

## Beschikbare vaarwegafmetingen en bevaarbaarheid Waal bij lage afvoeren - Aanscherping

Klimaatbestendige Netwerken (KBN) - Hoofdvaarwegennet (HVWN)



**Beschikbare vaarwegafmetingen en bevaarbaarheid Waal bij lage afvoeren -  
Aanscherping**  
Klimaatbestendige Netwerken (KBN) - Hoofdvaarwegennet (HVWN)

**Auteur(s)**

mevrouw C.F. van der Mark

## Beschikbare vaarwegafmetingen en bevaarbaarheid Waal bij lage afvoeren - Aanscherping Klimaatbestendige Netwerken (KBN) - Hoofdvaarwegennet (HVWN)

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	de heer F. Vinke
<b>Referenties</b>	Aanvulling / aanscherping van het vorig jaar opgestelde rapport: Van der Mark en Van den Hoek, 2024; Beschikbare vaarwegafmetingen Waal bij lage afvoeren, rapport- kenmerk 11209214-005-ZWS-0002, d.d. 2 januari 2024
<b>Trefwoorden</b>	Vaarwegen, klimaatbestendigheid, droogte, laagwater, vaarwegprofielen

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.1
<b>Datum</b>	08-10-2024
<b>Projectnummer</b>	11210314-004
<b>Document ID</b>	11210314-004-ZWS-0001
<b>Pagina's</b>	71
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Rolien van der Mark	

# 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 de 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 de bevaarbaarheid, en daarmee betrouwbaarheid en bereikbaarheid te behouden, is het nodig om mee te bewegen met een veranderend klimaat. Om daar een goede invulling aan te kunnen geven is binnen het kader van het programma “Klimaatbestendige Netwerken (KBN) – Hoofdvaarwegennetwerk (HVWN)” onderzoek gestart naar welke minimale beschikbare bevaarbaarheid (uitgedrukt in diepgang en breedte) voor de lage afvoerregimes nog haalbaar is en wat dit betekent voor de transportcapaciteit. Voorliggende rapportage is het resultaat van studie uit 2023 en 2024, waarbij de Waal – de belangrijkste transportcorridor voor het internationale vervoer – wordt beschouwd.

Doel van het 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:

- **Theorie:** wat is er volgens de theoretische regels (Richtlijnen Vaarwegen 2020) nodig aan vaarwegafmetingen om vlot en veilig te kunnen varen? Welke vaarwegbreedte en -diepte is daadwerkelijk beschikbaar bij lage afvoeren? En daarmee: welke scheepsklassen kunnen volgens die theorie nog varen bij verschillende lage afvoeren? Hierbij is ervoor gekozen om de bevaarbaarheid te beschouwen bij de knelpunten in de Waal, bekend uit eerder onderzoek.
- **Praktijk:** wat vaart er daadwerkelijk nog tijdens (extreem) lage afvoercondities zoals we die in 2018 en 2022 hebben meegemaakt? En met wat voor diepgangen en beladingsgraden?

Op basis van de gegevens uit de Richtlijnen Vaarwegen 2020 is voor een aantal knelpunten op de Waal onderzocht welke vaarwegprofielen nog inpasbaar zijn. Aan de hand van gegevens uit het IVS meld- en volgsysteem van Rijkswaterstaat, alsmede online geregistreerde verplaatsingen van schepen (scheepstrack-data), is beschouwd met welke diepgang en beladingsgraad nog gevaren is bij lage afvoeren, en welke rivierbreedte daadwerkelijk wordt bevaren.

Bij een afvoer van 1020 m<sup>3</sup>/s bij Lobith is een CEMT klasse VI vaarweg (normaal en intensiteitsprofiel) wat de Waal is, niet meer in te passen, uitgaande van de benodigde breedte en waterdiepte voor een vlotte en veilige vaart volgens de Richtlijnen Vaarwegen 2020. Bij een verder afnemende afvoer naar 700 m<sup>3</sup>/s bij Lobith, vallen ook de klassen Vb en Va af. 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 700 m<sup>3</sup>/s bij Lobith een normaal profiel voor Va en Vb (en hoger) formeel niet meer inpasbaar is. Met andere woorden, bij een afvoer van 700 m<sup>3</sup>/s bij Lobith is met betrekking tot het normaal profiel alleen een klasse IV vaarweg (of lager) bij de grootste knelpunten (Nijmegen, Ophemert) inpasbaar. Tussen de knelpunten en bij de minder grote knelpunten is een hogere klasse inpasbaar.

In werkelijkheid varen dergelijke grote schepen (CEMT klassen V en VI) nog veelvuldig bij lage afvoeren (data tot ~750 m<sup>3</sup>/s), wel dan met sterk gereduceerde beladingsgraden (niet lager dan 20%). Dat in de praktijk nog grote schepen varen, terwijl de bijbehorende vaarwegprofielen volgens de Richtlijnen Vaarwegen niet meer inpasbaar zijn, komt doordat de Richtlijnen bedoeld zijn voor de beheerder om zekerheid en veiligheid te bieden onder alle omstandigheden. Er wordt daarom uitgegaan van een veilige minimale benodigde breedte en diepte; de minimaal benodigde waterdiepte is gelijk aan 1,3 of 1,4 keer de diepgang van het maatgevende geladen schip. Dit komt bij een diepgang van 3,0 m neer op een kielspeling van 0,9 tot 1,2 m. Dit uitgangspunt van 1,3 of 1,4 keer de diepgang komt voort uit het feit dat de bodem over langere trajecten ongelijkmatig kan zijn, en dat passages (met bijbehorende waterspiegeldaling) vlot en veilig moeten kunnen plaatsvinden. Als we de richtlijnen vergelijken met de IVS- en track-data, zien we dat in de praktijk een kleinere kielspeling aangehouden wordt (om winst te maximaliseren) en minder breedte nodig is dan de richtlijnen voorschrijven. Dit kán ook, omdat de schippers weten waar de knelpunten en ondieptes (MGD's) zich bevinden, hoe ze er langs kunnen varen, en hoe veilig kan worden genavigeerd in het diepste deel van de rivier.

Omdat in de Richtlijnen Vaarwegen 2020 de kielspeling afwijkt van de praktijk en de ledige diepgang overschat lijkt te worden, is de invloed ervan op de theoretische beladingsgraad onderzocht door een bandbreedte te kiezen. De invloed van de kielspeling op de beladingsgraad die in theorie nog gehaald kan worden is significant. Hetzelfde geldt voor de ledige diepgang: ook die invloed is significant.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>8</b>
1.1	Achtergrond	8
1.2	Doelstelling	8
1.3	Afbakening	10
1.4	Ontvangen gegevens	10
<b>2</b>	<b>Theorie: wat kan nog waar varen bij lage afvoeren</b>	<b>11</b>
2.1	Huidige eisen	11
2.2	Aanpak	12
2.3	Stap 1: Beschouwde knelpunten	13
2.4	Stap 2: Benodigde breedte en diepte bij vaarwegprofiel (type en klasse)	13
2.4.1	Basis-afmetingen per profiel en CEMT-klasse	13
2.4.2	Aanvullende toeslagen	15
2.4.2.1	Windtoeslag	15
2.4.2.2	Langsstroom-toeslag	16
2.4.2.3	Bochttoeslag	17
2.4.3	Benodigde totale vaarwegbreedte inclusief toeslagen	21
2.5	Stap 3: Beschikbare breedte en diepte per knelpunt	22
2.5.1	Bepaling beschikbare breedte en diepte per afvoerniveau voor de gehele Waal	22
2.5.2	Bepaling beschikbare breedte en diepte per afvoerniveau per knelpunt	23
2.6	Stap 4: Confrontatie tussen benodigde en beschikbare afmetingen per knelpunt	25
2.6.1	Aanpak	25
2.6.2	Resultaten Knelpunt “Erlecom bovenstrooms”	26
2.6.3	Resultaten Knelpunt “Erlecom”	27
2.6.4	Resultaten Knelpunt “Erlecom benedenstrooms”	28
2.6.5	Resultaten Knelpunt “Nijmegen”	29
2.6.6	Resultaten Knelpunt “Ophemert”	30
2.6.7	Resultaten Knelpunt “St. Andries”	31
2.6.8	Resultaten Knelpunt “Gameren”	32
2.6.9	Bevindingen	32
2.7	Stap 5: Vergelijking tussen klimaatscenario's Huidig en $W_{H,dry}$	33
<b>3</b>	<b>Praktijk: wat vaart nog en waar bij lage afvoeren</b>	<b>36</b>
3.1	Inleiding	36
3.2	Wat vaart bij lage afvoeren op basis van IVS-data	36
3.2.1	Aantallen en scheepstypes langs Lobith	36
3.2.2	Diepgang en beladingsgraad	39
3.3	Welke rivierbreedte wordt bevaren bij lage afvoeren op basis van scheepstrack data	44
<b>4</b>	<b>Invloed parameters op theoretische beladingsgraad</b>	<b>50</b>

4.1	Inleiding	50
4.2	Ledige diepgang	50
4.3	Invloed van toeslagen, kielspeling en ledige diepgang	53
<b>5</b>	<b>Conclusies en Aanbevelingen</b>	<b>58</b>
	<b>Referenties</b>	<b>60</b>
<b>A</b>	<b>Bijlagen bij Hoofdstuk 2</b>	<b>62</b>
A.1	Beschouwde knelpunten	62
A.2	Intensiteit op jaarbasis en jaargemiddeld laadvermogen	63
<b>B</b>	<b>Bijlagen bij Hoofdstuk 3</b>	<b>64</b>
B.1	Ruimtegebruik bij St. Andries	64
<b>C</b>	<b>Bijlage bij Hoofdstuk 4</b>	<b>66</b>

# 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 de 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 de bevaarbaarheid, en daarmee betrouwbaarheid en bereikbaarheid te behouden, is het nodig om mee te bewegen met een veranderend klimaat. Om daar een goede invulling aan te kunnen geven is in 2023 binnen het kader van het programma “Klimaatbestendige Netwerken (KBN) – Hoofdvaarwegennetwerk (HVWN)” onderzoek gestart naar welke minimale beschikbare bevaarbaarheid, uitgedrukt in diepgang en breedte, voor de lage afvoerregimes nog haalbaar is en wat dit betekent voor de transportcapaciteit.

Vorig jaar werd de eerste stap gezet binnen dit onderzoek, en is er gestart met een studie naar de beschikbare en theoretisch benodigde vaarwegafmetingen voor de Waal, de belangrijkste transportcorridor voor het internationale vervoer (gerapporteerd in Van der Mark en Van den Hoek, 2024; Beschikbare vaarwegafmetingen Waal bij lage afvoeren, rapportnummer 11209214-005-ZWS-0002, d.d. 2 januari 2024).

Dit jaar (2024) is afgesproken (binnen SITO-PS samenwerking tussen Rijkswaterstaat, Deltares en Ministerie) om de studie van vorig jaar verder aan te scherpen. Omwille van de leesbaarheid is besloten om de rapportage van 2023 als basis te blijven hanteren, en daarin de aangescherpte onderdelen toe te voegen (en passages die daardoor niet meer relevant zijn aan te passen of verwijderen). Aan sommige onderwerpen uit 2023 is dit jaar niet gewerkt; die zijn onveranderd overgenomen in deze aangescherpte rapportage.

In een mogelijk vervolgtraject zal worden bekeken, op welke onderdelen nog verder onderzoek nodig is.

## 1.2 Doelstelling

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

In 2023 is daartoe, met de geografische afbakening tot de Waal (dus zonder Boven-Rijn), vanuit de twee invalshoeken “theorie” en “praktijk” naar de vaarwegafmetingen gekeken:

- Theorie: wat is er volgens de regels (Richtlijnen Vaarwegen 2020<sup>1</sup>) die aan vaarwegafmetingen gesteld zijn benodigd om vlot en veilig te kunnen varen? Welke vaarwegbreedte en -diepte is daadwerkelijk beschikbaar bij lage afvoeren? En daarmee: welke scheepsklassen kunnen volgens die theorie nog varen bij verschillende lage

---

<sup>1</sup> Waar we in het vervolg spreken over de Richtlijnen Vaarwegen, wordt de laatste versie, dat wil zeggen die van 2020 bedoeld, ook als Rijkswaterstaat (2020) opgenomen in de referentielijst.



afvoeren? Hierbij is ervoor gekozen om de bevaarbaarheid te beschouwen bij de knelpunten in de Waal, die naar voren zijn gekomen in De Jong & Van der Mark (2021).

- **Praktijk:** wat vaart er daadwerkelijk nog tijdens (extreem) lage afvoercondities zoals we die in 2018 en 2022 hebben meegemaakt? En met wat voor diepgangen en beladingsgraden?

### **Aanscherping in 2024**

De studie wordt op drie onderwerpen aangevuld, te weten:

- 1 Breedtetoeslagen vaarwegontwerp,
- 2 Kielspeling en diepgang,
- 3 Ledige diepgang.

Hieronder staat in cursief aangegeven welke secties van het rapport nieuw of aangepast zijn ten opzichte van het eerdere rapport van vorig jaar.

Ad 1)

In de Richtlijnen Vaarwegen worden toeslagen op de vaarwegbreedte voor wind, bochten en langsstroming voorgesteld. In 2023 werden deze toeslagen niet meegenomen. In 2024 worden deze toeslagen meegenomen bij de bepaling van de benodigde breedte.

*In Hoofdstuk 2 (theorie) is een sectie (§2.4.2) toegevoegd waarin de aanvullende toeslagen op de breedte worden bepaald. Vervolgens is sectie 2.6, waar de benodigde en beschikbare vaarwegafmetingen met elkaar geconfronteerd worden, geactualiseerd, uitgaande van de nieuwe breedtes. Ook sectie 2.7 is geactualiseerd, waarin een doorkijk naar 2050 wordt gemaakt.*

Ad 2)

Er wordt een uitbreiding gedaan op twee punten:

- In het hoofdstuk “wat vaart er nog in de praktijk” was het in 2023 niet mogelijk om de werkelijke kielspeling en beladingsgraad te onderzoeken, omdat die gegevens niet in de aangeleverde dataset aanwezig waren. In 2024 wordt aan de hand van een nieuwe dataset afgeleid met welke diepgang en beladingsgraad bij welke MGD (Minst Gepeilde Diepte) en afvoer nog gevaren wordt. Hiertoe is een nieuwe IVS-dataset aangeleverd, waarin individuele reizen (d.w.z., niet reizen geaggregeerd) zijn opgenomen en de beladingsgraad kan worden bepaald uit het vervoerde gewicht en het laadvermogen. Ook MGD-data van 2018 en 2022 zijn daartoe aangeleverd.

*Sectie 3.2, in het hoofdstuk “Praktijk”, is geheel aangepast op de nieuwe dataset. De opgetreden beladingsgraad, diepgang en ingeschatte kielspeling zijn beschouwd voor verschillende afvoeren/MGD’s.*

- In de Richtlijnen Vaarwegen wordt een waterdiepte als richtlijn voorgesteld, waarbij wordt uitgegaan van een kielspeling van 30 of 40% (afhankelijk van het type profiel). Het is bekend dat, vooral op rivieren, met een kleinere kielspeling gevaren wordt. In 2024 wordt de invloed van een kleinere kielspeling beschouwd. Hierbij kiezen we één of enkele kleinere kielspelingen die dichter aansluiten bij de praktijk.

*Aan de hand van de ingeschatte kielspeling uit de praktijk (§3.2) is in het nieuw toegevoegde Hoofdstuk 4 de invloed van kleinere kielspeling gepresenteerd.*

Ad 3)

De ledige diepgang is in de analyse naar wat nog kan varen bij de vaarwegafmetingen volgens de Richtlijnen Vaarwegen gebruikt om de beladingsgraad te bepalen. Hiervoor is de ledige diepgang gebruikt die is opgenomen in de Richtlijnen Vaarwegen. Het vermoeden bestaat dat de toegepaste ledige diepgang te groot is. In 2024 wordt een accurater beeld gecreëerd van de werkelijke ledige diepgang, aan de hand van o.a. a) meetbriefgegevens uit de database van ILT (Inspectie Leefomgeving en Transport) omtrent de in Nederland geregistreerde schepen en b) de lege schepen in de IVS-dataset. Daarmee wordt de invloed van de kleinere ledige diepgang op de resultaten bepaald.

*In Hoofdstuk 4 zijn de verschillende bronnen voor ledige diepgang bij elkaar gezet en is de invloed van een kleinere ledige diepgang gepresenteerd.*

### 1.3 Afbakening

We hebben in overleg met Rijkswaterstaat (opdrachtgever) bij de aanpak de onderstaande afspraken gemaakt en afbakening gekozen:

- Geografisch wordt de studie nog steeds afgebakend tot de Waal.
- Er wordt gebruik gemaakt van de KBN-bodem 'huidige' bodemligging (2018), zie De Jong & Van der Mark (2021).
- Voor het toekomstige klimaatscenario wordt gebruikgemaakt van KNMI '14 scenario  $W_{H,dry}$  voor zichtjaren 2050 en 2085, zie ook De Jong (2019) en KNMI (2015).
- We maken gebruik van de zogenaamde KBN-afvoeren: 700, 850, 1020, 1400 en 1800  $m^3/s$  bij Lobith (De Jong, 2019), en hebben daar in 2023 de lage afvoer van 550  $m^3/s$  aan toegevoegd.
- Voor de in praktijk opgetreden beladingsgraad, diepgang en ingeschatte kielspeling baseren we ons op de reizen van de twee jaren 2018 en 2022. In deze jaren traden zeer lage afvoeren op.

### 1.4 Ontvangen gegevens

We hebben de onderstaande gegevensbestanden ontvangen om te gebruiken bij de studie. De in 2024 nieuw ontvangen IVS-dataset bevat ook gegevens over laadvermogen en vervoerd gewicht, zodat de beladingsgraad kan worden bepaald. De set die was ontvangen in 2023, bevatte deze gegevens niet.

- IVS\_passages\_2018\_en\_2022\_Lobith.csv,
- scheepsafmetingen\_meetbrieven.csv,
- Lege inzinking schepen.msg,
- MGD+Qf\_gekoppeld\_2018\_en\_2022\_v2.xlsx,
- curvature.m en circumcenter.m voor het bepalen van bochtstralen.

## 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) lag tot voor kort vast in Verordening (EU) Nr. 1315/2013 dat lidstaten er voor zorgen dat de infrastructuur voldoet aan de vereisten voor waterwegen klasse IV (voor horizontale scheepsafmetingen) en een minimum diepgang van 2,50 m als vereiste gedurende 365 dagen per jaar. Deze verordening is herzien en recentelijk op 13 juni 2024 goedgekeurd door het Europese Parlement en de Europese Raad. De nieuwe verordening is met ingang van 18 juli 2024 van kracht onder Verordening Nr. 2024/1679, en de oude verordening Nr. 1315/2013 is op die datum ingetrokken.

De nieuwe versie herformuleert de eis: van een permanente diepgang van 2,50 m naar een vaardiepte van ten minste 2,50 m ten opzichte van vastgestelde referentiewaterstanden, die op een bepaald aantal dagen per jaar worden overschreden ten opzichte van een statisch gemiddelde. Of de herziening een versoepeling van de eis is, hangt af van wat als referentiewaterstand wordt gekozen. De referentiewaterstanden moeten nog worden vastgesteld in overleg tussen de Europese Commissie en de lidstaten.

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<sup>2</sup> periode gemiddeld 20 dagen per jaar wordt onderschreden, en is gelijkgesteld aan 1020 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/s. De zogenaamde Minst Gepeilde Dieptes (MGD's) getuigen hier van: als de afvoer hoger is dan 1020 m<sup>3</sup>/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. Daarbij moet wel bedacht worden dat de meeste MGD's optreden aan de rand van de 150 m brede vaargeul. Er komen echter bij afvoeren van 1020 m<sup>3</sup>/s ook MGD's voor die midden in de vaargeul liggen, met name bij vaste lagen, bochtovergangen en op locaties waar kabels en leidingen de rivieren kruisen.

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. Daar komt nog bij dat de OLR niet alleen afneemt als gevolg van een dalende

---

<sup>2</sup> In Nederland wordt 100 jaar gehanteerd.

afvoer, maar ook als gevolg van voortgaande rivierbodemerrosie. De afgelopen decennia is de OLA nagenoeg gelijk gebleven, maar is de OLR als gevolg van bodemerrosie gemiddeld met 10 cm per decennium gezakt. Van der Mark (2022) gaat nader in op de ontwikkeling in OLA en OLR.

In deze rapportage wordt gekeken welke scheepstypes nog wel kunnen varen bij hele lage afvoeren, los van de gestelde eisen. In dit hoofdstuk wordt uitgewerkt welke vaarwegprofielen (met benodigde breedte en diepte bij iedere CEMT-klasse) volgens de Richtlijnen Vaarwegen (de “theorie”) nog passen bij gegeven lage afvoeren.

## 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. Daarbij wordt ook rekening gehouden met de intensiteit van het gebruik van de vaarweg, o.a. op basis van het vaarweggebruiksprofiel en de bijbehorende 'stroken-theorie': hoe meer verkeer er over de vaarweg gaat, des te meer stroken moeten er beschikbaar zijn om veilig te kunnen manoeuvreren. 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 principe betekent dit dat bepaalde scheepvaartklassen op een gegeven moment (bij lage afvoeren) niet meer vlot en veilig kunnen varen. In dit hoofdstuk wordt beschouwd welke theoretische vaarwegprofielen bij welke afvoerniveaus nog mogelijk zijn.

De Richtlijnen Vaarwegen beschrijven *richtlijnen* voor de afmetingen van een vaarweg waarbij vlotte en veilige vaart kan plaatsvinden. De richtlijnen zijn opgesteld aan de hand van uitgebreid meerjarig theoretisch, empirisch, modelmatig onderzoek en deskundigenoordeel, zodat we hier stellen (zie de titel van het hoofdstuk) dat deze richtlijnen de *theorie* zijn. De praktijk kan afwijken van de theorie; dat komt aan bod in het volgende hoofdstuk.

De aanpak is op hoofdlijnen als volgt:

1. Zoom in op de belangrijkste knelpunten op de Waal (§2.3)

2. Bepaal **BENODIGDE** breedte en diepte bij de verschillende vaarwegprofielen (enkel, krap, normaal, intensiteit) en CEMT-klassen (§2.4)

3. Bepaal **BESCHIKBARE** breedte en diepte in de Waal per dwarsprofiel (ca. iedere 250 m) en per afvoerniveau (§2.5)

4. Confronteer **BENODIGDE** en **BESCHIKBARE** afmetingen per knelpunt: bepaal bij welk afvoerniveau nog vlot en veilig gevaren kan worden door welke klassen (§2.6)

5. Bepaal de verschillen tussen de klimaatscenario's Huidig en  $W_{H,dry}$  (§2.7)

Voor de afvoerniveaus maken we gebruik van de zogenaamde KBN-afvoeren: 700, 850, 1020, 1400 en 1800 m<sup>3</sup>/s bij Lobith (De Jong, 2019), en voegen daar de lage afvoer van 550 m<sup>3</sup>/s aan toe.

In de volgende paragrafen wordt iedere stap uitgewerkt en worden gemaakte keuzes toegelicht.

## 2.3 Stap 1: Beschouwde knelpunten

Er is gekozen om voor bekende dieptebeperkende knelpunten op de Waal 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 Waal ook bevaren worden.

De selectie van knelpunten is tot stand gekomen op basis van de informatie uit De Jong & Van der Mark (2021), de waterdieptekaarten (Rijkswaterstaat, 2018), MGD-registraties, QinCom (De Jong, 2021) en Rijkswaterstaat (2022). Bijlage A.1 toont een overzicht van de knelpunten. Op voorhand weten we niet of er grote verschillen in de analyse ontstaan tussen de knelpunten onderling, 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 877-882)  
De ondiepe binnenbocht maakt de vaarweg smal.
- 4 Nijmegen (rkm 883-886)  
Het ondiepste punt ligt direct benedenstrooms van de vaste laag (rechteroever).
- 5 Ophemert (rkm 917-921)  
Het langsdammen traject heeft een beperktere normaalbreedte dan de rest van de Waal, en er bevindt zich een ondiepte langs de dam.
- 6 St. Andries (rkm 925-929)  
Het ondiepste punt ligt direct benedenstrooms van de vaste laag (rechteroever). Het knelpunt St. Andries is bij gemiddelde afvoeren (1700 tot 2100 m<sup>3</sup>/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 (938-942)  
Flauwe bochten beperken mogelijk de breedte bij lagere afvoeren.

## 2.4 Stap 2: Benodigde breedte en diepte bij vaarwegprofiel (type en klasse)

### 2.4.1 Basis-afmetingen per profiel en CEMT-klasse

De Richtlijnen Vaarwegen schrijven voor wat de minimaal benodigde vaarbreedte en waterdiepte is per type vaarwegprofiel en CEMT-klasse. Er wordt onderscheid gemaakt in een enkelstrooks profiel, krap profiel, normaal profiel en intensiteitsprofiel. De gebruikte gegevens zijn vermeld in Tabel 2-1. Voor de breedte geldt dat hier nog toeslagen bij opgeteld dienen te worden, zie §2.4.2.

Tabel 2-1 Toegepaste basisafmetingen voor type vaarwegprofiel en CEMT-klasse (Richtlijnen Vaarwegen), dus zonder toeslagen op de breedte voor wind, langsstroming en bochten. Klasse VI moet volgens de Richtlijnen Vaarwegen minimaal voldoen aan het normaal profiel, dus daarvoor zijn geen afmetingen beschikbaar bij enkelstrooks en krap. De toeslag voor het intensiteitsprofiel is in de Richtlijnen Vaarwegen enkel beschikbaar voor klasse VI. B staat voor de breedte en T voor de diepgang van het geladen maatgevende schip.

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 intensiteit	Diepte (m) – 1,4T
I	10,2	3,3	15,3	3,3	20,4	3,5	-	-
II	13,2	3,4	19,8	3,4	26,4	3,6	-	-
III	16,4	3,5	24,6	3,5	32,8	3,8	-	-
IV	19,0	3,9	28,5	3,9	38,0	4,2	-	-
Va	22,8	4,6	34,2	4,6	45,6	4,9	-	-
Vb	22,8	5,2	34,2	5,2	45,6	5,6	-	-
Vla (M12)	-	-	-	-	68,0	5,6	125,0	5,6
Vla (BII-2b)	-	-	-	-	91,2	5,6	148,2	5,6
Vlb	-	-	-	-	91,2	5,6	148,2	5,6
Vlc	-	-	-	-	91,2	5,6	148,2	5,6

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

- [Kielspeling] Voor een veilige vaart, ook tijdens oplopen en passeren en/of bij grote intensiteit, is volgens de Richtlijnen Vaarwegen een kielspeling van 30% bij enkel en krap profiel en 40% bij normaal en intensiteitsprofiel benodigd. Dit uitgangspunt is hier overgenomen. De minimale waterdiepte in Tabel 2-1 wordt daarmee bepaald als 1,3 of 1,4 keer de diepgang (T) van het maatgevende, geladen schip (Tabel 2-2).
- [Geen intensiteitsprofiel bij lage CEMT-klassen] De Richtlijnen Vaarwegen stellen dat een intensiteitsprofiel van toepassing is bij vaarwegen met intensiteiten van meer dan 30.000 passerende schepen per jaar. Op vaarwegen met veel passages zijn enkelstrooks en krap profiel niet toegestaan, omdat dat niet veilig is en/of voor groot oponthoud zorgt. In dat geval moet een intensiteitstoeslag worden gehanteerd bovenop het normale profiel. De Richtlijnen stellen ook dat grote intensiteiten voornamelijk worden gevonden op klasse VI vaarwegen. De richtlijnen presenteren derhalve geen intensiteitsprofiel voor CEMT-klassen lager dan VI. Het verdient wellicht aanbeveling om de Richtlijnen Vaarwegen hierop uit te breiden, 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, maar nu niet beschikbaar.
- [Intensiteitsprofiel bij 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 2020) 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.2 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 basis vaarwegbreedte (zonder toeslagen voor wind, langsstroming, bochten) van nagenoeg 150 m voor het klasse VI intensiteitsprofiel.

- [Geen enkelstrooks en krap profiel bij klasse VI] 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 in de Richtlijnen en we hebben deze profielen niet meegenomen in de analyse.
- [Aanvullende toeslagen] Volgens de Richtlijnen dienen nog aanvullende toeslagen te worden toegepast voor wind, langsstroming, en bochten of ‘crossings’ tussen twee bochten. De waarden van de toeslagen zijn afhankelijk van de situatie/locatie/beladingsgraad en kunnen dus verschillen per beschouwd knelpunt. Hieronder in §2.4.2 wordt toegelicht hoe deze aanvullende toeslagen tot stand zijn gekomen.

Tabel 2-2 Toegepaste diepgang gegevens maatgevend schip per CEMT-klasse in meter (bron: Richtlijnen Vaarwegen). Voor de diepgang van een leeg duwstel wordt 0,6 m en 1,8 m vermeld (respectievelijk duwbak en duwboot), aangezien de Richtlijnen Vaarwegen schrijven dat een lege duwbak ongeveer 0,6 m bedraagt, en die van de duwboot 1,8 m.

CEMT-klasse	Diepgang leeg (m)	Diepgang geladen T (m)	Schipbreedte B (m)	Schiplengte L (m)
I (M1)	1,2	2,5	5,1	38,5
II (M2)	1,4	2,6	6,6	55
III (M5)	1,5	2,7	8,2	85
IV (M7)	1,6	3,0	9,5	105
Va (M9)	1,8	3,5	11,4	135
Vb (BII-2I)	0,6 en 1,8	4,0	11,4	190
Vla (M12)	2,0	4,0	17,0	135
Vla (BII-2b)	0,6 en 1,8	4,0	22,8	145
Vlb (BII-4)	0,6 en 1,8	4,0	22,8	195
Vlc (BII-6I)	0,6 en 1,8	4,0	22,8	270

## 2.4.2 Aanvullende toeslagen

### 2.4.2.1 Windtoeslag

Hoge schepen, zoals leegvaart en containerschepen, zijn gevoelig voor zijwind. Het effect van wind dient te worden verwerkt via een toeslag op de vaarwegbreedte, zowel in bochten als in rechte vaarwegvakken. We kunnen uitgaan van de toeslagen die gelden voor de “landstreek”, aangezien de Waal zich in dit gedeelte bevindt. Conform de Richtlijnen Vaarwegen, gaan we voor het normaal- en intensiteitsprofiel uit van een zijwindtoeslag van 0,05L (L = lengte maatgevend schip) en voor het krappe profiel van 0,07L. Voor het enkelstrooks profiel is geen voorschrift. Hier passen we dezelfde toeslag toe als voor het krappe profiel, net als is gedaan in Veuger (2023).

Volgens de Richtlijnen Vaarwegen is voor vaarwegen van klassen Vb, Vlb en Vlc een extra windtoeslag vereist indien het aandeel in het totale laadvermogen van genoemde schepen meer dan 5% bedraagt en de oriëntatie van de vaarweg ten opzichte van de dominante windrichting ongunstig is. De waarden zijn afgelezen uit de tabellen in de Richtlijnen

Vaarwegen, waarbij we uitgaan van een oriëntatie van de vaarweg van 90° ten opzichte van het noorden, en een percentage van het laadvermogen van de betreffende klasse van 25%. Tabel 2-3 toont de in deze studie toegepaste waarden. Gemakshalve gaan we uit van het meest conservatieve percentage van het laadvermogen (25%), want de invloed is gering.

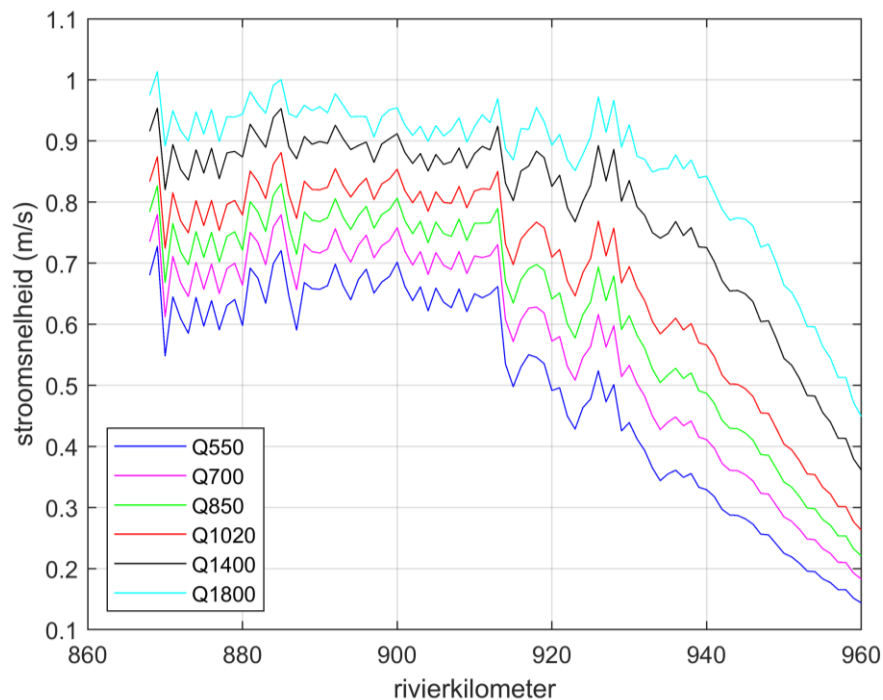
Tabel 2-3 Toegepaste windtoeslag (in meter). Voor klassen Vb, VIb en VIc is de benodigde extra toeslag rechts van het plussteken weergegeven.

Profiel	Enkelstrooks profiel & Krap profiel	Normaal profiel & Intensiteitsprofiel
CEMT-klasse	Windtoeslag (m): 0,07L + extra	Windtoeslag (m): 0,05L + extra
I	3	2
II	4	3
III	6	4
IV	7	5
Va	9	7
Vb	13 + 0 = 13	10 + 5 = 15
VIa (M12)	-	7
VIa (BII-2b)	-	7
VIb	-	10 + 14 = 24
VIc	-	14 + 14 = 28

#### 2.4.2.2 Langsstroom-toeslag

In de Richtlijnen Vaarwegen staat vermeld dat langsstroom op de vaarweg, zeker voorstrooms varende en in bochten, tot een grotere padbreedte leidt. De stroomtoeslag is overgenomen uit tabel 22 van de Richtlijnen Vaarwegen. De waarden behorend bij een stroomsnelheid van 0,5 m/s tot 1 m/s zijn gebruikt, aangezien de stroomsnelheid hiertussen blijft bij lage afvoeren (Figuur 2-1). De toeslag moet per vaarstrook toegepast worden. Tabel 2-4 toont de in deze studie toegepaste waarden.





Figuur 2-1 Langsstromsnelheid in de Waal, bepaald met SOBEK, voor de verschillende KBN-afvoerniveaus.

Tabel 2-4 Toegepaste langsstroom-toeslag (in meter). De toeslag geldt per vaarstrook, zodat de waarde voor het krap, normaal en intensiteitsprofiel 2x zo groot is.

Profiel CEMT-klasse	Enkelstrooks Langsstrom-toeslag (m)	Krap Langsstrom-toeslag (m)	Normaal / Intensiteit Langsstrom-toeslag (m)
I	0,5	1,0	1,0
II	0,7	1,4	1,4
III	0,8	1,6	1,6
IV	0,9	1,8	1,8
Va	1,1	2,2	2,2
Vb	1,1	2,2	2,2
VIa (M12)	-	-	3,4
VIa (BII-2b)	-	-	4,6
VIb	-	-	4,6
VIc	-	-	4,6

### 2.4.2.3 Bochttoeslag

Volgens de Richtlijnen Vaarwegen nemen schepen door hun opstuurhoek in een bocht een grotere breedte in, en is voor de vlotte en veilige vaart in bochten een grotere vaarwegbreedte nodig dan in de rechte vaarwegvakken. De beschouwde knelpunten liggen allen in een bocht, en derhalve blijft extra toeslag voor een crossing<sup>3</sup> buiten beschouwing.

<sup>3</sup> Een crossing is een korte rechtstand als verbinding tussen twee tegengestelde bochten, waarbij de as van de vaargeul over gaat van de ene naar de andere oever.

We passen de formules voor bochttoeslag toe zoals die in de Richtlijnen staan:

$$\Delta_{B1} = C_1 L^2 / R \text{ voor toeslag op de breedte van het geladen schip,}$$

$$\Delta_{B2} = C_2 L^2 / R \text{ voor toeslag op de breedte van het lege schip.}$$

Hierin is L de lengte van het maatgevende schip en R de straal van de bocht. De factoren C<sub>1</sub> en C<sub>2</sub> zijn afgelezen uit de tabellen in de Richtlijnen Vaarwegen (Tabel 2-5).

Als maatgevend voor zowel het krappe als het normale en intensiteitsprofiel wordt beschouwd een ontmoeting van één geladen en één leeg maatgevend schip. De totale toeslag is gelijk aan de sommatie van het lege en geladen schip. Er zijn twee situaties beschouwd: 1) geladen opgaand, leeg afgaand, en 2) geladen afgaand, leeg opgaand. Situatie 1 is maatgevend en wordt gebruikt voor het krappe, normale en intensiteitsprofiel. Voor enkelstrooks zijn alle vier situaties beschouwd en is één enkel schip afvarend en leeg maatgevend. Die wordt toegepast voor enkelstrooks.

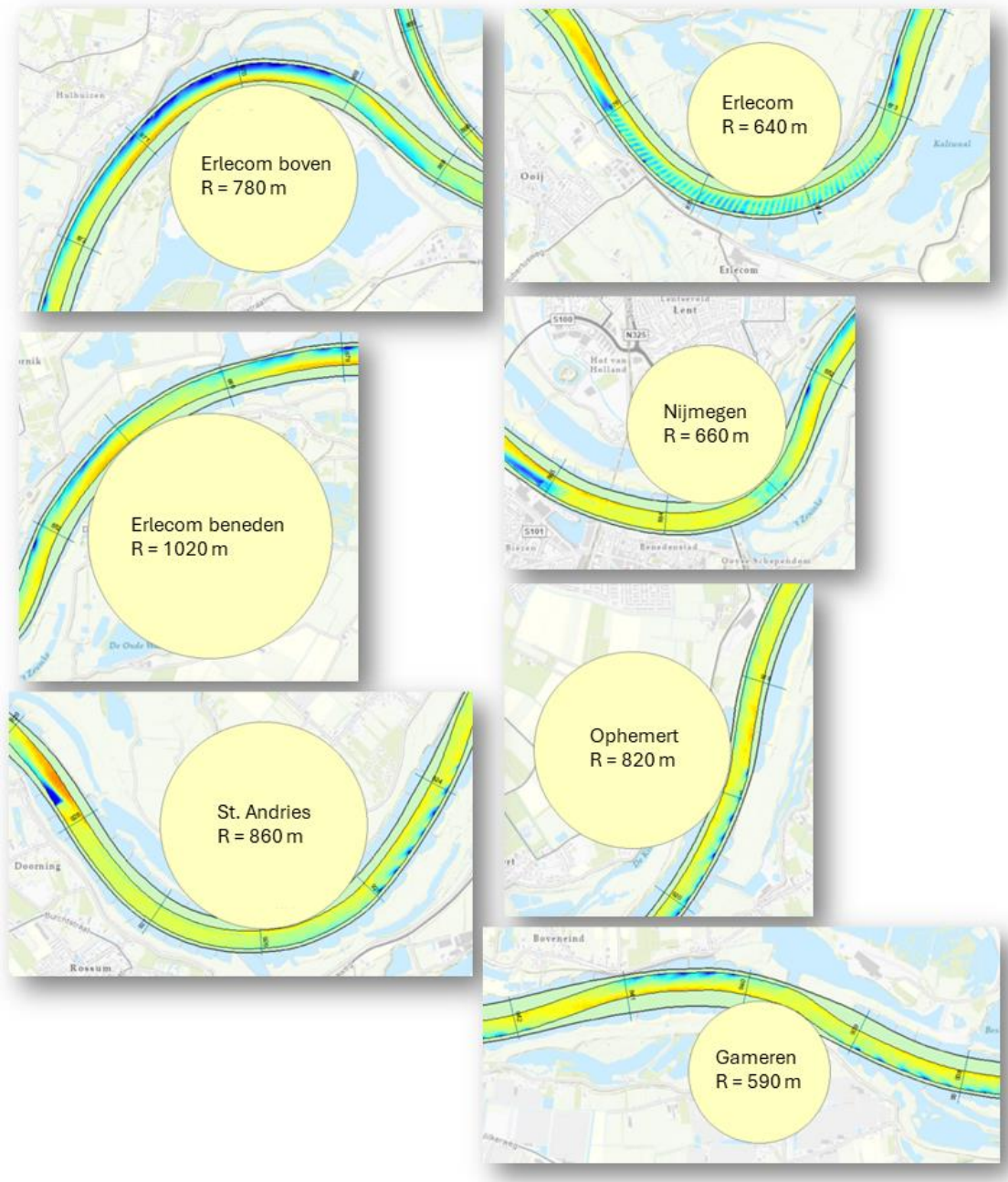
Tabel 2-5 Toegepaste factoren bij het bepalen van de breedtetoeslag bij bochten.

Factor CEMT- klasse	Situatie 1		Situatie 2	
	C <sub>1</sub> Geladen, opgaand	C <sub>2</sub> Leeg, afgaand, langsstroom 1 m/s	C <sub>1</sub> Geladen, afgaand, langsstroom 1 m/s	C <sub>2</sub> Leeg, opgaand
I	0,30	0,65	0,35	0,45
II	0,30	0,60	0,35	0,40
III	0,25	0,50	0,30	0,35
IV	0,25	0,45	0,30	0,35
Va	0,25	0,45	0,30	0,35
Vb	0,25	0,40	0,30	0,30
Vla (M12)	0,30	0,60	0,35	0,45
Vla (BII-2b)	0,30	0,60	0,35	0,45
Vlb	0,30	0,60	0,35	0,45
Vlc	0,25	0,45	0,30	0,35

De straal van de bochten kan op meerdere manieren bepaald worden. De gekozen aanpak hier is afgestemd met Rijkswaterstaat, en sluit aan bij de wijze waarop in Veuger (2023) de bochtstralen voor de IJssel zijn afgeleid.

Voor het bepalen van de straal is gebruik gemaakt van de vaargeul-lijnen (links, midden en rechts). Schepen volgen, vooral tijdens lage afvoer, vrij netjes de vaargeul, dus de vaargeul-lijnen kunnen we aannemen als ongeveer de lijn die de schepen varen. De bochtstraal is vervolgens ongeveer per 100 m bepaald met behulp van het door Rijkswaterstaat aangeleverde script (curvature.m). De kleinste bochtstraal van de lijnen (links, midden, rechts) op het traject van de knelpunten wordt vervolgens gebruikt voor dat knelpunt. Figuur 2-2 toont voor alle beschouwde knelpunten de resulterende bochtstraal die is toegepast bij het bepalen van de bochttoeslag. Het valt op dat de bochtstralen bij Gameren en Ophemert relatief klein zijn in vergelijking tot de bocht van de rivier. Dit komt doordat de vaargeul hier een knik vertoont. De invloed van de straal werkt één op één door in de toeslag: een twee keer zo grote straal geeft een twee keer zo kleine toeslag. Door de bochtstraal te bepalen aan de hand van de vaargeul, gebruiken we de meest conservatieve waarde voor de toeslag. Schepen zullen, vooral bij Gameren en Ophemert, een flauwere koers varen. Tabel 2-6 toont per knelpunt de toegepaste toeslagen op de vaarwegbreedte.

Voor bochten met een booghoek  $\beta$  kleiner dan  $30^\circ$ , mag de breedtetoeslag worden vermenigvuldigd met een reductiefactor  $\beta/30$ . Deze reductie is niet toegepast, omdat de bochten (dat wil zeggen, de vaargeul-lijnen) een grotere booghoek hebben dan  $30^\circ$ .



Figuur 2-2 Bochtstralen die zijn toegepast voor ieder knelpunt. De schaal is voor alle subplots gelijk.

Tabel 2-6 Toegepaste maatgevende bochttoeslag (in meter).

Profiel	Bochttoeslag (m)													
	Enkelstrooks							Krap / Normaal / Intensiteit						
	Erlecom boven	Erlecom	Erlecom beneden	Nijmegen	Ophemert	St. Andries	Gameren	Erlecom boven	Erlecom	Erlecom beneden	Nijmegen	Ophemert	St. Andries	Gameren
CEMT-klasse														
Berekende en gehanteerde bochtstraal (m)	R = 780 m	R = 640 m	R = 1020 m	R = 660 m	R = 820 m	R = 860 m	R = 590 m	R = 780 m	R = 640 m	R = 1020 m	R = 660 m	R = 820 m	R = 860 m	R = 590 m
I	1,2	1,5	0,9	1,5	1,2	1,1	1,6	1,8	2,2	1,4	2,1	1,7	1,6	2,4
II	2,3	2,8	1,8	2,8	2,2	2,1	3,1	3,5	4,3	2,7	4,1	3,3	3,2	4,6
III	4,6	5,6	3,5	5,5	4,4	4,2	6,1	6,9	8,5	5,3	8,2	6,6	6,3	9,2
IV	6,4	7,8	4,9	7,5	6,1	5,8	8,4	9,9	12,1	7,6	11,7	9,4	9,0	13,1
Va	10,5	12,8	8,0	12,4	10,0	9,5	13,9	16,4	19,9	12,5	19,3	15,6	14,8	21,6
Vb	18,5	22,6	14,2	21,9	17,6	16,8	24,5	30,1	36,7	23,0	35,6	28,6	27,3	39,8
Vla (M12)	-	-	-	-	-	-	-	21,0	25,6	16,1	24,9	20,0	19,1	27,8
Vla (BII-2b)	-	-	-	-	-	-	-	24,3	29,6	18,6	28,7	23,1	22,0	32,1
VIb	-	-	-	-	-	-	-	43,9	53,5	33,6	51,9	41,7	39,8	58,0
VIc	-	-	-	-	-	-	-	65,4	79,7	50,0	77,3	62,2	59,3	86,5

### 2.4.3 Benodigde totale vaarwegbreedte inclusief toeslagen

De benodigde "basis" vaarwegbreedte uit §2.4.1 samen met de aanvullende toeslagen uit §2.4.2 leveren de totale benodigde vaarwegbreedte per profiel en CEMT-klasse. Dit is opgenomen in Tabel 2-7.

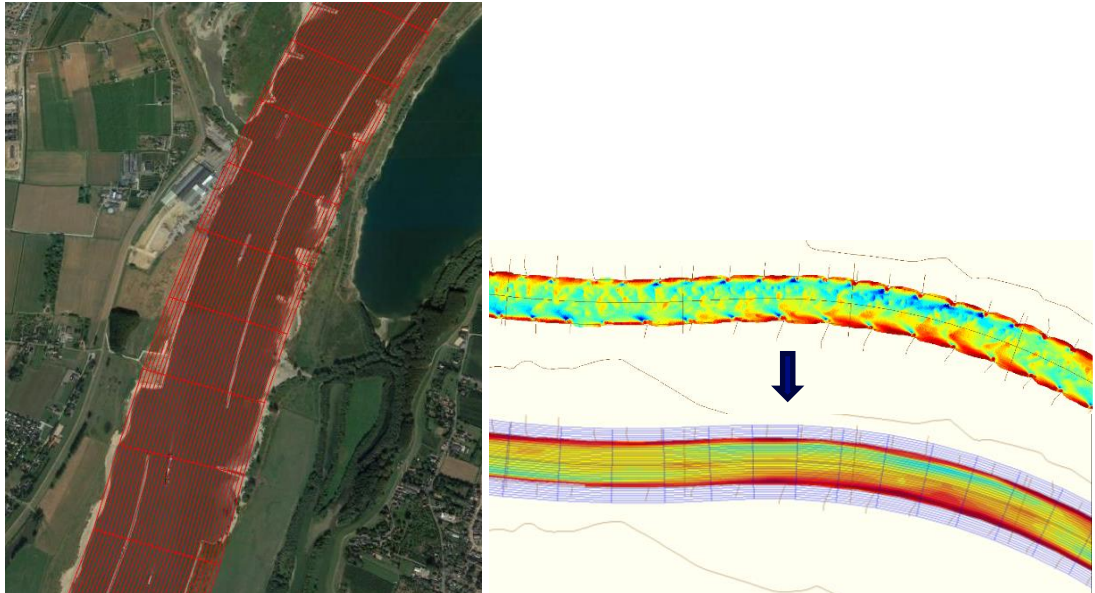
Tabel 2-7 Toegepaste benodigde vaarwegbreedte (in meter) per knelpunt voor type vaarwegprofiel en CEMT-klasse (opgesteld aan de hand van de Richtlijnen Vaarwegen en hierboven beschreven aanpak). De verschillen tussen de knelpunten onderling ontstaan enkel door de bochttoeslag (bochtstraal).

Totale benodigde vaarwegbreedte inclusief toeslagen (m)							
Knelpunt	Erlecom boven	Erlecom	Erlecom beneden	Nijmegen	Ophemert	St. Andries	Gameren
<b>Enkelstrooks</b>							
I	14,9	15,2	14,6	15,2	14,9	14,8	15,3
II	20,2	20,7	19,7	20,7	20,1	20,0	21,0
III	27,8	28,8	26,7	28,7	27,6	27,4	29,3
IV	33,3	34,7	31,8	34,4	33,0	32,7	35,3
Va	43,4	45,7	40,9	45,3	42,9	42,4	46,8
Vb	55,4	59,5	51,1	58,8	54,5	53,7	61,4
<b>Krap</b>							
I	21,1	21,5	20,7	21,4	21,0	20,9	21,7
II	28,7	29,5	27,9	29,3	28,5	28,4	29,8
III	39,1	40,7	37,5	40,4	38,8	38,5	41,4
IV	47,2	49,4	44,9	49,0	46,7	46,3	50,4
Va	61,8	65,3	57,9	64,7	61,0	60,2	67,0
Vb	79,5	86,1	72,4	85,0	78,0	76,7	89,2
<b>Normaal</b>							
I	25,2	25,6	24,8	25,5	25,1	25,0	25,8
II	34,3	35,1	33,5	34,9	34,1	34,0	35,4
III	45,3	46,9	43,7	46,6	45,0	44,7	47,6
IV	54,7	56,9	52,4	56,5	54,2	53,8	57,9
Va	71,2	74,7	67,3	74,1	70,4	69,6	76,4
Vb	92,9	99,5	85,8	98,4	91,4	90,1	102,6
Vla (M12)	99,4	104,0	94,5	103,3	98,4	97,5	106,2
Vla (BII-2b)	127,1	132,4	121,4	131,5	125,9	124,8	134,9
Vlb	163,7	173,3	153,4	171,7	161,5	159,6	177,8
Vlc	189,2	203,5	173,8	201,1	186,0	183,1	210,3
<b>Intensiteit</b>							
Vla (M12)	156,4	161,0	151,5	160,3	155,4	154,5	163,2
Vla (BII-2b)	184,1	189,4	178,4	188,5	182,9	181,8	191,9
Vlb	220,7	230,3	210,4	228,7	218,5	216,6	234,8
Vlc	246,2	260,5	230,8	258,1	243,0	240,1	267,3

## 2.5 Stap 3: Beschikbare breedte en diepte per knelpunt

### 2.5.1 Bepaling beschikbare breedte en diepte per afvoerniveau voor de gehele Waal

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 2-3 is overgenomen uit dat rapport om een indruk 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.

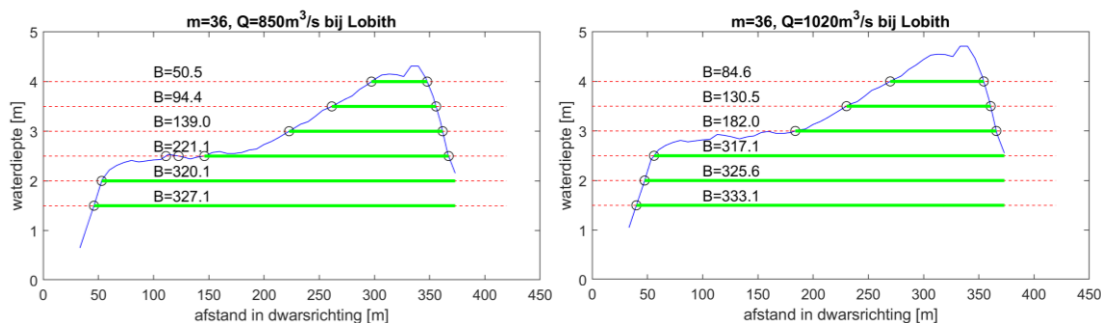


Figuur 2-3 Visualisatie van een stukje van het rooster en projectie van de bodemligging op het rooster. Overgenomen uit De Jong & Van der Mark (2021).

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 m<sup>3</sup>/s bij Lobith. Voor de 550 m<sup>3</sup>/s afvoer was nog geen simulatie beschikbaar, dus die simulatie is in 2023 als onderdeel van 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 2-4 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 logischerwijs 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.

De breedte wordt afgeknot ter plaatse van de normaallijnen (denkbeeldige lijnen lopend over de kribkoppen) als aan de linker- of rechteroever geen profielgegevens meer beschikbaar zijn. De berekende beschikbare breedte kan dus nooit groter worden dan de normaalbreedte. Dit is een logische keuze, omdat in werkelijkheid de bevaren breedte ook nooit groter zal zijn dan de normaalbreedte.



Figuur 2-4 Illustratie van de bepaling van de beschikbare breedte (in m) bij verschillende gegeven waterdieptes (hier gevisualiseerd 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).

## 2.5.2 Bepaling beschikbare breedte en diepte per afvoerniveau per knelpunt

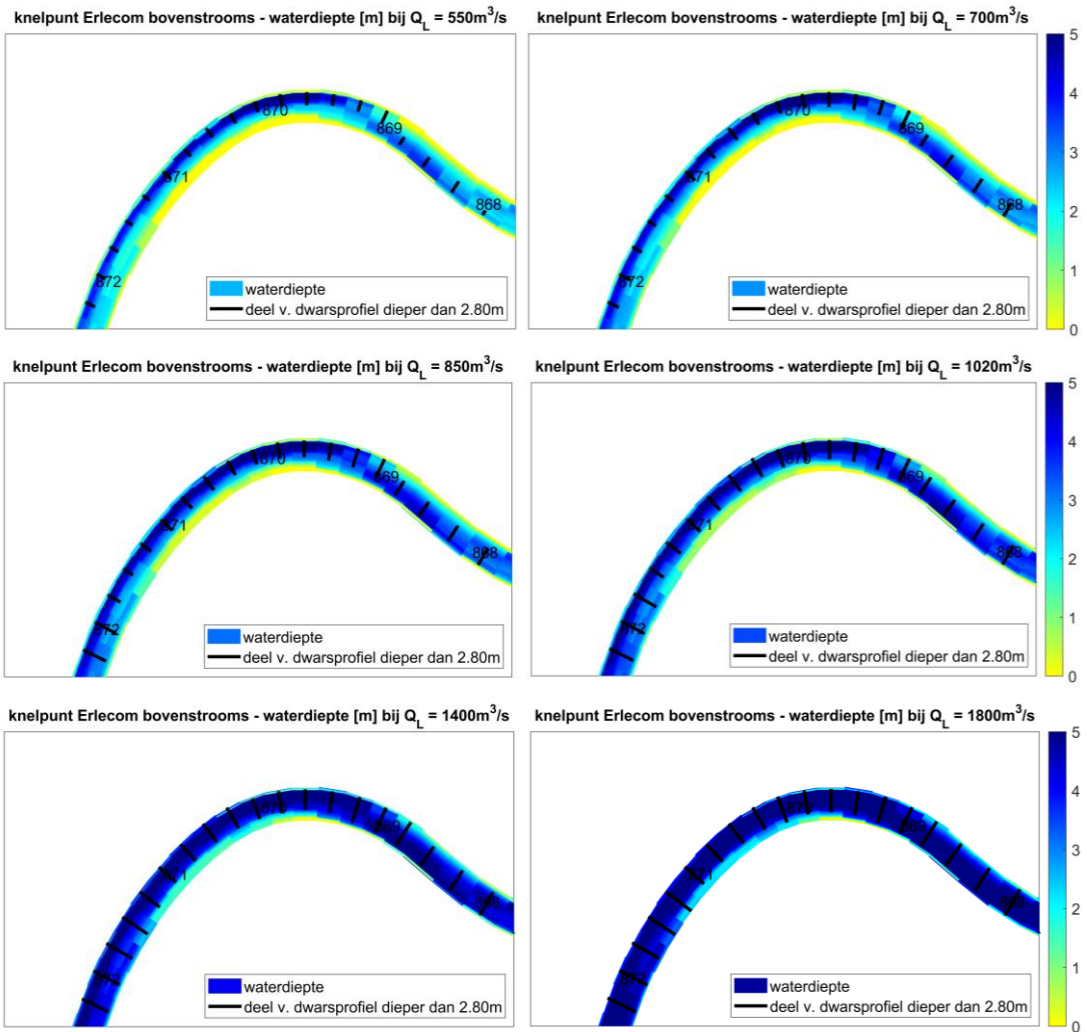
Vervolgens is *per knelpunt* bepaald wat de beschikbare afmetingen (vaarwegbreedte en waterdiepte) zijn bij de verschillende afvoerniveaus.

Figuur 2-5 toont voor de KBN-afvoeren de waterdiepte bij knelpunt “Erlecom bovenstrooms”, 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.

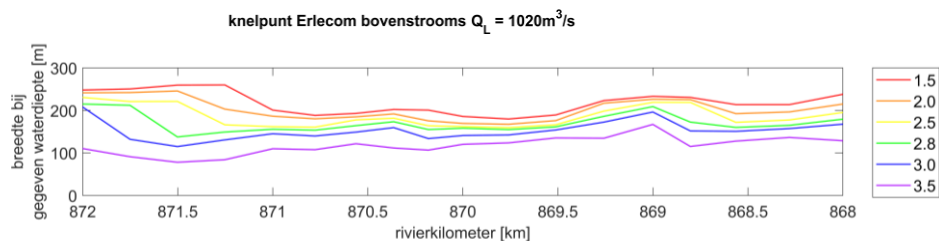
Figuur 2-5 laat zien dat hoe hoger de afvoer, des te groter de waterdiepte, en des te breder het gedeelte dat dieper is dan de waterdiepte van 2,80 m. Dergelijke bovenaanzichten zijn ook te maken voor de andere waterdiepte-criteria. Vervolgens kan het verloop over de breedte gepresenteerd worden voor de verschillende waterdiepte-criteria. Figuur 2-6 laat het breedteverloop over het knelpunt zien voor enkele waterdiepte-criteria bij een afvoer van  $1020 \text{ m}^3/\text{s}$ . Hoe dieper de gewenste vaarweg, des te smaller deze wordt (of andersom: hoe breder de gewenste vaarweg, des te ondieper deze wordt). Uit deze figuur valt onder andere op te maken:

- Als een waterdiepte van 2,80 m gewenst is (groene lijn), dan is de vaarweg ordegrrootte 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 246 m gewenst is (CEMT 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 breedte op het knelpunt-traject leidend, daarna wordt gekeken hoeveel minder afgeladen kan worden als de diepte te beperkend is. Daarom wordt voor ieder knelpunt-traject de minimale breedte gezocht bij een gegeven waterdiepte. Met andere woorden: aan de hand van de informatie in Figuur 2-6 over het knelpunt-traject (rkm 868-872) wordt de minimale breedte genomen per waterdiepte. Zo wordt Figuur 2-7 voor “Erlecom bovenstrooms” samengesteld. Voor de andere knelpunten wordt deze relatie tussen breedte en diepte gepresenteerd in de volgende sectie (§2.6) bij de bespreking van de betreffende knelpunten. De breedte en diepte bij een knelpunt zijn dus de maatgevende waarden over het gegeven traject (geen puntlocatie).

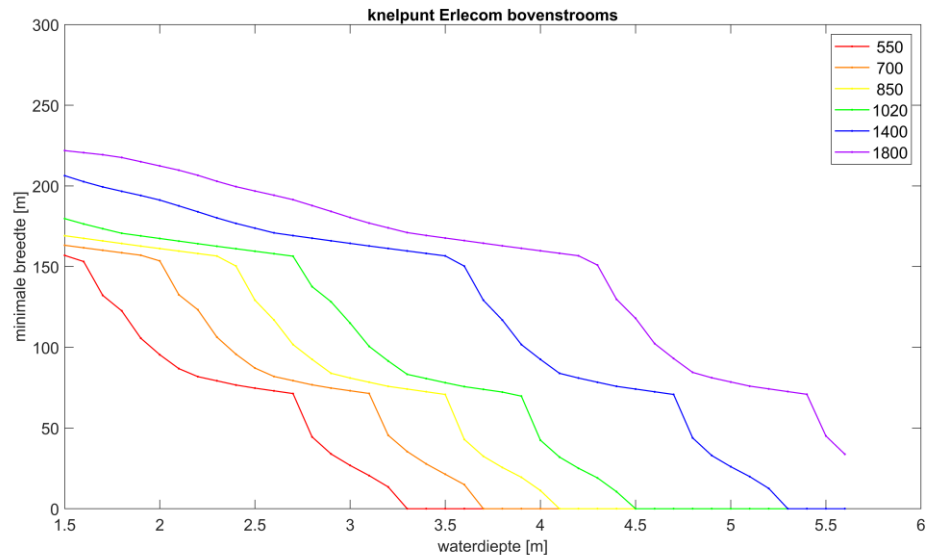


Figuur 2-5 Bovenaanzichten van de waterdiepte ter plaatse van knelpunt “Erlecom bovenstrooms” voor de zes KBN-afvoerniveaus. De zwarte lijnen geven aan welk deel van de rivier dieper is dan 2,80 m.



Figuur 2-6 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  $1020\text{ m}^3/\text{s}$  bij Lobith. (De groene lijn hier correspondeert dus met het breedteverloop aangegeven in Figuur 2-5,  $Q = 1020\text{ m}^3/\text{s}$ ).





Figuur 2-7 Relatie tussen beschikbare breedte en waterdiepte voor de KBN-afvoerniveaus ter plaatse van het knelpunt “Erlecom bovenstrooms”.

## 2.6 Stap 4: Confrontatie tussen benodigde en beschikbare afmetingen per knelpunt

### 2.6.1 Aanpak

In deze paragraaf wordt per knelpunt beschouwd hoe de beschikbare afmetingen (vaarwegbreedte en waterdiepte) bij de verschillende afvoerniveaus zich verhouden tot de minimaal benodigde afmetingen voor een zekere CEMT-klasse en type vaarwegprofiel.

Door de *benodigde* afmetingen van de vaarwegprofielen bij de *beschikbare* afmetingen te plotten, wordt duidelijk welke profielen zijn in te passen (zie bijv. Figuur 2-8-boven voor het knelpunt “Erlecom bovenstrooms”). Als een vaarwegprofiel (aangegeven met de symbolen) zich links van een afvoerniveau-lijn bevindt, is deze in te passen: de benodigde afmetingen zijn dan immers lager dan de beschikbare afmetingen bij die afvoer. Hoe lager de afvoer, des te minder vaarwegprofielen zijn in te passen.

Voor het knelpunt “Erlecom bovenstrooms” geeft Figuur 2-8-onder voor alle theoretische vaarwegprofielen (type en klasse) en KBN-afvoerniveaus in tabelvorm weer welke profielen vallen in te passen:

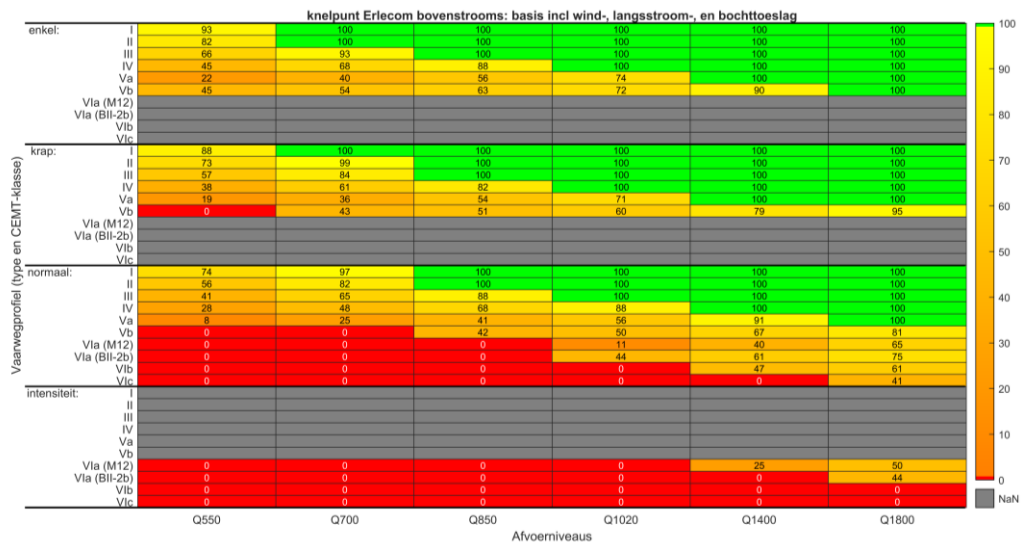
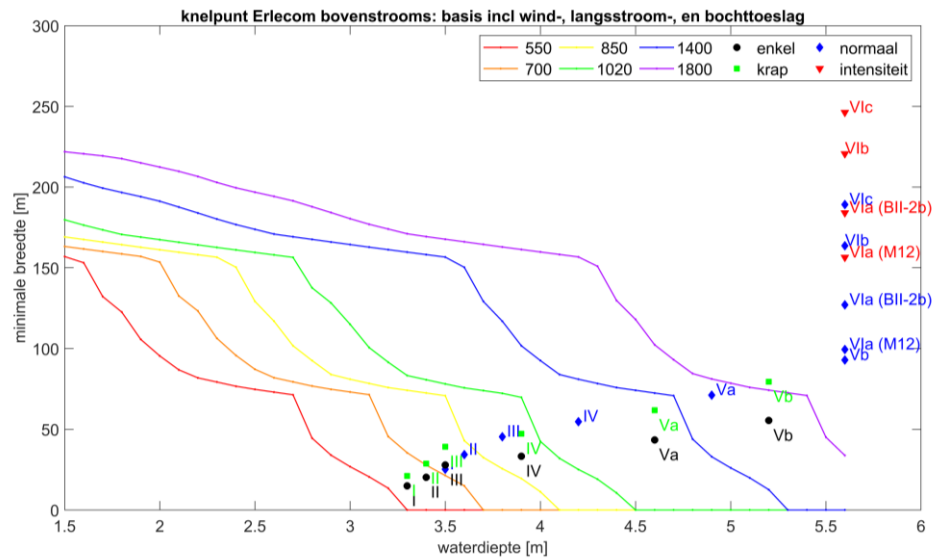
- Als de benodigde breedte bij een vaarwegprofiel niet beschikbaar is bij bepaalde afvoer, kleurt het betreffende vakje rood.
- Als de benodigde breedte én diepte bij een vaarwegprofiel beschikbaar zijn bij bepaalde afvoer, kleurt het betreffende vakje groen.
- Als de benodigde breedte bij een vaarwegprofiel wel beschikbaar is bij bepaalde afvoer, maar de benodigde waterdiepte niet, dan kleurt het betreffende vakje oranje of rood, afhankelijk van de beladingsgraad. In die situatie is er voldoende breedte beschikbaar, maar onvoldoende diepte, zodat het schip minder moet afladen. Als de beladingsgraad groter is dan 0, kleurt het vakje oranje. De beladingsgraad wordt bepaald als:  

$$\frac{\text{mogelijke diepgang} - \text{ledige diepgang}}{\text{maximale diepgang} - \text{ledige diepgang}} \times 100\%$$
 waarbij de mogelijke diepgang afhangt van de beschikbare waterdiepte en vastgestelde kielspeling (30 of 40% conform de Richtlijnen Vaarwegen). De ledige diepgang volgt uit Tabel 2-2.

- Bij duwstellen wordt de beladingsgraad bepaald aan de hand van de lege en geladen diepgang van een duwbak (respectievelijk 0,6 en 4,0 m). Door de kleine ledige diepgang is de beladingsgraad hier over het algemeen hoger dan bijvoorbeeld een M12 schip (Figuur 2-8-onder). Echter, als de waterdiepte ontoereikend is voor de duwboot om te varen (1,8 m diepgang), dan kleurt de cel rood. De beladingsgraad van de duwbakken kan in die situatie groter dan 0% zijn, maar ze kunnen dan alsnog niet getransporteerd worden.

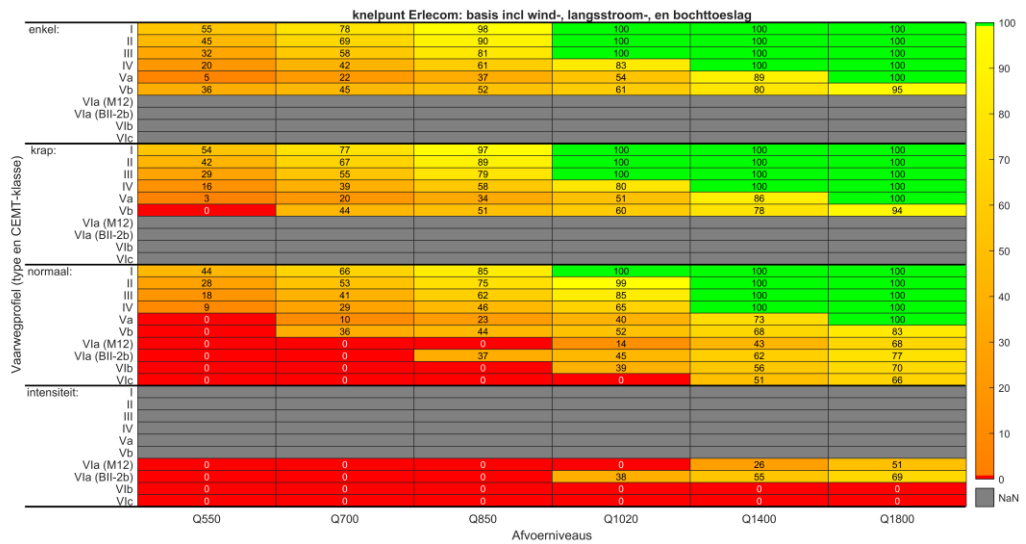
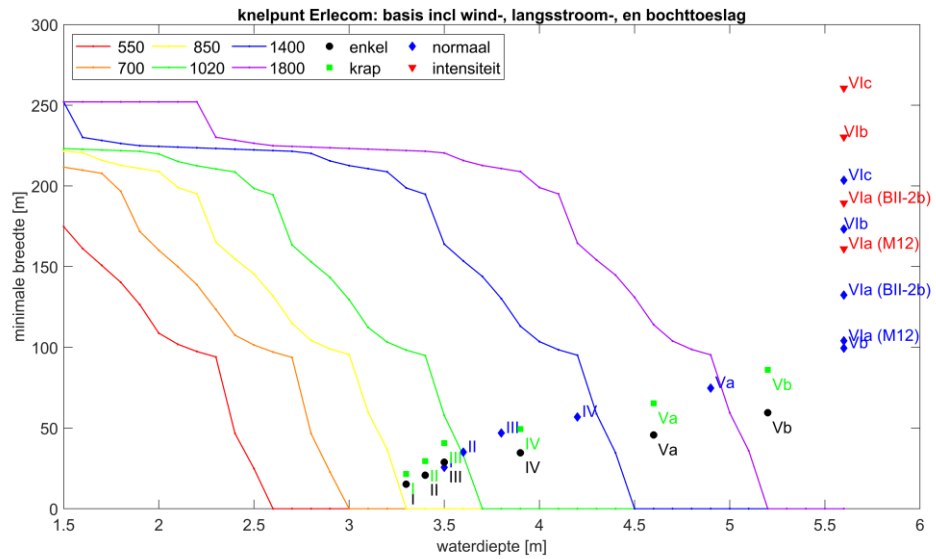
Er wordt opgemerkt dat de berekende beladingsgraad de theoretisch mogelijke beladingsgraad voorstelt. In de praktijk zal een schip niet gaan varen met een beladingsgraad van bijvoorbeeld 1 of 3%. Uit de praktijk (zie Hoofdstuk 3) weten we dat de beladingsgraad waarmee nog gevaren wordt niet lager wordt dan 20%. In de onderstaande paragrafen §2.6.2 t/m §2.6.8 staan de grafieken voor de zeven knelpunten gepresenteerd.

## 2.6.2 Resultaten Knelpunt “Erlecom bovenstrooms”



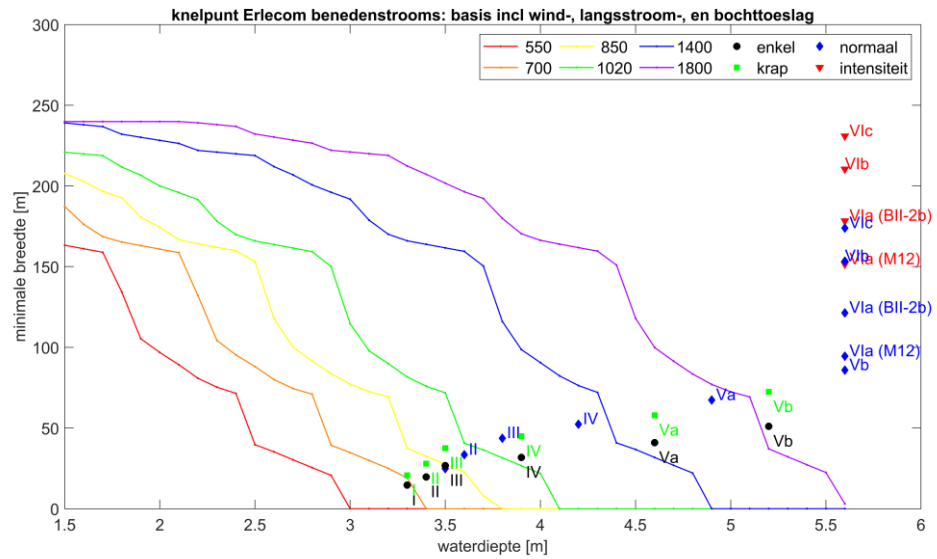
Figuur 2-8 Knelpunt “Erlecom bovenstrooms”. Boven: relatie tussen minimale breedte en de waterdiepte voor de KBN-afvoerniveaus. Onder: totaaloverzicht welk vaarwegprofiel (type en klasse) theoretisch valt in te passen bij ieder KBN-afvoerniveau. Waarden in de cellen zijn de beladingsgraad (in %).

### 2.6.3 Resultaten Knelpunt “Erlecom”



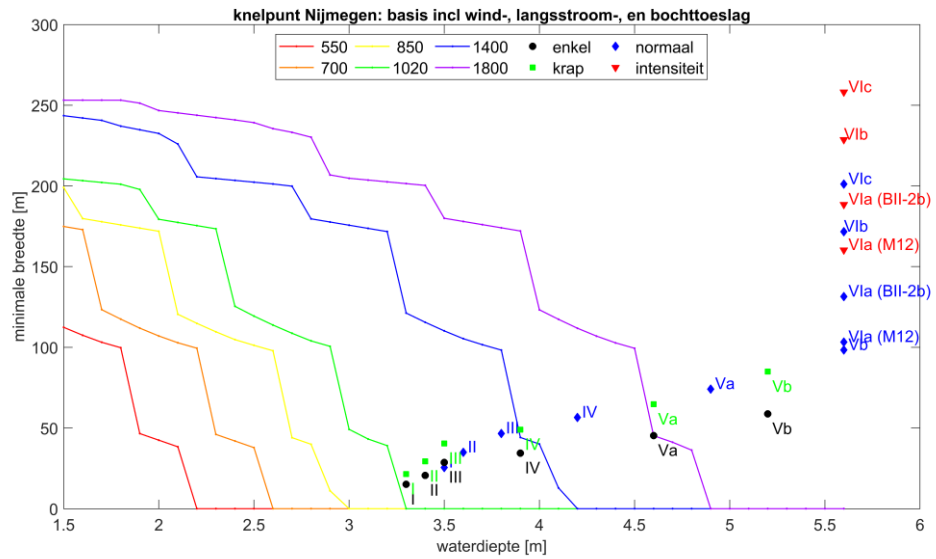
Figuur 2-9 Knelpunt “Erlecom”. Boven: relatie tussen minimale breedte en de waterdiepte voor de KBN-afvoerniveaus. Onder: totaaloverzicht welk vaanwegprofiel (type en klasse) theoretisch valt in te passen bij ieder KBN-afvoerniveau. Waarden in de cellen zijn de beladingsgraad (in %).

## 2.6.4 Resultaten Knelpunt “Erlecom benedenstrooms”



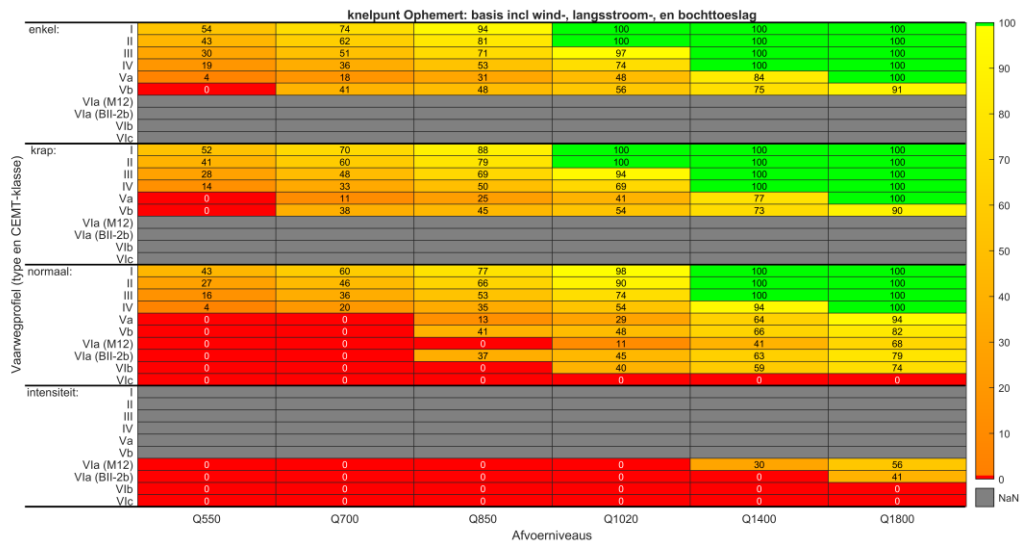
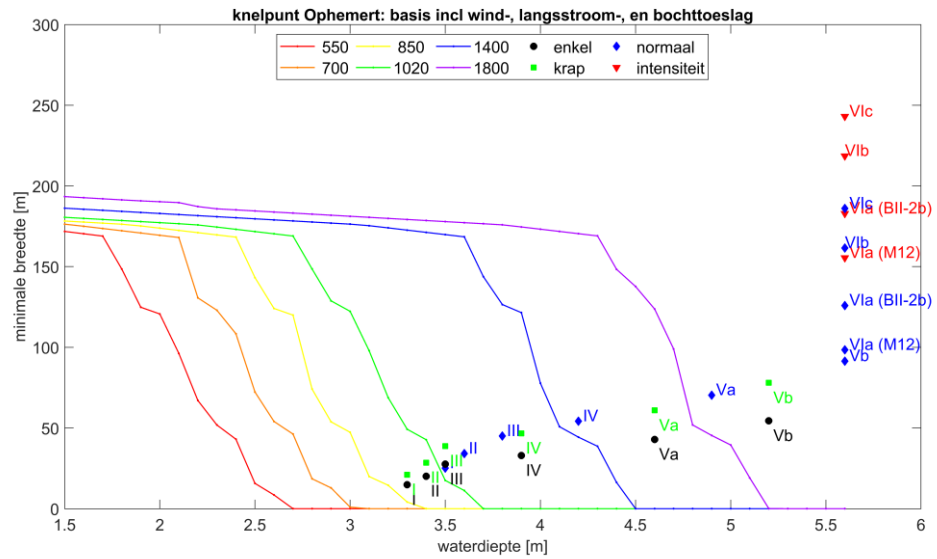
Figuur 2-10 Knelpunt “Erlecom benedenstrooms”. Boven: relatie tussen minimale breedte en de waterdiepte voor de KBN-afvoerniveaus. Onder: totaaloverzicht welk vaarwegprofiel (type en klasse) theoretisch valt in te passen bij ieder KBN-afvoerniveau. Waarden in de cellen zijn de beladingsgraad (in %).

## 2.6.5 Resultaten Knelpunt “Nijmegen”



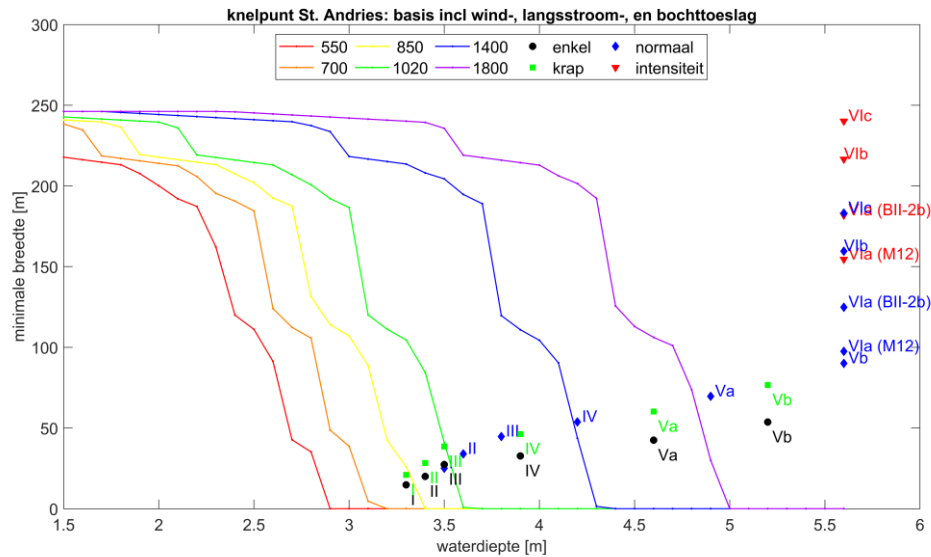
Figuur 2-11 Knelpunt “Nijmegen”. Boven: relatie tussen minimale breedte en de waterdiepte voor de KBN-afvoerniveaus. Onder: totaaloverzicht welk vaanwegprofiel (type en klasse) theoretisch valt in te passen bij ieder KBN-afvoerniveau. Waarden in de cellen zijn de beladingsgraad (in %).

## 2.6.6 Resultaten Knelpunt “Ophemert”



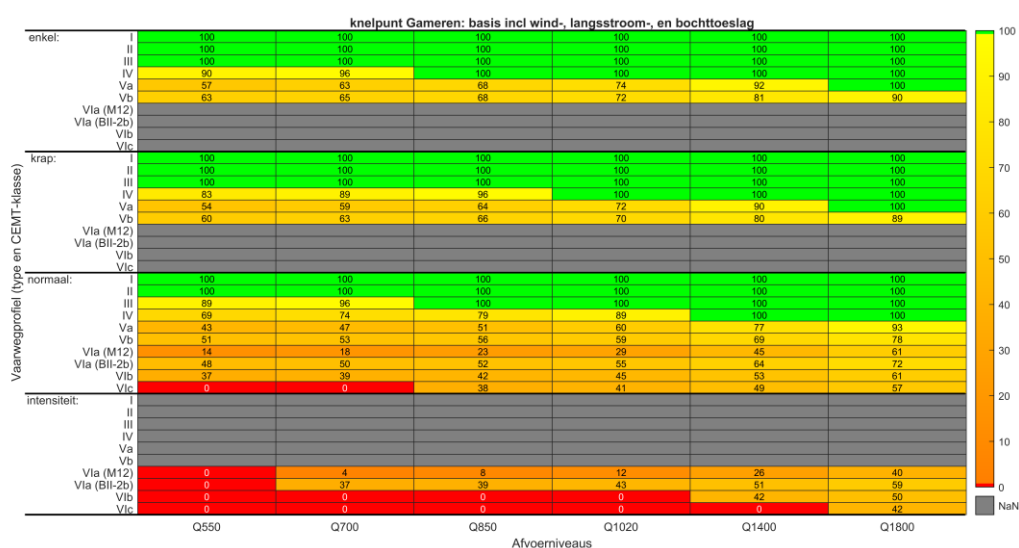
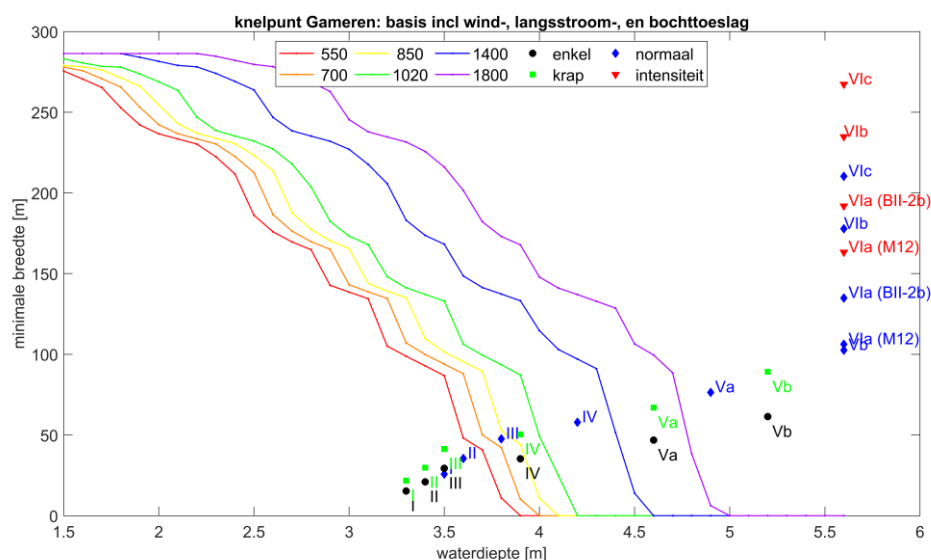
Figuur 2-12 Knelpunt “Ophemert”. Boven: relatie tussen minimale breedte en de waterdiepte voor de KBN-afvoerniveaus. Onder: totaaloverzicht welk vaanwegeprofiel (type en klasse) theoretisch valt in te passen bij ieder KBN-afvoerniveau. Waarden in de cellen zijn de beladingsgraad (in %).

## 2.6.7 Resultaten Knelpunt “St. Andries”



Figuur 2-13 Knelpunt “St. Andries”. 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 %).

## 2.6.8 Resultaten Knelpunt “Gameren”



Figuur 2-14 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 %).

## 2.6.9 Bevindingen

Wat opgemerkt kan worden uit de resultaten van de knelpunten is dat al bij een afvoer van 1800 m<sup>3</sup>/s de klasse Vb en VI schepen met verminderde beladingsgraad moeten varen (in het normale profiel) of zelfs niet meer kunnen varen (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 al vastgesteld aan de hand van metingen dat al bij een afvoer van circa 2000 m<sup>3</sup>/s de beladingsgraad begint te verminderen (dit geldt voor droge bulk). De IVS-analyse in het volgende hoofdstuk laat dit ook zien.

De vaargeul die in de Waal onderhouden wordt is 150 m breed. Een klasse Vlc intensiteitsprofiel zou volgens de hier uitgevoerde berekening een grotere breedte nodig hebben van 230 à 270 m, afhankelijk van de beschouwde bocht.



De groen/oranje/rode kleuren maken in één oogopslag inzichtelijk welke knelpunten het meest kritisch zijn. Het knelpunt Nijmegen is maatgevend (minste groen, meeste rood bij alle afvoerniveaus). Daarna volgt knelpunt Ophemert bij de langsdammen. Voor verkeer dat over de Waal vaart, maar Nijmegen niet passeert (bijvoorbeeld omdat opwaarts varende de afslag richting Amsterdam-Rijnkanaal of Maas-Waalkanaal wordt genomen), is Ophemert dus het meest relevante knelpunt.

Noemenswaardig is dat een M12 schip in sommige situaties niet meer kan varen of lage beladingsgraad heeft, terwijl een duwstel met vergelijkbare horizontale afmetingen nog wel kan varen of hogere beladingsgraad heeft. Dit komt doordat een duwbak een kleinere ledige diepgang heeft. Bij lage afvoer kan deze nog lang doorvaren met redelijk veel lading (totdat de afvoer zo laag wordt dat de duwboot te diep steekt).

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.

## 2.7 Stap 5: Vergelijking tussen klimaatscenario's Huidig en $W_{H,dry}$

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.

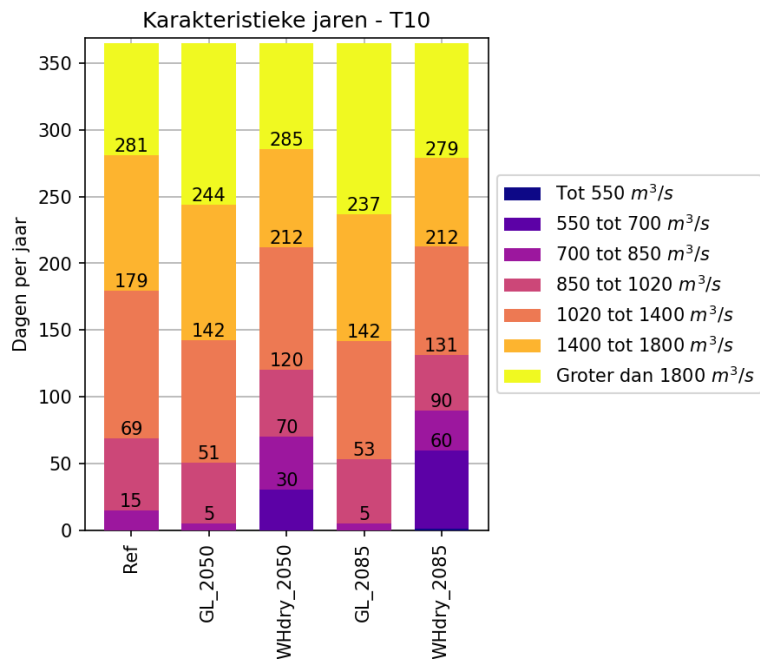
De informatie uit Figuur 2-15 over hoeveel dagen een bepaalde afvoer wordt onderschreden combineren we met de informatie over welke vaarwegprofielen nog passen bij bepaalde afvoeren. Hierbij doen we de aanname dat er nog gevaren wordt als de beladingsgraad groter of gelijk is aan 30%. Zo kan er afgelezen 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 aan 850 m<sup>3</sup>/s.

Bij een afvoer van 850 m<sup>3</sup>/s kan bij Nijmegen een normaal profiel voor CEMT-klasse Vb gerealiseerd worden (beladingsgraad 37%), en kan er dus maximaal klasse Vb varen. Klasse VI past niet bij de gedane aanname, de beladingsgraad is dan lager dan 30%. Op die manier kunnen de onderstaande figuren (Figuur 2-16) worden afgelezen: gedurende 295 dagen per jaar kan maximaal een klasse Vb normaal vaarwegprofiel voor de scheepvaart naar Duitsland ingepast worden, en gedurende een kleiner aantal dagen per jaar is dat een hogere klasse.

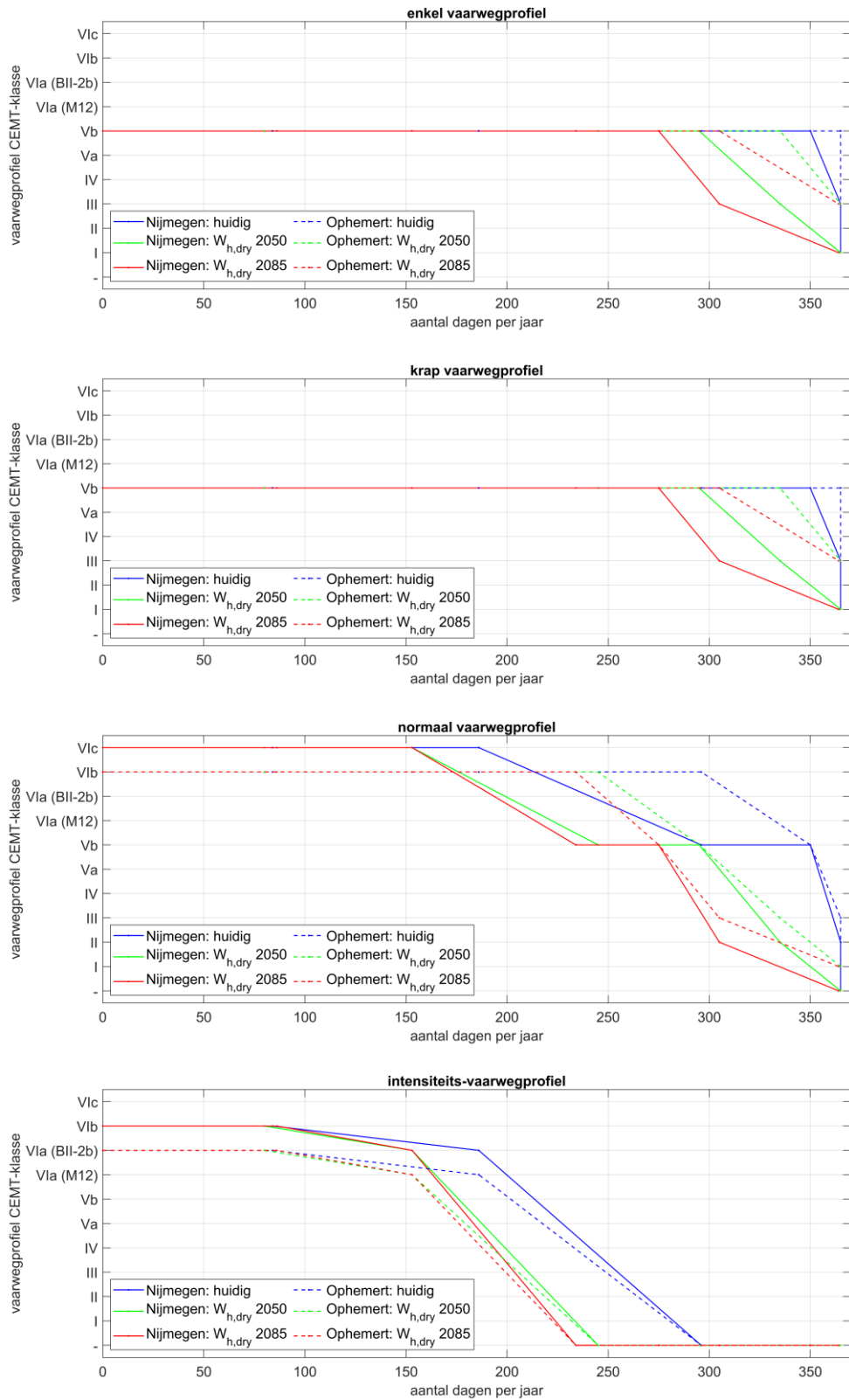
De grafiek komt tot stand door aantal dagen te koppelen aan afvoeren en die weer te koppelen aan de vaarwegprofielen. De knikpunten zijn daarmee bekend, maar niet het verloop (de lijnstukjes) tussen de knikpunten. Een horizontaal lijnstuk kan ontstaan als de sprong van het ene naar andere afvoerniveau (met bijbehorend aantal dagen) niet leidt tot een ruimer inpasbaar vaarwegprofiel door de aanname van minimaal 30% beladingsgraad.

De resultaten zijn als verwacht: de  $W_{H,dry}$  scenario's zijn eerder belemmerend voor hoge klassen dan het huidige klimaatscenario. Het is wel verstandig de figuren door de oogbaren te beschouwen en niet direct op de werkelijkheid te projecteren gezien de aannames en omdat het gaat om theoretische profielen, en gezien 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 (VI). Dit verandert nauwelijks in de toekomstige klimaatscenario's.



Figuur 2-15 Opbouw van een karakteristiek droog jaar (T10) met een terugkeertijd van 10 jaar voor de verschillende klimaatscenario's. Zie De Jong (2019); in Van der Mark & Van den Hoek (2024) is de afvoer van 550 m³/s toegevoegd.



Figuur 2-16 Aantal dagen per jaar dat een bepaald vaarwegprofiel (CEMT-klasse) kan worden ingepast voor een karakteristiek droog jaar (T10) en de verschillende klimaatscenario's.

## 3 Praktijk: wat vaart nog en waar bij lage afvoeren

### 3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt beschouwd welke scheepstypes in werkelijkheid nog varen met welke diepgang bij MGD en tijdens lage afvoeren en welke rivierbreedte 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 en beladingsgraad) geanonimiseerde IVS-data van de droge jaren 2018 en 2022 verwerkt die zijn aangeleverd door Rijkswaterstaat. 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 rapportage bij elkaar wat we hierover al weten van eerdere analyses. Eventuele vervolgvragen kunnen dan in later stadium worden gedefinieerd en opgepakt.

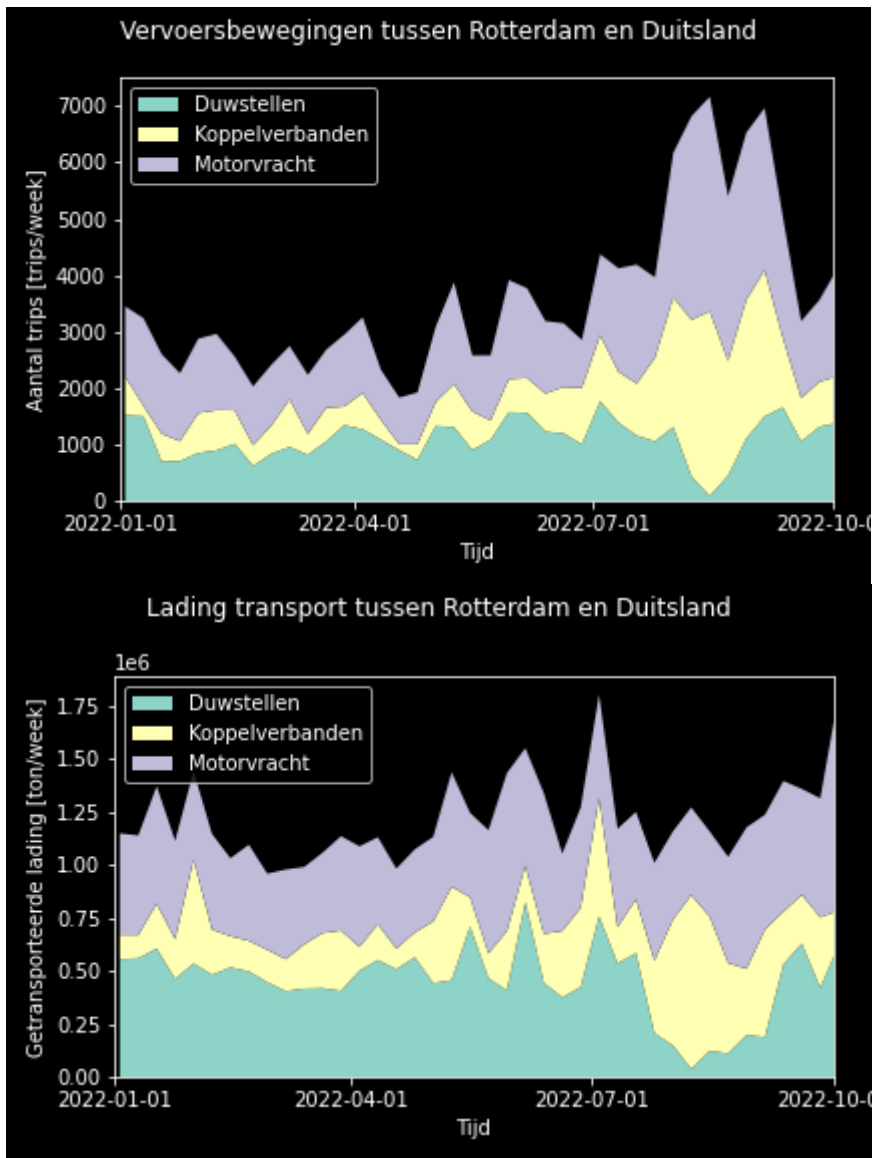
### 3.2 Wat vaart bij lage afvoeren op basis van IVS-data

#### 3.2.1 Aantallen en scheepstypes langs Lobith

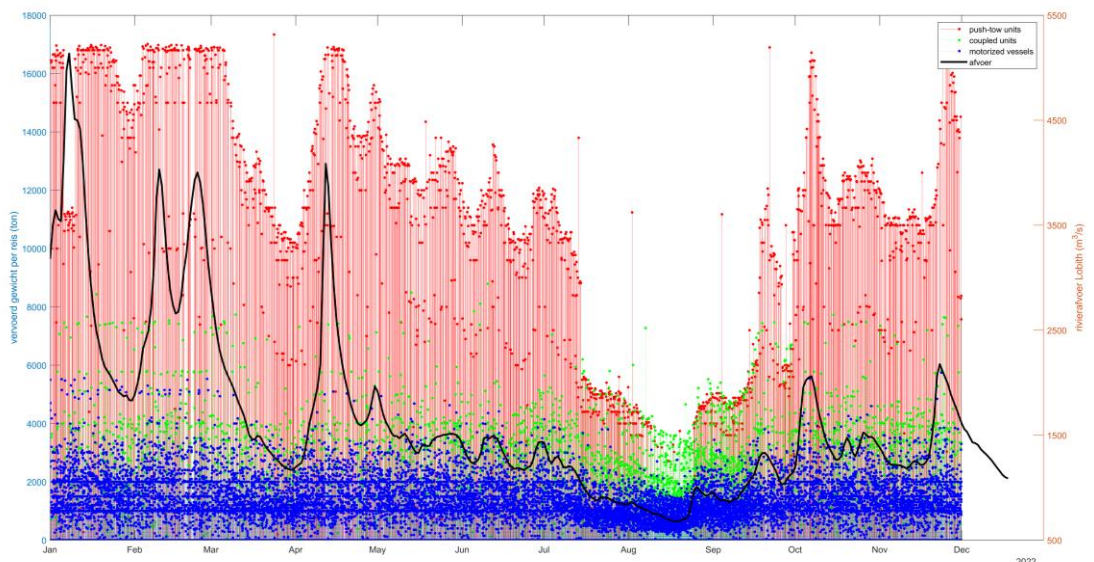
Allereerst hebben we bekeken welk type (klasse) schepen bij lage afvoeren nog in de vaart zijn. Dit is gedaan voor de gehele IVS dataset, dus met alle schepen die langs Lobith varen.

Er is gebruik gemaakt van door Rijkswaterstaat aangeleverde IVS-data bij telpunt Lobith. In de data staan alle reizen die langs Lobith kwamen in de jaren 2018 en 2022. In het bestand zijn onder andere het scheepstype en scheepskenmerken (klasse en afmetingen), de herkomst en bestemming, de diepgang, het vervoerd gewicht en laadvermogen opgenomen.

Voor de scrollymap Droogte ([Droogte op de rivier \(drought-scrolly.netlify.app\)](https://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, evenals in Hendriks & Mens (2024). 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 3-1). Het vervoerd gewicht per reis is weergegeven in Figuur 3-2.



Figuur 3-1 Goederentransport tussen Rotterdam en Duitsland, uitgesplitst naar type schip (motorschip, koppelverband, duwstellen). Boven: aantal trips per week. Onder: getransporteerd tonnage per week. Bron: [Droogte op de rivier \(drought-scrollly.netlify.app\)](https://drought-scrollly.netlify.app).

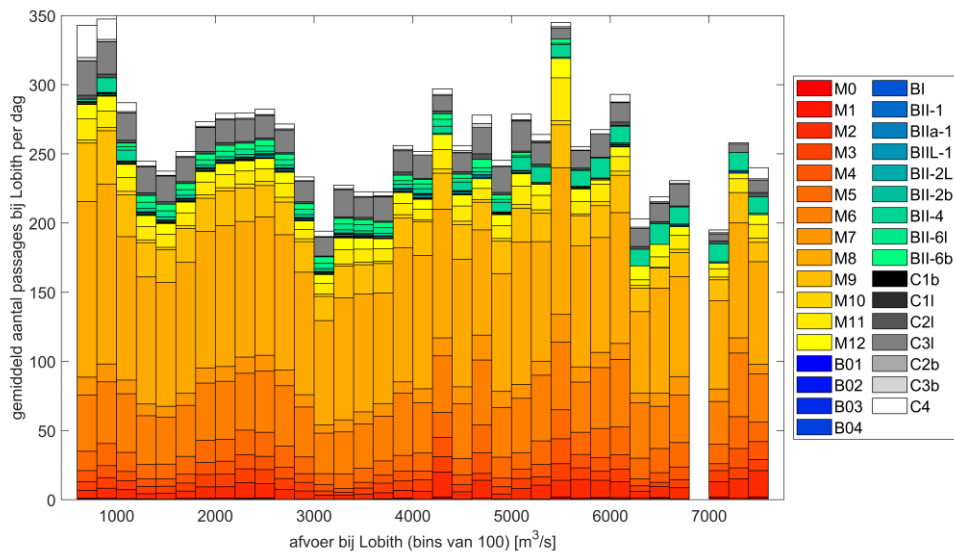


Figuur 3-2 Goederentransport tussen Rotterdam en Duitsland, uitgesplitst naar type schip (motorschip, koppelverband, duwstellen). Vervoerd gewicht per reis (linkeras), samen met de afvoer bij Lobith (rechteras). Elk staafje is een reis. Bron: Hendriks & Mens (2024).

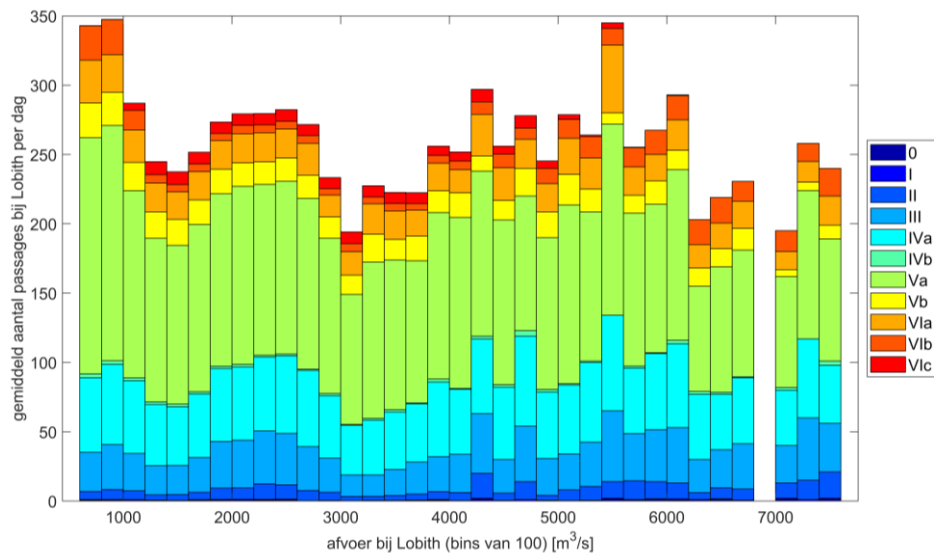
De voor dit project aangeleverde dataset biedt de mogelijkheid dit inzicht verder uit te breiden, door (a) het jaar 2018 mee te nemen (de eerdere verkenningen gingen alleen over 2022), (b) een verdere uitsplitsing te maken in de scheepstypen, en (c) door te kijken of er een relatie te vinden is tussen varende scheepstypen en afvoer. Daartoe plotten we de varende vloot als functie van de afvoer (Figuur 3-3). Het grootste aandeel van de vloot is motorschepen (in vergelijking tot duwstellen en koppelverbanden), en de grootste CEMT-klasse is de klasse Va. Verder zien we een lichte toename in het aantal passages bij de lagere afvoeren. In het voorgaande onderzoek (Van der Mark & Van den Hoek, 2023) leek deze toename wat overtuigender. Dit kan wellicht verklaard worden doordat toen data van meerdere jaren (ook tussenliggende jaren 2019 t/m 2021) werden gebruikt.

De CEMT VIc schepen (6-baks duwstellen) gaan geleidelijk uit de vaart als de afvoer afneemt tot onder de  $1150 \text{ m}^3/\text{s}$ .<sup>4</sup> Het gaat overigens om een afname van circa 10 scheepspassages naar 1 of 0 passages per dag. Voor de andere scheepstypen (met name Va en VIb), 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.

<sup>4</sup> Het Rijnvaartpolitiereglement 1995 schrijft voor dat 6-baks duwstellen alleen op de Waal mogen varen als de waterstand bij Lobith tussen  $8,50 \text{ m}$  en  $13,50 \text{ m} + \text{NAP}$  is gelegen. Volgens de betrekkinglijnen is de afvoer bij Lobith ongeveer  $1600 \text{ m}^3/\text{s}$  bij een waterstand van  $8,50 \text{ m}$ . In een rapportage van RWS uit 2007 (RWS, 2007) is onderzocht of als nieuwe ondergrens  $7,5 \text{ m} + \text{NAP}$  (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 Aantallen passages per dag onderverdeeld per scheepstype (RWS-klasse) als functie van de afvoer, afgeleid van de IVS-data.

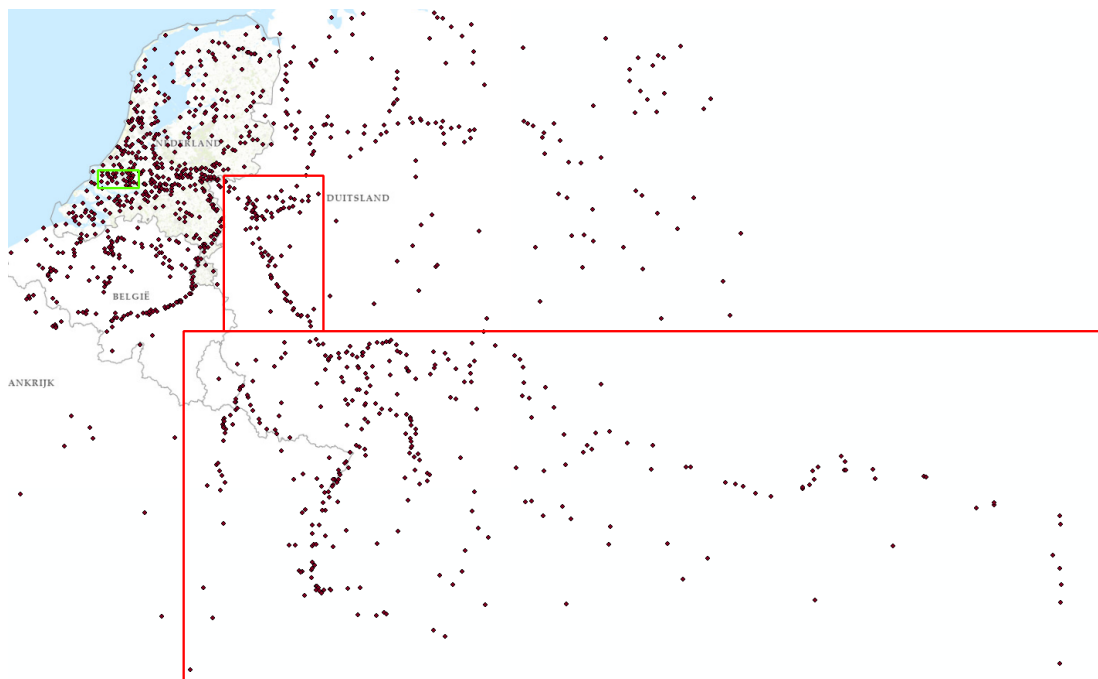


Figuur 3-4 Aantallen passages per dag onderverdeeld per scheepstype (CEMT-klasse) als functie van de afvoer, afgeleid van de IVS-data.

### 3.2.2 Diepgang en beladingsgraad

Vervolgens beschouwen we met welke diepgang en beladingsgraad nog door de verschillende scheepstypes wordt gevaren bij lage afvoeren en bij kleine MGD aan de hand van de IVS-dataset. Hiertoe is het nodig om een subset van de data te maken, aangezien de data reizen bevat langs Lobith, maar niet alle reizen over de Waal gaan. Er is een subset gemaakt die enkel reizen bevat met herkomst regio Rotterdam en bestemming Duitsland langs de Rijn en verder (Figuur 3-5), of andersom (bestemming Regio Rotterdam). Deze reizen zullen zeer waarschijnlijk over de Waal gegaan zijn.

Daartoe was het eerst nodig om de herkomsten en bestemmingen zonder coördinaten daarmee te verrijken met behulp van Baart et al. (2024).



*Figuur 3-5 Reizen die zeer waarschijnlijk over de Waal gaan, hebben herkomst Regio Rotterdam (groen vak) en bestemming Duitsland en verder (rode vakken), en vice versa. De punten zijn herkomsten en bestemmingen in de gehele dataset.*

De diepgang van de reis is onderdeel van de data. De beladingsgraad wordt bepaald als het vervoerde gewicht gedeeld door het laadvermogen. De dataset is opgeschoond door reizen waarvan de benodigde gegevens (de herkomst, bestemming, vervoerd gewicht, laadvermogen, of scheepstype) ontbreken of als een parameter een onrealistische waarde heeft (laadvermogen van 0 of 99999) te verwijderen. De diepgang en beladingsgraad wordt enkel beschouwd voor de reizen met niet-lege schepen.

We hebben de beladingsgraad en diepgang zowel geplot als functie van de MGD als van de afvoer bij Lobith (Figuur 3-6 en Figuur 3-7). Reizen met CEMT-klassen I, II en VIa (B/C) komen niet of zeer weinig voor in de data en zijn daarom achterwege gelaten.

In alle CEMT-klassen neemt de beladingsgraad en diepgang logischerwijs af met afnemende afvoer of MGD. We zien dat de 6-baks duwvaart (VIc) met hoge beladingsgraad vaart bij hogere afvoeren (nagenoeg 1). Dat de beladingsgraad bij de andere scheepsklassen lager dan 1 is bij de hogere afvoeren kan komen doordat schepen simpelweg niet volledig afgeladen hoeven te varen (aanbod aan lading), maar kan ook komen doordat de schepen afgeladen zijn op een ander knelpunt, bijvoorbeeld Kaub verder in Duitsland.

De grilligheid in de Figuur 3-6 en Figuur 3-7 (onder) kan waarschijnlijk verklaard worden door het feit dat het aantal datapunten waarover de mediaan wordt bepaald redelijk beperkt is. Hoewel de initiële dataset een groot aantal reizen bevat (> 200.000), blijft er na filtering op Waal-corridor, op niet-lege schepen en na groepering in MGD / afvoerranges en scheepsklassen een klein aantal reizen over. Afhankelijk van type en MGD, gaat het om honderden of soms slechts enkele reizen waarover de mediaan wordt bepaald. De analyse wordt sterker als meer jaren aan reizen worden meegenomen, dan heeft het ook waarde om naar spreiding of verder in te zoomen op bijvoorbeeld de 10% diepst stekende schepen.





Figuur 3-6 Beladingsgraad en diepgang als functie van de MGD: (boven) alle reizen van de dagen waarop de MGD werd gemeten; (midden en onder) met onderscheid naar CEMT-klasse.



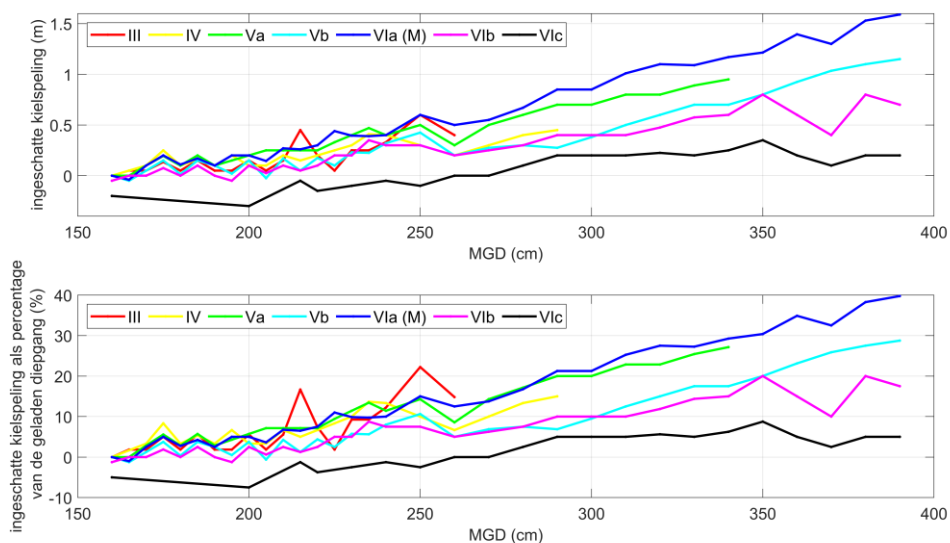
Figuur 3-7 Beladingsgraad en diepgang als functie van de afvoer bij Lobith: (boven) alle reizen; (midden en onder) gemiddeld over CEMT-klasse.

### Inschatting kielspeling op basis van de IVS-data

We kunnen een inschatting van de kielspeling maken, als we aannemen dat schepen worden afgeladen op de MGD. Immers, als schepen bij beperkte waterdiepte worden afgeladen op de MGD, dan zou de diepgang plus een aangehouden kielspeling ongeveer gelijk moeten zijn aan de MGD. Hiermee is een inschatting gemaakt van de kielspeling (Figuur 3-8). De figuur is afgeknot voor de hogere MGD-waarden (vanaf MGD gelijk aan maximale diepgang), aangezien bij hoge waterdiepte en MGD, maximaal beladen kan worden en de kielspeling heel groot kan worden. Uit Figuur 3-6 en Figuur 3-8 valt op te maken dat klasse VIc schepen bij lage MGD dieper afladen dan de MGD (bij een MGD van 200 cm is de diepgang groter dan 2 m), en bij hogere MGD is de kielspeling ongeveer 20 à 30 cm (circa 5% van de maximale diepgang). Bij de andere CEMT-klassen zien we ook een kleinere kielspeling bij lagere MGD (circa 5% bij 200 cm MGD), maar hier wordt niet dieper afgeladen dan de MGD (diepgang is kleiner dan MGD).

Het is hier relevant te vermelden dat er een verschil is tussen de werkelijke diepte in de vaargeul en de MGD, vaak gemeten aan de rand van de geul. De schipper weet doorgaans goed met welke aflaaddiepte nog kan worden gevaren in het midden van de geul, bij een bepaalde MGD. Dit verklaart de kleine, soms zelfs negatieve, kielspelingsen. Een schipper wordt in geval van een gronding geverbaliseerd wanneer de aflaaddiepte groter was dan de MGD. Het Rijk schrijft niet voor tot welke diepte afgeladen mag worden, maar geeft wel de MGD als een soort grens of richtsnoer.

Deze inschatting moet met voorzichtigheid geïnterpreteerd worden, want zoals gesteld is bij berekening van de kielspeling de aanname gedaan dat er is afgeladen op MGD. Echter kan ook afgeladen zijn op andere overwegingen.



Figuur 3-8 Kielspeling (*inschatting*) afgeleid uit de IVS-data als functie van de MGD: (boven) kielspeling, (onder) kielspeling (*inschatting*) als percentage van de geladen diepgang van de betreffende CEMT-klasse.

### 3.3 Welke rivierbreedte wordt bevaren 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. Scheepstracks vertegenwoordigen de route die een schip heeft afgelegd en worden opgebouwd aan de hand van de signalen die worden uitgezonden door de aan boord aanwezige AIS-transponder. Het verwerken van AIS data is een omvangrijke exercitie; daarom brengen we in deze studie eerst bij elkaar wat we hierover al weten van eerdere analyses. Eventuele vervolgvragen kunnen dan in later stadium worden gedefinieerd en opgepakt.

Voor onder andere het ruimtegebruik in de Waal zijn in de afgelopen jaren twee grotere analyses gedaan met behulp van scheepstrack-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.

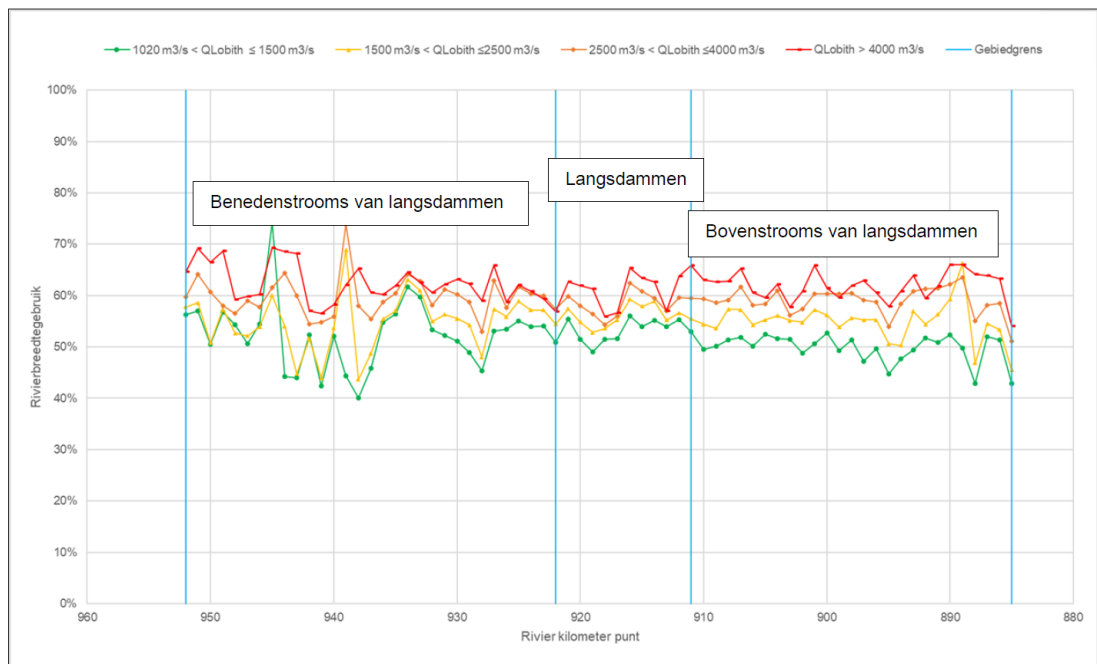
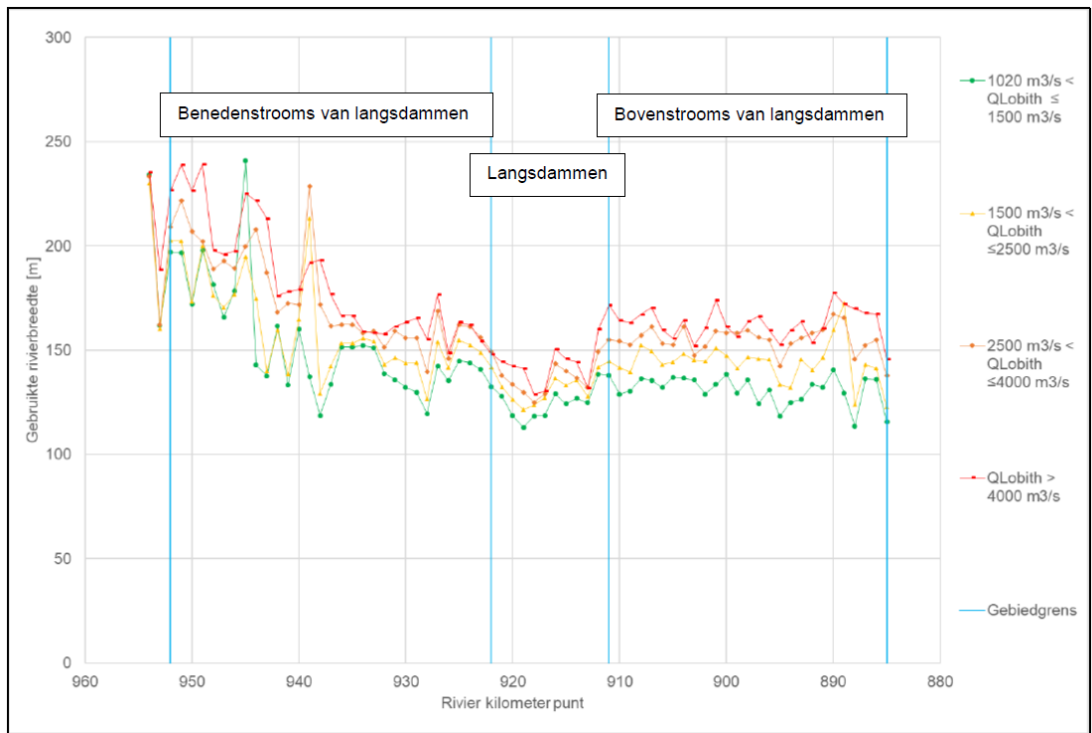
Voor de vraag welke rivierbreedte wordt benut bij verschillende afvoeren, zijn hieronder de resultaten uit de studies bijeengebracht.

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:

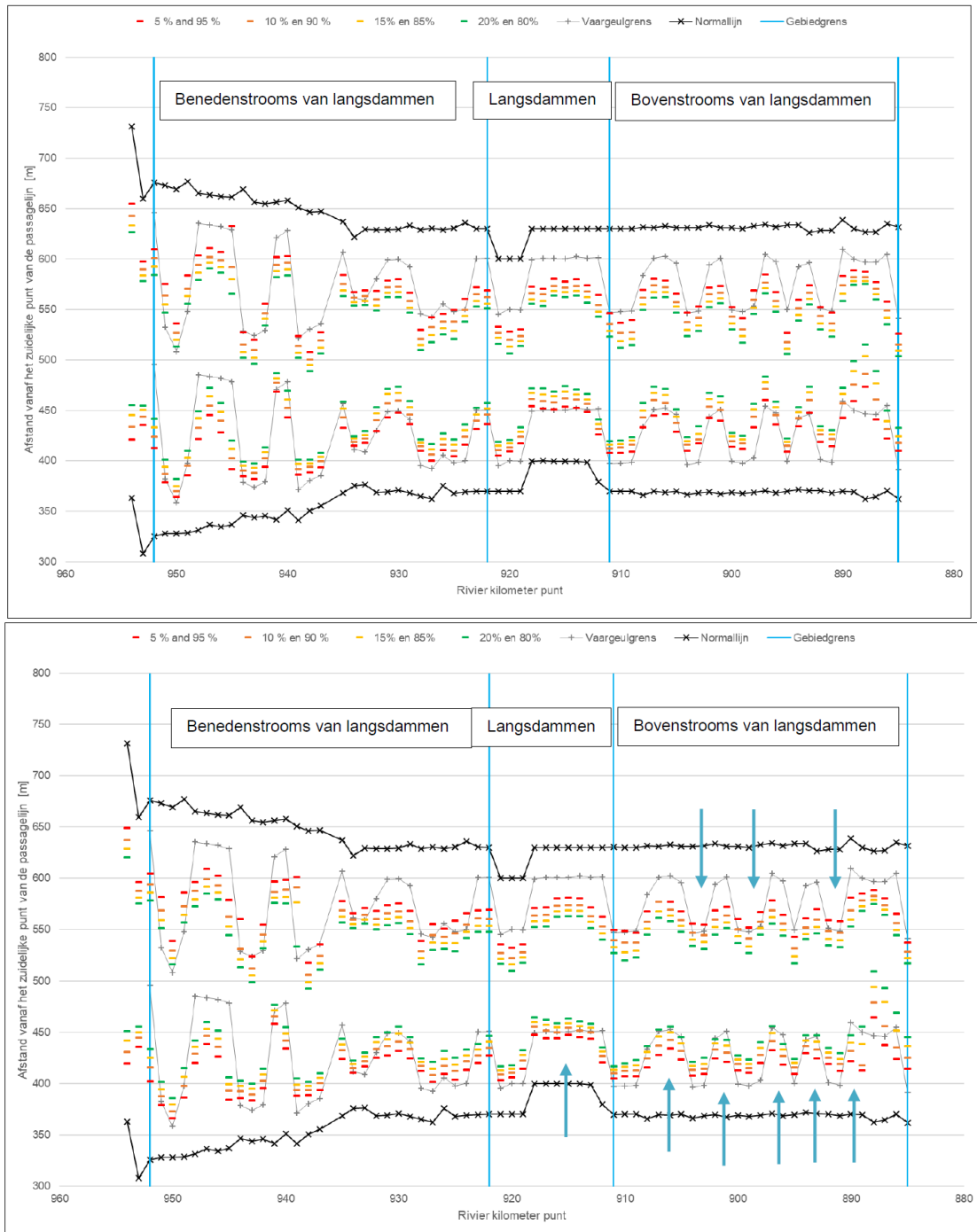
- $Q_L$  kleiner dan 1020 m<sup>3</sup>/s
- $Q_L$  tussen 1020 en 1500 m<sup>3</sup>/s
- $Q_L$  tussen 1500 en 2500 m<sup>3</sup>/s
- $Q_L$  tussen 2500 en 4000 m<sup>3</sup>/s
- $Q_L$  groter dan 4000 m<sup>3</sup>/s

Een afvoer kleiner dan 1020 m<sup>3</sup>/s kwam nauwelijks voor in de beschouwde periode waarvoor data beschikbaar waren, en is in de figuren niet meegenomen.

Figuur 3-9 laat zien dat bij lage afvoeren de gebruikte breedte orde grootte 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 3-10, 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.

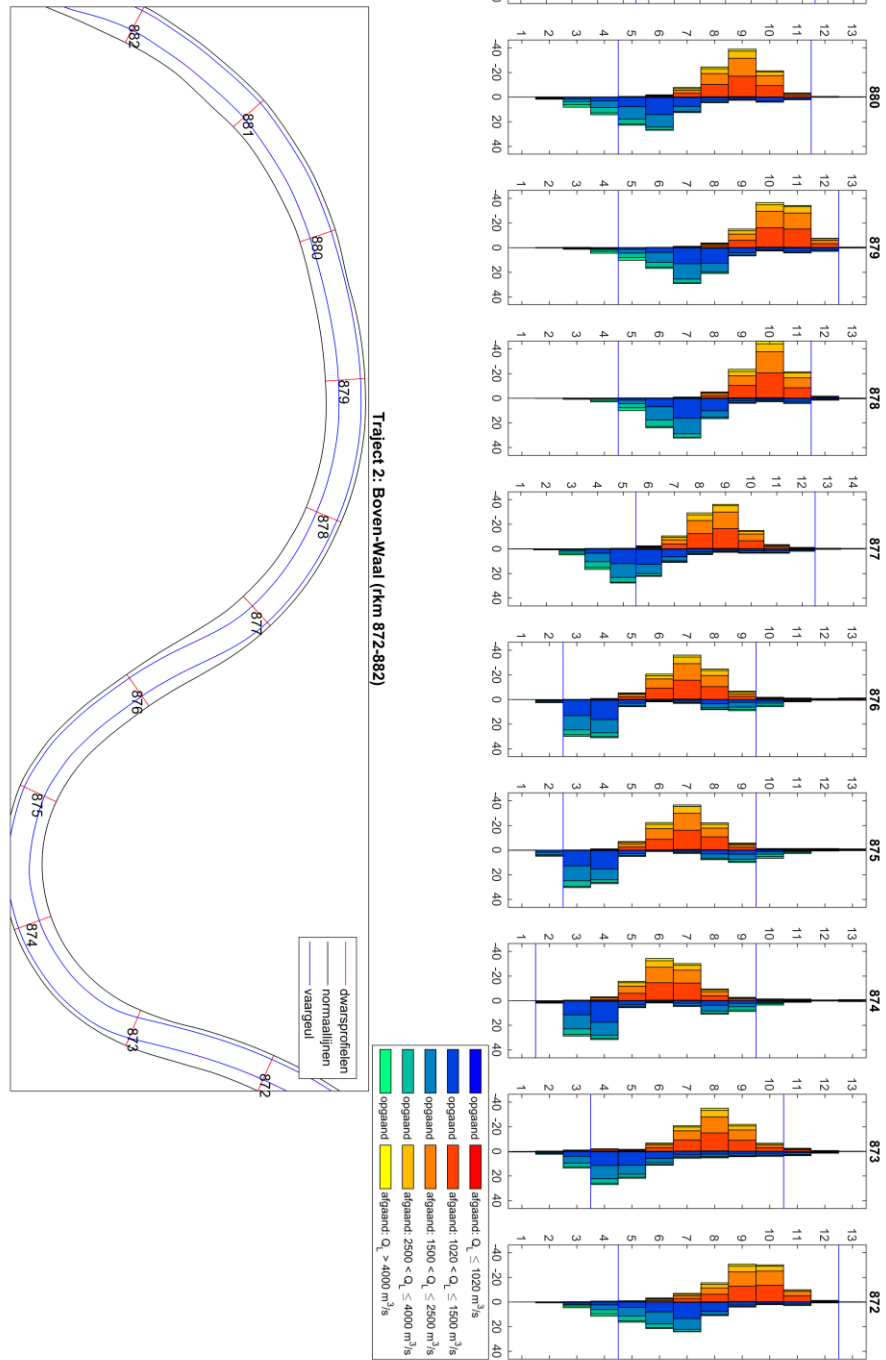


Figuur 3-9 Boven: gebruikte rivierbreedte op de Waal voor verschillende afvoerranges. 90% van de schepen vaart binnen deze breedte. Het traject loopt van net benedenstrooms van Nijmegen tot Vuren. Onder: gebruikte rivierbreedte ten opzichte van de normaalbreedte, de afstand tussen de normaallijnen. Bron: Indah-Everts & Hermans (2021).

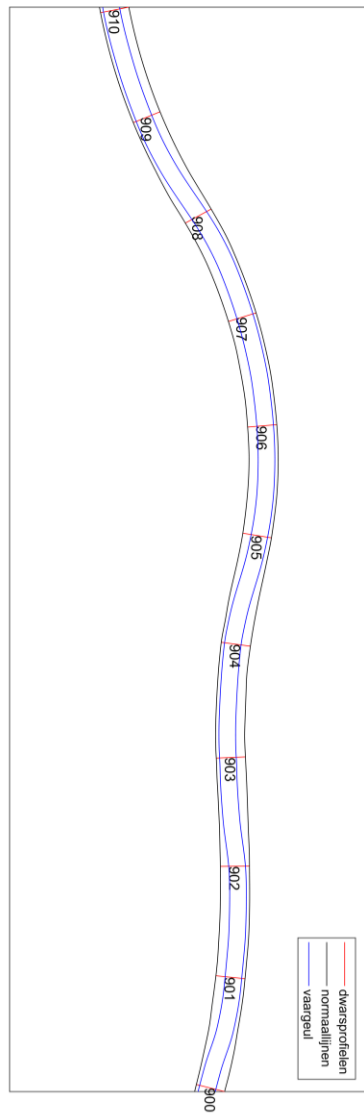


Figuur 3-10 Gebruikte rivierbreedte met onderscheid in percentielen. 90% van de schepen vaart binnen het rode deel, 80% binnen het oranje deel, 70% binnen het gele deel, 60% binnen het groene deel. De normaallijnen en 150 m brede beleidsmatige vaargeul zijn weergegeven. Het traject loopt van net benedenstrooms van Nijmegen tot Vuren. Boven: ruimtegebruik voor de afvoerrange 1020 – 1500 m<sup>3</sup>/s. Onder: ruimtegebruik voor de afvoerrange 1500 – 2500 m<sup>3</sup>/s. Bron: Indah-Everts & Hermans (2021).

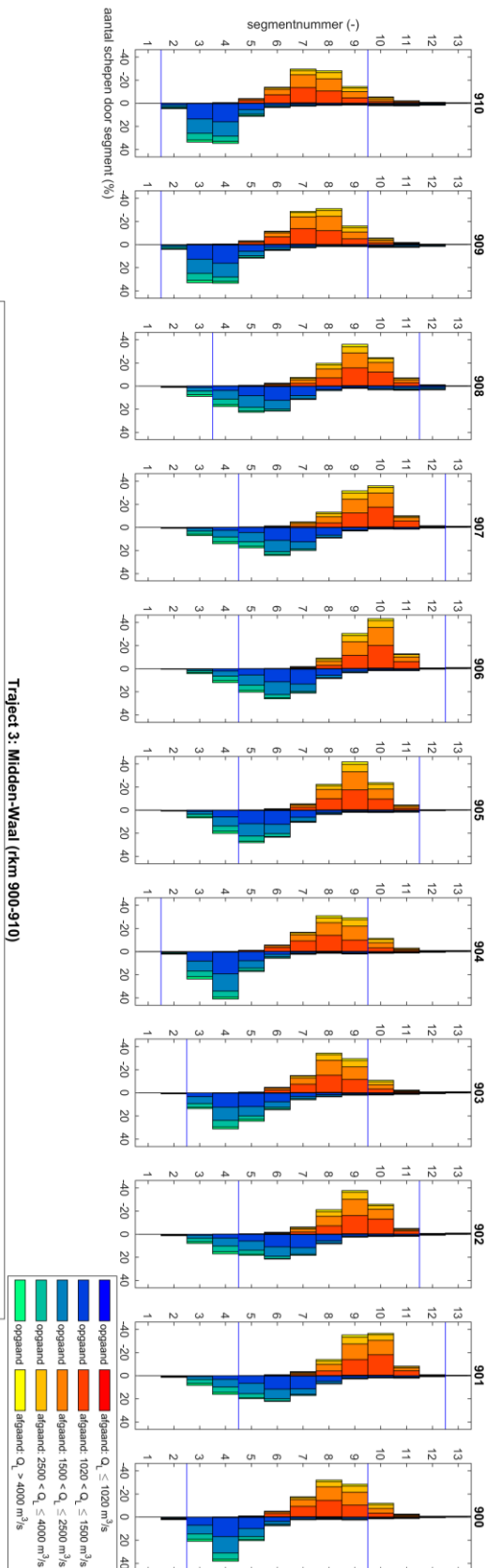
Een overeenkomstig beeld is gevonden in de suppletie-studie, waarin CoVadem-data werden gebruikt voor de bepaling van het ruimtegebruik. In deze studie werden drie trajecten beschouwd, waarvan er twee in de Waal liggen: de bocht bij Erlecom (Figuur 3-11) en een deel van de Midden-Waal (Figuur 3-12). 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.



Figuur 3-11 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. De rivier is opgedeeld in een aantal even brede stroken, het aantal passages door het dwarsprofiel per strook (segment) is geteld. Bron: Becker et al. (2023).



Traject 3: Midden-Waal (rkm 900-910)



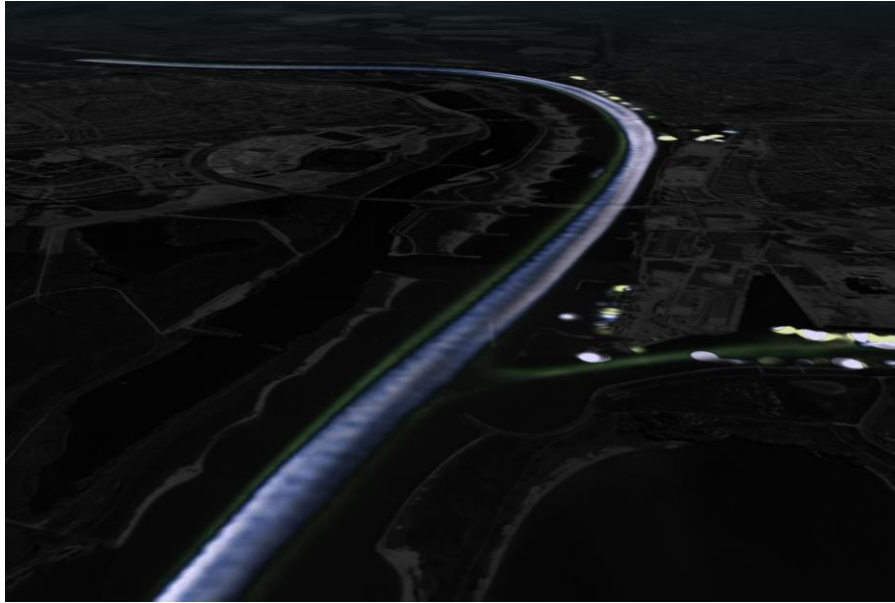
Periode 4: Na suppletie 2 (20 aug 2019 - 1 apr 2022)

Figuur 3-12 Ruimtelijke verdeling van schepen op de Midden-Waal, waarbij onderscheid is gemaakt in verschillende afvoerniveaus en opvaart/afvaart. De ligging van de vaargeul is met blauwe lijnen aangegeven in de histogrammen. De rivier is opgedeeld in een aantal even brede stroken, het aantal passages door het dwarsprofiel per strook (segment) is geteld. Bron: Becker et al. (2023).



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 m<sup>3</sup>/s bij Lobith) vergeleken met een week met zeer lage afvoer (week 34, ongeveer 900 m<sup>3</sup>/s bij Lobith), zie Figuur 3-13.

In de praktijk wordt dus aanzienlijk minder vaarbreedte gebruikt dan volgens de Richtlijnen Vaarwegen benodigd is. Alle drie de studies tonen dat er voornamelijk binnen de vaargeul van 150 m wordt gevaren. Dit betekent overigens niet dat we automatisch kunnen concluderen dat de Richtlijnen te streng zouden zijn of dat met minder breedte volstaan kan worden. Vlot en veilig betekent ook dat er incidenteel voldoende ruimte is om uit te wijken als dat nodig is. Bovendien kennen schippers de rivier over het algemeen goed, en zullen ze oplopen/passeren op locaties waar het veilig kan.



*Figuur 3-13 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. Bron: [Droogte op de rivier \(drought-scrollly.netlify.app\)](https://drought-scrollly.netlify.app).*

## 4 Invloed parameters op theoretische beladingsgraad

### 4.1 Inleiding

In Hoofdstuk 2 zijn benodigde vaarwegafmetingen afgeleid aan de hand van de Richtlijnen Vaarwegen. Daarmee is bepaald wat de “theoretische” beladingsgraad is waarmee nog veilig kan worden gevaren als de benodigde en beschikbare afmetingen met elkaar worden geconfronteerd. De Richtlijnen Vaarwegen zijn à priori bedoeld voor toepassing bij ontwerp van nieuwe vaarwegen. Bij toepassing faciliteren ze vlot en veilig verkeer. Ze kunnen gebruikt worden om na te gaan welk profiel er nodig is om veilig te kunnen varen. De Richtlijnen zijn in eerste instantie niet bedoeld om een bestaande vaarweg te toetsen, aan bijvoorbeeld een extreme (laagwater) situatie. Het is goed om wat meer gevoel te hebben bij de waarde van de “theoretische” beladingsgraad, aangezien we weten dat enkele parameters onzeker of streng zijn. In dit hoofdstuk wordt voor enkele parameters de invloed op de theoretische beladingsgraad beschouwd.

#### *Kielspeling*

In de Richtlijnen Vaarwegen, wordt uitgegaan van een minimaal benodigde waterdiepte gelijk aan 1,3 of 1,4 keer de diepgang van het maatgevende geladen schip, ofwel een kielspeling van 30 of 40%. Het is bekend dat in de praktijk een kleinere kielspeling aangehouden wordt. In Hoofdstuk 3 werd dat ook getoond. Ook 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.

De kielspeling bepaalt de benodigde vaarwegafmetingen (waterdiepte) en is ook nodig om de theoretische beladingsgraad te bepalen waarmee nog gevaren kan worden.

#### *Ledige diepgang*

Er bestaan vermoedens dat ook de waarden voor ledige diepgang zoals gepresenteerd in de Richtlijnen Vaarwegen, aan de hoge kant zijn. De ledige diepgang wordt, net als de kielspeling, gebruikt om de beladingsgraad te bepalen waarmee nog gevaren kan worden.

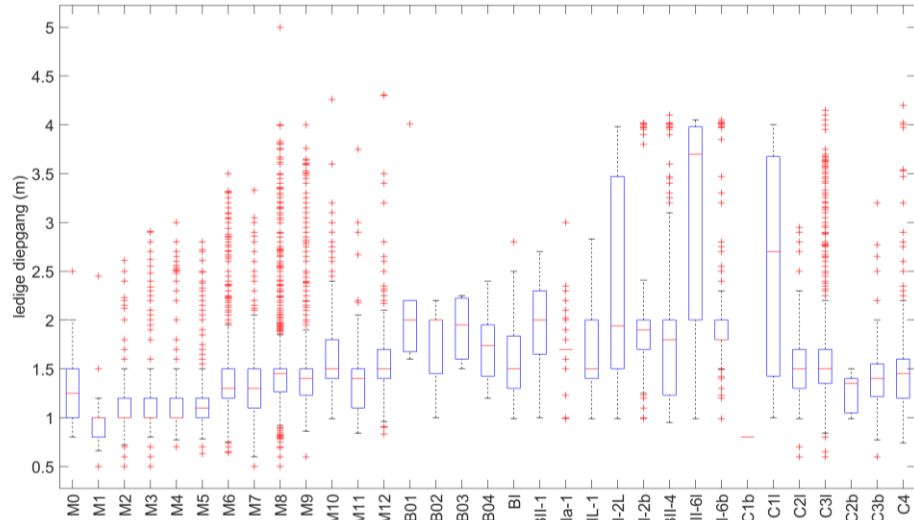
In dit hoofdstuk zullen we de invloed van de kielspeling en ledige diepgang op de resultaten uit Hoofdstuk 2 beschouwen. De invloed van de breedtetoeslagen nemen we daarin ook mee.

### 4.2 Ledige diepgang

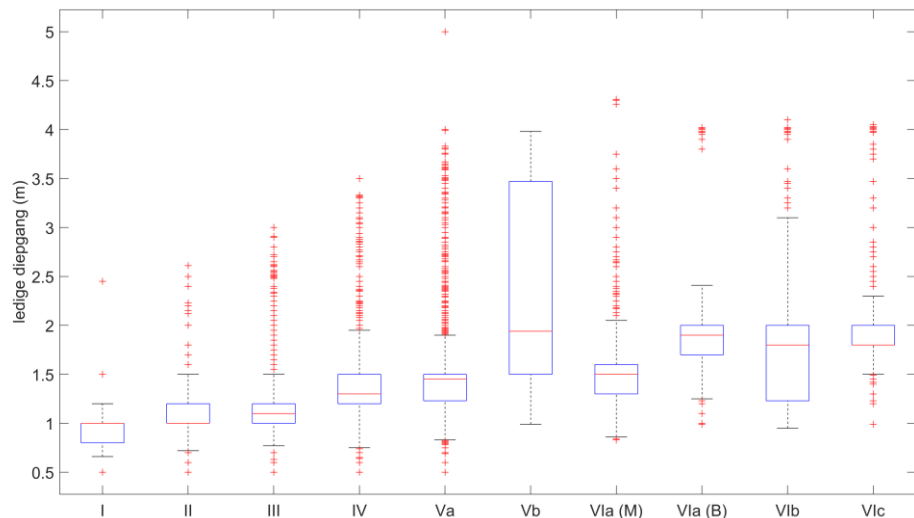
De ledige diepgang volgens de Richtlijnen Vaarwegen zijn vermeld in Tabel 2-2. Voor het inschatten van de ledige diepgang, zijn daarnaast vier verschillende bronnen geraadpleegd, namelijk: 1) de IVS-dataset, 2) gegevens van ILT uit meetbrieven, 3) ledige diepgang bepaald volgens het model van Van Dorsser (2020), en 4) aangeleverde gegevens uit de casco database.

### IVS-dataset

Uit de ontvangen IVS-dataset zijn alle lege schepen gefilterd. Alle “lege” reizen met een diepgang groter dan 5 m zijn vervolgens verwijderd (verondersteld dat deze waarde onjuist is). De diepgang van de ledige schepen is gepresenteerd in Figuur 4-1. Een groepering naar CEMT-klassen levert het resultaat in Figuur 4-2. De ledige diepgang van de duwstellen betreft vermoedelijk de duwboot (niet de bakken). Diepgang informatie uit IVS is handmatige invoer van de schippers en kan daarom onjuiste informatie bevatten. Dat verklaart mogelijk de uitschieters en hoge mediaan voor BII-6I en C1L schepen in Figuur 4-1.



Figuur 4-1 Ledige diepgang voor verschillende scheepstypes, afgeleid van de lege schepen in de IVS-dataset.



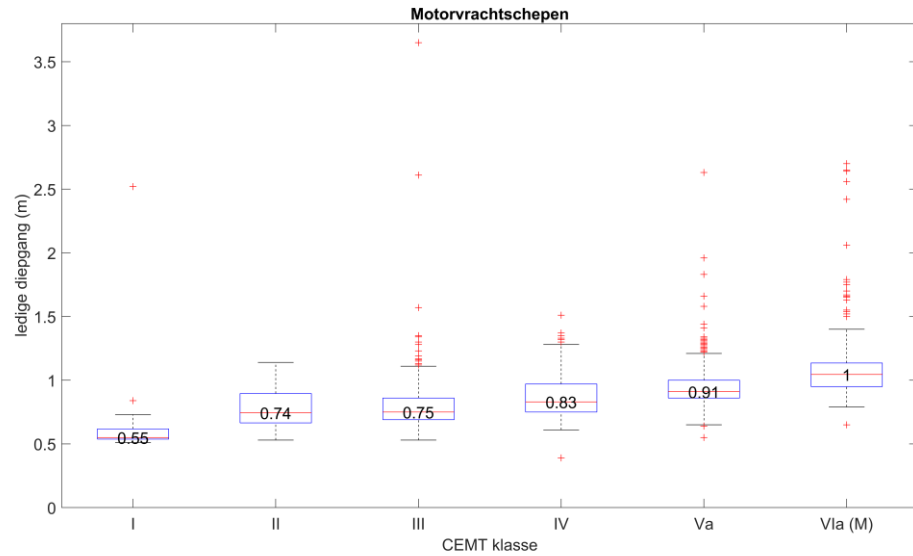
Figuur 4-2 Ledige diepgang voor verschillende CEMT-klassen door groepering van de data in Figuur 4-1.

### Meetbrieven ILT

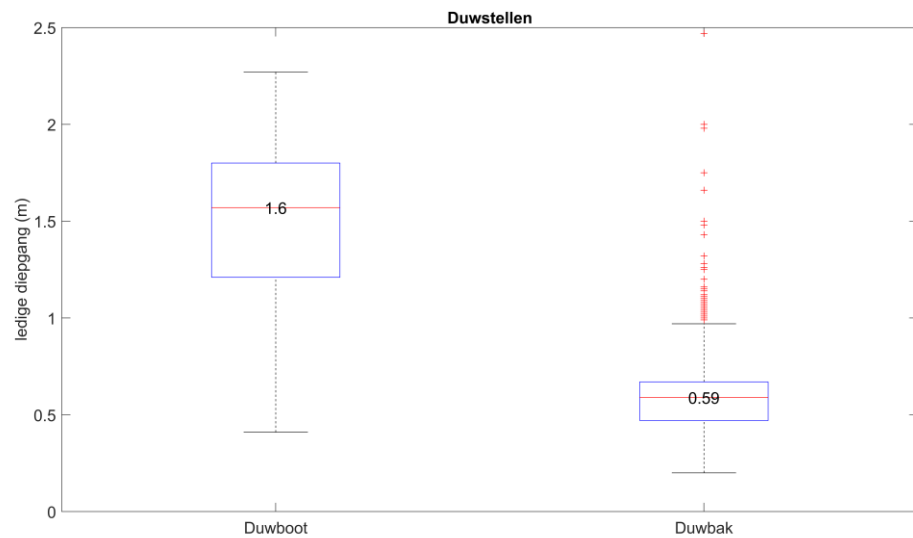
Daarnaast hebben we van Rijkswaterstaat een dataset van het ILT ontvangen (scheepsafmetingen\_meetbrieven.csv). Deze dataset bevat het type schip, lengte, breedte en ledige diepgang.

Alle schepen aangemerkt als motorvrachtschip en motortankschip zijn gefilterd om voor motorschepen de ledige diepgang (mediaan) per CEMT-klasse te bepalen (Figuur 4-3). Evenzo voor duwstellen, zijn scheepstypes geselecteerd en gegroepeerd in Figuur 4-4 voor

de duwboot (types: schip met duwsteven en duwboot) en de duwbak (types: ponton en alle bakken).



Figuur 4-3 Ledige diepgang voor motorvrachtschepen, afgeleid van ILT data van meetbrieven.



Figuur 4-4 Ledige diepgang voor duwstellen, afgeleid van ILT data van meetbrieven.

**Model van Van Dorsser et al. (2020)**

Van Dorsser et al. (2020) presenteert regressiemodellen voor ledige diepgang en ontwerpdiepgang, die zijn afgeleid van een set aan meetbrieven. We hebben het model toegepast voor motorschepen, niet voor duwstellen of koppverbanden. Eerst dient de ontwerpdiepgang bepaald worden aan de hand van de afmetingen van het schip. Hierbij zijn de regressie-coëfficiënten verschillend per type schip (container, droge bulk, duwbak, tanker). We hebben het model toegepast met de regressie-coëfficiënten voor containers. Daarna wordt de ledige diepgang bepaald, waarbij de ontwerpdiepgang en scheepsafmetingen input zijn. De resultaten staan in Tabel 4-1, samen met de overige bronnen.

### Cascodatabase

Tot slot hebben we van Rijkswaterstaat informatie over de lege inzinking van enkele casco's uit de zogenaamde cascodatabase ontvangen.

In Tabel 4-1 staan alle verzamelde ledige diepgangen van de vier verschillende bronnen bij elkaar.

Tabel 4-1 Ledige diepgang, afgeleid uit de verschillende bronnen.

CEMT-klasse	Ledige diepgang (m)				
	Richtlijnen Vaarwegen	IVS-dataset (mediaan, zie boxplots)	ILT meetbrieven (mediaan, zie boxplots)	Model Van Dorsser et al. (2020)	Casco database
I	1,2	1,0	0,55	0,57	0,55 (Spits: 38,5 x 5,05 m)
II	1,4	1,0	0,74	0,65	0,65 (Kempenaar: 55 x 6,50 m)
III	1,5	1,1	0,75	0,72	0,73 (Dordtmunder: 67 x 8,20 m)
IV	1,6	1,3	0,83	0,75	0,76 (Rijn-Herneschip: 85 x 9,50 m)
Va	1,8	1,5	0,91	0,76	0,91 (Groot Rijnschip: 135 x 11,45 m)
Vb	0,6 en 1,8	1,9	0,6 en 1,6		
Vla (M12)	2,0	1,5	1,0	0,80	1,00 (Rijn-max: 135 x 15 m)
Vla (BII-2b)	0,6 en 1,8	1,9	0,6 en 1,6		
Vlb	0,6 en 1,8	1,8	0,6 en 1,6		
Vlc	0,6 en 1,8	1,8	0,6 en 1,6		

## 4.3 Invloed van toeslagen, kielspeling en ledige diepgang

Op basis van de verzamelde informatie bepalen we de invloed van de kielspeling en ledige diepgang door uit te gaan van realistischere waarden. Voor de kielspeling gaan we uit van 5% en 10% ongeacht het type profiel, in plaats van 30% of 40% als voorgeschreven in de Richtlijnen Vaarwegen. Voor de ledige diepgang (Tabel 4-2) gaan we uit van de waarden uit de ILT meetbrieven, die geven een betrouwbare ondergrens; dit komt neer op een halvering ten opzichte van de Richtlijnen Vaarwegen voor de motorschepen. We gaan uit van 1,6 m diepgang voor de duwboot (en 0,6 m voor de duwbak blijft gelijk). Ook de invloed van het niet toepassen van de toeslagen op de breedte is meegenomen. In onderstaande figuren is het bereik gepresenteerd in beladingsgraad, door de verschillende scenario's bij elkaar te plotten:

- Richtlijnen Vaarwegen toegepast (de resultaten voor de beladingsgraad zijn gepresenteerd in Hoofdstuk 2);
- Richtlijnen Vaarwegen zonder toeslagen op de vaarwegbreedte;
- Richtlijnen Vaarwegen, maar met een kielspeling van 5%;
- Richtlijnen Vaarwegen, maar met een kielspeling van 10%;
- Richtlijnen Vaarwegen, maar met een halvering van de ledige diepgang;
- Richtlijnen Vaarwegen, maar met een halvering van de ledige diepgang en met een kielspeling van 5%.

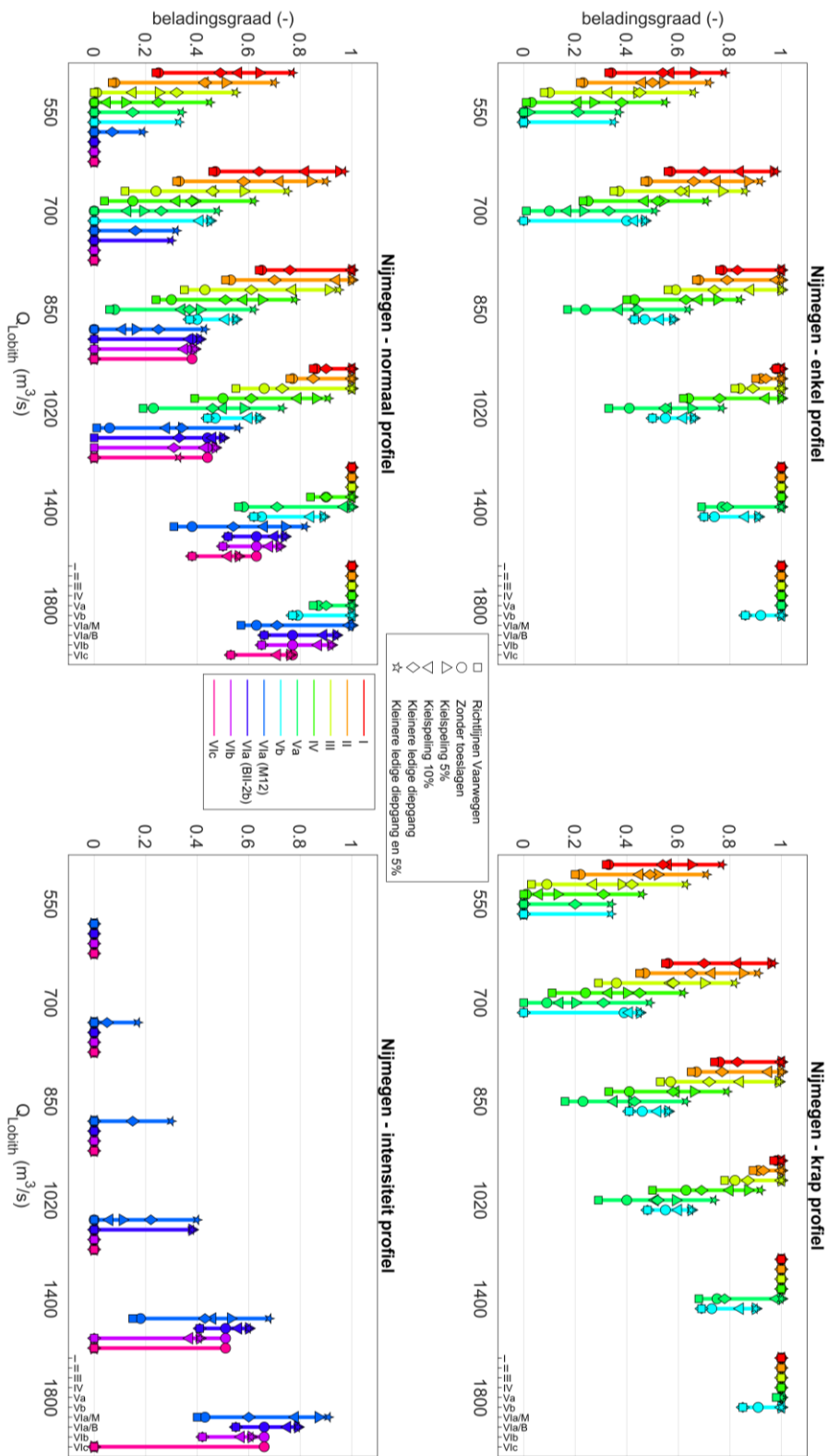
Tabel 4-2 Toegepaste ledige diepgang voor analyse naar de invloed op de beladingsgraad.

CEMT-klasse	Toegepaste ledige diepgang (m)
I	0,60
II	0,70
III	0,75
IV	0,8
Va	0,9
Vb	0,6 en 1,6
Vla (M12)	1,0
Vla (BII-2b)	0,6 en 1,6
Vlb	0,6 en 1,6
Vlc	0,6 en 1,6

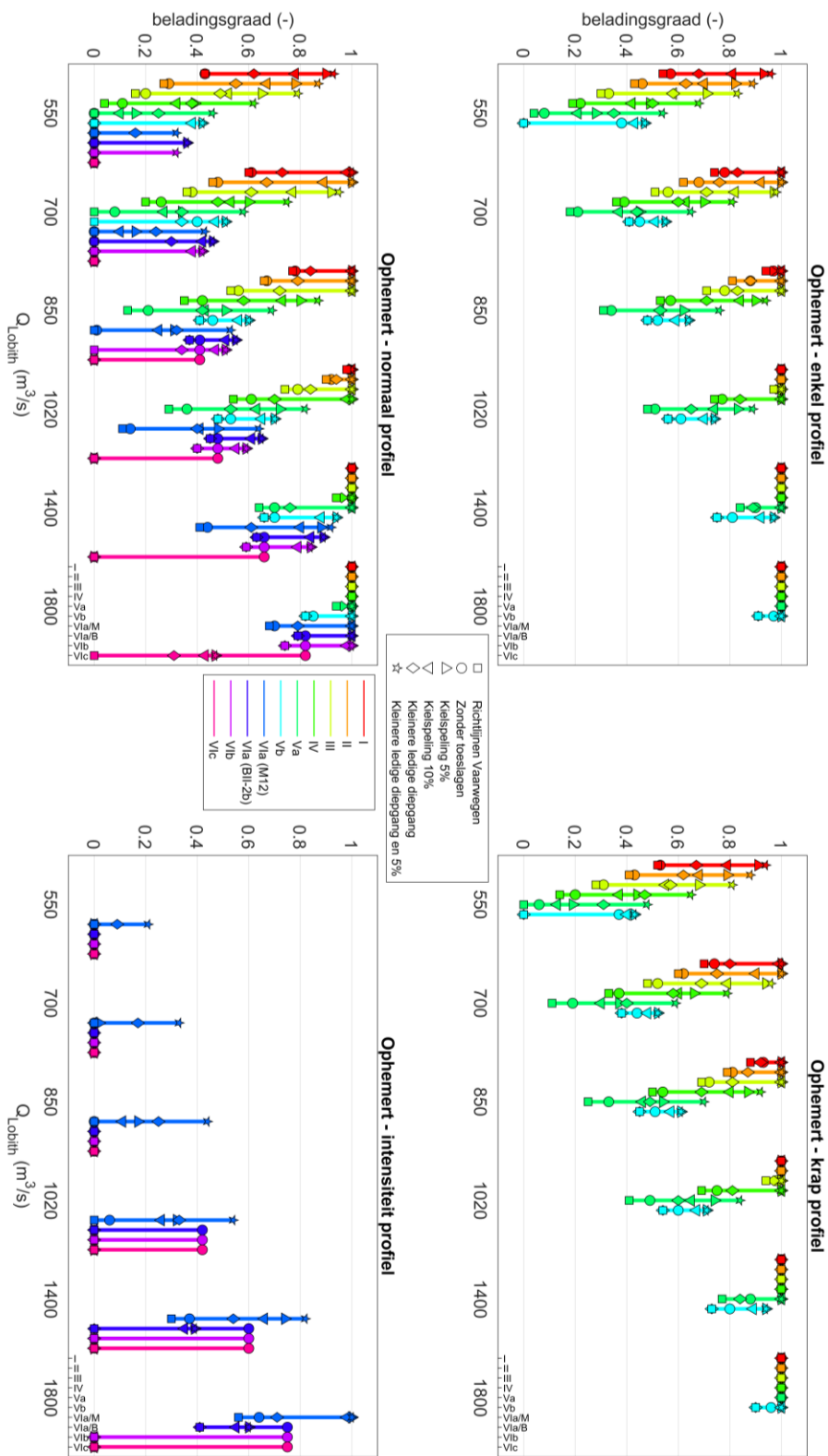
Het bereik in de beladingsgraad is gepresenteerd voor knelpunten Nijmegen en Ophemert in de onderstaande figuren (Figuur 4-5 en Figuur 4-6). De overige knelpunten zijn opgenomen in Bijlage C. In zijn algemeenheid kunnen we vaststellen dat de verschillende parameters een vrij grote invloed hebben op de beladingsgraad. Het niet meenemen van toeslagen heeft vooral een groot effect op de hogere CEMT-klassen in het intensiteitsprofiel.

Vanzelfsprekend neemt bij een kleinere kielspeling van 5% in vergelijking met 10% de beladingsgraad toe. In vrijwel alle gevallen is in het laatste scenario (F. de combinatie kleinere ledige diepgang en kielspeling) de theoretische beladingsgraad het grootst.

Figuur 4-7 en Figuur 4-8 tonen nogmaals voor het normaal profiel de range in beladingsgraad per CEMT-klasse net als in respectievelijk Figuur 4-5 en Figuur 4-6, met daaraan toegevoegd de van IVS-data afgeleide beladingsgraad (de data uit Figuur 3-7). Het is lastig om een algemene conclusie te trekken uit deze vergelijking tussen theorie en praktijk. Het scenario F ligt het dichtst bij de praktijksituatie (behalve dat normaal profiel en geen intensiteitsprofiel wordt beschouwd), en de theoretische beladingsgraad bij dit scenario (label ster) ligt voor de klassen tot Vla (M12) voor alle beschouwde afvoeren (tot 1800 m<sup>3</sup>/s) hoger dan de beladingsgraad (mediaan), afgeleid van metingen. Voor klasse Vlb is het verloop bij Nijmegen redelijk aan elkaar gelijk (theorie scenario F en praktijk) en voor klasse Vlc ligt de praktijk hoger dan de theorie.

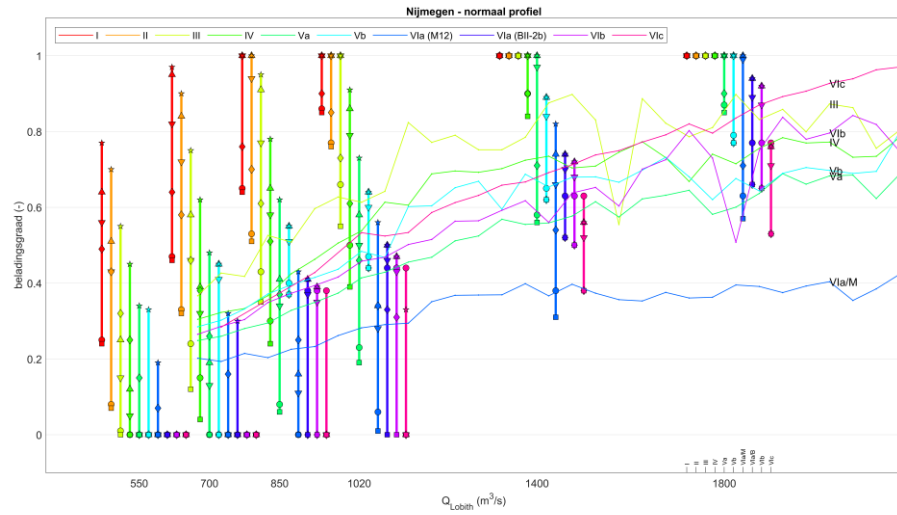


Figuur 4-5 Beladingsgraad knelpunt “Nijmegen” voor verschillende scenario’s voor de verschillende vaarwegprofielen en CEMT-klassen. De vier grafieken behoren bij de vier profielen (enkelstrooks, krap, normaal, intensiteitsprofiel). De symbolen refereren naar de 6 verschillende scenario’s. De kleuren hebben betrekking op de CEMT-klassen. Zoals ook vermeld bij de resultaten in Hoofdstuk 2, kan klasse VI niet voorkomen in een enkelstrooks en krap profiel, en presenteren de Richtlijnen geen intensiteitsprofielgegevens voor CEMT-klassen lager dan VI. De legenda’s (lijnen en symbolen) zijn van toepassing op alle vier de grafieken.

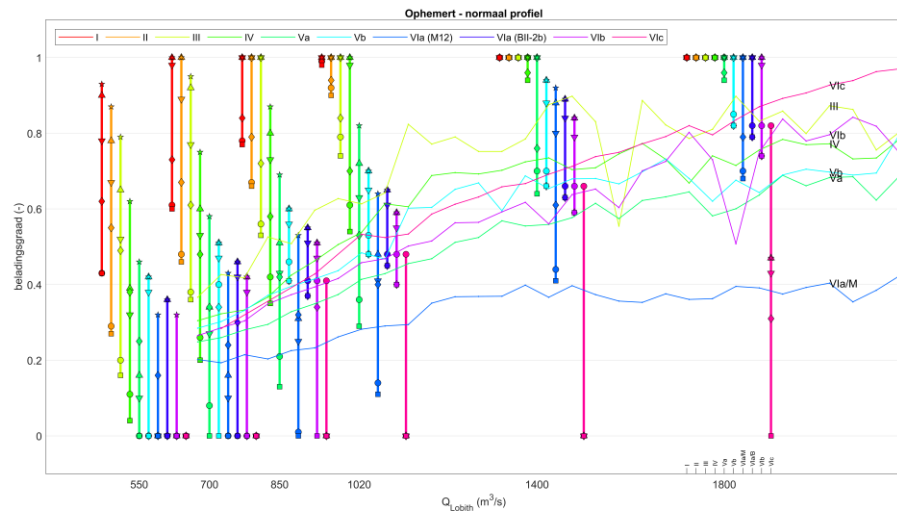


Figuur 4-6 Beladingsgraad knelpunt “Opnemert” voor verschillende scenario’s voor de verschillende vaarwegprofielen en CEMT-classes. De vier grafieken behoren bij de vier profielen (enkelstrooks, krap, normaal, intensiteitsprofiel). De symbolen refereren naar de 6 verschillende scenario’s. De kleuren hebben betrekking op de CEMT-classes. Zoals ook vermeld bij de resultaten in Hoofdstuk 2, kan klasse VI niet voorkomen in een enkelstrooks en krap profiel, en presenteren de Richtlijnen geen intensiteitsprofielgegevens voor CEMT-classes lager dan VI. De legenda’s (lijnen en symbolen) zijn van toepassing op alle vier de grafieken.





Figuur 4-7 Beladingsgraad knelpunt "Nijmegen"; theoretische beladingsgraad gecombineerd met de beladingsgraad, afgeleid uit IVS-data. Figuur is gelijk aan de subplot "normaal profiel" in Figuur 4-5, waaraan is toegevoegd de mediane beladingsgraad uit IVS-data van Figuur 3-7.



Figuur 4-8 Beladingsgraad knelpunt "Ophemert"; theoretische beladingsgraad gecombineerd met de beladingsgraad, afgeleid uit IVS-data. Figuur is gelijk aan de subplot "normaal profiel" in Figuur 4-6, waaraan is toegevoegd de mediane beladingsgraad uit IVS-data van Figuur 3-7.

## 5 Conclusies en Aanbevelingen

In de voorgaande hoofdstukken is vanuit enerzijds de theorie en anderzijds de praktijk beschouwd welke scheepsklassen nog knelpunten kunnen passeren bij verschillende lage afvoeren, en dus bij verminderde vaardiepte en breedte, en wat dit betekent bij een toekomstig klimaat. De conclusies richten zich vooral op de vergelijking tussen de theorie en praktijk.

Al bij een afvoer van 1800 m<sup>3</sup>/s moeten de grootste schepen met verminderde beladingsgraad varen volgens de theorie. Dit stemt overeen met wat we zien in de praktijk. Er is in dat geval nog wel voldoende breedte voor een vaarwegprofiel van de hoogste klassen.

Bij een afvoer van 1020 m<sup>3</sup>/s bij Lobith is een klasse VI vaarwegprofiel (normaal en 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 700 m<sup>3</sup>/s bij Lobith, zijn ook de klassen Va en Vb formeel niet meer in te passen. Voor de 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 700 m<sup>3</sup>/s bij Lobith een normaal profiel voor Va en Vb (en hoger) niet meer inpasbaar is. Met andere woorden, bij een afvoer van 700 m<sup>3</sup>/s bij Lobith is met betrekking tot het normaal profiel alleen een klasse IV vaarweg (of lager) bij de grootste knelpunten (Nijmegen, Ophemert) inpasbaar. Tussen de knelpunten en bij de minder grote knelpunten is een hogere klasse inpasbaar.

In werkelijkheid varen dergelijke grote schepen (CEMT klassen V en VI) nog veelvuldig bij lage afvoeren (data tot ~750 m<sup>3</sup>/s), wel dan met sterk gereduceerde beladingsgraden (niet lager dan 20%). Dat in de praktijk nog grote schepen varen, terwijl de bijbehorende vaarwegprofielen volgens de Richtlijnen Vaarwegen niet meer inpasbaar zijn, komt doordat de Richtlijnen bedoeld zijn voor de beheerder om zekerheid en veiligheid te bieden onder alle omstandigheden. Er wordt daarom uitgegaan van een veilige minimale benodigde breedte en diepte; de minimaal benodigde waterdiepte is gelijk aan 1,3 of 1,4 keer de diepgang van het maatgevende geladen schip. Dit komt bij een diepgang van 3,0 m neer op een kielspeling van 0,9 tot 1,2 m. Dit uitgangspunt van 1,3 of 1,4 keer de diepgang komt voort uit het feit dat de bodem over langere trajecten ongelijkmatig kan zijn, en dat passages (met bijbehorende waterspiegeldaling) vlot en veilig moeten kunnen plaatsvinden. Als we de richtlijnen vergelijken met de IVS- en track-data, zien we dat in de praktijk een kleinere kielspeling aangehouden wordt (om winst te maximaliseren) en minder breedte nodig is dan de richtlijnen voorschrijven. Dit kán ook, omdat de schippers weten waar de knelpunten en ondieptes (MGD's) zich bevinden, hoe ze er langs kunnen varen, en hoe veilig kan worden genavigeerd in het diepste deel van de rivier.

Omdat in de Richtlijnen Vaarwegen 2020 de kielspeling afwijkt van de praktijk en de ledige diepgang overschat lijkt te worden, is de invloed ervan op de theoretische beladingsgraad onderzocht door een bandbreedte te kiezen. De invloed van de kielspeling op de beladingsgraad die in theorie nog gehaald kan worden is significant. Hetzelfde geldt voor de ledige diepgang: ook die invloed is significant.

In de praktijk zien we dat alleen de CEMT-klasse VIc (duwstellen) nagenoeg uit de vaart gaan bij afvoeren onder de 1150 m<sup>3</sup>/s. Voor een nautisch vlotte en veilige vaarweg zou volgens de theorie/richtlijnen ook voor Vb, VIa en VIb te weinig ruimte zijn (normaal profiel Nijmegen, Q850). Duwstellen kunnen bij lage afvoer met een grotere beladingsgraad varen dan motorschepen door de kleinere ledige diepgang van de duwbakken, vergelijk bijvoorbeeld klassen Va (0,9 m ledige diepgang volgens ILT meetbrieven) en Vb (0,6 m ledige diepgang). Bij nog lagere afvoeren wordt de diepgang van de duwboot maatgevend (1,6 m ledige diepgang); als de duwboot niet meer kan varen verandert de beladingsgraad naar 0.

Een vergelijking tussen theorie en praktijk ten aanzien van de benodigde en gebruikte vaarwegbreedte is met de verzamelde informatie lastig. Volgens de theorie is een breedte nodig van circa 260 m voor de grootste scheepsklasse in het intensiteitsprofiel. Bij lage afvoeren is minder breedte beschikbaar dan de theorie voorschrijft. Desondanks zien we dat de schepen toch uit de voeten kunnen met de wél beschikbare breedte (orde 130 m wordt benut). Er kan worden vastgesteld dat men vaart waar het praktisch nog past.

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 m<sup>3</sup>/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 II normaal profiel bijvoorbeeld nog het hele jaar, bij snelle klimaatverandering reduceert dit tot circa 330 (in 2050) en 300 (in 2085) dagen per jaar.

De analyse laat zien dat bij afvoeren van 1020 m<sup>3</sup>/s bij Lobith en lager, intensiteitsprofielen voor klasse VI niet meer inpasbaar zijn, noch bij Nijmegen noch bij Ophemert. De beschikbare afmetingen bij deze afvoeren zijn te klein voor een intensiteitsprofiel voor klasse VI, en bij Nijmegen geldt dat ook voor een normaal profiel. Klasse Va (motorschepen) heeft het grootste aandeel bij telpunt Lobith. Deze klasse kan volgens de theorie niet meer langs Nijmegen varen bij een afvoer van 700 m<sup>3</sup>/s bij Lobith.

Aangezien er verschillen geconstateerd zijn tussen theorie en praktijk (benutte en voorgeschreven breedte, toegepaste en voorgeschreven kielspeling), werpt de vraag zich op of er ook vlot en veilig (incidenteel) gevaren kan worden met afmetingen die minder groot zijn dan de Richtlijnen Vaarwegen voorschrijven. Voor nautische veiligheid kunnen de Richtlijnen Vaarwegen gezien worden als de standaard, en vanuit die optiek staat de bevaarbaarheid bij lage afvoer onder druk. Het is aan te bevelen om te onderzoeken of een 'laagwaterprotocol' met eventuele aanvullende verkeers- en veiligheidsmaatregelen noodzakelijk is, om bij lage afvoeren toch vlot en veilig te kunnen blijven varen.

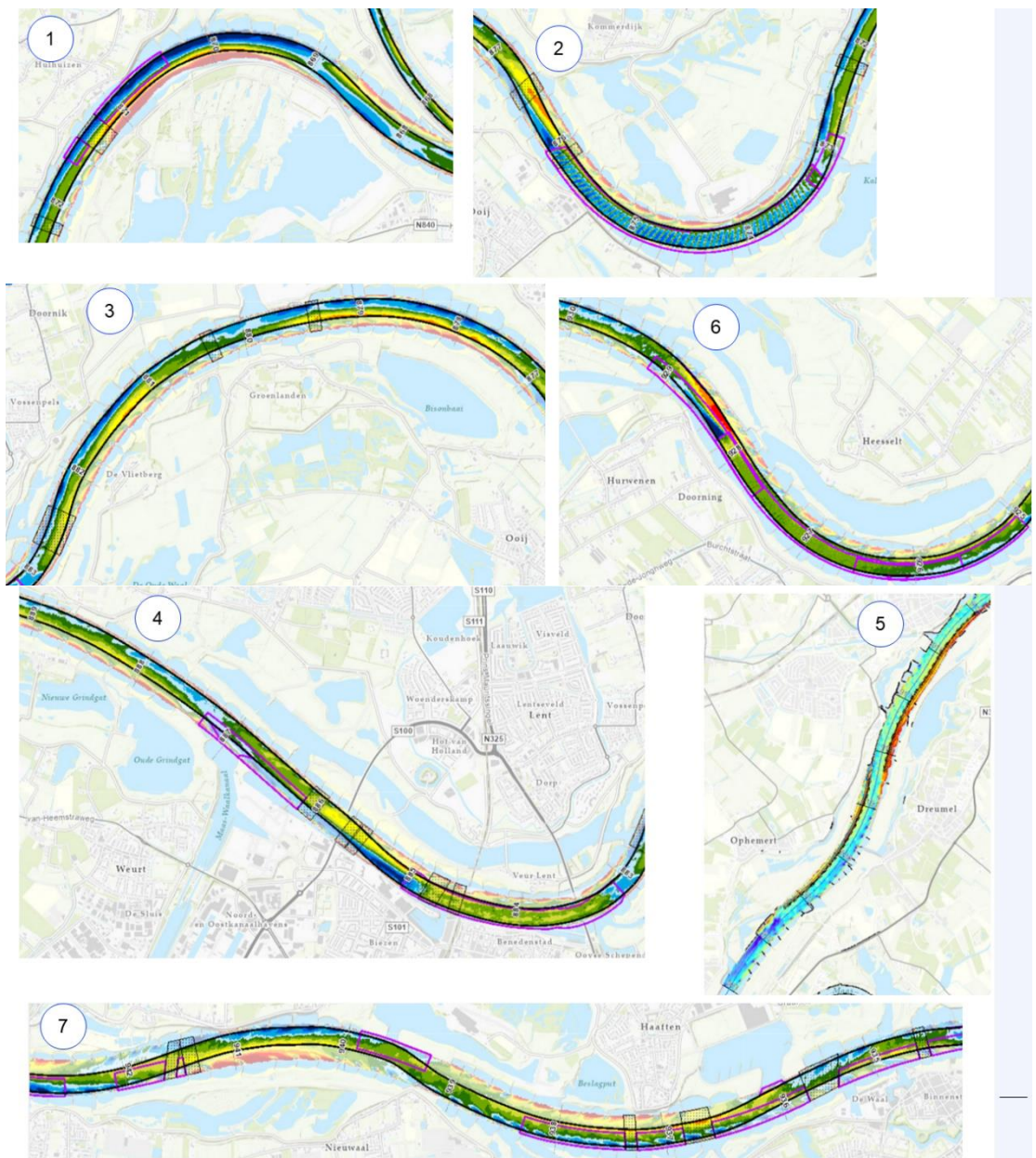
# Referenties

- Baart, F., Turpijn, B., van der Mark, R., & van Hemert, G. (2024). Geocoded variant of United Nations Code for Trade and Transport Locations [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11191511>
- 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.
- Dorsser, C. Van, F. Vinke, R. Hekkenberg, & M. van Koningsveld (2020). The effect of low water on loading capacity of inland ships. *EJTIR* 20(3), 2020, pp.47-70.
- DVS (2009). Rijkswaterstaat, Dienst Verkeer en Scheepvaart. Scheepvaartinformatie Hoofdvaarwegen Editie 2009.
- Hendriks, D. en Mens, M. (eds.) (2024). De droogte van 2022: een brede analyse van de ernst en maatschappelijke gevolgen, Achtergrondrapport. Deltares, KWR, WUR, WER, KnowH2O. Deltares rapport met kenmerk 11210273-001-BGS-0001.
- 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 (2022). Methode, effecten en houdbaarheid van de OLA/OLR; KBN-HVWN Klimaatbestendige Netwerken – Hoofdvaarwegennetwerk. Deltares rapport 11208077-005-GEO-0003, d.d. 21 november 2022.
- 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.

- Mark, R. van der & R. Van den Hoek (2024). Beschikbare vaarwegafmetingen Waal bij lage afvoeren; Klimaatbestendige Netwerken (KBN) - Hoofdvaarwegennet (HVWN). Deltares rapport 11209214-005-ZWS-0002, d.d. 2 januari 2024.
- Rijkswaterstaat (2007). Verruiming toelating zes-baks duwvaart. 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](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.
- Veuger, R. (2023). Onderzoek bevaarbaarheid en toelating Boven-IJssel. Definitieve tussenrapportage Versie 0.2. MARIN rapport nr 34441-1-MO-v0.2, d.d. 15 november 2023. Nog niet gepubliceerd.

# A Bijlagen bij Hoofdstuk 2

## A.1 Beschouwde knelpunten



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

## A.2 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 in 2023.

Jaar	Aantal passages
2005	70999
2006	136405
2007	126741
2008	124081
2018	125121
2019	106597
2020	102088
2021	104823
2022	105606

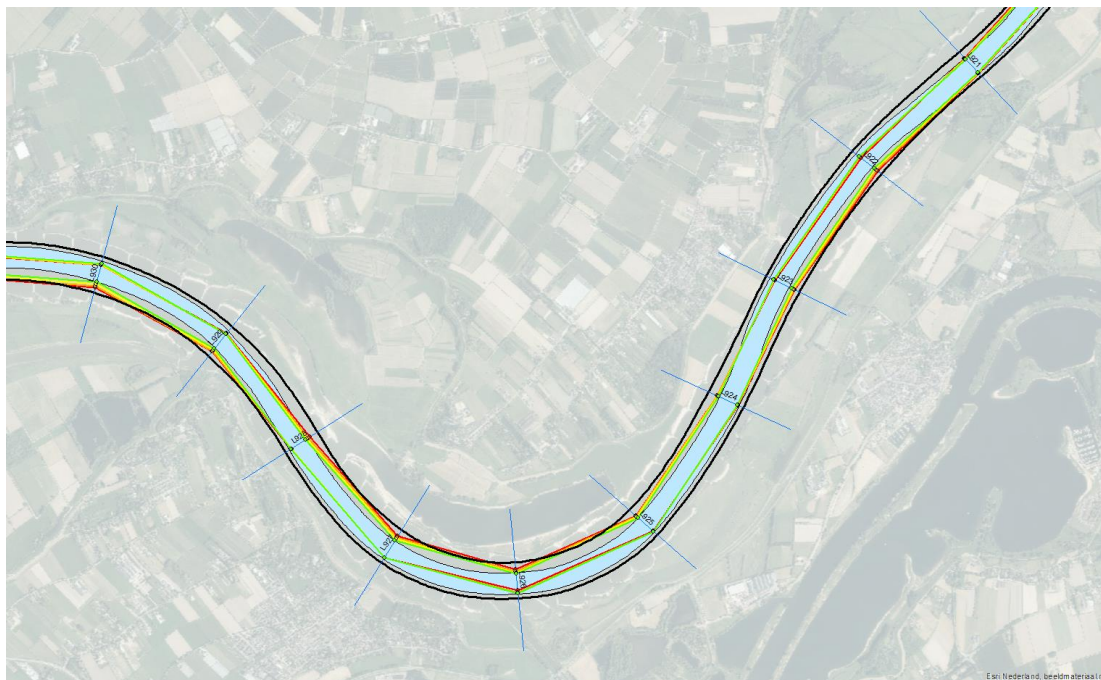
Tabel A-2 Jaargemiddeld laadvermogen bij Lobith. Bron: DVS (2009).

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

## B Bijlagen bij Hoofdstuk 3

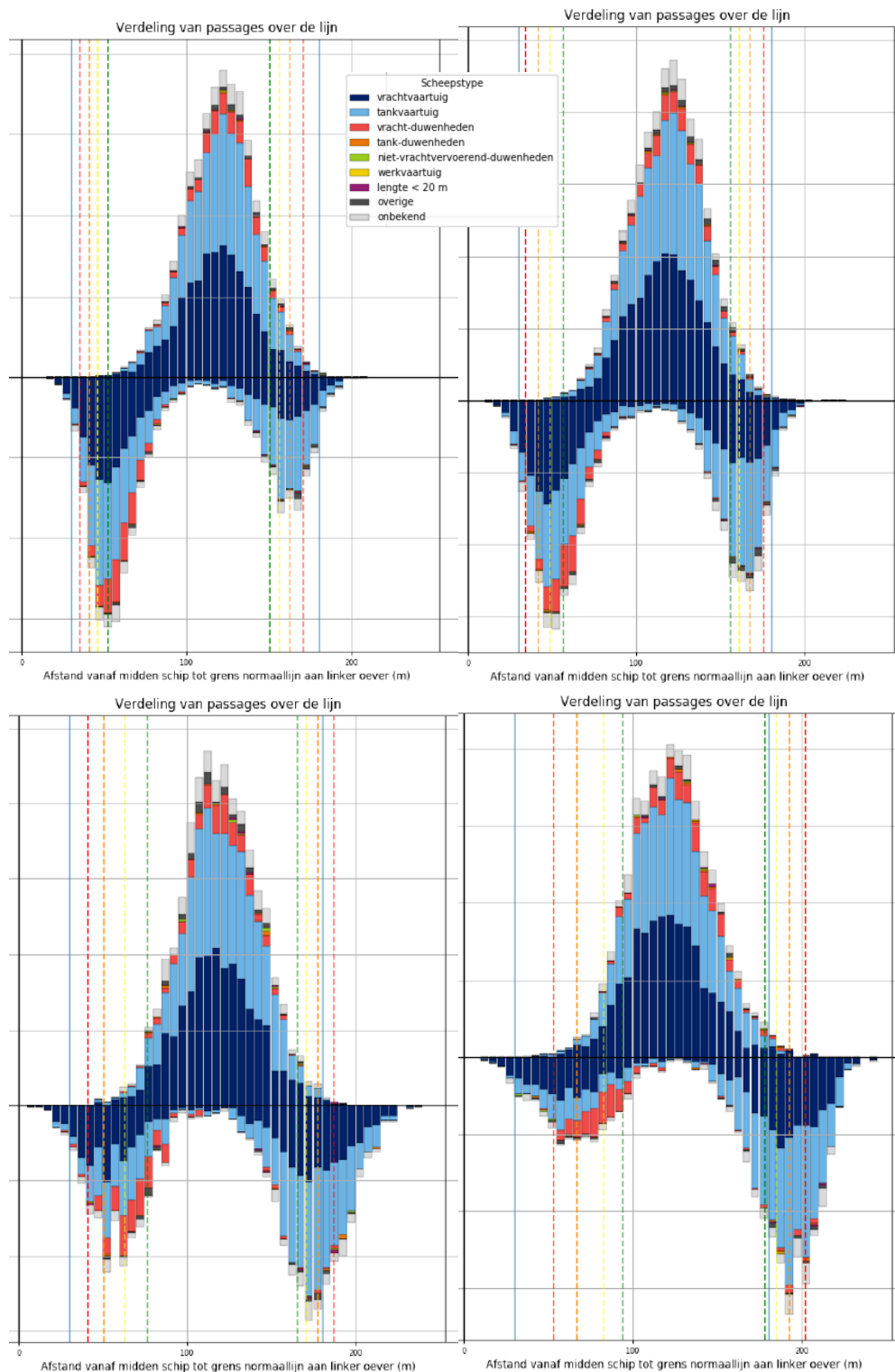
### B.1 Ruimtegebruik bij St. Andries

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).



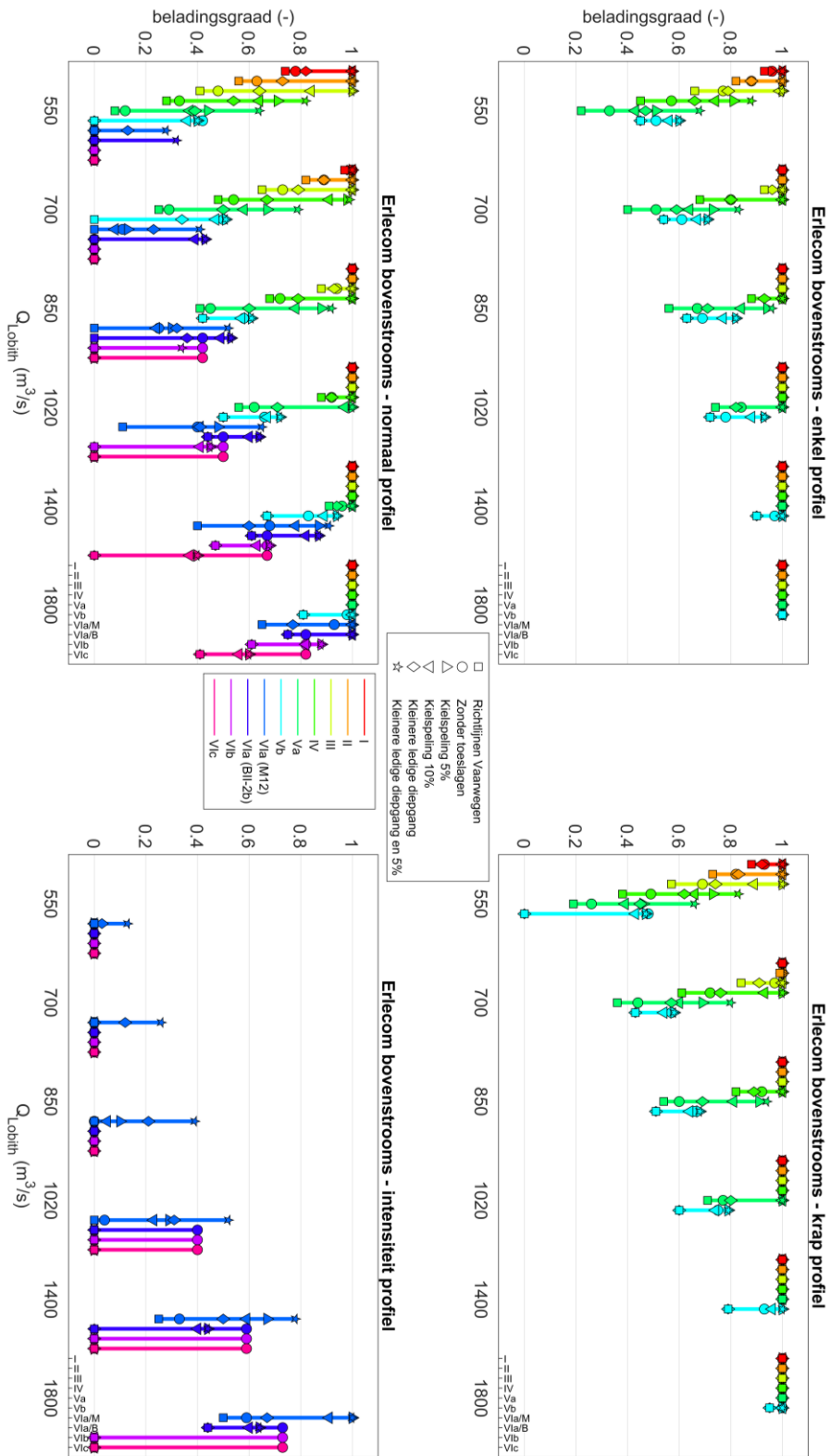
Figuur B-1 Ruimtegebruik bij St. Andries met onderscheid in verschillende afvoerranges. Groen:  $Q_L$  tussen 1020 en 1500  $m^3/s$ , geel:  $Q_L$  tussen 1500 en 2500  $m^3/s$ , oranje:  $Q_L$  tussen 2500 en 4000  $m^3/s$ , rood:  $Q_L$  groter dan 4000  $m^3/s$ . NB: het ruimtegebruik is bepaald per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

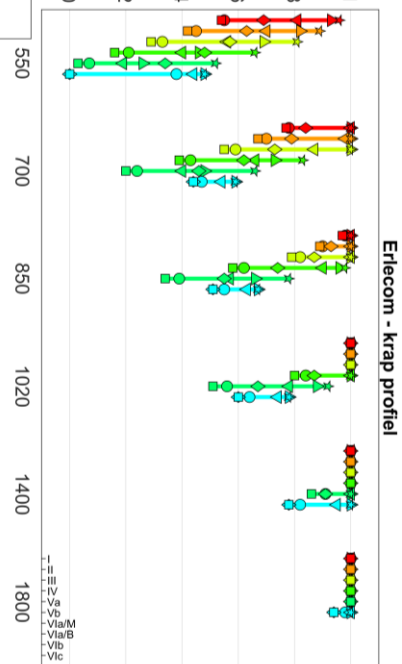
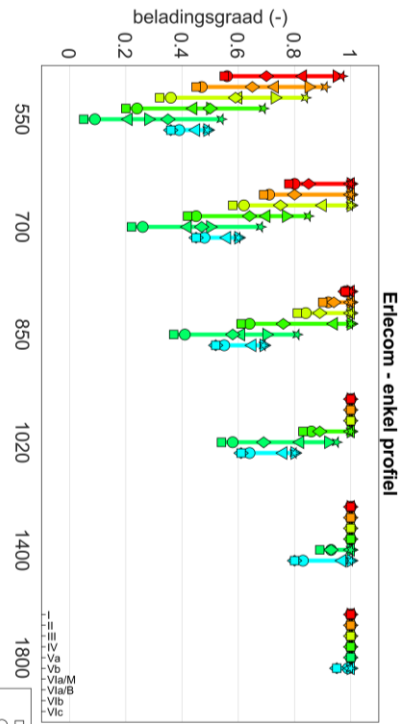




Figuur B-2 Ruimtelijke verdeling van de scheepspassages bij verschillende afvoerranges ter hoogte van rkm 926 (bovenop de vaste laag van St. Andries). Boven-links:  $Q_L$  tussen 1020 en 1500  $m^3/s$ , boven-rechts:  $Q_L$  tussen 1500 en 2500  $m^3/s$ , onder-links:  $Q_L$  tussen 2500 en 4000  $m^3/s$ , 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 percentiellijnen. 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).

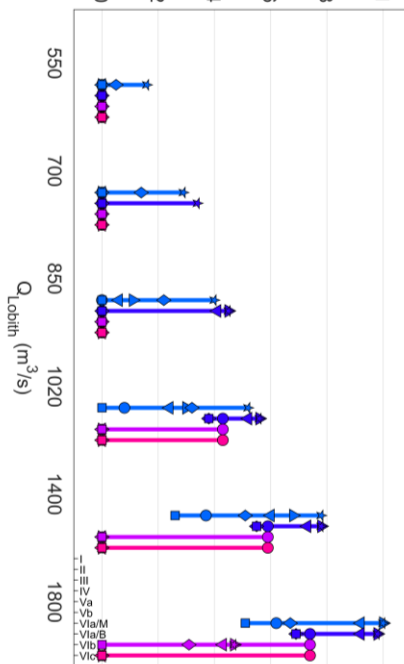
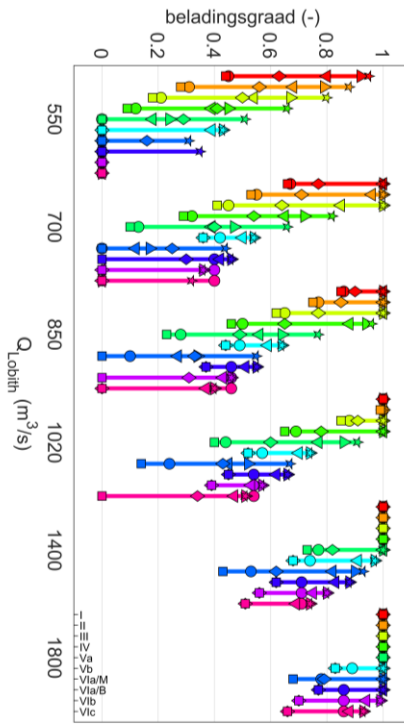
# C Bijlage bij Hoofdstuk 4





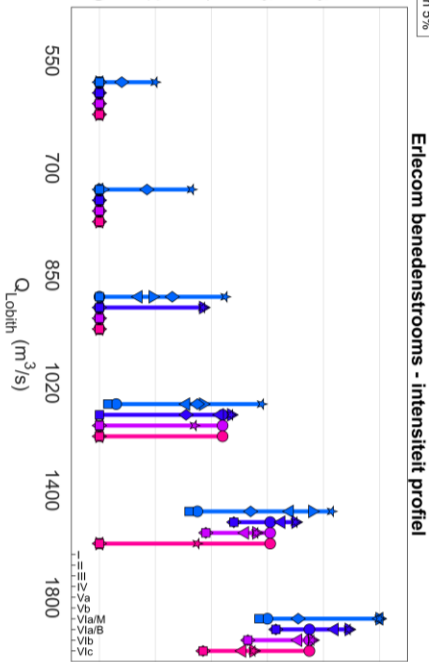
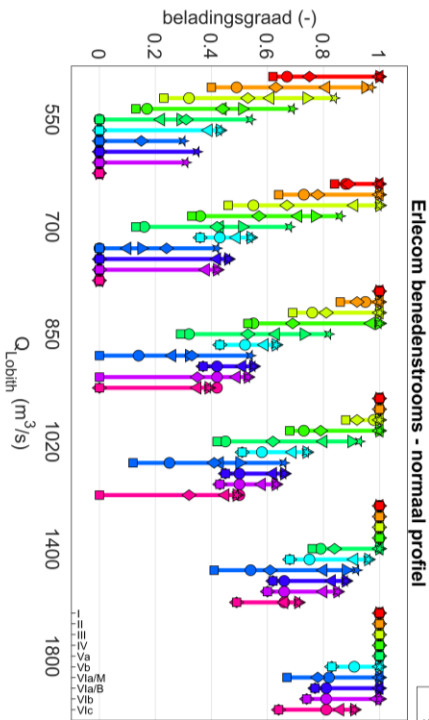
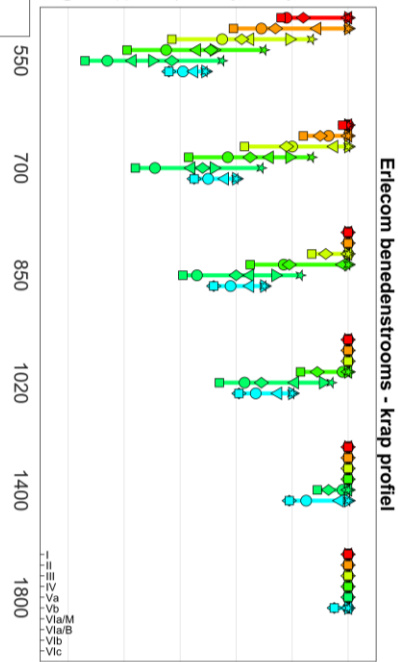
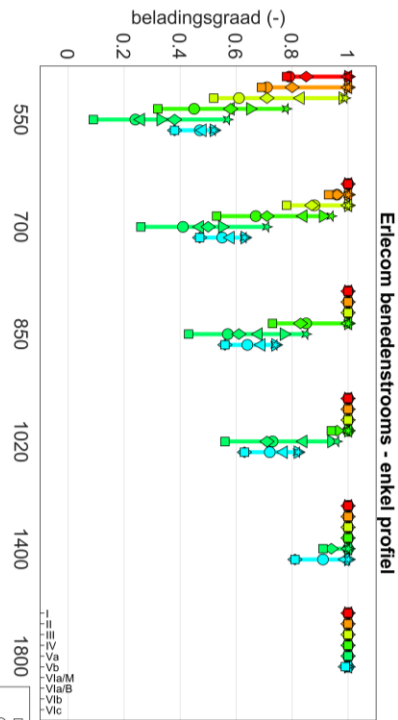
Eriecom - normaal profiel

Eriecom - intensiteit profiel



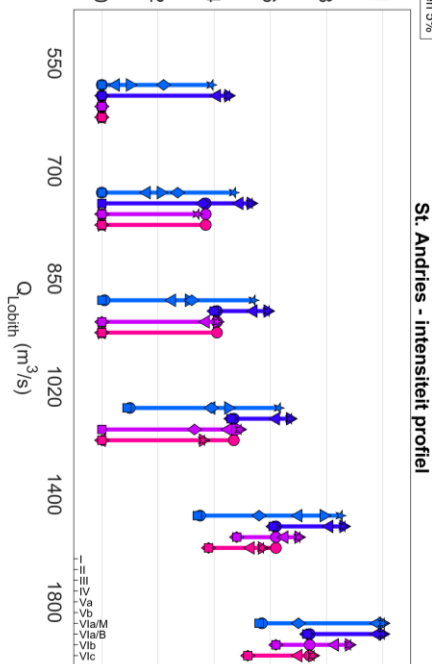
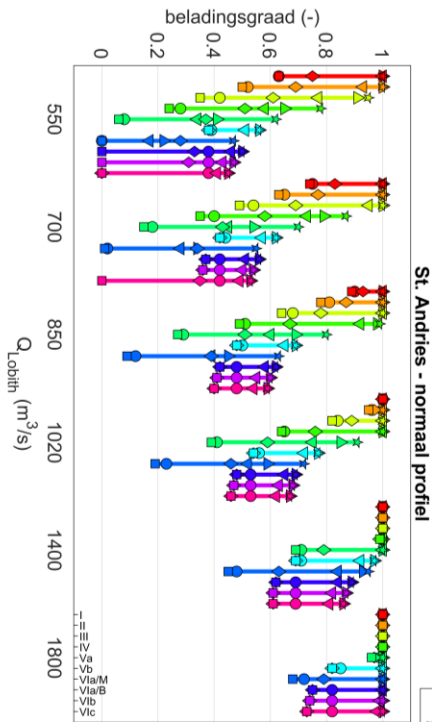
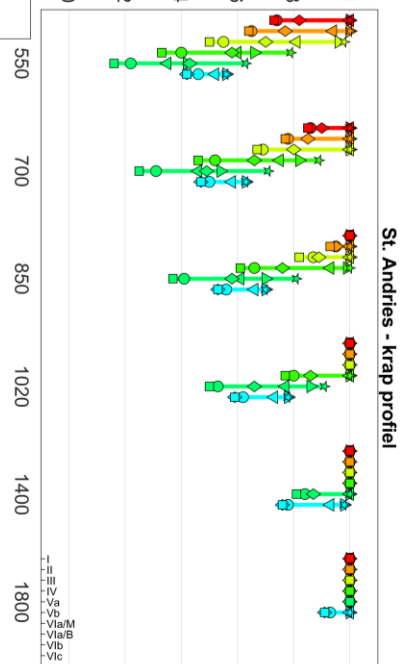
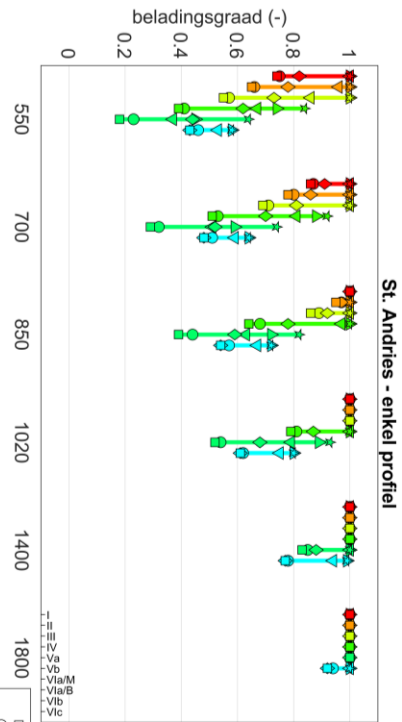
- Zonder toeslagen
- Kiepspelling 5%
- △ Kiepspelling 10%
- ◇ Kleinere ledige diepgang
- \* Kleinere ledige diepgang en 5%

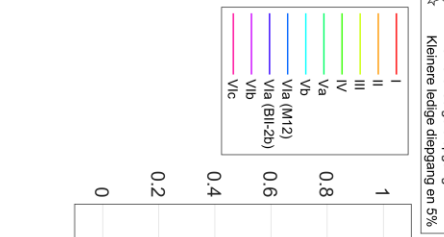
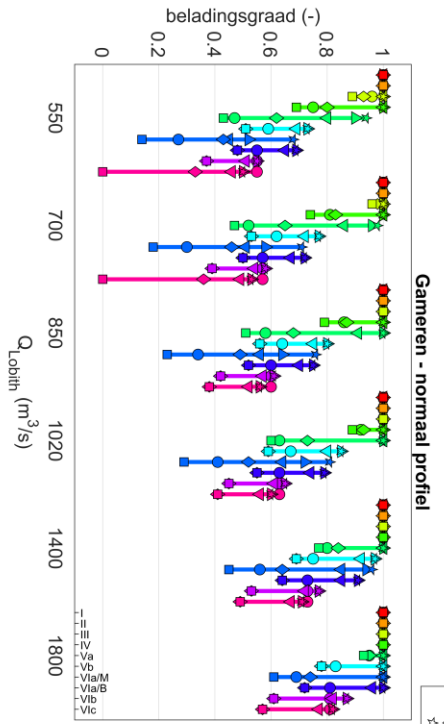
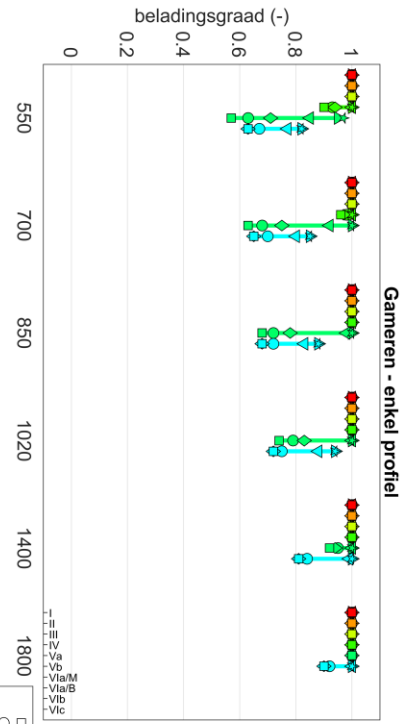
- I - Richtiglijnen Vaanwegen
- II - Kiepspelling 5%
- III - Kiepspelling 10%
- IV - Kleinere ledige diepgang
- Va - Kleinere ledige diepgang en 5%
- Vb -
- Va (M12)
- Va (BII-2b)
- Vib -
- Vic -



- Richtlijnen Vaanwegen
- Zonder foelstagen
- △ Kiepspelling 5%
- ◇ Kiepspelling 10%
- ☆ Kleinere ledige diepgang

- I
- II
- III
- IV
- Va
- Vb
- Va (M12)
- Va (BII-2b)
- Vb
- Vc





- Richtlijnen Vaanwegen
- Zander foelagen
- △ Kiepspeling 5%
- ◇ Kiepspeling 10%
- ☆ Kleinere ledige diepgang
- ☆ Kleinere ledige diepgang en 5%

- I
- II
- III
- IV
- Va
- Vb
- Va (M12)
- Va (B11-2b)
- Vib
- Vic

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](http://www.deltares.nl)