TEU ($6 \times 411 + 50 \times 55$). Door het toenemen van de rivierafvoer kan er dus in een jaar met een herhalingstijd van 50 jaar 3155 TEU extra niet worden getransporteerd.

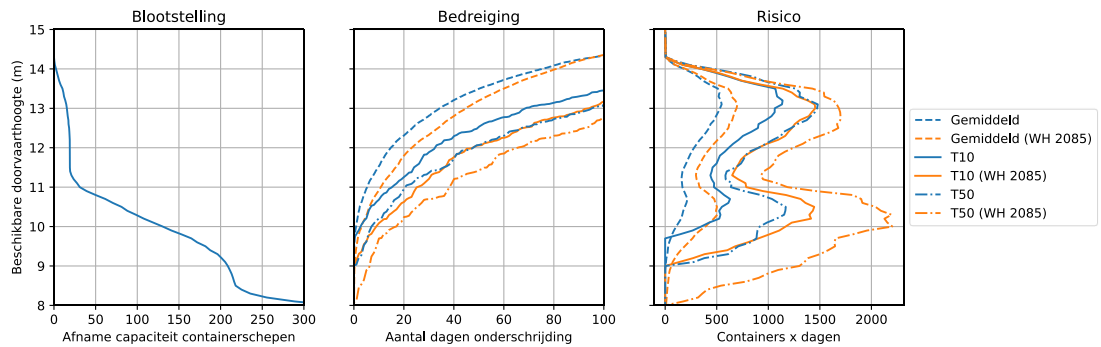
Dezelfde berekening is voor de continue verdeling (zie Figuur 3-2) herhaald. Deze rekenmethode is weergegeven in Figuur 6-1. Bij iedere beschikbare doorvaarthoogte is de hiervoor genoemde berekening uitgevoerd, waarbij de afname in capaciteit van het aantal containers (links) wordt vermenigvuldigd met het aantal dagen dat deze hoogte wordt overschreden (midden), resulterend in het risico per doorvaarthoogte in een gegeven jaar (gemiddeld, T10 of T50) (rechter figuur). Het totale risico in een jaar wordt berekend door de integraal over de y-as te nemen.

Uit de figuur van het risico per doorvaarthoogte blijken twee pieken. Rond 13 m wordt de schaarse 5-laags containervaart niet meer mogelijk in combinatie maar relatief veel dagen, en rond 10 m wordt de veel intensievere 4-laags containervaart niet meer mogelijk voor maar een beperkt aantal dagen.

Het resultaat (de integraal) geeft een verlies in containers in een gemiddeld jaar en in jaren met een terugkeertijd van 10 en 50 jaar. Dit is gegeven in Tabel 6.1.

De resultaten met de continue verdeling geven een nauwkeuriger resultaat, maar ook dezelfde orde grootte als de simpele handberekening. De handberekening is daarom een eenvoudige indicator. De continue verdeling geeft een iets hoger resultaat, voor T50 bij snelle klimaatverandering 8100 in plaats van 5216.

Uitgaande van de huidige verdeling in scheepshoogten, wordt dus maximaal een verlies in transportcapaciteit van 0.4% (8100 van de 2 miljoen) gevonden voor een jaar met relatief hoge afvoeren in het toekomstige klimaatscenario. Op jaarbasis is het effect op de gehele capaciteit dus beperkt. Een focus op enkel de beperkende dagen, of enkel in verhouding tot het transport met de grootste containerschepen zal een hoger percentage geven. In deze studie worden de jaargetallen gepresenteerd omdat deze geacht worden een goede indicator te zijn voor de economische impact en als maat voor de klimaatbestendigheid.



Figuur 6-1 Methode voor berekening van risico. Op basis van blootstelling (gelijk aan Figuur 3-2), de bedreiging voor onvoldoende hoogte (gelijk aan Figuur 4-1) wordt het risico (of impact) berekend als de vermenigvuldiging van beiden. Deze rechter figuur geeft per beschikbare doorvaarthoogte het aantal containers dat per jaar niet meegenomen kan worden. Gegeven zijn een gemiddeld en een T10 en T50 jaar voor het huidige klimaat en bij snelle klimaatverandering (WH 2085).

Tabel 6.1 Verlies in containers door onvoldoende doorvaarthoogte in het huidige klimaat en bij snelle klimaatverandering in 2085, uitgaande van een gelijk aantal schepen dat ingezet wordt.

	Verlies in containers door onvoldoende doorvaarthoogte	
	Huidige klimaat	WH 2085
Gemiddeld per jaar	1300	2200
T10 jaar	2900	4900
T50 jaar	4800	8100

6.2 Reacties

In dit hoofdstuk wordt kwalitatief ingegaan op enkele mogelijke reacties op beperkingen in de doorvaarthoogte. Hiervoor wordt ter indicatie in enkele gevallen gebruik gemaakt van de inschatting van de impact in paragraaf 6.1.

6.2.1 Niet of later varen

Het laten liggen van de lading is met oog op de tijdsdruk op het vervoeren minder waarschijnlijk dan bij andere modaliteiten. Het afwachten van een piek in waterstand in een getijdegebied is wel te timen, maar is ook afhankelijk van nauwkeurige voorspellingen en strakke logistieke planning.

6.2.2 Omvaren

Met omvaren zullen er enkele knelpunten vermeden kunnen worden om de beperking in doorvaarthoogte iets te verminderen. In de meeste gevallen is er nog altijd sprake van een toename in onderschrijding omdat op de alternatieve route op datzelfde moment ook beperkingen zijn. De route over de Nieuwe Maas ten opzichte van de Oude Maas (Spoorbrug Dordrecht en Botlekbrug) is een plausibel alternatief. Het omvaren via de Waal om de knelpunten op de Nederrijn te mijden is ook een plausibele reactie op beperkingen in doorvaarthoogte.

Op de Maas is het vanwege de onderschrijdingsduur op het traject Grave – Keizersveer cruciaal om gebruik te maken van de Waal en het Maas-Waalkanaal om de bruggen op de Bergsche Maas en spoorbrug Ravenstein te vermijden. De waterstand, en daarmee doorvaarthoogte, is gereguleerd op het Maas-Waalkanaal waardoor deze minder gevoelig is voor hoge rivierafvoeren. Bij hoge rivierafvoeren zal echter op een gegeven moment ook op dit kanaal beperkingen ontstaan voor de containervaart.

De doorvaarthoogte bij de Moerdijkbruggen kan sterk beperkend zijn voor de containervaart als de zeespiegel stijgt. Dit is voor de corridor Rotterdam naar het achterland geen probleem, maar kan meer kritisch zijn voor de containervaart vanuit Antwerpen. Doordat deze brug niet open kan, moeten schepen omvaren via de Dordtsche Kil, Oude Maas en Beneden Merwede. Op deze route zijn meerdere lage bruggen die wel open kunnen.

Door de kleine doorvaarthoogte bij de bruggen van Deventer komt de containervaart al snel in de knel op de IJssel. Het is in theorie mogelijk om via het Amsterdam-Rijnkanaal, Markermeer en IJsselmeer vanuit de IJsseldelta de IJssel op te varen. Hierdoor zou het in potentie mogelijk zijn om met een grotere scheepshoogte alsnog delen van de IJssel te bereiken. In de praktijk wordt er vanwege beperkingen in de vaarwegbreedte al gebruik gemaakt van deze omvaarroute door scheepvaart. Of containervaart dit ook doet is niet bekend.

6.2.3 Brug open

Op de grote rivieren zijn er maar enkele bruggen die open kunnen en daarmee kunnen resulteren in een andere reactie op de beperkingen in doorvaarthoogte. Deze bruggen kunnen echter maar tot een beperkte hoogte open (hefbrug) en in deze studie is de waarde meegenomen van een geopende brug omdat scheepvaart anders al heel snel niet meer mogelijk is. Hier is dus al de maximaal beschikbare doorvaarthoogte genomen van de bruggen in geopende toestand. Het gaat hier om de bruggen bij Maastricht, Kampen en Zutphen.

In de Rijn-Maasmonding is het openen van bruggen geen realistische optie voor de schepen met meer dan 4 lagen containers. Anders zou namelijk voor een groot deel van het getij de bruggen open moeten gaan voor de scheepvaart. Voor de 4-laagscontainervaart zou het voor de momenten van windopzet, al dan niet in combinatie met springtij, wel een optie kunnen zijn. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de knelpunten (Spoorbrug Dordrecht en Merwedebrug A27) een cruciale rol vervullen in respectievelijk het hoofdwegennet (een snelweg) en het hoofdspoorwegennet (een drukke spoorlijn). De afweging tussen de verschillende functies van de brug wordt niet in dit project gemaakt, maar dient nader onderzocht te worden alvorens dit als maatregel kan worden beschouwd.

Daarnaast dient opgemerkt te worden dat de nautische veiligheid een uitdaging kan vormen als meerdere schepen moeten wachten op het openen van de brug als er geen ruimte is voor de wachtende schepen.

Dit zal verschillend zijn per brug en dient nader onderzocht te worden als er door beperkingen in doorvaarthoogte frequent de brug geopend dient te worden.

6.2.4 Meer schepen

De beschikbare capaciteit van de vloot is sterk afhankelijk van de economische situatie. Na de economische crisis van 2008 was er lang een overschot aan scheepscapaciteit. Maar in perioden met lage rivierafvoeren zijn er lang niet altijd genoeg schepen om alle vracht te vervoeren, omdat er dan met meer schepen met minder belading wordt gevaren. Hierbij dient ook opgemerkt te worden dat de hoeveelheid personeel in de transportsector een steeds groter probleem wordt. Dus zelfs als de schepen voorhanden zijn is het niet zeker dat alle schepen bemand kunnen worden.

Een M8 Groot Rijnschip¹⁴ heeft ongeveer ruimte voor 50 TEU per laag containers. Uit het rekenvoorbeeld in paragraaf 6.1 volgt dat op de Waal door klimaatverandering, gemiddeld eens in de 50 jaar, 3068 TEU minder vervoerd kan worden met 4-laags containerschepen. Dat betekent dat er dan om en nabij 20 reizen met Grote Rijnschepen extra nodig zijn die met 3-lagen varen. Er is een capaciteitsanalyse nodig om te bepalen of deze capaciteit werkelijk beschikbaar is. Hierbij dient er niet alleen gekeken te worden naar de vloot, maar ook naar de capaciteit bij de terminals. Het inzetten van meer schepen zal namelijk ook resulteren in meer handelingen bij de terminals.

6.2.5 Andere vervoersmethoden

Er is slechts een beperkte capaciteit beschikbaar bij de overige modaliteiten, zoals over de weg of via het spoor. Daarnaast vraagt het vervoeren van containers over andere modaliteiten de inzet van meer voertuigen. Een vrachtwagen kan gemiddeld 2 TEU vervoeren en een trein om en nabij 100 TEU. Om de 3068 TEU te vervoeren zijn 1534 reizen met vrachtwagens of 31 treinreizen extra nodig. Of dit mogelijk is dient onderzocht te worden met een capaciteitsanalyse.

6.3 Maatregelen

6.3.1 Aanpassen infrastructuur

Het verhogen van bruggen is een kostbare aangelegenheid en lang niet overal mogelijk door de beperkte ruimte. Met name spoorbruggen zijn erg duur om te verhogen en vragen veel extra ruimte vanwege het lange talud. Het is mogelijk dat bij het wegnemen van een enkel knelpunt in een corridor de baten opwegen tegen de lasten.

Bij het aanleggen van nieuwe bruggen is het te overwegen om extra marge op te nemen in de brughoogte. Hierbij wordt er voorkomen dat er later kostbare ingrepen nodig zijn in het systeem om voldoende doorvaarthoogte te garanderen.

6.3.2 Ballasten

Schepen hebben de mogelijkheid om water in te nemen als ballast. Dit wordt veelal gedaan vanuit stabiliteitsoogpunt. Maar het is ook een maatregel om bij beperkingen in doorvaarthoogte het schip dieper in het water te laten zinken. Of en tot welke beperkingen in doorvaarthoogte ballasten een haalbare oplossing is zou nader uitgezocht moeten worden.

6.3.3 Informatievoorziening

Incidenten waarbij schepen de brug aanvaren kunnen voorkomen worden met een betere informatievoorziening met betrekking tot de beschikbare doorvaarthoogte. Dit is met name relevant in het getijdegebied waar beperkingen een beperkt deel van het getij kunnen plaatsvinden.

¹⁴ Op basis van de RWS classificatie

7 Discussie

In dit project is een stresstest light uitgevoerd voor de doorvaarthoogte in het hoofdwatersysteem. Bij het starten van het project waren nog niet alle bouwstenen van deze stresstest duidelijk. Tijdens het project is de methodiek in overleg met Rijkswaterstaat bijgestuurd om aan te sluiten bij de laatste inzichten. Dat neemt niet weg dat er nog openstaande vragen en onzekerheden zijn. De resultaten geven een overzicht van de knelpunten met betrekking tot de doorvaarthoogte, maar de mogelijke maatregelen en gevolgen zijn nog niet volledig uitgewerkt. Dit kan in vervolgstudies worden opgepakt.

De bepaling van de impact is gebaseerd op verscheidene uitgangspunten die in praktijk anders uitpakken. Het begint al met de bepaling van de benodigde doorvaarthoogte op basis van de BIVAS en IVS gegevens. Zoals in paragraaf 3 is aangegeven zijn er meerdere redenen waardoor de gebruikte data afwijkt van de praktijk. Als de getallen uit de database worden gebruikt om een impact te bepalen (paragraaf 6) moet het resultaat van die berekening met minstens hetzelfde voorbehoud worden bekeken als de resultaten uit paragraaf 3. Daarnaast zijn er meerdere andere processen die een rol spelen in hoe groot de impact werkelijk zal zijn als gevolg van klimaatverandering en zeespiegelstijging. Dit vraagt een significant uitgebreidere studie. Voorafgaand aan deze studie is het aan te raden om metingen uit te voeren van de benodigde doorvaarthoogte op verschillende riviertakken.

Eén van de aandachtspunten is de invloed van beleidsmatige stremmingen op de beperkingen in de doorvaarthoogte. De knelpunten voor de indicatieve waarde 9,1 meter op de Waal en Nederrijn/Lek hangen samen met hoge Rijnafvoeren vergelijkbaar met 1993 en 1995. Ten tijde van hoge rivierafvoeren wordt vaker besloten om het scheepvaartverkeer te stremmen ten behoeve van de hoogwater- en nautische veiligheid. Als het scheepvaartverkeer in deze situaties wordt gestremd maakt het niet uit of de doorvaarthoogte een probleem is en zullen veel meer goederen (ook met lagere schepen) niet meer over het water kunnen worden vervoerd. Het is dan ook de vraag op welk niveau de bruggen in het systeem moeten worden ingericht. Deze discussie speelt op dit moment ook binnen Rijkswaterstaat en is zeker voor de lagere indicatieve waarden relevant. Wat ook meespeelt is dat veel van het containertransport naar de Boven-Rijn gaat, waar veel bulkgoederen naar het Ruhrgebied worden vervoerd. In delen van de Rijn in Duitsland wordt er over het algemeen al eerder overgegaan tot stremming van het scheepvaartverkeer met het oog op de veiligheid. Zo is te zien in Bijlage E dat bij Kaub het peil Marke 2 wordt overschreden corresponderend met een Lobith afvoer van rond de 7000 m³/s. Vanaf dit peil wordt alle scheepvaart gestremd. Aanbevolen wordt op basis van de resultaten uit de voorliggende studie te onderzoeken of de huidige afweging tussen benodigde doorvaarthoogte en terugkeertijd gegrond is.

De invloed van zeespiegelstijging op de waterstanden in het Haringvliet en Bergsche Maas is vrij hoog. De uitgevoerde sommen gaan uit van een gelijk blijvende aansturing van de Haringvlietssluisen, wat het opstuwende effect van de stijgende zeespiegel kan verhogen. Of in de toekomst de Haringvlietssluisen op dezelfde manier worden aangestuurd en wat hiervan de invloed is op de waterstand op dit deel van de Rijn-Maasmonding is niet te zeggen zonder aanvullende modelsimulaties. In hoeverre zeespiegelstijging goed wordt meegenomen in SOBEK modellen wordt op dit moment ook onderzocht in het Kennisprogramma Zeespiegelstijging. Er kan echter van uit worden gegaan dat de resultaten uit het Nationaal Water Model een redelijke indicatie geven van de waterstanden in de toekomst.

In deze studie is alleen gekeken naar doorvaarthoogten voor containervaart. De hogere waterstanden zullen ook invloed hebben op het speciale transport over water waar ook een minimale doorvaarthoogte voor nodig is. Tevens kunnen hogere waterstanden er voor zorgen dat kades onderlopen en er beperkingen optreden bij terminals. Het is aan te raden om op basis van de resultaten van deze studie (de waterstandsduurlijnen) andere infrastructuur ook te toetsen op de kwetsbaarheid op hoge rivierafvoer.

In deze studie is kort stil gestaan bij de invloed van klimaatverandering op gesloten systemen. Er is ook benoemd dat de waterstand dichter of vaker bij de kritische waarde zal komen en dat er kleinschalige fluctuaties kunnen optreden. Als gevolg van de klimaatverandering is te verwachten dat er meer druk op de gesloten systemen komt. Een gevolg hiervan zou kunnen zijn dat de kritische waterstand vaker wordt benaderd (of overschreden), ook al is het beheer er op gericht om het peil onder deze waterstand te houden.

8 Conclusie

Het doel van de stresstest uit dit rapport is om de knelpunten en gevoeligheid in het Hoofdvaarwegennet (HVWN) voor containervaart te bepalen door te kijken naar de doorvaarthoogte. De doorvaarthoogte op de vaarwegen bepaalt namelijk voor een groot deel hoeveel containers er kunnen worden vervoerd. In deze studie zijn de volgende onderzoeksvragen gesteld die in de alinea's daaronder samengevat worden beantwoord:

- 1 Hoe kunnen zeespiegelstijging en hoge rivierafvoer negatieve effecten hebben op de scheepvaart?
- 2 Hoe vaak en hoe lang zijn er negatieve effecten voor de doorvaarthoogte in het HVWN door klimaatverandering?
- 3 Waar in het HVWN zijn de knelpunten in het systeem?
- 4 Wat zijn de verwachte gevolgen voor de scheepvaart?

De zeespiegelstijging en hoge rivierafvoeren als gevolg van klimaatverandering zorgen ervoor dat er vaker hogere waterstanden voorkomen. Op die momenten neemt de doorvaarthoogte af en kunnen er minder containers worden vervoerd. Voor de wateren die onder alle condities gereguleerd worden, wordt er nu van uitgegaan dat het huidige peil wordt gehandhaafd, waardoor klimaatverandering slechts een beperkte invloed zal hebben op de doorvaarthoogte in deze wateren. Het Volkerak-Zoommeer en daarmee het Schelde-Rijnkanaal is echter aangemerkt als berging voor hoogwaterveiligheid. Tijdens de perioden dat deze bergingsgebieden worden ingezet zal de doorvaarthoogte sterk beperkt worden, al is het waarschijnlijk dat scheepvaart dan ook gestremd wordt.

Voor de overige wateren zijn de effecten van klimaatverandering verschillend per gebied:

- De herhalingsperiode voor beperkingen (~1 dag per jaar) aan de 4-laagscontainervaart op de Waal en Nederrijn/Lek gaat van eens in de 50 à 100 jaar naar eens in de 10 jaar. Tijdens een T = 10 jaar is het gedurende het jaar 10% van de tijd niet mogelijk om meer dan 4 lagen containers mee te nemen (in plaats van 6% in de huidige situatie).
- Op de IJssel zal door klimaatverandering 2 weken in plaats van 1 week in het jaar geen 3-laagscontainervaart mogelijk zijn met een herhalingsperiode van 2 jaar.
- De beperkingen in doorvaarthoogte op de Maas nemen met 3 – 4 dagen toe als gevolg van klimaatverandering bij de herhalingsperiodes van 10, 50 en 100 jaar.
- In de Rijn-Maasmonding zal het voor de helft van het jaar niet mogelijk zijn om méér dan 4 lagen containers te vervoeren als gevolg van één meter zeespiegelstijging. Enkele bruggen zullen met enige regelmaat (ca. 7 dagen in het jaar) ook niet voldoende doorvaarthoogte hebben voor 4-laagscontainervaart.

De grootste knelpunten in het systeem per tak zijn:

- | | | |
|------------------------------|--|---------------------------------|
| • Prins Willem-Alexanderbrug | | Waal |
| • Oosterbeek spoorbrug | | Nederrijn/Lek |
| • Deventer wegbrug | | IJssel |
| • Ravenstein spoorbrug | | Maas: traject Oost-westcorridor |
| • Stadsbrug Venlo | | Maas: traject Maasroute |
| • Merwedebrug A27 | | Boven Merwede |
| • Willemsbrug | | Nieuwe Maas |
| • Spoorbrug Dordrecht | | Oude Maas |
| • Moerdijkbrug (spoor) | | Hollands Diep |

Wat de impact is van de beperkingen in doorvaarthoogte is moeilijk te bepalen op basis van de beschikbare data. Het is aan te raden om op verschillende riviertakken de benodigde doorvaarthoogte te meten van de vloot om een betere inschatting te kunnen maken van de impact.

De afname in beschikbare doorvaarthoogte door klimaatverandering kan leiden tot de volgende reacties/maatregelen:

- I. Vracht wordt niet of later vervoerd;
- II. Er wordt een alternatieve route gezocht;
- III. De brug wordt vaker geopend;
- IV. Er worden meer schepen ingezet om de lading te vervoeren;
- V. Er vindt een modal shift plaats;
- VI. De infrastructuur wordt aangepast;
- VII. Er wordt meer ballast ingenomen;
- VIII. Met behulp van betere informatie wordt optimaal gebruik gemaakt van de beschikbare doorvaarthoogte.

Voor ieder van deze reacties is kwalitatief gekeken wat hiervoor de mogelijkheden en beperkingen zijn in het huidig systeem en welke kennis er nodig is om deze mogelijkheden verder te onderzoeken.

I. Het laten liggen van de lading is met oog op de tijdsdruk op het vervoeren minder waarschijnlijk dan bij andere modaliteiten. Het afwachten van een piek in waterstand in een getijdegebied is wel te timen, maar is ook afhankelijk van nauwkeurige voorspellingen en strakke logistieke planning.

II. Er kunnen enkele knelpunten worden vermeden door om te varen of een andere route te kiezen. De belangrijkste knelpunten liggen rond het eiland van Dordrecht waarbij de optimale route afhangt van de herkomst van de vracht en de uiteindelijke bestemming.

III. Vaker en langer de brug openen is in het getijdegebied een mogelijke oplossing bij hogere waterstanden als gevolg van windopzet in combinatie met zeespiegelstijging. De invloed van het openen van de brug op andere functies en modaliteiten moet nader geanalyseerd worden.

IV. De hoeveelheid extra schepen die nodig is om alle containers te vervoeren valt nog relatief mee. Maar in praktijk blijkt dat er over het algemeen precies genoeg capaciteit is in de huidige situatie en dat er maar weinig redundantie is ingebouwd in het systeem.

V. Een modal-shift is voor tijd-sensitieve goederen de meest waarschijnlijke optie. Hiervoor geldt dat de beschikbare extra capaciteit op de weg en het spoor niet groot is en dat grote aantallen containers niet zomaar zullen verschuiven van modaliteit. Als er sprake is van een stelselmatig tekort aan doorvaarthoogte kan dit een gevolg zijn voor de langere termijn.

VI. Het verhogen van bruggen is een zeer kostbare aangelegenheid. Met name spoorbruggen zijn bijzonder duur om te verhogen en dit zal ook niet overal mogelijk zijn.

VII. Het innemen van ballast is niet altijd wenselijk. Daarnaast kost het schepen hoe dan ook meer brandstof doordat het schip dieper is geladen. Of en tot hoe lang ballast innemen een optie is hangt ook af van de beschikbare vaardiepte.

VIII. Met name in het getijdegebied kan met een betere informatievoorziening beter gebruik gemaakt worden van de beschikbare doorvaarthoogte. Door meerdere factoren is het maar de vraag of er op het uur nauwkeurig gevaren kan worden om van een “window of opportunity” gebruikt te maken, zo zijn de vertragingen bij terminals in de huidige situatie al een probleem voor de scheepvaart.

9 Referenties

Brolsma, J. (2015). *Containerhoogtemetingen*.

van der Mark, R. d. (2020). *Stresstest Droogte Maas - Blootstelling en kwetsbaarheid bij de sluiscomplexen*. Delft: Deltares.

Wijbenga, C. v. (2019, 6 6). *Vergaderstukken Tweede Kamer*. Opgehaald van Officiële stukken Tweede Kamer:

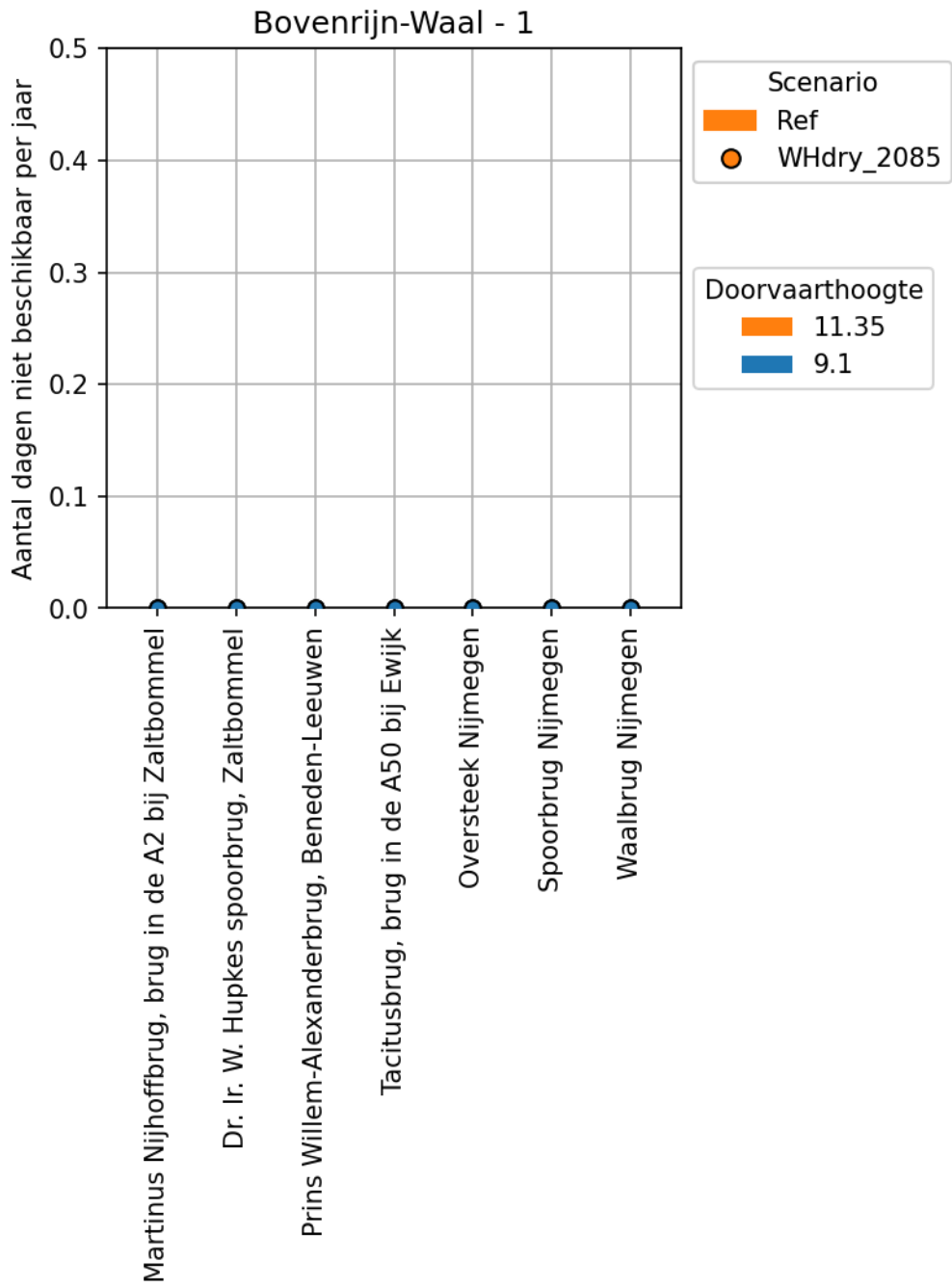
https://www.tweedekamer.nl/kamerstukken/brieven_regering/detail?id=2019Z11498&did=2019D23682

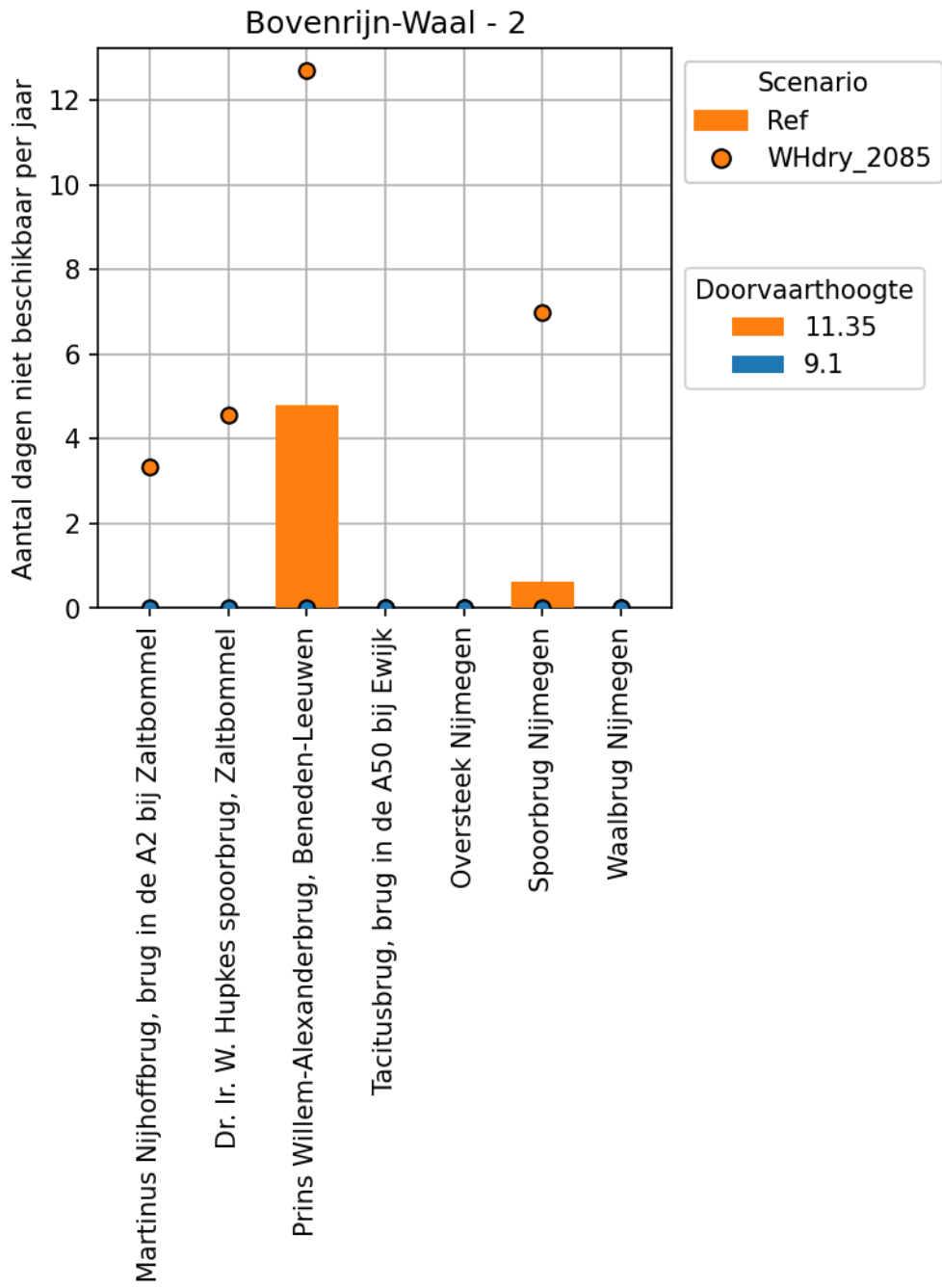
Wijk, R. v. (2020). *Klimaatbestendige Vaarwegen - Bepaling bedreiging en blootstelling doorvaarthoogte.docx*. 11205274-004-BGS-0002_v1.0.

A Onderschrijdingsduur Rivieren

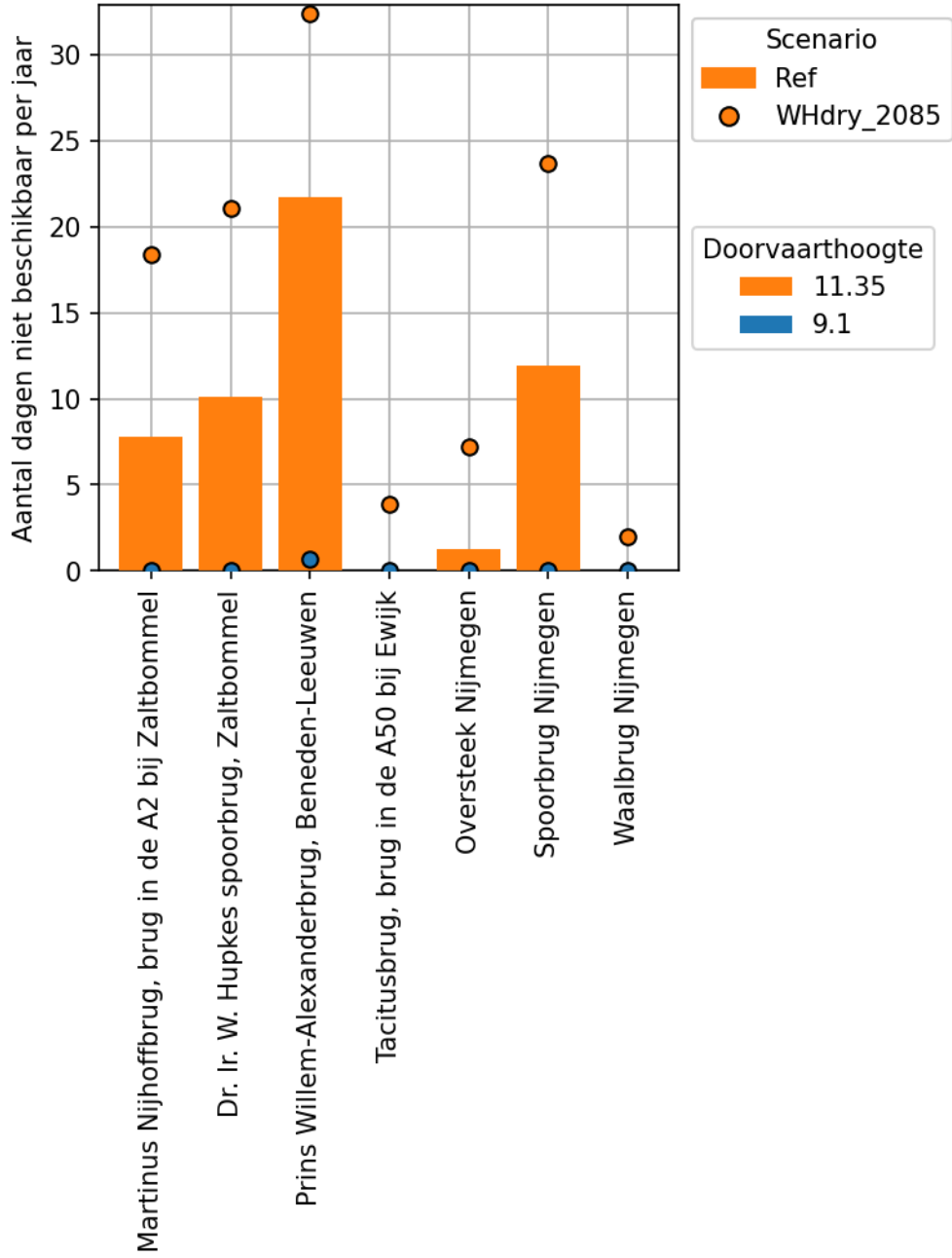
A.1 Aantal dagen per herhalingsstijd (barplot)

A.1.1 **Waal (1, 2, 10, 50 & 100, gem)**

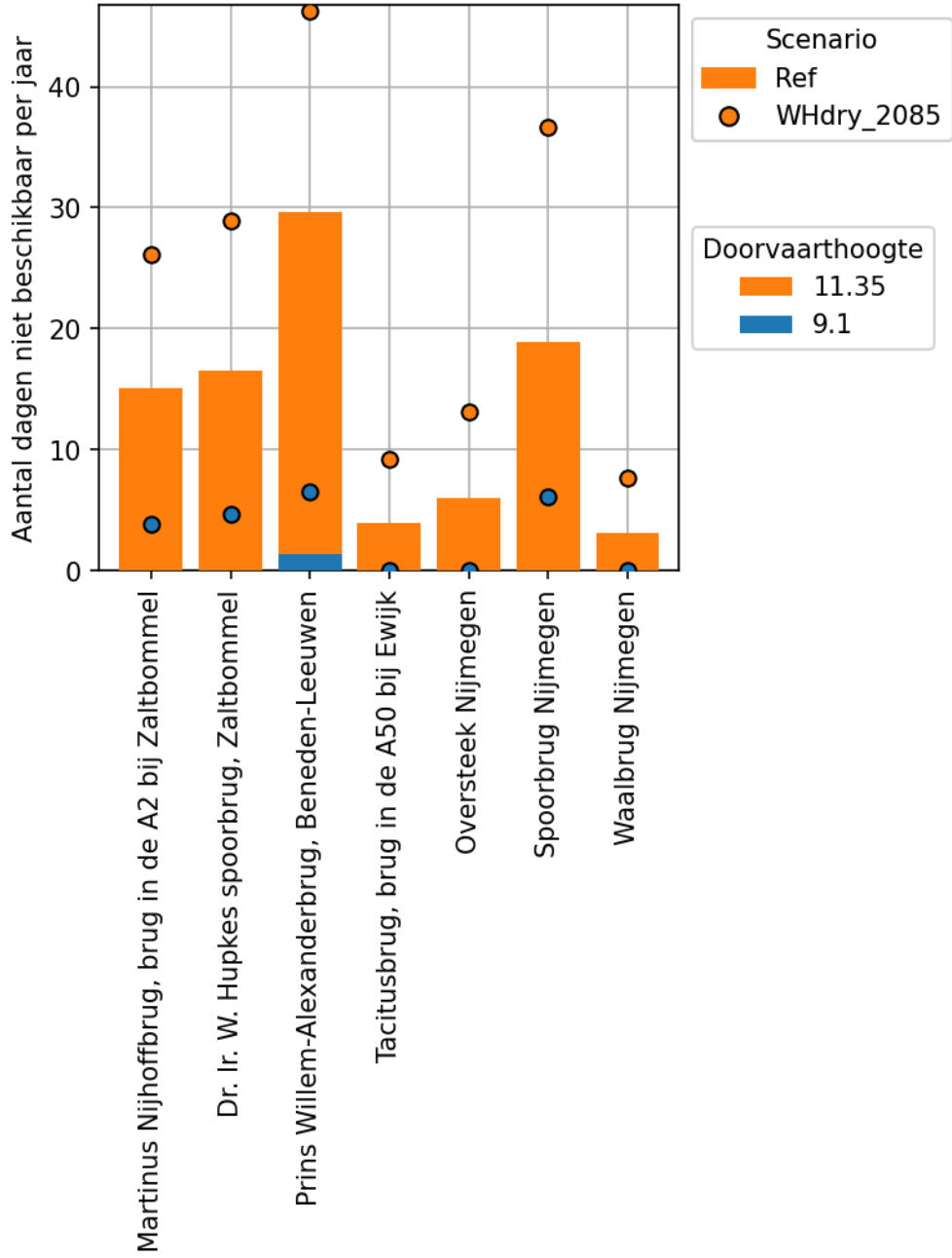


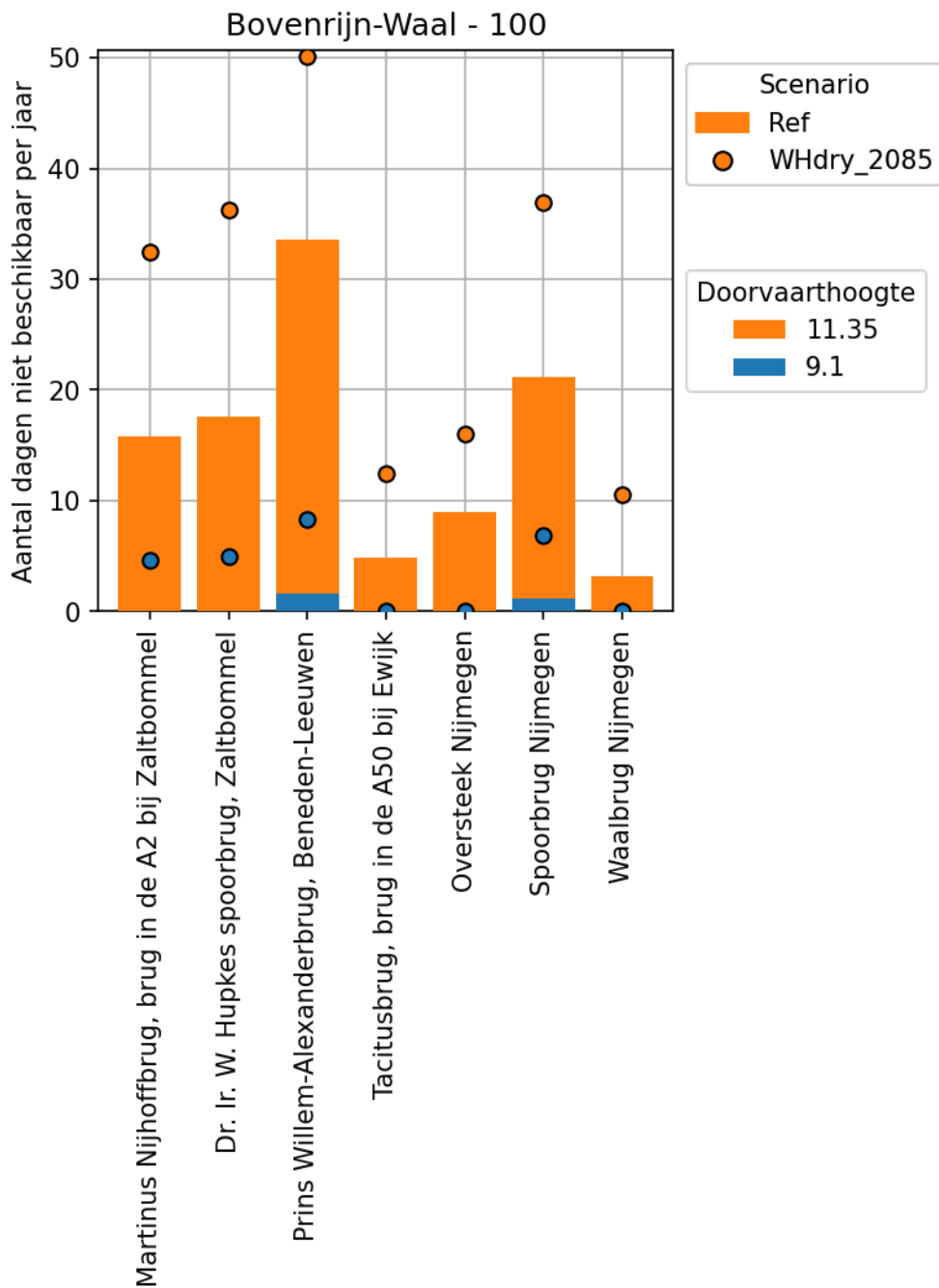


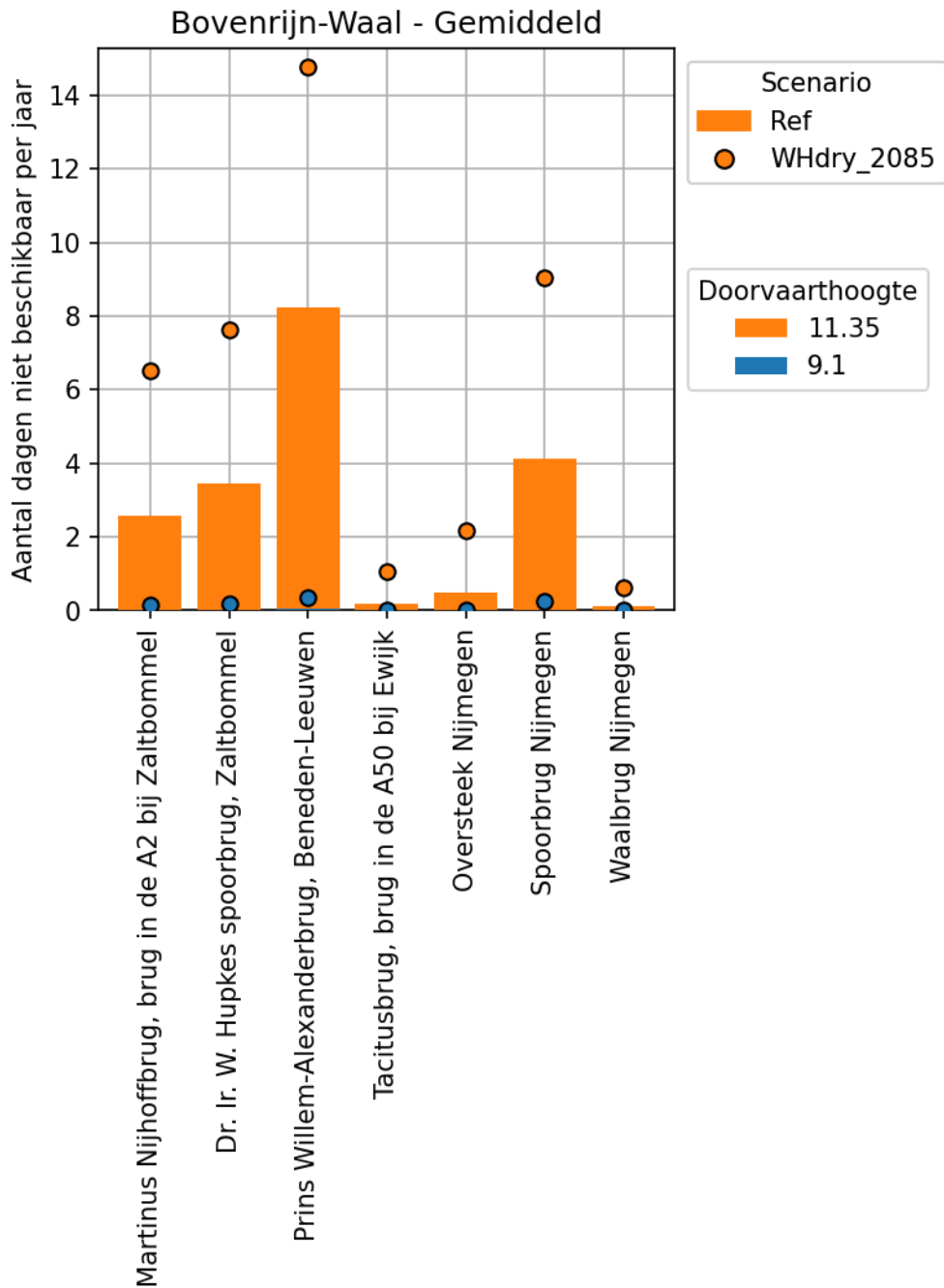
Bovenrijn-Waal - 10



Bovenrijn-Waal - 50

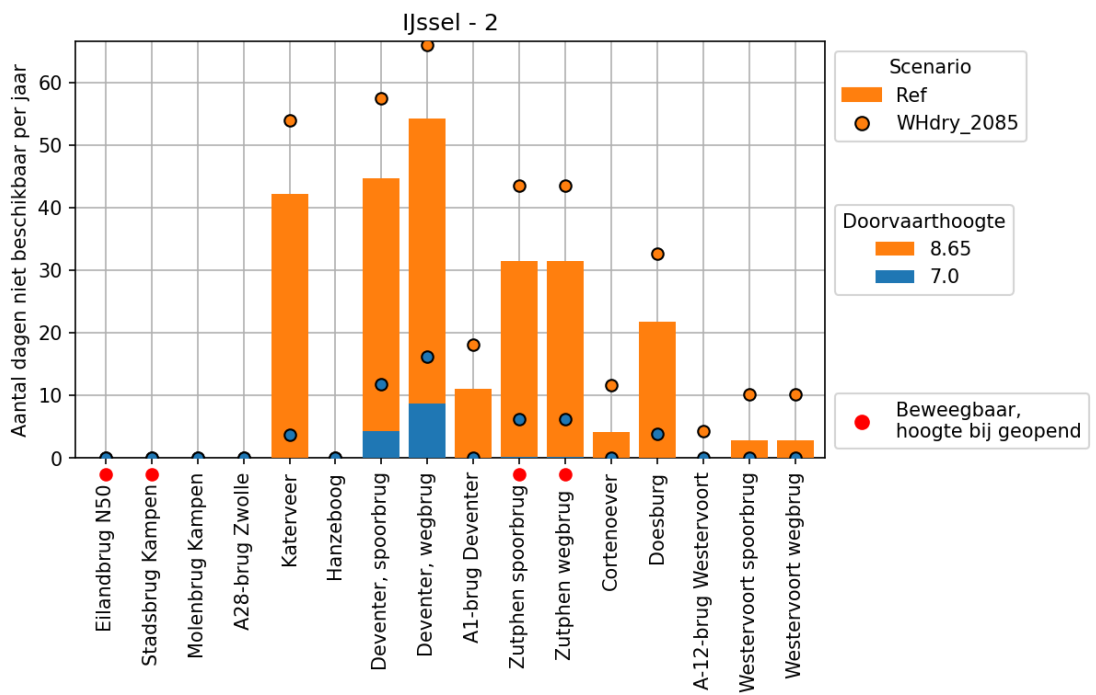
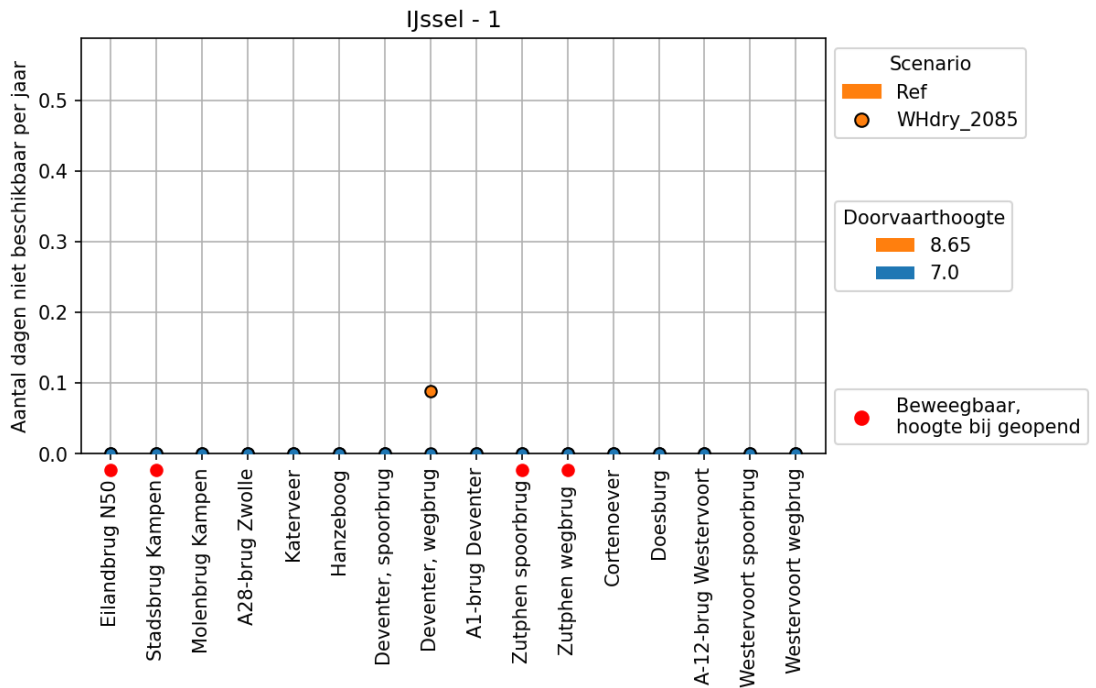


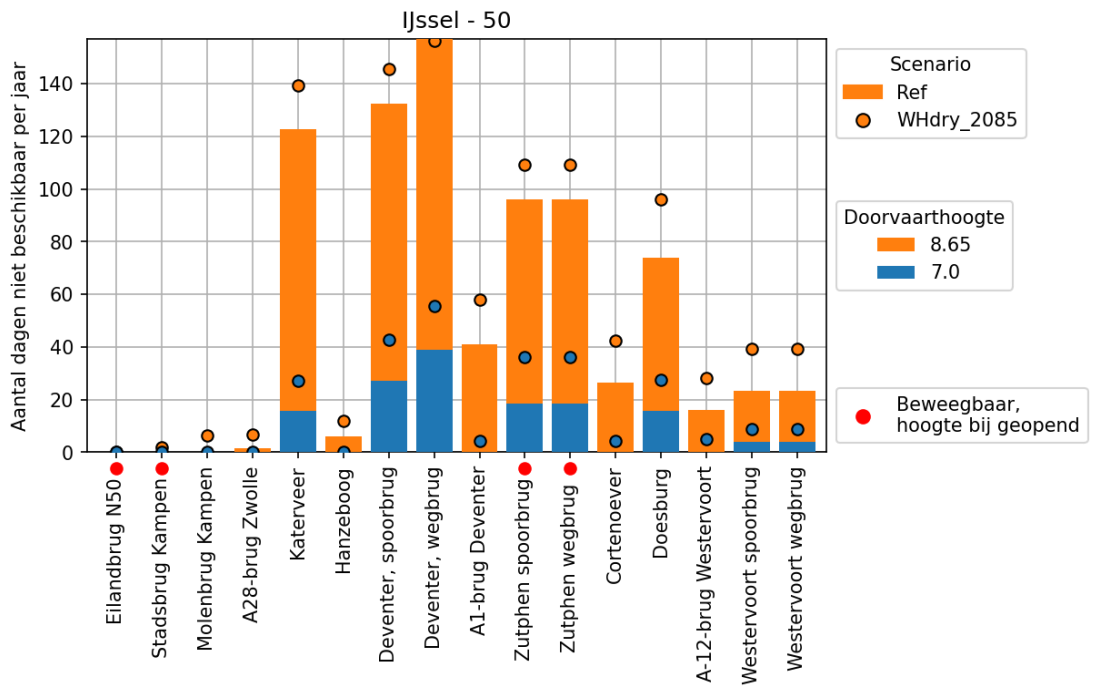
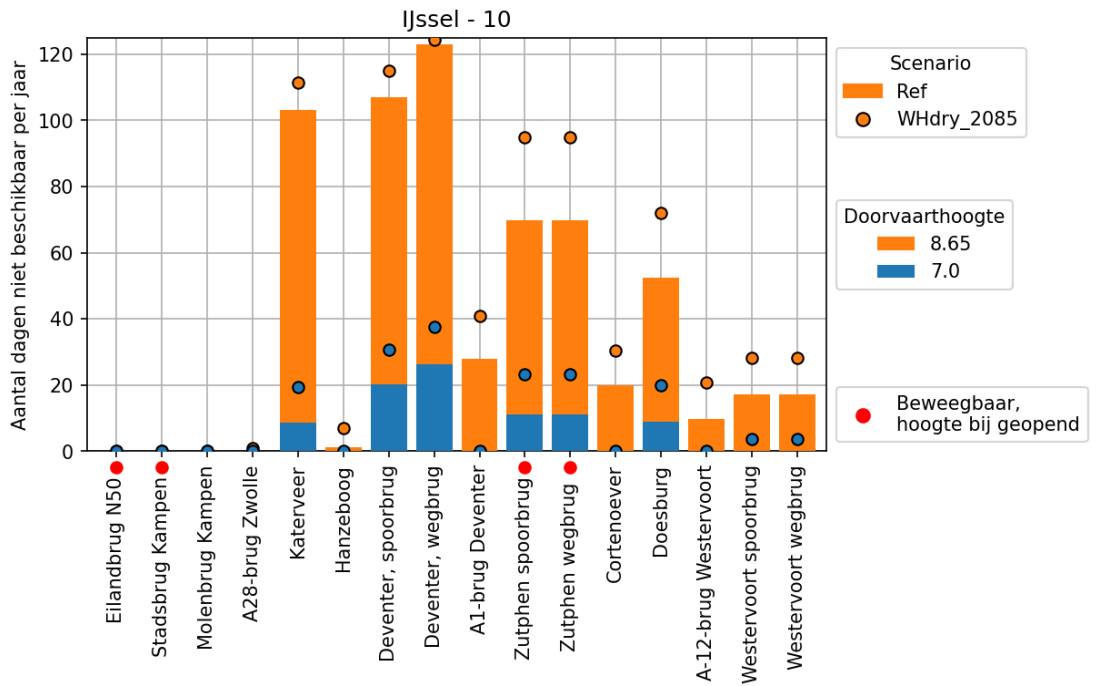


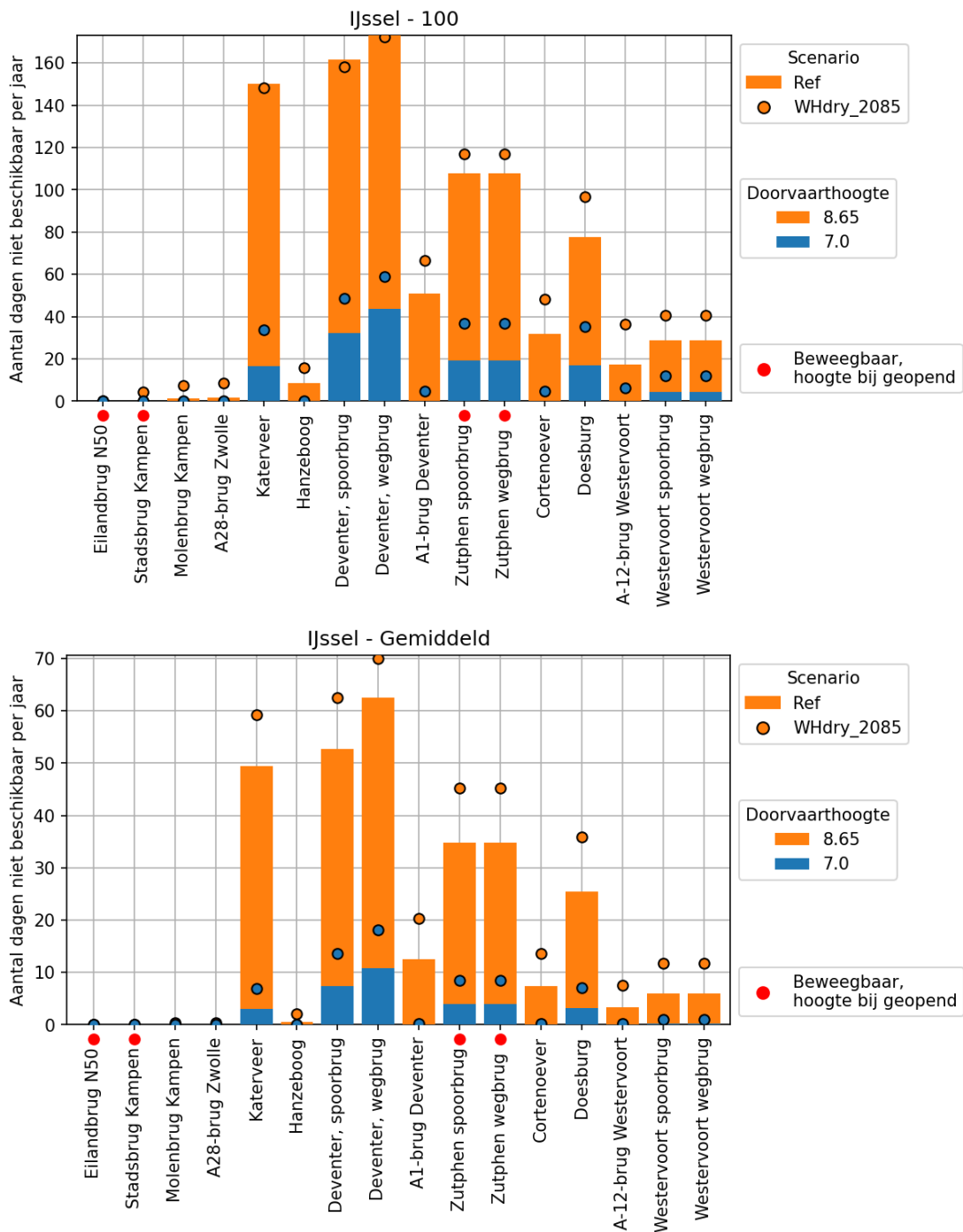


Figuur 9-1 Staafdiagrammen voor de onderschrijdingsduur van de bruggen op de Waal voor $T = 1$ (linksboven), 2 (rechtsboven), 10 (midden links), 50 (midden rechts), 100 (linksonder) en gemiddeld jaar (rechtsonder)

A.1.2 IJssel (1, 2, 10, 50 & 100, gem)

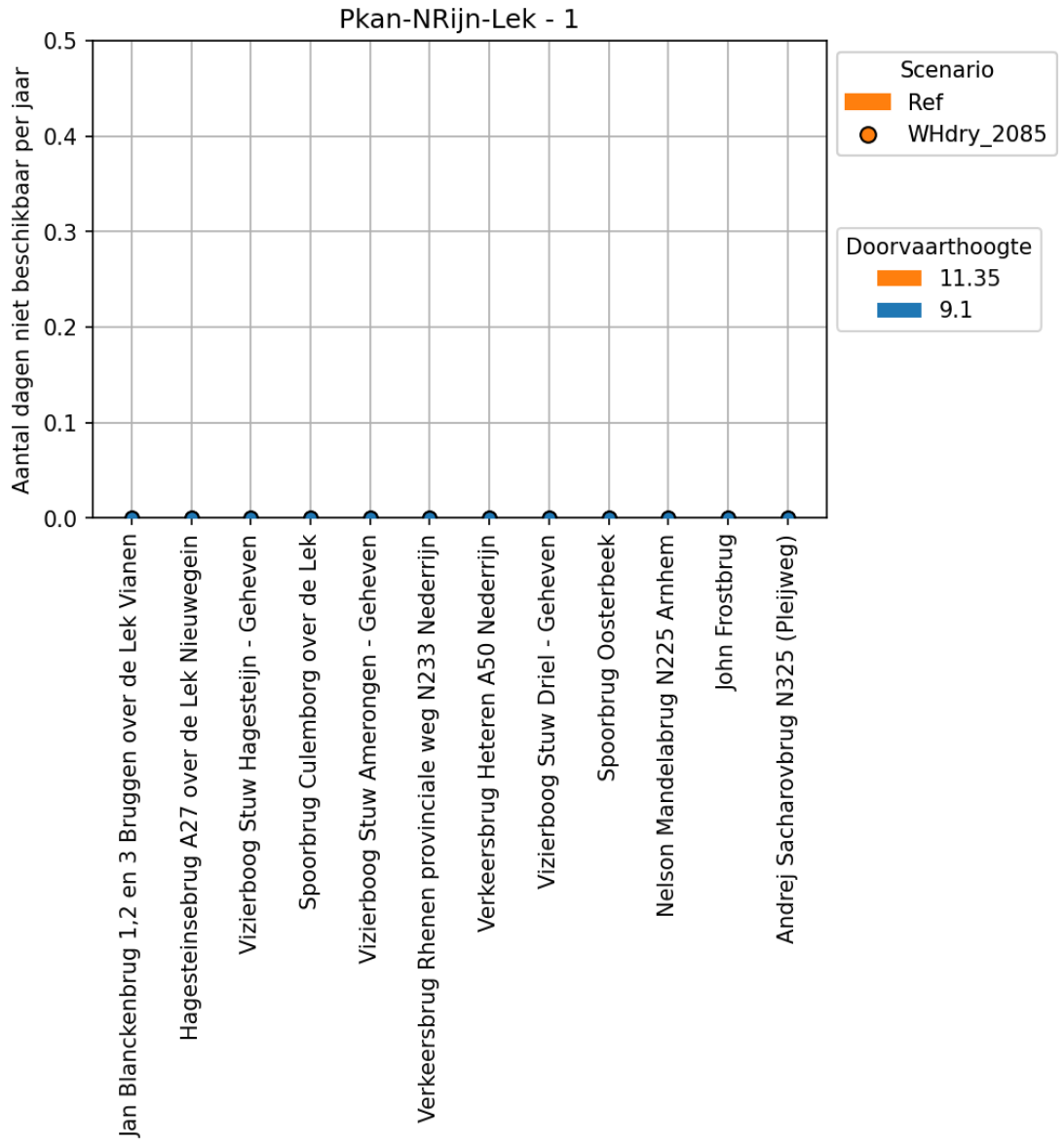




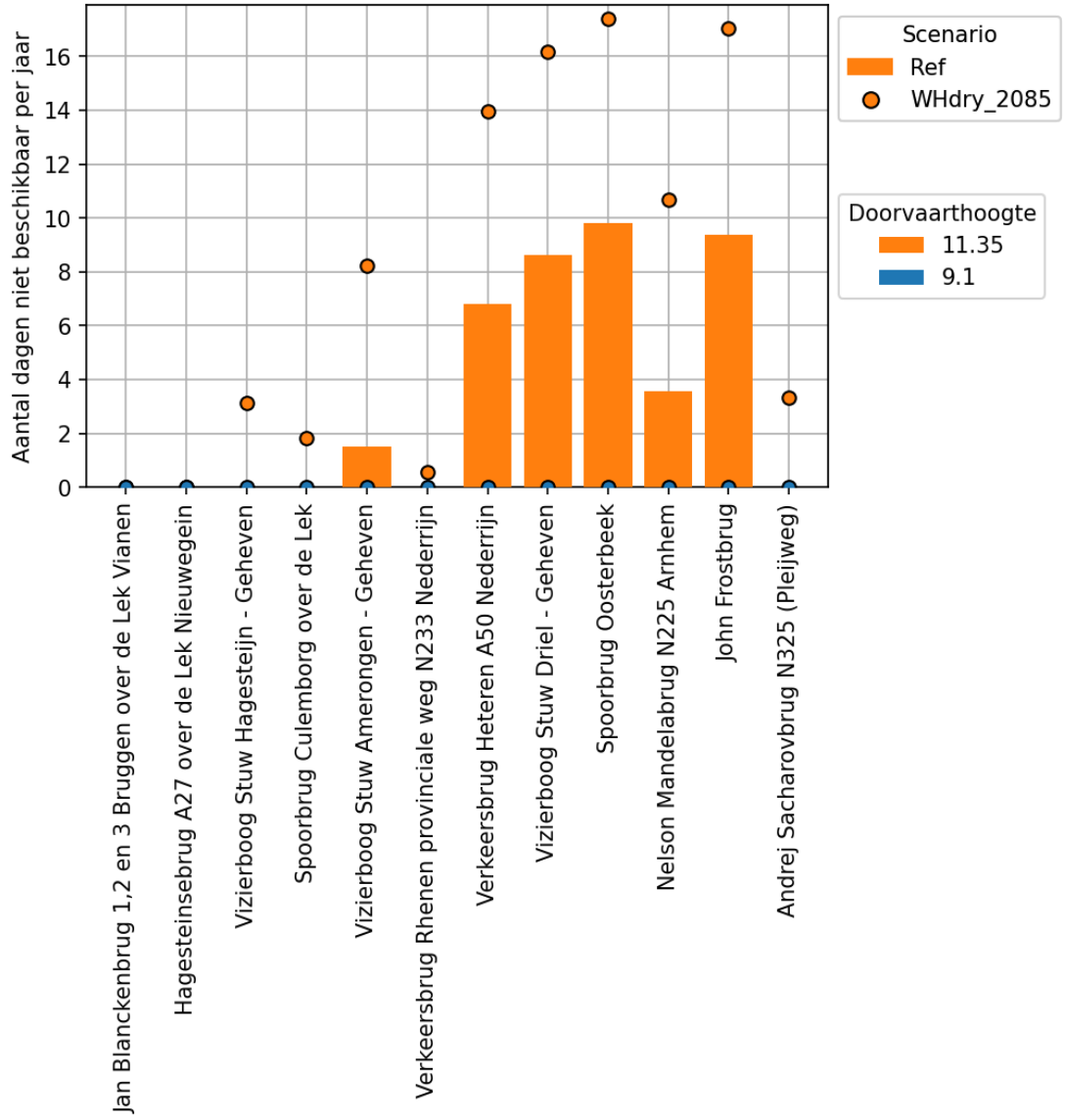


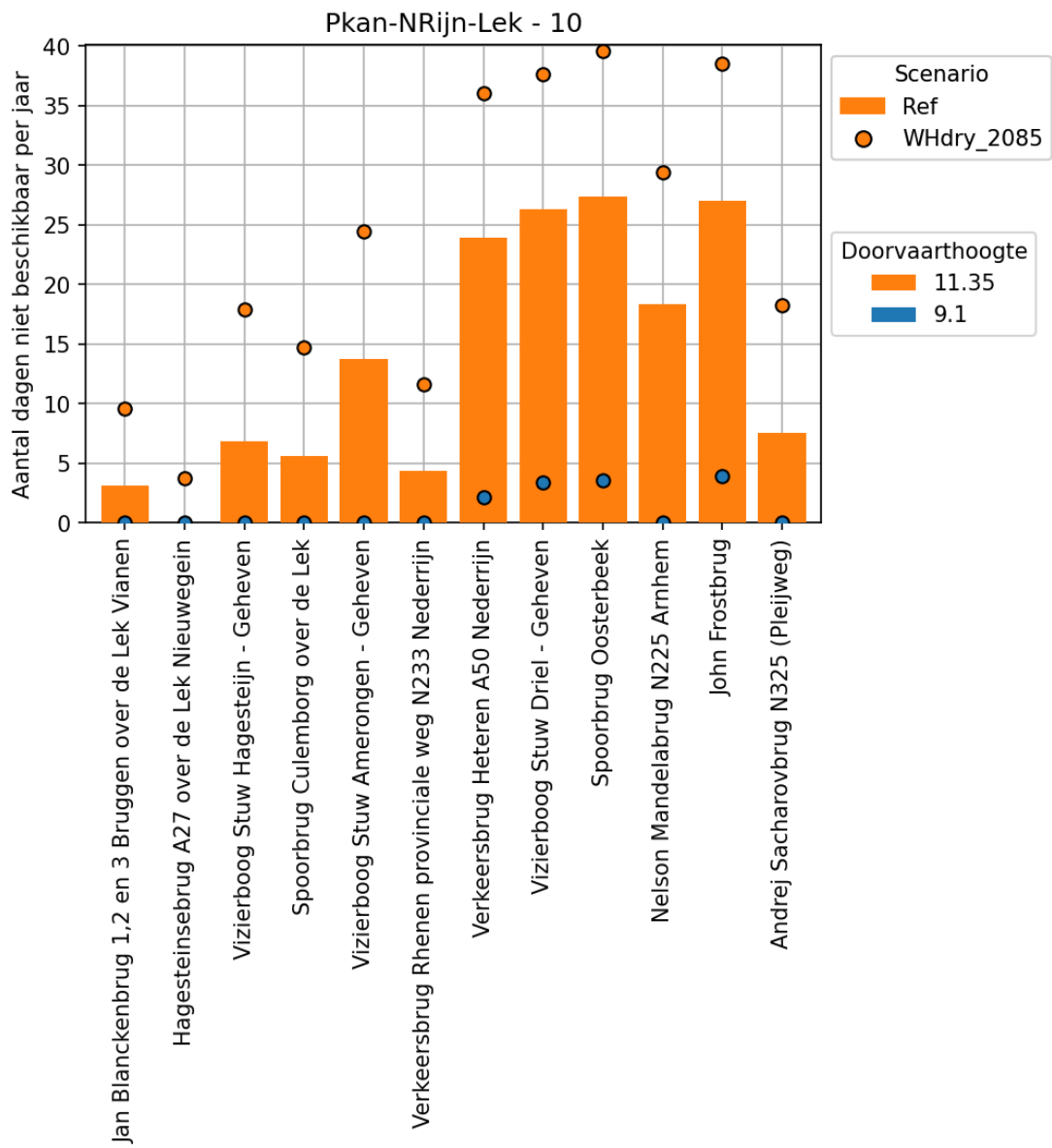
Figuur 9-2 Staafdiagrammen voor de onderschrijdingsduur van de bruggen op de IJssel voor $T = 1, 2, 10, 50, 100$ en gemiddeld jaar

A.1.3 Nederrijn/Lek (1, 2, 10, 50 & 100, gem)

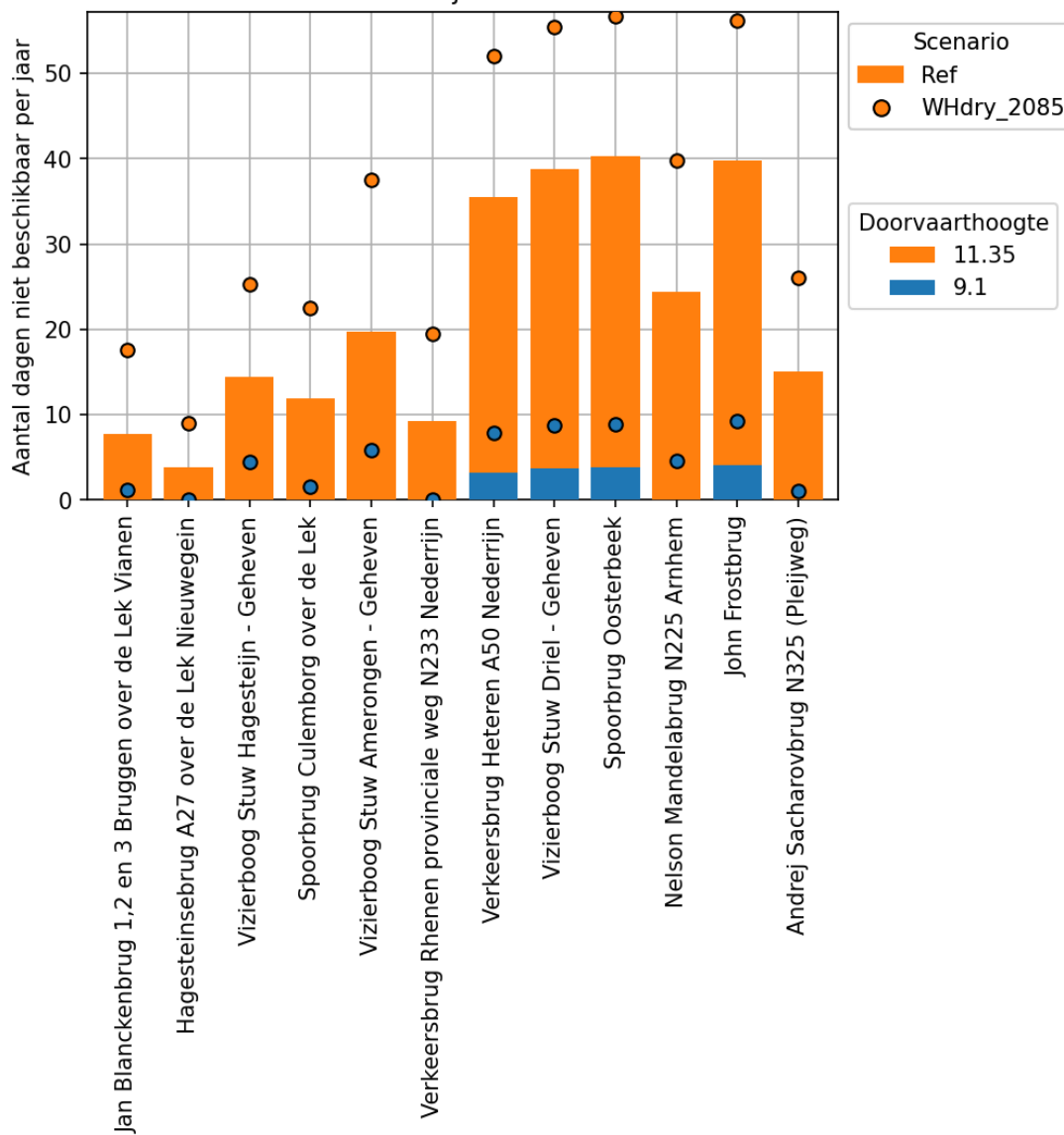


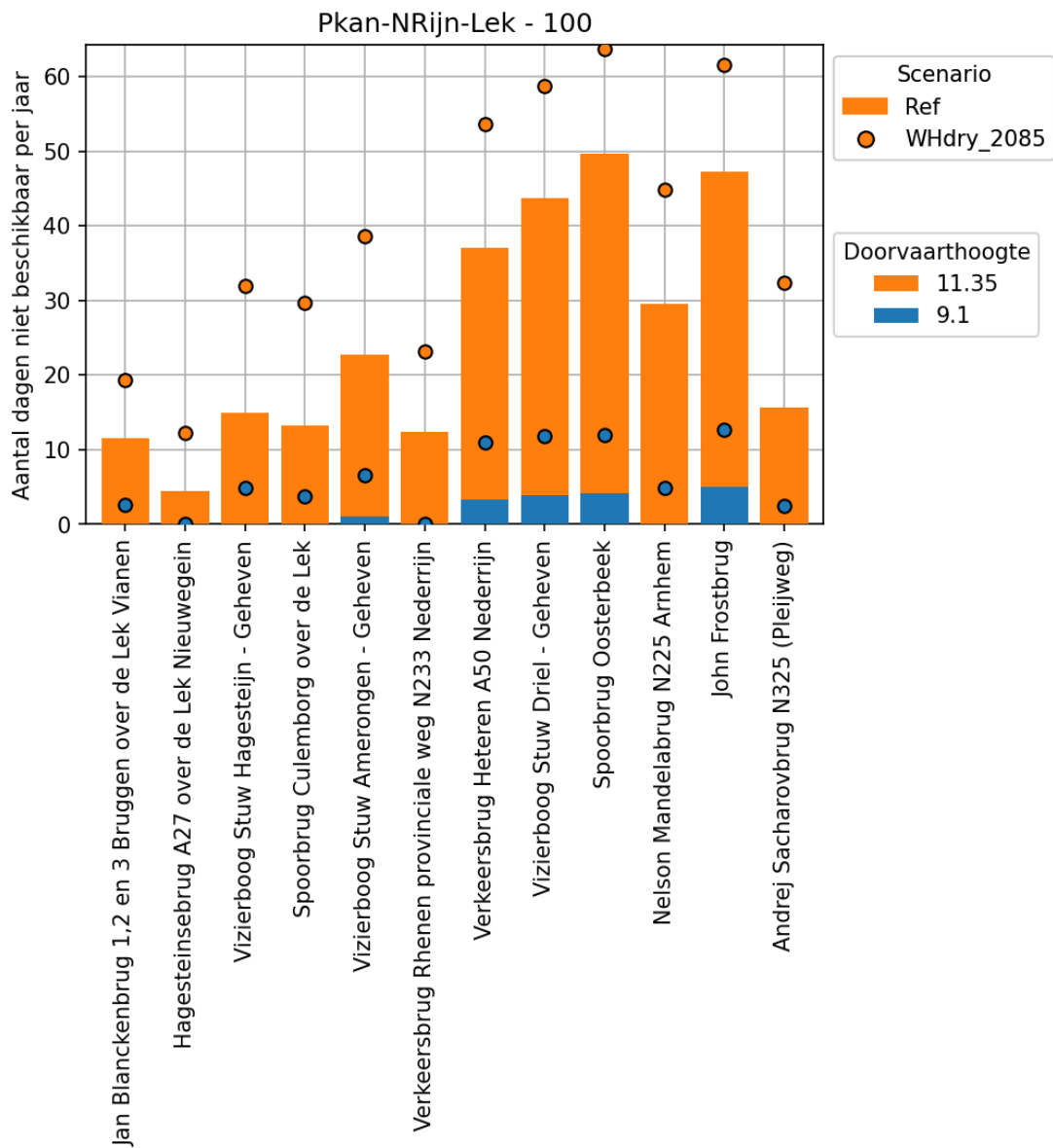
Pkan-NRijn-Lek - 2

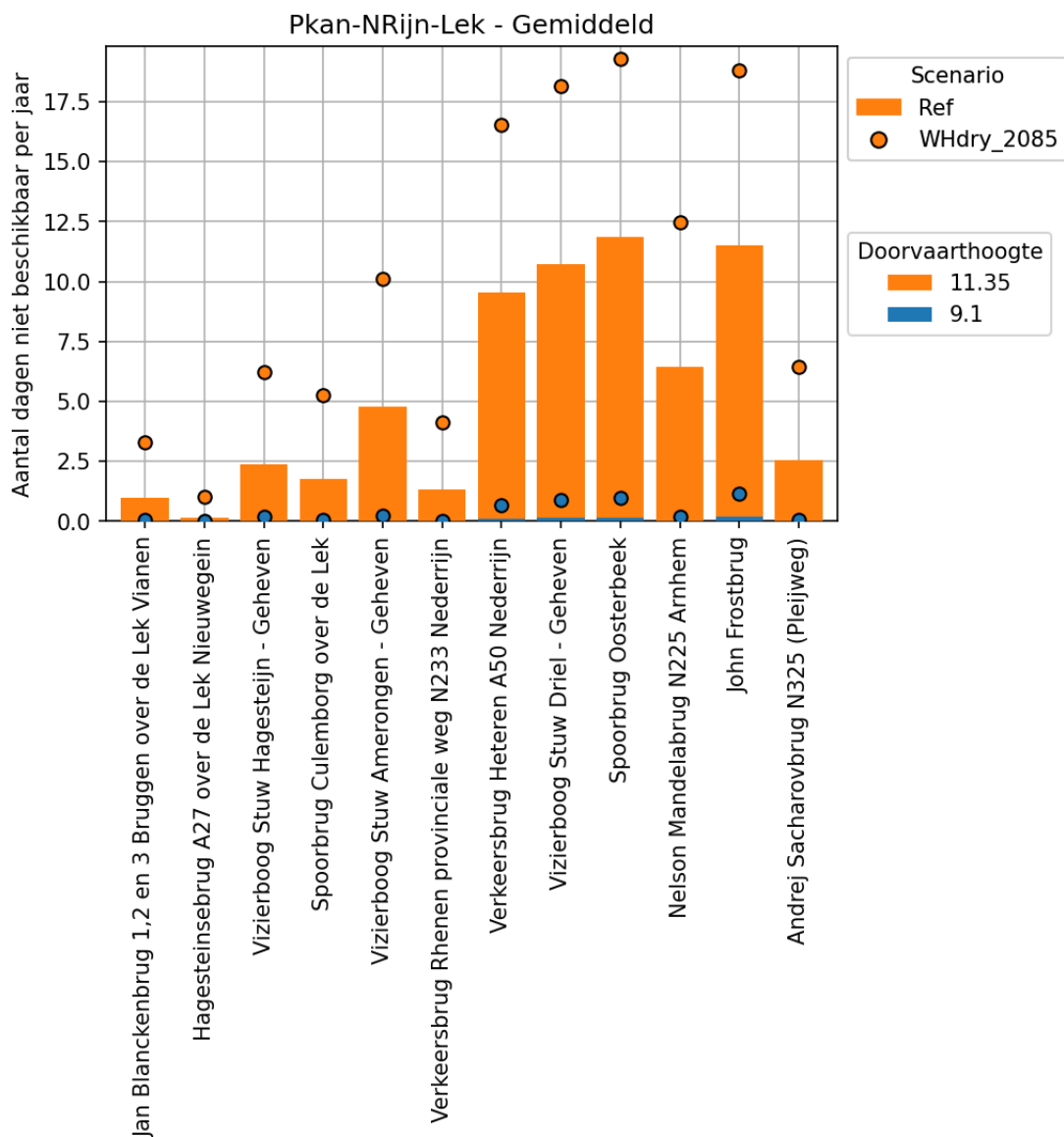




Pkan-NRijn-Lek - 50

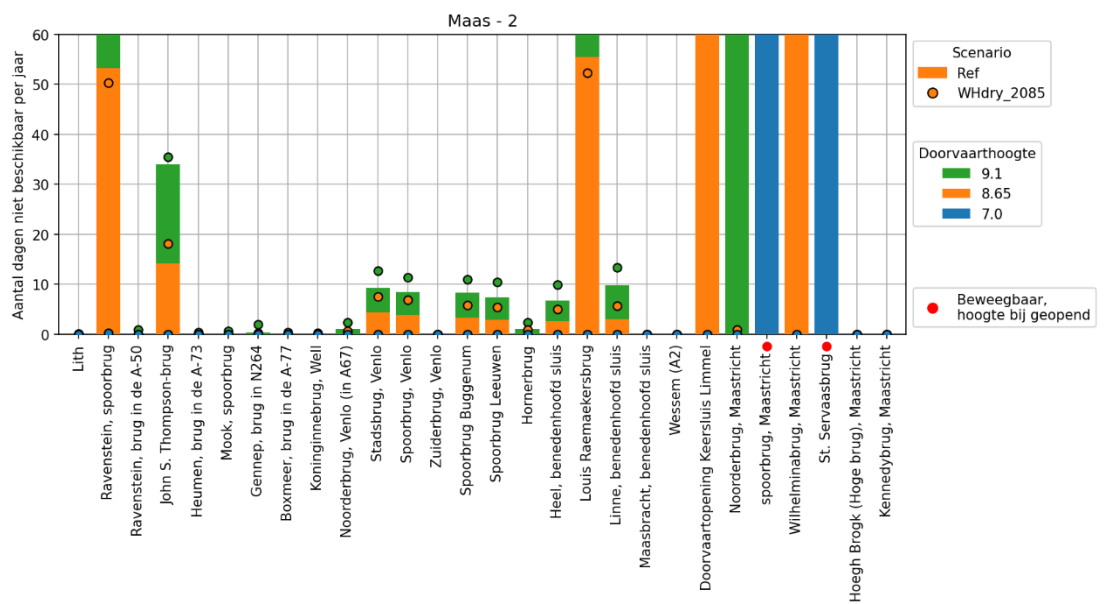
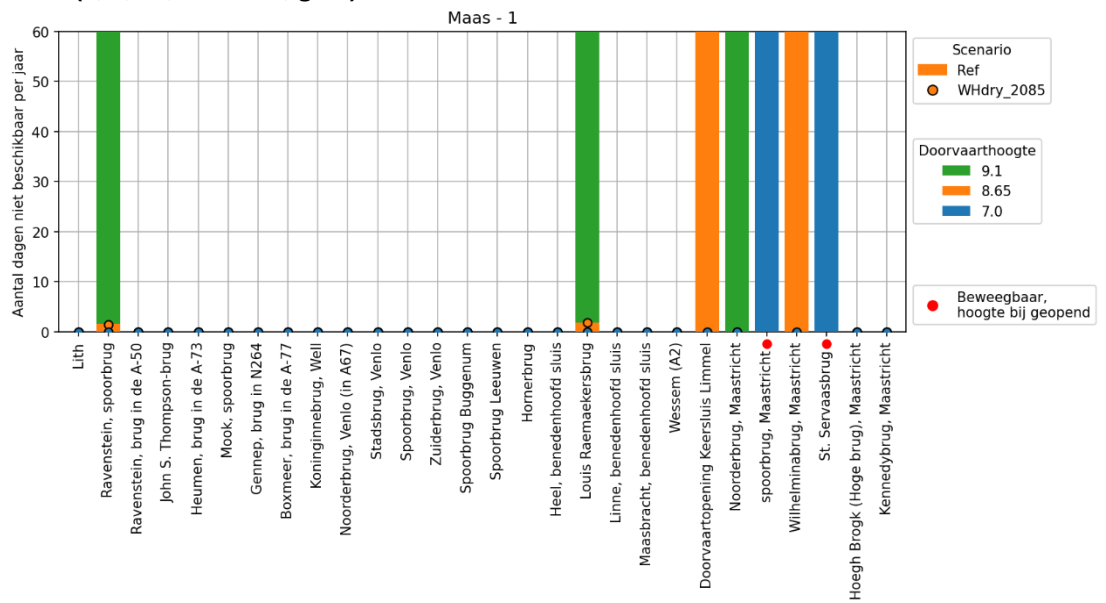


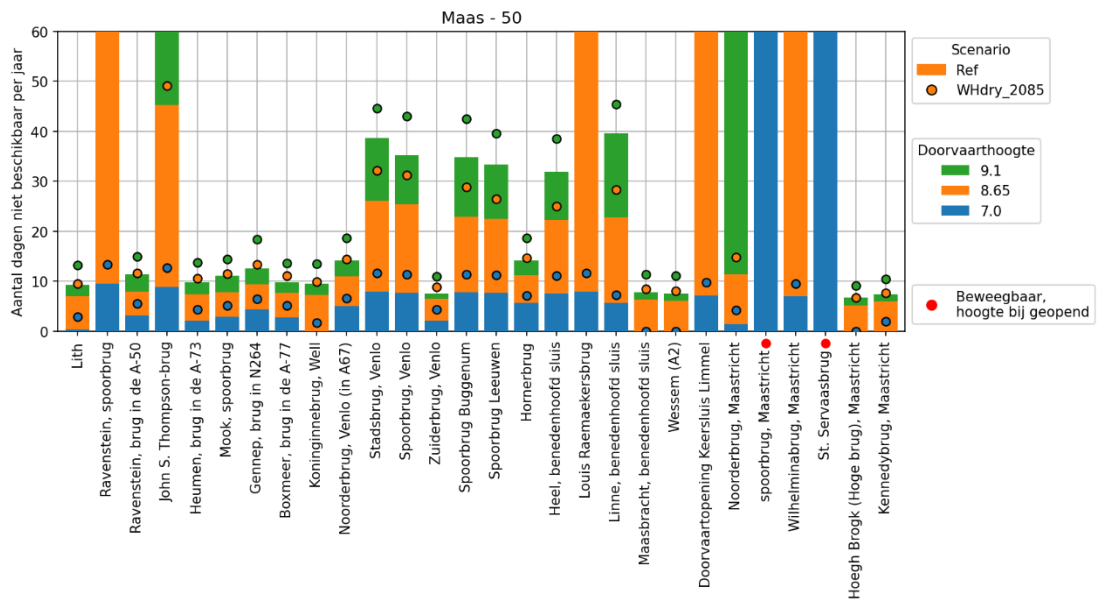
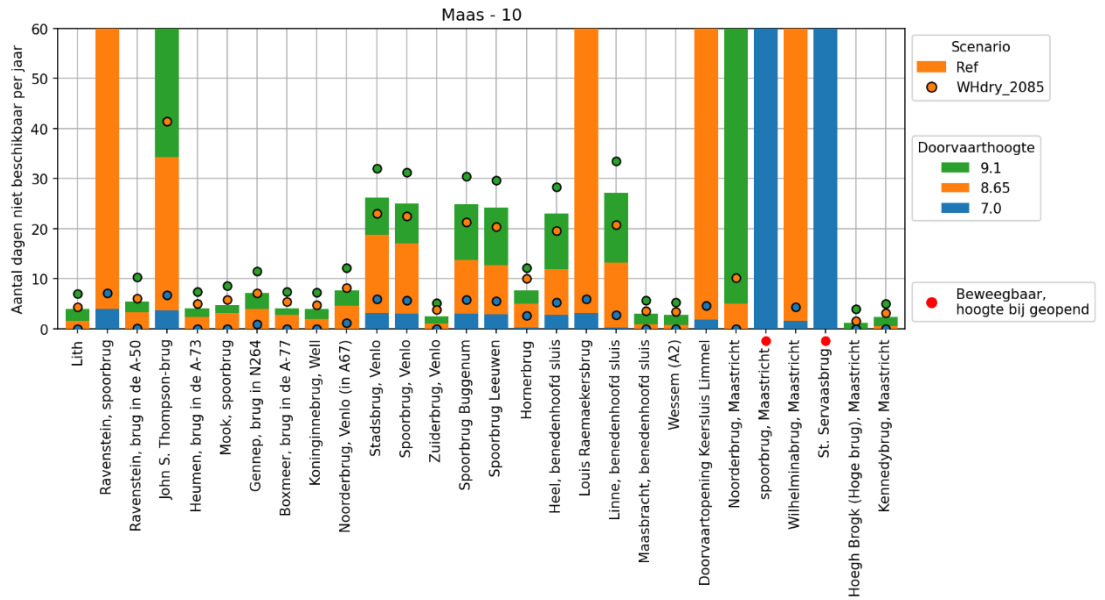


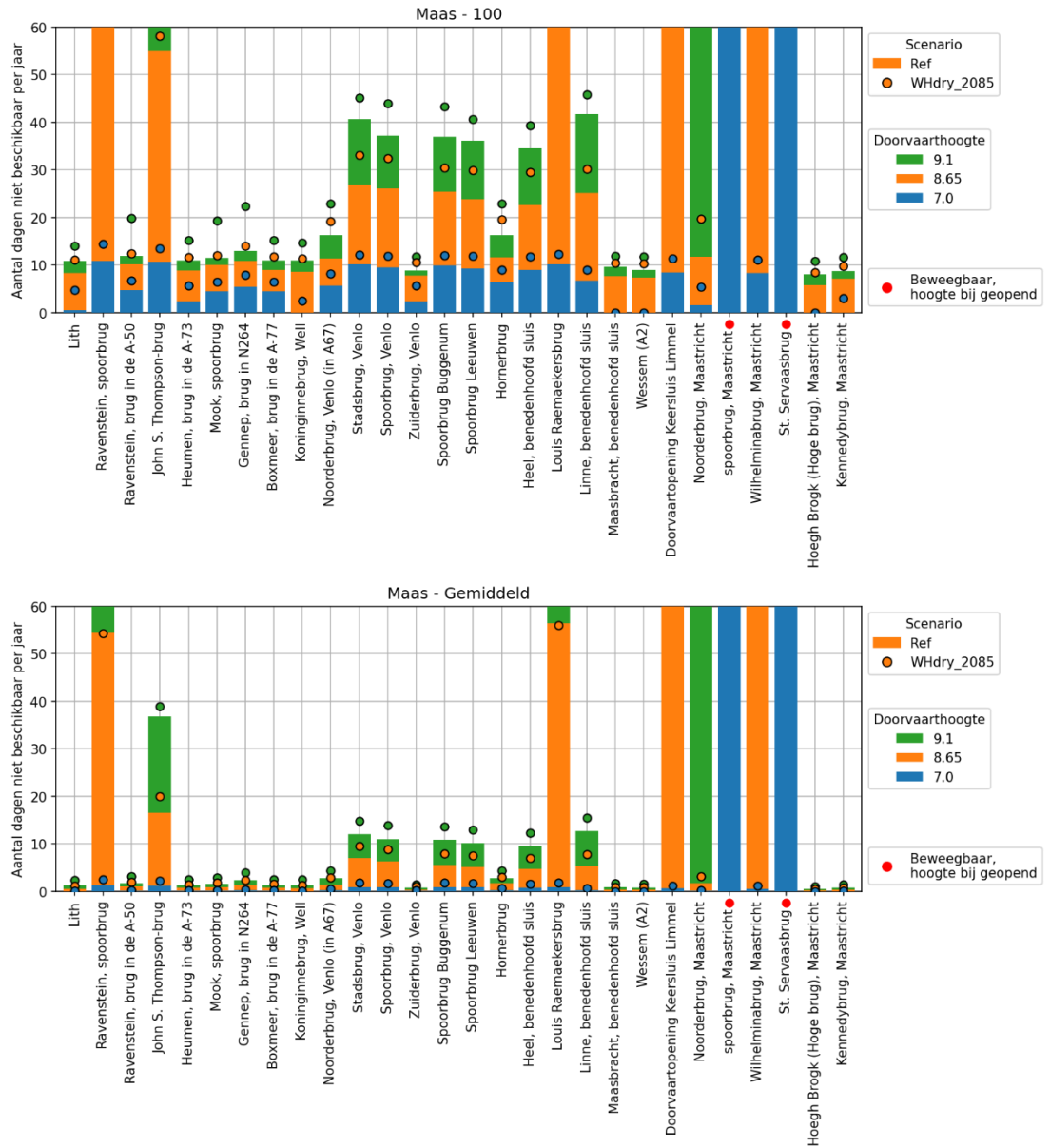


Figuur 9-3 Staafdiagrammen voor de onderschrijdingsduur van de bruggen op de Nederrijn/Lek voor $T = 1$ (linksboven), 2 (rechtsboven), 10 (midden links), 50 (midden rechts), 100 (linksonder) en gemiddeld jaar (rechtsonder)

A.1.4 Maas (1, 2, 10, 50 & 100, gem)







Figuur 9-4 Staafdiagrammen voor de onderschrijdingsduur van de bruggen op de Maas voor T = 1, 2, 10, 50, 100 en gemiddeld jaar

A.2 Resultaten in tabelvorm

Deze tabel bevat de getallen behorend bij alle eerdere figuren van doorvaarthoogte op de rivieren (zie hoofdstuk 5.1 en bijlage A.1). Voor iedere brug zijn de resultaten gegeven voor minimaal twee niveaus van doorvaarthoogte. Bij ieder niveau is de afvoer gegeven, waarbij een afvoer '-inf' (minus oneindig) betekent dat deze hoogte altijd overschreden wordt en 'inf' (oneindig) dat deze hoogte nooit overschreden wordt.

Tabel 9.1 Onderschrijdingsduur voor alle bruggen op de rivieren voor alle herhalingstijden en scenario's

Brugnaam	Herhalingstijd	1		2		10		50		100		Gemiddeld		Afvoer(m³/s)
	Scenario	Ref	WHdry_2085	Ref	WHdry_2085	Ref	WHdry_2085	Ref	WHdry_2085	Ref	WHdry_2085	Ref	WHdry_2085	
Doorvaart hoogte (m)														
Waalbrug Nijmegen	9.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	inf
	11.35	0	0	0	0	0	2	3	8	3	11	0	1	10,829
Spoorbrug Nijmegen	9.1	0	0	0	0	0	0	0	6	1	7	0	0	12,061
	11.35	0	0	1	7	12	24	19	37	21	37	4	9	6,477
Oversteek Nijmegen	9.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15,943
	11.35	0	0	0	0	1	7	6	13	9	16	1	2	8,993
Tacitusbrug, brug in de A50 bij Ewijk	9.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	inf
	11.35	0	0	0	0	0	4	4	9	5	12	0	1	10,049
Prins Willem-Alexanderbrug, Beneden-Leeuwen	9.1	0	0	0	0	0	1	1	7	2	8	0	0	11,545
	11.35	0	0	5	13	22	32	30	46	34	50	8	15	5,580
Dr. Ir. W. Hupkes spoorbrug, Zaltbommel	9.1	0	0	0	0	0	0	0	5	0	5	0	0	12,580
	11.35	0	0	0	5	10	21	17	29	18	36	3	8	6,749
Martinus Nijhoffbrug, brug in de A2 bij Zaltbommel	9.1	0	0	0	0	0	0	0	4	0	5	0	0	13,206
	11.35	0	0	0	3	8	18	15	26	16	32	3	7	7,079
Westervoort wegbrug	7	0	0	0	0	0	4	4	9	4	12	0	1	10,247
	8.65	0	0	3	10	17	28	23	39	29	41	6	12	6,002
Westervoort spoorbrug	7	0	0	0	0	0	4	4	9	4	12	0	1	10,247
	8.65	0	0	3	10	17	28	23	39	29	41	6	12	6,002
A-12-brug Westervoort	7	0	0	0	0	0	0	0	5	0	6	0	0	12,307
	8.65	0	0	0	4	10	21	16	28	17	36	3	7	6,785
Doesburg	7	0	0	0	4	9	20	16	27	17	35	3	7	6,883
	8.65	0	0	22	33	52	72	74	96	78	97	25	36	4,060
Cortenoever	7	0	0	0	0	0	0	0	4	0	5	0	0	13,047
	8.65	0	0	4	12	20	30	26	43	32	48	7	14	5,738
Zutphen wegbrug	7	0	0	0	6	11	23	18	36	19	37	4	9	6,572
	8.65	0	0	32	43	70	95	96	109	108	117	35	45	3,670
Zutphen spoorbrug	7	0	0	0	6	11	23	18	36	19	37	4	9	6,572
	8.65	0	0	32	43	70	95	96	109	108	117	35	45	3,670
A1-brug Deventer	7	0	0	0	0	0	0	0	4	0	5	0	0	13,047
	8.65	0	0	11	18	28	41	41	58	51	67	13	20	5,010
Deventer, wegbrug	7	0	0	9	16	26	38	39	56	44	59	11	18	5,220
	8.65	0	0	54	66	123	124	166	156	186	172	62	70	2,995
Deventer, spoorbrug	7	0	0	4	12	20	31	27	43	32	49	7	14	5,717
	8.65	0	0	45	58	107	115	132	146	162	158	53	62	3,168
Hanzeboog	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	inf
	8.65	0	0	0	0	1	7	6	12	9	16	0	2	9,061
Katerveer	7	0	0	0	4	9	19	16	27	17	34	3	7	6,942
	8.65	0	0	42	54	103	111	123	139	150	148	49	59	3,244
A28-brug Zwolle	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	inf
	8.65	0	0	0	0	0	1	2	7	2	9	0	0	11,451
Molenbrug Kampen	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	inf
	8.65	0	0	0	0	0	0	0	6	1	7	0	0	11,891
Stadsbrug Kampen	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	inf
	8.65	0	0	0	0	0	0	0	2	0	4	0	0	13,739
Eilandbrug N50	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	inf
	8.65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	inf
Andrej Sacharovbrug N325 (Pleijweg)	9.1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	14,880
	11.35	0	0	0	3	8	18	15	26	16	32	3	6	7,093
John Frostbrug	9.1	0	0	0	0	0	4	4	9	5	13	0	1	9,997
	11.35	0	0	9	17	27	39	40	56	47	62	12	19	5,145
Nelson Mandelabrug N225 Arnhem	9.1	0	0	0	0	0	0	0	5	0	5	0	0	12,690
	11.35	0	0	4	11	18	29	24	40	30	45	6	12	5,875
Spoorbrug Oosterbeek	9.1	0	0	0	0	0	4	4	9	4	12	0	1	10,247
	11.35	0	0	10	17	27	40	40	57	50	64	12	19	5,098
Vizierboog Stuw Driel - Geheven	9.1	0	0	0	0	0	3	4	9	4	12	0	1	10,332
	11.35	0	0	9	16	26	38	39	55	44	59	11	18	5,223
Verkeersbrug Heteren A50 Nederrijn	9.1	0	0	0	0	0	2	3	8	3	11	0	1	10,766
	11.35	0	0	7	14	24	36	36	52	37	54	10	17	5,379
Verkeersbrug Rhenen provinciale weg N233 Nederrijn	9.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	inf
	11.35	0	0	0	1	4	12	9	19	12	23	1	4	7,883
Vizierboog Stuw Amerongen - Geheven	9.1	0	0	0	0	0	0	0	6	1	7	0	0	12,177

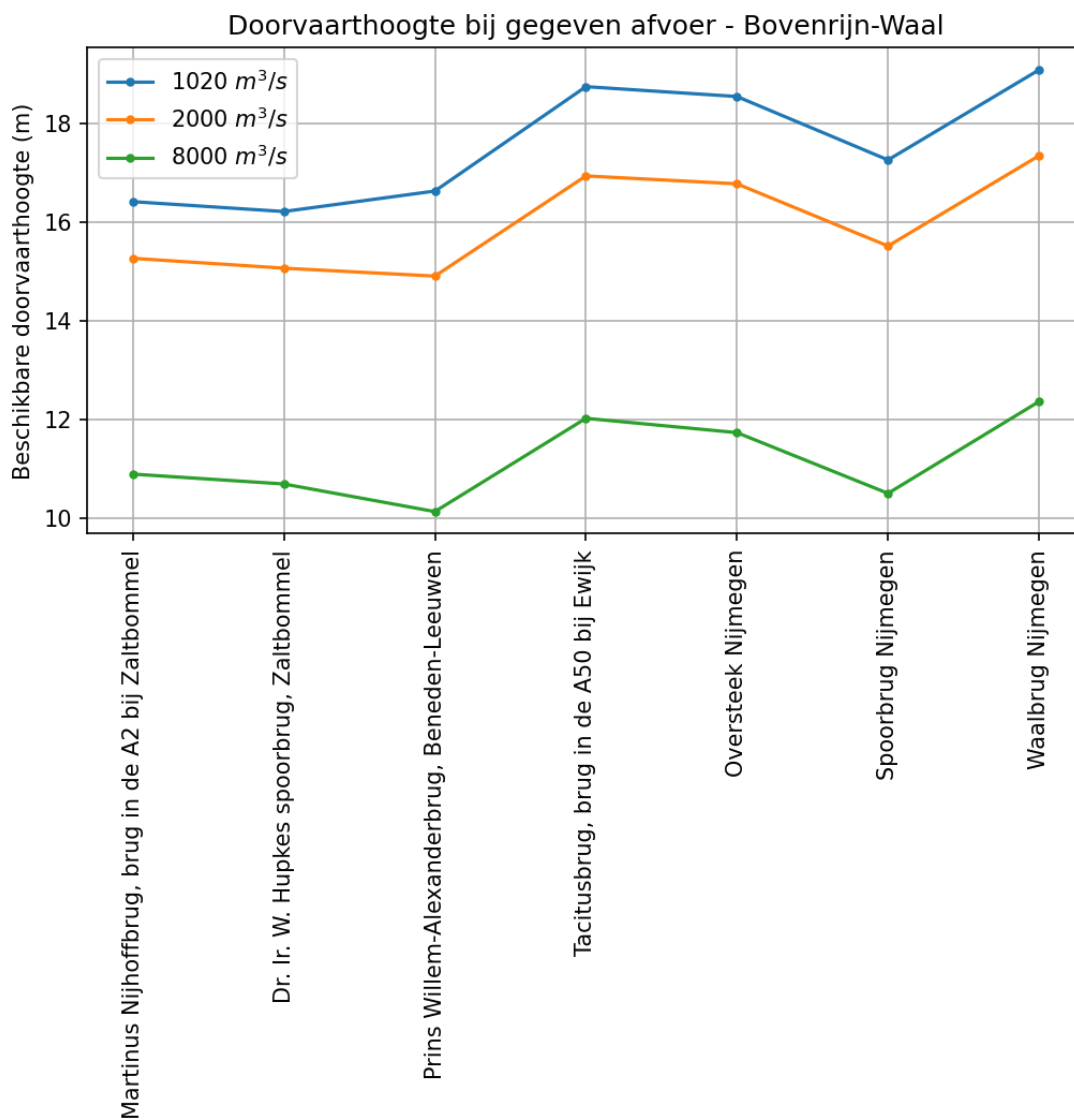
	Herhalingstijd	1		2		10		50		100		Gemiddeld		Afvoer(m³/s)
		Scenario	Ref	WHdry_2085	Ref	WHdry_2085	Ref	WHdry_2085	Ref	WHdry_2085	Ref	WHdry_2085	Ref	
Spoorbrug Culemborg over de Lek	11.35	0	0	2	8	14	24	20	38	23	39	5	10	6,303
	9.1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	4	0	0	14,235
Vizierboog Stuw Hagesteijn - Geheven	11.35	0	0	0	2	6	15	12	23	13	30	2	5	7,509
	9.1	0	0	0	0	0	0	0	4	0	5	0	0	12,765
Hagesteijnsebrug A27 over de Lek Nieuwegein	11.35	0	0	0	3	7	18	14	25	15	32	2	6	7,159
	9.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	inf
Jan Blanckenbrug 1,2 en 3 Bruggen over de Lek Vianen	11.35	0	0	0	0	0	4	4	9	4	12	0	1	10,149
	9.1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	0	0	14,667
Kennedybrug, Maastricht	11.35	0	0	0	0	3	10	8	18	11	19	1	3	8,220
	7	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	0	3,223
Hoegh Brogk (Hoge brug), Maastricht	8.65	0	0	0	0	0	3	6	8	7	10	0	1	2,040
	9.1	0	0	0	0	2	5	7	10	9	12	1	1	1,789
St. Servaasbrug	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,928
	8.65	0	0	0	0	0	2	5	7	6	8	0	1	2,200
Wilhelminabrug, Maastricht	9.1	0	0	0	0	1	4	7	9	8	11	0	1	1,908
	7	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	-inf
spoorbrug, Maastricht	8.65	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	-inf
	9.1	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	-inf
Noorderbrug, Maastricht	7	0	0	0	0	2	4	7	10	8	11	1	1	1,864
	8.65	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	-inf
Doorvaartopening Keersluis Limmel	9.1	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	-inf
	7	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	-inf
Wessem (A2)	8.65	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	-inf
	9.1	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	-inf
Maasbracht, benedenhoofd sluis	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,273
	8.65	0	0	0	0	1	3	6	8	7	10	0	1	1,993
Linne, benedenhoofd sluis	9.1	0	0	0	0	3	5	8	11	9	12	1	2	1,759
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,172
Louis Raemaekersbrug	8.65	0	0	0	0	1	4	6	8	8	10	0	1	1,965
	9.1	0	0	0	0	3	6	8	11	10	12	1	2	1,733
Heel, benedenhoofd sluis	7	0	0	0	0	0	3	6	7	7	9	0	1	2,083
	8.65	0	0	3	6	13	21	23	28	25	30	5	8	1,172
Hornerbrug	9.1	0	0	10	13	27	33	40	45	42	46	13	15	922
	7	0	0	0	0	3	6	8	12	10	12	1	2	1,707
Spoorbrug Leeuwen	8.65	2	2	55	52	97	98	118	116	119	118	56	56	485
	9.1	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	-inf
Zuiderbrug, Venlo	7	0	0	0	0	3	5	8	11	9	12	1	2	1,759
	8.65	0	0	3	5	12	20	22	25	23	29	5	7	1,205
Spoorbrug, Venlo	9.1	0	0	7	10	23	28	32	38	35	39	10	12	1,008
	7	0	0	0	0	0	3	6	7	7	9	0	1	2,099
Stadsbrug, Venlo	8.65	0	0	0	1	5	10	11	15	12	20	2	3	1,522
	9.1	0	0	1	2	8	12	14	19	16	23	3	4	1,380
Koninginnebrug, Well	7	0	0	0	0	3	6	8	11	9	12	1	2	1,742
	8.65	0	0	3	5	13	20	23	26	24	30	5	8	1,183
Noorderbrug, Venlo (in A67)	9.1	0	0	7	10	24	30	33	40	36	41	10	13	986
	7	0	0	0	0	3	6	8	11	10	12	1	2	1,726
Zuiderbrug, Venlo	8.65	0	0	3	6	14	21	23	29	25	30	5	8	1,161
	9.1	0	0	8	11	25	30	35	43	37	43	11	14	965
Spoorbrug, Venlo	7	0	0	0	0	0	0	2	4	2	6	0	0	2,715
	8.65	0	0	0	0	1	4	6	9	8	11	0	1	1,936
Stadsbrug, Venlo	9.1	0	0	0	0	3	5	8	11	9	12	1	1	1,771
	7	0	0	0	0	3	6	8	11	10	12	1	2	1,736
Noorderbrug, Venlo (in A67)	8.65	0	0	4	7	17	23	25	31	26	32	6	9	1,121
	9.1	0	0	8	11	25	31	35	43	37	44	11	14	959
Koninginnebrug, Well	7	0	0	0	0	3	6	8	12	10	12	1	2	1,710
	8.65	0	0	4	7	19	23	26	32	27	33	7	10	1,095
Noorderbrug, Venlo (in A67)	9.1	0	0	9	13	26	32	39	45	41	45	12	15	935
	7	0	0	0	0	0	1	5	7	6	8	0	0	2,243
Koninginnebrug, Well	8.65	0	0	0	1	5	8	11	14	11	19	1	3	1,548
	9.1	0	0	1	2	8	12	14	19	16	23	3	4	1,380
Koninginnebrug, Well	7	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	0	3,274
	8.65	0	0	0	0	2	5	7	10	9	11	1	1	1,816

	Herhalingstijd	1		2		10		50		100		Gemiddeld		Afvoer(m ³ /s)
		Scenario	Ref	WHdry_2085	Ref	WHdry_2085	Ref	WHdry_2085	Ref	WHdry_2085	Ref	WHdry_2085	Ref	
Boxmeer, brug in de A-77	9.1	0	0	0	0	4	7	10	14	11	15	1	2	1,598
	7	0	0	0	0	0	0	3	5	4	6	0	0	2,541
	8.65	0	0	0	0	3	5	8	11	9	12	1	2	1,753
	9.1	0	0	0	0	4	7	10	14	11	15	1	3	1,591
Gennep, brug in N264	7	0	0	0	0	0	1	4	6	5	8	0	0	2,299
	8.65	0	0	0	0	4	7	9	13	11	14	1	2	1,607
	9.1	0	0	0	2	7	12	13	18	13	22	2	4	1,422
Mook, spoorbrug	7	0	0	0	0	0	0	3	5	4	6	0	0	2,538
	8.65	0	0	0	0	3	6	8	12	10	12	1	2	1,717
	9.1	0	0	0	1	5	9	11	14	11	19	2	3	1,541
Heumen, brug in de A-73	7	0	0	0	0	0	0	2	4	2	6	0	0	2,714
	8.65	0	0	0	0	2	5	7	11	9	12	1	1	1,783
	9.1	0	0	0	0	4	7	10	14	11	15	1	3	1,590
John S. Thompson-brug	7	0	0	0	0	4	7	9	13	11	14	1	2	1,635
	8.65	0	0	14	18	34	41	45	49	55	58	17	20	836
	9.1	0	0	34	35	69	75	81	91	94	98	37	39	607
Ravenstein, brug in de A-50	7	0	0	0	0	0	0	3	6	5	7	0	0	2,479
	8.65	0	0	0	0	3	6	8	12	10	12	1	2	1,700
	9.1	0	0	0	1	5	10	11	15	12	20	2	3	1,507
Ravenstein, spoorbrug	7	0	0	0	0	4	7	9	13	11	14	1	2	1,602
	8.65	2	1	53	50	95	95	114	114	117	115	54	54	495
	9.1	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	-inf
Lith	7	0	0	0	0	0	0	0	3	1	5	0	0	2,936
	8.65	0	0	0	0	2	4	7	10	8	11	1	1	1,864
	9.1	0	0	0	0	4	7	9	13	11	14	1	2	1,611

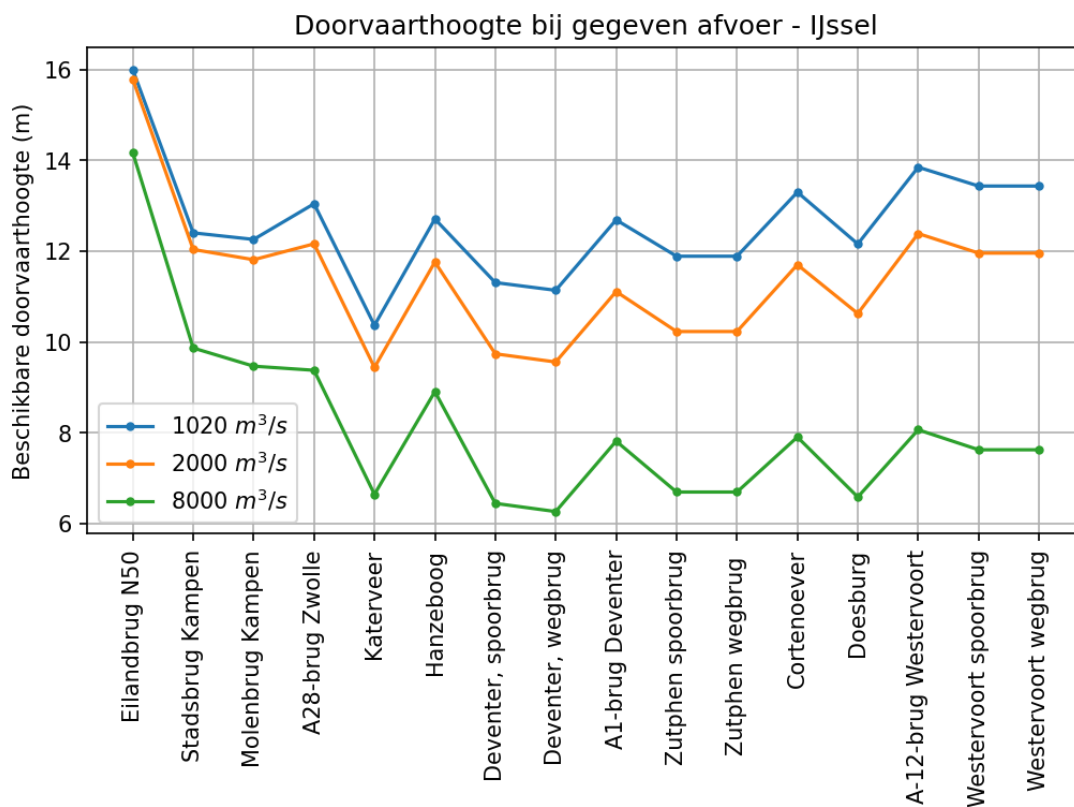
A.3 Langsdoorsnede beschikbare doorvaarthoogte bij gegeven afvoer

Deze bijlage bevat langsdoorsnede van de doorvaarthoogte van alle riviertakken bij een gegeven afvoer. De figuren geven in een oogopslag de relatie tussen de beschikbare hoogte bij de diverse bruggen. De gegeven afvoeren zijn gekozen om een beeld te geven van de verandering in doorvaarthoogte als gevolg van een verschillend verhang in de rivier.

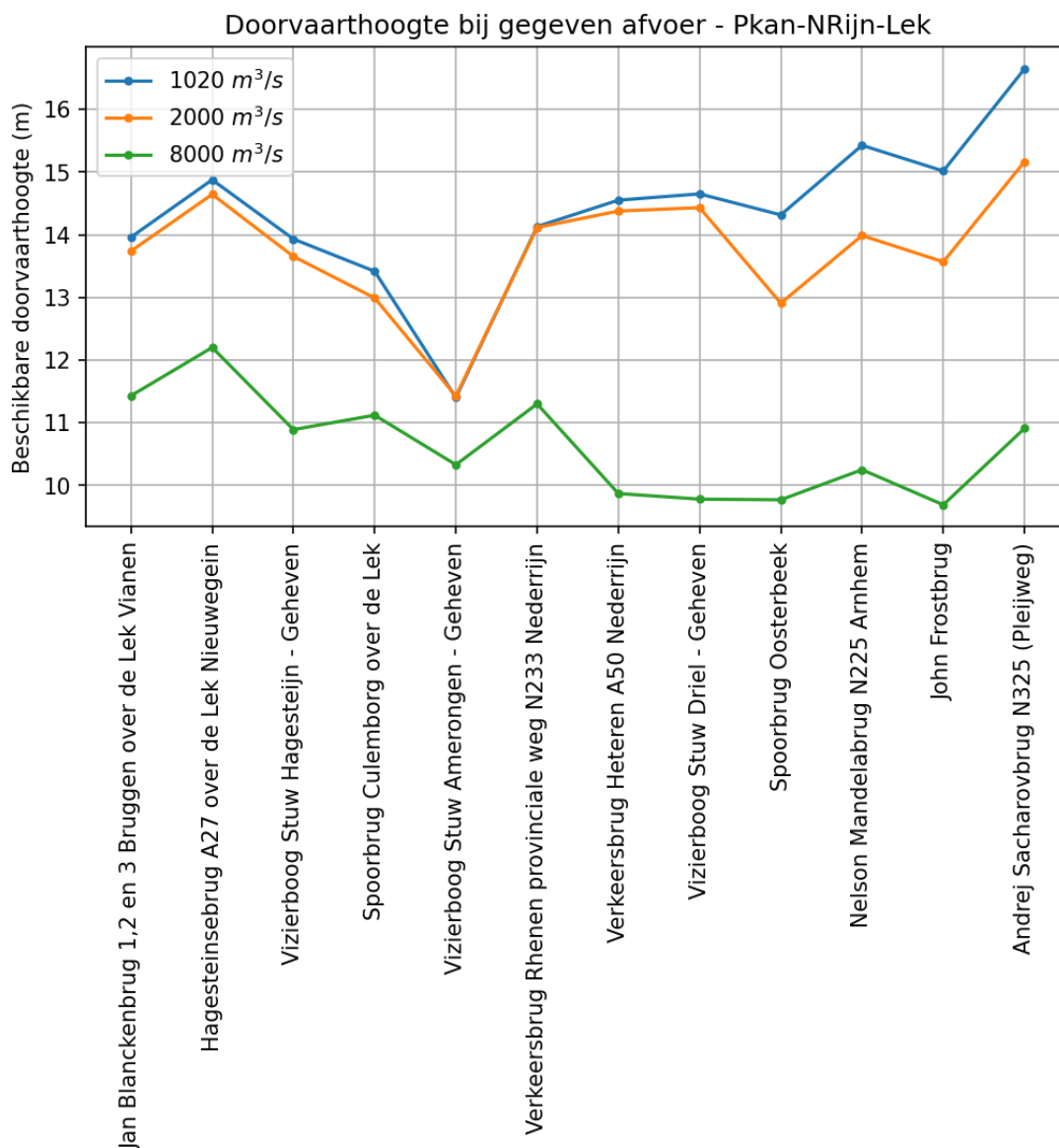
- Voor de Rijn kunnen de afvoeren 1000, 2000 en 8000 m³/s geïnterpreteerd worden als 'lage afvoer', 'gemiddelde afvoer' en 'hoge afvoergolf' (jaarlijks terugkerend).
- Voor de Maas komen de waarden 80, 200 en 1000 m³/s overeen met 'lage afvoer', 'gemiddelde afvoeren', en 'hoge winterafvoeren'. Pas bij veel hogere afvoeren (ruim 2000 m³/s) worden de stuwen gestreken en wordt gesproken van een hoogwatergolf.



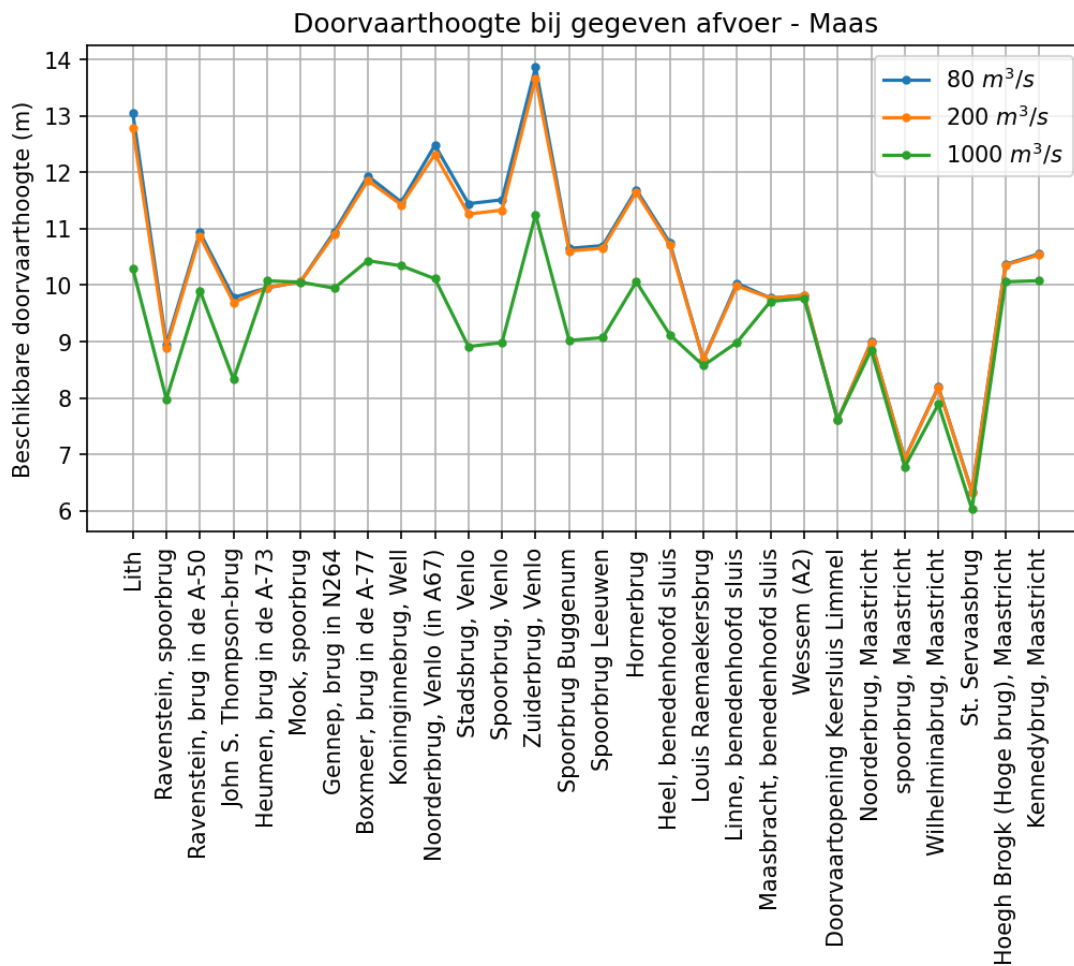
Figuur 9-5 Langsdoorsnede van de doorvaarthoogte voor 3 afvoeren op de Waal



Figuur 9-6 Langsdoorsnede van de doorvaarthoogte voor 3 afvoeren op de IJssel



Figuur 9-7 Langdoorsnede van de doorvaarthoogte voor 3 afvoeren op de Nederrijn/Lek



Figuur 9-8 Langsdoorsnede van de doorvaarthoogte voor 3 afvoeren op de Maas

B Overschrijdingsduur historische jaren Rijn- Maasmonding

Tabel 9.2 Onderschrijdingsduur voor de historische jaren in de Rijn-Maasmonding

		Referentie BP2017		W2050 1m stijging		Verschil	
		11.35 m	9.1 m	11.35 m	9.1 m	11.35 m	9.1 m
Hartelbrug	1953	82.22	0.17	271.68	0.81	189.46	0.63
	1965	101.92	0.00	289.17	0.87	187.25	0.87
	1990	108.76	0.00	289.49	1.33	180.73	1.33
	1932	83.60	0.00	275.40	0.19	191.80	0.19
	1927	86.62	0.00	282.25	0.00	195.63	0.00
Botlekbrug	1953	365.01	365.01	365.01	365.01	0.00	0.00
	1965	365.01	365.01	365.01	365.01	0.00	0.00
	1990	365.01	365.01	365.01	365.01	0.00	0.00
	1932	366.01	366.01	366.01	366.01	0.00	0.00
	1927	365.01	365.01	365.01	365.01	0.00	0.00
Spijkenissebrug	1953	6.47	0.01	151.63	0.34	145.16	0.33
	1965	21.63	0.00	174.20	0.12	152.58	0.12
	1990	28.04	0.00	174.33	0.09	146.30	0.09
	1932	10.33	0.00	156.64	0.00	146.31	0.00
	1927	9.10	0.00	156.88	0.00	147.78	0.00
Erasmusbrug	1953	23.12	0.14	160.59	0.57	137.47	0.43
	1965	44.21	0.00	186.44	0.52	142.23	0.52
	1990	52.69	0.00	185.02	0.66	132.33	0.66
	1932	24.84	0.00	166.56	0.09	141.72	0.09
	1927	27.28	0.00	166.97	0.00	139.69	0.00
Willemsbrug	1953	5.95	0.10	136.98	0.41	131.03	0.31
	1965	19.79	0.00	156.33	0.23	136.55	0.23
	1990	25.83	0.00	156.18	0.25	130.35	0.25
	1932	8.89	0.00	141.06	0.00	132.17	0.00
	1927	7.63	0.00	141.56	0.00	133.93	0.00
Algerabrug - 3 laags als indicatieve waarden	1953	228.34	1.81	359.64	108.50	131.30	106.69
	1965	267.40	7.99	359.99	129.85	92.59	121.86
	1990	259.31	8.22	359.81	131.22	100.50	123.00
	1932	237.19	2.83	360.65	111.44	123.46	108.61
	1927	246.00	0.76	360.85	114.07	114.85	113.31
Zwijndrechtbrug	1953	320.60	0.00	359.64	1.63	39.04	1.63
	1965	356.41	0.22	359.99	13.16	3.58	12.94
	1990	353.45	0.00	359.81	3.63	6.36	3.63
	1932	336.06	0.00	360.69	0.60	24.63	0.60
	1927	356.91	0.00	360.85	0.00	3.94	0.00

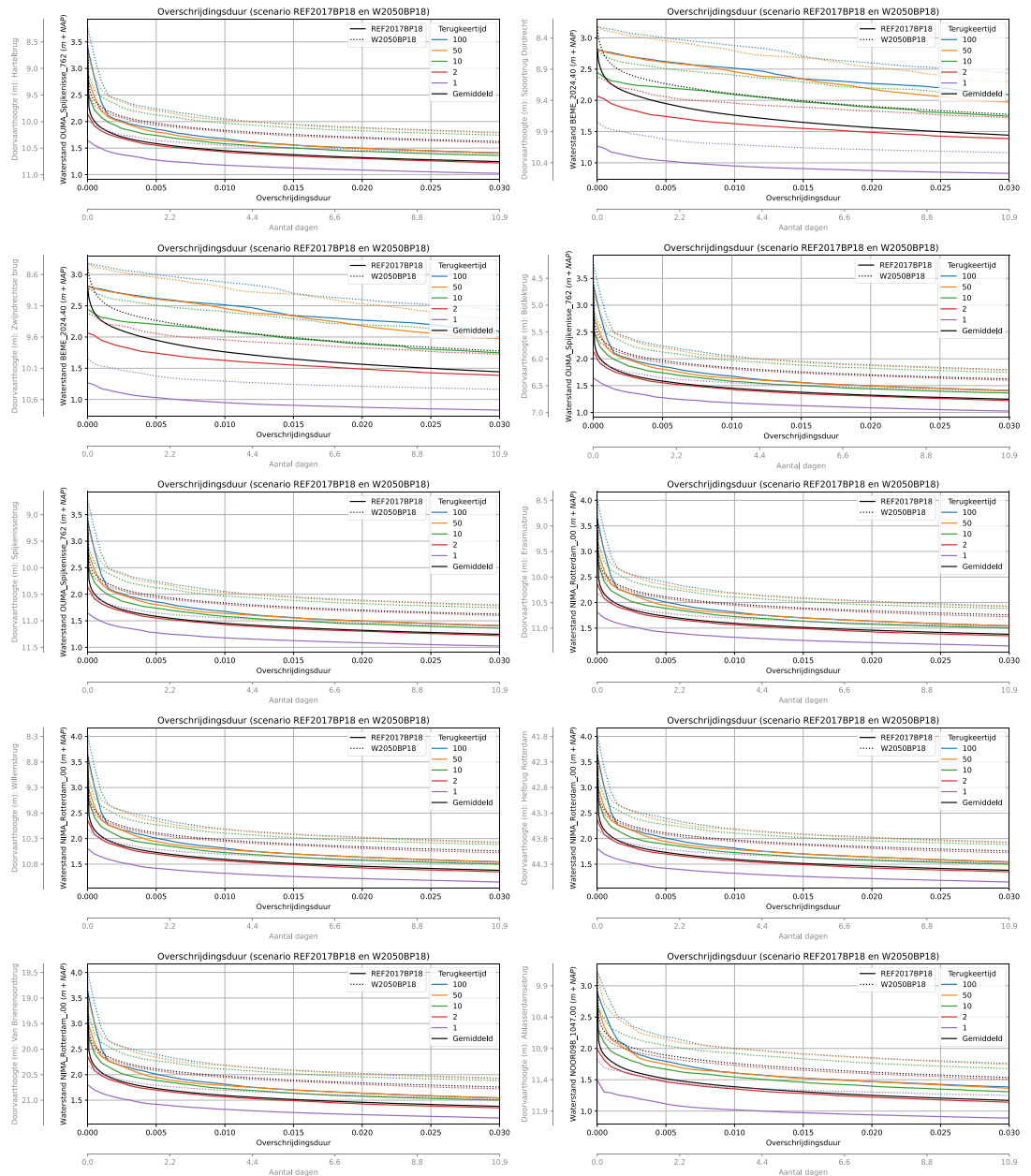
		Referentie BP2017		W2050 1m stijging		Verschil	
		11.35 m	9.1 m	11.35 m	9.1 m	11.35 m	9.1 m
Spoorbrug Dordrecht	1953	355.22	0.35	359.64	2.15	4.42	1.80
	1965	363.67	0.58	363.67	21.89	0.00	21.31
	1990	363.57	0.00	363.57	8.15	0.00	8.15
	1932	356.53	0.00	360.69	2.58	4.16	2.58
	1927	364.23	0.00	364.23	0.02	0.00	0.02
Merwedebrug N3	1953	0.97	0.00	3.85	0.00	2.88	0.00
	1965	2.51	0.00	38.99	0.00	36.48	0.00
	1990	0.46	0.00	22.19	0.00	21.73	0.00
	1932	0.00	0.00	11.62	0.00	11.62	0.00
	1927	0.00	0.00	3.53	0.00	3.53	0.00
Baanhoekspoorbrug	1953	1.43	0.00	27.69	0.00	26.26	0.00
	1965	16.55	0.00	115.10	0.00	98.55	0.00
	1990	3.07	0.00	75.09	0.00	72.02	0.00
	1932	0.32	0.00	51.94	0.00	51.62	0.00
	1927	0.00	0.00	65.02	0.00	65.02	0.00
Moerdijkbrug weg	1953	365.01	1.17	365.01	3.88	0.00	2.71
	1965	365.01	0.47	365.01	21.85	0.00	21.37
	1990	365.01	0.06	365.01	24.91	0.00	24.85
	1932	365.70	0.00	365.70	12.27	0.00	12.27
	1927	364.84	0.00	364.84	2.22	0.00	2.22
Moerdijkbrug spoor	1953	365.01	2.65	365.01	316.13	0.00	313.48
	1965	365.01	13.15	365.01	312.89	0.00	299.74
	1990	365.01	13.87	365.01	344.13	0.00	330.26
	1932	366.01	4.30	366.01	320.32	0.00	316.02
	1927	365.01	0.13	365.01	327.74	0.00	327.62
Haringvlietbrug	1953	105.55	0.04	236.51	0.69	130.96	0.65
	1965	80.06	0.08	206.32	2.49	126.26	2.40
	1990	94.62	0.06	208.85	3.57	114.23	3.51
	1932	99.90	0.00	236.76	0.28	136.86	0.28
	1927	102.17	0.00	238.07	0.27	135.90	0.27
Merwedebrug A27	1953	28.74	0.00	47.33	0.87	18.59	0.87
	1965	189.94	26.56	198.11	27.50	8.17	0.94
	1990	39.64	5.86	47.80	7.19	8.16	1.33
	1932	40.38	1.96	56.49	7.19	16.11	5.24
	1927	105.41	0.00	116.33	0.00	10.92	0.00
Dr. Ir. W. Hupkes spoorbrug	1953	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1965	0.00	0.00	18.00	0.00	18.00	0.00
	1990	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1932	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1927	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Martinus Nijhoffbrug	1953	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1965	0.00	0.00	17.62	0.00	17.62	0.00

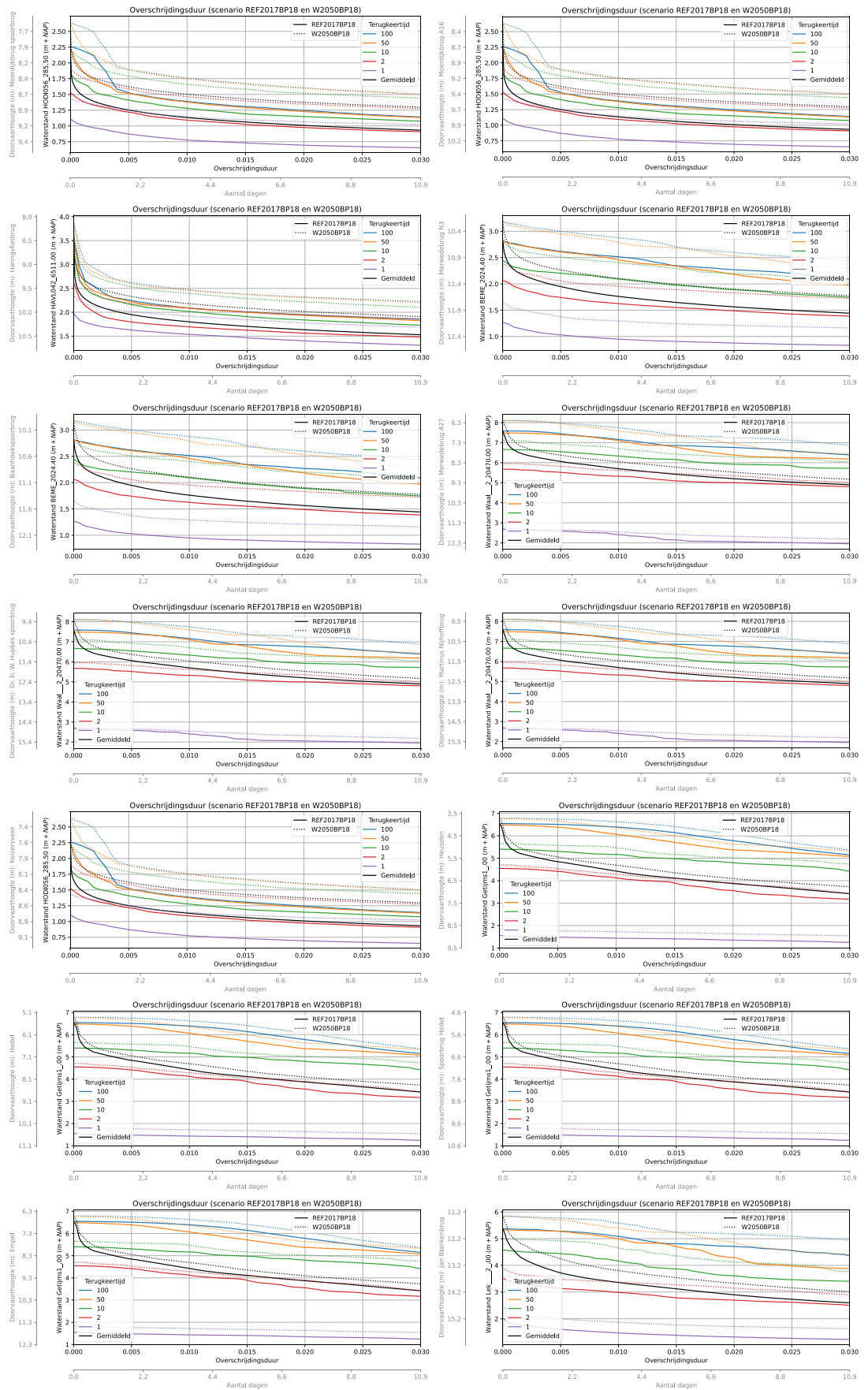
		Referentie BP2017		W2050 1m stijging		Verschil	
		11.35 m	9.1 m	11.35 m	9.1 m	11.35 m	9.1 m
	1990	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1932	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1927	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Jan Blankenbrug	1953	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1965	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1990	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1932	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1927	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hagesteinsebrug	1953	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1965	0.00	0.00	7.76	0.00	7.76	0.00
	1990	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1932	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1927	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Lekbrug Vianen	1953	0.00	0.00	0.17	0.00	0.17	0.00
	1965	0.13	0.00	14.77	0.00	14.64	0.00
	1990	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1932	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1927	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Keizersveer	1953	365.01	6.19	365.01	359.08	0.00	352.89
	1965	365.01	36.51	365.01	357.45	0.00	320.94
	1990	365.01	42.73	365.01	359.35	0.00	316.62
	1932	366.01	22.03	366.01	357.18	0.00	335.15
	1927	365.01	9.02	365.01	359.38	0.00	350.36
Heusden	1953	365.01	27.86	365.01	199.47	0.00	171.61
	1965	365.01	116.87	365.01	290.63	0.00	173.76
	1990	365.01	47.54	365.01	258.97	0.00	211.44
	1932	366.01	61.85	366.01	242.48	0.00	180.63
	1927	365.01	65.81	365.01	279.22	0.00	213.41
Hedel	1953	296.94	4.09	359.64	9.76	62.70	5.67
	1965	353.58	46.43	359.99	64.49	6.41	18.06
	1990	336.86	20.98	359.81	26.08	22.95	5.10
	1932	332.19	17.24	360.63	31.06	28.44	13.81
	1927	355.61	6.17	360.80	18.66	5.19	12.49
Empel	1953	8.22	0.00	31.47	0.35	23.26	0.35
	1965	66.76	24.50	114.55	24.99	47.79	0.49
	1990	29.74	0.00	55.79	1.99	26.05	1.99
	1932	34.31	0.00	59.94	0.53	25.63	0.53
	1927	23.84	0.00	61.33	0.00	37.49	0.00

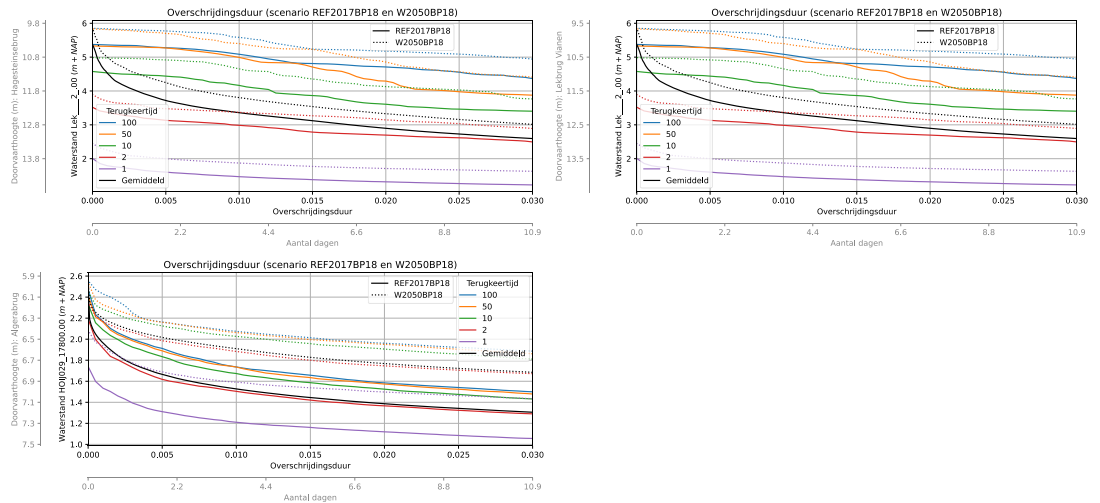
C Onderschrijding doorvaarthoogte Rijnmaasmondning

C.1 Onderschrijdingsduur

Deze bijlage bevat aanvullende figuren bij hoofdstuk 4.3. Iedere figuur geeft de overschrijdingskromme van een brug. De sortering is identiek aan de overzichten zoals bijvoorbeeld in bijlage C.2 en C.3.



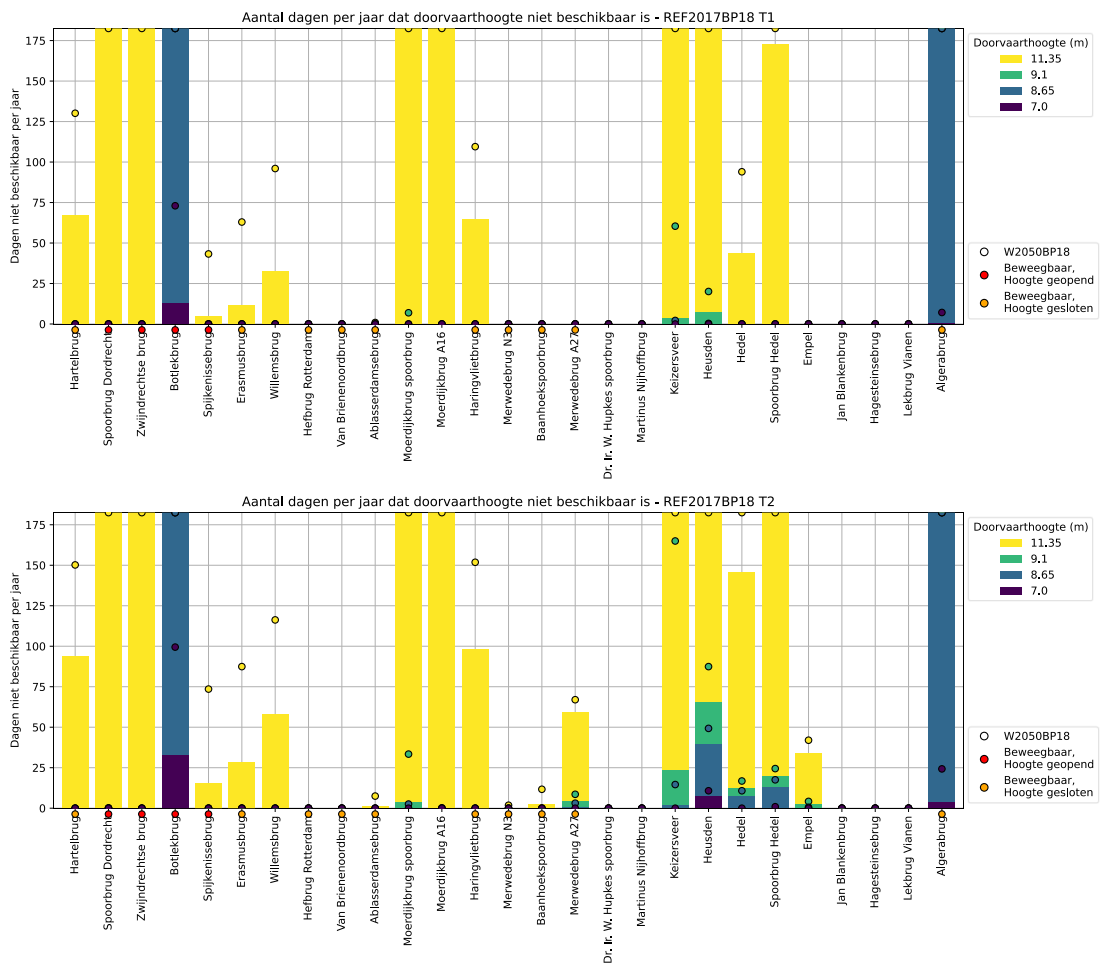


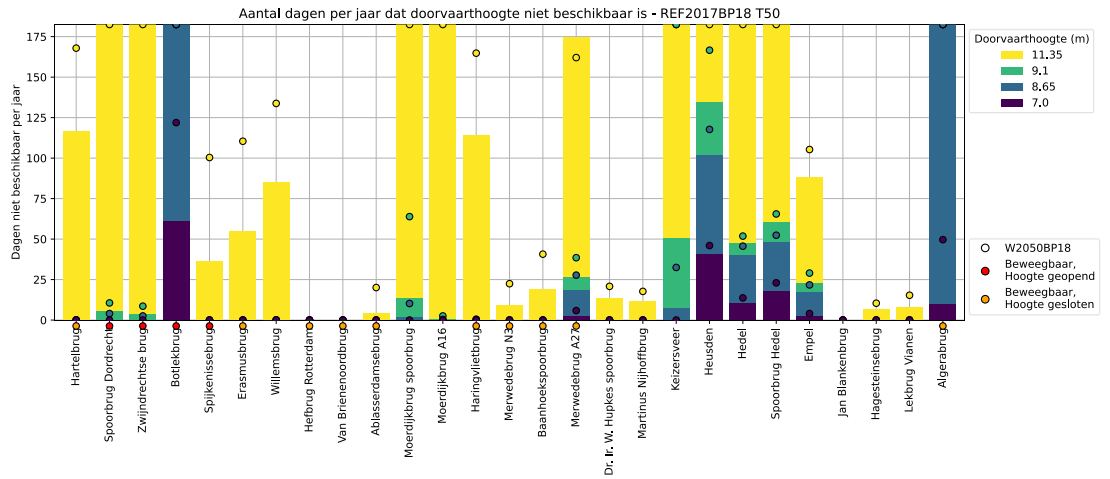
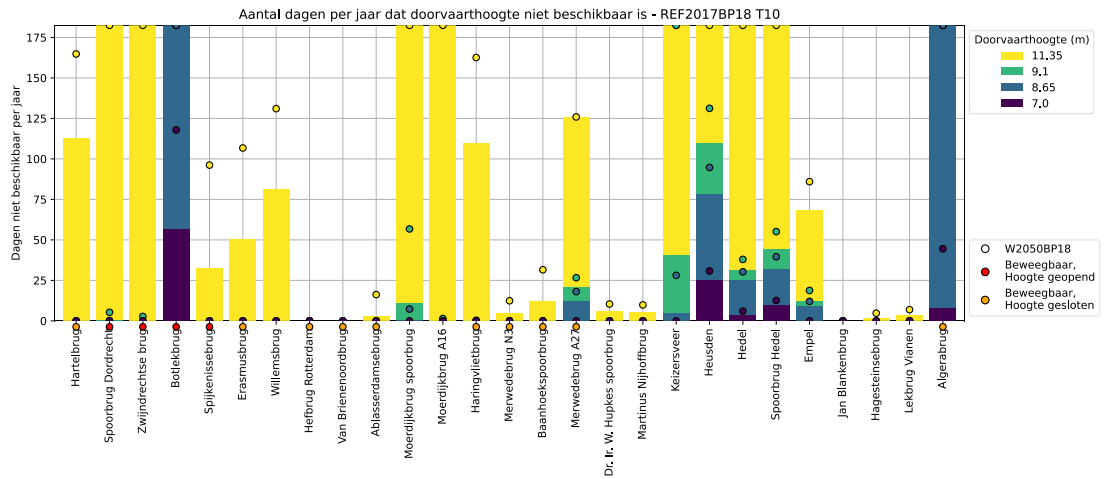


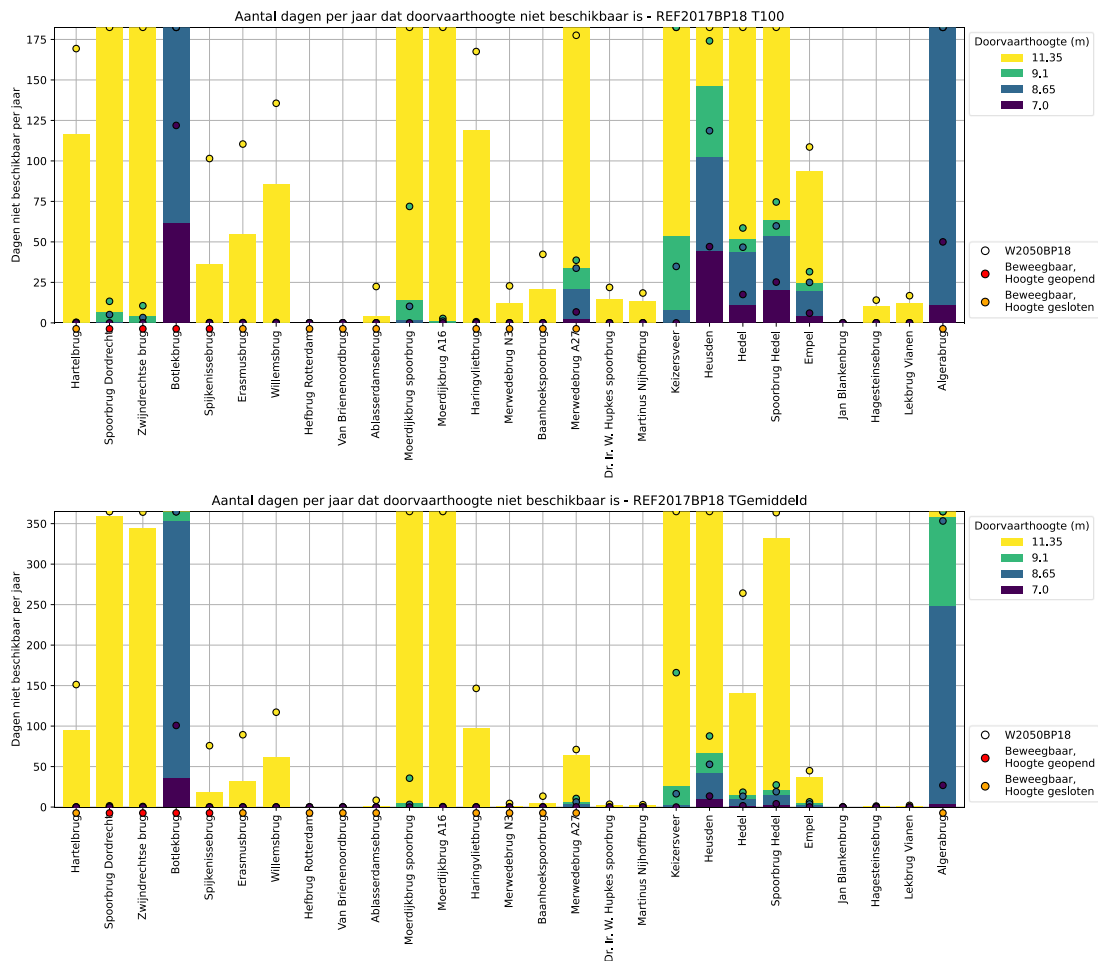
Figuur 9-9 Overschrijdingsduur voor de waterstanden bij alle bruggen in de Rijn-Maasmond

C.2 Staafdiagrammen

Aanvullende figuren voor hoofdstuk 5.2.1. Iedere figuur geeft de overschrijdingsduur per brug in dagen bij een andere terugkeertijd (gemiddeld, T1, T2, T10, T50, T100). De eerste figuur geeft de gemiddelde jaarlijkse overschijding. De staafdiagram geeft de referentiesituatie weer en de markeringen het scenario W2050BP18 waarbij de kleurcodering gelijk is aan die in het staafdiagram. De rode markeringen geven aan dat een brug geopend kan worden.







Figuur 9-10 Onderschrijdingsduur voor alle bruggen in de Rijn-Maasmond voor T = 1, 2, 10, 50, 100 en gemiddeld jaar

C.3 Resultaten in tabelvorm

Tabel 9.3 Overzicht onderschrijdingsduur van de niveaus van de doorvaarthoogte (m). Het maximum van 365 is afgekort met ∞, een het minimum van 0 is afgekort met -. Afhankelijk van de waarde is de uitkomst gegeven in uren (h) of in dagen (d).

		REF2017BP18					Gemiddeld	W2050BP18					Gemiddeld
		1	2	10	50	100		1	2	10	50	100	
Hartelbrug	9.1	-	-	-	-	4.4h	-	-	-	4.4h	8.8h	0.9h	
	11.35	66.8d	93.6d	112.8d	116.4d	116.8d	95.0d	130.1d	150.2d	164.8d	167.9d	169.4d	151.3d
Spoorbrug Dordrecht	9.1	-	-	13.1h	5.8d	6.6d	7.0h	-	4.4h	5.3d	10.6d	13.3d	36.8h
	11.35	∞	∞	∞	∞	∞	359.6d	∞	∞	∞	∞	∞	364.9d
Zwijndrechtse brug	9.1	-	-	-	3.7d	4.6d	3.5h	-	-	2.7d	8.6d	10.6d	16.6h
	11.35	∞	∞	∞	∞	∞	344.3d	∞	∞	∞	∞	∞	364.2d
Botlekbrug	9.1	∞	∞	∞	∞	∞	364.7d	∞	∞	∞	∞	∞	365.0d
	11.35	∞	∞	∞	∞	∞	365.0d	∞	∞	∞	∞	∞	365.0d
Spijkenssebrug	9.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.4h
	11.35	4.6d	15.5d	32.3d	36.0d	36.3d	18.1d	43.3d	73.5d	96.2d	100.4d	101.5d	75.8d
Erasmusbrug	9.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.4h
	11.35	11.1d	28.5d	50.6d	54.6d	54.9d	31.8d	63.0d	87.4d	106.8d	110.4d	110.4d	89.3d
Willembrug	9.1	-	-	-	-	4.4h	-	-	-	-	4.4h	4.4h	0.9h
	11.35	32.7d	57.9d	81.4d	85.2d	85.8d	61.0d	96.0d	116.3d	131.0d	133.8d	135.6d	117.1d
Hefbrug Rotterdam	9.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	11.35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	9.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	11.35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

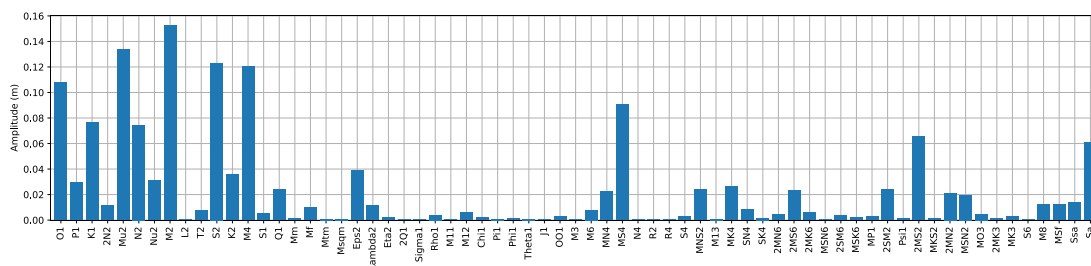
		REF2017BP18						W2050BP18						
		1	2	10	50	100	Gemiddeld	1	2	10	50	100	Gemiddeld	
Van Brienoordbrug	11.35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ablasserdamsebrug	9.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	11.35	-	21.9h	2.9d	4.0d	4.0d	28.9h	21.9h	7.5d	16.2d	20.1d	22.4d	8.4d	
Moerdijkbrug spoorbrug	9.1	4.4h	4.2d	11.1d	13.9d	14.2d	5.2d	6.9d	33.4d	56.8d	63.9d	71.9d	35.6d	
	11.35	∞	∞	∞	∞	∞	365.0d	∞	∞	∞	∞	∞	365.0d	
Moerdijkbrug A16	9.1	-	-	-	13.1h	26.3h	0.9h	-	4.4h	35.0h	2.6d	2.7d	12.3h	
	11.35	∞	∞	∞	∞	∞	364.8d	∞	∞	∞	∞	∞	365.0d	
Haringvlietbrug	9.1	-	-	4.4h	4.4h	4.4h	0.9h	-	-	8.8h	13.1h	17.5h	2.6h	
	11.35	64.6d	98.2d	110.0d	114.1d	119.2d	97.0d	109.5d	151.8d	162.6d	164.8d	167.5d	146.6d	
Merwedebrug N3	9.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	11.35	-	-	4.4d	9.3d	11.9d	28.0h	-	43.8h	12.4d	22.4d	22.8d	4.5d	
Baanhoekspoorbrug	9.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	11.35	-	2.2d	12.0d	19.0d	21.0d	4.4d	-	11.7d	31.6d	40.7d	42.3d	13.4d	
Merwedebrug A27	9.1	-	4.7d	21.4d	26.6d	33.8d	7.3d	-	8.6d	26.6d	38.5d	38.7d	10.6d	
	11.35	-	59.3d	125.7d	174.5d	∞	64.4d	-	67.0d	125.9d	162.1d	177.6d	71.1d	
Dr. Ir. W. Hupkes spoorbrug	9.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	11.35	-	-	5.8d	13.3d	14.2d	42.9h	-	-	10.4d	20.8d	21.9d	3.5d	
Martinus Nijhoffbrug	9.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	11.35	-	-	5.5d	11.7d	13.5d	35.9h	-	-	9.9d	17.7d	18.4d	3.0d	
Keizersveer	9.1	3.8d	23.4d	41.1d	50.6d	53.5d	25.6d	60.4d	165.0d	∞	∞	∞	166.0d	
	11.35	∞	∞	∞	∞	∞	365.0d	∞	∞	∞	∞	∞	365.0d	
Heusden	9.1	7.3d	65.7d	110.2d	134.7d	146.4d	66.4d	20.1d	87.4d	131.2d	166.6d	174.1d	87.7d	
	11.35	∞	∞	∞	∞	∞	365.0d	∞	∞	∞	∞	∞	365.0d	
Hedel	9.1	-	12.6d	31.8d	47.6d	52.2d	15.0d	-	16.8d	38.0d	51.8d	58.6d	18.4d	
	11.35	43.3d	145.8d	∞	∞	∞	140.2d	94.0d	∞	∞	∞	∞	264.2d	
Spoorbrug Hedel	9.1	-	20.1d	44.3d	60.6d	63.5d	22.0d	-	24.5d	55.1d	65.5d	74.6d	27.3d	
	11.35	172.3d	∞	∞	∞	∞	332.0d	∞	∞	∞	∞	∞	363.6d	
Empel	9.1	-	2.9d	12.4d	23.4d	24.8d	4.7d	-	4.2d	18.8d	29.0d	31.6d	6.4d	
	11.35	-	34.3d	68.3d	88.3d	93.4d	36.6d	-	42.0d	86.0d	105.3d	108.6d	44.9d	
Jan Blankenbrug	9.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	11.35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Hagesteinsebrug	9.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	11.35	-	-	39.4h	6.6d	10.2d	10.5h	-	-	4.7d	10.4d	14.1d	30.7h	
Lekbrug Vianen	9.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	11.35	-	-	3.7d	7.7d	12.2d	19.3h	-	-	6.9d	15.3d	16.8d	2.1d	
Algerbrug	9.1	∞	∞	∞	∞	∞	358.1d	∞	∞	∞	∞	∞	364.8d	
	11.35	∞	∞	∞	∞	∞	365.0d	∞	∞	∞	∞	∞	365.0d	

D Onderzoek oorzaak doorvaarthoogte

Op basis van de historische tijdreeksen (bij paragraaf 4.2.1) is onderzoek gedaan naar de reden achter hoge waterstanden per locatie in de Rijnmaasmonding. Hiervoor worden 4 mogelijke oorzaken onderzocht:

- Springtij (en andere astronomische cycli)
- Windopzet
- Hoge afvoer op de Rijn
- Hoge afvoer op de Maas

Voor het opsplitsen van de waterstand bij Hoek van Holland in astronomisch getij en windopzet is een harmonische analyse gedaan van het getij. De belangrijkste componenten van het getij die volgen uit deze analyse zijn weergegeven in onderstaande figuur. Er is niet nagegaan of deze amplitudes (en bijbehorende fase) overeenkomen met literatuur, omdat dit in deze studie uitsluitend gebruikt is voor opsplitsing van het waterstandssignaal. Op basis van deze harmonische componenten is het astronomisch getij gereconstrueerd. Visuele inspectie hiervan gaf voldoende vertrouwen in de methodiek.



Figuur 9-11 Componenten van astronomisch getij bij Hoek van Holland.

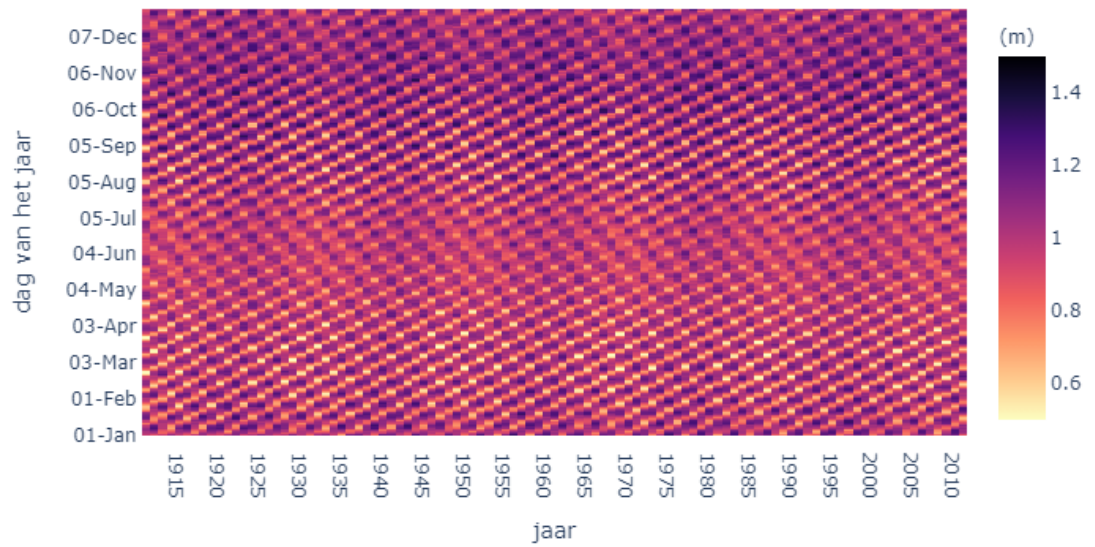
Voor de afvoer op de Rijn en Maas is gekeken naar de afvoer bij respectievelijk Tiel en Megen (of Lith) in de modelresultaten.

Uit deze analyses volgt voor iedere dag van ieder jaar de mate waarin ieder van onderstaande criterium wordt bereikt. Dit is weergegeven in onderstaande heatmaps, deze worden in interactieve vorm (html-pagina's) gedeeld met deze rapportage. Conclusies uit deze figuren zijn bijvoorbeeld:

- Astronomisch getij (Figuur 9-12):
 - We zien in de hele figuur met name de doortij-stormtij-cyclus met een lengte van ongeveer twee weken.
 - Er is een seizoensvariatie, met een minder extreme doortij-stormtij-cyclus
 - Ook is in horizontale richting een patroon zichtbaar met een periode van 18,6 jaar, veroorzaakt door het schommelen van de aardas onder invloed van de maan.
- Windopzet (Figuur 9-13):
 - Dit is een veel vlekkeriger patroon. Met name in de winter treden stormen op met een maximale hoogte tot 3 m.
 - Opvallende gebeurtenissen zijn zichtbaar in 1953 (watersnoodramp) en 2007 (sluiting Maeslantkering)
- Afvoeren Rijn en Maas (Figuur 9-14)
 - De meeste hoogwatergolven treden in de winter op.
 - Duidelijk zichtbaar zijn bijvoorbeeld de recente hoogwaters van 1995, 2003 en 2011

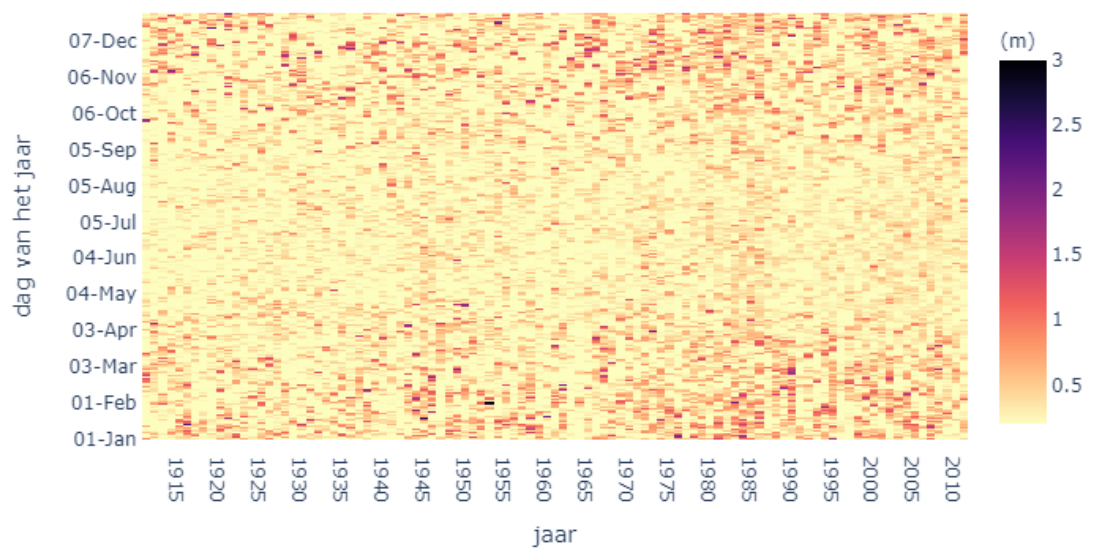
- Verder is er veel correlatie tussen beide figuren. Afvoergolven treden vaak in beide rivieren op.

Astronomisch



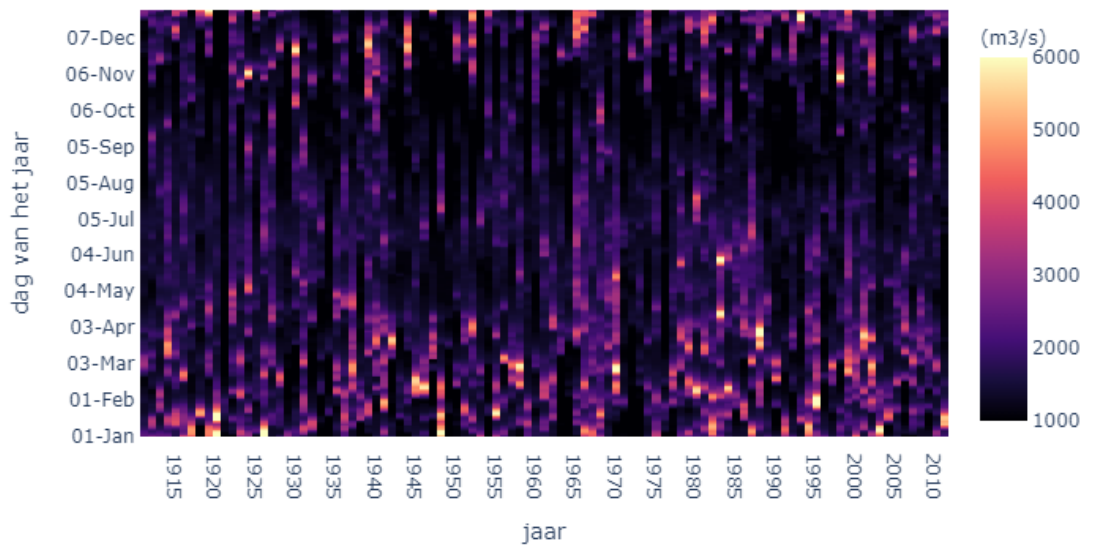
Figuur 9-12 Invloed van astronomisch getij op de waterstand

Maximale windopzet

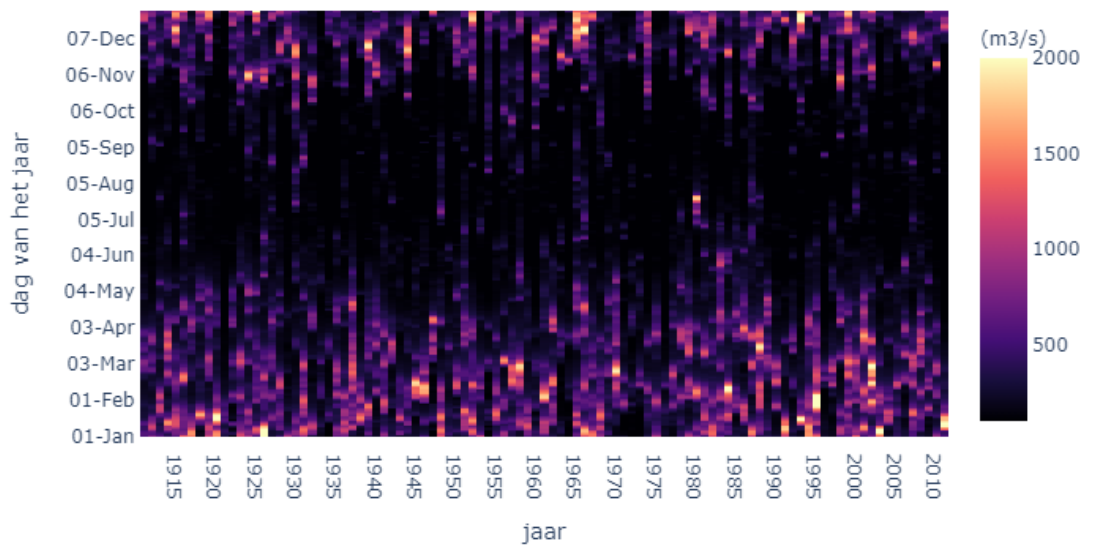


Figuur 9-13 Invloed van windopzet op de waterstand

Afvoer Waal te Tiel



Afvoer Maas te Megen



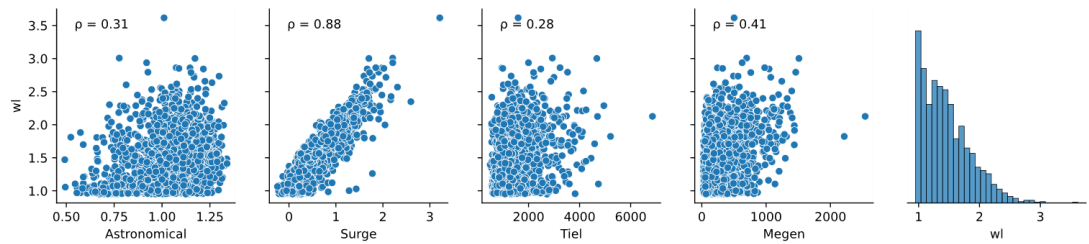
Figuur 9-14 Invloed van afvoer (Rijn boven, Maas beneden) op de waterstand

Op basis van deze mogelijke oorzaken is bij iedere brug op elk moment geanalyseerd of de doorvaarhoogte onvoldoende was voor een gegeven niveau. Aansluitende momenten zijn hierbij samengevoegd tot 1 gebeurtenis. Vervolgens is de correlatie tussen deze punten en de gegeven mogelijke oorzaken berekend. Twee voorbeelden zijn hieronder gegeven.

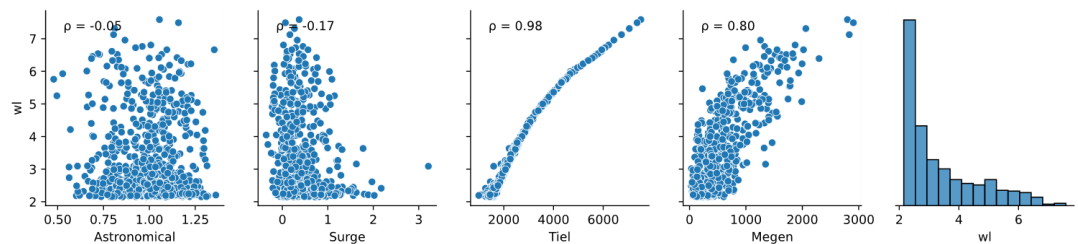
- De Willemsbrug met een sterke correlatie met de windopzet ('surge'), zie Figuur 9-15.
- De Merwedeburg A27 met een zeer sterke correlatie met de afvoer bij Tiel, zie Figuur 9-16.

De correlatie is gekwantificeerd met de Pearson correlatie coëfficiënt. Voor alle bruggen is dit gegeven in onderstaande tabellen/heatmaps. Hieruit kan het volgende geconcludeerd worden:

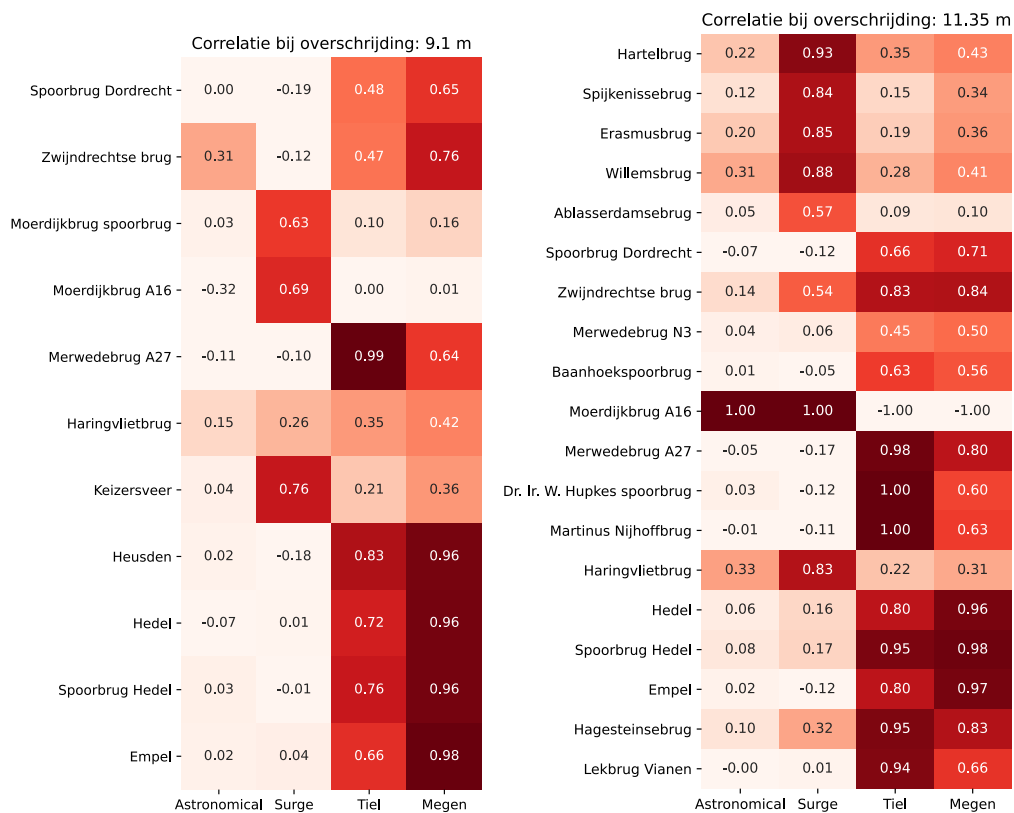
- De bruggen bij Hedel en Empel hebben een zeer sterke correlatie met de Maas-afvoer en worden nauwelijks beïnvloed door de waterstand op zee.
- De Merwedebrug (A27), Hupkesbrug, Martine Nijhoffbrug, Hagesteinbrug en Vianen zijn zeer sterk afhankelijk van de afvoer op de Rijn. Ook de Maasbruggen lijken hier sterk door beïnvloed, maar dit komt door de sterke correlatie tussen de Maas- en Rijnafvoer.
- De overige bruggen laten veelal de grootste bijdrage zien door windopzet, maar worden ook nog aanmerkelijk beïnvloed door de rivieren. Het astronomisch getij blijkt uit deze analyse nooit de hoofdoorzaak van beperkende doorvaarthoogten (Figuur 9-17).



Figuur 9-15 Correlatie bij Willemsbrug (waterstanden bij doorvaarthoogte kleiner dan 11.35 m)



Figuur 9-16 Correlatie bij Merwedebrug A27 (waterstanden bij doorvaarthoogte kleiner dan 11.35 m)



Figuur 9-17 Heatmap van de correlatie van beperkende doorvaarthoogten met astronomisch getij, windopzet, afvoer bij Tiel en afvoer bij Megen. In de linker figuur is de correlatie berekend van alle waterstanden als een doorvaarthoogte van 9 m niet mogelijk is. In de rechter figuur deze zelfde correlatie bij een doorvaarthoogte kleiner dan 11.35 m. In beide deelfiguren zijn enkel de bruggen weergegeven waarbij de analyse uitgevoerd kon worden op ten minste 2 perioden.

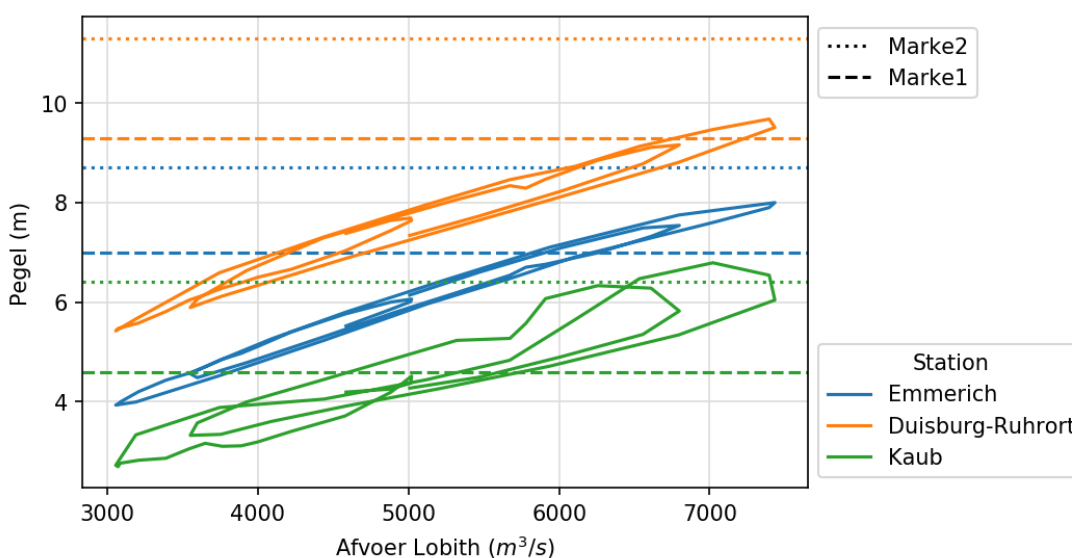
E Pegelstanden Duitsland

Voor de periode 2015 tot mei 2020 is een analyse uitgevoerd van de pegelstanden (waterstanden bij pegels/meetstations) in Duitsland (Emmerich, Duisburg-Ruhrort en Kaub) ten opzichte van de afvoer bij Lobith. Deze pegelstanden zijn vergeleken met de niveaus “Marke1” en “Marke2” zoals deze voor alle Duitse meetstations te vinden zijn op ELWIS¹⁵. De definitie van de niveaus is als volgt:

Marke1: Men dient 1/3 uit de kant te blijven met een max. snelheid van 20 kilometer per uur

Marke2: Volledig vaarverbod

Uit Figuur 9-18 wordt geconcludeerd dat het niveau Marke2 het eerste wordt overschreden bij Kaub bij een corresponderende afvoer van ongeveer 7000 m³/s te Lobith. Bij Emmerich vermoedelijk pas bij ongeveer 8000 m³/s en bij Duisburg vermoedelijk bij ongeveer 9000 m³/s.



Figuur 9-18 Vergelijking tussen afvoer bij Lobith en pegelstanden bij Duitsland. Voor iedere pegel is (met gelijke kleurcode) ook het niveau Marke1 en Marke2 aangegeven. Het referentieniveau van iedere pegel is anders en is gedefinieerd op basis van de locatie van (de aansluiting) op de meting.

¹⁵ Zie bijvoorbeeld voor Kaub:

<https://www.elwis.de/DE/dynamisch/gewaesserkunde/wasserstaende/index.php?target=1&pegelId=1d26e504-7f9e-480a-b52c-5932be6549ab>

F Eerder gestuurde memo bepaling bedreiging en blootstelling

F.1 Inleiding

Voor het project klimaatbestendige netwerken wordt er een stresstest uitgevoerd voor de vaarwegen. Een onderdeel daarvan is de stresstest zeespiegelstijging en hoge rivierafvoeren. In deze memo wordt er verder ingegaan op de voorlopige resultaten voor de eerste twee stappen in de stresstest. Niet alle resultaten worden in deze memo gepresenteerd, het doel is om consensus te bereiken over de tussenliggende stappen en niet om alle resultaten hier te bespreken. Hiervoor worden enkele voorbeelden uitgewerkt om de stappen van het project duidelijk te maken.

F.2 Bedreiging

F.2.1 Zeespiegelstijging – Rijn-Maasmonding

F.2.1.1. Nationaal Water Model

Binnen het Nationaal Water Model wordt voor 100 jaar de waterstanden in Nederland uitgerekend met een referentie scenario en verschillende klimaatscenario's. In de Rijn-Maasmonding wordt er gebruik gemaakt van een apart SOBEK model om ook zoutverspreiding te modelleren. Binnen dit project wordt er gebruik gemaakt van de resultaten van dit model.

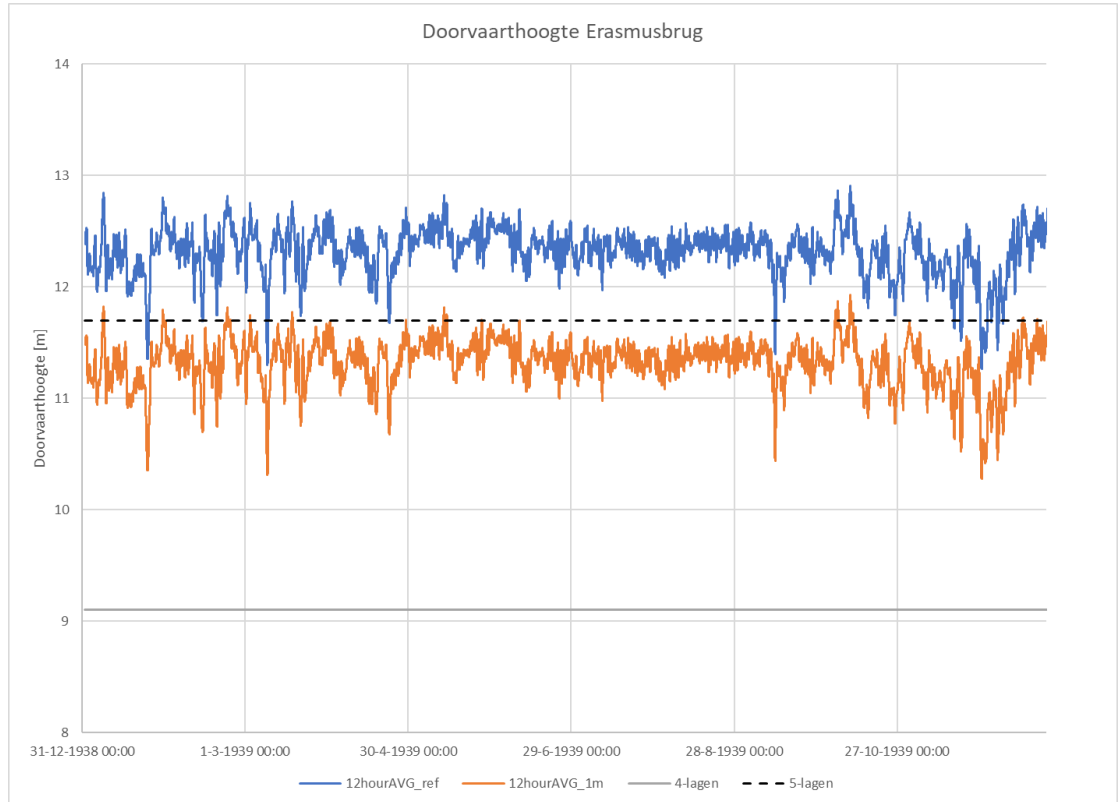
In het plan van aanpak is er voorgesteld om natte jaren (op basis van afvoer) met een herhalingsstijd van 1, 2, 10 en 100 jaar te gebruiken. Dit is op meerdere manieren te interpreteren doordat beperkingen in doorvaarthoogte in het getijgebied een combinatie van factoren kan zijn. Zo is zowel te beargumenteren dat de maximale afvoer als de gemiddelde afvoer meer bepalend kan zijn voor beperkingen in doorvaarthoogte.

Het doel van het kiezen van meerdere natte jaren is om een dwarsdoorsnede te krijgen van representatieve jaren en dit te vertalen naar een kwetsbaarheid van het systeem. Het voorstel is dan om zowel het gemiddeld natste jaar (1965) als het jaar met de maximale afvoer (1926) te kiezen. In het jaar 1939 was zowel de maximale als gemiddelde afvoer relatief hoog, dit jaar wordt in de analyse meegenomen als meest extreme jaar qua som van de componenten. Daarnaast wordt een jaar gekozen met een terugkeertijd van ongeveer 10 jaar (1981) en 1 jaar (1956). Tevens wordt het jaar 1949 meegenomen als droog jaar met de laagste gemiddelde afvoer bij Lobith. Samenvattend worden de volgende jaren geanalyseerd:

- 1965, hoogste gemiddelde afvoer;
- 1926, hoogste maximale afvoer;
- 1939, hoge maximale en gemiddelde afvoer;
- 1981, terugkeertijd van 10 jaar;
- 1956, gemiddeld jaar, herhalingsstijd van 1 jaar;
- 1949, droog jaar, geen beperkingen in doorvaarthoogte door afvoer.

Voor deze jaren worden de referentie (BP18) en W2050 met 1 meter zeespiegelstijging met elkaar vergeleken. Voor het jaar 1981 wordt ook gekeken naar het WH2085 scenario om de invloed van een extremer afvoerregime en iets lagere zeespiegelstijging (80 centimeter) te kwantificeren.

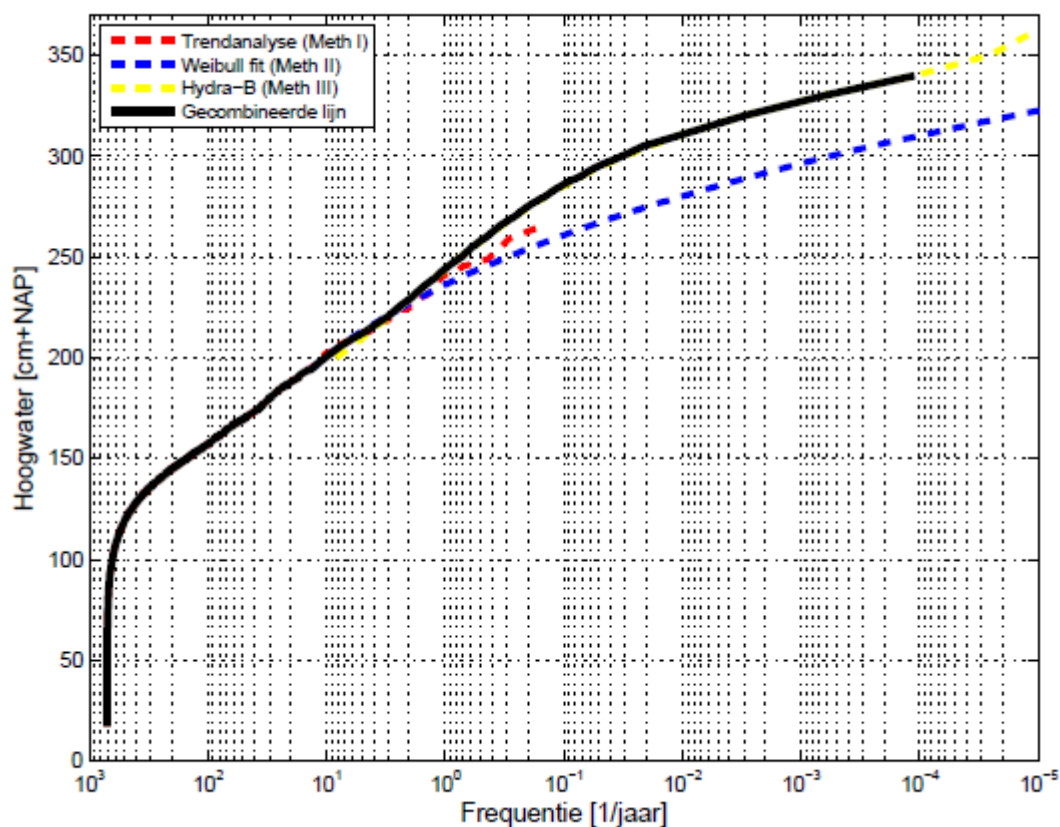
Voor elk van deze jaren wordt gekeken hoe lang bepaalde doorvaarthoogtes niet mogelijk zijn. De indicatieve waarden representeren een aantal containerlagen of percentage vervoerde containers (§3.2). Het verschil in overschrijding tussen de referentie en klimaatscenario beschrijft de bedreiging. Hieronder is een voorbeeld te vinden voor het jaar 1939 voor de Erasmusbrug. Daarin is te zien dat 5-laags containervaart in de referentie bijna het gehele jaar mogelijk is, terwijl in het klimaatscenario dit voor slechts een beperkt deel van het jaar mogelijk is.



Figuur F.1 Doorvaarthoogte Erasmusbrug in 1939 met twee indicatieve waarden (4- en 5-lagen containers)

F.2.1.2. Frequentiecurven

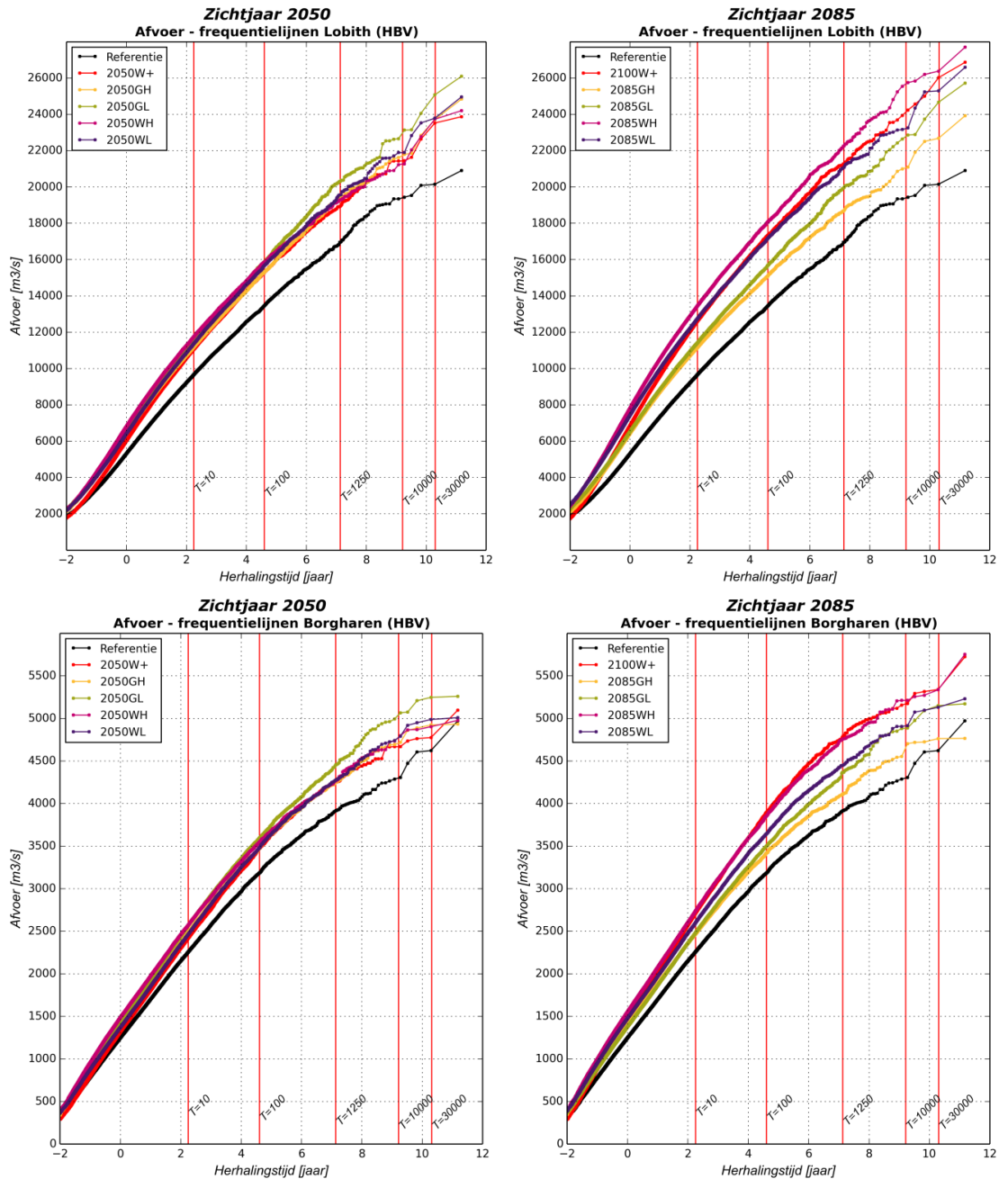
In de Rijn-Maasmonding wordt de waterstand door een combinatie van factoren bepaald. De extremen waarbij de doorvaarthoogte beperkt kan worden zijn te vertalen naar terugkeertijden in zogenaamde overschrijdingsfrequentielijnen (voorbeeld voor Rotterdam hieronder). Gegeven een bepaalde indicatieve waarde en een brughoogte kan de herhalingsperiode van de corresponderende waterstand worden bepaald. Voor de Erasmusbrug komt dit met de hoogte van 12.5 meter en een gewenste doorvaarthoogte van 9.1 meter neer op 3.4 meter. Volgens de grafiek komt dit ongeveer eens in de 10000 jaar voor bij Rotterdam (MHW). De lokale toename in waterstand zal niet overal 100% overeenkomen met de zeespiegelstijging vanwege de afnemende invloed van zee landinwaarts. Bij Rotterdam is dit wel om en nabij de 1 meter, hierdoor zal met dezelfde gewenste doorvaarthoogte van 9.1 meter een huidige waterstand van 2.4 meter de overschrijdingsfrequentie beschrijven in een situatie met 1 meter zeespiegelstijging. Hierdoor neemt de frequentie toe van 1 keer in de 10.000 jaar naar eens per jaar. Dit getal zegt niet iets over de duur van de overschrijding maar geeft aan hoe vaak er rekening gehouden moet worden met beperkingen in de doorvaarthoogte.



Figuur F.2 Overschrijdingsfrequentielijn voor Rotterdam (HKV, 2006)

F.2.2 Hoge rivierafvoeren

Voor elk van de riviertakken zijn zogenaamde waterstandsduurlijnen beschikbaar. Deze lijnen geven aan met welke afvoer een bepaald waterstand correspondeert en hoe veel dagen per jaar deze afvoer voorkomt. Voor de hogere afvoeren met een terugkeertijd in jaren kunnen betrekkinglijnen worden gebruikt die vergelijkbare informatie geeft. De frequentie van de afvoer is ook bepaald voor klimaatscenario's. Dit betekent dat voor de referentie de waterstand behorend bij een bepaalde indicatieve waarde kan worden bepaald. Voor de Spoorbrug bij Nijmegen (22.8 m +NAP) is dit voor 4 lagen containers (9.1 meter) 13.7 m +NAP. Hier hoort een Boven-Rijn afvoer van 12,127 m³/s bij. Deze afvoer heeft een herhalingstijd van 50 jaar in de referentie situatie en 10 jaar in het 2085WH scenario.



Figuur F.3 Frequentielijnen afvoeren Lobith en Borgharen (KNMI '14)

F.3 Blootstelling

F.3.1 Brughoogtes

Bijna alle brughoogtes zijn bekend voor de analyse en gecontroleerd met de aangeleverde gegevens. Als er meerdere openingen zijn of een kromming in de brug is er voor gekozen om de analyse met de maximale hoogte uit te voeren. Bij de analyse van de mogelijke reacties op beperkingen in doorvaarhoogte wordt ook gekeken of de brug open kan of dat er omreisroutes zijn.

Van te voren zijn er op elke riviertak enkele bekende knelpunten waar extra aandacht aan wordt geschonken. Dit zijn:

- **IJssel** – Deventer (wegbrug)
- **Waal** – Prins Willem-Alexanderbrug
- **Nederrijn/Lek** – John Frostbrug
- **Maas** – Ravensteinbrug (spoorbrug)
- **Nieuwe Maas** – Willemsbrug (kan open)
- **Oude Maas** – Botlekbrug (kan open)

F.3.2 Containervaart

Per riviertak is er op basis van de BIVAS database (2014) een overzicht gemaakt van de benodigde doorvaarthoogte om de containers te vervoeren. Dit is gedaan op basis van vergelijking 3.1.

Vergelijking 3.1 (op basis van BIVAS 4.8.1)

$$\text{containerLagen} = \text{afgerond} \uparrow \left(\frac{\text{aantalContainers [TEU]}}{\text{containerCapaciteit}} \right)$$

$$\text{containerCapaciteit} = \left(\frac{0.9 * \text{scheepsLengte} - 10}{6.2} \right) * \left(\frac{\text{scheepsBreedte} - 1.5}{2.45} \right)$$

NB: containerLagen beschrijft het minimaal aantal benodigde lagen om de containers mee te voeren.

$$\text{scheepsHoogte} = \text{containerLagen} * 2.59 - \text{scheepsDiepgang}$$

NB: Als er minder dan twee lagen containers zijn wordt er 2 meter opgeteld bij de scheepshoogte. Bij de meeste schepen zullen de containers dan in het ruim staan en is de hoogte van het schip boven de waterlijn bepalend.

De uitgerekende scheepshoogte zal op een aantal punten niet overeenkomen met de werkelijkheid.

- Niet elke container is 2.59 meter hoog, er zijn vrij veel zogenaamde High Cube containers in omloop die de benodigde doorvaarthoogte zullen vergroten;
- Niet elke laag wordt perfect gevuld voor de volgende laag wordt opgevuld, hierdoor wordt waarschijnlijk met name bij de overgang van de ene naar de andere laag een onderschatting gemaakt van de scheepshoogte;
- De dikte van de bodem van het schip is nu niet meegenomen in de benodigde doorvaarthoogte, hierdoor wordt de scheepshoogte onderschat.

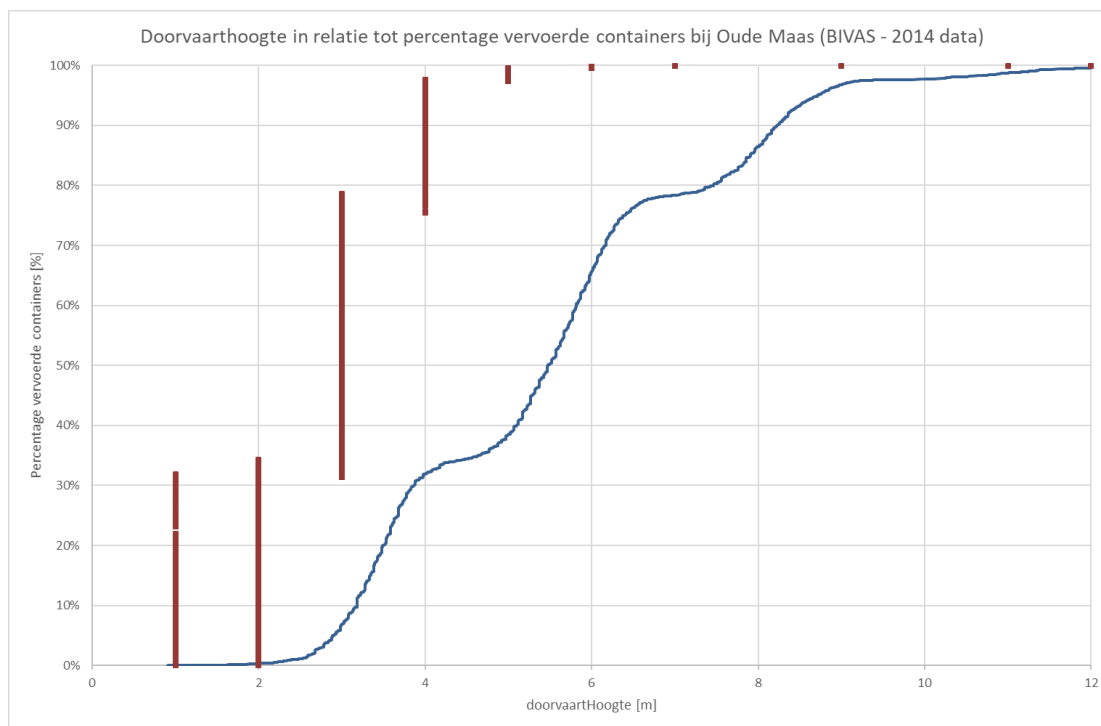
Al met al wordt naar alle waarschijnlijkheid de scheepshoogte onderschat. Dit geeft ook aan dat de resultaten weliswaar worden gepresenteerd als een enkele waarde maar moeten worden beschouwd met een onzekerheidsbandbreedte.

F.3.2.1. Percentiefiguren doorvaarthoogte

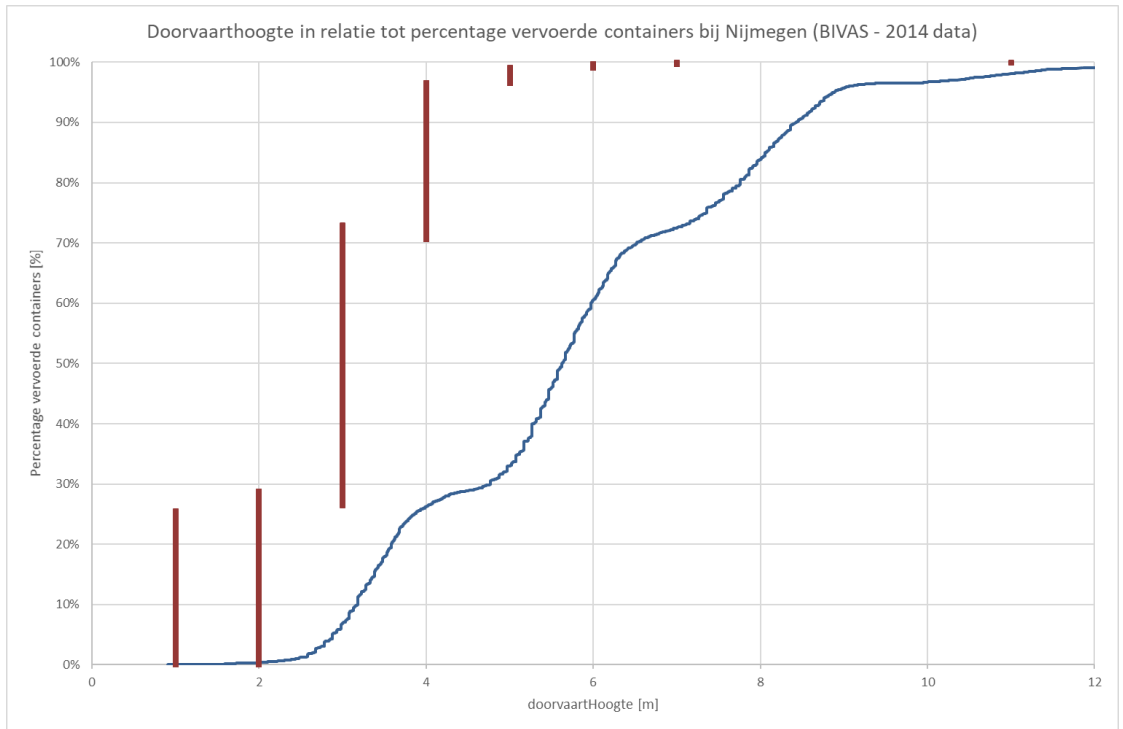
In Figuur F.4 tot en met Figuur F.9 zijn de percentie figuren weergegeven voor de riviertakken. Hier zijn verschillende indicatieve waarden uit te kiezen. In Tabel F.1 is de totale hoeveelheid vervoerde containers en benodigde doorvaarthoogte voor alle 3- en 4-laagscontainervaart weergegeven. Als laatste is de benodigde doorvaarthoogte om 99% van alle containervaart te vervoeren aangegeven. De hoogste percentages bevatten enkele outliers die door verkeerde scheepsdimensies in de BIVAS database niet nauwkeurig zijn. De 99% waarde is daardoor een stuk representatiever als getal voor het vervoeren van alle containervaart.

Tabel F.1 Indicatieve waarden voor verschillende riviertakken en totaal aantal vervoerde containers

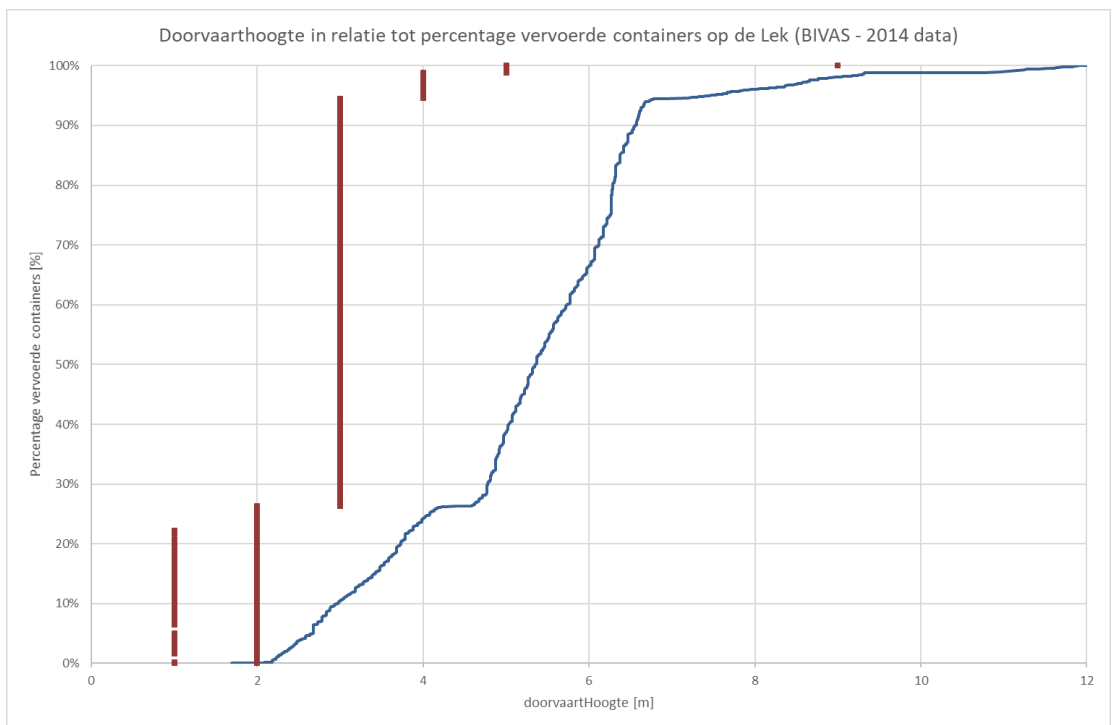
Riviertak	Totaal TEU	3lagen [m, %]	4lagen [m, %]	99% hoogte [m]
IJssel	68041	6.62, 99%	N/A	6.62
Lek	665988	6.90, 95%	9.32, 98%	11.05
Maas	281695	6.93, 91%	9.36, 98.8%	10.19
Nieuwe Maas	1480840	6.91, 88%	9.4, 97%	11.72
Oude Maas	1486018	6.99, 78%	9.47, 98%	11.25
Waal	2084260	6.92, 72%	9.47, 96.5%	11.85



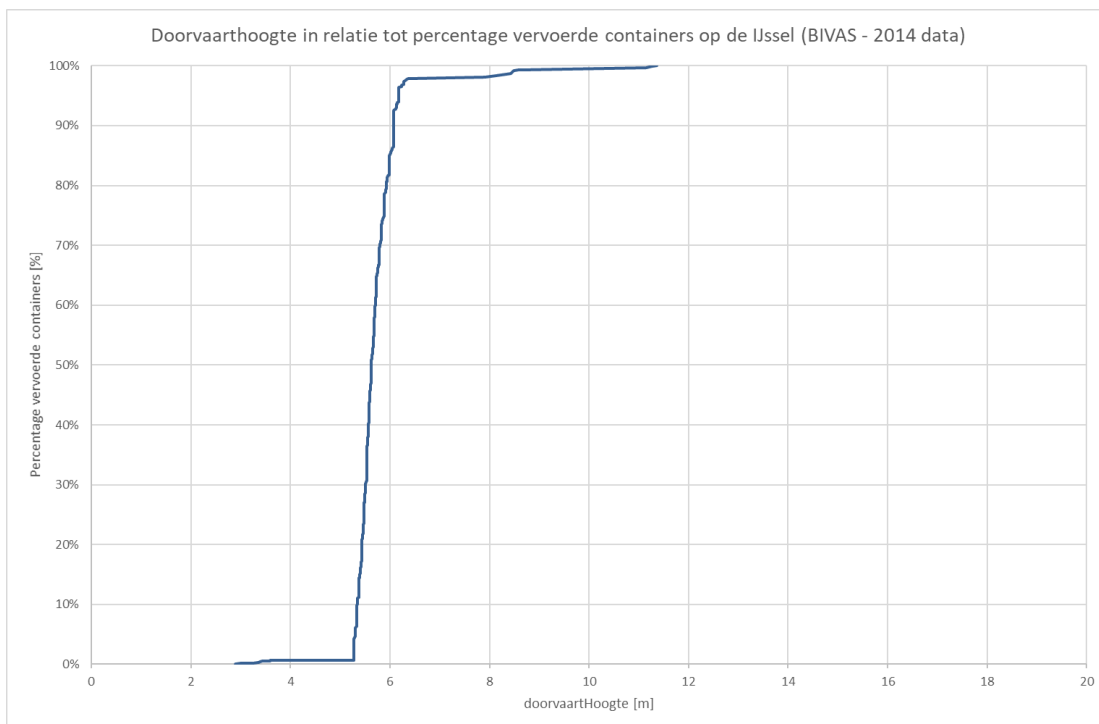
Figuur F.4 Percentiel doorvaarthoogte met vervoerde containers voor de Oude Maas met aantal lagen containers in rode vierkanten



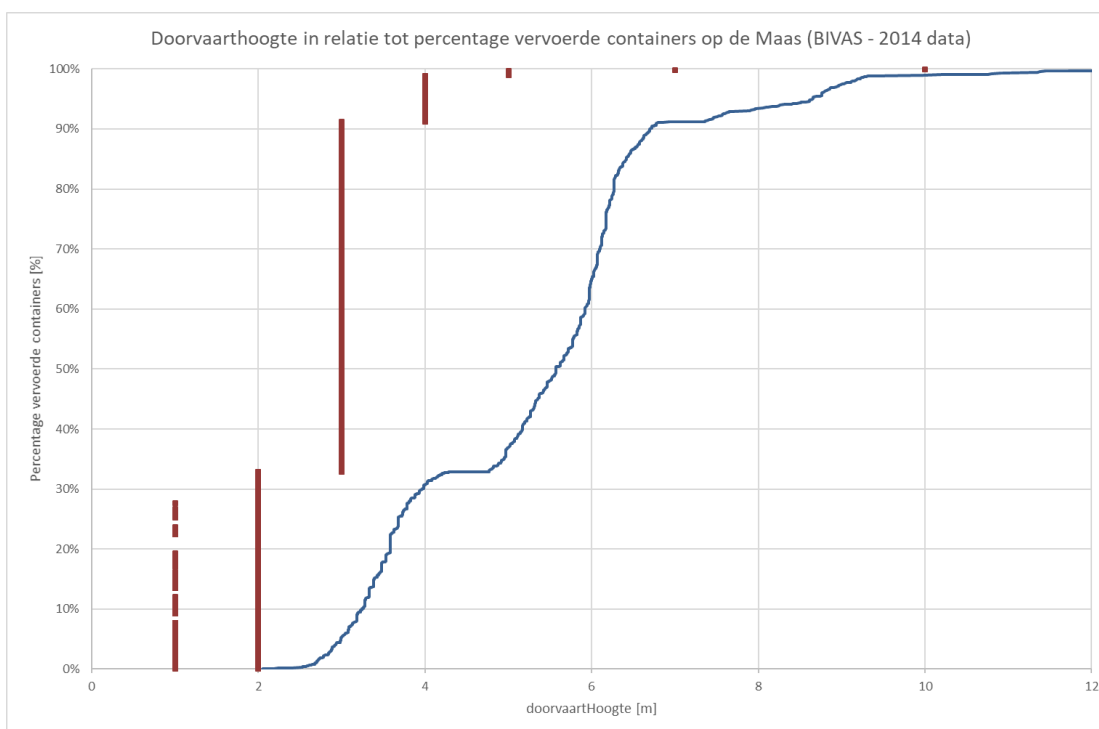
Figuur F.5 Percentiel doorvaarthoogte met vervoerde containers voor de Waal (Nijmegen) met aantal lagen containers in rode vierkanten



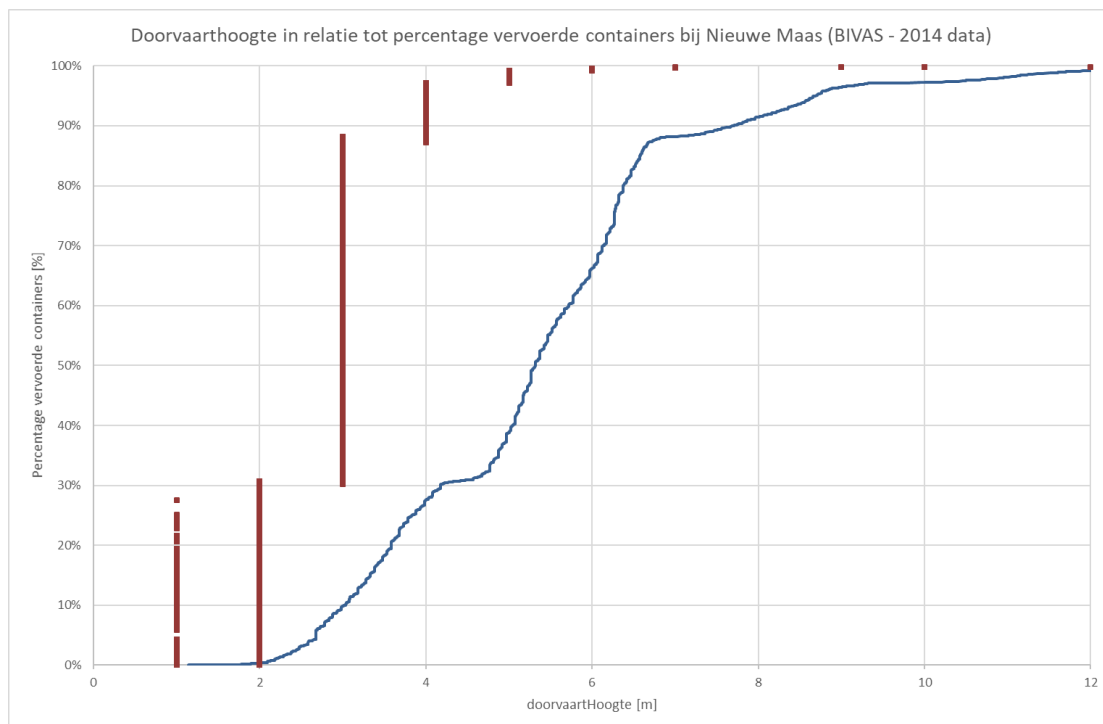
Figuur F.6 Percentiel doorvaarthoogte met vervoerde containers voor de Lek met aantal lagen containers in rode vierkanten



Figuur F.7 Percentiel doorvaarthoogte met vervoerde containers voor de IJssel



Figuur F.8 Percentiel doorvaarthoogte met vervoerde containers voor de Maas (stroomopwaarts van Maas-Waalkanaal) met aantal lagen containers in rode vierkanten



Figuur F.9 Percentiel doorvaarhoogte met vervoerde containers voor de Nieuwe Maas met aantal lagen containers in rode vierkanten

F.3.2.2. Indicatieve waarde afweging

Om een goed beeld te kunnen geven van de klimaatbestendigheid van het netwerk dient de beoogde capaciteit van het netwerk benoemd te worden. Ofwel, hoeveel containervaart moet er mogelijk zijn onder verschillende condities? Tot welke afvoer is een bepaalde doorvaarhoogte gegarandeerd?

Er zijn enkele manieren om naar dit probleem te kijken dit voor de in §3.1 genoemde bruggen hieronder worden uitgewerkt voor de grote rivieren. Er zijn drie verschillende waarden die gecombineerd worden om de indicatieve waarden te kiezen:

- Afvoer incl. herhalingstijd/overschrijdingsfrequentie;
- Doorvaarhoogte al dan niet gekoppeld aan x-aantal lagen containers;
- Percentage vervoerde containers.

De eerste aanpak is om te kijken naar een specifieke overschrijdingswaarde en dit te koppelen aan een percentage niet te vervoeren containers.

De andere methode is om een x-aantal lagen containers (meest aannemelijk om uit te gaan van 4) als drempelwaarde te nemen en hier de afvoer en herhalingstijd aan te koppelen onafhankelijk van het aantal vervoerde containers boven die drempelwaarde. Als laatste kan je uitgaan van een percentage te vervoeren containers en hier de bijbehorende doorvaarhoogte bij te kiezen.

In Tabel F.2 zijn de eerste en tweede methodiek uitgewerkt voor de bekende knelpunten op de riviertakken. In de eerste kolom is de doorvaarthoogte te vinden die hoort bij de afvoer die 20 dagen per jaar wordt overschreden. In de kolom daarnaast is het aantal containers te vinden die niet vervoerd kunnen worden als deze waarde wordt overschreden. In de 3^e kolom staat de herhalingstijd die hoort bij de afvoer om een bepaald aantal lagen containervaart te garanderen. Daarnaast staat het aantal containers wat boven die hoeveelheid wordt vervoerd. In beide gevallen gaat het om een relatief klein percentage containers wat niet vervoerd zou kunnen worden. Bij hogere waterstanden is het percentage containers wat wordt blootgesteld weliswaar hoger maar is de herhalingstijd ook significant hoger. De vraag is dus wat de meeste informatie geeft voor de klimaatbestendigheid van het netwerk. Een veelvoorkomende afvoer waarbij relatief weinig containers worden blootgesteld of een extreme afvoer waarbij een groot deel van de containers niet vervoerd kunnen worden.

Het voorstel is om de analyse verder uit te voeren met de volgende indicatieve waarden voor zowel de rivieren als de Rijn-Maasmonding:

- De doorvaarthoogte horend bij de afvoer die 20 dagen per jaar wordt overschreden in de referentie en toekomstige situatie;
- De doorvaarthoogte waarbij ten minste 3 of 4 lagen (afhankelijk van vaarwegklasse) containervaart is gegarandeerd.

Met deze twee waarden wordt gekeken naar beide kanten van het spectrum van het afvoerbereik. De meest extreme afvoeren hebben weliswaar een grotere impact op hoeveelheid containers die niet vervoerd kunnen worden, maar zijn beperkt te vertalen naar een concrete impact omdat de herhalingstijd zo hoog is. Verder is het waarschijnlijk dat bij deze afvoeren scheepvaart beperkt mogelijk is vanwege hoogwaterveiligheid of stremmingen elders op de Rijn.

Tabel F.2 Waarden voor twee uitgewerkte methodieken (20 dagen per jaar overschrijding en op basis van een minimum aantal lagen containers) voor de bekende knelpunten op 4 riviertakken (Deventer wegbrug, Prins Willem-Alexanderbrug, John Frostbrug, Ravensteinspoorbrug)

Tak	Doorvaarthoogte (20 dagen per jaar)	Containers blootgesteld	Herhalingstijd afvoer voor x-lagen containers	Percentage containers blootgesteld
IJssel	7.37	1429	3.8 - (3 laags)	680
Waal	12.24	680	21 - (4 laags)	2381
Nederrijn/Lek	12.04	0	11 - (4 laags)	1361
Maas	6.94	4559	2 - (3 laags)	6124

F.4 Samenvatting

Voor de bedreiging wordt er voor de Rijn-Maasmonding gebruik gemaakt van een zestal jaren uit de 100-jarige reeks op basis van de verschillen in afvoer bij Lobith. Het WH2050 klimaatscenario met 1 meter zeespiegelstijging wordt vergeleken met de referentie om het verschil in overschrijdingsduur te bepalen. Voor één jaar wordt ook gekeken naar het WH2085 scenario met 80 centimeter zeespiegelstijging om de invloed van een extremere afvoer met minder zeespiegelstijging te duiden. Daarnaast wordt met behulp van overschrijdingsfrequentiecurves het verschil in herhalingstijd voor verschillende indicatieve doorvaarthoogtes bepaald als gevolg van 1 meter zeespiegelstijging.

In de rivieren wordt de doorvaarthoogte bij elk van de bruggen gekoppeld aan een afvoer met behulp van waterstandsduurlijnen. Deze afvoeren hebben een herhalingstijd die veranderd in de klimaatscenario's. Voor het verschil in herhalingstijd wordt gekeken naar het WH2085 scenario.

Er wordt gewerkt met twee verschillende indicatieve waarden voor zowel de rivieren als Rijn-Maasmonding.

- De doorvaarthoogte horend bij de afvoer of waterstand die 20 dagen per jaar wordt overschreden in de referentie en toekomstige situatie;
- De doorvaarthoogte waarbij ten minste 3 of 4 lagen (afhankelijk van vaarwegklasse) containervaart is gegarandeerd.

Met deze twee waarden wordt er zowel gekeken naar veelvoorkomende condities waarbij slechts een beperkte hoeveelheid containers niet vervoerd kan worden als naar meer extreme condities waarbij een grotere hoeveelheid transport wordt bedreigd.

G Bruggen Rijn-Maasmonding

Bij de beweegbare bruggen betekent een 1 dat de brug beweegbaar is, en dat voor de bepaling van de hoogte uitgegaan is van de hoogte in geopende conditie. Een 2 betekent dat de brug beweegbaar is, maar dat bij de hoogte is uitgegaan van de gesloten conditie.

ID *	Naam	Riviertak	RD_X	RD_Y	Hoogte (m + NAP)	Beweegbaar
1	Suurhoffbrug	Hartelkanaal	66945.77	439513.3	11,5	0
2	Dintelhavenspoorbrug	Hartelkanaal	69340.03	439332.7	15,5	0
3	Dintelhavenbrug	Hartelkanaal	69300.38	439377.8	12,5	0
4	Harmenbrug	Hartelkanaal	74065.74	435461.3	11,45	1
5	Calandbrug	Calandkanaal	75117.87	435359.2	11,72	1
6	Rozenburgsesluisbrug	Calandkanaal	75261.05	434525.7	3,6	1
7	Rozenburgsesluisbrug	Calandkanaal	75277.46	434211.1	3,6	1
8	Hartelbrug	Hartelkanaal	80631.26	431323.5	12	2
17	Spoorbrug Dordrecht	Oude Maas	104204.3	424997	11,4	1
18	Zwijndrechtse brug	Oude Maas	104157.7	424969.6	11,55	1
9	Botlekbrug	Oude Maas	82310.82	431987	8	1
10	Spijkenissebrug	Oude Maas	82896.5	430625.6	12,5	1
11	Erasmusbrug	Nieuwe Maas	92956.37	436032.6	12,5	2
12	Willemsbrug	Nieuwe Maas	93678.44	436856.2	12,3	0
13	Hefbrug Rotterdam	Koningshaven	93814.87	436383.1	45,8	2
14	Koninginnebrug	Koningshaven	93940.66	436506.9	3,7	1
15	Van Brienoordbrug	Nieuwe Maas	96894.03	435385.2	22,5	2
16	Ablasterdamsebrug	Noord	104481.7	429990.4	12,94	2
21	Moerdijkbrug spoorbrug	Hollands Diep	103134.4	414546.8	10,17	0
22	Moerdijkbrug A16	Hollands Diep	103648.9	414693	10,92	0
82	Haringvlietbrug	Haringvliet	86705.38	414274.8	12,02	0
83	Haringvlietbrug	Haringvliet	87011	415001	12	2
19	Merwedebrug N3	Beneden Merwede	108026.3	426312.8	13,4	2
20	Baanhoekspoorbrug	Beneden Merwede	110488	426137.5	13,06	2
23	Merwedebrug A27	Boven Merwede	124330.3	426578.8	13,5	2
24	Dr. Ir. W. Hupkes spoorbrug	Waal	146235.1	425539.3	17,42	0
25	Martinus Nijhoffbrug	Waal	146338.3	425540.4	17,5	0
84	Keizersveer	Bergsche Maas	120680.8	414650.9	9,9	0
85	Heusden	Bergsche Maas	136427	416379	10,3	0
86	Hedel	Maas	146800.6	416784.9	12	0
87	Spoorbrug Hedel	Maas	147192.7	416834.7	11,5	0
88	Empel	Maas	149276	416676	13,2	0
91	Jan Blankenbrug	Lek	133714.9	445493.4	17,2	0
92	Hagesteinsebrug	Lek	136275.5	445940.8	15,8	0
93	Lekbrug Vianen	Lek	134007.3	445624.9	15,5	0
89	Algerabrug	Hollandsche IJssel	99423	436798	8,5	2
90	Gouderakse Brug	Hollandsche IJssel	107436	445611.2	5,2	1

H Bruggen Grote Rivieren

Bij alle beweegbare bruggen geldt dat de gegeven hoogte, de hoogte in geopende toestand is.

Naam	Riviertak	Rkm	Hoogte (m + NAP)	Beweegbaar
Waalbrug Nijmegen	Bovenrijn-Waal	882	24,7	0
Spoorbrug Nijmegen	Bovenrijn-Waal	883	22,8	0
Oversteek Nijmegen	Bovenrijn-Waal	884	23,9	0
Tacitusbrug, brug in de A50 bij Ewijk	Bovenrijn-Waal	892	23,3	0
Prins Willem-Alexanderbrug, Beneden-Leeuwen	Bovenrijn-Waal	909	19,6	0
Dr. Ir. W. Hupkes spoorbrug, Zaltbommel	Bovenrijn-Waal	932	17,4	0
Martinus Nijhoffbrug, brug in de A2 bij Zaltbommel	Bovenrijn-Waal	932	17,6	0
Westervoort wegbrug	IJssel	880	20,06	0
Westervoort spoorbrug	IJssel	880	20,06	0
A-12-brug Westervoort	IJssel	882	20,22	0
Doesburg	IJssel	897	17,3	0
Cortenoever	IJssel	902	17,9	0
Zutphen wegbrug	IJssel	915	15,7	1
Zutphen spoorbrug	IJssel	915	15,7	1
A1-brug Deventer	IJssel	934. 2	14,97	0
Deventer, wegbrug	IJssel	934. 2	13,42	0
Deventer, spoorbrug	IJssel	935. 3	13,5	0
Hanzeboog	IJssel	968. 5	13,04	0
Katerveer	IJssel	969. 3	10,66	0
A28-brug Zwolle	IJssel	969. 7	13,3	0
Molenbrug Kampen	IJssel	983	12,1	0
Stadsbrug Kampen	IJssel	985	12,2	1
Eilandbrug N50	IJssel	990	15,7	1
Andrej Sacharovbrug N325 (Pleijweg)	Pkan-NRijn-Lek	879. 9	23,49	0
John Frostbrug	Pkan-NRijn-Lek	882. 8	21,86	0
Nelson Mandelabrug N225 Arnhem	Pkan-NRijn-Lek	883. 8	22,27	0
Spoorbrug Oosterbeek	Pkan-NRijn-Lek	887. 7	21,16	0
Vizierboog Stuw Driel - Geheven	Pkan-NRijn-Lek	891. 5	20,65	0
Verkeersbrug Heteren A50 Nederrijn	Pkan-NRijn-Lek	894. 3	20,55	0
Verkeersbrug Rhenen provinciale weg N233 Nederrijn	Pkan-NRijn-Lek	909. 1	20,13	0
Vizierboog Stuw Amerongen - Geheven	Pkan-NRijn-Lek	922	17,4	0

Naam	Riviertak	Rkm	Hoogte (m + NAP)	Beweegbaar
Spoorbrug Culemborg over de Lek	Pkan-NRijn-Lek	939,8	15,99	0
Vizierboog Stuw Hagesteijn - Geheven	Pkan-NRijn-Lek	946,8	14,9	0
Hagesteinsebrug A27 over de Lek Nieuwegein	Pkan-NRijn-Lek	951,6	15,82	0
Jan Blanckenbrug 1,2 en 3 Bruggen over de Lek Vianen	Pkan-NRijn-Lek	954,3	14,89	0
Kennedybrug, Maastricht	Maas	12	54,68	0
Hoegh Brogk (Hoge brug), Maastricht	Maas	13	54,48	0
St. Servaasbrug	Maas	13	50,45	1
Wilhelminabrug, Maastricht	Maas	13	52,31	0
spoorbrug, Maastricht	Maas	14	51,03	1
Noorderbrug, Maastricht	Maas	14	53,1	0
Doorvaartopening Keersluis Limmel	Maas	15	51,7	0
Wessem (A2)	Maas	67	30,67	0
Maasbracht, benedenhoofd sluis	Maas	67	30,62	0
Linne, benedenhoofd sluis	Maas	74	26,9	0
Louis Raemaekersbrug	Maas	79	25,53	0
Heel, benedenhoofd sluis	Maas	85	24,9	0
Hornerbrug	Maas	85	25,84	0
Spoorbrug Leeuwen	Maas	85	24,85	0
Spoorbrug Buggenum	Maas	85	24,8	0
Zuiderbrug, Venlo	Maas	106	25,01	0
Spoorbrug, Venlo	Maas	108	22,66	0
Stadsbrug, Venlo	Maas	108	22,59	0
Noorderbrug, Venlo (in A67)	Maas	111	23,62	0
Koninginnebrug, Well	Maas	132	22,58	0
Boxmeer, brug in de A-77	Maas	151	19,9	0
Gennep, brug in N264	Maas	155	18,9	0
Mook, spoorbrug	Maas	165	17,99	0
Heumen, brug in de A-73	Maas	168	17,88	0
John S. Thompson-brug	Maas	176	14,7	0
Ravenstein, brug in de A-50	Maas	182	15,85	0
Ravenstein, spoorbrug	Maas	183	13,87	0
Lith	Maas	194	13,5	0

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