

Beschikbare vaarwegafmetingen Waal bij lage afvoeren

Klimaatbestendige Netwerken (KBN) - Hoofdvaarwegennet (HVWN)



Beschikbare vaarwegafmetingen Waal bij lage afvoeren
Klimaatbestendige Netwerken (KBN) - Hoofdvaarwegennet (HVWN)

Auteur(s)

Rolien van der Mark

Anna van den Hoek

Beschikbare vaarwegafmetingen Waal bij lage afvoeren

Klimaatbestendige Netwerken (KBN) - Hoofdvaarwegennet (HVWN)

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	de heer F. Vinke
Referenties	
Trefwoorden	Vaarwegen, klimaatbestendigheid, droogte, laagwater, vaarwegprofielen

Documentgegevens

Versie	0.2
Datum	02-01-2024
Projectnummer	11209214-005
Document ID	11209214-005-ZWS-0002
Pagina's	52
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Rolien van der Mark	
	Anna van den Hoek	

Samenvatting

Een veranderend klimaat zorgt ervoor dat de beschikbaarheid en betrouwbaarheid van het hoofdvaarwegennet onder druk komen te staan. De grootste bevaarbaarheidsproblemen doen zich voor bij lage afvoeren. De fysieke ruimte op de Rijntakken voor de scheepvaart is dan beperkt, schepen kunnen maar beperkt afladen en moeten meer reizen maken om dezelfde hoeveelheid lading op bestemming te krijgen; soms lukt het zelfs niet meer om de gewenste hoeveelheid lading te vervoeren. Dit heeft negatieve maatschappelijke, financiële en economische consequenties.

Om een betrouwbaar, bereikbaar en bevaarbaar hoofdvaarwegennet te behouden, is het nodig om mee te bewegen met een veranderend klimaat. Om daar een goede invulling aan te kunnen geven wordt binnen het kader van het programma “Klimaatbestendige Netwerken (KBN) – Hoofdvaarwegennetwerk (HVWN)” onderzoek gestart naar welke minimale beschikbare bevaarbaarheid (uitgedrukt in diepgang en breedte) per corridor voor de lage afvoerregimes nog haalbaar is en wat dit betekent voor de transportcapaciteit. Voorliggende rapportage is de eerste verkenning voor dit onderzoek, waarbij enkel de Waal wordt beschouwd.

Doel van voorliggend onderzoek is om een beeld te krijgen van de bevaarbaarheid (uitgedrukt in diepgang en breedte) van het hoofdvaarwegennet onder (extreem) lage afvoercondities. Hierbij zijn twee invalshoeken beschouwd:

- 1 Theorie: wat is er volgens de theoretische richtlijnen nog mogelijk, welke scheepvaartafmetingen (in termen van vaarwegprofielen) kunnen nog varen?
- 2 Praktijk: wat vaart er nog daadwerkelijk tijdens (extreem) lage afvoercondities zoals we die in 2018 en 2022 hebben meegemaakt?

Op basis van de gegevens uit de Richtlijnen Vaarwegen is voor een aantal knelpunten op de Waal onderzocht welke vaarwegprofielen nog inpasbaar zijn. Aan de hand van IVS-data en scheepstrack-data is beschouwd met welke diepgang nog gevaren is bij lage afvoeren, en welk deel van de rivier benut wordt.

De analyse laat zien dat bij afvoeren van 850 en 700 m³/s bij Lobith intensiteitsprofielen voor respectievelijk Vb en Va (of hoger) niet meer inpasbaar zijn, zowel bij Nijmegen als Ophemert. De beschikbare breedte bij deze afvoeren is te klein voor een intensiteitsprofiel voor deze klassen, en bij Nijmegen ook voor een normaal profiel. Er zou onderzocht kunnen worden om hieraan een limiet te koppelen, en geen klasse Vb (en hoger) meer toe te staan als de afvoer onder 850 m³/s zakt, en geen klasse Va (en hoger) als de afvoer onder 700 m³/s zakt. Aanvullende nautische studie is nodig alvorens een dergelijke maatregel te overwegen.

Een enkelstrooks profiel is voor de hoogste klassen nog wel in te passen bij 850 m³/s (Nijmegen) en 700 m³/s (Ophemert). Een andere maatregel zou daarom kunnen zijn om een lokaal passeerverbod over een bepaald traject voor bepaalde klassen bij de meest kritische locaties in combinatie met verkeersbegeleiding in te stellen als de afvoer onder een bepaalde afvoer daalt. Een vergelijkbare maatregel, maar dan afvoer-onafhankelijk, is ook op enkele korte trajecten op de IJssel van kracht. Ook hier is nader onderzoek nodig.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
1.1	Achtergrond	6
1.2	Doelstelling en onderzoeksvragen	6
1.3	Aanpak en leeswijzer	7
1.4	Afbakening	7
2	Theorie: wat kan nog waar varen bij lage afvoeren	8
2.1	Huidige eisen	8
2.2	Aanpak	8
2.3	Vaarwegprofielen	9
2.4	Breedte versus diepte per afvoerniveau	11
2.5	Gecombineerd overzicht bevaarbaarheid	12
2.5.1	Beschouwde knelpunten	12
2.5.2	Beschikbare afmetingen per knelpunt in vergelijking tot de vaarwegprofielen	13
2.5.3	Resultaten van alle knelpunten	17
2.6	Vergelijking klimaatscenario's	25
3	Praktijk: wat vaart nog waar bij lage afvoeren	28
3.1	Inleiding	28
3.2	Wat vaart bij lage afvoeren op basis van IVS-data	28
3.2.1	Diepgang	28
3.2.2	Scheepstypen	30
3.3	Waar wordt gevaren bij lage afvoeren op basis van scheepstrack data	33
4	Synthese	41
5	Aanbevelingen	45
6	Referenties	47
A	Bijlagen bij Hoofdstuk 2	48
A.1	Intensiteit op jaarbasis en jaargemiddeld laadvermogen	48
A.2	Beschouwde knelpunten	49
B	Bijlage bij Hoofdstuk 3	50
B.1	Ruimtegebruik bij St. Andries	50

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Een veranderend klimaat zorgt ervoor dat de beschikbaarheid en betrouwbaarheid van het hoofdvaarwegennet onder druk komen te staan. De grootste bevaarbaarheidsproblemen doen zich voor bij lage afvoeren. De fysieke ruimte op de Rijntakken voor de scheepvaart is dan beperkt, schepen kunnen maar beperkt afladen en moeten meer reizen maken om dezelfde hoeveelheid lading op bestemming te krijgen; soms lukt het niet meer om de gewenste hoeveelheid lading te vervoeren. Dit heeft negatieve maatschappelijke, financiële en economische consequenties.

Met een veranderend klimaat komt ook het nakomen van de huidige gestelde eisen, normen en doelstellingen omtrent bevaarbaarheid van het hoofdvaarwegennet onder druk te staan. Om een betrouwbaar, bereikbaar en bevaarbaar hoofdvaarwegennet te behouden, is het nodig om mee te bewegen met een veranderend klimaat. Om daar een goede invulling aan te kunnen geven wordt binnen het kader van het programma “Klimaatbestendige Netwerken (KBN) – Hoofdvaarwegennetwerk (HVWN)” onderzoek gestart naar welke minimale beschikbare bevaarbaarheid, uitgedrukt in diepgang en breedte, per corridor voor de lage afvoerregimes nog haalbaar is en wat dit betekent voor de transportcapaciteit.

Voorliggende verkennende rapportage is de eerste stap binnen dit onderzoek. Hierin wordt gestart met enkel de Waal. Waarschijnlijk krijgt dit onderzoek komende tijd vervolg, voortbouwend op de resultaten uit deze en andere studies.

1.2 Doelstelling en onderzoeksvragen

Doel van dit onderzoek is om een beeld te krijgen van de bevaarbaarheid, uitgedrukt in diepgang en breedte, van het hoofdvaarwegennet onder (extreem) lage afvoercondities.

Door Rijkswaterstaat zijn de volgende onderzoeksvragen gesteld:

- Hoe vaak, hoe lang en met welke terugkeertijd komen verschillende lage afvoeren voor bij toekomstige klimaatscenario's?
- Wat zijn de maximale scheepsafmetingen (diepte, breedte en lengte) die op basis van de richtlijnen een aantal bottlenecks kunnen passeren bij verschillende lage afvoeren? Wat betekent dit voor het aantal vaarstroken dat beschikbaar is op basis van de afvoercondities?
- Ervaring uit de praktijk: hoe ziet het daadwerkelijke gebruik van de vaarweg eruit bij lage afvoeren:
 - Wat passeert het knelpunt tijdens lage afvoeren op basis van metingen (IVS-data) en welke ruimte (breedte en diepte op basis van IVS/AIS-data) wordt door de scheepvaart gebruikt?
 - Hoe wijkt dit af van wat we gebruikelijk zien bij mediane/gemiddelde afvoer?
 - Hoe kunnen we de waargenomen verschillen tussen de antwoorden op voorliggende twee vragen verklaren?
- Conclusie: onder welke afvoercondities en hoe vaak treden deze op in het klimaatscenario waarbij de bevaarbaarheid niet voldoet aan de gestelde eisen (CCR/TEN-T)?
- Zijn er limieten voor de bevaarbaarheid te definiëren wat betreft afvoercondities? Wanneer houdt het op?

Deze studie heeft het karakter van een “quickscan”. Dit betekent dat alle onderdelen (onderzoeksvragen) aan bod komen, maar vanwege de eindige middelen niet alles even omvangrijk of grondig, en dat er soms aannames zijn gedaan. Voor de bepaling waar in de praktijk nog in de rivier wordt gevaren bij lage afvoeren aan de hand van scheepstrack-data, is bij elkaar gebracht wat bekend is uit eerdere studies. Deze quickscan of verkenning is daarmee richtinggevend voor het vervolg.

1.3 Aanpak en leeswijzer

De rapportage volgt de twee invalshoeken “theorie” en “praktijk”:

- 1 Theorie: wat is er volgens de theoretische richtlijnen nog mogelijk, welke scheepvaartafmetingen (in termen van vaarwegprofielen) kunnen nog varen?
- 2 Praktijk: wat vaart er daadwerkelijk nog tijdens (extreem) lage afvoercondities zoals we die in 2018 en 2022 hebben meegemaakt?

Daarna worden beide invalshoeken met elkaar vergeleken in de synthese, en volgt een reflectie op de onderzoeksvragen zoals die zijn gesteld door Rijkswaterstaat.

1.4 Afbakening

We hanteren de volgende afbakening:

- Geografisch wordt de quickscan afgebakend tot de Waal.
- Er wordt gebruik gemaakt van de KBN-bodem ‘huidige’ bodemligging (2018), zie De Jong & Van der Mark (2021).
- Voor de klimaatscenario’s wordt gebruikgemaakt van KNMI ‘14 scenario $W_{H,dry}$ voor zichtjaren 2050 en 2085, zie ook De Jong (2019) en KNMI (2015). De nieuwe KNMI ‘23 klimaatscenario’s zijn dit jaar in oktober uitgekomen. De daarvan afgeleide afvoerreksen komen halverwege deze maand (december 2023) beschikbaar. Er is op moment van schrijven nog niet naar buiten gebracht hoe die reksen eruit zullen zien, en het is daarom niet mogelijk om nu alvast een doorkijk te maken.
- We maken gebruik van de zogenaamde KBN-afvoeren: 700, 850, 1020, 1400 en 1800 m³/s bij Lobith (De Jong, 2019), en voegen daar de lage afvoer van 550 m³/s aan toe.

2 Theorie: wat kan nog waar varen bij lage afvoeren

2.1 Huidige eisen

In internationaal verband zijn er afspraken die voorschrijven aan welke afmetingen de Europese vaarwegen dienen te voldoen. Binnen het Trans-Europese transportnetwerk (TEN-T) is afgesproken in Verordening (EU) No 1315/2013 dat lidstaten er voor zorgen dat de infrastructuur voldoet aan de vereisten voor waterwegen klasse IV. Dit betekent een minimum diepgang van 2,50 m als vereiste gedurende 365 dagen per jaar. Deze verordening wordt momenteel herzien. De nieuwe versie is nog niet gereed, we hebben een uitsnede van de nieuwe verordening van Rijkswaterstaat ontvangen. Hieruit volgt dat het voorschrift in de nieuwe verordening verandert van een permanente diepgang van 2,50 m in een vaardiepte van ten minste 2,50 m ten opzichte van vastgestelde referentiewaterstanden die op een bepaald aantal dagen per jaar wordt overschreden ten opzichte van een statisch gemiddelde. Of de herziening een versoepeling van de eis is, hangt af van wat als referentiewaterstand wordt gekozen (niet bekend bij de auteurs).

De nieuwe definitie heeft gelijkenis met de afspraak zoals die is vastgelegd door de Centrale Commissie voor de Rijnvaart (CCR) in die zin dat die eis ook een diepte bij een zekere referentiewaterstand is. De afspraak in CCR-verband is dat de waterdiepte in de Waal minimaal 2,80 m dient te bedragen ten opzichte van de Overeengekomen Lage Rivierstand (OLR). De OLR is de waterstand die optreedt bij de Overeengekomen Lage Afvoer (OLA). De OLA is gedefinieerd als de afvoer die over een langjarige periode gemiddeld 20 dagen per jaar wordt onderschreden, en is gelijkgesteld aan 1020 m³/s bij Lobith. Verder dient de breedte van de vaargeul in de Waal minimaal 150 m te zijn bij OLR. Deze eisen aan diepte en breedte bepalen het baggerreferentievlak; als de bodem van de rivier onder dit vlak blijft, wordt aan de eisen ten aanzien van breedte en diepte voldaan.

Met een veranderend klimaat komen de huidige gestelde eisen meer en meer onder druk te staan. Het is uit eerdere rapportages (bijv. De Jong & Van der Mark, 2021) bekend dat het op enkele locaties lastig is om een waterdiepte van 2,80 m te onderhouden bij een Lobith-afvoer van 1020 m³/s. De MGD's getuigen hier bijvoorbeeld van: als de afvoer hoger is dan 1020 m³/s, dan zou het nergens binnen de vaargeul volgens de eis ondieper dan 2,80 m mogen zijn, maar er worden lagere MGD's gemeten.

De OLA kan in de toekomst afnemen als gevolg van klimaatverandering. De afvoer die gemiddeld 20 dagen per jaar wordt onderschreden, neemt af als het in de toekomst frequenter of langer laagwater is. Een lagere OLA leidt tot lagere OLR en daarmee tot een grotere onderhoudsinspanning om aan de gegarandeerde vaargeulafmetingen te blijven voldoen.

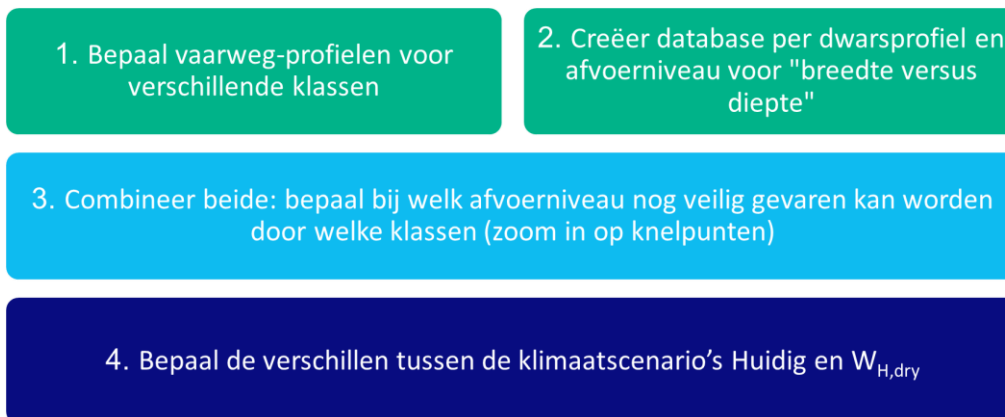
In deze rapportage wordt gekeken welke scheepstypes nog wel kunnen varen bij hele lage afvoeren, los van de gestelde eisen.

2.2 Aanpak

Voor een vaarweg geldt, dat bij de gewenste scheepsklasse en scheepsintensiteit de afmetingen qua breedte en waterdiepte zodanig moeten zijn dat een vlotte en veilige vaart is verzekerd. De Richtlijnen Vaarwegen (Rijkswaterstaat, 2020) zijn hierbij een belangrijke leidraad.

De richtlijnen schrijven voor welke minimale vaarwegbreedte en minimale vaarwegdiepte benodigd zijn om een bepaalde scheepvaartklasse veilig te kunnen laten navigeren en interacteren (passeren, oplopen) op de vaarweg. Omdat bij afnemende afvoer de rivierbreedte en waterdiepte afnemen, valt op zeker moment (bij een bepaalde afvoer/waterdiepte/rivierbreedte) zo'n "theoretisch vaarwegprofiel" niet meer overal in te passen. In theorie betekent dit dat bepaalde scheepvaartklassen op een gegeven moment (bij hele lage afvoeren) niet meer vlot en veilig kunnen varen. In dit hoofdstuk wordt beschouwd welke theoretische vaarwegprofielen bij welke afvoerniveaus nog mogelijk zijn.

De aanpak is daarbij op hoofdlijnen als volgt:



Hieronder wordt iedere stap uitgewerkt en worden gemaakte keuzes toegelicht.

2.3 Vaarwegprofielen

De Richtlijnen Vaarwegen schrijven voor wat de minimaal benodigde vaarbreedte en waterdiepte is per type profiel. Er wordt onderscheid gemaakt in een enkelstrooks profiel, krap profiel, normaal profiel en intensiteitsprofiel. In deze verkenning worden de gegevens uit de richtlijnen toegepast. De gebruikte gegevens zijn vermeld in Tabel 2-1.

Tabel 2-1 Toegepaste minimale afmetingen voor type vaarprofiel en CEMT-klasse (Richtlijnen Vaarwegen). De blauwe waarden in de tabel komen niet uit de Richtlijnen Vaarwegen, aangezien die stellen dat het intensiteitsprofiel bedoeld is voor klasse VI en dat klasse VI minimaal een normaal profiel heeft.

Profiel	Enkelstrooks profiel		Krap profiel		Normaal profiel		Intensiteitsprofiel	
	Breedte (m) – 2B	Diepte (m) – 1,3T	Breedte (m) – 3B	Diepte (m) – 1,3T	Breedte (m) – 4B	Diepte (m) – 1,4T	Breedte (m) – 4B+toeslag	Diepte (m) – 1,4T
I	10,2	3,3	15,3	3,3	20,4	3,5	35,3	3,5
II	13,2	3,4	19,8	3,4	26,4	3,6	45,7	3,6
III	16,4	3,5	24,6	3,5	32,8	3,8	56,7	3,8
IV	19,0	3,9	28,5	3,9	38,0	4,2	65,7	4,2
Va	22,8	4,6	34,2	4,6	45,6	4,9	78,9	4,9
Vb	22,8	5,2	34,2	5,2	45,6	5,6	78,9	5,6
Vla (M12)	34,0	5,2	51,0	5,2	68,0	5,6	125,0	5,6
Vla (BII-2b) / VIb / VIc	45,6	5,2	68,4	5,2	91,2	5,6	148,2	5,6

Om het proces in zijn geheel kwantitatief te kunnen doorlopen, zijn enkele aannames gedaan en keuzes gemaakt. Deze en andere aandachtspunten worden hieronder benoemd:

- Voor een veilige vaart, ook tijdens oplopen en passeren en/of bij grote intensiteit, is volgens de richtlijnen een kielspel van 30% bij enkel en krap profiel en 40% bij normaal en intensiteitsprofiel benodigd. Dit uitgangspunt is hier overgenomen. De minimale waterdiepte in de tabel wordt daarmee bepaald als 1,3 of 1,4 keer de diepgang van het maatgevende, geladen schip (Tabel 2-2).
- De Richtlijnen Vaarwegen stellen dat een intensiteitsprofiel van toepassing is bij vaarwegen met intensiteiten van meer dan 30.000 passerende schepen per jaar, en dat dit soort intensiteiten voornamelijk worden gevonden op klasse VI vaarwegen. In dat geval moet een intensiteitstoeslag worden gehanteerd bovenop het normale profiel. De richtlijnen presenteren derhalve geen intensiteitsprofiel voor CEMT-klassen lager dan VI. Wij hebben hier (Tabel 2-1) wél een intensiteitsprofiel voor lagere klassen toegepast, omdat tijdens laagwater een situatie denkbaar is van grote drukte op de Waal (> 30.000) met veelal kleinere (klasse V schepen). Een intensiteitsprofiel is bij dergelijke drukte dan vereist. Zo'n intensiteitsprofiel voor lagere klassen is, net als bij klasse VI, het normaal profiel met een extra breedtetoeslag voor als het zeer druk is. Bij de intensiteitstoeslag zijn de volgende keuzes gemaakt:
 - [Klasse VI] Qua grootte van de intensiteitstoeslag kunnen verschillende keuzes worden gemaakt. De Richtlijnen Vaarwegen schrijven een waarde voor (zie Tabel 21 uit de Richtlijnen Vaarwegen) aan de hand van het aantal passages op jaarbasis en het jaargemiddeld laadvermogen. Tijdens laagwater is het laadvermogen lager, maar de intensiteit hoger, en zou je op een hogere toeslag uitkomen. Aangezien onduidelijk is hoe de tabel precies tot stand is gekomen, passen we hem toe zoals voorgeschreven: de kentallen op jaarbasis bepalen de toegepaste toeslag. Ook tussen de jaren zijn er uiteraard verschillen; op basis van de gegevens uit Bijlage A.1 kiezen we ervoor om voor het klasse VI schip te rekenen met een intensiteitstoeslag van 57 m (corresponderend met een gemiddeld laadvermogen van 2550 ton en 120.000 passages op jaarbasis). Interpoleren binnen de tabel, zoals door de Richtlijnen Vaarwegen wordt gesuggereerd, is hier niet gedaan, gezien de variabiliteit tussen de jaren. Door deze toeslag toe te passen, komen we uit op een benodigde minimale vaarwegbreedte van nagenoeg 150 m voor het klasse VI intensiteitsprofiel, wat ook gelijk is aan de huidige vaarwegbreedte op de Waal (de Waal is een klasse VIc vaarweg).
 - [Lager dan klasse VI] De intensiteitstoeslag-tabel uit de Richtlijnen Vaarwegen is niet bedoeld voor lagere dan klasse VI schepen. Omdat we toch een intensiteitsprofiel voor lagere klassen willen meenemen in de analyse (normaal profiel geldt immers voor een vaarweg tot 30.000 scheepsbewegingen per jaar en op de Waal is het aanzienlijk drukker; daarboven dient intensiteitsprofiel te worden toegepast), passen we dezelfde gemiddelde procentuele toename bij de klassen VI (i.e., 73%) toe op de andere klassen. Dat betekent dat de toeslag kleiner is voor intensief verkeer met kleinere schepen, wat logisch lijkt.
- De Richtlijnen Vaarwegen stellen dat een klasse VI vaarweg minimaal moet voldoen aan het normaal profiel; het enkelstrooks en krap profiel is daarom niet gegeven. We hebben deze profielen wel meegenomen in de analyse door de richtlijnen (2x resp 3x de breedte van het maatgevende schip, B) ook toe te passen voor het klasse VI schip. Op die manier zijn het enkelstrooks en krap profiel voor klasse VI toch meegenomen. Het kan bijvoorbeeld denkbaar zijn om ter plaatse van een lokaal knelpunt waar alleen nog maar een enkelstrooks profiel valt in te passen, dit tijdelijk (i.e., tijdens een extreem lage afvoer) te realiseren via een vorm van verkeersbegeleiding.

- Volgens de richtlijnen dienen nog aanvullende toeslagen¹ te worden toegepast voor wind, bochten, langsstroming en crossings tussen twee bochten. De waarden van de toeslagen zijn afhankelijk van de situatie/locatie/beladingsgraad, en vragen soms aanvullend onderzoek. Bij het ontwerpen van een nieuwe, permanente waterweg zijn dit vanzelfsprekend noodzakelijke aspecten om te onderzoeken. Voor nu is besloten deze aanvullingen, die de minimaal benodigde vaarwegbreedte nog groter maken, niet mee te nemen. We doen daarbij dus de aannamen dat een laagwater niet permanent duurt, niet samenvalt met stevige wind en stromingen, en vanwege de tijdelijkheid minder stringente richtlijnen behoeft. Het maakt bovendien de analyse omvangrijker en mogelijk ook onoverzichtelijker (aangezien de toeslagen niet overal gelijk zijn). Bij de bespreking van de resultaten komen we terug op deze aannamen.

Tabel 2-2 Toegepaste gegevens maatgevend schip per CEMT-klasse (bron: Richtlijnen Vaarwegen).

CEMT-klasse	Diepgang leeg	Diepgang geladen (T)	Schipbreedte (B)
I	1,2	2,5	5,1
II	1,4	2,6	6,6
III	1,5	2,7	8,2
IV	1,6	3,0	9,5
Va	1,8	3,5	11,4
Vb	2,0	4,0	11,4
Vla (M12)	2,0	4,0	17,0
Vla (BII-2b) / Vlb / Vlc	2,0	4,0	22,8

2.4 Breedte versus diepte per afvoerniveau

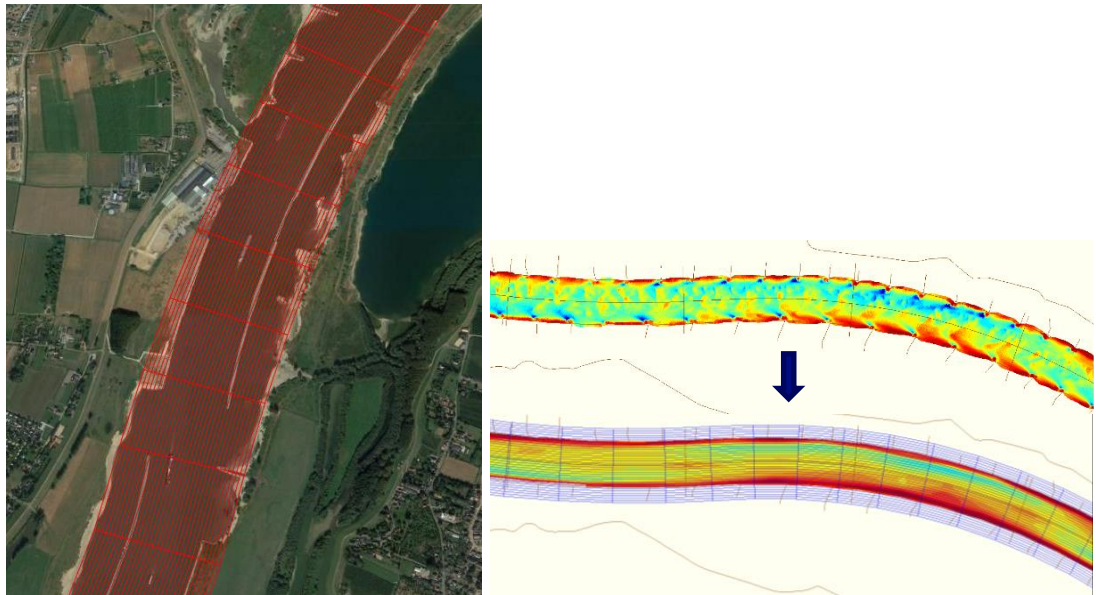
Om te kunnen bepalen welk profiel nog waar valt in te passen (waar en bij welke afvoer er nog voldoende breedte en diepte is voor bijvoorbeeld een klasse IV normaal profiel), wordt voor de gehele Waal een rivierbreedte-waterdiepte tabel samengesteld voor ieder KBN-afvoerniveau. Hiervoor wordt gebruikgemaakt van het bestaande “tweedimensionale 2018 bodem rooster” (zie De Jong & Van der Mark, 2019). Figuur 2-1 is overgenomen uit dat rapport om een beeld te geven van dit rooster. De cellen zijn aanzienlijk kleiner over de breedte dan over de lengte om variaties over de breedte goed te kunnen meenemen.

De breedte-waterdiepte tabel wordt samengesteld door voor iedere dwarsraai (een rij van roostercellen over de rivierbreedte) te bepalen wat per afvoerniveau de beschikbare breedte is bij een gegeven waterdiepte. Voor het creëren van de tabel is dit gedaan voor een bereik aan waterdieptes tussen 1,50 m en 5,60 m (met stapjes van 0,10 m). De beschouwde afvoerniveaus zijn 550, 700, 850, 1020, 1400 en 1800 m³/s bij Lobith. Voor de 550 m³/s afvoer was nog geen simulatie beschikbaar, dus die simulatie is in deze studie uitgevoerd. Voor deze berekening is hetzelfde model en zijn dezelfde uitgangspunten gehanteerd als voor de berekeningen met de andere afvoeren (beschreven in De Jong & Van der Mark, 2021).

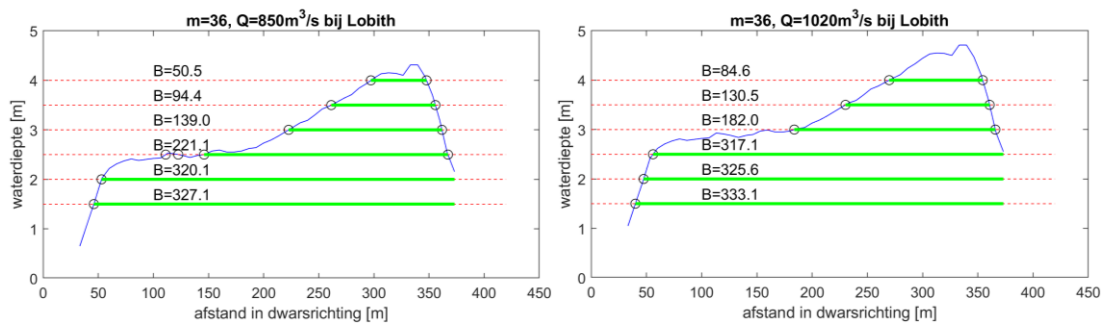
Figuur 2-2 illustreert voor een willekeurig gekozen dwarsprofiel en twee van de zes afvoerniveaus hoe de beschikbare breedte is bepaald bij een selectie van waterdieptes. De beschikbare breedte neemt af bij toenemende diepte. De vaarbreedte is zo gedefinieerd dat het overal bij deze breedte dieper is of even diep als het gekozen diepte-criterium.

¹ Zonder de kwaliteit van de Richtlijnen Vaarwegen in twijfel te trekken, rijst de vraag of optelling van al deze toeslagen niet leidt tot overdimensionering van de minimaal benodigde vaarwegbreedte, omdat de genoemde factoren niet allen overal tegelijkertijd zullen optreden en omdat (zoals ook vermeld in de Richtlijnen Vaarwegen) steeds meer schepen uitgerust zijn met een boegschroef en ook met een steeds groter vermogen.

De breedte wordt afgeknot ter plaatse van de normaallijn als aan de linker- of rechteroever geen profielgegevens meer beschikbaar zijn. De beschikbare breedte kan dus nooit groter worden dan de normaalbreedte (de normaallijnen liggen over de koppen van de kribben, doorkruisen de bakens). Hier is voor gekozen, omdat in werkelijkheid de bevaren breedte ook nooit groter zijn dan de normaalbreedte.



Figuur 2-1 Visualisatie van een stukje van het rooster en projectie van de bodemligging op het rooster. Overgenomen uit De Jong & Van der Mark (2021).



Figuur 2-2 Illustratie van de bepaling van de beschikbare breedte (in m) bij verschillende gegeven waterdieptes (hier van 1,5 m tot 4,0 m met stapjes van 50 cm). Dwarsraai $m=36$ ligt nabij de Pannerdensch Kop. Links voor een afvoer van $850 \text{ m}^3/\text{s}$, rechts voor een afvoer van $1020 \text{ m}^3/\text{s}$ bij Lobith (hier is de waterstand hoger, de waterdiepte groter, dus het profiel ligt hoger).

2.5 Gecombineerd overzicht bevaarbaarheid

2.5.1 Beschouwde knelpunten

Er is gekozen om voor bekende knelpunten te beschouwen tot wanneer nog gevaren kan worden door bepaalde scheepsklassen. Immers, als dit knelpunt, een kritische locatie, gepasseerd kan worden, kan de rest van de vaarweg ook bevaren worden.

De selectie van knelpunten is tot stand gekomen op basis van de informatie uit De Jong & Van der Mark (2021), de Geoweb waterdiepte kaarten (Rijkswaterstaat, 2018), MGD-registraties, QinCom (De Jong, 2021) en Rijkswaterstaat (2022). Bijlage A.2 toont een overzicht van de knelpunten.

Op voorhand weten we niet of er grote verschillen in de analyse ontstaan tussen de onderlinge knelpunten, omdat hier zowel de breedte als diepte worden beschouwd (en de bekendste knelpunten diepte-knelpunten zijn).

De volgende knelpunten in de Waal worden in beschouwing genomen:

- 1 Bocht bovenstrooms Erlecom (rkm 868-872)
 - De ondiepe binnenbocht maakt de vaarweg smal.
- 2 Erlecom (rkm 873-877)
 - Het ondiepste punt ligt direct benedenstrooms van de bodemkribben (rechteroever).
- 3 Bocht benedenstrooms Erlecom (rkm 877-883)
 - De ondiepe binnenbocht maakt de vaarweg smal.
- 4 Nijmegen (rkm 883-889)
 - Het ondiepste punt ligt direct benedenstrooms van de vaste laag (rechteroever).
- 5 Ophemert (rkm 915-924)
 - Het langsdammen traject heeft een beperktere normaalbreedte dan de rest van de Waal.
- 6 St. Andries (rkm 925-930)
 - Het ondiepste punt ligt direct benedenstrooms van de vaste laag (rechteroever).
 - Het knelpunt St. Andries is bij gemiddelde afvoeren (1700 tot 2100 m³/s) vaak de bepalende ondiepte voor alle scheepvaart die passeert (knelpunt op de corridor naar Duitsland). Bij lagere afvoeren zijn de ondiepten bij Nijmegen en Erlecom bepalend voor de internationale scheepvaart. De ondiepte bij St. Andries is bij lage afvoeren dan wel bepalend voor de schepen die wel langs St. Andries komen, maar niet langs Nijmegen (knelpunt op de corridor naar Amsterdam). Zie ook De Jong en Nijenhuis (2020).
- 7 Gameren / benedenstrooms van Zaltbommel (934-943)
 - Flauwe bochten beperken mogelijk de breedte bij lagere afvoeren.

2.5.2 Beschikbare afmetingen per knelpunt in vergelijking tot de vaarwegprofielen

Vervolgens is per knelpunt beschouwd wat de beschikbare afmetingen (vaarwegbreedte en waterdiepte) zijn bij de verschillende afvoerniveaus, en dit is vergeleken met de minimaal benodigde afmetingen voor een CEMT-vaarwegprofiel.

De KBN-afvoer (6 niveaus) – waterdiepte (met bereik van 1,5 tot 5,6 m) – bijbehorende vaarwegbreedte database met ongeveer 350 dwarsprofielen samen met de CEMT-vaarwegprofielen (4 types en 8 CEMT-klassen) maakt het mogelijk om een veelheid aan figuren, kaarten en/of bovenaanzichten te maken, die los van elkaar lastig te interpreteren zijn. Om in één oogopslag inzichtelijk te maken welke klasse nog kan varen bij welke afvoer, bewerken we de data eerst (a) naar een maatgevende (minimale) breedte per knelpunt. Als op deze locatie een profiel ingepast kan worden, dan op de rest van het knelpunt-traject ook. Vervolgens worden (b) de beschikbare en benodigde afmetingen met elkaar geconfronteerd in een minimale breedte-waterdiepte visualisatie, en tot slot wordt (c) in tabelvorm gepresenteerd welk vaarwegprofiel bij ieder afvoerniveau mogelijk is.

Hieronder is dit voor het eerste knelpunt (bocht bovenstrooms Erlecom) nader toegelicht; in de volgende paragraaf (§0) is het eindresultaat voor de andere knelpunten opgenomen. Figuur 2-3 toont voor de KBN-afvoeren de waterdiepte bij dit knelpunt, en toont het deel van het dwarsprofiel dat dieper is dan 2,80 m. De waarde van 2,80 m is enigszins willekeurig gekozen als voorbeeld om te illustreren welke stappen zijn doorlopen. We hadden ook een andere diepte-waarde tussen 1,50 en 5,60 m kunnen kiezen, de database bevat ook voor die waarden welk deel van het dwarsprofiel dieper is. Maar deze waarde is wel interessant, omdat deze diepte volgens de CCR-afspraken gegarandeerd dient te worden bij de OLA.

We zien in de figuren dat een breedte van 150 m niet overal beschikbaar is bij een waterdiepte van 2,80 m bij OLA. Dit was ook geconstateerd in De Jong & Van der Mark (2021).

Figuur 2-3 laat zien dat hoe hoger de afvoer, des te groter de waterdiepte, en des te breder het gedeelte dat dieper is dan de waterdiepte van 2,80 m. Dergelijke bovenaanzichten zijn ook te maken voor andere waterdiepte-criteria. Vervolgens kan het verloop over de breedte gepresenteerd worden voor de verschillende waterdiepte-criteria. Figuur 2-4 laat het breedteverloop over het knelpunt zien voor enkele waterdiepte-criteria bij een afvoer van 1020 m³/s. Hoe dieper de gewenste vaarweg, des te smaller deze wordt (of andersom: hoe breder de gewenste vaarweg, des te ondieper deze wordt). Uit dergelijke figuren valt op te maken (als voorbeeld):

- Als een waterdiepte van 2,80 m gewenst is, is de vaarweg ordegrootte 140 m breed bij rkm 871,5 en breder op de rest van het traject. Op die locatie is de beschikbare ruimte het kleinst en maatgevend.
- Andersom, als inpassing van een vaarwegbreedte van minimaal 148 m gewenst is (CEMT VIa/VIb/VIc intensiteitsprofiel), kan dit dus alleen gerealiseerd worden door een kleiner waterdiepte-criterium dan 2,80 m te hanteren, zo valt af te lezen.

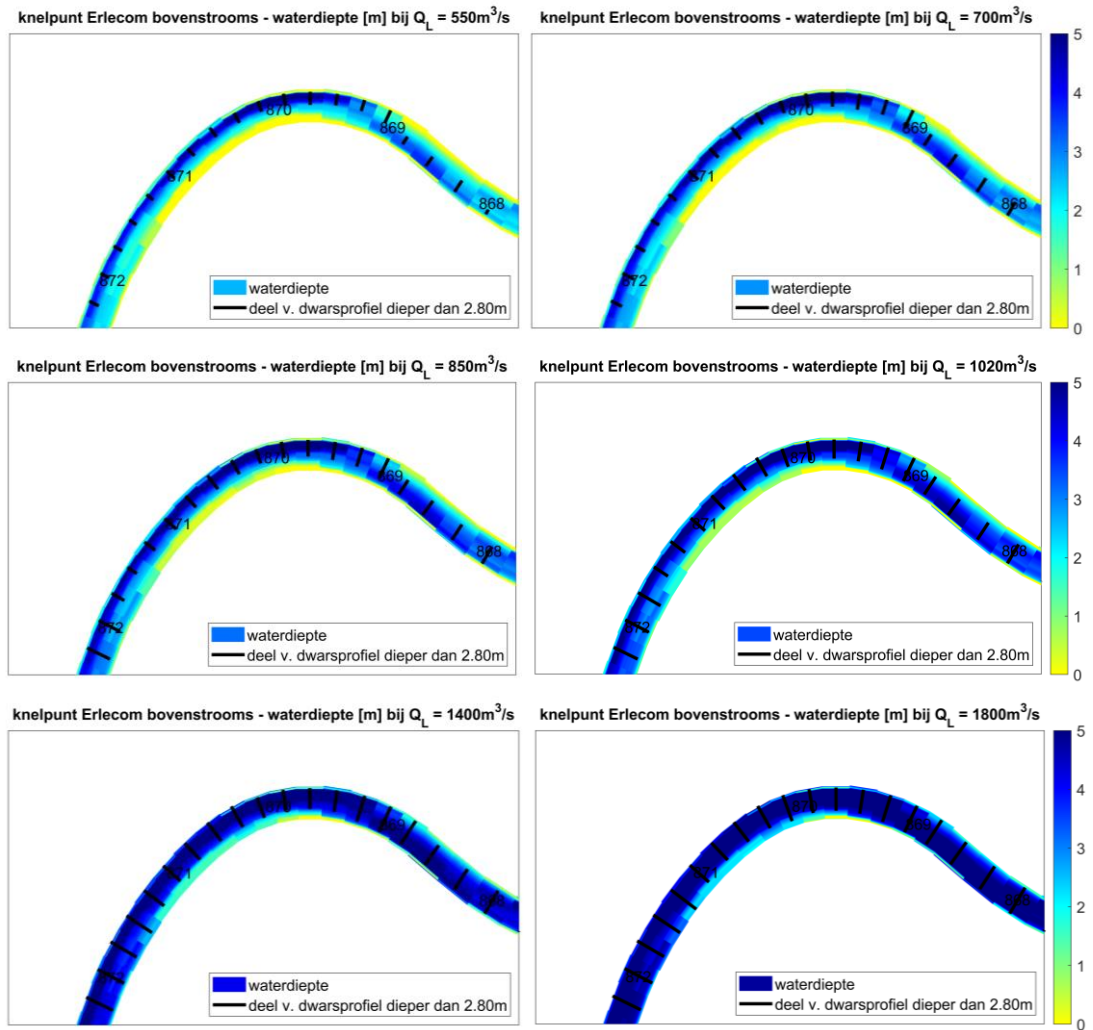
Bij het beoordelen welk vaarwegprofiel nog valt in te passen, is de minimale breedte op het knelpunt maatgevend. De minimale breedte op het knelpunt bij een gegeven waterdiepte is weergegeven in Figuur 2-5. Door de benodigde afmetingen van de vaarwegprofielen hierbij te plotten, wordt duidelijk welke profielen zijn in te passen. De vaarwegprofielen links van een afvoerniveau-lijn zijn in te passen; de benodigde afmetingen zijn lager dan de aanwezige afmetingen bij die afvoer. Hoe lager de afvoer, des te minder vaarwegprofielen zijn in te passen.

Aan de hand van deze grafiek kan ook de afname in beladingsgraad worden bepaald. Ter illustratie, als men een normaal klasse IV vaarwegprofiel wil realiseren (38 m breed, 4,2 m diep), lukt dit wel bij een afvoer van 1400 m³/s (links van de betreffende Q1400-lijn), maar niet meer bij een afvoer van 1020 m³/s (rechts van de betreffende Q1020-lijn). Een vaarweg met breedte van 38 m is bij deze locatie nog wel mogelijk, maar de waterdiepte is dan maximaal orde 4,1 m (af te lezen). Als de diepgang van het volle en ledige schip bekend is en de aangenomen theoretische kielspeling van 40% (bij normaal profiel) als uitgangspunt wordt genomen, kan berekend worden wat de beladingsgraad is (0% betekent dat het schip leeg is, 100% betekent dat het schip volledig geladen is). Voor alle theoretische vaarwegprofielen (type en klasse) en KBN-afvoerniveaus is op die manier in tabelvorm het totaaloverzicht inclusief beladingsgraad (theoretische kielspeling) voor het knelpunt weergegeven in Figuur 2-6.

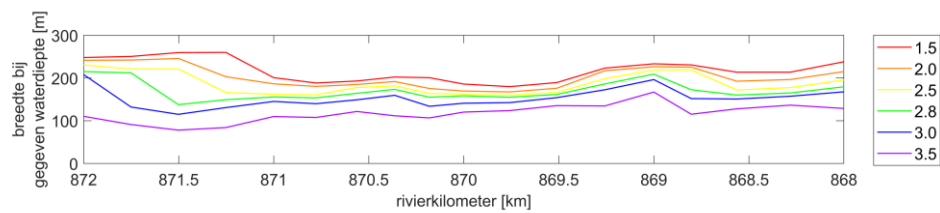
Aandachtspunt om te noemen is dat we hier niet de daadwerkelijke ligging van de vaarwegprofielen hebben ingetekend (dat zouden 4x8x6 vaarwegliggingen zijn). Als de benodigde breedte voor een profiel kleiner is dan de minimaal beschikbare breedte op het traject, dan veronderstellen we dat het intekenen van het profiel mogelijk is (start bij het meest beperkende stuk en teken van daaruit verder). Een check op bochtstralen bijvoorbeeld als de vaarweg via de diepste delen door de rivier slingert, zou moeten gebeuren bij een vervolgonderzoek.

Wat opvalt in het resultaat van knelpunt "Erlecom bovenstrooms" is dat al bij een afvoer van 1800 m³/s de klasse Vb en VI schepen met verminderde beladingsgraad moeten varen (in het normale en intensiteitsprofiel). Dit komt doordat de benodigde waterdiepte voor deze klassen volgens de richtlijnen 5,6 m is (40% kielspeling), en de vaargeulgemiddelde waterdiepte bij deze afvoer ruwweg tussen de 5 en 5,5 m varieert (afhankelijk van de locatie).

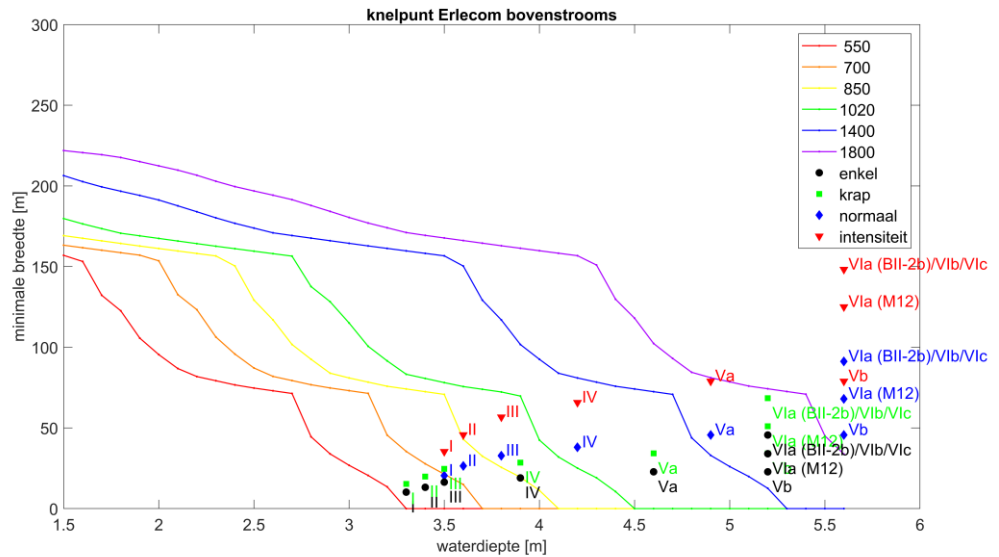
In de eerdere KBN-studie (De Jong, 2020) werd ook vastgesteld aan de hand van metingen dat al bij een afvoer van circa 2000 m³/s de beladingsgraad begint te verminderen (dit geldt voor droge bulk). De IVS-analyse in het volgende hoofdstuk laat dit ook zien.



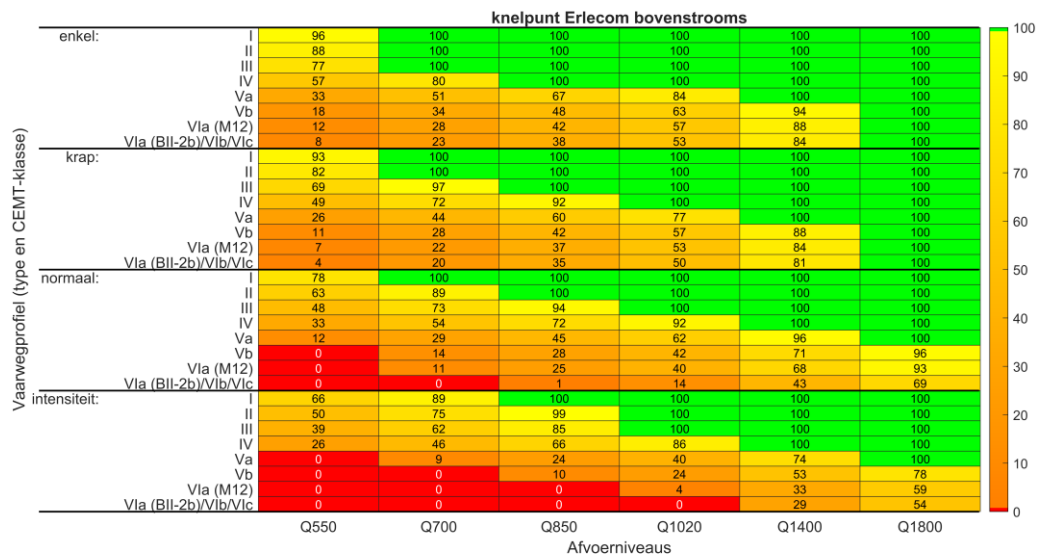
Figuur 2-3 Bovenanzichten van de waterdiepte ter plaatse van knelpunt “Erlecom bovenstrooms” voor de zes KBN-afvoerniveaus. De zwarte lijnen geven aan welk deel van de rivier dieper is dan 2,80 m.



Figuur 2-4 Verloop in beschikbare breedte in langsrichting van het knelpunt “Erlecom bovenstrooms” voor gegeven waterdiepte-criteria (legenda). Hoe dieper de gewenste vaarweg, des te smaller deze wordt. Dit figuur hoort bij een afvoerniveau van 1020 m³/s bij Lobith. (De groene lijn hier correspondeert dus met het breedteverloop aangegeven in Figuur 2-3, $Q = 1020\text{ m}^3/\text{s}$).



Figuur 2-5 Relatie tussen minimale breedte en de waterdiepte voor de KBN-afvoerniveaus ter plaatse van het knelpunt "Erlecom bovenstrooms". De benodigde breedte en waterdiepte voor de vaarwegprofielen (type en klasse) zijn hierbij geplot (Tabel 2-1). De afmetingen voor Vb-krap en Vla/M12-enkel vallen samen.



Figuur 2-6 Totaaloverzicht welk vaarwegprofiel (type en klasse) theoretisch valt in te passen bij ieder KBN-afvoerniveau bij knelpunt "Erlecom bovenstrooms". Groen betekent dat het profiel valt in te passen (beladingsgraad 100%), rood betekent dat het profiel niet valt in te passen, oranje betekent dat de benodigde vaarwegbreedte wel valt in te passen maar dat het schip enkel met kleinere beladingsgraad (weergave in %) kan varen.

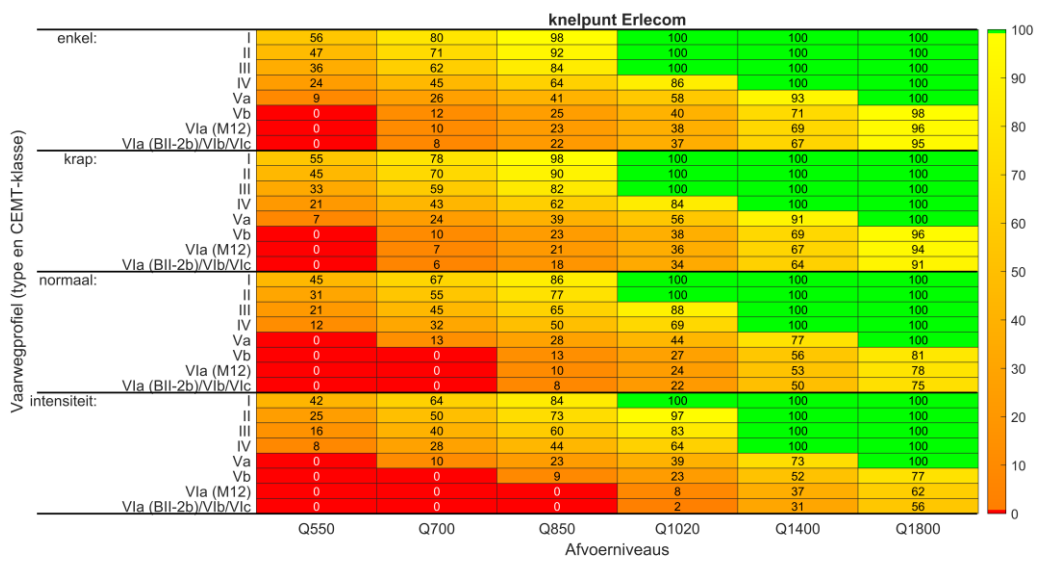
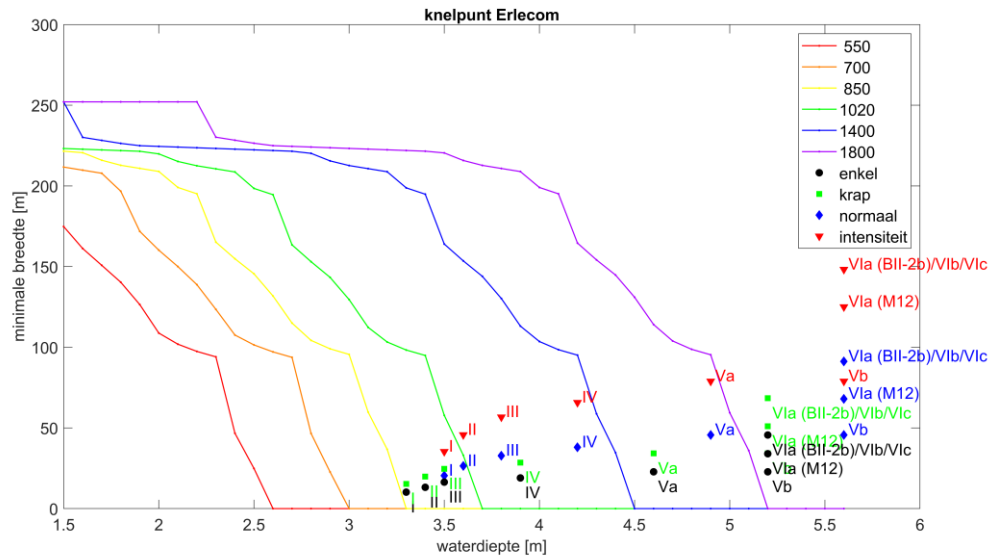
2.5.3 Resultaten van alle knelpunten

In de vorige alinea's is het proces toegelicht hoe we per knelpunt komen tot een tabel waarin inzichtelijk wordt welke vaarwegprofielen nog zijn in te passen bij de KBN-afvoerniveaus. Hieronder staan de overzichten onder elkaar voor de overige beschouwde zes knelpunten (Figuur 2-7 t/m Figuur 2-12).

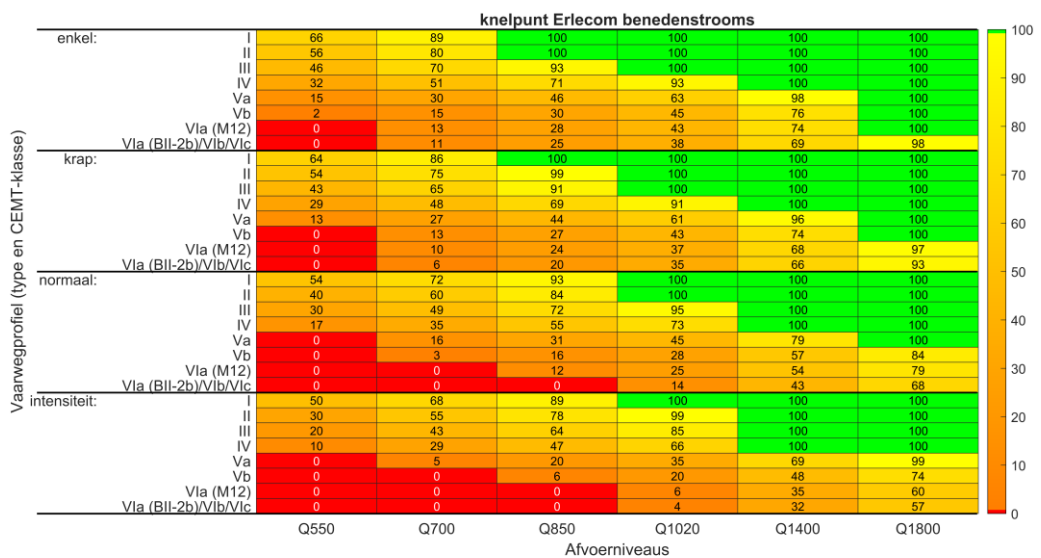
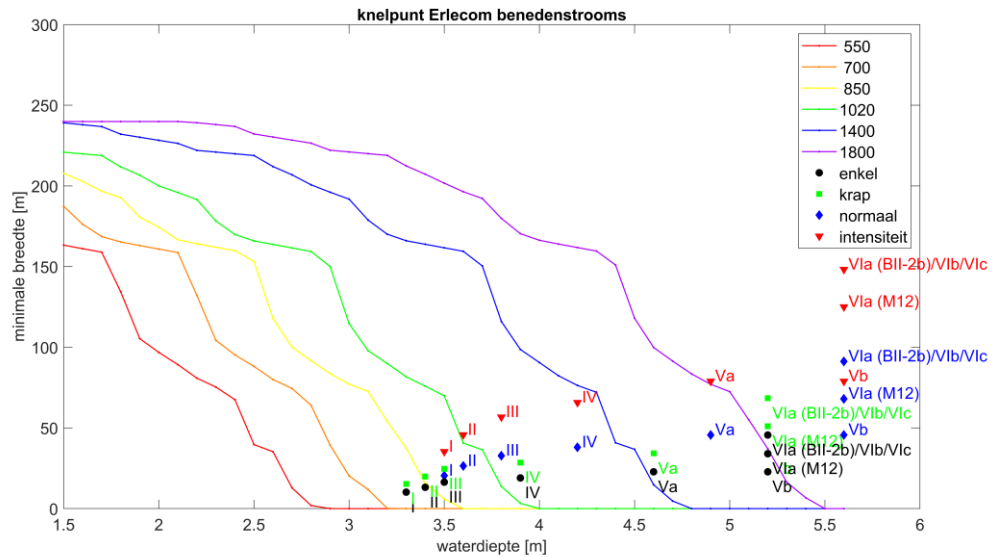
De groen/oranje/rode kleuren maken in één oogopslag inzichtelijk welke knelpunten het meest kritisch zijn. Bij het bepalen welke knelpunten maatgevend zijn, is het zinvol om twee corridors te beschouwen. Alle verkeer dat naar Duitsland vaart, móet de knelpunten bij Nijmegen en Erlecom passeren. Verkeer dat de andere knelpunten passeert, vaart niet allemaal richting Duitsland. Sommige schepen nemen de afslag richting Amsterdam-Rijnkanaal of Maas-Waalkanaal. We kunnen de knelpunten opdelen in twee trajecten: (1) de knelpunten ten oosten van Amsterdam-Rijnkanaal (ARK) / Maas-Waalkanaal (MWK) en (2) de knelpunten ten westen daarvan.

Voor het traject ten oosten van ARK/MWK is knelpunt Nijmegen maatgevend (minste groen, meeste rood bij alle afvoerniveaus). Voor het traject ten westen van ARK/MWK is knelpunt Ophemert bij de langsdammen maatgevend. Voor verkeer dat wel over de Waal vaart, maar niet Nijmegen passeert is Ophemert dus maatgevend.

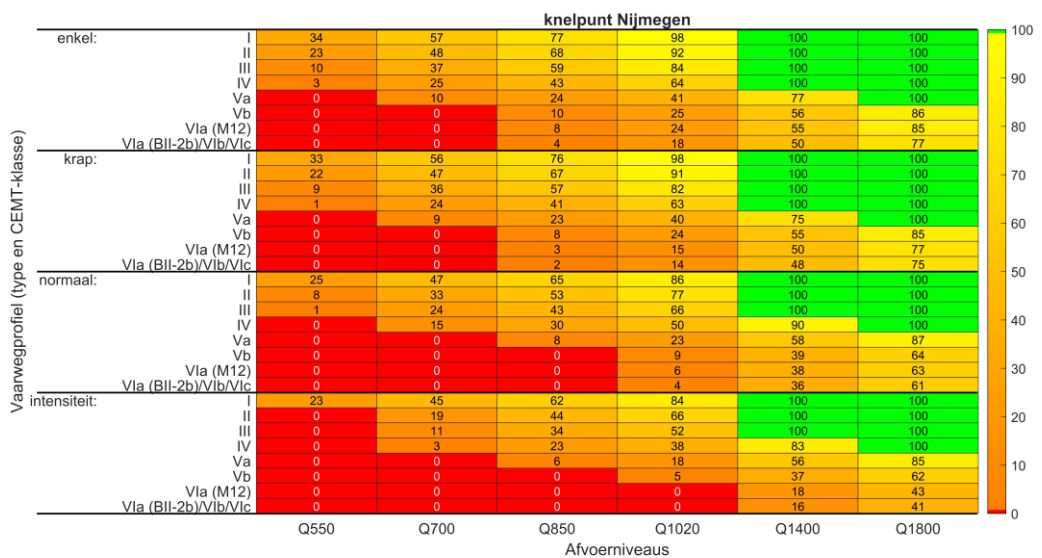
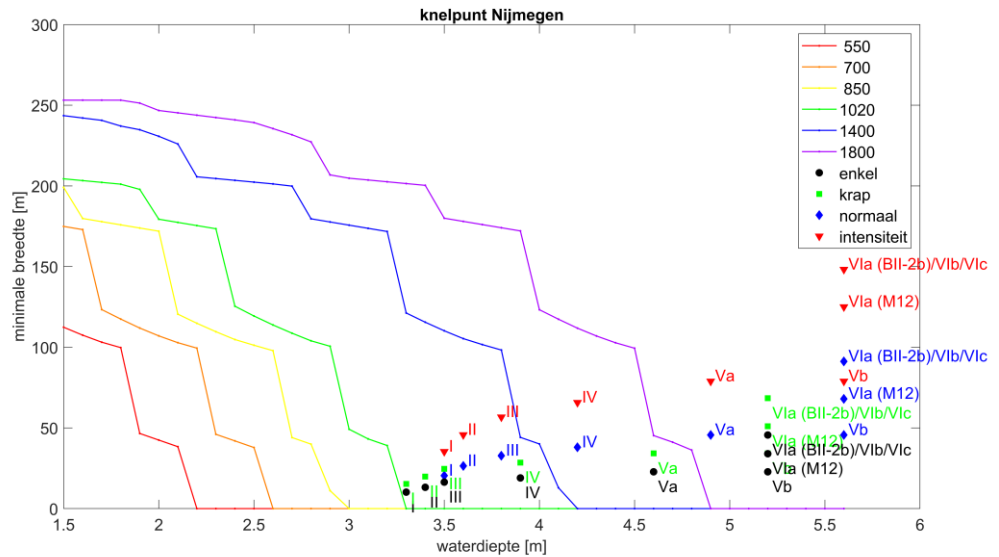
We merken volledigheidshalve nog op dat de beladingsgraden hier het resultaat zijn van het (theoretische) uitgangspunt van 30% of 40% kielspeling (1,3 of 1,4T) zoals voorgeschreven in de Richtlijnen Vaarwegen.



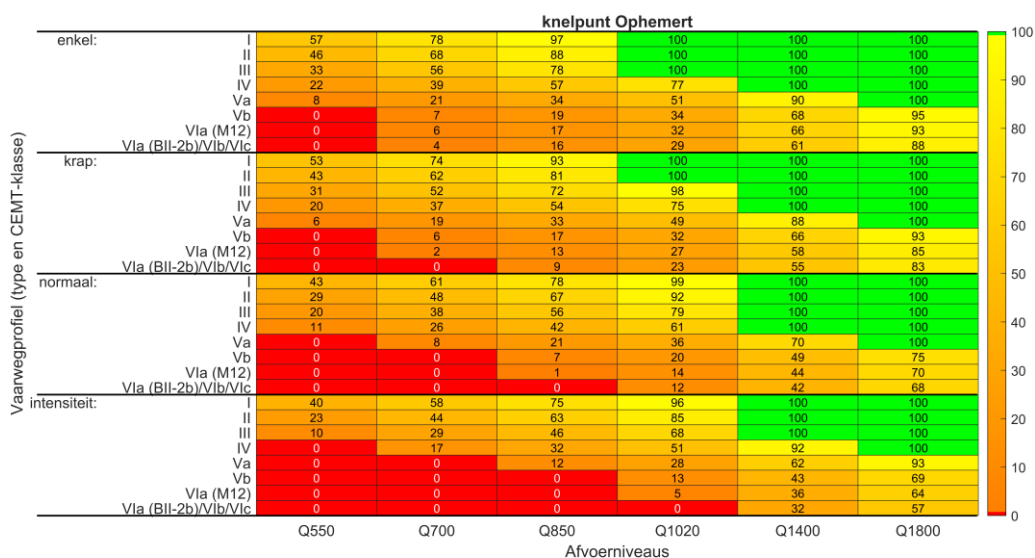
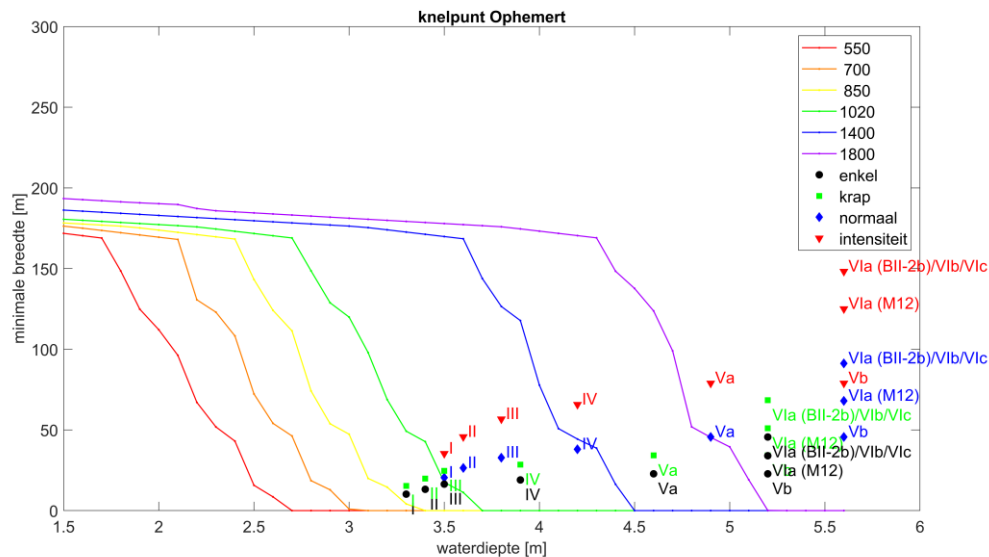
Figuur 2-7 Knelpunt "Erlecom". Boven: relatie tussen minimale breedte en de waterdiepte voor de KBN-afvoerniveaus. Onder: totaaloverzicht welk vaarwegprofiel (type en klasse) theoretisch valt in te passen bij ieder KBN-afvoerniveau. Waarden in de cellen zijn de beladingsgraad (in %).



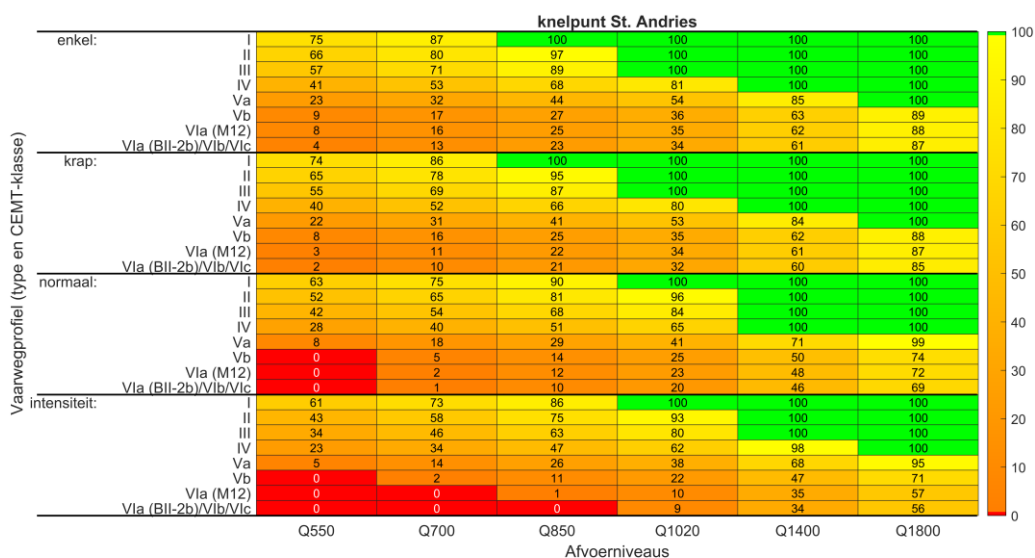
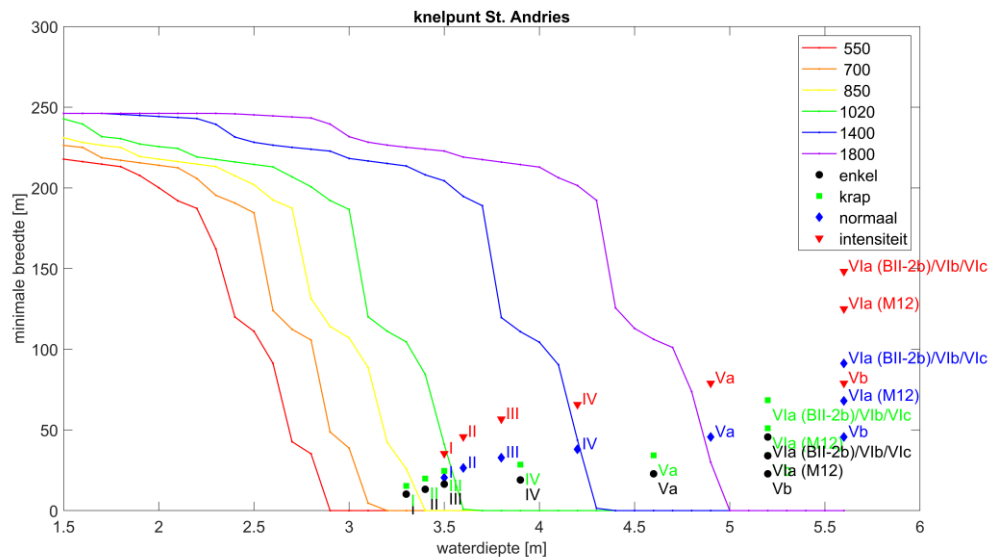
Figuur 2-8 Knelpunt "Erlecom benedenstrooms". Boven: relatie tussen minimale breedte en de waterdiepte voor de KBN-afvoerniveaus. Onder: totaaloverzicht welk vaarwegprofiel (type en klasse) theoretisch valt in te passen bij ieder KBN-afvoerniveau. Waarden in de cellen zijn de beladingsgraad (in %).



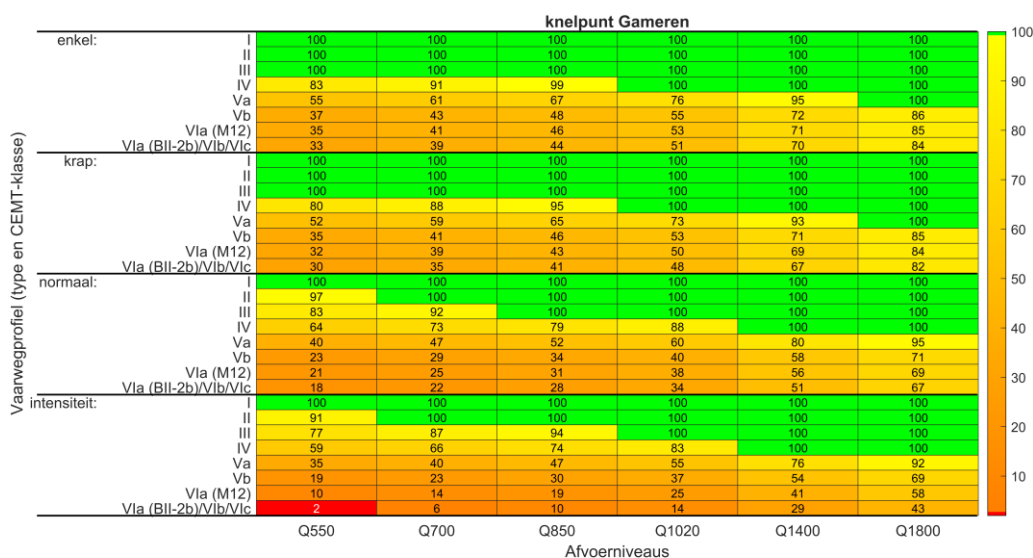
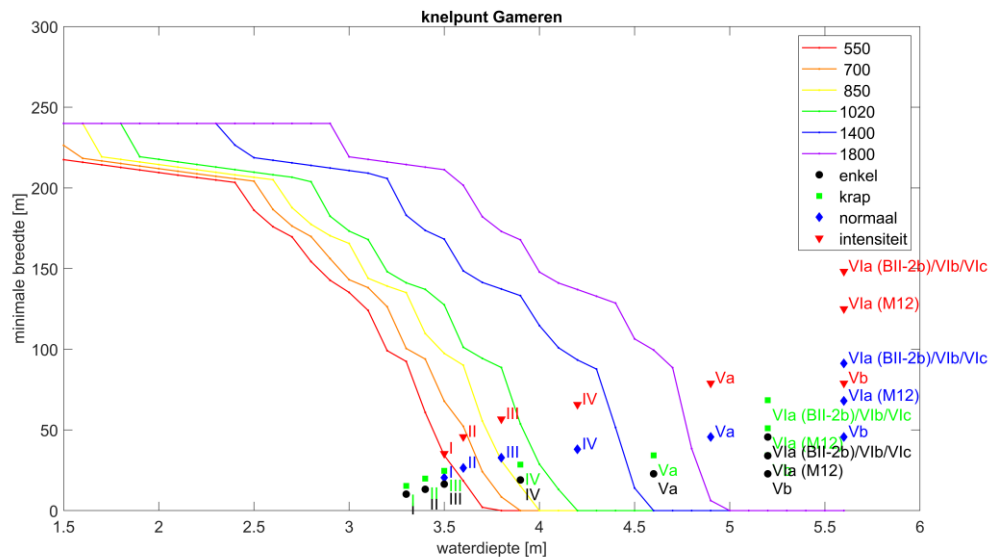
Figuur 2-9 Knelpunt "Nijmegen". Boven: relatie tussen minimale breedte en de waterdiepte voor de KBN-afvoerniveaus. Onder: totaaloverzicht welk vaarwegprofiel (type en klasse) theoretisch valt in te passen bij ieder KBN-afvoerniveau. Waarden in de cellen zijn de beladingsgraad (in %).



Figuur 2-10 Knelpunt "Ophemert". Boven: relatie tussen minimale breedte en de waterdiepte voor de KBN-afwormniveaus. Onder: totaaloverzicht welk vaarwegprofiel (type en klasse) theoretisch valt in te passen bij ieder KBN-afwormniveau. Waarden in de cellen zijn de beladingsgraad (in %).



Figuur 2-11 Knelpunt "St. Andries". Boven: relatie tussen minimale breedte en de waterdiepte voor de KBN-afwuurniveaus. Onder: totaaloverzicht welk vaarwegprofiel (type en klasse) theoretisch valt in te passen bij ieder KBN-afwuurniveau. Waarden in de cellen zijn de beladingsgraad (in %).



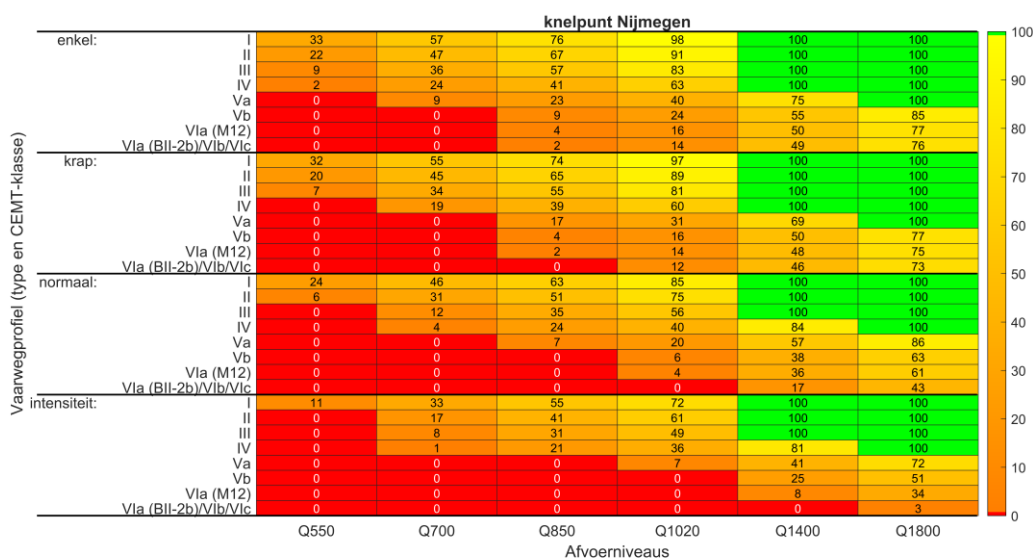
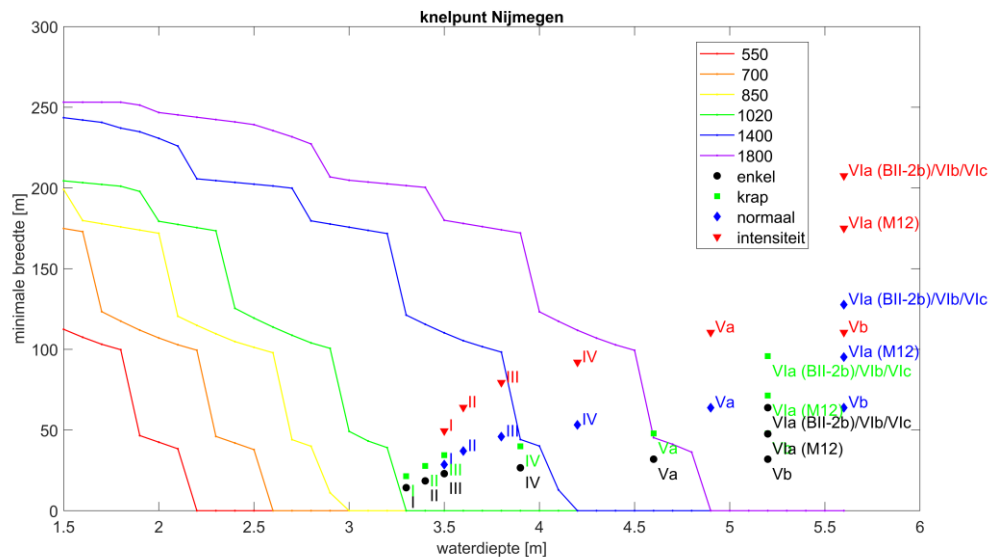
Figuur 2-12 Knelpunt "Gameren". Boven: relatie tussen minimale breedte en de waterdiepte voor de KBN-afvoerniveaus. Onder: totaaloverzicht welk vaarwegprofiel (type en klasse) theoretisch valt in te passen bij ieder KBN-afvoerniveau. Waarden in de cellen zijn de beladingsgraad (in %).

In de analyse hebben we toeslagen voor langsstroming, crossings tussen twee bochten, wind en bochten niet meegenomen.

- Bij een langsstroom kleiner dan 0,5 m/s is een toeslag niet nodig volgens de Richtlijnen Vaarwegen. Bij laagwater zal de stroomsnelheid wat lager zijn dan onder normale condities. Op het benedenstroomse deel van de Waal, vanaf St. Andries, ligt de stroomsnelheid (langsstroming) rond de 0,5 m/s bij een afvoer van 1000 m³/s. Bij hogere snelheden ligt de breedtetoeslag in de orde van 1 tot maximaal 5 m.

- De toeslag voor crossings bedraagt 0,144 keer de lengte van het maatgevende schip en kan dus oplopen tot enkele tientallen meters extra benodigde breedte. Deze toeslag dient toegepast als er tussen twee tegengestelde bochten sprake is van verkeer dat de vaarweg kruist om beter gebruik te maken van de stroom en/of de beschikbare waterdiepte in de bochten (voor het overlopen naar de andere oever en eventueel kruisen van het tegemoetkomende verkeer). De toeslag voor crossings hoeft niet toegepast als deze kleiner is dan de bochttoeslag van de aansluitende bochten. De beschouwde knelpunten betreffen ofwel een enkele bocht ofwel een relatief recht traject, oftewel geen crossings, zodat het verwaarlozen van deze toeslag hier te rechtvaardigen is. Alleen het 7^e knelpunt, een wat langer traject bij Gameren (benedenstrooms van Zaltbommel), bevat bochten en crossings. We verwachten dat de bochten hier dermate flauw zijn dat de scheepvaart niet vaak zal kruisen, maar gewoon rechts zal aanhouden.
- Extra breedtetoeslag vanwege zijwind is een lastige component, omdat de mate waarin zijwind hinder geeft afhangt van een groot aantal elementen. Vooral leegvaart en containerschepen hebben last van wind; daarnaast spelen de vlagerigheid van de wind, vaarsnelheid, oriëntatie van de vaarweg ten opzichte van de wind, of de vaarweg in een kust- of landstreek ligt ook een rol. Voor geladen schepen hoeft geen zijwindtoeslag in rekening gebracht. Bij vaarwegen die goed beschermt zijn (door ingraving, constructies, begroeiing) kan met geen of kleinere toeslag worden voldaan. Ondanks het grote aantal bepalende aspecten en het toenemende manoeuvreervermogen door grotere boegschroeven in containerschepen, wordt in de Richtlijnen Vaarwegen een waarde voor de toeslag gegeven. Voor het normaal profiel is dat circa 0,05 keer de lengte van het maatgevend schip (L) voor de landstreek, en voor het krappe profiel circa 0,07.L. Voor het enkelstrooks profiel is geen voorschrift. Dit toepassend is de zijwindtoeslag maximaal 12 m voor de grootste scheepsklasse. Daarnaast is een aanvullende toeslag vereist indien het aandeel in grote schepen (klasse Vb, VIb en VIc) groter is dan 5%. Voor de Waal is dit aandeel nog redelijk beperkt, en zal iets boven de 5% per klasse uitkomen (zie hierna, Figuur 3-5). Een extra toeslag van een tiental meters is dan benodigd bij een oriëntatie van 90° (de Waal is oost-west georiënteerd).
- De toeslag voor extra ruimte dat een maatgevend schip in een bocht nodig heeft, hangt onder andere af van de bochtstraal, of het schip opvarend of afvarend is en van de grootte van de langsstroming. Een waarde is niet eenvoudig uit de Richtlijnen Vaarwegen te halen, mede omdat de bochtstraal niet in termen van de vaarweg worden gegeven, maar in termen van de maatgevende scheepslengte. Erlecom en Nijmegen hebben een straal van orde grootte 1 km, zodat een ontmoeting van een leeg en geladen schip (dit wordt gesteld als zijnde de maatgevende situatie) een toeslag vereist van orde 10 m in geval van een klasse Va schip en lage stroomsnelheid. Bij hogere snelheid neemt de toeslag toe.

Als de breedtetoeslagen in totaal leiden tot een toename in benodigde breedte van zeg 40%, dan is het resultaat voor Nijmegen weergegeven in Figuur 2-13. Een toename van 40% betekent dat de benodigde breedte voor het intensiteitsprofiel voor klasse VIa/VIb/VIc toeneemt van 148 m naar 207 m. Een toename van circa 50 m is gezien het bovenstaande een realistische inschatting voor Nijmegen. Het meenemen van de toeslagen leidt ertoe dat de benodigde minimale breedte toeneemt (markers in breedte-waterdiepte figuur liggen hoger). Er komen enkele rode vakjes bij; nu is al bij een afvoer van 1400 m³/s bij Lobith een klasse VI intensiteitsprofiel niet meer in te passen door onvoldoende beschikbare breedte.



Figuur 2-13 Knelpunt "Nijmegen" met een toename in benodigde breedte van 40% vanwege toeslagen. Boven: relatie tussen minimale breedte en de waterdiepte voor de KBN-afvoerniveaus. Onder: totaaloverzicht welk vaarwegprofiel (type en klasse) theoretisch valt in te passen bij ieder KBN-afvoerniveau. Waarden in de cellen zijn de beladingsgraad (in %).

2.6 Vergelijking klimaatscenario's

Tot slot beschouwen we de verschillen tussen de verschillende klimaatscenario's voor een karakteristiek droog jaar (T10); een jaar dat een terugkeertijd van 10 jaar heeft. We doen dit voor de twee locaties Nijmegen en Ophemert, omdat de voorgaande paragraaf liet zien dat die twee locaties maatgevend zijn.

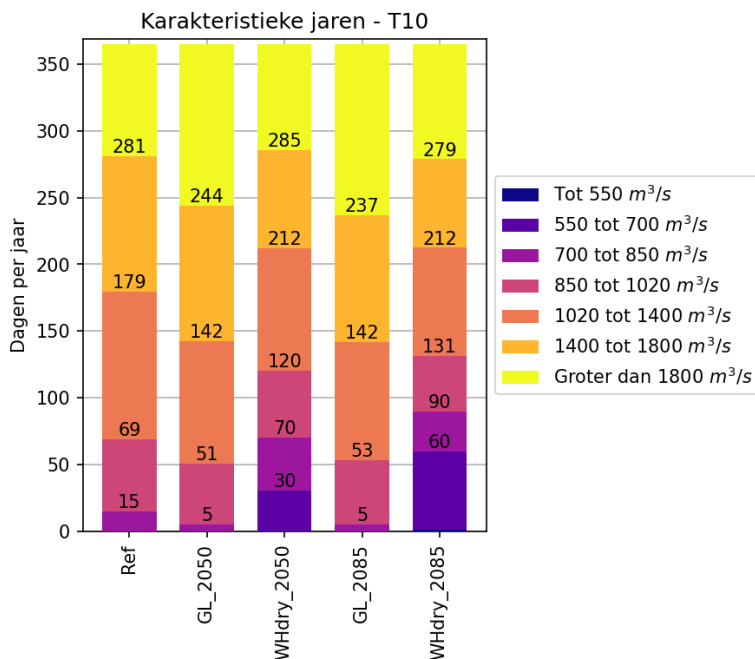
De informatie uit Figuur 2-14 over hoeveel dagen een bepaalde afvoer wordt onderschreden combineren we met de informatie over welke vaarwegprofielen nog passen bij bepaalde afvoeren. Hierbij doen we de aanname dat er nog gevaren wordt als de beladingsgraad groter of gelijk is aan 30%. Op die manier kan afgelezen worden (als voorbeeld) dat in het $W_{H,dry}$ scenario voor zichtjaar 2050 de afvoer gedurende 295 (365-70) dagen per jaar groter (of gelijk) is dan 850 m³/s.

Bij een afvoer van 850 m³/s kan bij Nijmegen een intensiteitsprofiel voor CEMT-klasse III gerealiseerd worden (beladingsgraad 34%), en kan er dus maximaal klasse III varen. Klasse IV past niet bij de gedane aanname, de beladingsgraad is dan 23%. Op die manier kunnen de onderstaande figuren (Figuur 2-15) worden afgelezen: gedurende 295 dagen per jaar kan maximaal klasse III intensiteits-vaarwegprofiel voor de scheepvaart naar Duitsland ingepast worden, en gedurende een kleiner aantal dagen per jaar is dat maximaal een hogere klasse.

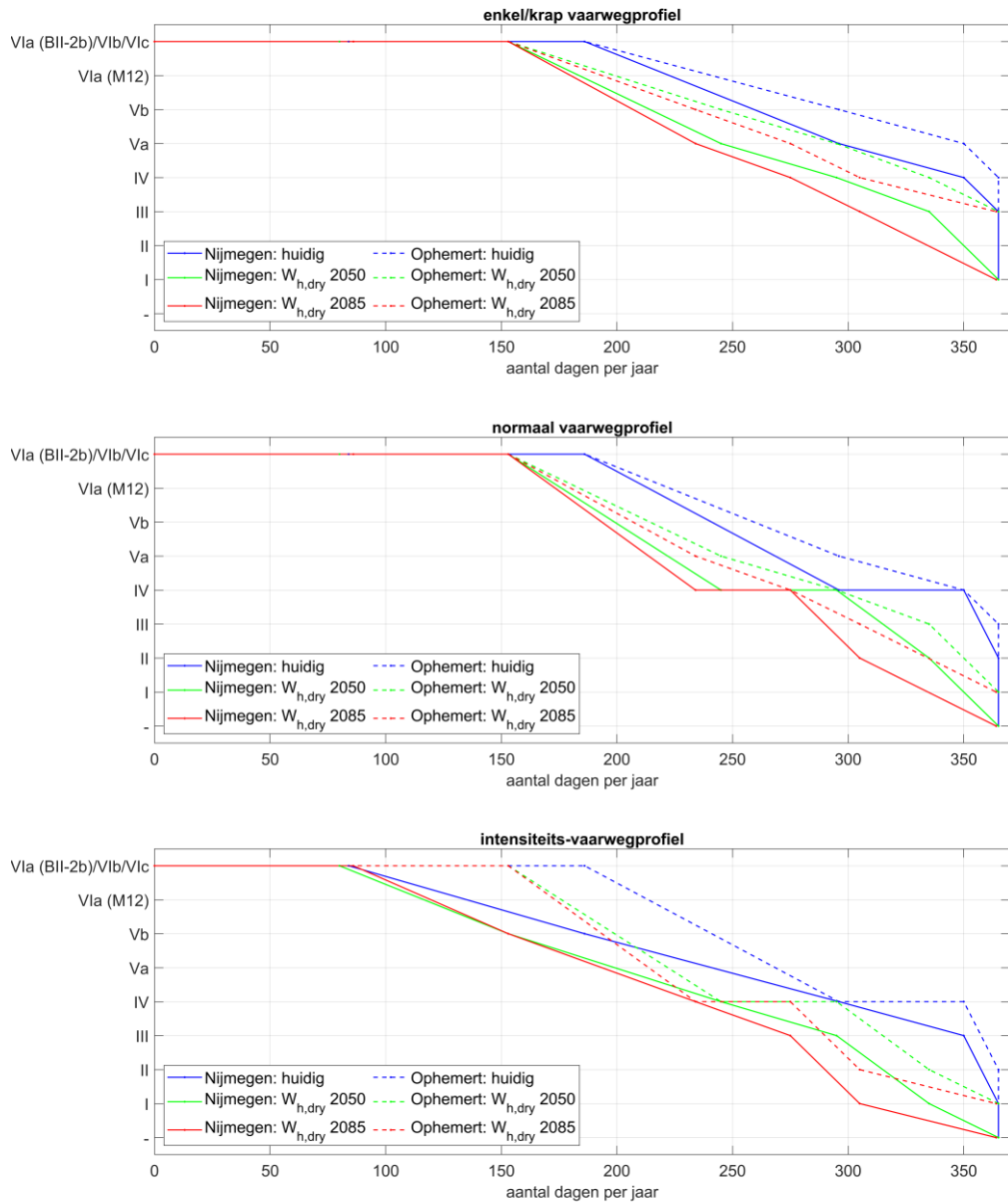
De grafiek komt tot stand door aantal dagen te koppelen aan afvoeren en die weer te koppelen aan de vaarwegprofielen. De knikpunten zijn daarmee bekend, maar niet het verloop (de lijnstukjes) tussen de knikpunten. Een horizontaal lijnstuk kan ontstaan als de sprong van het ene naar andere afvoerniveau (met bijbehorend aantal dagen) niet leidt tot een ruimer inpasbaar vaarwegprofiel door de aanname van minimaal 30% beladingsgraad (zie normaal profiel Nijmegen: bij Q850 past maximaal klasse IV met beladingsgraad van 30%; klasse Va past niet, want beladingsgraad van 8%; bij Q1020 past ook maximaal klasse IV, want klasse Va heeft een te lage beladingsgraad van 23%).

De resultaten zijn als verwacht: knelpunt Nijmegen is maatgevender dan Ophemert, intensiteitsprofiel is lastiger inpasbaar dan een krap profiel en de W_{H,dry} scenario's zijn eerder belemmerend voor hoge klassen dan het huidige klimaatscenario. Het is wel verstandig de figuren door de ooghalen te beschouwen en niet direct op de werkelijkheid te projecteren gezien de aannames (zoals kielspeling en beladingsgraad), gezien het gaat om theoretische profielen, en de discrete aanpak. Het geeft een globaal beeld van de impact voor de verschillende klimaatscenario's.

Vermeldenswaardig is dat in het huidige klimaat in een karakteristiek droog jaar (T10) maar ongeveer 85 dagen per jaar voldaan kan worden aan het intensiteitsprofiel voor de hoogste klasse (VIa/VIb/VIc). Dit verandert nauwelijks in de toekomstige klimaatscenario's.



Figuur 2-14 Opbouw van een karakteristiek droog jaar (T10) met een terugkeertijd van 10 jaar voor de verschillende klimaatscenario's.



Figuur 2-15 Aantal dagen per jaar dat een bepaald vaarwegprofiel (CEMT-klasse) kan worden ingepast voor een karakteristiek droog jaar (T_{10}) en de verschillende klimaatscenario's.

3 Praktijk: wat vaart nog waar bij lage afvoeren

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt beschouwd welke scheepstypes in werkelijkheid nog varen met welke diepgang tijdens (hele) lage afvoeren en welk deel van de rivier dan benut wordt (en dus in ieder geval bevaarbaar is). Hiertoe zijn voor het eerste deel van de onderzoeksvraag (wat vaart nog met hoeveel diepgang) geanonimiseerde IVS-data van de jaren 2018 t/m 2022 verwerkt die zijn aangeleverd door Rijkswaterstaat, met daarin ook de droge jaren 2018 en 2022. Voor het tweede deel van de vraag (in welk gedeelte van de rivier) zijn AIS-data een geschikte databron. Het verwerken van AIS data is een omvangrijke exercitie; daarom brengen we in deze verkenning bij elkaar wat we hierover al weten van eerdere studies. Eventuele vervolgvragen kunnen dan in later stadium worden gedefinieerd en opgepakt.

3.2 Wat vaart bij lage afvoeren op basis van IVS-data

3.2.1 Diepgang

Er is gebruik gemaakt van door Rijkswaterstaat aangeleverde IVS-data bij telpunt Lobith. In het bestand staan alle reizen tussen NL en DE via de Rijn/Waal (pers. comm. Bas Turpijn) van 01-01-2018 tot 31-12-2022. In het bestand zijn onder andere het aantal reizen, de lading (type en tonnage) en scheepskenmerken (klasse en afmetingen) opgenomen.

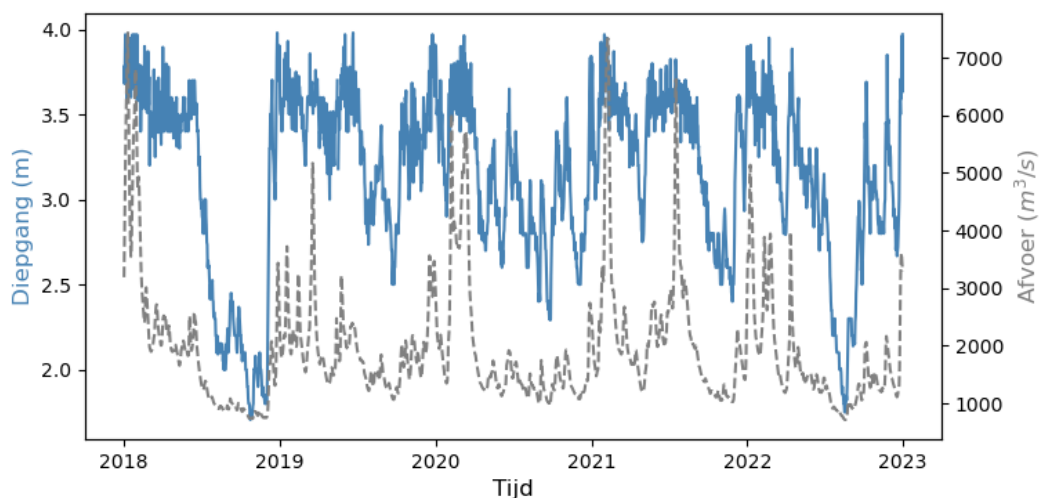
Om te bepalen wat er nog kan varen bij bepaalde afvoeren zijn de volgende stappen doorlopen:

- Uit de IVS-dataset wordt de diepgang van schepen verwerkt. Deze gegevens zijn allereerst bewerkt door 'default' waarden zoals 9999 en 9900 cm voor de diepgang eruit te halen.
- Vervolgens is per dag bepaald wat de 95^e percentiel in diepgang is van alle geladen schepen. Met andere woorden: wat is op een bepaalde dag de diepgang waar 95% van de geladen schepen op die dag mee vaart. We zijn geïnteresseerd in wat er nog kan varen bij een zekere lage afvoer, en daarom zoeken we primair de *maximale* diepgang op een zekere dag. Aangezien de data foutwaarden bevat, is gekozen voor de 95-percentiel aanpak. Dit is beter dan het verwijderen van diepgang-waarden groter dan een gekozen subjectief criterium, omdat de keuze van het criterium direct het resultaat beïnvloedt. De 95-percentiel van een parameter wordt in literatuur vaker gebruikt om spikes of infrequente pieken weg te laten uit een analyse naar maximale waarden.
- De 95-percentiel diepgang op iedere dag wordt afgezet tegen de gemiddelde afvoer op die dag.

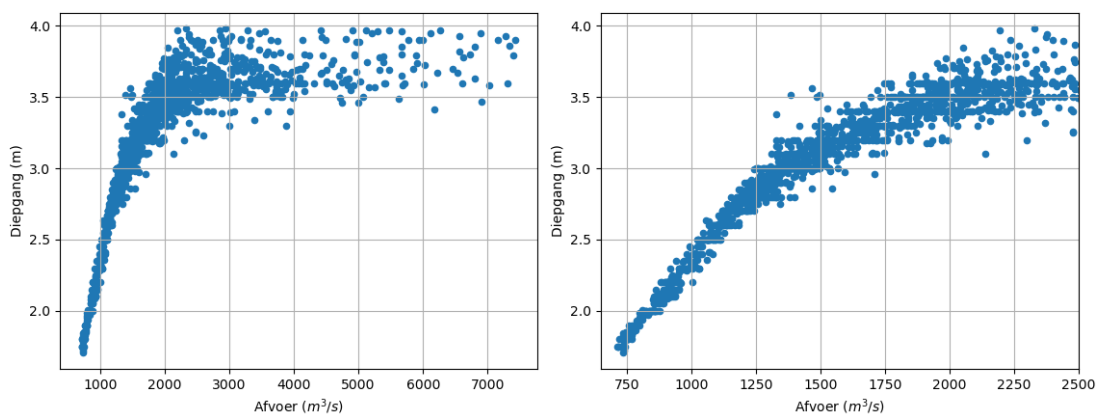
In Figuur 3-1 springen de laagwaterperiodes van 2018 en 2022 er direct uit. Toen was de 95-percentiel diepgang van de schepen minder dan 2,0 m. Figuur 3-2 toont bij welke afvoer nog met welke maximale (95-percentiel) diepgang gevaren kan worden. De figuur laat duidelijk zien dat de diepgang (95-percentiel) bij hoge afvoeren varieert tussen de 3 en 4 m, en afneemt bij afnemende afvoer. Ook is te zien dat de spreiding afneemt met afnemende afvoer. Uit de data kunnen we de onderstaande 95-percentiel diepgang aflezen (fit door de data) en de daarmee samenhangende beladingsgraad bepalen (Tabel 3-1). De beladingsgraad is hier bepaald als $(95\text{-percentiel diepgang} - \text{lege diepgang}) / (\text{geladen diepgang} - \text{lege diepgang})$. Het was niet mogelijk om de beladingsgraad per reis vanuit de IVS-data te bepalen (lading/laadvermogen), omdat het laadvermogen niet aanwezig was in de dataset.

Tabel 3-1 Opgetreden diepgang (95-percentiel) bij verschillende afvoeren en maximale beladingsgraad (in %) die gehaald kan worden per scheepsklasse bij de daadwerkelijk opgetreden maximale (95-percentiel) diepgang.

Lobith-afvoer (m ³ /s)	95-percentiel diepgang (m), van IVS-data	Beladingsgraad (%)					
		I	II	III	IV	Va	Vb, VIa, VIb, VIc
550	n/a	-	-	-	-	-	-
700	1,7	38%	25%	17%	7%	0%	0%
850	2,0	62%	50%	42%	29%	12%	0%
1020	2,4	92%	83%	75%	57%	35%	20%
1400	3,0	100%	100%	100%	100%	71%	50%
1800	3,4	100%	100%	100%	100%	94%	70%



Figuur 3-1 Diepgang per dag (95-percentiel) afgeleid van IVS-data versus daggemiddelde afvoer bij Lobith.



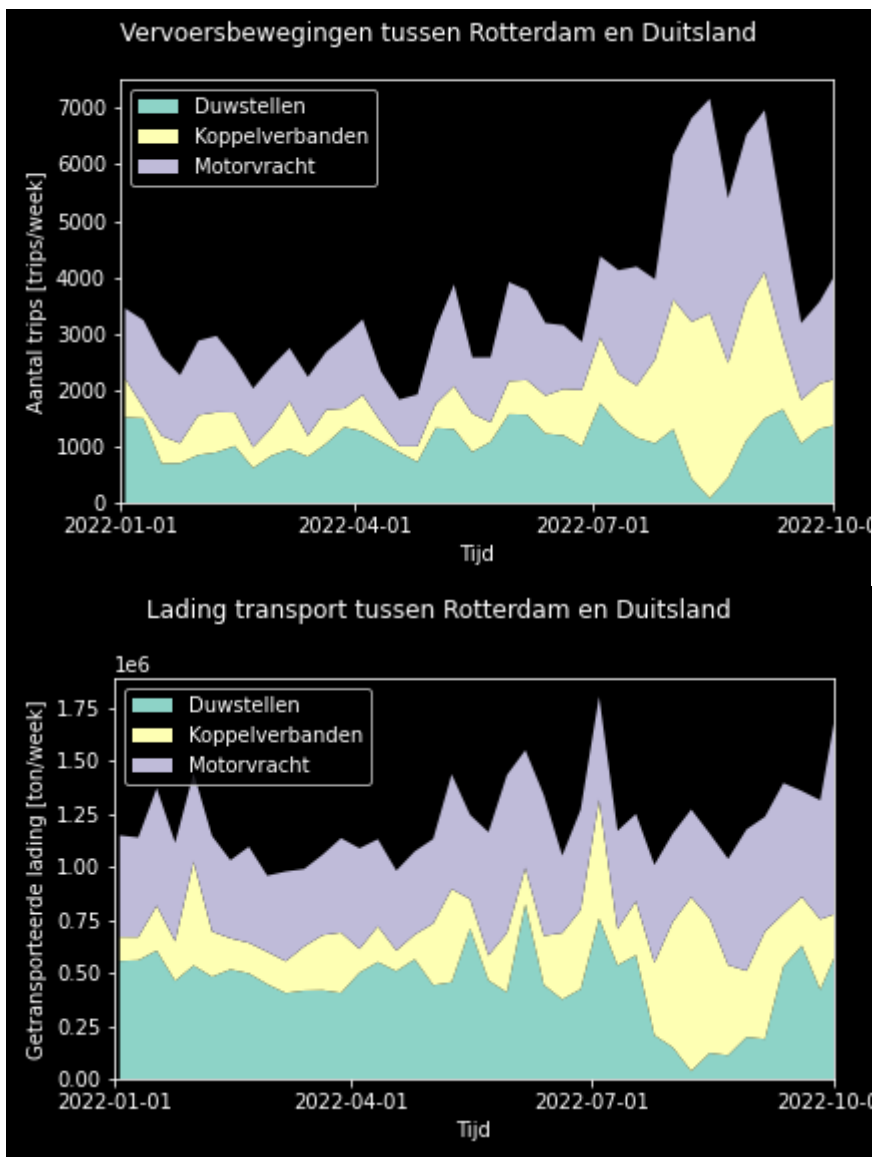
Figuur 3-2 Diepgang per dag (95-percentiel) als functie van de afvoer bij Lobith. Links: hele bereik van voorgekomen afvoeren in de beschouwde periode; rechts: ingezoomd op lage afvoeren.

3.2.2 Scheepstypen

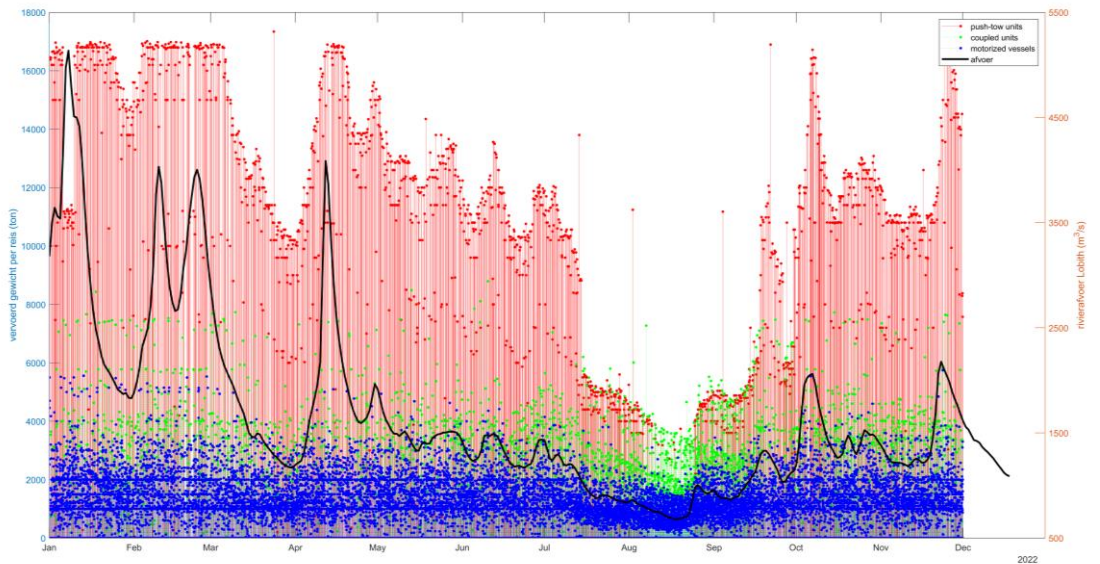
Vervolgens hebben we bekeken welk type (klasse) schepen bij hele lage afvoeren nog in de vaart zijn. Voor de scrollymap Droogte ([Droogte op de rivier \(drought-scrolly.netlify.app\)](#)), waarin het effect van de droogte van 2022 op de scheepvaart in beeld werd gebracht, hadden we hier al een korte verkenning naar gedaan. We zagen dat er ruim 2x zoveel trips nodig waren om lading van Rotterdam naar Duitsland te vervoeren, dat duwstellen tijdens het laagwater vrijwel geheel uit de vaart waren, en dat ter compensatie er meer goederentransport plaatsvindt middels koppelverbanden (Figuur 3-3). Het vervoerd gewicht per reis is weergegeven in Figuur 3-4.

Met de voor dit project aangeleverde dataset breiden we dit inzicht verder uit door extra jaren mee te nemen (de scrollymap ging alleen over 2022), een verdere uitsplitsing te maken in de scheepstypen, en door te kijken of er een relatie te vinden is tussen varende scheepstypen en afvoer. Daartoe plotten we de varende vloot als functie van de afvoer (Figuur 3-5). Het grootste aandeel van de vloot is de klasse Va. Verder zien we een toename in het aantal passages bij de lagere afvoeren. In Figuur 3-7 is dezelfde informatie op andere wijze weergegeven, zodat duidelijker zichtbaar is welke scheepstypen minder varen bij een afnemende afvoer. Er is enkel een afname zichtbaar bij de CEMT VIc schepen (dit zijn 6-baks duwstellen). Die gaan geleidelijk uit de vaart als de afvoer afneemt tot onder de $1150 \text{ m}^3/\text{s}$.² Het gaat overigens om een afname van circa 10 scheepspassages naar 1 passage per dag. Voor nagenoeg alle andere scheepstypen is er een toename in aantal passages zichtbaar bij afnemende afvoer. Dit zet zich in vanaf ongeveer $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ bij Lobith.

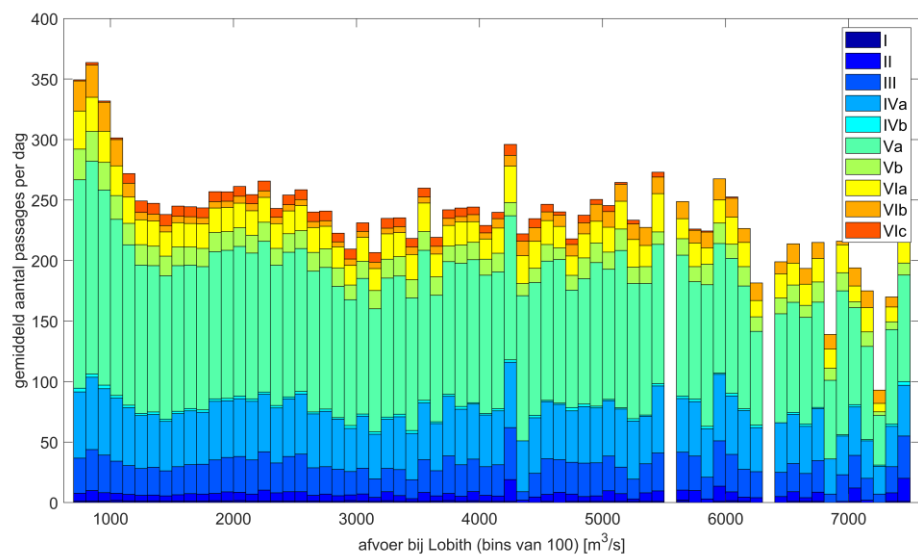
² Het Rijnvaartpolitiereglement 1995 schrijft voor dat 6-baks duwstellen alleen op de Waal mogen varen als de waterstand bij Lobith tussen 8,50 m en 13,50 m + NAP is gelegen. Volgens de betrekkinglijnen is de afvoer bij Lobith ongeveer $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ bij een waterstand van 8,50 m. In een rapportage van RWS uit 2007 (RWS, 2007) is onderzocht of als nieuwe ondergrens 7,5 m + NAP (afvoer van circa $1100 \text{ m}^3/\text{s}$) kan worden aangehouden. Er is in die rapportage geadviseerd om duwstellen met 6 bakken toe te laten op de Rijn onder dezelfde condities als 4-baksduwstellen.



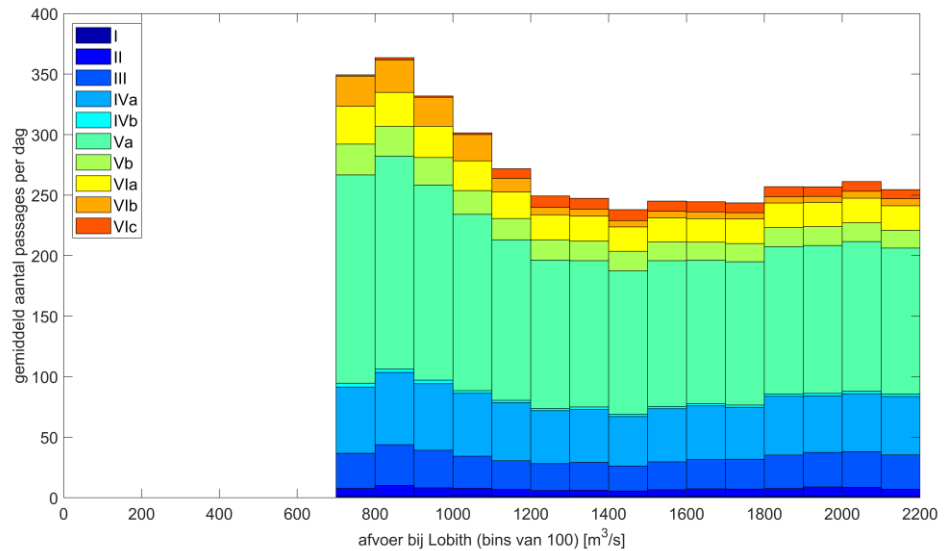
Figuur 3-3 Goederentransport tussen Rotterdam en Duitsland, uitgesplitst naar type schip (motorschip, koppelverband, duwstellen). Boven: aantal trips per week. Onder: getransporteerd tonnage per week.



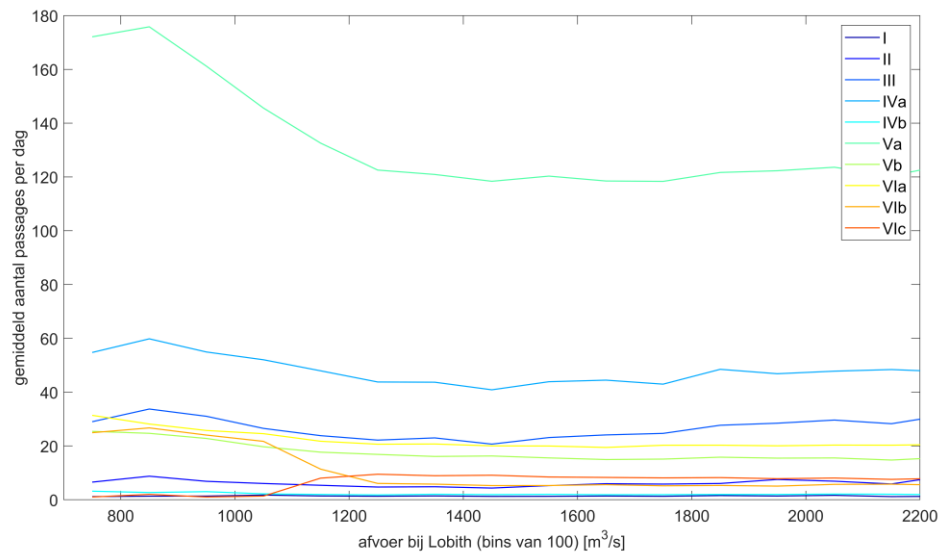
Figuur 3-4 Goedertransport tussen Rotterdam en Duitsland, uitgesplitst naar type schip (motorschip, koppelverband, duwstellen). Vervoerd gewicht per reis (linkeras), samen met de afvoer bij Lobith (rechteras). Elk staafje is een reis.



Figuur 3-5 Aantallen passages per dag onderverdeeld per scheepstype (CEMT-klasse) als functie van de afvoer, afgeleid van de IVS-data.



Figuur 3-6 Aantallen passages per dag onderverdeeld per scheepstype (CEMT-klasse) als functie van de afvoer, afgeleid van de IVS-data. Dezelfde figuur als Figuur 3-5, maar ingezoomd op de lage afvoeren tot 2200 m³/s bij Lobith.



Figuur 3-7 Aantallen passages per dag onderverdeeld per scheepstype (CEMT-klasse) als functie van de afvoer, afgeleid van de IVS-data. Dezelfde informatie als in Figuur 3-5, maar op andere wijze gepresenteerd en ingezoomd op de lage afvoeren tot 2200 m³/s bij Lobith.

3.3 Waar wordt gevaren bij lage afvoeren op basis van scheepstrack data

Voor de analyse waar binnen de rivier wordt gevaren bij afnemende afvoer zijn scheepstrack-data de meest geschikte databron. In deze verkenning brengen we bij elkaar welke informatie bekend is over ruimtegebruik bij verschillende afvoeren.

Voor onder andere het ruimtegebruik in de Waal zijn in de afgelopen jaren twee grotere analyses gedaan met behulp van schepenstrack-data, en ook in de scrollymap is AIS-data beschouwd binnen de context van laagwater en ruimtegebruik:

- Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal: geanonimiseerde AIS-data
 - Werkpakket WP4 Interpretatie AIS-data (Indah-Everts & Hermans, 2021)
 - Werkpakket WP7 Functie Vaarweg (Van der Mark & Van der Wijk, 2021)
- Eindevaluatie suppleties Boven-Rijn: geanonimiseerde CoVadem data
 - Deelrapport 2: Invloed op rivierfuncties (Becker et al., 2023)
- Scrollymap Droogte: geanonimiseerde AIS-data

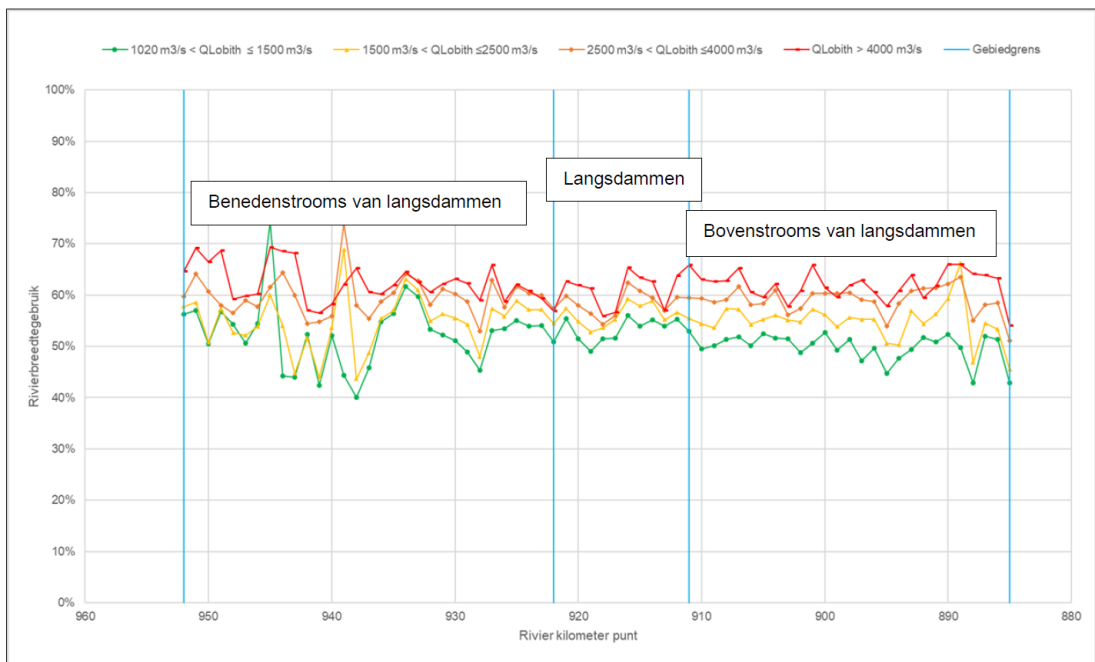
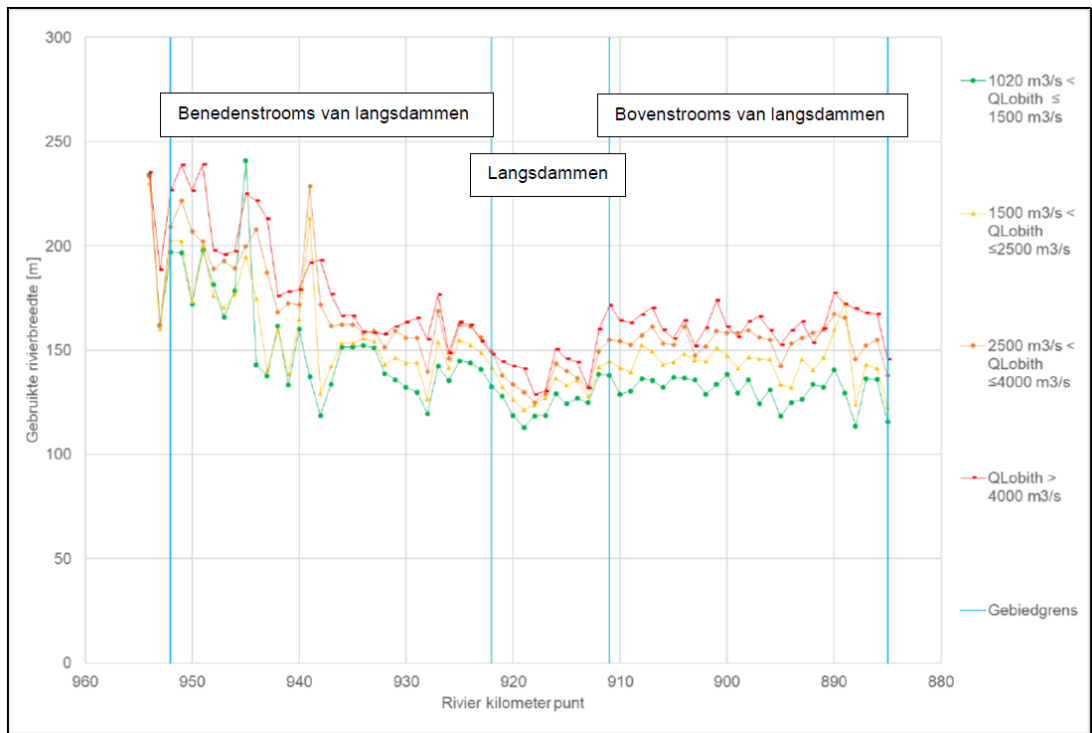
Voor de vraag welk deel van de rivier wordt benut bij verschillende afvoeren, zijn hieronder de resultaten uit de studies bijeengebracht.

In de langsdammen-studie is gebruik gemaakt van AIS-data over de periode januari 2018 t/m juni 2018, en januari 2019 t/m mei 2020. De tweede helft van 2018, waarin het laagwater was, kon niet worden meegenomen, omdat deze data niet beschikbaar waren. Dat betekent dat het beeld bij zeer lage afvoer niet inzichtelijk gemaakt kon worden. Voor verschillende afvoerranges werd afgeleid welke rivierbreedte benut werd. De volgende ranges voor de afvoer bij Lobith (Q_L) werden daarbij gehanteerd:

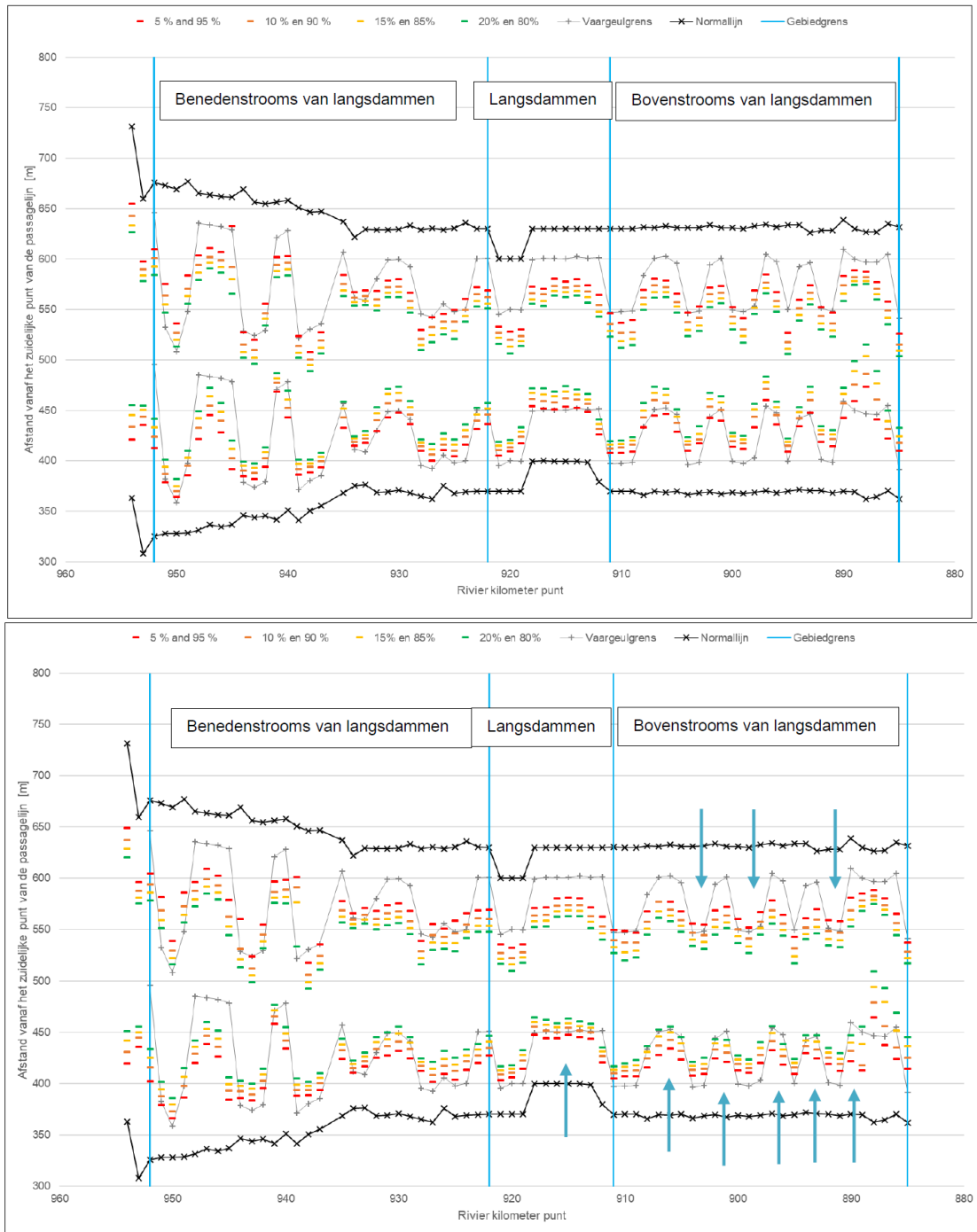
- Q_L kleiner dan 1020 m³/s
- Q_L tussen 1020 en 1500 m³/s
- Q_L tussen 1500 en 2500 m³/s
- Q_L tussen 2500 en 4000 m³/s
- Q_L groter dan 4000 m³/s

Een afvoer kleiner dan 1020 m³/s kwam nauwelijks voor in de beschouwde periode waarvoor data beschikbaar waren, en is in de figuren niet meegenomen.

Figuur 3-8 laat zien dat bij lage afvoeren de gebruikte breedte ordegrrootte 130 m bedraagt, en dat de gebruikte breedte toeneemt met toenemende afvoer. Richting benedenstrooms wordt de rivier breder en dus ook de benutte breedte. Bij lage afvoer wordt overal zo veel mogelijk binnen de 150 m brede vaargeul gevaren (afgezien van benedenstrooms vanaf rkm 945, bij Brakel). Dit is ook te zien in Figuur 3-9, Bijlage B.1 en aanvullende figuren in Indah-Everts & Hermans (2021). Bij toenemende afvoer gaan schepen de grotere ruimte benutten, blijven niet binnen de beleidsmatige vaargeul.



Figuur 3-8 Boven: gebruikte rivierbreedte op de Waal voor verschillende afvoerranges. 90% van de schepen vaart binnen deze breedte. Het traject loopt van net benedenstrooms van Nijmegen tot Vuren. Onder: gebruikte rivierbreedte ten opzichte van de normaalbreedte, de afstand tussen de normaallijnen. Bron: Indah-Everts & Hermans (2021).

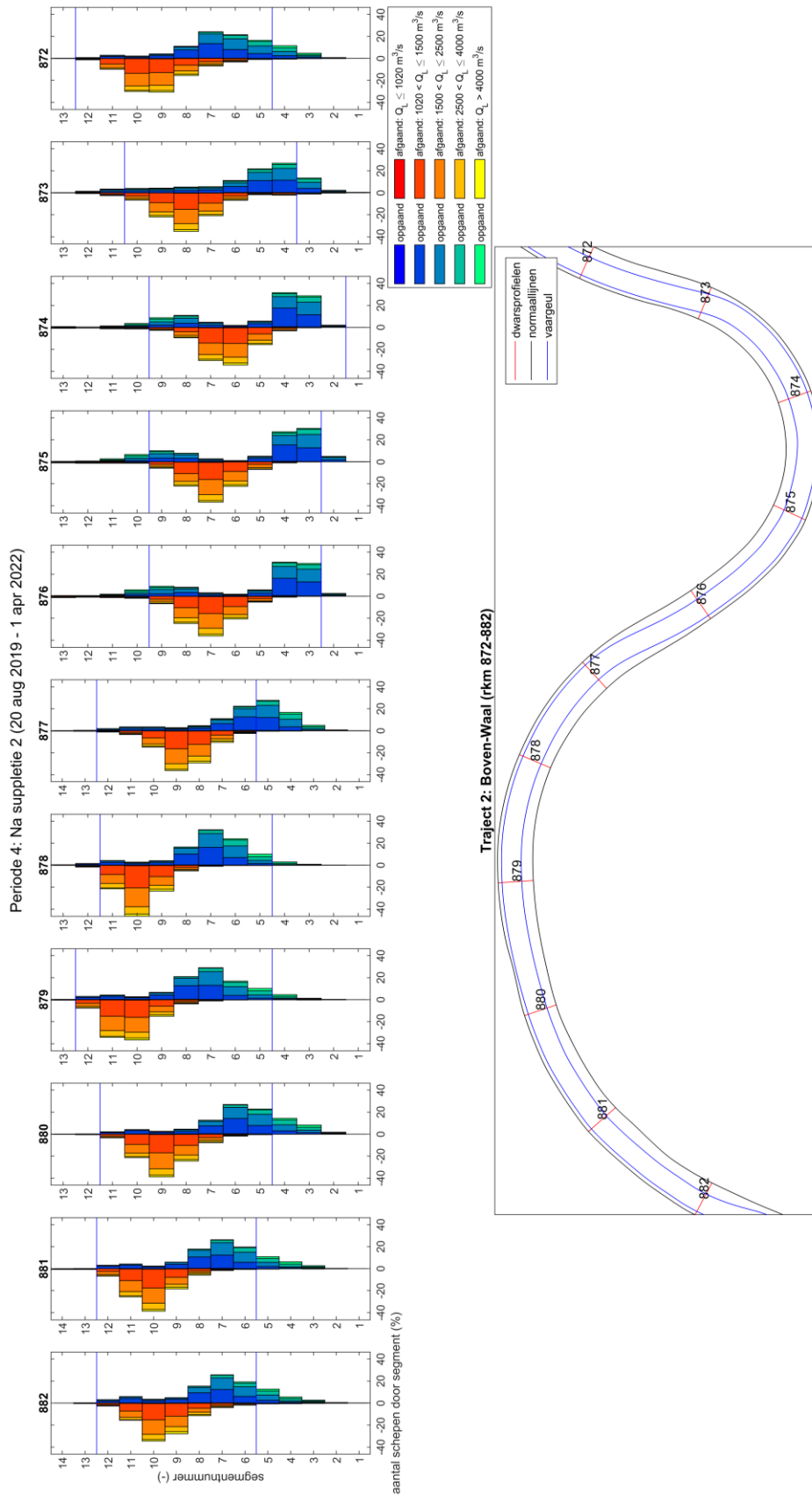


Figuur 3-9 Gebruikte rivierbreedte met onderscheid in percentielen. 90% van de schepen vaart binnen het rode deel, 80% binnen het oranje deel, 70% binnen het gele deel, 60% binnen het groene deel. De normaallijnen en 150 m brede beleidsmatige vaargeul zijn weergegeven. Het traject loopt van net benedenstrooms van Nijmegen tot Vuren. Boven: ruimtegebruik voor de afvoerrange 1020 – 1500 m³/s. Onder: ruimtegebruik voor de afvoerrange 1500 – 2500 m³/s. Bron: Indah-Everts & Hermans (2021).

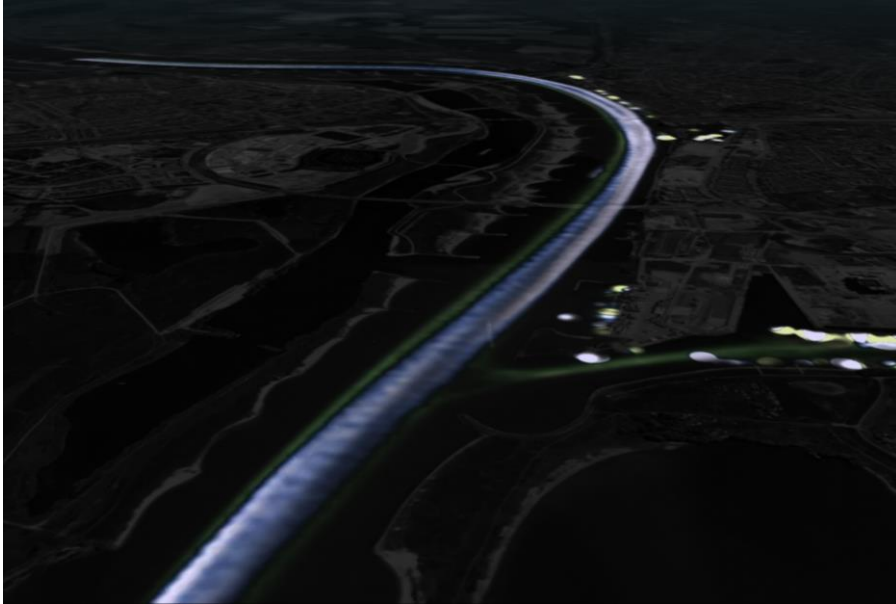
Een overeenkomstig beeld is gevonden in de suppletie-studie, waarin CoVadem-data werden gebruikt voor de bepaling van het ruimtegebruik. In deze studie werden drie trajecten beschouwd, waarvan er twee in de Waal liggen: de bocht bij Erlecom (Figuur 3-10) en een deel van de Midden-Waal (Figuur 3-11). Op het relatief rechte traject (Midden-Waal) houdt het merendeel van de opvaart de linkeroever aan en de afvaart de rechteroever.

Bij de bocht van Erlecom houdt de opvaart niet altijd de linkeroever aan. Bij hogere afvoer wordt een breder deel van de rivier benut dan bij lagere afvoer.

In de Scrollymap Droogte ([Droogte op de rivier \(drought-scrollly.netlify.app\)](https://drought-scrollly.netlify.app)) is ook een beknopte verkenning opgenomen van het ruimtegebruik aan de hand van AIS-data. Hier is een week met redelijk lage afvoer (week 18, ongeveer 1600 m³/s bij Lobith) vergeleken met een week met zeer lage afvoer (week 34, ongeveer 900 m³/s bij Lobith), zie Figuur 3-12.



Figuur 3-10 Ruimtelijke verdeling van schepen bij de bocht bij Erlecom, waarbij onderscheid is gemaakt in verschillende afvoerniveaus en opvaart/afvaart. De ligging van de vaargeul is met blauwe lijnen aangegeven in de histogrammen. Bron: Becker et al. (2023).



Figuur 3-12 Verschil in ruimtegebruik (in aantal schepen per gridcel per week) bij Nijmegen. Groen betekent minder verkeer, blauw meer verkeer in de “droge week” (week 34 van 2022) in vergelijking tot de minder droge week (week 18 van 2022). Het Maas-Waalkanaal wordt minder bevaren (groen) door de stremming van sluis Weurt.

4 Synthese

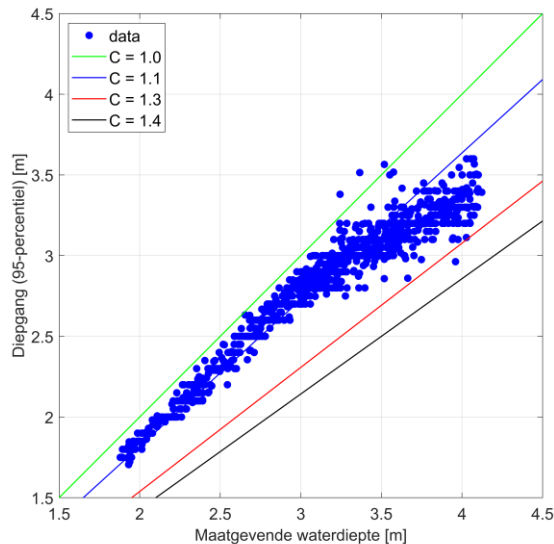
In de voorgaande hoofdstukken is vanuit enerzijds de theorie en anderzijds de praktijk beschouwd welke scheepvaart in termen van diepgang en CEMT-klasse nog knelpunten kan passeren bij verschillende lage afvoeren, en wat dit betekent bij een toekomstig klimaat ($W_{H,dry}$ 2050 en 2085). Hier doen we een eerste aanzet om de vergaarde informatie over theorie en praktijk samen te brengen en komen tot de onderstaande bevindingen.

Diepgang en beladingsgraad – vergelijking theorie en praktijk

Al bij een afvoer van 1800 m³/s moeten de grootste schepen met verminderde beladingsgraad varen volgens de theorie. Dit stemt overeen met wat we zien in de praktijk. Er is nog wel voldoende breedte voor een vaarwegprofiel van de hoogste klassen.

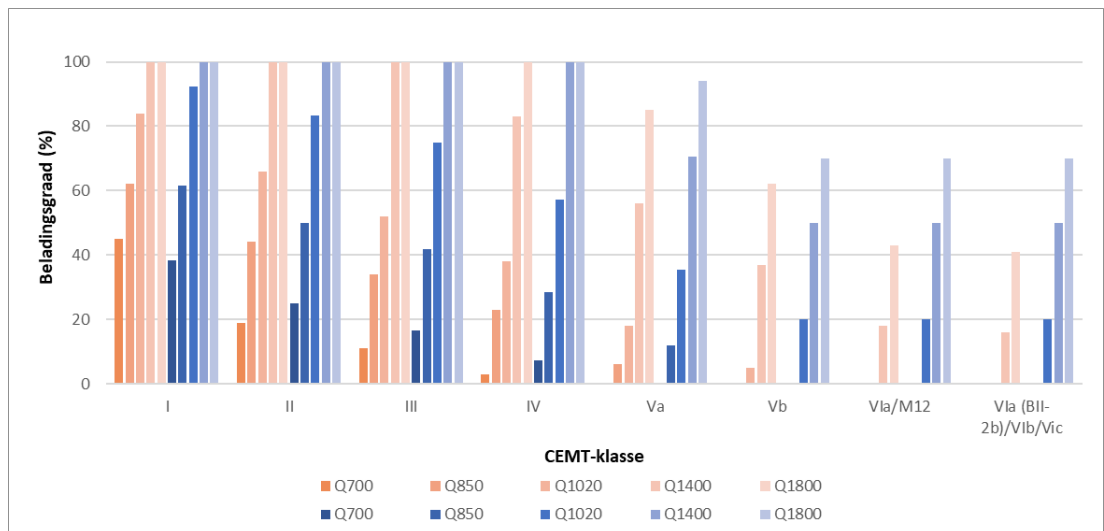
In de Richtlijnen Vaarwegen, en Hoofdstuk 2 – theorie, wordt uitgegaan van een minimaal benodigde waterdiepte gelijk aan 1,3 of 1,4 keer de diepgang van het maatgevende geladen schip. Als we dit vergelijken met de IVS-data, lijkt in de praktijk een kleinere kielspeling aangehouden te worden (Figuur 4-1). Dit werd ook eerder geconcludeerd. De Jong (2020) laat bijvoorbeeld zien aan de hand van een eerdere IVS-analyse dat bij zeer geringe waterdiepte een kielspeling van 0,0 tot 0,3 m wordt aangehouden (afhankelijk van type lading) ten opzichte van de MGD-waarde. Ook wordt wel gevaren met grotere diepgangen dan de MGD.

In Figuur 4-1 is de 95-percentiel diepgang uit de IVS-data geplot tegen een maatgevende waterdiepte, waaruit de kleinere kielspeling (circa 10%) blijkt. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat het resultaat vrij gevoelig is voor de wijze waarop de maatgevende waterdiepte is afgeleid. De maatgevende waterdiepte is hier voor ieder KBN-afvoerniveau bepaald als de minimale diepte binnen de vaargeul op het traject Nijmegen aan de hand van het bestaande tweedimensionale 2018 bodem rooster (zie De Jong & Van der Mark, 2019). Met de aldus opgestelde Q_{KBN} -Waterdiepte-relatie zijn de 95-percentiel diepgang-data bij opgetreden afvoer geplot. De zo afgeleide maatgevende waterdiepte is niet de werkelijke waterdiepte die ten tijde van de reizen uit IVS-data optrad. Indien gewenst, is het aan te bevelen om iets meer tijd te nemen voor de IVS-data-analyse. Het beste zou zijn om als maatgevende waterdiepte de MGD te gebruiken (dag van de reis uit IVS-data en de MGD van die betreffende dag aan elkaar koppelen).



Figuur 4-1 Diepgang per dag (95-percentiel) als functie van de maatgevende waterdiepte. De maatgevende waterdiepte is bepaald als de minimale diepte bij Nijmegen. Enkel data is weergegeven waarbij de afvoer lager is dan 1800 m³/s bij Lobith. De getrokken lijnen hoort bij de relatie “Maatg. waterdiepte = C x Diepgang (95-p)”.

Daarnaast was het niet mogelijk om de beladingsgraad direct uit de data af te leiden. De beladingsgraad, naast de diepgang een geschikte parameter om te toetsen, is te bepalen als lading / laadvermogen. Als beide velden bekend zijn, kan de beladingsgraad worden bepaald. Het laadvermogen maakte geen deel uit van de dataset, zodat het gedrag in praktijk niet goed kan worden vergeleken met de theorie/richtlijnen. Dit zou in een vervolg aangevuld kunnen worden. Figuur 4-2 toont de beladingsgraad die volgens de theorie mogelijk zou zijn om Nijmegen te passeren (intensiteitsprofiel) versus de beladingsgraad die is afgeleid van de opgetreden diepgang. Hier wordt dan uitgegaan van een karakteristieke diepgang vol en ledig bij de verschillende CEMT-classes. Ook hier is te zien dat de beladingsgraad afgeleid van “praktijk” iets groter is dan “theorie” aangezien de kielspeling in theorie groter is.



Figuur 4-2 Beladingsgraad die mogelijk is volgens de theorie (oranje) en beladingsgraad afgeleid van opgetreden diepgang (blauw). De geplote data volgt uit Figuur 2-9 (knelpunt Nijmegen - intensiteitsprofiel) en Tabel 3-1.

Vaarwegbreedte – vergelijking theorie en praktijk

Een vergelijking tussen theorie en praktijk ten aanzien van de benodigde en gebruikte vaarwegbreedte is met de verzamelde informatie eveneens lastig. Volgens de theorie is een breedte nodig van minimaal 148 m voor de grootste scheepsklasse in het intensiteitsprofiel (Tabel 2-1). Daar komen enkele tientallen meters bij inclusief toeslagen voor wind en bochten. Als de daadwerkelijk benutte breedte op het traject van benedenstrooms Nijmegen tot Vuren (Figuur 3-9) bij lage afvoeren wordt vergeleken met de benodigde (minstens 148 m) en mogelijke vaarwegbreedte (148 m op dit traject overal inpasbaar bij Q1020 en hoger, behalve bij Ophemert), dan kunnen we vaststellen dat de scheepvaart minder breedte gebruikt (orde 130 m) dan de richtlijnen voorschrijven. De benodigde ruimte is aanwezig volgens de dwarsprofielen, maar de scheepvaart kiest er toch voor om slechts een smallere strook te benutten. Dit is wellicht omdat de schippers zo veel mogelijk diepte onder de kiel willen hebben.

Scheepstypes – vergelijking theorie en praktijk

Bij een afvoer van 1020 m³/s bij Lobith is een klasse VI vaarweg (intensiteitsprofiel) niet meer in te passen, uitgaande van de benodigde breedte en waterdiepte voor een vlotte en veilige vaart volgens de Richtlijnen Vaarwegen. De beschikbare breedte en waterdiepte zijn dan bij Nijmegen dusdanig dat er onvoldoende ruimte is. Bij een verder afnemende afvoer naar 850 en 700 m³/s bij Lobith, komen daar respectievelijk de klassen Vb en Va bij. Voor scheepvaart op de Waal die niet langs Nijmegen hoeft, is het langsdammen-traject bij Ophemert maatgevend, maar daar is de situatie ten aanzien van de beschikbare ruimte (breedte en diepte) niet veel anders. Ook hier geldt dat bij een afvoer van 850 en 700 m³/s bij Lobith intensiteitsprofielen voor respectievelijk Vb en Va (of hoger) niet meer inpasbaar zijn.

In werkelijkheid varen deze grote schepen nog veelvuldig bij zulke lage afvoeren (data tot ~750 m³/s). Dat dit niet helemaal met elkaar overeenstemt, komt doordat de richtlijnen een zekere minimale breedte voorschrijven. Als die benodigde breedte voor een bepaalde klasse er niet is, is het vaarwegprofiel niet in te passen volgens de gekozen aanpak. In werkelijkheid is er nog wel genoeg diepte aanwezig om, zij het met beperkte beladingsgraad, met zo'n klasse te varen.

In de praktijk zien we dat alleen de CEMT-klasse VIc (duwstellen) nagenoeg uit de vaart gaan bij afvoeren onder de 1150 m³/s. Voor een nautisch vlotte en veilige vaarweg zou volgens de theorie/richtlijnen ook voor Vb, VIa en VIb te weinig ruimte zijn (normaal en intensiteitsprofiel Nijmegen, Q850).

Als we kijken naar de impact van snelle klimaatverandering ($W_{H,dry}$) voor een karakteristiek droog jaar, dan zien we dat het aantal dagen dat de afvoer groter is dan 1800 m³/s nauwelijks verschilt (Ref, $W_{H,dry}$ 2050 en 2085), en dus verandert ook het aantal dagen niet (orde 80 per jaar bij het intensiteitsprofiel Nijmegen) dat een profiel voor de grootste klassen (en dus ook voor de kleinere) past. Verschuivingen treden op in de lagere afvoeren. In het huidige klimaat past een klasse III profiel nog bijna het hele jaar, bij snelle klimaatverandering reduceert dit tot 300 (in 2050) en 275 (in 2085) dagen per jaar.

Limiet qua bevaarbaarheid

De analyse laat zien dat bij afvoeren van 850 en 700 m³/s bij Lobith intensiteitsprofielen voor respectievelijk Vb en Va (of hoger) niet meer inpasbaar zijn, zowel bij Nijmegen als Ophemert. De beschikbare breedte bij deze afvoeren is te klein voor een intensiteitsprofiel voor deze klassen, en bij Nijmegen ook voor een normaal profiel. Vanuit optiek van nautische veiligheid zou je hier de limiet kunnen stellen qua bevaarbaarheid.

Er zou overwogen kunnen worden om geen klasse Vb (en hoger) meer toe te staan als de afvoer onder 850 m³/s zakt, en geen klasse Va (en hoger) als de afvoer onder 700 m³/s zakt³. Echter is het aan te bevelen hier eerst aanvullend onderzoek naar te doen. Het gaat om een tijdelijke situatie, en schippers varen tijdens extreme condities met hogere alertheid en voorzichtigheid en zijn in staat minder breedte te gebruiken. Anderzijds is het wel drukker tijdens lage afvoeren dan onder normale condities, wat de nautische veiligheid verder onder druk zet.

Een enkelstrooks profiel is voor de hoogste klassen nog wel in te passen bij 850 m³/s (Nijmegen) en 700 m³/s (Ophemert). Een andere maatregel kan zijn een vorm van lokaal passeerverbod over een bepaald traject voor bepaalde klassen bij de meest kritische locaties in combinatie met verkeersbegeleiding als de afvoer onder een bepaalde waarde daalt. Een vergelijkbare maatregel is van kracht op de IJssel, waar schepen groter dan 80 x 9,5 m op enkele korte trajecten (bochten) niet mogen passeren of oplopen. Op de IJssel is dit verbod geldig voor alle afvoeren, op de Waal zou een afhankelijkheid van afvoer een optie kunnen zijn. De intensiteit op de Waal is dermate groot dat dit op het eerste oog wat onrealistisch lijkt, maar het aandeel van passages van de allergrootste klassen (Vb en hoger) is redelijk beperkt. Ook hier is nader nautisch onderzoek nodig.

Huidige eisen

Als we de uitgevoerde analyse vergelijken met de actuele eisen die gesteld zijn vanuit de CCR en TEN-T, dan stellen we vast dat een klasse IV intensiteit vaarwegprofiel (TEN-T) niet inpasbaar is bij afvoeren vanaf 1400 m³/s en lager (oranje blokjes bij Ophemert en Nijmegen, Figuur 2-9 en Figuur 2-10). Het is wel zo dat in TEN-T een maatgevend schip met diepgang van 2,5 m voor klasse IV als uitgangspunt wordt genomen, terwijl hier is uitgegaan van 3,0 m (Tabel 2-2). Ook voor de CCR-eis hebben we laten zien dat een breedte van 150 m niet overal beschikbaar is bij een waterdiepte van 2,80 m bij OLA.

³ Het Rijnvaartpolitiereglement geeft vergelijkbare restricties dat bepaalde scheepsafmetingen bij bepaalde ondergrenzen en bovengrenzen op bepaalde trajecten niet meer mogen varen. Waarschijnlijk liggen dezelfde overwegingen hieraan ten grondslag (te beperkte ruimte, vlot- en veiligheid in geding). Vanzelfsprekend is aanvullend (nautisch) onderzoek nodig alvorens een dergelijke overweging in praktijk te brengen.

5 Aanbevelingen

Deze studie had een verkennend karakter, waarbij alle onderwerpen van de onderzoeksvragen geadresseerd zijn. Het was niet mogelijk om alle onderzoeksvragen even uitgebreid te behandelen. Hieronder reflecteren we op de gestelde vragen, waaruit mogelijke aanbevelingen voor vervolg kunnen worden afgeleid.

Door Rijkswaterstaat zijn de volgende onderzoeksvragen (cursief) gesteld:

- *Hoe vaak, hoe lang en met welke terugkeertijd komen verschillende lage afvoeren voor bij toekomstige klimaatscenario's?*
 - Het aantal dagen per jaar met lage afvoeren in een karakteristiek droog jaar (T10) is terug te vinden in Figuur 2-14. Bij de analyse naar vaarwegprofielen (volgende vraag) is een karakteristiek droog jaar gebruikt om de impact van klimaatverandering te bepalen. Dit zou uitgebreid kunnen worden voor andere jaren met andere terugkeertijden.
- *Wat zijn de maximale scheepsafmetingen (diepte, breedte en lengte) die op basis van de richtlijnen een aantal bottlenecks kunnen passeren bij verschillende lage afvoeren? Wat betekent dit voor het aantal vaarstroken dat beschikbaar is op basis van de afvoercondities?*
 - Welke vaarwegprofielen, op basis van de richtlijnen, wel en niet zijn in te passen bij de knelpunten op de Waal voor verschillende afvoeren is weergegeven in Figuur 2-6 t/m Figuur 2-12. Het is aan te bevelen om de invloed van toeslagen (bocht, wind) iets beter te beschouwen. Daarnaast is het zinvol om te bekijken wat een andere kielspeling doet op de resultaten, aangezien we weten uit de praktijk (volgende vraag) dat met kleinere kielspelingen gevaren wordt. In deze studie is gekozen om het “theoretische” hoofdstuk met de voorgeschreven richtlijnen uit te werken. Als daadwerkelijk wordt overwogen om beleidsmaatregelen door te voeren, moet gekeken worden wat realistisch is, en is de theorie wellicht te streng.
- *Ervaring uit de praktijk: hoe ziet het daadwerkelijke gebruik van de vaarweg eruit bij lage afvoeren:*
 - *Wat passeert het knelpunt tijdens lage afvoeren op basis van metingen (IVS-data) en welke ruimte (breedte en diepte op basis van IVS/AIS-data) wordt door de scheepvaart gebruikt?*
 - *Hoe kijkt dit af van wat we gebruikelijk zien bij mediane/gemiddelde afvoer?*
 - *Hoe kunnen we de waargenomen verschillen tussen de antwoorden op voorliggende twee vragen verklaren?*

Welke scheepstypes nog in de vaart zijn bij lage afvoeren, wat de diepgang is waarmee wordt gevaren bij lage afvoeren, en welke ruimte wordt benut bij verschillende afvoeren is gepresenteerd in Hoofdstuk 3. Er is aanbevolen om iets meer tijd te nemen voor de IVS-data-analyse ten aanzien van diepgang en beladingsgraad, echter is het de vraag of dit aanvullende kennis oplevert.

- *Conclusie: onder welke afvoercondities en hoe vaak treden deze op in het klimaatscenario waarbij de bevaarbaarheid niet voldoet aan de gestelde eisen (CCR/TEN-T)?*

Een doorkijk naar de klimaatscenario's en hoeveel dagen per jaar bepaalde vaarwegprofielen niet meer ingepast kunnen worden, is weergegeven in Figuur 2-15.

- *Zijn er limieten voor de bevaarbaarheid te definiëren wat betreft afvoercondities? Wanneer houdt het op?*

In de synthese is gesteld dat een limiet voor de bevaarbaarheid gedefinieerd kan worden daar waar theoretisch geen normaal profiel meer ingepast kan worden. Vanuit optiek van vlotheid en nautische veiligheid is dat een te rechtvaardigen overweging. Dat betekent geen klasse Vb (en hoger) meer toe te staan als de afvoer onder $850 \text{ m}^3/\text{s}$ zakt, en geen klasse Va (en hoger) als de afvoer onder $700 \text{ m}^3/\text{s}$ zakt. Aanvullende nautische studie is nodig alvorens een dergelijke maatregel te overwegen.

Een van de aspecten die bij aanvullend onderzoek verder meegenomen zouden moeten worden is de gevoeligheid van de resultaten van de analyse op de bodemligging. We werken nu met een bewerkte (vergridde) 2018 bodemligging. Aangezien de opname van de bodemligging een momentopname is (een maand later bijvoorbeeld kunnen aanzandingen ontstaan of juist verdwenen/weggebaggerd zijn), is het verstandig om te bekijken of de resultaten qua inpasbaarheid van vaarwegprofielen nagenoeg onveranderd blijven voor enkele andere momentopnames van de bodemligging.

6 Referenties

- Becker, A., R. van der Mark, R. van der Wijk, E. Mosselman (2023). Eindevaluatie suppleties Boven-Rijn; Deelrapport 2: Invloed op rivierfuncties. Deltares rapport 11208437-000-ZWS-0010, d.d. 8 maart 2023.
- DVS (2009). Rijkswaterstaat, Dienst Verkeer en Scheepvaart. Scheepvaartinformatie Hoofdvaarwegen Editie 2009.
- Indah-Everts, S.N. & M.I. Hermans (2021). Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal; Interpretatie AIS-data. MARIN rapport 32127-1-MO-rev.1.0, d.d. 25 februari 2021.
- Jong, J.S. de (2019). KBN: Bedreiging klimaatverandering - Beschrijving karakteristieke droge jaren met stationaire afvoerniveaus. Deltares memo 11203738-005-BGS-0002 versie 1.1 d.d. 14 december 2019.
- Jong, J.S. de (2020). KBN-HVWN Stresstest droogte Rijntakken: Impact op de scheepvaart. Deltares rapport 11205274-004-BGS-0009, d.d. 14 december 2020.
- Jong, J.S. de (2021). Quick Inland Navigation Cost Model (QINCoM) voor een snelle berekening van het effect van laagwater en maatregelen op kosten van de binnenvaartsector. Deltares memo 11205272-005-ZWS-0003, d.d. 16 december 2021.
- Jong, J.S. de & R. van der Mark (2021). KBN-HVWN Stresstest droogte Rijntakken: Toestand van het Systeem en Kwetsbaarheid gebruiksfunctie. Deltares rapport 11205274-004-BGS-0022, d.d. 7 mei 2021.
- Jong, J.S. de & A. Nijenhuis (2020). Probleembeschrijving en oplossingsrichtingen voor de ondiepte bij St. Andries. Deltares memo 11205271-009-ZWS-0001 d.d. 3 september 2020.
- KNMI (2015). Klimaatscenario's voor Nederland 2014. Herziene uitgave 2015.
- Mark, R. van der & R. Van der Wijk (2021). Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal; Functie Vaarweg. Deltares rapport 11204644-009-ZWS-0003, d.d. 30 september 2021.
- Rijkswaterstaat (2007). Verruiming toelating zesbaksduwvaart. Adviesdienst Verkeer en Vervoer, augustus 2007
- Rijkswaterstaat (2018). Waterdieptekaarten Rijntakken RWS-ON. RWS memo d.d. 1 november 2018, Luc Jans. https://maps.rijkswaterstaat.nl/gwproj55/index.html?viewer=ON_Waterdieptekaarten_Rijntakken.Webviewer
- Rijkswaterstaat (2020). Richtlijnen Vaarwegen 2020. ISBN: 978-90-9033423-3.
- Rijkswaterstaat (2022). Klimaatbestendige Netwerken: Stresstest Hoofdvaarwegennet - Deelrapport Droogte; Risico's van klimaateffecten voor de scheepvaart. d.d. 14 april 2022.

A Bijlagen bij Hoofdstuk 2

A.1 Intensiteit op jaarbasis en jaargemiddeld laadvermogen

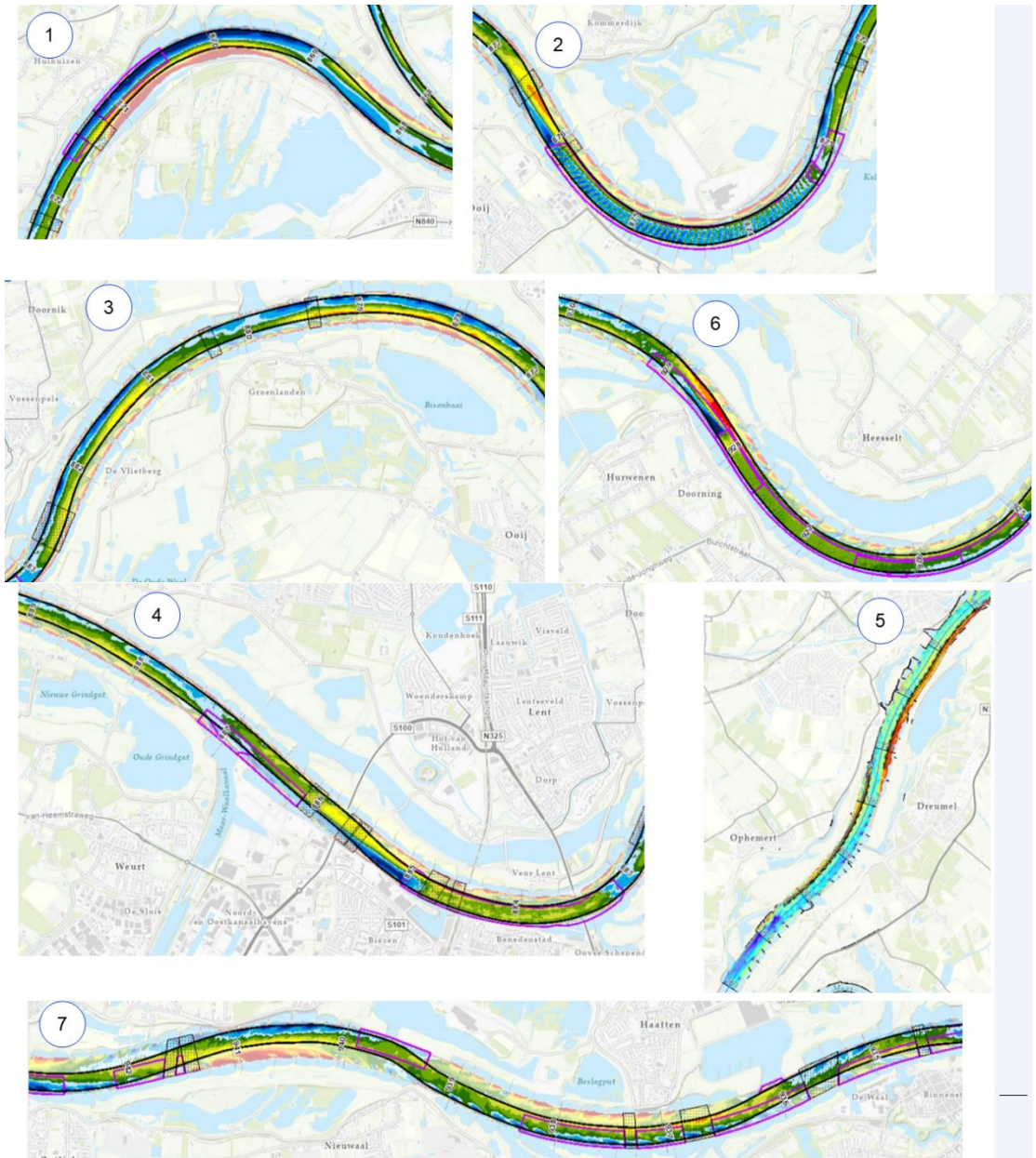
Tabel A-1 Aantal scheepspassages bij Lobith op jaarbasis. Bronnen: DVS (2009) en IVS-data van 2018 t/m 2022 aangeleverd door Rijkswaterstaat.

Jaar	Aantal passages
2005	70999
2006	136405
2007	126741
2008	124081
2018	125121
2019	106597
2020	102088
2021	104823

Tabel A-2 Jaargemiddeld laadvermogen bij Lobith. Bron: DVS (2009).

Jaar	Gewogen gemiddeld laadvermogen (ton)
2005	2444
2006	2380
2007	2457
2008	2543

A.2 Beschouwde knelpunten

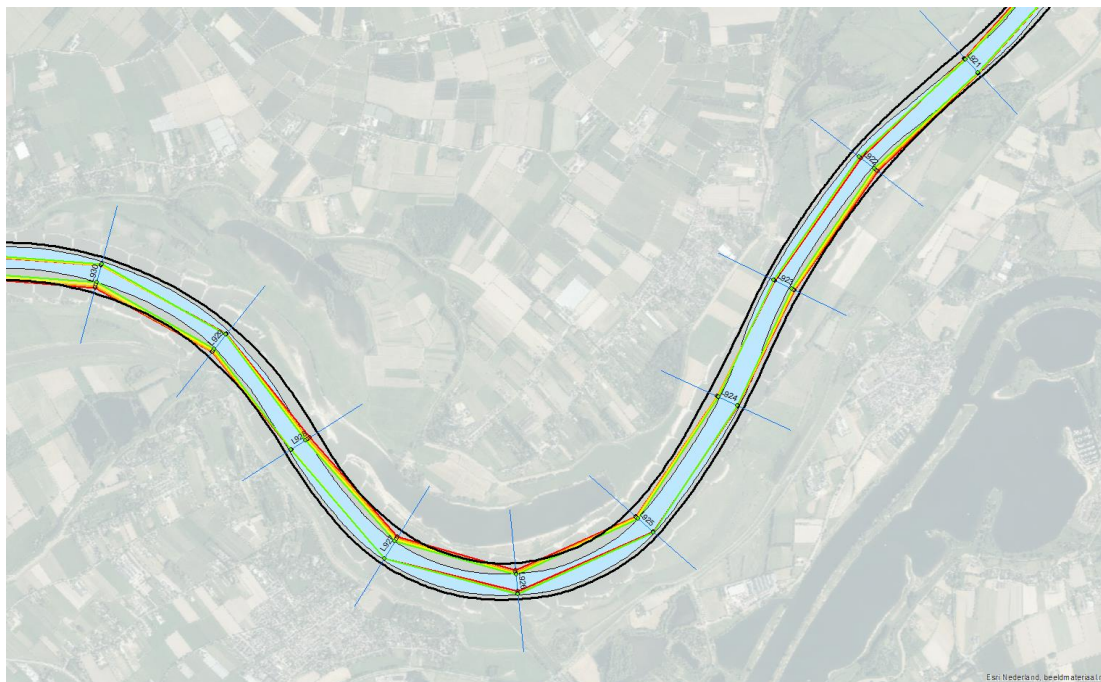


Figuur A-1 Beschouwde knelpunten. Bron: screenshots uit de Geoweb Catalogus (<https://maps.rijkswaterstaat.nl/GeoWebPortaal/>).

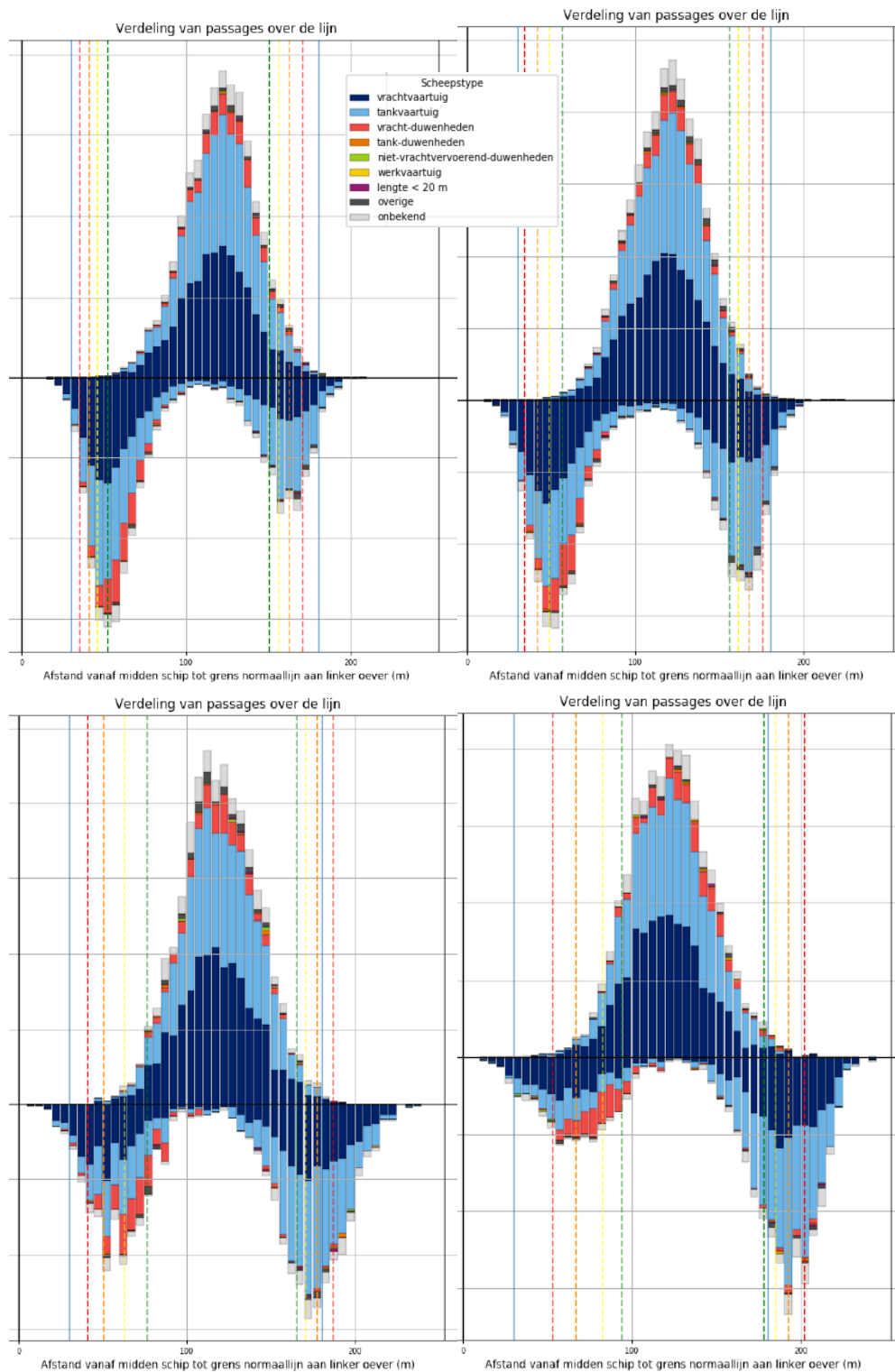
B Bijlage bij Hoofdstuk 3

B.1 Ruimtegebruik bij St. Andries

Figuur B-1 toont ter illustratie het ruimtegebruik bij St. Andries in bovenaanzicht. Voor iedere rivierkilometer zijn ook verdelingen over het dwarsprofiel geplot voor de verschillende afvoerranges en sloopstypes. Een voorbeeld is opgenomen in Figuur B-2; aanvullende figuren zijn te vinden in Indah-Everts & Hermans (2021).



Figuur B-1 Ruimtegebruik bij St. Andries met onderscheid in verschillende afvoerranges. Groen: Q_L tussen 1020 en 1500 m^3/s , geel: Q_L tussen 1500 en 2500 m^3/s , oranje: Q_L tussen 2500 en 4000 m^3/s , rood: Q_L groter dan 4000 m^3/s . NB: het ruimtegebruik is bepaald per rivierkilometer (de punten), de lijnen tussen de punten kunnen een vertekend beeld geven.



Figuur B-2 Ruimtelijke verdeling van de scheepspassages bij verschillende afvoerranges ter hoogte van rkm 926 (bovenop de vaste laag van St. Andries). Boven-links: Q_L tussen 1020 en 1500 m^3/s , boven-rechts: Q_L tussen 1500 en 2500 m^3/s , onder-links: Q_L tussen 2500 en 4000 m^3/s , onder-rechts: Q_L groter dan 4000 m^3/s . De vaargeul is weergegeven met de blauwe lijnen, de normaallijnen in zwart. De stippellijnen corresponderen met percentielijnen. Langs de y-as staat het aantal passages (opvaart omlaag, afvaart omhoog). Het aantal passages per afvoerniveau is niet gelijk en de waarde niet relevant voor vergelijking. Bron: Indah-Everts & Hermans (2021).

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

Deltares

www.deltares.nl