Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

RWS INFORMATIE

Klimaatbestendige Netwerken: Stresstest Hoofdvaarwegennet - Deelrapport Hoogwater (doorvaarthoogte)

Risico's van klimaateffecten voor de scheepvaart

Datum	25 mei 2022
Status	definitief

Colofon

Uitgegeven door	Rijkswaterstaat - Water, Verkeer & Leefomgeving
Informatie	Informatiepunt WVL
Telefoon	088-7977102
Email	informatiepuntwvl@rws.nl
Datum	25 mei 2022
Status	definitief
Versienummer	1.1

Positionering deelrapport Hoogwater binnen proces Klimaatbestendige Netwerken RWS

Met het programma Klimaatbestendige Netwerken geeft RWS uitvoering aan de afspraken die gemaakt zijn in het kader van het Deltaprogramma Ruimtelijk Adaptatie. Via stresstesten (ambitie 1) en het voeren van risicodialogen (ambitie 2) wordt toegewerkt naar een uitvoeringsagenda met maatregelen voor realisatie van klimaatbestendige RWS-netwerken (ambitie 3).

Voorliggend document maakt deel uit van de stresstest Hoogwater voor het hoofdvaarwegennet en richt zich op de doorvaarthoogte van bruggen. De stresstesten per thema - droogte, hitte, hoogwater, extreem weer en indirecte bedreigingen - zijn telkens het startpunt voor de interne risicodialogen die RWS regionaal voert, alvorens externe risicodialogen te voeren. Het werkdocument dient als basis, maar is geen definitief document: op basis van de interne risicodialogen vindt validatie en aanscherpingen plaats. Dit leidt tot een scherper beeld met kwetsbaarheden per thema en/of regio. Hiermee kan RWS vervolgens de externe risicodialogen voeren en invulling geven aan de nog op te stellen uitvoeringsagenda met benodigde maatregelen voor het realiseren van een klimaatbestendig hoofdvaarwegennet.

Inhoud

Samenvatting 7
Inleiding 10

1 Aanpak 13
1.1 Klimaatrisico-analyse 13
1.2 Procesaanpak 15
1.3 Scope 18
1.3.1 Tijdshorizon 18
1.3.2 Geografische afbakening 18
1.3.3 Sectoren 18
1.4 Scenario's 18
1.4.1 Scenario-analyse 18
1.4.2 Klimaatscenario's 19

2 Bedreigingen vanuit klimaatverandering voor de scheepvaart 20
2.1 Introductie 20
2.2 Waterstanden en doorvaarthoogte 20
2.2.1 Waterstanden 20
2.2.1.1 Grote rivieren 20
2.2.1.2 Rijn-Maasmonding 21
2.2.2 Klimaatscenario 21
2.2.2.1 Zeespiegelstijging 21
2.2.2.2 Afvoeren 21

3 Blootstelling 22
3.1 Containervaart 22
3.1.1 Formele eisen en praktijk 22
3.2 Bruggen: doorvaarthoogte per vaarweg 24
3.3 Indicatieve waarden 25
3.4 Blootstelling op de Waal als gevolg van onvoldoende doorvaarthoogte 26

4 Kwetsbaarheden 28
4.1 Introductie: Overschrijdingsduur waterstanden 28
4.2 Grote rivieren 28
4.2.1 Afvoeren 28
4.3 Rijn-Maasmonding 30
4.3.1 Historische jaren 30
4.3.2 Waterstandsduurlijnen 31

5 Kwetsbaarheden in het HVWN 32
5.1 Introductie 32
5.2 Kwetsbaarheid HVWN 32
5.2.1 Grote rivieren 32
5.2.1.1 Waal 34
5.2.1.2 IJssel 35
5.2.1.3 Nederrijn-Lek 36
5.2.1.4 Maas 37
5.2.2 Rijn-Maasmonding 38
5.2.2.1 Knelpunten 38
5.2.2.2 Waterstandsduurlijnen en beschikbaarheid van doorvaarthoogtes 40
5.3 Gevolgen van afname van de doorvaarthoogte 43

5.3.1 Impact 43
5.3.2 Reacties 44
5.3.2.1 Niet of later varen 44
5.3.2.2 Omvaren 45
5.3.2.3 Brug open 45
5.3.2.4 Meer schepen 46
5.3.2.5 Andere vervoersmodaliteiten 46
5.3.3 Mogelijke maatregelen 46
5.3.3.1 Aanpassen infrastructuur 47
5.3.3.2 Aanpassen waterpeil 47
5.3.3.3 Ballasten van containerschepen 47
5.3.3.4 Informatievoorziening 47
5.4 Effecten op de nautische veiligheid 48

6 Conclusies en aanbevelingen 51
6.1 Conclusie 51
6.2 Aanbevelingen voor vervolgstappen 52

7 Literatuur 53

Bijlages - Achtergrondinformatie 54

Samenvatting

Doel van de stresstest HVWN

Deze stresstest Hoogwater is gericht op het in beeld brengen van de mogelijke kwetsbaarheden en potentiele impact van zeespiegelstijging en hoge rivierafvoeren op het hoofdvaarwegennet (HVWN).

Bedreigingen door klimaatverandering

De bedreigingen die binnen de stresstest worden meegenomen, zijn *hoge rivierafvoeren* en *zeespiegelstijging*. Hoe hoger het water in de rivieren en de rivierdelta komt te staan, hoe kleiner de zgn. *doorvaarthoogte* van bruggen. Vooral containerschepen ondervinden hiervan hinder en moeten soms - bij zeer hoog water - een laag containers minder meenemen. Dit leidt tot hogere vervoerskosten voor de logistieke sector.
Door klimaatverandering komen hoge rivierafvoeren vaker voor. Zeespiegelstijging leidt tot hogere (spring)vloed. Deze effecten kunnen gelijktijdig optreden en elkaar versterken.

Kwetsbaarheden van blootgestelde elementen

De impact van de bedreigingen op de doorvaarthoogte van bruggen en complexen op de Waal, de Maas en in de Rijn-Maasmonding is onderzocht. Er is gekeken naar de doorvaarthoogtes die nodig zijn voor 3- en 4- laags containervaart, zowel voor *standaardcontainers* als voor extra hoge *high cube-containers*. Dat zijn de zogenaamde *indicatieve waarden*:

Indicatieve waarden doorvaarthoogte containervaart

Aantal lagen	Doorvaarthoogte in m	
	Standaard	High cube
3	7,00	8,65
4	9,10	11,35

Op een vaarroute of corridor is de laagste brug bepalend voor de beschikbare doorvaarthoogte voor het gehele traject. Een lage brug kan dus een bottleneck voor de gehele corridor vormen. In de kaart hieronder is per brug het aantal dagen weergegeven, dat de doorvaarthoogte niet beschikbaar is, uitgaande van de indicatieve waarde voor standaardcontainers.

De volgende bruggen vormen op een knelpunt op een riviertak of corridor:

Riviertak/corridor	Knelpunt
Waal	Prins Willem-Alexanderbrug
IJssel	Deventer, wegbrug (stadsbrug)
Maas: Maasroute	Stadsburg Venlo
Maas: Oost-westcorridor	Spoorbrug Ravenstein
Nederrijn-Lek	Spoorbrug Oosterbeek
Rijn-Maasmonding	Moerdijkbrug Keizersveerbrug, Brug Heusden Merwedebrug

Figuur 1: mogelijke bottlenecks doorvaarthoogte

Risico's voor de scheepvaart

Voor de riviertakken Waal, Lek, Maas en IJssel is berekend, wat de knelpunten betekenen qua vracht die niet kan worden meegenomen.
De *uitval* van vracht varieert voor de Waal van ruim 1.800 TEU in een jaar met hoogwater (T_{10}) bij het huidige klimaat, tot bijna 2.900 in 2085 bij de sterkste klimaatverandering. In extreme jaren met zeer hoog water kan dit oplopen tot bijna 5.500 TEU per jaar. Op de Maas neemt de uitval toe van ca. 1.000 TEU nu tot ca. maximaal 1.850 (T_{100}) bij scenario $W_{H,dry}$ 2085. Daarmee is de uitval op de Maas procentueel iets groter, omdat de Maas ca. 280.000 TEU per jaar vervoert, tegen ruim 2 miljoen TEU voor de Waalcorridor. Op de Lek is alleen in extreme gevallen in 2085 sprake van uitval. Voor de IJssel en Maas - met ontwerphoogte 7,0 m - moet worden bedacht, dat qua waterhoogte de maxima al snel worden bereikt, en dat nóg extremere jaren alleen nog verschil laten zien in het aantal dagen dat de doorvaarthoogte niet beschikbaar is. Het effect van nóg hogere afvoeren is daarom gering. Voor de Waal en Lek geldt dit niet; de bruggen liggen daar relatief zo hoog, zodat extreem hoogwater daar effect blijft sorteren.
Afgezet tegen het totale vervoer is de uitval op de riviertakken in de ordegrootte van 1% en dus relatief klein.

Tabel 1: Verlies aan niet vervoerde containers per riviertak per jaar door onvoldoende doorvaarthoogte in het huidige klimaat en bij snelle klimaatverandering in 2085, uitgaande van een gelijk aantal schepen dat wordt ingezet.

			Verlies in containers per jaar door onvoldoende doorvaarthoogte					
	Huidig vervoer		Huidig klimaat/ref			Toekomstig $W_{H,dry}$, 2085		
Riviertak	TEU/jaar	TEU/dag	T 10	T 50	T 100	T 10	T 50	T 100
Waal	2.084.260	5.706	1.857	2.742	3.119	2.873	4.896	5.472
Lek	665.988	1.823	0	0	0	0	147	160
Maas	281.695	771	949	1.480	1.598	1.232	1.835	1.856
IJssel	68.041	186	278	382	≥ 430	301	394	≥ 430

Eerste inventarisatie maatregelen

Het aantal maatregelen om de geïnventariseerde risico's te mitigeren, is beperkt. Bestaande bruggen ophogen is - vooral bij spoorbruggen - zeer kostbaar en vanuit economisch oogpunt niet efficiënt. Dit is gebleken uit een eerdere MKBA-studie naar mogelijke aanpak van 'kansrijke corridors'. Wel is een nieuwe norm vastgesteld voor nieuw te bouwen bruggen. Ook bij vervanging moet een 'hogere variant' worden onderzocht. De scheepvaartsector zelf heeft de optie om in tijden van zeer hoog water de schepen te ballasten teneinde de eigen (kruip)hoogte te verminderen en dus alsnog meer (lagen) containers mee te kunnen nemen.

Inleiding

Aanleiding

Het klimaat verandert en de gevolgen daarvan worden steeds duidelijker merkbaar. De actualiteit onderstreept dat: de zeer hoge rivierafvoeren begin 2018, gevolgd door hevige droogte tot laat in het jaar, ongekende temperatuurrecords in de zomer van 2019, opnieuw forse droogte en extreme hitte in 2020 en hoogwater aan het begin van 2021. Ze laten telkens nieuwe verrassingen zien in snelheid en extremiteit. Om de gevolgen van klimaatverandering 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 dus 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 het plannen van adaptatiemaatregelen (zie figuur 2). Dit moet leiden tot een uitvoerings- en investeringsagenda.

Dit deelrapport omtrent droogte maakt onderdeel uit van de rapportage gericht op de eerste ambitie binnen DPRA: *kwetsbaarheden in beeld brengen*. Om de kwetsbaarheden door de gevolgen van klimaatverandering in beeld te krijgen, dienen alle overheden een stresstest uit te voeren voor de vier klimaatthema's: droogte, wateroverlast, hitte en overstroming. Dit document presenteert de resultaten van de stresstest voor het HVWN, thema hoogwater (wateroverlast).

Uit deze stresstest volgt ruimtelijk inzicht in kwetsbaarheden en de doorvertaling naar risico's voor de scheepvaart, nog zonder waardeoordeel. Of deze kwetsbaarheden en risico's daadwerkelijk een probleem vormen en maatregelen vergen, wordt tijdens de interne en externe risicodialogen besproken[1].

[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.

Figuur 2: Zeven ambities binnen het Deltaplan Ruimtelijke Adaptatie (2018).

Doel van de stresstest

Het doel van de stresstest voor het HVWN is tweedelig:

Doelstelling 1: *Het in beeld brengen van de kwetsbaarheden van het HVWN in relatie tot de belangrijkste bedreigingen vanuit klimaatverandering en de doorvertaling naar risico's voor de scheepvaart.*

Doelstelling 2: *Een gedeeld beeld van de stresstestresultaten creëren ter voorbereiding op de interne en externe risicodialogen[2].*

Hiervoor dienen eerst de volgende hoofdonderzoeksvragen te worden beantwoord:

- Welke bedreigingen vanuit klimaatverandering zouden negatieve effecten kunnen hebben op de scheepvaart?
- Hoe vaak en hoe lang wordt het HVWN blootgesteld aan de negatieve effecten van klimaatverandering?
- Waar in het HVWN worden deze negatieve effecten verwacht?
- Welke elementen binnen het HVWN worden blootgesteld aan de negatieve effecten van klimaatverandering?
- Hoe kwetsbaar (fysiek en economisch) zijn de blootgestelde elementen voor de negatieve effecten van klimaatverandering?
- Wat zijn de verwachte risico's voor de scheepvaart?
- Welke maatregelen kunnen worden genomen om deze risico's te beperken?

[2] De interne risico dialogen worden uitgevoerd tussen IenW en RWS. De externe risicodialogen zijn met gebiedspartners (regionale overheden en andere net(werk)beheerders) binnen de werkregio's DPRA of op een ander passend niveau.

Leeswijzer

Hoofdstuk 1 bevat een beknopte beschrijving van de gebruikte aanpak binnen dit project.

De belangrijkste bedreigingen vanuit klimaatverandering die invloed zouden kunnen uitoefenen op de scheepvaart worden in hoofdstuk 2 beschreven. In hoofdstuk 3 worden de elementen binnen het HVWN geïdentificeerd, die nu en in de toekomst worden blootgesteld aan de negatieve effecten van klimaatverandering. De mate van kwetsbaarheid (fysieke en economische schade) van deze blootgestelde elementen wordt in hoofdstuk 4 gepresenteerd.

Hoofdstuk 5 brengt de resultaten van bovengenoemde aspecten bij elkaar een geeft een overzicht van de verwachte risico's van klimaateffecten voor de scheepvaart, alsmede een eerste inventarisatie van mogelijke preventieve, gevolg-beperkende en/of herstelmaatregelen om de negatieve effecten van klimaatverandering voor de scheepvaart tegen te gaan.

De samenvattende conclusies en aanbevelingen voor vervolgstappen worden in hoofdstuk 6 gegeven.

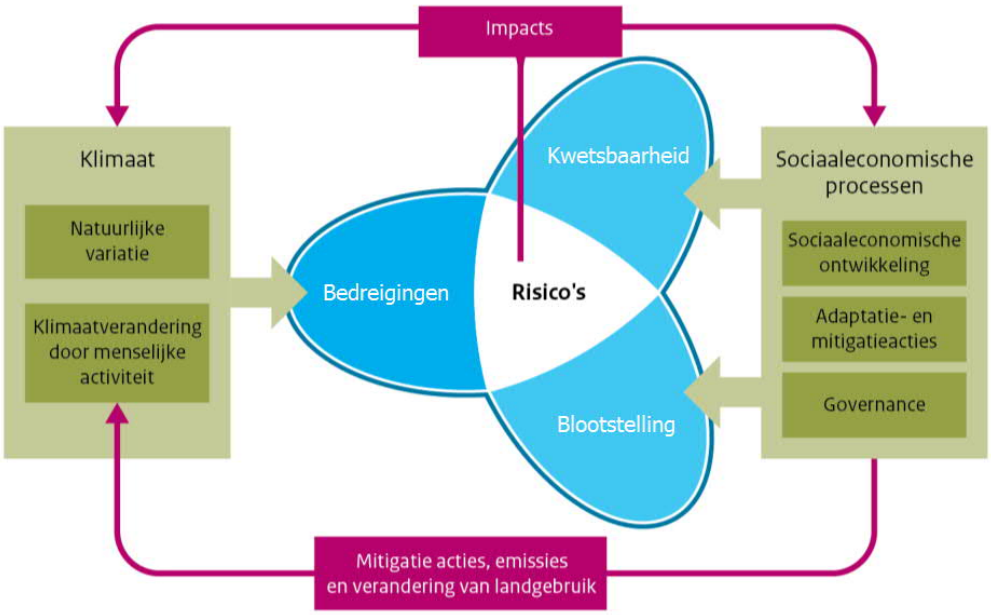
1 Aanpak

1.1 Klimaatrisico-analyse

Klimaatgerelateerde risico's

Het risico van klimaateffecten wordt bepaald door de combinatie van de kans op en de intensiteit van klimaatgerelateerde bedreigingen (bijv. hitte), de blootstelling hieraan (bijv. blootgestelde bruggen) en de kwetsbaarheid van de blootgestelde elementen voor de schadelijke gevolgen van klimaatverandering (bijv. stremmingen als gevolg van een vastgelopen brug door uitgezette materialen). Een bedreiging wordt pas een risico wanneer een element wordt blootgesteld aan de bedreiging *en* deze kwetsbaar is als het hieraan wordt blootgesteld. Zo kan een bedreiging als hoog water wel optreden en schepen er aan blootstellen, maar als deze er niet kwetsbaar voor zijn, bijv. omdat er geen scheepvaartbeperkingen zijn bij hoog water, dan is er geen sprake van een concreet risico. Anders is het voor de dijken, die ook blootgesteld worden aan hoog water, en er wél kwetsbaar voor zijn. De drie begrippen bedreiging, blootstelling en kwetsbaarheid moeten per klimaatthema goed worden onderzocht.

Figuur 3 presenteert een grafische weergave van deze interactie. Veranderingen in zowel het klimaatsysteem (links) als de sociaaleconomische processen en het gevoerde beleid (rechts) beïnvloeden de aard en omvang van de risico's[3].



Figuur 3: Factoren die van invloed zijn op klimaatgerelateerde risico's (conceptueel kader van IPCC WGII AR5). Bron: IPCC (2014)

[3] Bron: PBL (2015). Van risicobeoordeling naar adaptatiestrategie. Risicobeoordeling klimaateffecten bij rapport 'Aanpassen aan klimaatverandering' (achtergrondstudie).

Dit onderzoek gaat dus in op de drie aspecten - bedreigingen, blootstelling en kwetsbaarheden - die de risico's op klimaateffecten direct beïnvloeden. Elk aspect wordt uitvoerig behandeld in de komende hoofdstukken. De interactie tussen deze drie aspecten wordt bij elkaar gebracht bij het onderdeel over risico's.

Verder wordt ook een eerste inventarisatie gemaakt van mogelijke klimaat<u>adaptieve</u> maatregelen om de risico's te minimaliseren (rechterkant van figuur 3). Dit onderzoek legt de focus dus niet op klimaat<u>mitigerende</u> acties, die juist gericht zijn op het verminderen van de intensiteit van klimaatgerelateerde bedreigingen (linkerkant van figuur 3). Dit onderzoek legt focus op adaptatie-acties, gericht op het aanpassen van het hoofdvaarwegennet op de verwachte effecten van klimaatverandering.

Terminologie in klimaatrisicomanagement

Er bestaan verschillende definities voor risico. In dit document wordt niet ingegaan op dé juiste benadering en terminologie, maar wordt aangegeven welke benadering en terminologie in deze stresstest is gebruikt.
De definities van de belangrijkste termen worden hierna in 'Box 1' gepresenteerd.

Box 1: Terminologie klimaatrisicomanagement (IPCC WGII, AR5)

Bedreiging: mogelijk optreden van klimaatgerelateerde fysieke gebeurtenissen of (langzaam evoluerende) trends of hun directe fysieke effecten (bijv. overstromingen) die kunnen leiden tot verlies van levens, letsel of andere gezondheidseffecten, evenals schade en verlies aan eigendommen, infrastructuur, bestaansmiddelen, dienstverlening, ecosystemen en natuurlijke hulpbronnen.

Blootstelling: aanwezigheid van mensen, bestaansmiddelen, soorten of ecosystemen, milieufuncties, diensten, hulpbronnen, infrastructuur, of economische, sociale of culturele middelen op plaatsen en omgevingen die nadelig kunnen worden beïnvloed.

Kwetsbaarheid: geneigdheid of predispositie om negatief te worden beïnvloed (schade oplopen). Kwetsbaarheid heeft twee relevante elementen: gevoeligheid of vatbaarheid voor schade (bijv. door de fysieke eigenschappen van de infrastructuur) en onvoldoende capaciteit om ermee om te gaan en zich aan te passen (bijv. onvoldoende voorbereid zijn of niet snel kunnen reageren op potentiele schade).

Risico's van klimaatveranderingseffecten: potentiële gevolgen waar iets van waarde (bijv. middelen, mensen, ecosysteem, etc.) op het spel staat en waar de uitkomst onzeker is. Risico is het product van de waarschijnlijkheid op klimaatgerelateerde bedreigingen, de blootstelling hieraan en de kwetsbaarheid voor schadelijke gevolgen.

Bron: IPCC (2014)

1.2 Procesaanpak

Algemene aanpak

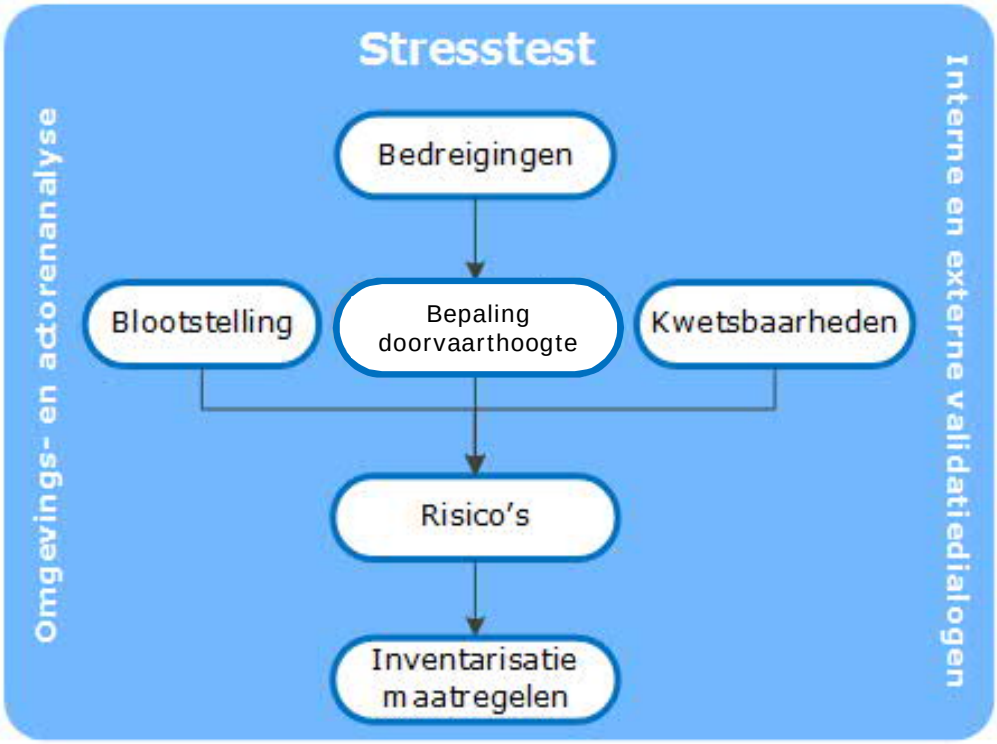
Voor het uitvoeren van de klimaatrisico-analyse, zijn meerdere stappen doorlopen. Deze stappen zijn onderstaand uiteen gezet in een zogenaamde Road Map. Eerst wordt echter stilgestaan bij een noodzakelijke tussenstap in de beoordeling van bedreiging, blootstelling en kwetsbaarheid, namelijk de 'bepaling van de doorvaarthoogte'. Bij de belangrijkste klimaatbedreigingen wordt de scheepvaart namelijk niet zichtbaar direct blootgesteld. Door inzichtelijk te maken, hoe veranderingen de toestand van het vaarwegennet in relatie tot doorvaarhoogte verandert, kunnen vervolgens de negatieve effecten in beeld gebracht worden voor de bevaarbaarheid van het netwerk.

Voor de bedreiging 'hoogwater' is deze samenhang als volgt: voor de schepen zelf gaat er van hoogwater geen directe bedreiging uit, maar hoge rivierafvoeren en zeespiegelstijging zorgen ervoor dat de ruimte tussen de waterspiegel en de onderzijde van bruggen kleiner wordt. Deze *doorvaarthoogte* - nader toegelicht in hoofdstuk 2 - is voor sommige deelsectoren van het vervoer over water bepalend voor de hoeveelheid vracht die per reis kan worden vervoerd. Zodoende kan hoogwater leiden tot het minder meenemen van vracht en de daaruit voortvloeiende effecten. Daarnaast veroorzaakt hoogwater ook hinder, zoals verandering van stromingspatronen en hoge stroomsnelheden, het minder zichtbaar worden of zelfs onder water verdwijnen van vaarwegmarkering en het niet meer bruikbaar worden van landverbindingen (loopbruggen). Dit zijn vervelende effecten, maar leiden niet direct tot economische schade. Daarom concentreert deze stresstest zich - voor nu - uitsluitend op de doorvaarthoogte.

Begrip Hoogwater: daar waar in dit rapport wordt gesproken over 'hoogwater', wordt bedoeld: het cumulatieve effect van hoge rivierafvoeren en - waar relevant - zeespiegelstijging, samen leidend tot extra hoge waterstanden ten opzichte van het huidige klimaat.

De inschatting van de blootstelling en de kwetsbaarheid van het hoofdvaarwegennet kan alleen in samenhang met de veranderingen doorvaarthoogte - beïnvloed door hoge rivierafvoeren en zeespiegelstijging - worden beoordeeld. Daarom is in de aanpak de bepaling en verandering van de doorvaarthoogte opgenomen.

Met de invoeging van de toestand van de doorvaarthoogte ziet de totale aanpak er als volgt schematisch uit:



Figuur 4: Aanpak stresstest HVWN

Specifieke aanpak

Bij het bepalen van de bedreiging is de toenemende waterstand als gevolg van hogere rivierafvoeren en/of zeespiegelstijging op waterwegen onderzocht, inclusief een *frequentie* van het voorkomen van een bepaalde hoge waterstand. Daarna is de combinatie van waterstand en de fysieke brughoogte vertaald naar de doorvaarthoogte, inclusief een inschatting van de kans op voorkomen van die doorvaarthoogte, bij alle bruggen in het huidige en toekomstige klimaat.
De toenemende stromingssnelheden op de vaarweg zijn vooralsnog niet meegenomen in dit onderzoek. Dit zal worden opgepakt in een vervolgonderzoek.

Voor de blootstelling waren de volgende vragen relevant:
- wat is de locatie van vaste en beweegbare bruggen?
- welke routes zijn er beschikbaar voor de scheepsklassen in het hoofdvaarwegennet?
- wat is het belang van deze bruggen voor welke deelsectoren.

In deze stap is vrijwel uitsluitend gekeken naar de containervaart, omdat deze deelsector veel sterker dan alle andere deelsectoren afhankelijk is van de doorvaarthoogte. Weliswaar ondervindt - in theorie - ook de cruisevaart hinder van hoogwater, omdat de meeste passagiersschepen een verhoudingsgewijs hoge opbouw hebben, maar slechts zeer zelden valt het hoogwaterseizoen samen met het typische seizoen voor de cruisevaart.

Ook zijn sommige bijzondere transporten van bijv. grote machines of constructies afhankelijk van voldoende doorvaarthoogte, maar deze sector is zeer klein ten opzichte van de containervaart. Daarom is besloten om dit onderzoek uit zwaartepuntsoverweging toe te spitsten op de containervaart.

Bij de bepaling van de kwetsbaarheid is per brug eerst gekeken, hoeveel dagen de beschikbare doorvaarthoogte niet voldoende was voor de indicatieve waarde voor 3- of 4-laags containervaart. Vervolgens is het grootste knelpunt op de corridor of het betreffende traject bepaald.
Er is voor de Waal een analyse uitgevoerd, hoeveel containers er mogelijk niet vervoerd kunnen worden als gevolg van te weinig doorvaarthoogte, in het huidige en toekomstige klimaat.

Tot slot zijn bij de bepaling van risico's de bedreiging, blootstelling en kwetsbaarheid gecombineerd door de voorgaande elementen samen te voegen en te wegen.

Dialogen

Juist vanwege het relatief nieuwe karakter van de stresstesten is er voor gekozen om op meerdere momenten in het onderzoek dialogen te organiseren met stakeholders en experts. Deze dialogen dienen enerzijds ter validatie en eventueel nuancering van de tussenresultaten en anderszins om de risico's te analyseren en te duiden.

<u>Validatiedialogen</u>
De validatiedialogen bestaan uit gesprekken met experts op het gebied van scheepvaart, rivierkunde, hydrologie en aanverwante specialismen. Deze dialogen zijn bedoeld om na te gaan, of de juiste onderzoeksmethode is gebruikt, of de aannames en berekeningen plausibel zijn en of de uitkomsten gedeeld worden. Ook wordt in deze dialogen een eerste inventarisatie van mogelijke maatregelen uitgevoerd. De validatiedialogen worden eerst intern gevoerd met deskundigen van Rijkswaterstaat en de Beleidskern van I&W, en vervolgens extern met belangenorganisaties, marktpartijen en/of andere overheden.

<u>Risicodialogen</u>
In de risicodialogen worden de uitkomsten van de stresstesten besproken met stakeholders, zowel de direct bij de vaarweg betrokken partijen zoals de gebruikers en de beheerders, maar ook met *omgevingspartijen* zoals gemeenten, provincies, waterschappen en maatschappelijke organisaties. Met deze partijen wordt de vertaalslag gemaakt van risico's naar mogelijke oplossingen en wordt geïnventariseerd, hoe klimaatbestendig handelen vanaf 2020 eruit zou moeten zien. Daarbij komen ook vragen aan bod als: "welke risico's willen of moeten we accepteren?" en "wie moet welke rol spelen in de aanpak van risico's?"

In bijlage A zijn lijsten opgenomen van de partijen betrokken bij de validatiedialogen en risicodialogen.

1.3 Scope

1.3.1 Tijdshorizon

Qua tijdshorizon wordt zo veel mogelijk aangesloten bij de KNMI-scenario's voor klimaatverandering, namelijk 2050 en 2085. In deze stresstest is gebruik gemaakt van het scenario in 2085 voor de rivieren, terwijl voor de zeespiegelstijging het scenario 2050 met 1 m zeespiegelstijging is toegepast. Dit laatste is representatief voor de situatie van 2085.

1.3.2 Geografische afbakening

De geografische afbakening verschilt per thema. De problematiek rond *hoogwater* concentreert zich op de grote rivieren (Rijntakken en Maas) en op de Rijn-Maasmonding. In de rivieren wordt de doorvaarthoogte beïnvloed door de rivierafvoeren en naarmate de afstand tot de zee kleiner wordt, steeds meer door zeespiegelstijging.

1.3.3 Sectoren

De problematiek van *hoogwater* en de afnemende doorvaarthoogte als gevolg van klimaatverandering richt zich in dit onderzoek op de containervaart. Elk schip heeft een zekere 'minimumhoogte' nodig om veilig onder bruggen door te kunnen varen, de *kruiphoogte*. Voor het overgrote deel van de vloot is deze kruiphoogte gering, tussen 2 en 7 meter[4], terwijl de doorvaarthoogte van veel bruggen méér dan 7 meter bedraagt. Voor containerschepen met drie lagen containers of meer is 7,0 meter echter onvoldoende om de brug veilig te passeren en zijn doorvaarthoogtes tot 11,35 meter noodzakelijk.

Figuur 5: Gevoeligheid containervaart voor doorvaarthoogte, spoorbrug Dordrecht. Links: containerschip met vier lagen containers (bron: bureau voorlichting binnenvaart), rechts: vrachtschip zonder containers (bron: vereniging De Binnenvaart)

1.4 Scenario's

1.4.1 Scenario-analyse

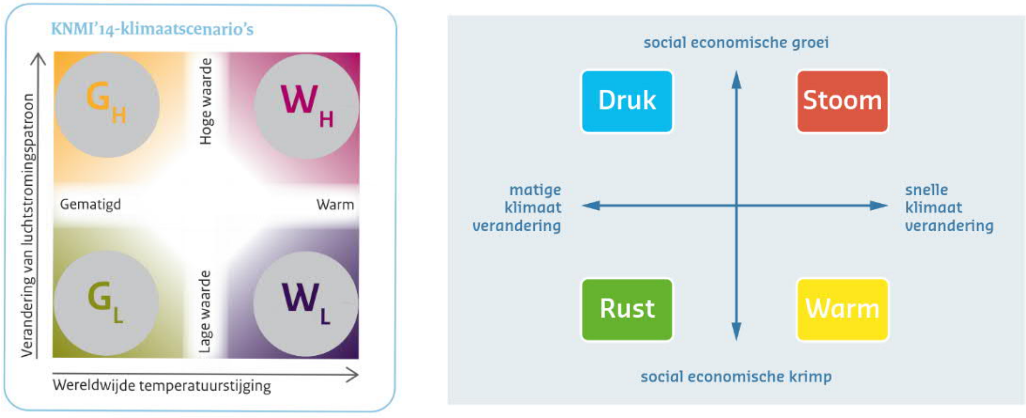
Om een beeld te krijgen van de effecten van de blootstelling van de containervaart aan de bedreigingen, is gewerkt met scenario-analyse. Zo'n analyse anticipeert op een onzekere toekomst en kan daarom niet exact de effecten voorspellen, maar kan wel een plausibele bandbreedte geven qua effecten. Het spreekt voor zich, dat hoe

[4] Bron: historische maatschepen-tabel, Vereniging de Binnenvaart, https://www.debinnenvaart.nl/binnenvaarttaal/index.php?lijst=maatschepen-1

groter het aantal variabelen is waarvoor scenario's moeten worden uitgewerkt, hoe groter de uiteindelijke bandbreedte wordt qua uitkomsten.
In dit onderzoek is gewerkt met de hieronder beschreven scenario's.

1.4.2 *Klimaatscenario's*

Voor klimaatverandering wordt gebruikt gemaakt van de klimaatscenario's KNMI 2014 (KNMI, 2015) die gebruikt worden binnen de Deltascenario's (Deltares, 2017). Voor een matige klimaatverandering is er het scenario met gematigde (G) temperatuurstijging en lage (L) veranderingen in het luchtstromingspatroon: G_L.



Figuur 6: Links: Klimaatscenario's KNMI; Rechts: assenkruis Deltascenario's. Matige klimaatverandering komt overeen met GL, snelle klimaatverandering met WH

Voor snelle klimaatverandering is er warme (W) temperatuurstijging en hoge (H) veranderingen in het luchtstromingspatroon: W_H[5]. In de scenario's zit een zeespiegelstijging in 2050 van respectievelijk 15 en 40 cm. In figuur 4 zijn zowel de klimaatscenario's als de deltascenario's weergegeven.
Voor dit onderzoek is dus gekozen voor de twee uitersten qua bandbreedte: G_L versus W_H.

[5] Er wordt gebruik gemaakt van het scenario $W_H/W_{H,dry}$ waarin de neerslag in Nederland afkomstig is uit het scenario W_H en voor de neerslag in Europa (en dus de rivierafvoer) het extra droge scenario $W_{H,\,dry}$ (Klijn, et al, 2015). Dit scenario is ook gebruikt in Deltaprogramma Zoetwater (DPZW), zie hoofdstuk 2.4.2 van Mens, et al (2019).

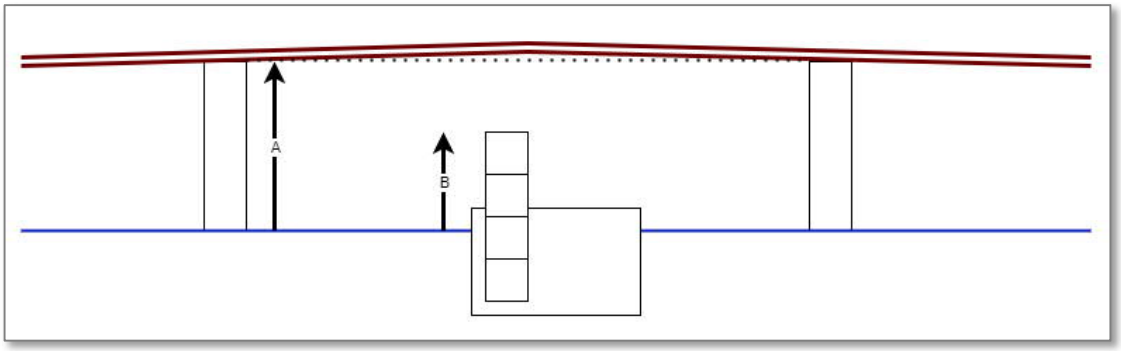
2 Bedreigingen vanuit klimaatverandering voor de scheepvaart

2.1 Introductie

Dit hoofdstuk behandelt de bedreigingen *hoogwater* die klimaatverandering brengt voor de scheepvaart op de rivieren en in de Rijn-Maasmonding. Onderstaande paragrafen gaan meer in detail in op die bedreigingen.

2.2 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 uit gegaan 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 (stippellijn in figuur 7) genomen binnen de vaargeul[6] zoals deze ook wordt getoond in de databases van Rijkswaterstaat[7]. In deze studie wordt het verschil tussen de brughoogte en de waterstand de *beschikbare doorvaarthoogte* genoemd.



Figuur 7: Concept van doorvaarthoogte (pijl A) aangegeven voor een theoretische brug (inclusief een welving of boog in het brugdek). Voor een schip met 4 lagen containers is de benodigde doorvaarthoogte aangegeven met pijl B.

2.2.1 Waterstanden

De waterstand in het vaarwegennet varieert op verschillende tijdschalen en door verschillende factoren. In de rivieren stijgt de waterstand als gevolg van het toenemen van de afvoer terwijl dichter bij 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 geheel jaar om gevolgen beter te kunnen duiden.

2.2.1.1 Grote rivieren

Voor elk van de riviertakken (Rijn en Maas) zijn zogenaamde betrekkingslijnen beschikbaar. Deze lijnen geven aan, welke waterstand correspondeert met een

[6] Op grond van internationale definities is de doorvaartbreedte gekoppeld aan de doorvaarhoogte; de doorvaartbreedte is dat gedeelte van het vaarwater waarbij de vastgesteld doorvaarthoogte wordt gegarandeerd. Deze doorvaartbreedte valt doorgaans samen met het begrip vaargeul.
[7] https://vaarweginformatie.nl

bepaalde afvoer. Deze zijn vervolgens te vertalen naar een *waterstandsduurlijn* door te kijken, hoeveel dagen per jaar deze afvoer voorkomt. Voor de hogere afvoeren wordt de herhalingstijd in jaren gegeven in de betrekkingslijnen.
In hoofdstuk 4 wordt dit weergegeven en verder vertaald naar een *overschrijdingsduur* van bepaalde waterstanden.

2.2.1.2 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 doorgerekend met een numeriek 1D model (SOBEK-RE)[8]. 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 als rivierafvoer.
In hoofdstuk 4 wordt dit nader uitgewerkt

2.2.2 Klimaatscenario

Voor alle onderzochte gebieden wordt gekeken naar de invloed van klimaatverandering op de waterstanden. In deze studie is daarbij vooral van het verwachte klimaat van 2085 uitgegaan als 'worst case' scenario voor 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.

2.2.2.1 Zeespiegelstijging

Binnen het Nationaal Watermodel is voor 100 jaar de waterstanden in Nederland uitgerekend met een referentiescenario en verschillende klimaatscenario's. In de Rijn-Maasmonding wordt er voor diverse doeleinden ook gebruik gemaakt van een toegespitst SOBEK-model, o.a. om zoutverspreiding te modelleren. Dit model bleek ook bruikbaar binnen dit project en de resultaten van dit model zijn toegepast voor het aspect zeespiegelstijging Rijn-Maasmonding.
Er zijn niet voor de gehele reeks van 100 jaar resultaten van klimaatscenario W_H 2085 en uitgangspunt "80 centimeter zeespiegelstijging" beschikbaar. Er is wel een 100-jarige reeks met W_H 2050 en 1,0 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 het effect van de rivierafvoer. Alleen op de Waal en Boven Merwede is dit niet het geval; daar speelt de verandering van de afvoer een grotere rol.

2.2.2.2 Afvoeren

Voor de afvoeren van de rivieren is ook een 100-jarige reeks beschikbaar voor zowel de referentiesituatie als de klimaatscenario's. Deze afvoer is vervolgens te vertalen naar een overschrijdingsduur per jaar.
Met de eerder genoemde betrekkingslijnen is de afvoer te koppelen aan een waterstand per brug. In deze studie wordt gebruik gemaakt van de afvoer uit het W_{H_dry} 2085-scenario.

[8] SOBEK_RE_NDB_1_1_0

3 Blootstelling

3.1 Containervaart

De containervaart neemt een steeds belangrijker rol in bij het vervoer over water. De capaciteit van containerschepen wordt veelal uitgedrukt in *Twenty Foot Equivalent Units* (TEU)[9]. 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 de rand van het ruim uit kunnen komen (vanaf twee lagen). In de praktijk komt het er op neer, dat grote containerschepen ten minste vier lagen containers kunnen laden (waarvan twee lagen boven het ruim). De 5- en 6-laagscontainervaart komt sporadisch voor, maar is voorbehouden aan de laatste generatie containerschepen en sterk afhankelijk van de route en doorvaarthoogte. Dit onderzoek concentreert zich op maximaal vier lagen containers. Dit houdt mede verband met de medio 2019 per Kamerbrief gecommuniceerde vastgestelde streefbeelden[10] voor alle belangrijke scheepvaartroutes. Deze zijn allen geënt op 4-laags containervaart.

De laatste jaren worden steeds meer zgn. *high cube*-containers met een hoogte van 2,85 meter meegenomen, waardoor de schepen met dezelfde hoeveelheid lagen containers hoger boven het water uitsteken (Van Nieuwenhuizen-Wijbinga, 2019) De hoogte van de containers boven het water wordt in dit rapport de *scheepshoogte* of *benodigde doorvaarthoogte* genoemd (figuur 7).
Het is belangrijk om te realiseren, dat er in de praktijk een zekere veiligheidsmarge - ordegrootte centimeters tot decimeters - wordt aangehouden door de schippers, en daardoor de werkelijk benodigde doorvaarthoogte dus eigenlijk groter is dan de hoogte zoals in dit rapport gehanteerd.

3.1.1 Formele eisen en praktijk

De Centrale Commissie voor de Rijnvaart (CCR) heeft als formele eis een minimum doorvaarthoogte van 9,10 m boven de *hoogst bevaarbare waterstand*[11] vastgesteld, gebaseerd op geladen schepen met 4-laagscontainervaart. De zelfde hoogtenorm is ook vastgelegd in de Richtlijnen Vaarwegen van Rijkswaterstaat die gelden voor het ontwerp van nieuwe vaarwegen.
In Nederland is de *maatgevende hoge waterstand scheepvaart* (MHWS) volgens de Richtlijn Vaarwegen:

- op kanalen en bij kortdurende waterstandsvariaties: de waterstand, die 1% van de tijd overschreden wordt, gemeten over de laatste 10 jaar.
- bij langdurige waterstandsvariaties, bijvoorbeeld op rivieren: de waterstand, die in de laatste periode van 10 jaar éénmaal gedurende een aaneengesloten periode van 24 uur overschreden wordt.

---

[9] Een twintigvoet container is het standaard formaat van één van de twee veel voorkomende containers en meet 6,1 m lang x 2,44 m breed x 2,59 m hoog en weegt volgeladen maximaal 24 ton en gemiddeld ca. 10 ton. Veertigvoet containers zijn de andere standaard containers en zijn per stuk 2 TEU, maximaal 30,5 ton in gewicht.
[10] Kamerbrief " Vervolg Kosten-batenanalyse brughoogtes (4 kansrijke vaarwegcorridors) ", kenmerk IenW/BSK-2019/127403
[11] De CCR-norm gaat uit van een maximale waterstand waarboven geen scheepvaart meer wordt toegestaan. In Nederland bestaan ten principale geen vaarverboden a.g.v. hoogwater. Daarom worden in Nederland andere termen gehanteerd.

Specifiek voor de Rijntakken is echter *Maatgevend Hoogwater* (MHW) het referentievlak waarop de doorvaarthoogte wordt getoetst in CCR-kader. MHW is de hoogwaterstand bij een afvoer van 16.000 m^3/s bij Lobith. MHW ligt aanzienlijk hoger dan de waterstand die 1% van de tijd wordt overschreden.
Dientengevolge hebben de bruggen over de Rijntakken een veel grotere doorvaarthoogte dan de bruggen over de overige riviertakken.
De relatie betreffende de bevaarbaarheid tussen Duitsland en Nederland bij hoge afvoeren is onderzocht in een separaat onderzoek (Deltares, 2021).

De eis voor de doorvaarthoogte 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 naar voren met betrekking tot de benodigde doorvaarthoogte voor 3 en 4-laagscontainervaart, uitgedrukt in onderschrijdingspercentages (voor stilliggende schepen, inclusief 30 cm veiligheidsmarge en rekening houdend met high cube-containers):

- 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% | 11,20 m

De cijfers moeten als volgt worden geïnterpreteerd: voor vierlaags containervaart voldoet een hoogte van 10,0 m voor de helft van de tijd niet in geval van hoogwater. Een doorvaarthoogte van 11,05 meter brengt dit terug tot 10% niet-beschikbaarheid en 11,20 meter naar 5% niet-beschikbaarheid, dus 95% van de tijd wél geschikt voor 4-laags containervaart.
Naar aanleiding van deze bevindingen is o.a. in eerder genoemde Kamerbrief een nieuwe streefhoogte van 11,35 meter opgenomen als te onderzoeken maximumvariant voor nieuwe en te vervangen bruggen. Voor maritieme toegangsgebieden kan de maximumvariant zelfs nog hoger liggen.

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 zijn toenmalige aannames omtrent de beladingsgraad van containers niet realistisch gebleken 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%**

Er is dus aan te nemen dat 31% van de containervaart met *ten minste vier lagen* containers wordt uitgevoerd.

NB: de in 2012 door Brolsma uitgevoerde metingen zijn sindsdien niet herhaald. De toenmalige verdeling van standaardcontainers en high cube-containers is dan ook voor deze stresstest het uitgangspunt geweest. Mogelijk is sindsdien de verhouding veranderd, doordat met name in de zeevaart - en dus de aanvoer van containers in de zeehavens - het aandeel high cube-containers blijft groeien.

De effecten van deze nieuwe ontwikkelingen zijn onderwerp voor aanvullend onderzoek.

3.2 Bruggen: doorvaarthoogte per vaarweg

Voor de beoordeling van de kwetsbaarheid per brug zijn gegevens nodig van de verdeling in *benodigde doorvaarthoogtes* van de schepen per brug (de blootstelling). Metingen (zoals door Brolsma) zijn hiervoor niet beschikbaar. In plaats daarvan is een inschatting gemaakt van de doorvaarthoogtes op basis van gegevens uit het meld- en volgsysteem IVS. 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, alsmede de scheepshoogte op basis van de geregistreerde hoeveelheid containers per schip. Hiervoor is vergelijking 1. gebruikt. Op basis van eerdere bevindingen (zie bijlage B; Van Wijk, 2020) wordt in deze vergelijking gebruik gemaakt van uitsluitend high cube containers (2,896 m), een constructiehoogte van de bodem[12] 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 (zgn. squat: inzinking a.g.v het Bernoulli-effect bij varen schepen; dit is afhankelijk van de relatieve stroomsnelheid en kan oplopen tot 0,5 m).

Vergelijking 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.

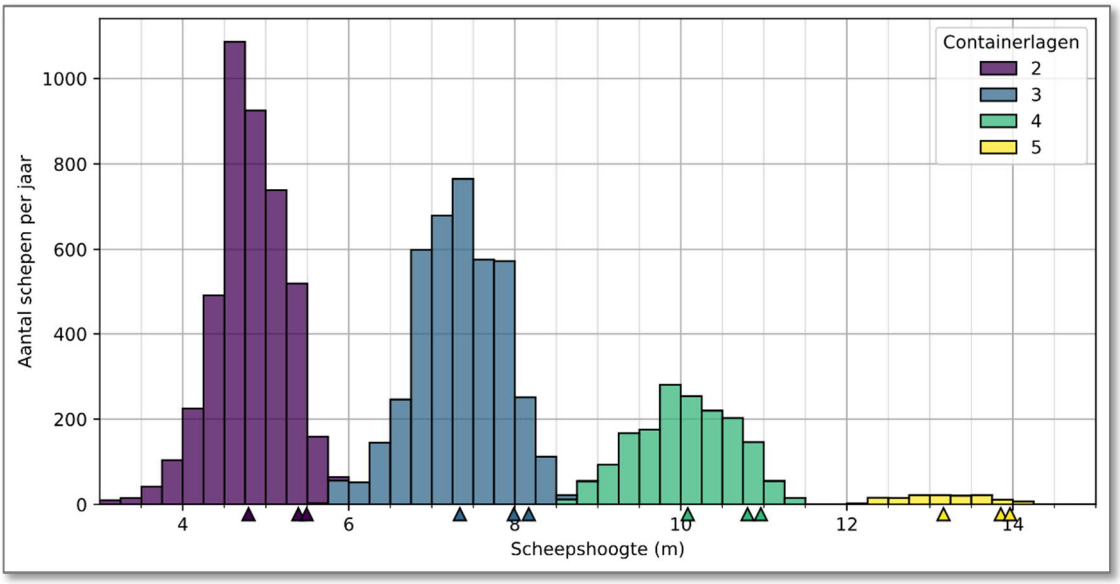
$$scheepsHoogte = containerLagen * containerhoogte - scheepsDiepgang + veiligheidsmarge + constructiehoogte_bodem$$

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 drie lagen is 8,20 m (t.o.v. 8,65 m) en voor vier 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.

[12] hoogte tussen kielvlak en laadvloer

Met behulp van deze formule is per brug en per vaarweg een hoogteprofiel opgesteld dat is gebruikt voor de verdere analyses. In onderstaand figuur is als voorbeeld de verdeling van scheepshoogtes weergegeven ter hoogte van Nijmegen:



Figuur 8: 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 ten opzichte van afgesproken, indicatieve waarden. In overleg met I&W is besloten om gebruik te maken van twee indicatieve waarden voor 3- en 4-laagscontainervaart. Afhankelijk van de vaarwegklasse van het vaarwater wordt het aantal gewenste containerlagen gekozen. De waarden zijn:

Tabel 2: indicatieve waarden doorvaarthoogte voor 3- en 4-laagscontainervaart

Aantal lagen	Doorvaarthoogte in m	
	Standaard	High cube
3	7,00	8,65
4	9,10	11,35

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. Oftewel: als deze doorvaarthoogte beschikbaar is, zou alle containervaart met die hoeveelheid lagen mogelijk moeten zijn.
In deze rapportage wordt dit ook vertaald naar de volgende consequenties voor 4-laags containervaart:

- Als de lage indicatieve waarde wordt onderschreden is zo goed als alle 4-laags en hogere containervaart onmogelijk;
- Als de hoge indicatieve waarde wordt onderschreden is in ieder geval alle containervaart boven de 4e 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 als gevolg van 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. De Waal is veruit de drukst bevaren rivier in het hoofdvaarwegennet met ca. 2 miljoen TEU containertransport per jaar, terwijl de Maas en IJssel ca. 300.000 resp. 70.000 TEU per jaar faciliteren. De bepaling van de effecten op de Waal is bedoeld om later de impact beter in te kunnen schatten van de beperkingen in doorvaarthoogte voor het hele hoofdvaarwegennet.

Totaal containertransport per jaar

Er wordt gemiddeld 2 miljoen TEU aan containers per jaar vervoerd over de Waal volgens de gegevens uit IVS (verkregen uit de BIVAS database), overeenkomend met 5.500 TEU per dag.

- Volgens de metingen bestaat 26% uit 4-laagscontainervaart en 5% uit 5-containervaart (zie paragraaf 3.1);
- Dit resulteert in 600.000 (31%) en 100.000 (5%) TEU die 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 dan nog steeds met vier lagen worden vervoerd; een reductie van maximaal 20%. Bij 4-laagscontainervaart kan dan nog steeds met drie lagen wordt gevaren; een reductie van maximaal 25%.

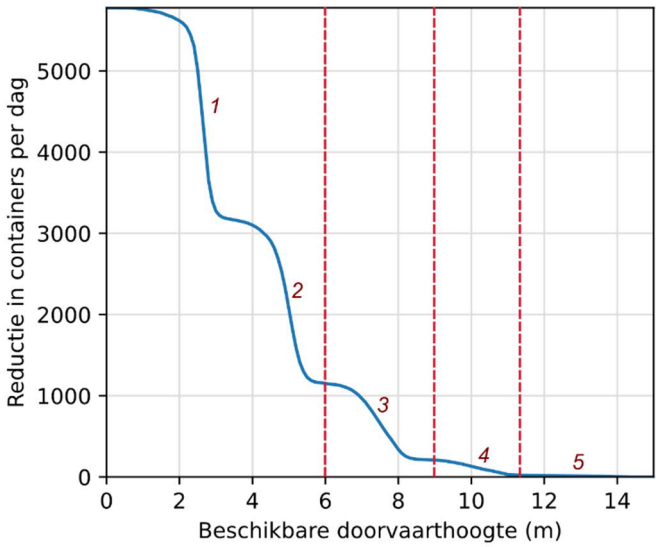
- Als de beschikbare doorvaarthoogte lager is dan 11,35 m - de indicatieve waarde voor 4-laags high cube - is alle 5-laags containervaart onmogelijk en resulteert dit op jaarbasis in 20.000 TEU (20% van 100.000) die niet meer met hetzelfde aantal reizen vervoerd kunnen worden.
- Als de beschikbare doorvaarthoogte lager is dan 9,10 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 indicatieve waarde *standaard* (9,10 m) tot een afname van 411 TEU per dag en voor de indicatieve waarde *high cube* (11,35 m) 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 9 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 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 in de figuur zichtbaar is: gemiddeld 20 containers per dag. Vergelijkbaar is bij 8,65 m - maximum high cube 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 voorts toont het figuur dat vanaf ongeveer 6 m ook alle 3 laags containervaart stopt, oplopend tot 1.200 containers per dag.



Figuur 9: Kwetsbaarheid door onvoldoende doorvaarthoogte (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.

Deze getallen wijken af van de inschatting uit metingen: 20 resp. 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.

4 Kwetsbaarheden

4.1 Introductie: Overschrijdingsduur waterstanden

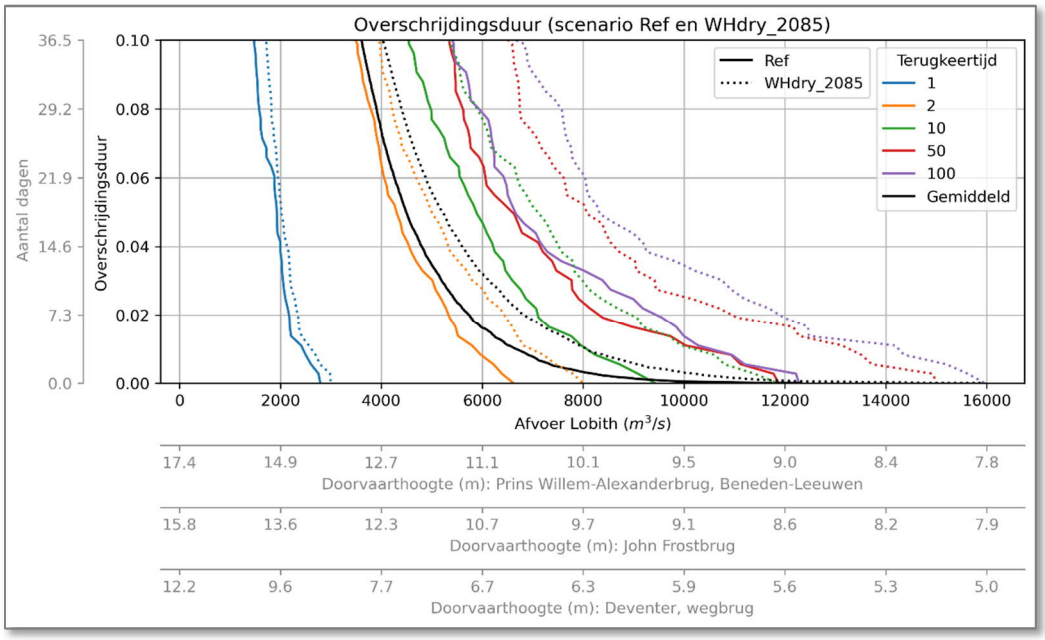
Bij de bepaling van de kwetsbaarheid van het hoofdvaarwegennet voor hoogwater wordt de doorvaarthoogte beschouwd over een geheel jaar. Met behulp van de indicatieve waarden wordt gekeken, hoeveel dagen/uren in het jaar de benodigde doorvaarthoogte niet beschikbaar is, de *overschrijdingsduur*.

Om de impact van beperkingen in doorvaarthoogte voor de diverse klimaatscenario's goed in te kunnen schatten, is het niet toereikend om alleen de verandering in waterstand als gevolg van klimaatverandering voorspellen. Er moet ook een indicatie zijn van de herhalingstijd 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 voor de grote rivieren, omdat in de Rijn-Maasmonding sprake is van een combinatie van meerdere factoren - afvoer, zeespiegelstijging en wind - die zich elk op verschillende tijdschalen afspelen.
In onderstaande paragrafen is de overschrijdingsduur voor de grote rivieren en de Rijn-Maasmonding nader toegelicht.

4.2 Grote rivieren

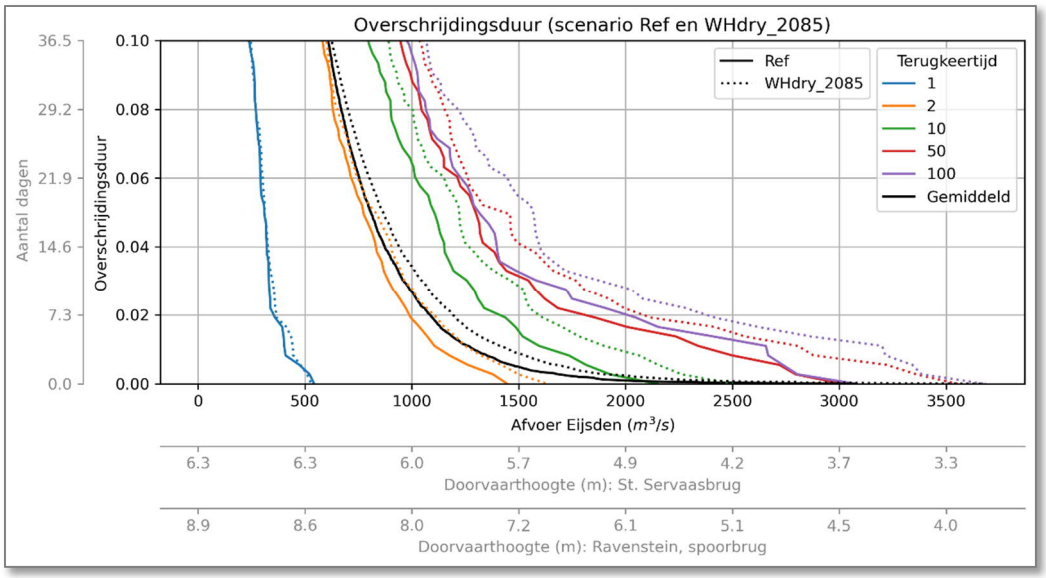
4.2.1 Afvoeren

Figuur 10 en figuur 11 geven de overschrijdingsduur voor de Rijntakken en Maas voor verschillende afvoeren per jaar, gekoppeld aan de doorvaarthoogte bij enkele bekende knelpunten (onder de horizontale as).



Figuur 10: Overschrijdingsduur (en aantal dagen) voor de Rijnafvoer voor verschillende terugkeertijden, mede gerelateerd aan de doorvaarthoogte bij de Pr. Willem-Alexanderbrug (Waal), John Frostbrug (Nederrijn) en Deventer wegbrug (IJssel).

Elke afvoer heeft een eigen herhalingstijd, waarbij in deze studie wordt gekeken naar de herhalingstijd van 1, 2, 10, 50 en 100 jaar. Deze herhalingstijden zijn bepaald op basis van een 100-jarige reeks waarbij voor elk jaar een overschrijdingsduurlijn is gemaakt. De afvoerlijn is hierdoor niet te koppelen aan een historisch jaar, maar is een fictieve combinatie van de verschillende jaren.



Figuur 11: Overschrijdingsduur (en aantal dagen) voor de Maasafvoer voor verschillende herhalingstijden, ook gerelateerd aan de doorvaarthoogte bij de St. Servaasbrug (Maastricht) en spoorbrug bij Ravenstein.

In het referentiescenario is zelden sprake van te weinig doorvaarthoogte op de Waal en de Nederrijn, zelfs als wordt uitgegaan van 4-laags high cubes als indicatieve waarde. In het scenario $W_{h,dry}$ 2085 (gestippelde lijnen) zal echter wel een tekort aan doorvaarthoogte kunnen optreden, eens per 10 jaar gedurende enkele dagen en in zeldzamer jaren (terugkeertijd 50 of 100) tot ca. twee weken overschrijdingsduur.
Voor de IJssel wordt nu reeds de minimale voorvaarthoogte zeer regelmatig en langdurig niet gehaald, wanneer wordt uitgegaan van een vaarweg van CEMT-klasse Va. De IJssel is echter 'ontworpen' als klasse IV-vaarweg waarop in later stadium klasse Va werd toegelaten. Uitgaande van *standaard* 7,0 m voor drielaags containervaart[13] is sprake van een overschrijding van ca. 10 dagen eens per twee jaar (T=2). Met name deze T2-lijn en de gemiddelde lijn lopen in scenario $W_{h,dry}$ 2085 snel op. De T10-lijn ligt voor dit scenario reeds buiten de grafiek (meer dan ca. 50 dagen). Als in plaats van de standaard indicatiewaarde wordt uitgegaan van 3-laags high cube, dan wordt deze situatie nog ernstiger; dan is er *gemiddeld* al spraken van een overschrijdingsduur van 50+ dagen en neemt dit toe tot extreme waarden bij klimaatscenario Wh,dry 2085 en/of meer zeldzame jaren.

Ook voor de Maas wordt nu reeds de gewenste doorvaarthoogte van 9,10 m bij hoogwatercondities zelden - eigenlijk nooit - gehaald op de trajecten Maastricht-Venlo en beneden Ravenstein. De bruggen over de gestuwde panden zijn ontworpen op 7,0 m boven stuwpeil. Sommige bruggen liggen iets hoger en kunnen tot ca. 8,50 m doorvaarthoogte faciliteren. Alleen op het traject Venlo-Ravenstein is soms 9,10 m beschikbaar.
De effecten van de klimaatverandering ($W_{h,dry}$ 2085) zijn op de Maas relatief gering.

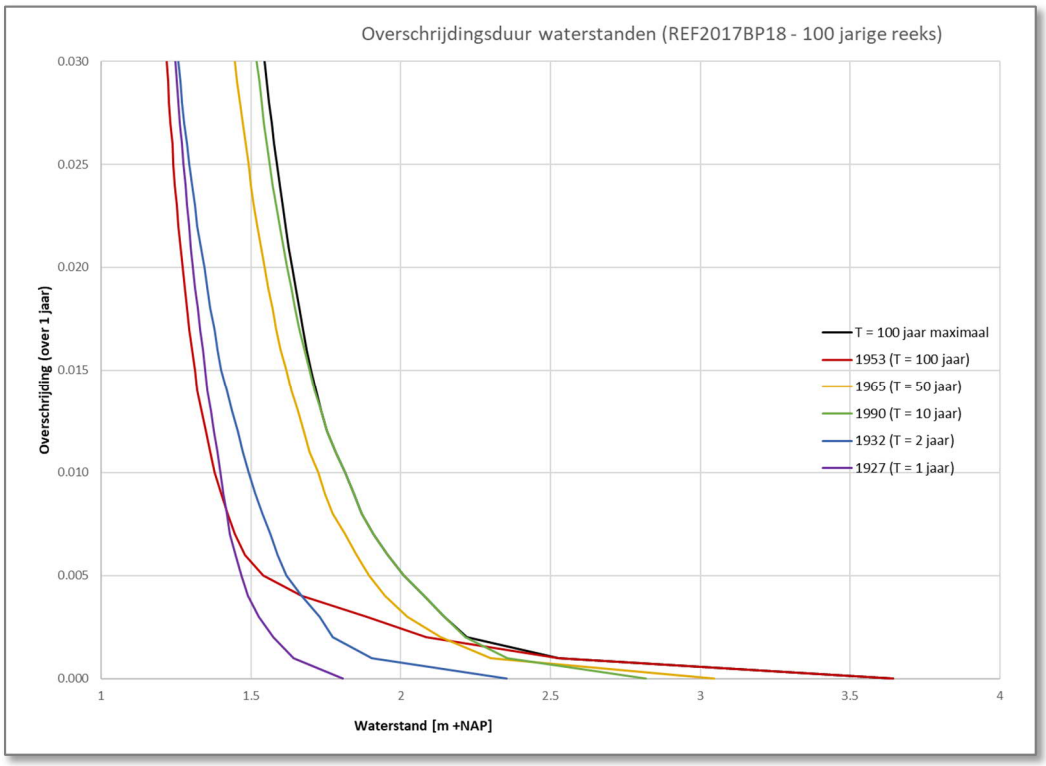
[13] NB: dit wijkt af van de streefwaarden uit de Kamerbrief omtrent brughoogtes.

Alleen in extreme jaren zal voor een indicatieve waarde van 3-laags standaard (7,0 m) de overschrijdingsduur oplopen tot ca. 14 dagen, maar de gemiddelde overschrijding zal weinig veranderen. Voor 3-laags *high cube* (8,65 m) geldt nu reeds, dat dit op grote delen van de corridor niet haalbaar is en daar waar dit wel haalbaar is, zal de overschrijding toenemen tot ca. twee tot vier weken in resp. een T2 en T10-jaar.

4.3 Rijn-Maasmonding

4.3.1 Historische jaren

Voor de Rijn-Maasmonding is de waterstand bij elke brug een optelsom van enerzijds de rivierafvoeren en anderzijds het getij. Beiden fluctueren - het getij voortdurend met twee pieken en twee minima per dag - en het bepalen van terugkeertijden ten behoeve van de analyse van de doorvaarthoogte is daarom complex. In sommige jaren die *historisch* zijn voor hoge eb- en vloedstanden waren de rivierafvoeren minder bepalend dan in meer normale jaren qua getij met toevallig wél hoge rivierafvoeren.
Onderstaand figuur illustreert dit verschijnsel: 1953 - hét jaar van de watersnoodramp - was qua getij een extreem jaar met een terugkeertijd van T=100, maar de rivierafvoeren waren minder extreem dan bijv. 1965 (T=50) of 1990 (T=10) en dus kruist de lijn van 1953 die van andere historische jaren, wanneer de optelsom van getij en rivier voor een honderdjarige reeks 100 jarige uit het Nationaal Water Model (REF2017BP18) in een grafiek worden uitgezet.

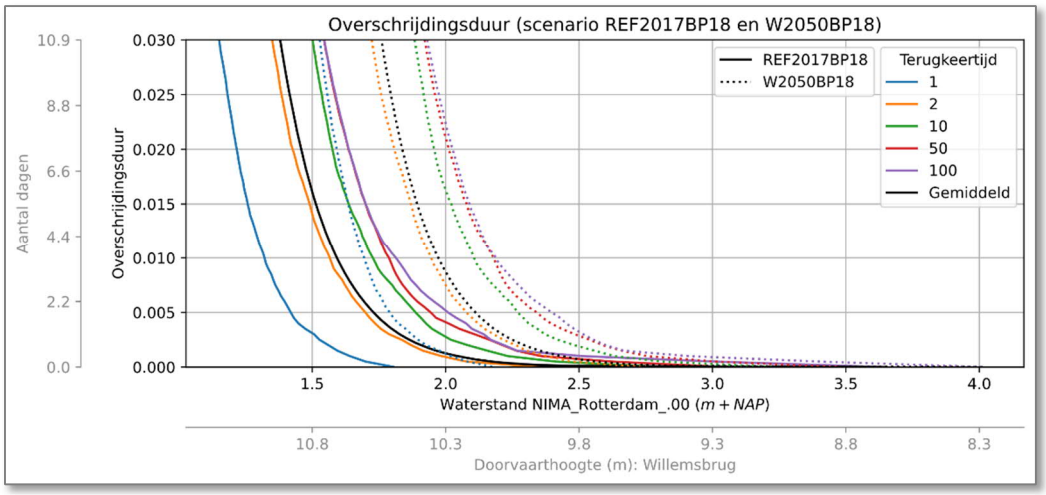


Figuur 12: Overschrijdingsduur waterstand Rotterdam op basis van de 100-jarige reeks. De figuur is afgeknipt bij een overschrijdingsduur van maximaal 3%.

4.3.2 *Waterstandsduurlijnen*

Voor een nauwkeurigere berekening van de terugkeertijd van overschrijdingen bleek het niet goed mogelijk om te werken met terugkeertijden van bepaalde rivierafvoeren en eb- en vloedstanden in individuele historische jaren.
In plaats daarvan bleek het noodzakelijk om eigenlijk het omgekeerde te doen: naar een historische reeks van waterstanden op bepaalde locaties te kijken en voor iedere waterstand te berekenen, hoe vaak deze in ieder jaar wordt overschreden - de *waterstandsduurlijn* - en op basis daarvan de herhalingstijd te bepalen. Het resultaat is een zogenaamde *overschrijdingsduurkromme* per terugkeertijd.

Een voorbeeld van de toepassing hiervan is gegeven in figuur 13. Dit voorbeeld is gegeven voor Rotterdam en ter interpretatie is ook de bijbehorende doorvaarthoogte bij de Willemsbrug toegevoegd.



Figuur 13: 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%

Uit dit voorbeeld blijkt dat de *standaard* doorvaarthoogte van de Willemsbrug eigenlijk zelden langdurig niet beschikbaar is. Als echter wordt uitgegaan van de indicatieve waarde 4-laags *high cube*, dan blijkt een overschrijdingsduur van ca. twee weken. De geringe overschrijdingsduur wordt in belangrijke mate bepaald door het getij: twee keer per dag is er sprake van een minimum getijde-effect en dus weer een ruimere doorvaarthoogte. Er is zelden echt lange tijd sprake van te hoog water.

5 Kwetsbaarheden in het HVWN

5.1 Introductie

Kwetsbaarheid is door de IPCC gedefinieerd als de geneigdheid of predispositie om negatief te worden beïnvloed (schade oplopen). Kwetsbaarheid heeft twee relevante elementen:

- gevoeligheid of vatbaarheid voor schade, bijv. door de fysieke eigenschappen van de infrastructuur, en;
- het vermogen om ermee om te gaan en zich aan te passen, bijv. onvoldoende voorbereid zijn of niet snel kunnen reageren op potentiele schade.

Kwetsbaarheid gaat dus enerzijds om een negatief effect en anderzijds om de reactie op dat effect.
Voor het hoofdvaarwegennet worden meerdere effecten in beeld gebracht, zoals hiernaast weergegeven in de figuur hiernaast.

In dit hoofdstuk wordt eerst het effect van de klimaatverandering beschreven, voor de rivieren en Rijn-Maasmonding en de daarin gelegen bruggen. Vervolgens wordt dit vertaald naar een *impact* op de sector en *mogelijke reacties*. Het hoofdstuk wordt afgesloten met *mogelijke maatregelen*.

5.2 Kwetsbaarheid HVWN

5.2.1 Grote rivieren

Voor elk van de bruggen zijn grafieken opgesteld van overschrijdingsduren bij de verschillende herhalingstijden. Vanwege de grote hoeveelheid bruggen worden de gegevens niet voor elke brug apart weergegeven. In plaats daarvan worden in de onderstaande paragrafen slechts per riviertak de belangrijkste knelpunten besproken. Het betreft:

Tabel 3: knelpunten doorvaarthoogte per riviertak

Riviertak	Afvoer (Lobith/St. Pieter) waarbij knelpunten optreden	Knelpunt
Waal	9,10 m: 11.545 m^3/s	Prins Willem-Alexanderbrug
IJssel	7,00 m: 5.220 m^3/s	Deventer, wegbrug (stadsbrug)
Maas: Maasroute	7,00 m: 1.602 m^3/s	Venlo, stadsbrug
Maas: Oost-westcorridor		Spoorbrug Ravenstein
Nederrijn-Lek	9,10 m: 10.204 m^3/s	Spoorbrug Oosterbeek

Bij deze opsomming moet t.a.v. de Nederrijn-Lek worden opgemerkt, dat mogelijk de doorvaarthoogte van de vizierbogen van de stuwen Driel, Amerongen en Hagestein niet goed gemodelleerd zijn. Dit zijn bogen met een relatief kleine straal. De maximale doorvaarthoogte van deze bogen wijkt tot wel 2,0 m af van de *realistische* doorvaarthoogte, wanneer rekening wordt gehouden met een veilige *padbreedte* van een schip dat onder de boog door moet varen. Die padbreedte kan - afhankelijk van de stroomsterkte en ligging van de stuw ten opzichte van de stroming wel 20 m bedragen, ruwweg de helft van de doorvaartopening. Over die breedte is de doorvaarthoogte aanzienlijk minder groot.

Voorts moet worden opgemerkt, dat de stadsbruggen bij Kampen, Zutphen en Maastricht zodanig laag zijn, dat ze bij hoogwatercondities alleen in geheven toestand een zinvolle doorvaartopening hebben, en dan ook nog beperkt, omdat het allen hefbruggen betreft. De doorvaarthoogte in geheven toestand is ca. 9 meter.

Afvoeren en knelpunten

Om een idee te krijgen, bij de mate van hoogwater de knelpunten voor het eerst gaan optreden, is in onderstaande tabel aangegeven, bij welke afvoeren er een overschrijding van minimaal 20 dagen per jaar zich voordoet, afhankelijk van de gekozen indicatieve waarde voor de doorvaarthoogte (11,35 resp. 9,10 m voor 4-laags en 8,65 m resp. 7,0 m voor 3-laags containervaart).

Tabel 4: Afvoer bij Lobith/Eijsden waarbij de indicatieve waarde 20 dagen per jaar 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
Maas			495 m^3/s	1.602 m^3/s

Duur van de knelpunten

Om ook een overzicht te krijgen van de ernst van de hinder per riviertak, uitgedrukt in de *duur van het niet beschikbaar zijn van de doorvaarthoogte*, is in onderstaande tabel deze *onderschrijdingsduur* voor het huidige (ref) en toekomstige klimaat ($W_{h,dry}$ 2085) weergegeven.

Tabel 5: Onderschrijdingsduur voor de verschillende terugkeertijden per knelpunt op elke riviertak., de achtergrondkleur correspondeert met de hierboven genoemde indeling van onderschrijdingsduur per jaar

	Terugkeertijd	1		2		10		50		100	
	Scenario	Ref	WH85	Ref	WH85	Ref	WH85	Ref	WH85	Ref	WH85
Waal	9,10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	1,4	6,6	1,7	8,3
	11,35	0,0	0,0	4,8	12,7	21,7	32,4	29,7	46,2	33,6	50,1
IJssel	7	0,0	0,0	8,7	16,2	26,3	37,6	38,9	55,5	43,8	58,8
	8,65	0,0	0,1	54,2	66,0	123	124	166	156	186	172
Nederrijn/Lek	9,10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,6	3,8	8,9	4,3	12,1
	11,35	0,0	0,0	9,8	17,4	27,3	39,6	40,3	56,7	49,7	63,7
Maas: Maasroute	7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	4,4	6,4	5,4	7,9
	8,65	0,0	0,0	0,0	0,2	3,9	7,1	9,4	13,3	10,9	14,1
	9,10	0,0	0,0	0,4	2,0	7,2	11,6	12,7	18,4	13,0	22,4
Maas: Oost-westcorridor	7	0,0	0,0	0,0	0,2	4,0	7,2	9,5	13,4	10,9	14,4
	8,65	1,6	1,5	53,2	50,3	94,9	94,6	114	114	117	115
	9,10	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365

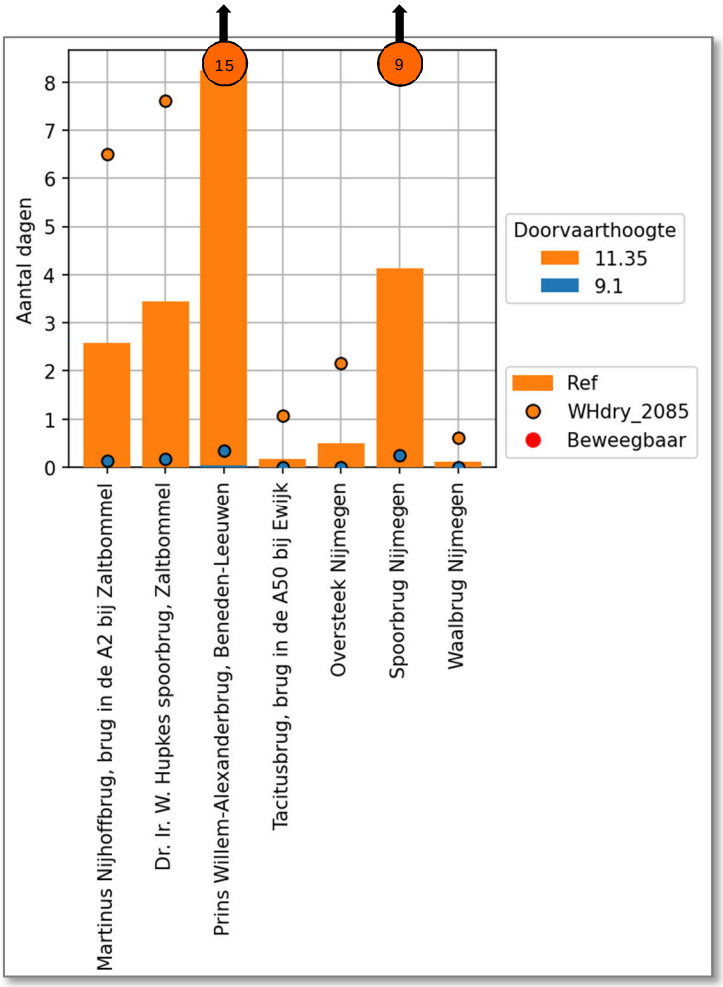
Doordat er is gewerkt met fictieve jaren is niet precies te zeggen, hoe lang aaneengesloten de beschikbare doorvaarthoogte wordt onderschreden. Er is wel een schatting te geven op basis van de systeemwerking (afvoergolven). Hierbij zullen de afvoergolven op de Rijn langer duren en meer gerelateerd zijn 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 (zie kleuren in bovenstaande tabel):

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.

5.2.1.1 Waal

In figuur 14 is de onderschrijdingsduur weergegeven voor een gemiddeld jaar voor de bruggen over de Waal.

De blauwe en oranje staven geven de overschrijding van de doorvaarthoogte in het huidige klimaat. De *bolletjes* geven de overschrijding in het klimaatscenario $W_{h,dry}$ 2085.
Daar waar de bolletjes buiten de schaal van de grafiek vallen, is de waarde bovenaan de betreffende kolom weergegeven met pijl en de waarde.



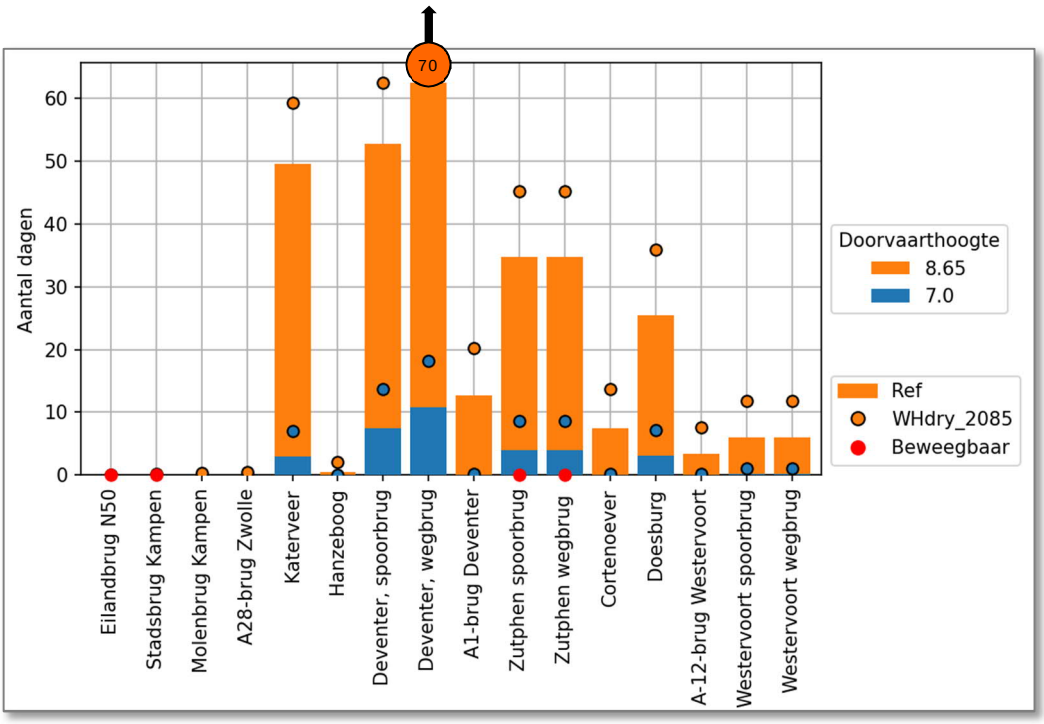
Figuur 14: Onderschrijdingsduur doorvaarthoogte voor de bruggen over de Waal voor gemiddelde condities voor het huidige klimaatscenario en het toekomstige scenario.

Op de Waal is er in het huidige klimaatscenario, vanaf een herhalingstijd van 2 jaar voor het eerst sprake van een overschrijding van de hoge indicatieve waarde (11,35 meter) 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.
De laagste indicatieve waarde (9,10 m) wordt onderschreden vanaf een herhalingstijd van 50 jaar in het huidige klimaatscenario. Dit blijft beperkt tot 1 á 2 dagen per jaar voor de twee hoogste herhalingstijden. Dit verandert naar 7 á 8 dagen in het toekomstige klimaatscenario.

5.2.1.2 IJssel

In figuur 15 is de onderschrijdingsduur weergegeven voor een gemiddeld jaar voor de bruggen over de IJssel.



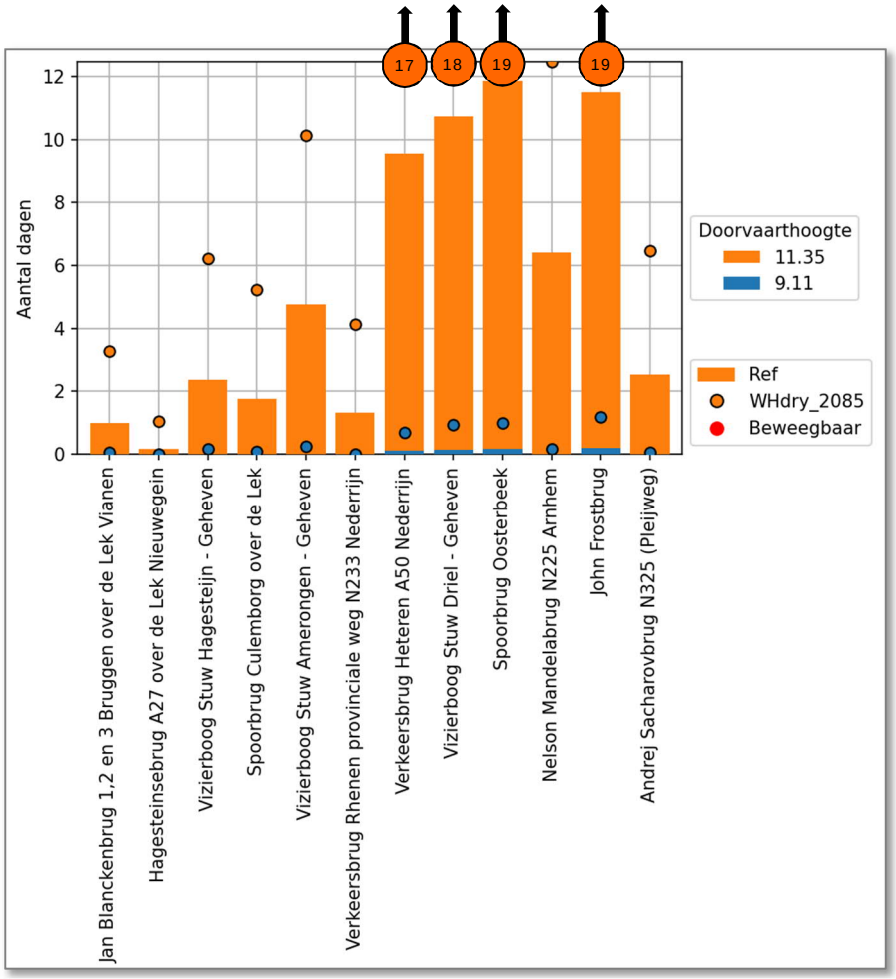
Figuur 15: Onderschrijdingsduur doorvaarthoogte voor de bruggen op de IJssel voor gemiddelde condities voor het huidige klimaatscenario (staafdiagram) en het toekomstige scenario (bolletjes).

Op de IJssel is er sprake van een knelpunt bij de Deventer wegbrug (Stadsbrug) vanaf een herhalingstijd van 2 jaar met een onderschrijding van meer dan 15% over het gehele jaar, voor de hoge indicatieve waarde (8,65 m) in het huidige klimaatscenario. Dit loopt op naar 50% bij de hogere herhalingstijden. Het komt er dus op neer, dat al vrij snel 3-laags containervaart met high cube-containers niet mogelijk is voor een groot deel van het jaar in de referentiesituatie. Het klimaatscenario verandert hier vrij weinig aan bij hoge terugkeertijden, al neemt de duur bij een herhalingstijd van 2 jaar met zo'n 10 dagen toe.

De lage indicatieve waarde van 7,0 m wordt ook al onderschreden bij een herhalingstijd van 2 jaar, al gaat het hier om 4 tot 8 dagen per jaar. Dit neemt toe tot 40 dagen bij een herhalingstijd van 100 jaar. Door de hogere afvoeren in het toekomstige klimaatscenario neemt dit 7 tot 15 extra dagen toe.

5.2.1.3 Nederrijn-Lek

In figuur 16 is de onderschrijdingsduur weergegeven voor een gemiddeld jaar voor de bruggen over de Nederrijn/Lek.



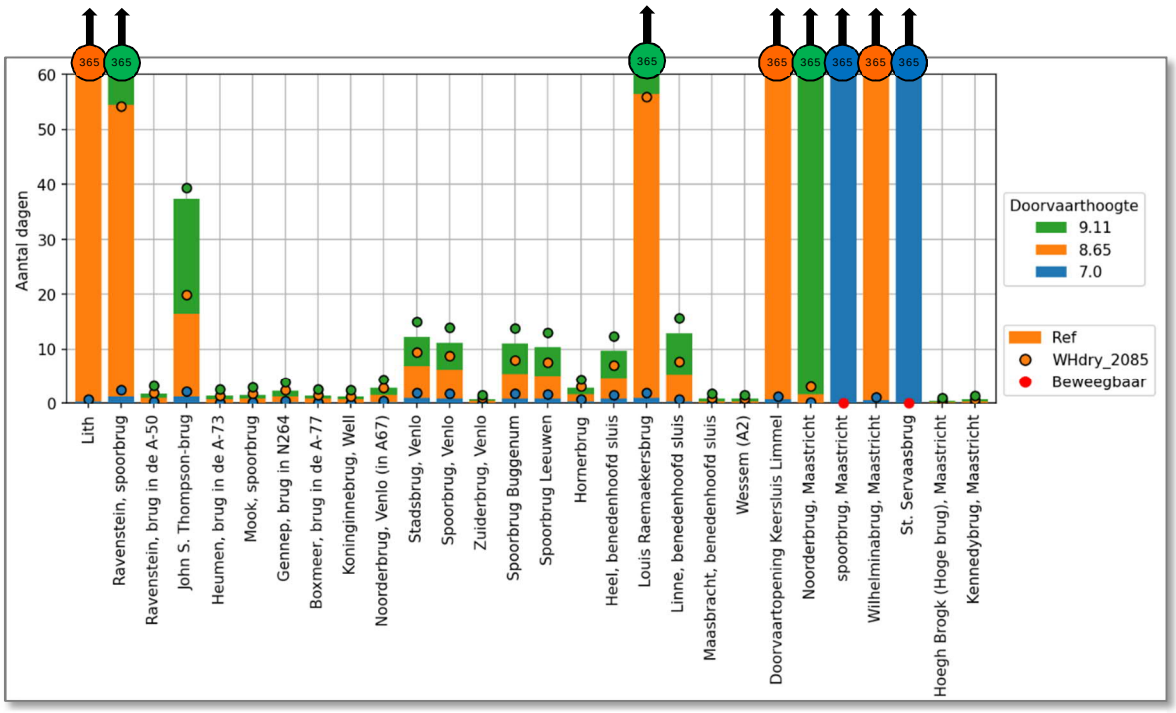
Figuur 16: Onderschrijdingsduur doorvaarthoogte voor de bruggen op de Nederrijn-Lek voor gemiddelde condities voor het huidige klimaatscenario (staafdiagram) en het toekomstige scenario (bolletjes).

De knelpunten bevinden zich allemaal in het bovenste deel van de Nederrijn nabij Arnhem.
De onderschrijdingsduur is vergelijkbaar met die van de Waal, ware het niet dat het grootste knelpunt op dit traject (spoorbrug Oosterbeek) meer beperkend dan het grootste knelpunt op de Waal.
Ook op de Nederrijn is 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.

5.2.1.4 Maas

In Figuur 5.4 is de onderschrijdingsduur weergegeven voor een gemiddeld jaar voor de bruggen over de Maas.



Figuur 17: 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).

Omdat de formele streefwaarde voor de Maas 9,10 m bedraagt, maar praktisch 7,0 m, zijn alle drie de indicatieve waarden weergegeven.

De Maas is op te delen in drie verschillende trajecten:

- Het meest bovenstroomse traject vanaf Maastricht tot en met Venlo heeft een beperkte beschikbare doorvaarthoogte. Tegelijkertijd is de hoeveelheid containervaart op dit traject - ondanks de aanwezigheid van een containerterminal in Born - relatief beperkt en over het algemeen ook minder dan 3 lagen.
  - 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-laags containervaart met high cube-containers amper mogelijk is. Er zijn enkele bruggen die beweegbaar zijn en waarbij tegelijk de indicatieve waarde van 7 meter voor de vaste overspanning ook vrijwel het hele jaar wordt onderschreden. Hierdoor is containervaart wel mogelijk, maar zal de betreffende brug vaak open moeten.
  - De onderschrijdingsduur neemt met 2-3 dagen toe voor 3-laags containervaart vanaf een herhalingstijd van 2 jaar voor het toekomstige klimaatscenario.

- Het traject tussen Venlo en Grave wordt meer gebruikt voor containervaart vanwege de terminal stroomafwaarts van Venlo. Op dit traject vormen de bruggen tot aan de invaart van het Maas-Waalkanaal weinig knelpunten. Bij Grave vormt de John S. Thompsonbrug een aantal dagen per jaar een knelpunt, maar veel van de containervaart verkiest de route over de Waal, via het Maas-Waalkanaal. Als de brug bij Grave op die reden buiten beschouwing wordt gelaten, dan is de stadbrug van Venlo het meest bepalende knelpunt.
  - De beperking in doorvaarthoogte is - vergeleken met de andere trajecten - redelijk beperkt in het huidige klimaatscenario. Zelfs met een herhalingstijd van 100 jaar is de onderschrijdingsduur 5 dagen voor 3-laags containervaart (7 meter) en 12 dagen voor 4-laags containervaart. (9,10 meter) Dit neemt voor 4-laagscontainervaart toe met 3 dagen (T=2), 4 dagen (T=10), 6 dagen (T=50) en 9 dagen (T=100) door klimaatverandering. Het resultaat is een onderschrijdingsduur van 2, 11, 18 resp. 22 dagen.

- Stroomafwaarts van Grave zijn meerdere knelpunten, waaronder de brug bij Ravenstein. De stuw bij Lith geldt alleen als knelpunt bij hogere afvoeren, als de stuw open is en deze gebruikt moet worden door de scheepvaart. Voor dit traject geldt, dat de meeste schepen met een grotere scheepshoogte gebruik zullen maken van de Waal en het Maas-Waalkanaal.
  - 4-laags containervaart met high cube-containers is zelden mogelijk op dit traject. 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 als gevolg van klimaatverandering.

5.2.2 Rijn-Maasmonding

5.2.2.1 Knelpunten

In de Rijn-Maasmonding is het verloop van de waterstanden grilliger en wisselt sneller, doordat getij, afvoeren en ook wind afwisselend hun invloed op het systeem laten gelden.
Daarom wordt in het overzicht van knelpunten een iets andere schaal gebruikt voor het duiden van de ernst van knelpunten:

<1 dag	hangt samen met hoge stormopzet en zal leiden tot een onderschrijding van de doorvaarthoogte gedurende 1 of meerdere getijperiodes.
1 – 7 dagen	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	de doorvaarthoogte wordt geregeld onderschreden. Dit zal dan enkele uren per getijperiode zijn afhankelijk van de totale onderschrijding over het gehele jaar.
30 – 90 dagen	zo goed als elke getijperiode zal de doorvaarthoogte worden onderschreden. Met 90 dagen per jaar zal gemiddeld 3 uur per getijperiode de doorvaarthoogte niet beschikbaar zijn.
> 90 dagen	de onderschrijding per getijperiode zal steeds meer toenemen. Vanaf 180 dagen per jaar zal tijdens de hele vloedperiode de doorvaarthoogte worden onderschreden.

Hieronder is een overzicht gegeven van de knelpunten in de Rijn-Maasmonding waarbij de mate van onderschrijding met bovengenoemde kleuren is aangegeven. Eerst wordt echter kort stilgestaan bij de gekozen referentiejaren: om een idee te

krijgen van de effecten van diverse invloeden op het systeem - leidend tot extreme waterstanden - zijn elke typische referentiejaren geselecteerd, op basis van de terugkeertijd van de maximale waterstand die optrad bij een belangrijk knooppunt in de Rijn-Maasmonding, namelijk Rotterdam.
Het betreft de volgende referentiejaren met bijhorende terugkeertijden en historische jaren en weerscondities:

Referentie-jaar	Bijzondere weersomstandigheden	Terugkeertijd Maximale waterstand Rotterdam (aantal jaar)	Historisch voorbeeld
a	Extreem hoge vloed	100	1953
b	Gemiddeld 'natste' jaar	50	1965
c	Jaar met extreme storm	10	1990
d	*Mediaan* jaar zonder extremen	2	1932
e	Minst problematische jaar	1	1927

Voor deze referentiejaren is de onderschrijdingsduur van de doorvaarthoogte voor de knelpunten in de Rijn-Maasmonding als volgt:

Tabel 6: Onderschrijdingsduren in dagen, knelpunten in de Rijn-Maasmonding bij verschillende indicatieve jaren, huidig en toekomstig klimaat (W2050) met 1,0 m zeespiegelstijging. Vaste bruggen zijn onderstreept (1e kolom). Een grotere toename in onderschrijding resulteert in een steeds donkerder rode kleur in de kolom 'verschil'.

Brug	referentie jaar	Huidige klimaat		W2050 1m stijging		Verschil	
		11,35 m	9,1 m	11,35 m	9,1 m	11,35 m	9,1 m
Hartelbrug (Hartelkanaal)	a	82,22	0,17	271,68	0,81	189,46	0,63
	b	101,92	0,00	289,17	0,87	187,25	0,87
	c	108,76	0,00	289,49	1,33	180,73	1,33
	d	83,60	0,00	275,40	0,19	191,80	0,19
	e	86,62	0,00	282,25	0,00	195,63	0,00
Spijkenissebrug (Oude Maas)	a	6,47	0,01	151,63	0,34	145,16	0,33
	b	21,63	0,00	174,20	0,12	152,58	0,12
	c	28,04	0,00	174,33	0,09	146,30	0,09
	d	10,33	0,00	156,64	0,00	146,31	0,00
	e	9,10	0,00	156,88	0,00	147,78	0,00
Willemsbrug (Nieuwe Maas)	a	5,95	0,10	136,98	0,41	131,03	0,31
	b	19,79	0,00	156,33	0,23	136,55	0,23
	c	25,83	0,00	156,18	0,25	130,35	0,25
	d	8,89	0,00	141,06	0,00	132,17	0,00
	e	7,63	0,00	141,56	0,00	133,93	0,00
Spoorbrug Dordrecht (Oude Maas)	a	355,22	0,35	359,64	2,15	4,42	1,80
	b	363,67	0,58	363,67	21,89	0,00	21,31
	c	363,57	0,00	363,57	8,15	0,00	8,15
	d	356,53	0,00	360,69	2,58	4,16	2,58
	e	364,23	0,00	364,23	0,02	0,00	0,02
Moerdijkbrug spoor (Hollands Diep)	a	365,01	2,65	365,01	316,13	0,00	313,48
	b	365,01	13,15	365,01	312,89	0,00	299,74
	c	365,01	13,87	365,01	344,13	0,00	330,26
	d	366,01	4,30	366,01	320,32	0,00	316,02
	e	365,01	0,13	365,01	327,74	0,00	327,62
Merwedebrug A27 (Boven Merwede)	a	28,74	0,00	47,33	0,87	18,59	0,87
	b	189,94	26,56	198,11	27,50	8,17	0,94
	c	39,64	5,86	47,80	7,19	8,16	1,33
	d	40,38	1,96	56,49	7,19	16,11	5,24
	e	105,41	0,00	116,33	0,00	10,92	0,00
Keizersveer (Bergsche Maas)	a	365,01	6,19	365,01	359,08	0,00	352,89
	b	365,01	36,51	365,01	357,45	0,00	320,94
	c	365,01	42,73	365,01	359,35	0,00	316,62
	d	366,01	22,03	366,01	357,18	0,00	335,15
	e	365,01	9,02	365,01	359,38	0,00	350,36

Uit deze tabel blijkt, dat een jaar als referentiejaar a (T=100) met extreme vloed niet noodzakelijkerwijs leidt tot de grootste problemen voor de doorvaarthoogte. Bij veel bruggen is de onderschrijding bij een zeer nat jaar (b, T=50) of een jaar zoals referentiejaar c (T=10) met hevige stormen problematischer.
Voor de Moerdijkbrug, Merwedebrug en Keizersveerbrug is in het huidige klimaat reeds sprake van forse onderschrijding van de doorvaarthoogte, zeker voor 4-laags high cube, maar ook al voor 4-laags standaard. Het klimaatscenario maakt dit veel ernstiger voor Moerdijk en Keizersveer. Voor de veel dieper landinwaarts gelegen Merwedebrug valt het effect van de klimaatverandering relatief mee.
Voor de Keizersveerbrug moet worden opgemerkt, dat deze binnenkort als onderdeel van het project A27 Houten-Hooipolder wordt vervangen door een hogere brug, rekening houdend met zeespiegelstijging.

De Hartelbrug en de spoorbrug Dordrecht zijn in het huidige klimaat eigenlijk alleen beschikbaar voor 4-laags standaard; weinig tot helemaal niet voor vaart met 4-laags high cube-containers, zelfs niet in het mediane jaar of een jaar met de minste hinder. Het klimaatscenario maakt deze situatie nog iets erger.

De Spijkenissebrug en de Willemsbrug voldoen een groot deel van de tijd wél voor 4-laags high cube en vrijwel altijd voor 4-laags standaard. Het klimaatscenario heeft een groot effect op de beschikbaarheid van de doorvaarthoogte voor 4-laags high cube - bijna een halvering van de beschikbare tijd - maar amper voor 4-laags standaard.

5.2.2.2 Waterstandsduurlijnen en beschikbaarheid van doorvaarthoogtes

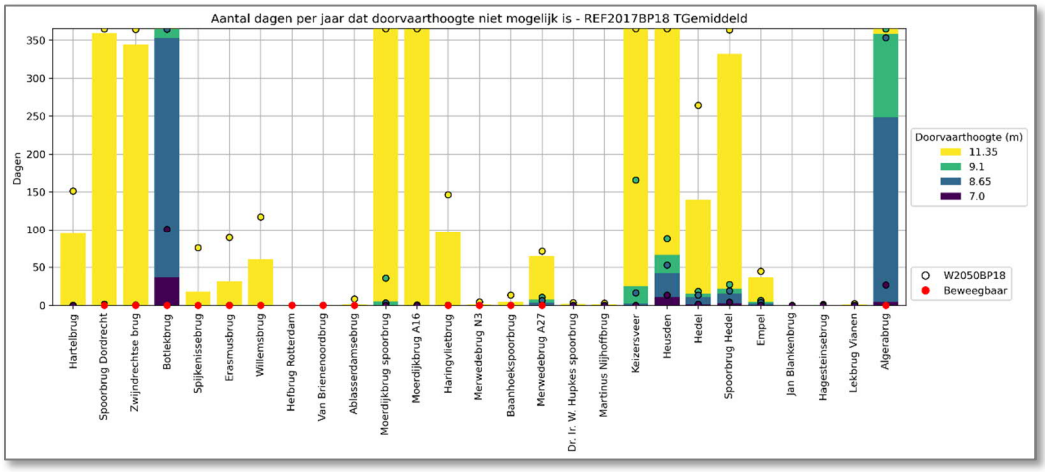
Ook voor de bruggen in de Rijn-Maasmonding zijn voor elke brug waterstandsduurlijnen gemaakt. Hieruit blijkt, hoe vaak de doorvaarthoogte bij iedere brug in een gemiddeld jaar, of bij een specifieke herhalingstijd wordt onderschreden.

Dit is in onderstaande figuren gevisualiseerd met staven (huidige klimaat) en bolletjes (toekomstig klimaat) voor de herhalingstijden 2 (boven) en 10 jaar (onder). Deze geven aan, hoe lang een bepaalde doorvaarthoogte niet beschikbaar is.

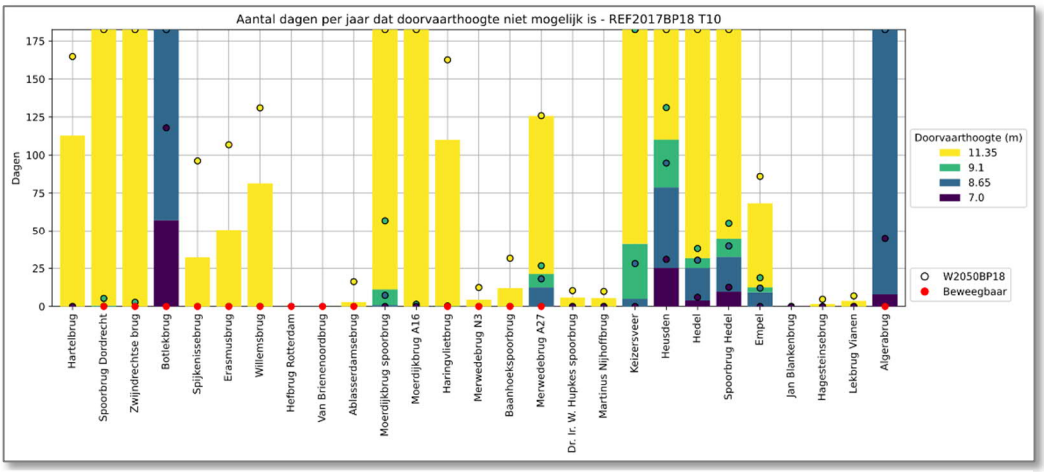
Daarbij zijn voor alle bruggen vier overschrijdingsniveaus gegeven. Voor de bruggen langs de Hollandse IJssel[14] zijn de laagste niveaus van belang (7,0 en 8,65 m) voor de rest van de Rijnmaasmonding gelden de hogere niveaus (9,1 en 11,35 m).

[14] Deze bruggen worden beheerd door de provincie Zuid-Holland.

Terugkeertijd: 2 jaar



Terugkeertijd 10 jaar



Figuur 18: Aantal dagen dat de doorvaarthoogte niet beschikbaar is, voor een gemiddeld jaar (T2, boven) en een herhalingstijd van 10 jaar (onder).

Uit deze analyse kan voor het huidige klimaat het volgende worden geconcludeerd:

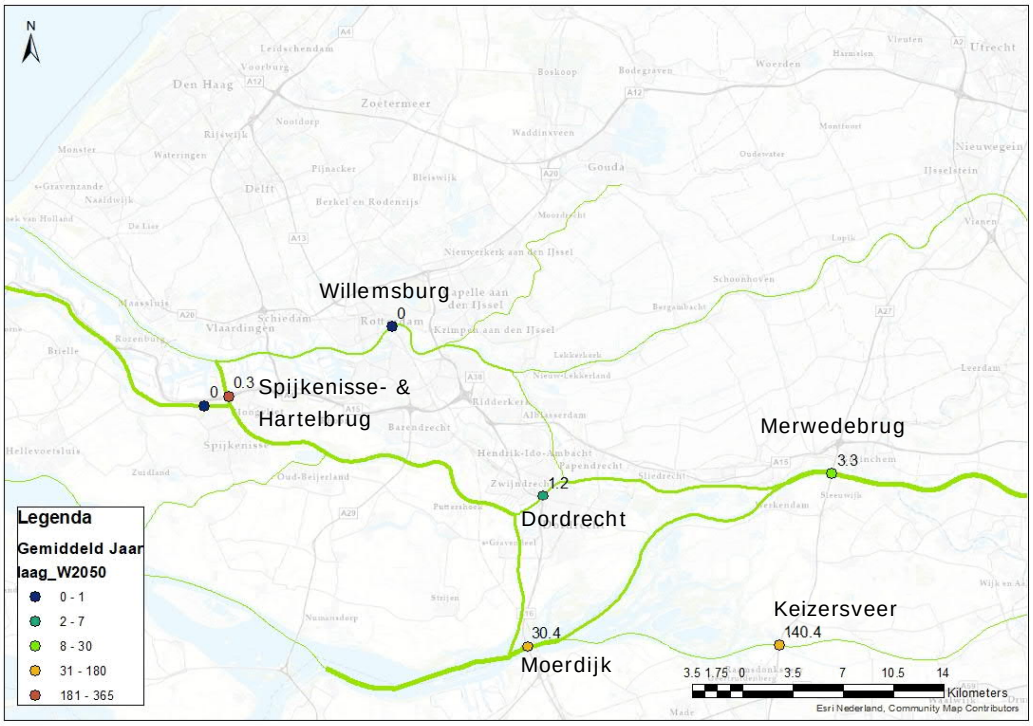
- In een gemiddeld jaar zijn er acht bruggen die nooit beperkend zijn voor een doorvaarhoogte van 11,35 m en twee bruggen die minder dan 2 dagen (48 uur) beperkend zijn. Voor zeven bruggen geldt een toenemende niet-beschikbaarheid voor 11,35 m, van 20 dagen voor Spijkenissebrug tot 140 dagen voor de Merwedebrug. Voor de laatste tien bruggen is een hoogte van 11,35 m het hele jaar niet mogelijk.
- Van de bruggen die het gehele jaar een hoogtebeperking vormen, kunnen de bruggen bij Moerdijk, Hedel en Keizersveer niet geopend worden en is de hoogtebeperking dus permanent.
- Bij een herhalingstijd van 10 jaar (T10) is grotendeels hetzelfde beeld zichtbaar, met voor iedere brug nog méér dagen met onvoldoende hoogte. Bij de Merwedebrug 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.

De situatie verandert als volgt voor het klimaatscenario W2050 met een zeespiegelstijging van 100 cm:

- In een gemiddeld jaar neemt de beschikbaarheid van de doorvaarthoogte bij vrijwel alle bruggen af. De veranderingen zijn het sterkst bij de mondingen, in de ordegrootte van 50 dagen en nemen richting de bovenloop van de rivieren af.
- De brug bij Keizersveer valt op, doordat een doorvaarthoogte van 9,1 m bijna het hele jaar niet meer haalbaar is.

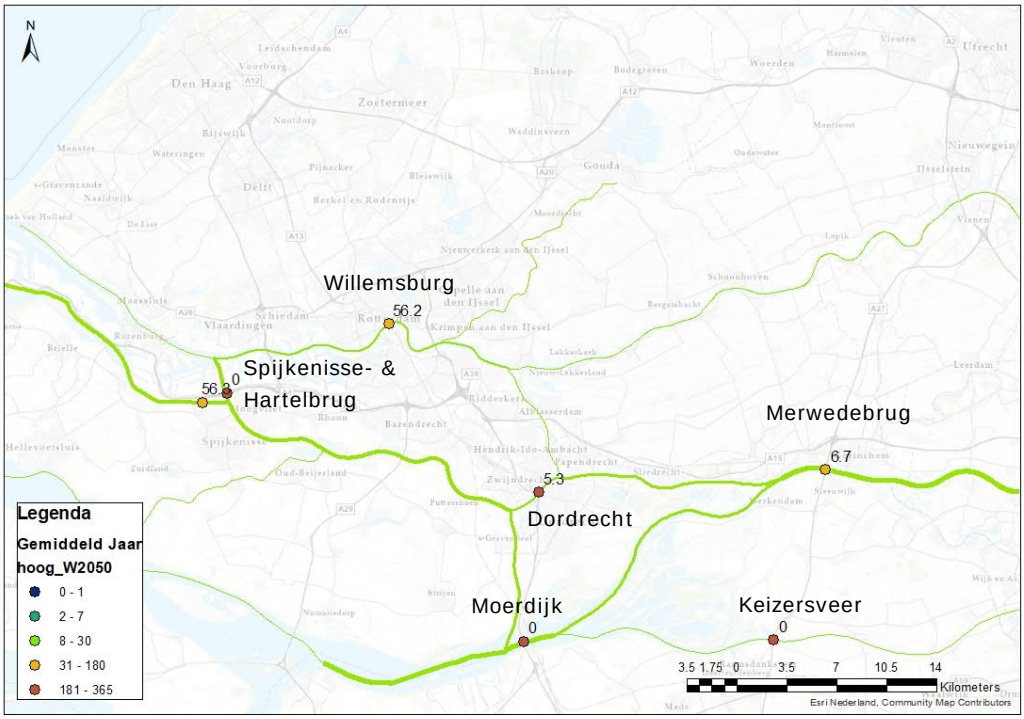
In de figuren hieronder zijn de onderschrijdingsduren voor het klimaatscenario en toename in onderschrijdingsduur ruimtelijk weergegeven voor een gemiddeld jaar. De kleur van de bol geeft de niet-beschikbaarheid in dagen in het huidige klimaat. Het getal naast de bol geeft de verandering (toename) van de niet-beschikbaarheid als gevolg van de klimaatverandering.

De knelpunten Moerdijkbrug en Keizersveerbrug vallen direct op bij de lage indicatieve waarden van 9,10 m. In het toekomstig klimaat bereiken deze bruggen voor 9,10 m de maximum niet-beschikbaarheid van 365 dagen (zie ook tabel 6).



Figuur 19: Onderschrijdingsduur doorvaarthoogte 9,10 m Rijn-Maasmonding voor absolute duur over een gemiddeld jaar (kleurcode in bollen) en toename (getal naast de brug) ten opzichte van huidig klimaat.

De Willemsbrug, Hartelbrug, Spoorbrug Dordrecht en de Merwedebrug laten pas bij hoge indicatieve waarde 11,35 m (onderste figuur) een groot verschil zien tussen het huidige en toekomstig klimaat. Daarbij is de toename in onderschrijdingsduur groter rondom Rotterdam en Spijkenisse dan verder naar het achterland, waar de invloed van de zee geringer is.
De Moedijkbrug en Keizersveerbrug bereiken reeds nabij 9,10 m de maximum niet-beschikbaarheid van 365 dagen, waardoor er bij de hoge indicatieve waarde geen 'extra' onderschrijdingsduur meer bij komt (dus 0 naast de bol). Spoorbrug Dordrecht bereikt bij 11,35 m ook de maximum niet-beschikbaarheid (365 dagen).



Figuur 20: Onderschrijdingsduur doorvaarhoogte 11,35 m Rijn-Maasmonding voor absolute duur over een gemiddeld jaar (kleurcode in bollen) en toename (getal naast de brug) ten opzichte van huidig klimaat.

5.3 Gevolgen van afname van de doorvaarthoogte

In de onderstaande paragrafen wordt de impact van de verwachte afname van de doorvaarthoogte beschreven. Daarbij wordt gekeken naar de impact in termen van het *verlies* van containers die niet meer kunnen worden vervoerd doordat er een laag minder kan worden meegenomen.
Daarna wordt stilgestaan bij de verwachte reacties van de sector op deze impact.

5.3.1 Impact

Op basis van de uitkomsten van de vorige paragrafen kan een indicatie worden gegeven voor het aantal containers dat niet meer vervoerd kan worden door het toenemen van de waterstand in het toekomstige klimaatscenario.
De berekening is aanvankelijk alleen uitgevoerd voor de belangrijkste corridor, de Waal. Begin 2022 is dit uitgebreid met de Maas, IJssel en Lek en is de berekeningsmethodiek enigszins verfijnd.
De resultaten zijn bedoeld om een beter beeld te krijgen van de mogelijke gevolgen en daarmee ook de mogelijke reacties.

In de paragraaf *blootstelling* (3.4) is reeds op basis van metingen een schatting gemaakt van het aantal containers dat per dag niet vervoerd kan worden als de benodigde brughoogtes niet beschikbaar zijn, waarbij is aangenomen dat een containerlaag bij alle containerschepen vervalt bij onderschrijding van de indicatieve waarde. Voor de lage indicatieve waarde 8,65 m was dit 411 TEU per dag, voor de hoge indicatieve waarde 11,35 m 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 9).

Door deze blootstelling te vermenigvuldigen met het aantal dagen dat de indicatieve waarden worden onderschreden, wordt het risico (de impact) berekend.
Uitgaande van distributiekrommes van de afvoer bij Lobith, en een berekening van de beschikbare doorvaarthoogte bij iedere brug per afvoer, is een distributiekromme opgesteld van de beschikbare doorvaarthoogte op iedere riviertak.
Dit is vervolgens per riviertak gecombineerd met de brughoogtes en vervoersvolumes.
Dit resulteert in de volgende impact per riviertak (TEU per jaar):

Tabel 7: Verlies aan niet vervoerde containers door onvoldoende doorvaarthoogte in het huidige klimaat en bij snelle klimaatverandering in 2085, uitgaande van een gelijk aantal schepen dat wordt ingezet.

			Verlies in containers per jaar door onvoldoende doorvaarthoogte					
	Huidig vervoer		Huidig klimaat/ref			Toekomstig $W_{H,dry}$, 2085		
Riviertak	TEU/jaar	TEU/dag	T 10	T 50	T 100	T 10	T 50	T 100
Waal	2.084.260	5.706	1.857	2.742	3.119	2.873	4.896	5.472
Lek	665.988	1.823	0	0	0	0	147	160
Maas	281.695	771	949	1.480	1.598	1.232	1.835	1.856
IJssel	68.041	186	278	382	≥ 430	301	394	≥ 430

De tabel laat zien, dat in het huidige klimaat reeds uitval optreedt bij jaren met hoge waterstanden (T_{10}). Alleen de Lek (traject kruising Amsterdam-Rijnkanaal tot monding) kent in het huidig klimaat geen beperkingen.
Bij snelle klimaatverandering neemt de uitval toe en ontstaan ook op de Lek heel soms problemen bij brug Hagestein. Op de Maas neemt de uitval toe van ca. 1.000 TEU nu tot maximaal 1.850 (T_{100}) bij scenario $W_{H,dry}$ 2085. Daarmee is de uitval op de Maas verhoudingsgewijs groter van bijv. op de Waal, omdat de Maas *slechts* ca. 280.000 TEU per jaar vervoert, tegen ruim 2 miljoen TEU voor de Waalcorridor.

Voor de IJssel en Maas - met ontwerphoogte 7,0 m - moet worden bedacht, dat qua waterhoogte de maxima al snel worden bereikt, en dat nóg extremere jaren alleen nog verschil laten zien in het aantal dagen dat de doorvaarthoogte niet beschikbaar is. Het effect van nóg hogere afvoeren is daarom gering. Voor de Waal en Lek geldt dit niet; de bruggen liggen daar relatief zo hoog, zodat extreem hoogwater daar effect blijft sorteren.
Afgezet tegen het totale vervoer is de uitval op de riviertakken in de ordegrootte van 1% en dus relatief klein.

5.3.2 Reacties

In de nu volgende paragrafen worden de mogelijke reacties van de sector op de impact behandeld.

5.3.2.1 Niet of later varen

Het geheel niet varen vanwege te geringe doorvaarthoogte ligt niet voor de hand. Het 'uitzitten' van een piek in de waterstanden is in een getijdegebied wel te timen, maar is ook afhankelijk van nauwkeurige voorspellingen en strakke logistieke planning. Mogelijk zal er voor gekozen worden om niet te wachten, maar te varen met een laag containers minder.

5.3.2.2 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 zullen zijn. De route over de Nieuwe Maas ten opzichte van de Oude Maas ter vermijding van de 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.
Overigens moet dan vaak wel gebruik worden (kunnen worden) gemaakt van de oostkolk van sluis Weurt; de westkolk van dit complex heeft hefdeuren met een doorvaarthoogte van nog ca. 5,50 m bij maximaal kanaalpeil in Heumen.

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

Door de geringe doorvaarthoogte bij de bruggen van Deventer komt de containervaart al snel in de knel op de IJssel. Daar waar de stadsbrug Deventer met 5,52 doorvaarthoogte bij MHW beperkend is voor verkeer in noordelijke richting, is het 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. Daarbij moet echter worden opgemerkt, dat ook veel van de andere IJsselbruggen erg laag liggen, waaronder de Katerveerbrug (5,86 m @ MHW) bij Zwolle en de Alexander Ver Heull-brug bij Doesburg (6,00 m @ MHW). Daarmee is de doorvaarthoogte op vrijwel de gehele corridor beperkt, met uitzondering van de IJsseldelta.
Bovendien geldt voor alle schepen die van en naar de Twentekanalen varen, dat de bruggen over dat kanaal vaak nog veel beperkender zijn, met als laagste 6,30 m doorvaarthoogte (Dorrebrug) boven regulier kanaalpeil.

5.3.2.3 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. Veel van deze bruggen kunnen echter maar tot een beperkte hoogte open (hefbrug) en in deze studie is reeds 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 te worden opgemerkt, dat de knelpunten (Merwedebrug en spoorbrug Dordrecht) zijn gelegen in respectievelijk een drukke snelweg (A27) en een drukke spoorlijn (Amsterdam-Rotterdam-Brabant/Zeeland-Antwerpen).
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.

5.3.2.4 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 beschikbaarheid van personeel in de transportsector een steeds groter probleem wordt. Dus zelfs als de schepen voorhanden zijn, is het niet zeker dat alle schepen voldoende bemand kunnen worden.
Een *groot rijnschip*[15] 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 circa 3.068 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.

5.3.2.5 Andere vervoersmodaliteiten

Er is slechts een beperkte capaciteit beschikbaar bij de overige modaliteiten weg en 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 3.068 TEU te vervoeren zijn 1.534 reizen met vrachtwagens of 31 extra treinen nodig. Of dit mogelijk is dient onderzocht te worden met behulp van een capaciteitsanalyse.

5.3.3 Mogelijke maatregelen

Tot slot wordt nog stilgestaan bij mogelijke maatregelen om de impact van de klimaatverandering op de doorvaarthoogte te beperken. Daarbij staan praktisch gezien slechts twee opties ter beschikking: bruggen verhogen of waterstand verlagen.

[15] Klasseindeling RWS; type M8, 110 x 11,40 m; Richtlijnen Vaarwegen 2020, tabel 8.

5.3.3.1 Aanpassen infrastructuur

Het verhogen van bruggen is een kostbare aangelegenheid en lang niet overal mogelijk door beperkte ruimte. De kosten van het opvijzelen van wegbruggen bedragen - afhankelijk van de grootte van de brug - ca. 2 tot 5 miljoen euro. Spoorbruggen zijn vaak veel duurder om te verhogen, omdat spoortracés een geringe maximumhelling kennen en daarom veelal extra lange taluds aan weerzijde van een brug nodig hebben. De ordegrootte van de kosten van verhoging van spoorbruggen is 10 tot 20 miljoen euro.
Daarbij geldt bovendien, dat verhoging alleen mogelijk is wanneer er géén station direct achter de brug is gelegen, anders zou ook het gehele station en vaak daarbij behorend emplacement óók moeten worden verhoogd. Dat sluit bijvoorbeeld verhoging van de spoorbruggen Deventer en Zutphen op voorhand uit.

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.

5.3.3.2 Aanpassen waterpeil

Voor sommige peilgereguleerde systemen is het tot een bepaalde hoogwaterstand mogelijk om - eventueel tijdelijk - het peil te laten zakken om zodoende meer doorvaarthoogte te creëren. Dit gaat echter ten koste van de beschikbare vaar- en aflaaddiepte en wordt daarmee al snel een 'keuze uit twee kwaden'.
Een en ander is afhankelijk van het 'typische' gebruik van de betreffende vaarweg. Containerschepen bereiken zelden hun volledige diepgang, terwijl zand- en grindschepen vrijwel uitsluitend op maximale diepgang varen. Bij gemengd gebruik van een vaarweg door diverse deelsectoren zal verlaging van het peil vrijwel altijd een nadeel opleveren voor een deelsector. Bovendien is het te hanteren peil op veel vaarwegen onderdeel van waterakkoorden, waarin de belangen en eisen van landelijke en regionale partijen zijn vastgelegd. Peilaanpassingen kunnen daarom niet eenvoudig worden doorgevoerd.

5.3.3.3 Ballasten van containerschepen

Veel moderne containerschepen zijn uitgerust met ballasttanks waarmee de diepgang en dus ook de kruiphoogte van het schip kan worden beïnvloed. Ballasten wordt veelal gedaan vanuit stabiliteitsoogpunt, maar ook kan de kruiphoogte ermee aanzienlijk worden verkleind. Wel moet worden bedacht, dat het meevoeren van ballast - zeker over grotere afstanden - leidt tot een hoger brandstofverbruik.
Of en tot welke beperkingen qua doorvaarthoogte ballasten een haalbare oplossing is, zal nader moeten worden onderzocht.

5.3.3.4 Informatievoorziening

Informatievoorziening met betrekking tot de beschikbare doorvaarthoogte kan helpen om incidenten te voorkomen. Dit is met name relevant in het getijdegebied waar de doorvaarthoogte snel kan veranderen en hoogtebeperkingen een beperkt deel van het getij kunnen optreden. Voorts kunnen voorspellingen omtrent hoogwatergolven en extreme getijden helpen bij het beter plannen van de vertrek- en aankomstmomenten.

5.4 Effecten op de nautische veiligheid

In een apart onderzoek is een kwalitatieve verkenning gedaan naar de effecten van klimaatverandering op de nautische veiligheid op de Nederlandse binnenwateren en de Noordzee.
In deze verkenning zijn de klimaatbedreigingen verkend en de te verwachten effecten vertaald naar de risicobeoordeling van bestaande toprisico's.
Per nautisch toprisico (een type scheepsongeval) is aangegeven, of door een klimaatbedreiging en diens gevolgen voor de vaarweg en scheepvaart, de kans op en de gevolgen van een scheepsongeval toenemen of afnemen.
Daarbij is gebruik gemaakt van expert judgement van verschillende expert. Een voorbeeld van zo'n beoordeling is weergegeven in onderstaande tabel:

Tabel 8: voorbeeld inschatting effect hoogwater op toprisico nautische veiligheid

Aanvaring brug door beroepsvaart — Beoordeeld door:
Klimaatscenario: Hoogwater — Adviseur + 5 experts

	-25%	-10%	-5%	-1%	0%	1%	5%	10%	25%	50%	100%
Kans neemt af/toe						3	3				
Gevolgen nemen af/toe					3	2	1				
Risicoscore oud:	62,411				Risicoscore nieuw:				66,187		

De effectinschatting is rekenkundig verwerkt tot een *toename van de risicoscore*. De initiële risicoscore is per toprisico bepaald op basis van geregistreerde incidenten en daaruit voortvloeiende effecten over een periode van 8 jaar, zoals weergegeven in onderstaand voorbeeld:

Effect klasse	Piramide risico typering categorie	Aantal ongevallen [in 8 jaar]
5	Zeer ernstig	0 (0%)
4	Ernstig	24 (3%)
3	Beperkt	54 (6%)
2	Licht	65 (8%)
1	Zeer licht	210 (25%)
0	Nihil	489 (58%)
Totaal aantal incidenten		842 (100%)
Totale risico score per 8 jaar		302,600
Gemiddelde risicoscore per jaar		37,825

Figuur 21: Risicopiramide en bepaling risicoscore voor een toprisico op basis van geregistreerde scheepsongevallen.

In de onderstaande paragraaf wordt stilgestaan bij de *verandering van kans en effect* als gevolg van hoogwater.

Daarbij is de volgende uitsnede gemaakt van toprisico's vanwege de te verwachten effecten van hoogwater:

- Aanvaring van een brug door beroepsvaart
- Aanvaring tussen beroepsvaart onderling

Bij deze selectie van toprisico's speelden de volgende overwegingen, gerelateerd aan de problematiek van afnemende doorvaarthoogte van bruggen:

- Uit onderzoek blijkt, dat aanvaringen van bruggen door beroepsvaart in veel gevallen worden veroorzaakt door inschattingsfouten van de schipper, technische storingen van het schip, technische storingen van de brug en bedienfouten van de operator. Inschattingsfouten kunnen ontstaan door het verkeerd inschatten van de hoogte van de brug of door misinterpretatie van de omgevingsomstandigheden (wind, stroming). Ook komt het voor, dat de schipper het schip opzettelijk laat inzakken (door extra gas te geven) om net onder de brug door te kunnen varen. Deze manoeuvre kan ook een aanvaring inleiden. Tenslotte kan een aanvaring ontstaan door technische mankementen, zoals het uitvallen van het brugmechaniek, een motorstoring van het schip of het uitvallen van de stuurinrichting. De schipper kan de brug dan niet meer ontwijken door een technisch probleem.
  Door hoogwater neemt de effectieve doorvaarthoogte bij bruggen af. Hierdoor nemen de hierboven genoemde kansen toe.
- Daarnaast zal met name de afvaart last krijgen van de (beperkte) extra stroming die ontstaat door de hogere rivierafvoer. De afgaande schepen moeten met iets hogere snelheden varen om manoeuvreerbaar te blijven. De schippers moeten hierdoor verder vooruitkijken en het manoeuvreren tussen de brugpijlers wordt lastiger. Door de toegenomen snelheid kunnen de gevolgen van een aanvaring in ernst toenemen.
- Verminderde doorvaarthoogte leidt er mogelijk toen, dat meer schepen *opening* van een beweegbare brug vereisen. Hierdoor kan lokaal extra drukte ontstaan voor de bruggen. Dit kan leiden tot extra aanvaringen tussen beroepsvaart onderling.
- Wanneer het aantal beschikbare brugopeningen[16] per tijdeenheid daarbij ook nog beperkt is en/of een maximale openingstijd geldt - zoals bijvoorbeeld bij een aantal bruggen in Rijnmaasmonding - dan ontstaan extra potentieel gevaarlijke situaties, omdat er meer schepen in dezelfde tijd de brug moeten passeren. Daarnaast leidt dit mogelijk ook tot een hogere bezetting van de ligplaatsen bij bruggen met meer manoeuvreerbewegingen. Hogere en langdurige ligplaatsbezetting kan voor schepen met containers met gevaarlijke lading een extra veiligheidsissue (externe veiligheid) inhouden.

Invloed hoogwater op toprisico's

Het in dit deelrapport beschouwde effect van hoogwater op de nautische veiligheid is weergegeven in onderstaande tabel. Daarbij zijn van links naar rechts de oorspronkelijke risicoclassificering, verandering van het risico en nieuwe risicoclassificering 'met effect' weergegeven.

[16] Met 'opening' wordt niet verwezen naar de fysieke doorvaartopening, maar naar de tijdvensters waarbinnen een beweegbare brug kan worden geopend om beroepsvaart te laten passeren. Deze vensters worden mede bepaald door de eigenschappen van het kruisende verkeer, bijv. een drukke verkeersweg, autosnelweg en/of spoorlijn.

Confrontatiematrix Binnenwateren	Risicoclassificering	Hoge rivierafvoer	Risicoclassificering met effect
Aanvaring van een brug door beroepsvaart		1,06	
Aanvaring tussen beroepsvaart onderling		1,06	

Tabel 9: Confrontatiematrix Binnenwateren

Groen – laag risico, geel – midden risico, oranje – hoog risico, rood – zeer hoog risico

Door hoogwater neemt het risico op aanvaring van een brug door beroepsvaart toe, en ook neemt in de omgeving van de brug de kans op aanvaring tussen beroepsvaart onderling toe, met name als het aantal beschikbare brugopeningen en de openingsduur beperkt is. De verandering van het risico leidt evenwel niet tot een andere risicoclassificering van de geselecteerd nautische toprisico's.

Mitigerende maatregelen

De in dit kader genoemde mitigerende maatregelen zijn dezelfde als genoemd in paragraaf 5.3.3.4, namelijk goede informatievoorziening vooraf. Als de condities vooraf bekend zijn, dan kan de schipper hier rekening mee houden en hierop acteren. Het gaat hierbij over het meten van de omstandigheden (stroming, wind, diepte, golven, doorvaarthoogte, voorspellingen waterhoos).

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusie

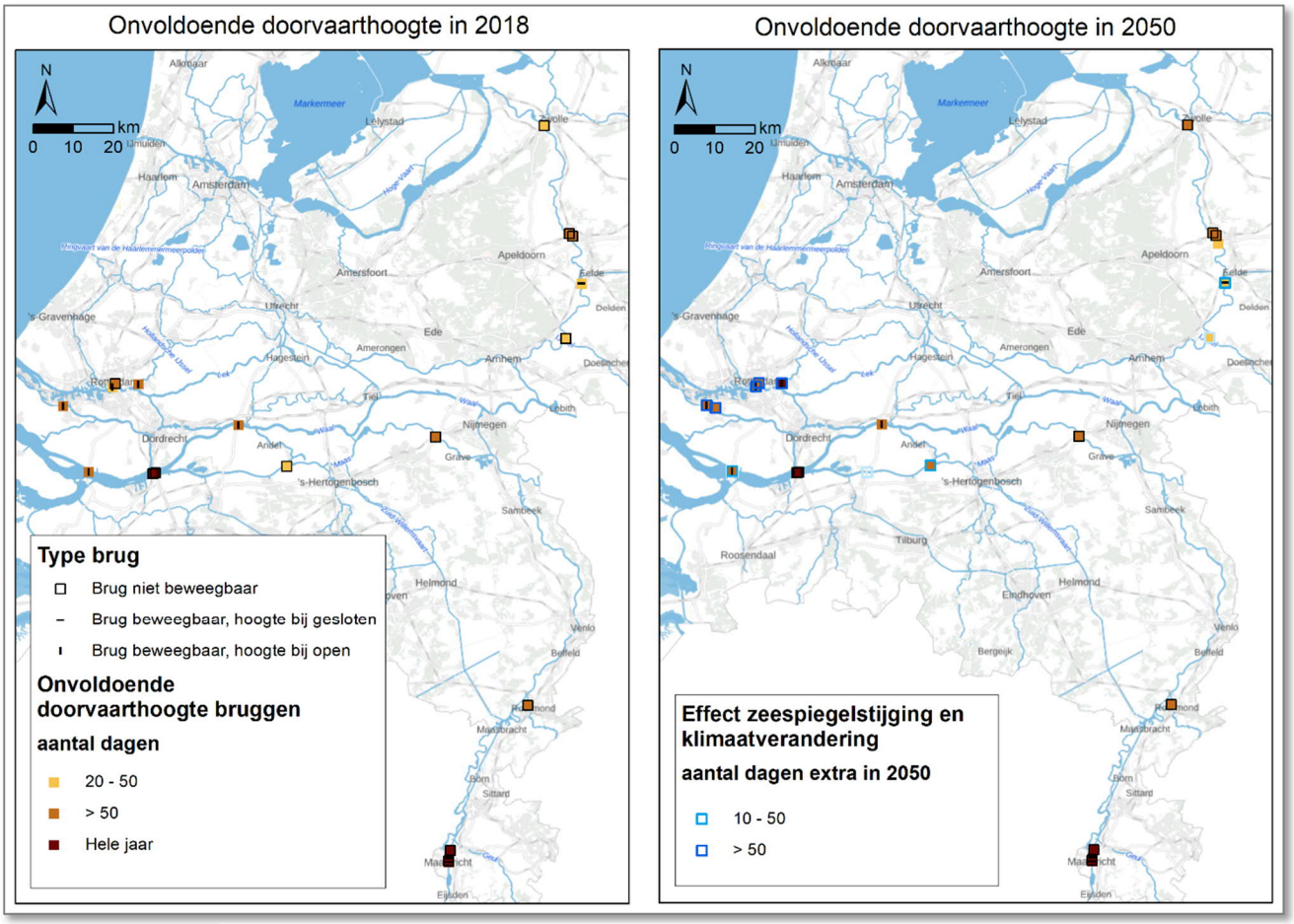
In onderstaande tabel is het effect van klimaatverandering op de doorvaarthoogte van de onderzochte vaarwegen samengevat. Daarbij is het aantal dagen weergegeven dat er op een bepaald traject onvoldoende doorvaarthoogte beschikbaar is voor de relevante indicatieve waarden.

Systeem	Huidige klimaat (Ref)	Klimaatverandering W_H2085
Waal (9,10 / 11,35)	Nauwelijks (ook niet voor 11,35 m)	T_{10}: enkele dagen $T_{50/100}$: tot ca. 2 weken
IJssel (7,00 / 8,65 / 9,10)	Knelpunt voor CEMT-klasse Va T_2 (7,00 m): 10 dagen	T_{10} (7,00 m): >50dagen T_{gem} (8,65 m): >50dagen
Nederrijn/Lek (9,10 / 11,35)	Nauwelijks	T_{10}: enkele dagen. $T_{50/100}$: tot ca. 2 weken
Maas (7,00 / 8,65 / 9,10)	9,10 m wordt op meerdere locaties niet gehaald. 8,65 m wordt op sommige trajecten gehaald 7,00 m is op de meeste locaties beschikbaar	7,00 m → Effect is gering Extreme jaren: tot ca. 2 weken 8,65 m → toename T_2: 2 weken → toename T_{10}: 4 weken
Rijn-Maasmonding (W_H2050 +1,00 m) (9,10 / 11,35)	9,10 m alleen Keizersveer vorm probleem, maar wordt verhoogd ihkv A27 HH 11,35 m alleen Willemsbrug & Spijkenissebrug <u>géén</u> probleem	9,10 m → Keizersveer & Moerdijkbrug Toename >300 dagen/jr. 11,35 m → overige bruggen vormen knelpunten Toename >100 dagen/jr.

Het algemene beeld is dat:
- op de Waal er in de toekomst pas bij extreme herhalingstijden problemen ontstaan, maar dat dit vooral geldt voor indicatieve waarde 11,35 m.
- op de IJssel en de Maas in de toekomst het aantal dagen dat er niet wordt voldaan de benodigde doorvaarthoogte, flink zal toenemen, maar dat de uitval in absolute zin beperkt blijft door het kleine vervoersvolume op deze riviertakken en het feit dat nóg hogere afvoeren niet veel méér bijdragen aan de uitval van niet-vervoerde containers.
- het in de Rijn-Maasmonding gaat om een tweetal specifieke bruggen die een knelpunt vormen voor 9,10 m, maar dat er voor 11,35 m meer knelpunten bij komen. Dit kan oplopen tot meer dan 100 dagen niet-beschikbaarheid.

Het aantal containers dat mogelijk niet kan worden vervoerd op de riviertakken tijdens hoogwater is beperkt: ca. 1 % van het totale vervoer van ca. 3 mln containers per jaar.

Onderstaand figuur geeft de knelpunten ruimtelijk weer voor het huidige klimaat (linker figuur) en geeft daarnaast het effect van voor toekomstige klimaat inclusief zeespiegelstijging weer als *extra dagen* niet-beschikbaarheid (rechter figuur).



Figuur 22: overzicht huidige knelpunten (2018) en effect klimaatverandering en zeespiegelstijging (2050).

6.2 Aanbevelingen voor vervolgstappen

Qua vervolgstappen en aanvullend onderzoek wordt het volgende geadviseerd:

- Onderzoeken van effecten van verhoogde stroomsnelheden op de rivier voor de scheepvaart. Dit zou het aanvaarrisico bij bruggen en tussen schepen onderling kunnen verhogen.
- Onderzoek naar de invloed van de boogwerking op de beschikbare doorvaarthoogte bij de stuwen op de Nederrijn, ook in relatie tot de benodigde padbreedte.

7 Literatuur

Referentie	Publicatie
Brolsma, 2015	Brolsma, J.U. (2015). *Rapportage containerhoogtemetingen - revisie 2015*. Brolsma Advies (eigen uitgave). Driebergen, 8 april 2015.
Deltares, 2017	Deltares (2017). *Deltascenario's voor de 21e Eeuw*. Actualisering 2017.
Deltares, 2021	Deltares (2021) - *Discussie over de normering van de doorvaarthoogte in Nederland, in relatie tot de normering in Duitsland en de gewenste doorvaarthoogte,* 15 november 2021.
IPCC, 2014	IPCC (2014). *Emergent Risks and Key Vulnerabilities*. Hst. 19 van Climate Change 2014 - Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A, Global and Sectoral Aspects. Working Group II, AR5.
KNMI, 2015	KNMI (2015). *Klimaatscenario's voor Nederland 2014*. Herziene uitgave 2015.
Van Nieuwenhuizen-Wijbinga, 2019	Van Nieuwenhuizen-Wijbenga, C. v. (2019). *Vervolg kosten-batenanalyse brughoogtes (vier kansrijke vaarwegcorridors)*. Brief regering, 2019.
Van der Wijk, 2020	Van der Wijk, R. (2020). *Klimaatbestendige Vaarwegen - Bepaling bedreiging en blootstelling doorvaarthoogte*. Deltares, 2020.
Van der Wijk & De Jong, 2021	Van der Wijk, R., & de Jong, J. (2021). Stresstest Doorvaarthoogte Hoofdvaarwegennet. Delft: Deltares.
WLO; CPB en PBL, 2015	CPB/PBL (2015). *Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving; Nederland in 2030 en 2050: twee referentiescenario's*.

Bijlages - Achtergrondinformatie

A Deelnemende partijen validatie- en risicodialogen

Interne validatiedialoog doorvaarthoogte
8 april 2021

Deelnemende organisaties:
- Directoraat-Generaal Luchtvaart en Maritieme Zaken (I&W)
- Deltares
- Maatschap voor Communicatie
- Rijkswaterstaat:
  - Oost-Nederland (ON)
  - Water, Verkeer en Leefomgeving (WVL)
  - West-Nederland Zuid (WNZ)
  - Zuid-Nederland (ZN)

Externe validatiedialoog doorvaarthoogte
13 juli 2021

Deelnemende organisaties:
- Directoraat-Generaal Luchtvaart en Maritieme Zaken (I&W)
- Deltares
- Havenbedrijf Amsterdam
- Havenbedrijf Rotterdam
- Koninklijke BLN Schuttevaer
- Maatschap voor Communicatie
- Rijkswaterstaat:
  - Corporate Dienst (CD)
  - Oost-Nederland (ON)
  - Water, Verkeer en Leefomgeving (WVL)
  - West-Nederland Zuid (WNZ)
  - Zuid-Nederland (ZN)

Interne risicodialoog 'bruggen' (hitte & doorvaarthoogte)
1 september 2021

Deelnemende organisaties:
- Directoraat-Generaal Luchtvaart en Maritieme Zaken (I&W)
- Rijkswaterstaat, Water, Verkeer en Leefomgeving (WVL)

B Bepaling bedreiging en blootstelling - memo Deltares

B.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.

B.2 Bedreiging

B.2.1 Zeespiegelstijging – Rijn-Maasmonding

B.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.

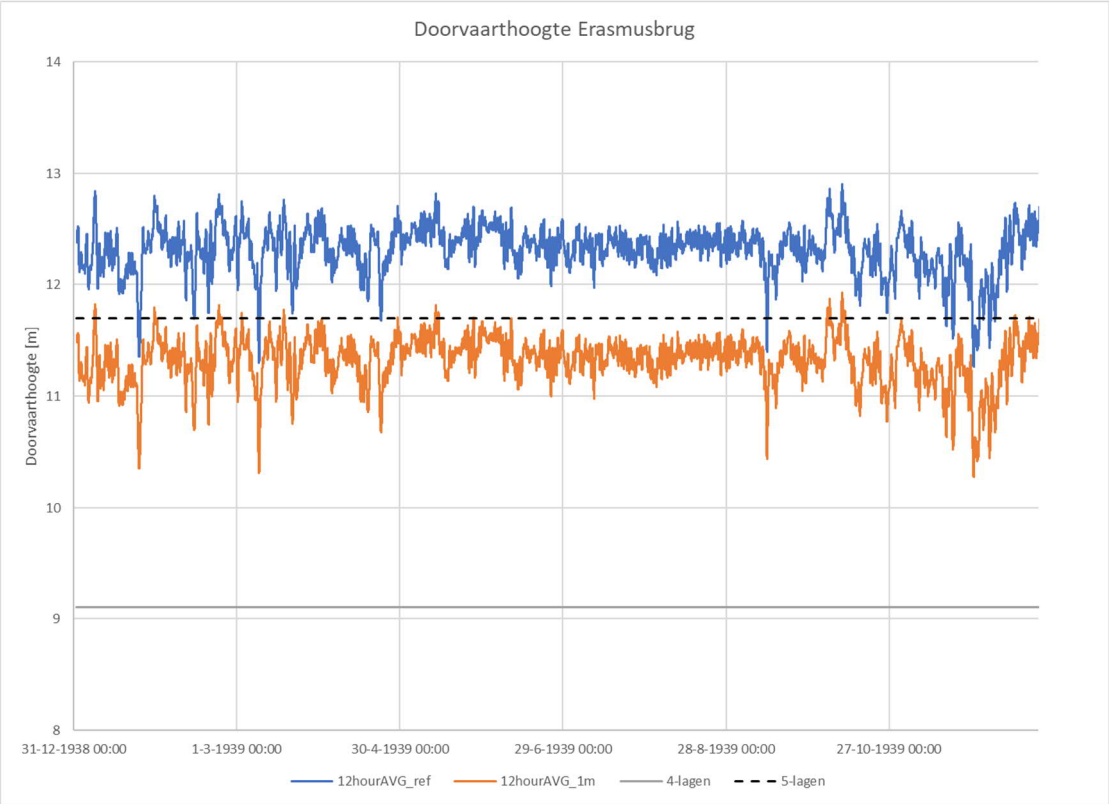
In het plan van aanpak is er voorgesteld om natte jaren (op basis van afvoer) met een herhalingstijd van 1, 2, 10 en 100 jaar te gebruiken. Dit is op meerdere manieren te interpreteren doordat beperkingen in doorvaarthoogte in het getijgebied een combinatie van factoren kan zijn. Zo is zowel te beargumenteren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

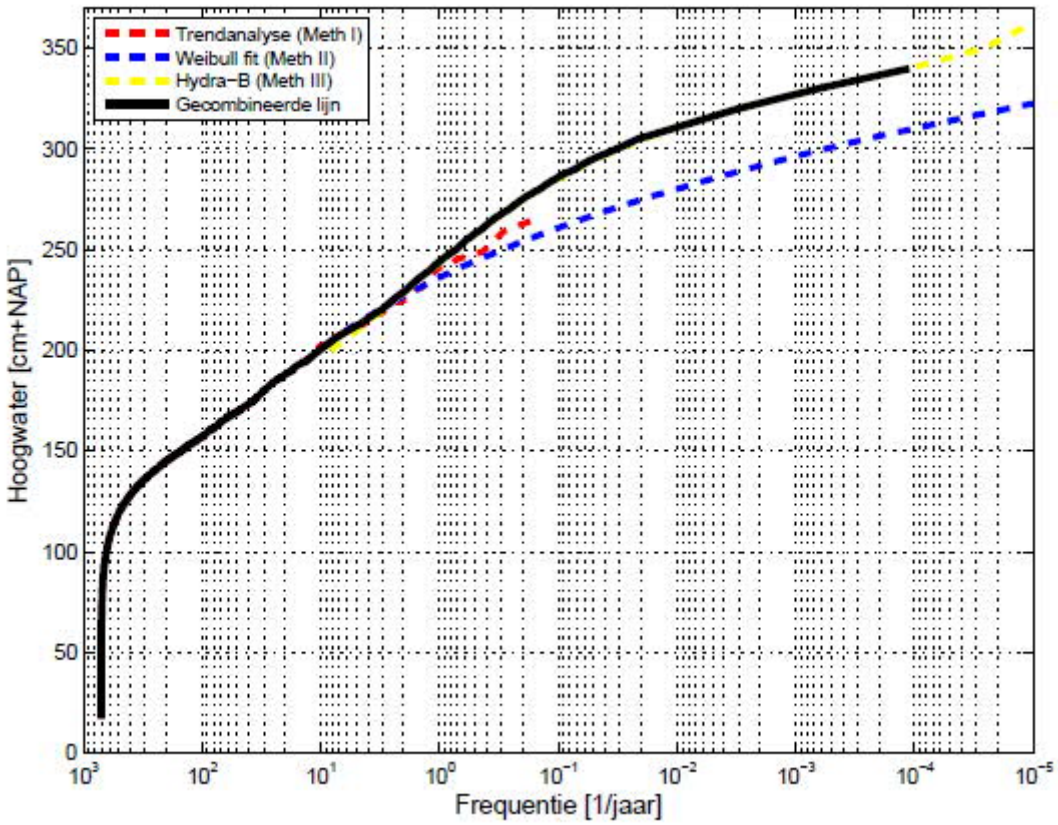


Figuur B.1 Doorvaarthoogte Erasmusbrug in 1939 met twee indicatieve waarden (4- en 5-lagen containers)

B.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 herhalingstijd 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 10.000 jaar voor bij Rotterdam (MHW). De lokale toename in waterstand zal niet overal 100% overeen komen 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.

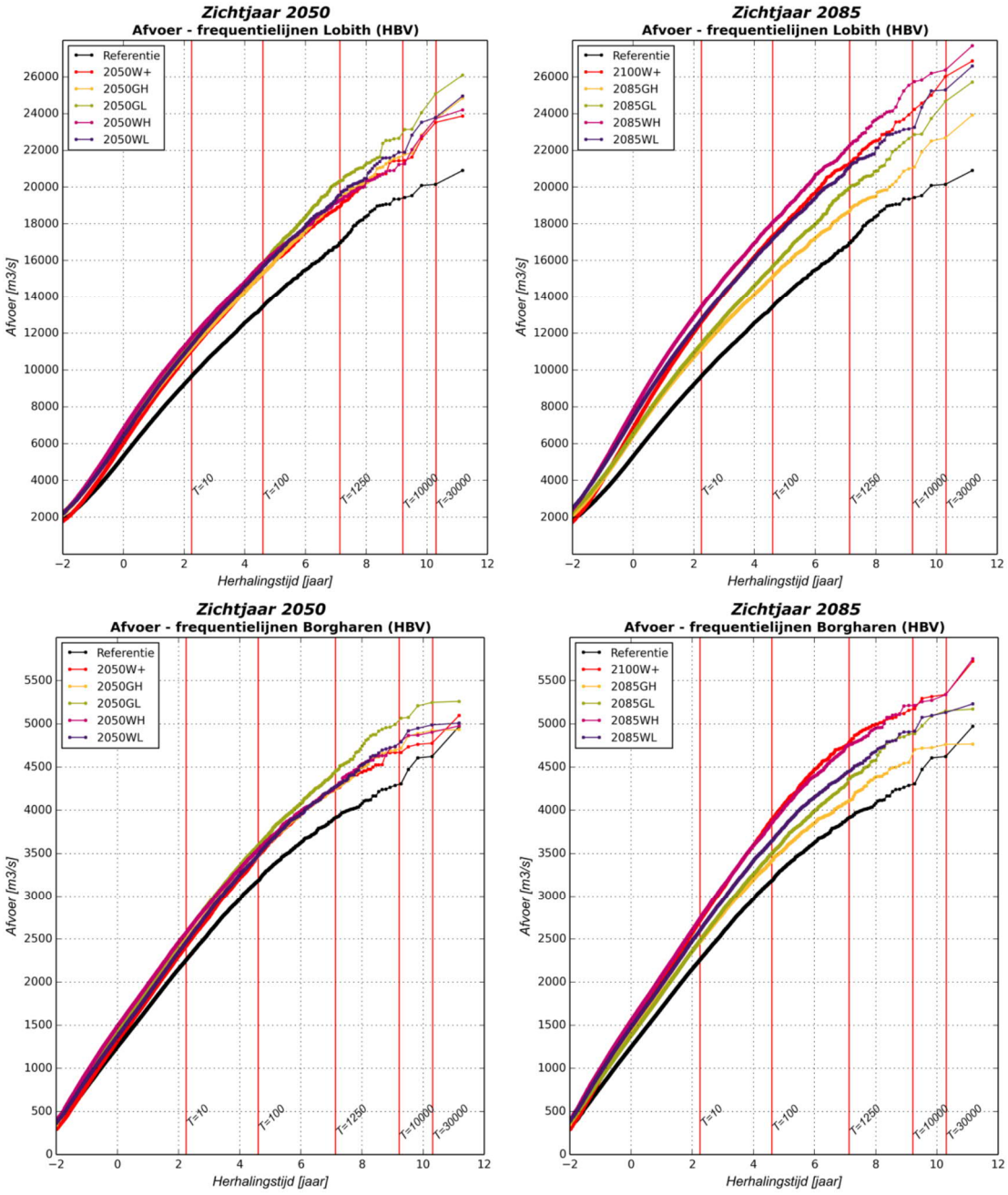
Dit getal zegt niet iets over de duur van de overschrijding maar geeft aan hoe vaak er rekening gehouden moet worden met beperkingen in de doorvaarthoogte.



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

B.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 jarenkunnen betrekkingslijnen 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 m^3/s bij. Deze afvoer heeft een herhalingstijd van 50 jaar in de referentie situatie en 10 jaar in het 2085WH scenario.



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

B.3 Blootstelling

B.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 doorvaarthoogte 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)

B.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)

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

$$containerCapaciteit = \left(\frac{0{,}9 * scheepsLengte - 10}{6{,}2}\right) * \left(\frac{scheepsBreedte - 1{,}5}{2{,}45}\right)$$

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

$$scheepsHoogte = containerLagen * 2{,}59 - scheepsDiepgang$$

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 scheep 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.

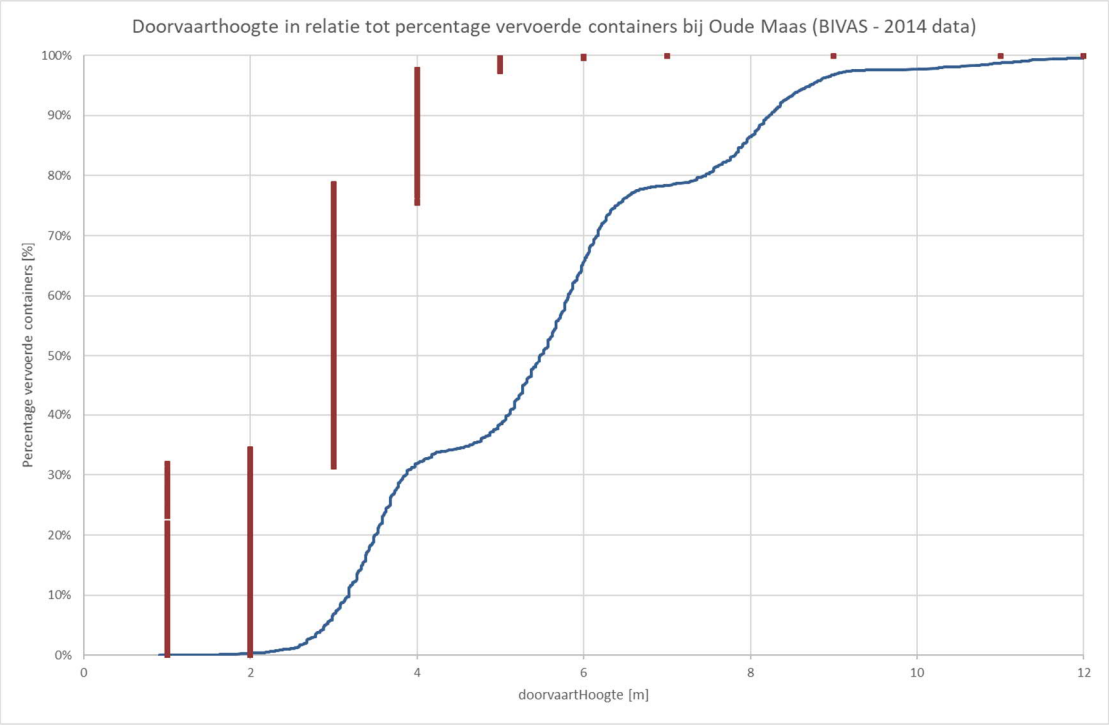
B.3.2.1. Percentielfiguren doorvaarthoogte

In figuur B.4 tot en met figuur B.9 zijn de percentiel figuren weergegeven voor de riviertakken. Hier zijn verschillende indicatieve waarden uit te kiezen. In tabel B.1 is de totale hoeveelheid vervoerde containers en benodigde doorvaarthoogte voor alle

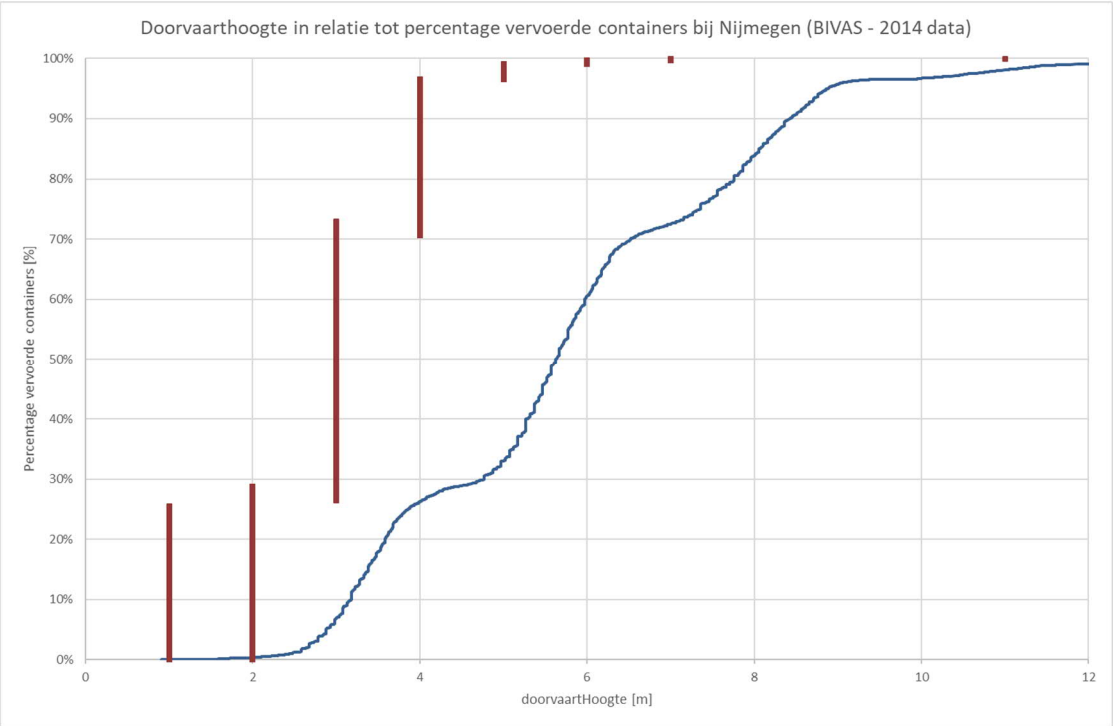
3- en 4-laagscontainervaart weergegeven. Als laatste is de benodigde doorvaarthoogte om 99% van alle containervaart te vervoeren aangegeven. De hoogste percentages bevatten enkele outliers die door verkeerde scheepsdimensies in de BIVAS database niet nauwkeurig zijn. De 99% waarde is daardoor een stuk representatiever als getal voor het vervoeren van alle containervaart.

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

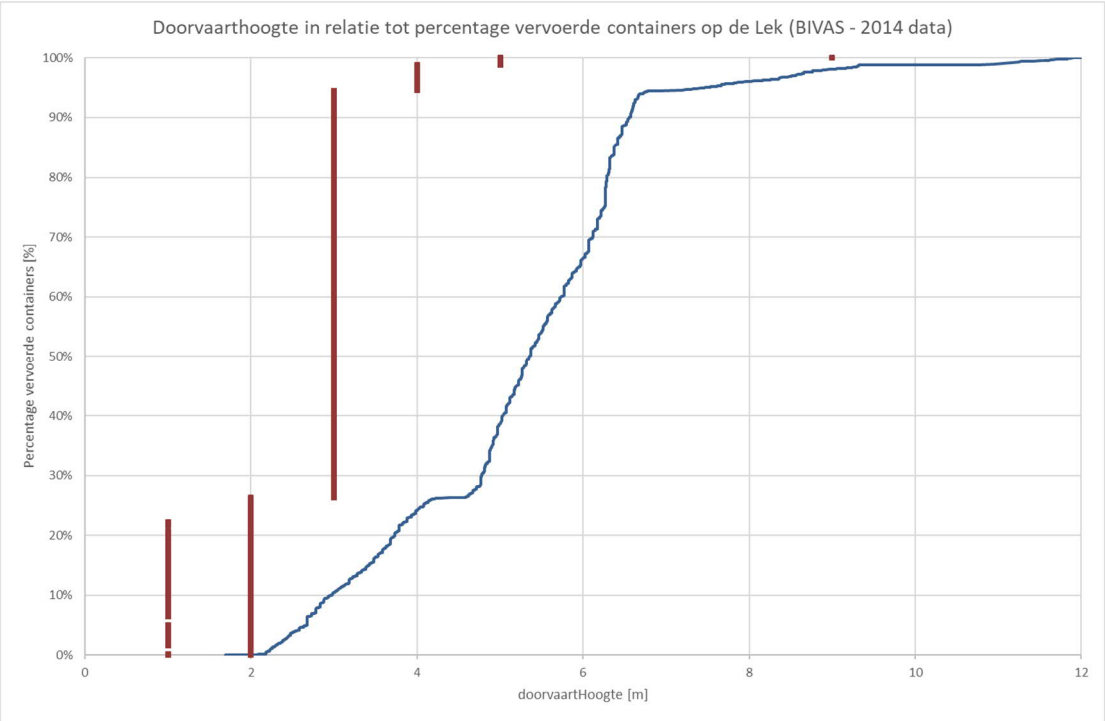
Riviertak	Totaal TEU	3 lagen [m, %]		4lagen [m, %]		99% hoogte [m]
IJssel	68.041	6,62	99%		N/A	6,62
Lek	665.988	6,90	95%	9,32	98%	11,05
Maas	281.695	6,93	91%	9,36	98,8%	10,19
Nieuwe Maas	1.480.840	6,91	88%	9,40	97%	11,72
Oude Maas	1.486.018	6,99	78%	9,47	98%	11,25
Waal	2.084.260	6,92	72%	9,47	96,5%	11,85



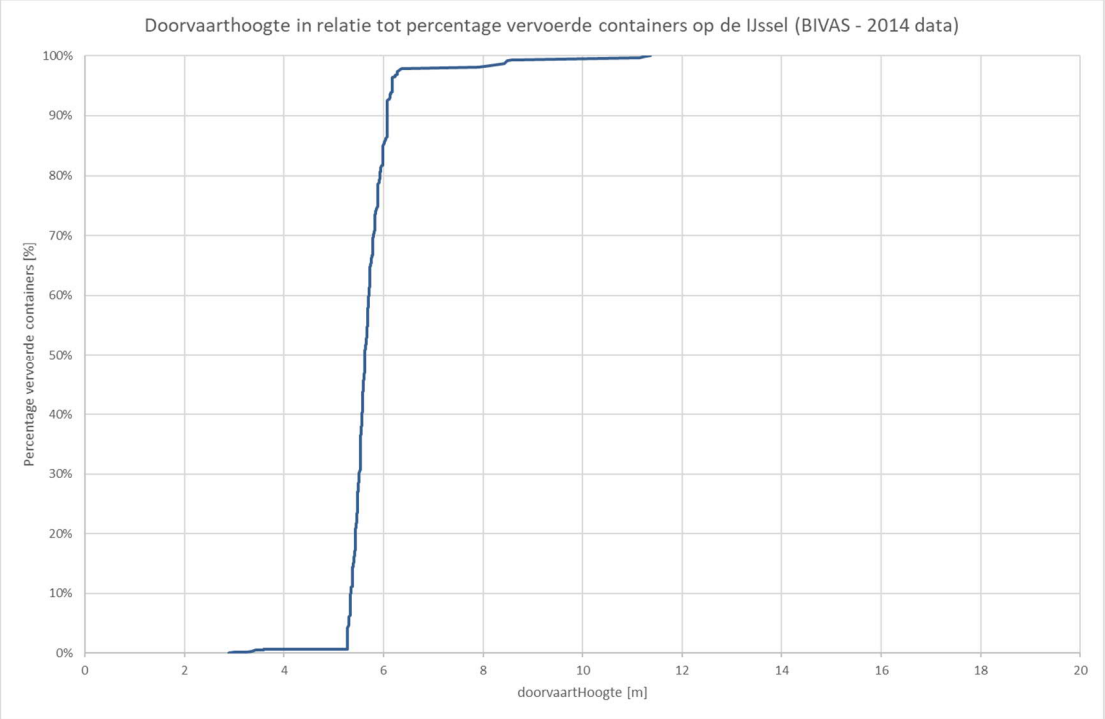
Figuur B.4 Percentiel doorvaarthoogte met vervoerde containers voor de Oude Maas met aantal lagen containers in rode vierkanten



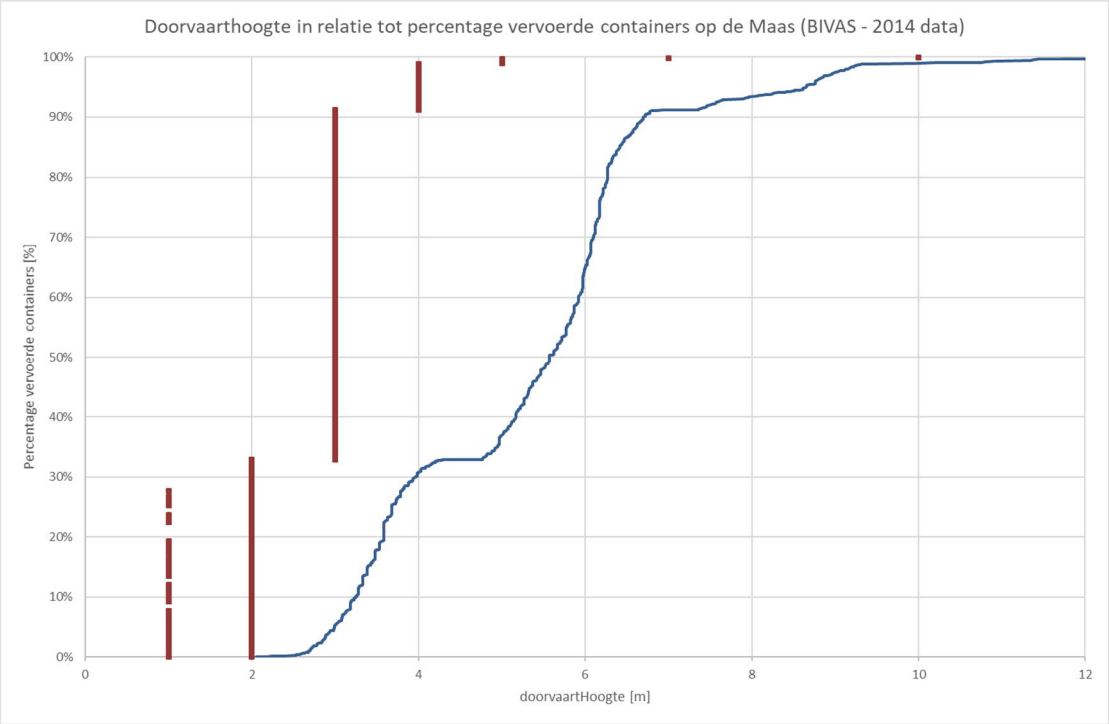
Figuur B.5 Percentiel doorvaarthoogte met vervoerde containers voor de Waal (Nijmegen) met aantal lagen containers in rode vierkanten



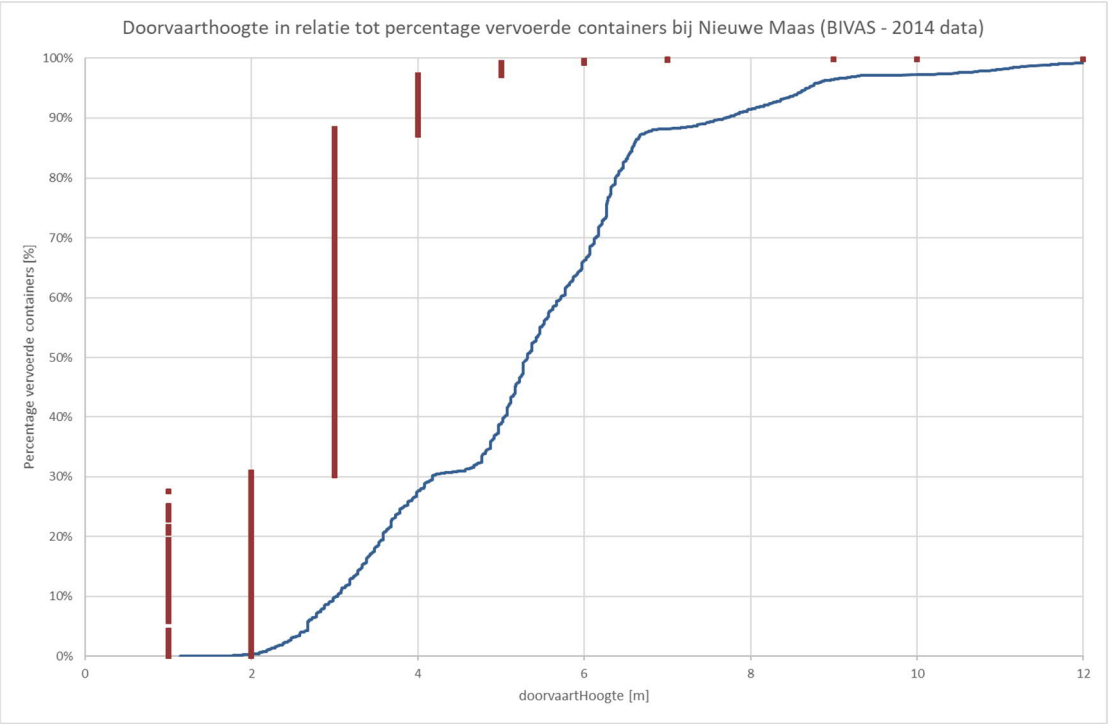
Figuur B.6 Percentiel doorvaarthoogte met vervoerde containers voor de Lek met aantal lagen containers in rode vierkanten



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



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



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

B.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 doorvaarthoogte 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;
- Doorvaarthoogte 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 doorvaarthoogte bij te kiezen.

In tabel B.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 3e 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 netwerkt. 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 B.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	1.429	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	4.559	2 – (3 laags)	6124

B.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.