

Reductiepotentieel van de milieu- en
klimaatimpact van binnenvaart

Metten op Schepen

TNO 2023 R12671v2 – 21 december 2023

Meten op Schepen

Reductiepotentieel van de milieu- en klimaatimpact van binnenvaart

Auteurs	Jessica M. de Ruiter, Akshay Bhorkaskar, en Norbert E. Ligterink
Exemplaar nummer	2023-STL-RAP-100351642
Aantal pagina's	84 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	2
Opdrachtgever	Topsector Logistiek Connekt
Programmanaam	Metten op Schepen
Programmanummer	060.56197

Alle rechten voorbehouden

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

© 2023 TNO

Samenvatting

De huidige studie is gebaseerd op ruim een jaar aan monitoringsdata van 19 binnenvaartschepen van verschillende typen (container, bulk, en tanker) en grootte (CEMT klasse IV tot VI), met elke twee seconden gedetailleerde en instantaan informatie over brandstofverbruik, belading, snelheid en andere data over de omstandigheden zoals diepgang en stroming. De schepen worden in dit rapport aangeduid met de combinatie van type en grootteklassen bijvoorbeeld: C-IV-1, is het eerste Containerschip met CEMT klasse IV.

Sommige schepen zijn koppilverbanden, en worden aangeduid met een de letter “K”. Deze data zijn in een opdracht voor Topsector Logistiek verzameld door Covadem en Shipping Technology, en beschikbaar gemaakt aan TNO voor analyses, ook in opdracht van Topsector logistiek. Het doel van de analyses is om een goed kwantitatief beeld te krijgen van de factoren die invloed hebben op het brandstofverbruik, en daarmee CO₂-uitstoot, en inzicht in de mogelijkheden om deze uitstoot daarvan te verminderen. Het was ook de bedoeling om de NO_x-uitstoot te koppelen aan dezelfde operationele factoren, maar dat bleek onvoldoende nauwkeurig te zijn en daarvoor is onvoldoende kwalitatieve data verzameld.

Voor het klimaatprobleem is uiteindelijk het totale fossiele brandstofverbruik, en de CO₂ die daarmee in de atmosfeer wordt uitgestoten, de bepalende factor. Aan de andere kant, voor CO₂-reducerende maatregelen is het belangrijk te weten welke activiteiten bijdragen aan deze uitstoot, en op welke manier. Welke aspecten relevant zijn voor de CO₂-uitstoot van binnenvaart, en hoe die samenhangen met de transportopgave, is de kern van dit onderzoek. Voor deze vragen is het belangrijk om voldoende onderscheid te maken tussen verschillende schepen en activiteiten. Dat levert in sommige gevallen een complex beeld zonder duidelijke conclusies. In deze samenvatting hebben de conclusies de focus. Verder is het belangrijk om te realiseren dat alle partijen een rol hebben in het klimaatprobleem en haar oplossing, en de uitstoot altijd in de context van de activiteit wordt gezien. Voor binnenvaart, en het vervoer van goederen, wordt deze activiteit uitgedrukt in tonnen lading vervoerd over kilometers afstand, ofwel “ton*km”, en het kengetal gram CO₂-uitstoot per ton*km heeft daarmee bijzondere aandacht.

Onderzoekaanpak

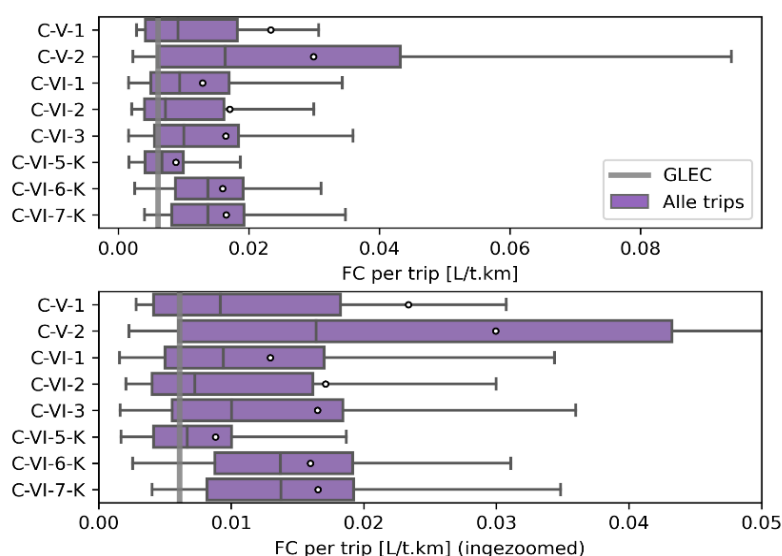
Het is belangrijk om te realiseren dat de data, analyses, en conclusies gebaseerd zijn op de normale inzet van schepen. De geobserveerde verschillen geven een getrouw beeld van de normale praktijk van de binnenvaart. Dit kan afwijken van testresultaten van motoren en schepen in laboratoriumomgevingen, die onder ideale en gecontroleerde omstandigheden plaatsvinden, buiten de normale praktijk met de praktische en economische randvoorwaarden van transport over water. Dit beperkt de mogelijke vergelijkingen tussen de gemeten praktijkdata en data afkomstig uit typegoedkeuringen van motoren en sleeptanktests voor het testen van het ontwerp van schepen, zoals deze voor zeevaart, constant, in rechte lijn, over diep water en vol beladen, beter toepasbaar lijken.

Normale praktijkdata beperkt sommige vergelijkingen

Deze samenvatting focust verder uitsluitend op de conclusies die betrouwbaar getrokken kunnen worden op basis van de data. Een deel van de analyses heeft geen resultaten opgeleverd. Daarvoor zijn meerdere redenen. In sommige gevallen was de beschikbaarheid en kwaliteit van de data ontoereikend, zoals voor NO_x-emissies en lokale stromingseffecten. In andere gevallen was de inzet van binnenvaartschepen te divers en complexer dan voorzien en konden geen eenduidige conclusies getrokken worden binnen deze tijdsperiode. Verder bleek een aantal gebruikelijke veronderstellingen niet te kloppen, zoals deze onder andere voor de nationale totalen worden gebruikt. Bijvoorbeeld, vaarweerstand is niet volledig proportioneel aan het totaalgewicht, en lage belading heeft een groter effect op brandstofverbruik per ladingsgewicht dan op basis van deze proportionaliteit wordt aangenomen. Deze analyses zijn terug te vinden in de hoofdtekst van het rapport, en mogelijk nuttige informatie voor andere onderzoekers.

Grote variatie in resultaten niet gedekt door kentallen

In de binnenvaartsector gangbare kengetallen ("*emission intensity factors*", gram per ton*km) kunnen vergeleken worden met de metingen. Er is vanuit gegaan dat deze factoren het gemiddelde beeld geven van verschillende schepen, en daarom is alle gemonitorde data meegenomen in deze vergelijking, ook bij lage belading waarbij de efficiëntie van het vervoer ook laag is. De metingen leveren waarden die zijn vaak een factor twee tot drie hoger dan de gangbare kentallen voor brandstofverbruik en CO₂ die nu door, o.a., GLEC opgegeven worden. Het gevolg is dat koplopers in de sector die met primaire, gemeten data gaan rapporteren volgens het "*CountEmissions*" protocol veel slechter uitkomen dan bedrijven die terugvallen op generieke, secundaire data, ofwel de gemiddelde kentallen zoals bij GLEC gebruikt werd. Het is belangrijk dat betere data niet tot negatievere rapportages leiden. Kentallen zouden een worst case inschatting moeten zijn om de juiste incentive te geven om beter te rapporteren en daarop te sturen. De grote variatie in de data wordt gevangen in het overzicht, en veelal is een tweede figuur nodig om de details rond het gemiddelde en de laagste waarden beter te visualiseren.

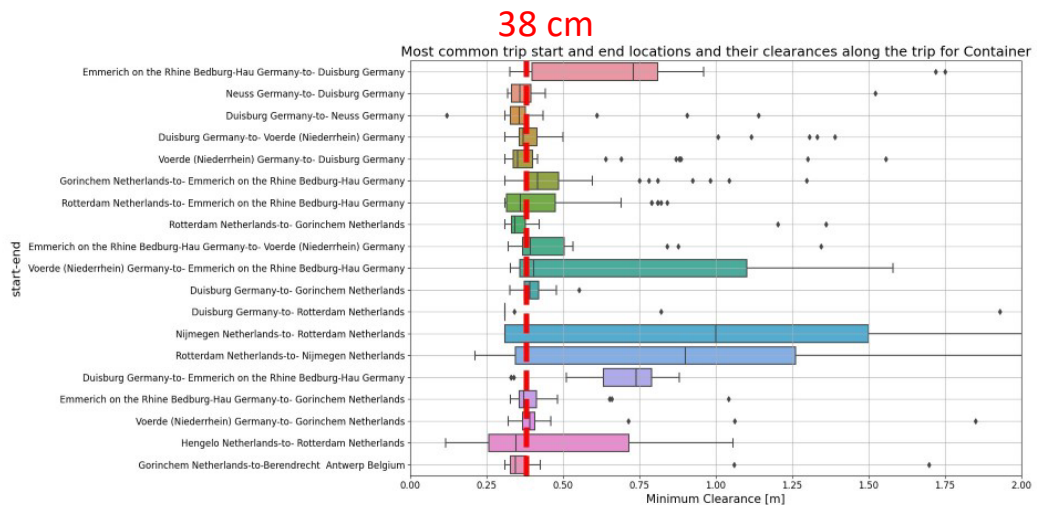


Figuur 1.1: Gemiddeld brandstofverbruik per trip in L/t.km berekend volgens de GLEC framework. Het GLEC kengetal wordt weergegeven door de verticale grijze lijn.

In principe kan het rapporteren van de vervoersprestaties van schepen op basis van primaire data op basis van brandstofverbruiksmeters de koplopers een concurrentievoordeel geven, omdat deze koplopers betrouwbaar kunnen rapporteren, en verschillen door inzet zichtbaar maken en adresseren. Echter, moeten de default secundaire waarden een reëlere en daarmee duidelijk hogere uitstoot waarden geven dan best-of-class schippers. De default waarden moeten bijgesteld worden tot een niveau waarbij het over het algemeen voordeel heeft om primaire data te verzamelen. Een mogelijke keuze is het niveau van 60%-70% van alle gemeten waarden in dit project. In dat geval zal 2 op de 3 schepen een voordeel hebben om primaire data te verzamelen, als basis om daarna verder te reduceren. Deze verschillen in prestatieresultaten op basis van de primaire data ten opzichte van secundaire data moet ook bij verladers bekend zijn, zodat verladers weloverwogen keuzes te kunnen maken en rekening houden met de bestaande onzekerheden in secundaire data. De eisen aan, en betrouwbaarheid van, secundaire data zouden kunnen worden afgeleid op basis van de resultaten van deze studie.

Lage kielspeling beïnvloedt vooral de belading

Stroomopwaarts routes zijn sterk bepalend voor de uitstoot per ton*km. Als de route een ondiepe locatie bevat, beperkt dat de maximale aflaaddiepte in de betreffende vaarweg. Schepen op de meeste routes hebben een minimale kielspeling op een beperkt deel van de route rond de 38 centimeter, op basis van de meetdata. De afstand tussen de bodem van de vaarweg en de kiel is daarmee bepalend voor de belading, die afgestemd wordt op deze minimale kielspeling. Het gevolg is dat het brandstofverbruik per vervoerde ton goederen vooral het gevolg is van de karakteristieken van de vaarroute en de actuele waterstanden op rivieren. Op sommige routes is het brandstofverbruik in g/ton*km daarom twee keer zo groot dan op andere routes. Schepen die in staat zijn om een deel van de lading te lossen voor het ondiepe stuk, wat voor containervervoer gemakkelijker is dan voor bulkvervoer, komen daarom gunstiger uit qua brandstofverbruik. De scheepsdata is verzameld in de periode september 2022 tot oktober 2023. In deze periode zijn er geen extreem lage waterstanden geweest, zoals in 2018, en hadden de ondiepe locaties in deze data een grotere invloed dan de seizoenen met hogere en lagere waterstanden. Ontegenzeggelijk blijft staan dat de ondiepe punten op specifieke routes belangrijk zijn voor de CO₂-kentallen, en dat kentallen niet alleen aan schepen, maar ook aan routes gekoppeld moeten worden. Het grootste effect van kielspeling is belading, en niet de vaak aangehaalde vaarweerstand. Het effect op vaarweerstand is beperkt. Deels komt dat omdat het korte stukken van de route betreft en een beperkt deel van de tijd. Het is in de data nauwelijks tot niet apart zichtbaar, zelfs niet met het extra effect bij ondiepe punten van lokaal hoge stroomsnelheden.



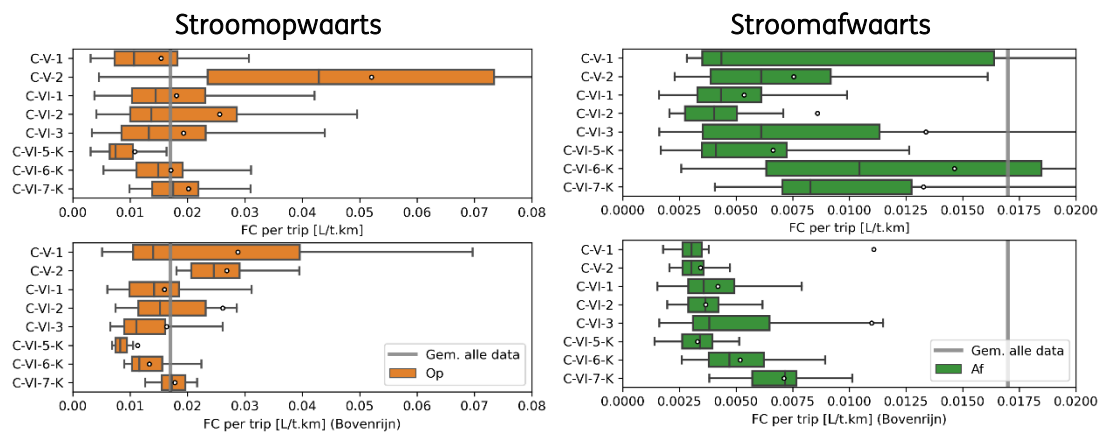
Figuur 1.2: Minimum kielspeling op de door containerschepen meest gevaren routes.
De rode lijn geeft de mediaan van 38 cm aan.

Voor bulkvervoer en tankers zijn de verschillende routes, waaronder ook meer binnen Nederland, en het aandeel leeg varen, bepalend voor het beeld. Dat beeld is daarmee complexer, maar ook hier worden de meeste schepen afgeladen tot een minimale kielspeling van minder dan een meter op het ondiepste punt dat slechts een beperkt deel van de route is en niet bepalend voor de gemiddelde vaarweerstand.

Snelheidsverschillen vooral stroomafwaarts zichtbaar

Stromingsdata is beperkt beschikbaar geweest in dit onderzoek, als constante waarde over langere afstanden en tijden, die geen recht lijkt te doen aan lokale verschillen. Daarom was de correlatie met motorbelasting en vaarsnelheid beperkt. In het rapport wordt verder ingegaan op alternatieve aanpakken om de verschillen duidelijk te maken. Er is hier alleen onderscheid gemaakt tussen vaarwegen met en zonder stroming, en de stroomrichting.

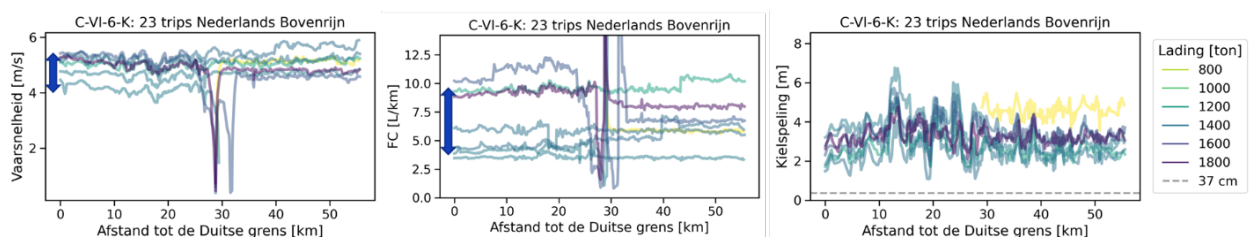
In de data zijn er duidelijke verschillen in snelheden stroomafwaarts, voor dezelfde schepen en tussen schepen. Deze verschillen geven grote verschillen in het brandstofverbruik, maar minder in de reistijden, omdat de schepen met de stroming meegaan. Bewust sturen op lager verbruik (actief aanpassen van het vaargedrag door schipper) kan grote verschillen in uitstoot per ton*km geven. Vooral stroomafwaarts is brandstofverbruik tot 50% of bij een lagere vaarsnelheid, zoals geobserveerd in de praktijk. De mogelijkheid bestaat om brandstof te besparen door middel van het verlagen van de vaarsnelheid, maar dat zal afhankelijk zijn van de specifieke contracten, deadlines, of instructies aan de schipper.



Figuur 1.3: Brandstofverbruik per trip, uitgesplitst naar stroomaf- en opwaarts voor containerschepen op (boven) alle vaarwegen, en (onder) alleen de Nederlandse Nederrijn en de Waal (tussen de Duitse grens en Tiel). Stroomafwaarts varen heeft structureel een lager brandstofverbruik in L/t*km, en dus een andere schaal. De spreiding op de Nederrijn is een stuk minder wanneer alle data in beschouwing wordt genomen. C-V-1 stroomopwaarts vormt hier een uitzondering. Dit schip laadt en lost in Nijmegen waardoor er een grote variatie in belading is op dit traject die van invloed is op het specifiek brandstofverbruik.

Een brandstofverbruik van 50 tot 100 liter per uur levert een substantiële kostenpost. Het goed instrumenteren van een schip (gebruik van flowmeters, positie- en snelheidssensoren en telematica) is een investering die in dat licht moet worden beschouwd. Een schipper die kwantitatief inzicht heeft in de effecten kan zo bewust optimaliseren en brandstofkosten besparen. Afhankelijk van de ervaring van de schipper kan dat forse besparingen geven in uitstoot en brandstofverbruik. Zonder instrumentatie moet de schipper terugvallen op vuistregels en zijn gevoel bij effecten stroming, trim, in combinatie met belading. Een aantal koplopers gebruiken al de harde cijfers om te sturen op lagere CO₂-emissies.

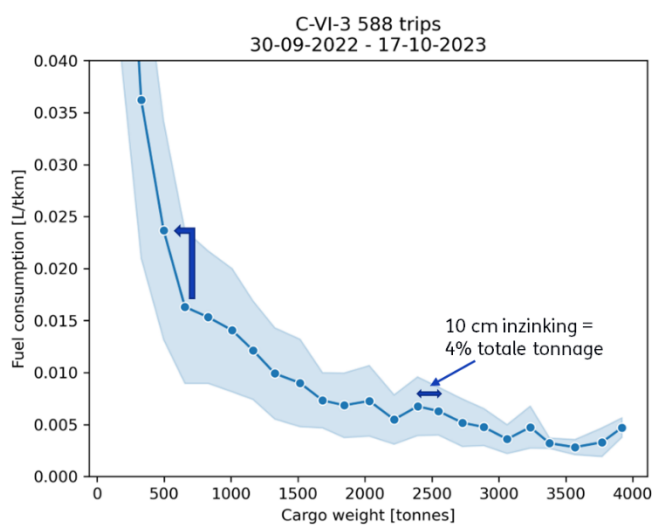
Het vergelijken van verschillende schepen, zeker bij stroming in de rivier, kan alleen goed op hetzelfde stuk route. Een drukke route is de Nederrijn en Waal tussen Tiel en de Duitse grens, wat in dit rapport is aangeduid met de “Nederlandse Bovenrijn”. Daar zijn de verschillen tussen schepen duidelijk en valt tegelijkertijd op dat bochten in de rivier, bij de Waalbrug en verder stroomopwaarts, duidelijke effecten hebben op het brandstofverbruik. Dit is waarschijnlijk een complexe interactie tussen de roerstand, ofwel trim, en het stromingsprofiel over de breedte van de rivier, omdat de “buitenbocht” het grootste effect geeft op het brandstofverbruik. Dit staat los van de gemiddelde stroming op de Nederlandse Bovenrijn de gemiddelde snelheid op dat deel van de route.



Figuur 1.4: Vaarsnelheid, brandstofverbruik in L/km, en kielspeling *stroomafwaarts* op de Rijn van de Duitse grens naar Tiel (“Nederlandse Bovenrijn”) voor C-VI-6-K.

Effecten van 10cm minder diepgang

Alhoewel er in de monitoringsperiode 2022-2023 geen extreem laag water, zoals dat voor het laatst in juni tot augustus van 2018 werd geobserveerd, is geweest, is het effect van kielspeling, gekoppeld aan diepgang en waterstand, belangrijk. Het effect van laag water, dat hieruit volgt, is dat er een steeds grotere marginale toename van de uitstoot per ton*km is, door de lagere belading, naarmate de diepgang minder is bij laag water. Zoals hierboven geconcludeerd worden schepen vaak op de minimale kielspeling van 38 cm beladen. 10 cm lagere waterstand en een beperkte belading, leiden tot +30% meer uitstoot per ton*km (fig.1.5). Met deze data is het mogelijk om de economische - en uitstooteffecten van laag water in de Rijn te kwantificeren, maar ook de voordelen van scheepsontwerpen die minder diepgang hebben bij dezelfde belading.



Figuur 1.5: Brandstofverbruik in L/t*km als functie van de belading per trip voor alle trips van C-VI-3. Elk puntje is op een interval van 10 cm inzinking, dit verschil is gemiddeld 4% van de totale tonnage, geassocieerd met 2,5 meter inzinking. De gemiddelde belading van C-VI-3 is ca. 1600 ton.

Gecontroleerde vaartesten hebben toegevoegde waarde

De huidige data is verkregen uit de normale praktijk van schippers en schepen en de vaarprofielen. Bepaalde combinaties van belading en snelheden komen daarin voor, en andere mogelijk niet, omdat sommige belading-snelheid combinaties niet de gebruikelijke keuze van de schipper is. In sommige gevallen is het relevant om bewust twee keuzemogelijkheden, meer gecontroleerd, met elkaar te vergelijken. Dat biedt, boven op de bestaande data meer en beter inzicht in effecten van “anders varen”, op basis van kwantitatieve resultaten. Schippers hebben zelf gevoel en ervaring van wat wel en niet werkt: testen in de praktijk hoeveel verschil dat nu uitmaakt kan veel inzicht geven waar andere schippers ook hun voordeel mee kunnen doen. Ook testen van wat negatief uit zou moeten werken (en hoeveel dan) is waardevol.

Uitstoot bij stilliggen

Een deel van het brandstofverbruik van de motor is nodig om de interne verliezen van de motor te overwinnen. Dit heeft twee effecten.

Ten eerste is er een substantieel brandstofverbruik en CO₂-uitstoot bij stationair draaien. Ten tweede, zijn hogere interne verliezen ook de oorzaak van een lagere efficiëntie van de motor, ofwel meer CO₂ per kWh mechanische arbeid. Stationair draaien van de hoofdmotoren geeft soms een verrassend hoge bijdrage aan de totale uitstoot van CO₂. Dit is lang niet altijd te voorkomen met bestaande schepen en de redenen zijn verder niet onderzocht in deze studie, maar aandacht hiervoor is belangrijk. Het brandstofverbruik bij stilliggen, ofwel stationair draaien, ligt tussen de 1% en 19% van het totaal, terwijl de schepen 9% tot 44% van de draaiuren van de motor stilliggen.

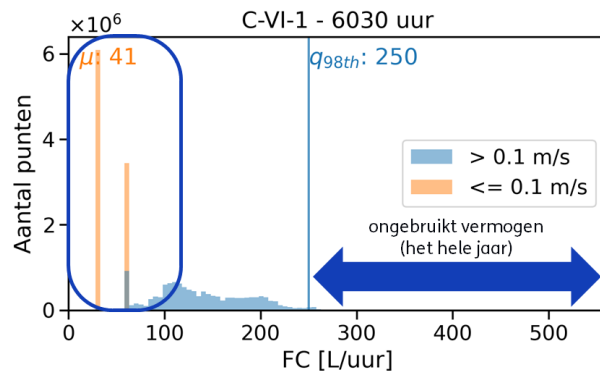
Tabel 1.1: Het brandstofverbruik tijdens stilliggen als percentage van totale brandstofverbruik

Schip	Stillig brandstof van totaal [%]	Stillig tijd van totaal [%]
B-IV-1	1	11
B-IV-2	1	9
B-IV-3	6	11
B-V-4-K	1	13
C-V-1	5	12
C-V-2	1	9
C-VI-1	19	44
C-VI-2	5	19
C-VI-3	4	18
C-VI-5-K	1	12
C-VI-6-K	1	13
C-VI-7-K	2	14
T-IV-1	4	16
T-V-1	8	20
T-V-2	4	29
T-V-3	7	11
T-VI-1	4	24

Grote motorvermogens vragen meer brandstof

De interne verliezen van een motor zijn ongeveer proportioneel met de grootte van de motor. De arbeid en het brandstofverbruik dat nodig is om de motor überhaupt te laten draaien, zijn 3% tot 6% van de waarde bij het maximaal vermogen. Het effect van grote motoren op verbruik is daarom aanzienlijk. Als een motor op 30% motorlast draait, en de interne verliezen zijn 5%, dan is $5\% / (30\% + 5\%) = 15\%$ van het brandstofverbruik gerelateerd aan de interne verliezen. Bij een motor met half dat vermogen is de motorbelasting 60%, en de interne verliezen 8% van het totaal. De kleinste motor voor het noodzakelijke vermogen is het meest efficiënt en geeft het laagste brandstofverbruik. Het toepassen van grote verbrandingsmotoren die geselecteerd zijn voor inbouw op basis van piekvraag aan vermogen dat echter zelden voorkomt, leiden tot een fors extra sluipverbruik door het jaar heen, tot 17% extra.

In andere studies is geconcludeerd dat hybride aandrijvingen met meerdere gen-sets, eventueel met een accu voor het leveren van het gewenste of vereiste piekvermogen, en een kleinere motor direct op de schroefas zijn flexibeler, maar het specifieke ontwerp passend bij het vaarprofiel is belangrijk om, bijvoorbeeld, interne verliezen bij omzetting tussen energievormen, brandstof, mechanisch, elektrisch, te beperken.



Figuur 1.6: Brandstofverbruik distributie tijdens stilliggen (oranje) en varen (blauw). De x-as is geschaald naar het totaal geïnstalleerd vermogen. De blauwe pijl geeft aan hoeveel hiervan niet gebruikt wordt. Het gemiddelde brandstofverbruik tijdens stilliggen kan worden gezien als de interne verliezen (in blauwe cirkel).

De NO_x-uitstoot van dieselmotoren in de praktijk

Alhoewel het in dit project moeilijk is gebleken om NO_x-uitstoot te meten is het een relevant gegeven, vanwege de bijdrage van de binnenvaart aan de nationale NO_x-uitstoot en de stikstofdepositie, zeker omdat binnenvaartschepen ook langs kwetsbare natuurgebieden varen. Moderne motoren, met SCR, gebruiken ook NO_x-sensoren om de SCR regeling voor het omzetten van NO_x naar onschadelijke stoffen, met behulp van AdBlue reagens. Er is dus, in principe, de mogelijkheid om de NO_x-uitstoot van moderne schepen te monitoren met de techniek die al aan boord is. Tot dusverre is er beperkt medewerking geweest van de leveranciers van de systemen om de data te ontsluiten, en dat is de grootste hindernis geweest om NO_x-uitstoot van de gemonitorde schepen beschikbaar te krijgen.



Figuur 1.7: Beschermde natuurgebieden, Natura 2000 gebieden, langs de Waal en Rijn

De laboratoriumtestprocedures (CCRI, CCRII, Stage IIIA, Stage-V (IWP/IWP)) voor motoren in de binnenvaart, en de weegfactoren bestrijken vooral het gebied van belastingspunten in deze testcycli komen veelal niet overeen met de inzet in de praktijk (bijvoorbeeld de E3 cyclus), met 25% tot 100% motorvermogen. We zien dat veel motoren het merendeel van de tijd draait op een vermogen lager dan 25% (incl. stationair). Daarom kunnen er grote afwijkingen zijn tussen de emissies tijdens de test voor de typegoedkeuring, en in de praktijk. In het bijzonder werken SCR systemen slecht bij lage motorbelasting, onder de 20% van het maximaal vermogen, omdat de uitlaatgassen dan niet warm genoeg worden voor de reactie tussen Adblue en NO_x om de NO_x om te zetten. De uitlaatgastemperatuur hangt af van de belasting van de motor en daarmee direct samen met het geïnstalleerd vermogen en de inzet van het schip en de motoren. Het is daarom belangrijk dat er inzicht komt in welke situaties de NO_x emissies hoog zijn, en hoe dit voorkomen kan worden. Op dit moment ontbreekt het aan data uit de praktijk en zal er nog op algemene vuistregels en oudere informatie vertrouwd moeten worden. De data laat in ieder geval zien dat er veel meer aandacht moet zijn voor het belastinggebied <25% vermogen in de regelgeving.

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
Inhoudsopgave	12
1 Inleiding	14
2 Achtergrondkennis	16
2.1 Impact van binnenvaart op milieu en klimaat	17
2.2 Voortstuwing van schepen	18
2.3 Arbeid van de motor	18
2.4 Toerental en schroefkromme	18
2.5 Effect van belading	18
2.6 Configuratie van schepen	19
2.7 Stroming in de rivier als grote onbekende	19
2.8 Kielspeling en belading, waterstand	19
2.9 Breedte van de vaarweg	20
2.10 Bochten, wind en golven	21
2.11 Laden, lossen, en energiegebruikers aan boord	21
2.12 Ontwerpkeuzes	21
2.13 Operationele keuzes	21
3 De scheepseigenschappen en inzet	22
3.1 Technische eigenschappen	22
3.2 Gevaren routes	23
3.3 Draaiuren en vaarkilometers	25
4 Data beschikbaarheid en kwaliteit	26
5 Analyses	30
5.1 Kielspeling	30
5.2 Belading en waterstand	36
5.2.1 Lage kielspeling beïnvloedt vooral lading	38
5.3 Brandstofverbruik	38
5.3.1 Trip analyse	39
5.3.2 Spreiding in brandstofverbruik laat verschillen in inzet zien	44
5.3.3 Kleinere motoren hebben minder interne verliezen	48
5.4 De meest voorkomende routes	49
5.4.1 De Nederrijn/Waal als vergelijkingstraject	50
5.4.2 Variatie per trip op de Nederlandse Bovenrijn en Amsterdam-Rijnkanaal	53
5.5 Mogelijkheden voor verdere analyse	55
5.5.1 Toerentalen voor een inschatting van stroomsnelheid	55
5.5.2 Correlatie tussen snelheid en belading	57
5.5.3 Kwantificering invloed lage kielspeling op brandstofverbruik	58
5.5.4 Generalisatie naar de vloot	58
6 NO _x metingen	59
6.1 NO _x uitstoot van de binnenvaart	60
7 Modellen en formules	61
7.1 Brandstof per trip	61

7.2	Brandstof in liters per uur	61
7.3	Schroefkrommes	64
8	Vergelijkingen met kentallen	68
8.1	Vergelijking met Emissieregistratie	68
8.2	Vergelijking kengetallen GLEC	73
9	Conclusies.....	75
10	Aanbevelingen.....	77
10.1	De binnenvaartmarkt.....	77
10.2	Vervolgstappen	77
	Ondertekening.....	79

Bijlagen

Bijlage A:	Tabellen	80
Bijlage B:	Figuren	84

1 Inleiding

Topsector Logistiek heeft TNO gevraagd om analyses uit te voeren op monitoringsdata van binnenvaartschepen die zij heeft laten verzamelen in aparte opdrachten voor partijen die voor de binnenvaart reeds monitoringsystemen hebben. Het doel van het verzamelen van de data en de analyses is om gericht de operationele verschillen van de inzet van binnenvaartschepen, en hun impact op milieu en klimaat, te onderscheiden. Dit is de basis om op feiten gebaseerd uitstootreductiemaatregelen te nemen en beoordelen.

Veel van de maatregelen om uitstoot te beperken leunen op de ervaring van de schippers zelf, die moeten omgaan met verschillende beladingen, waterstanden, deadlines, stroming op de rivieren, en getijden in de kustregio. De uitstoot van CO₂ is direct gerelateerd aan brandstof en de brandstofkosten. Dit onderzoek waarin veel en harde data verzameld is, is hopelijk een aanvulling op de werkwijzen van schippers, door ook naar verschillen tussen schepen en beladingen te kijken. In deze studie worden de belangrijkste parameters, zoals brandstofverbruik, snelheid, belading, kielspeling meegenomen, en blijkt, zeker op de rivieren de optimalisatie van de inzet complex.

Daarnaast is monitoringsdata ook niet automatisch geschikt om verschillende situaties met elkaar te vergelijken, en effecten te isoleren. Laag water beïnvloedt niet alleen de belading, maar ook de weerstand in het water en de gekozen snelheid van het schip, en de effecten van deze twee aspecten zijn niet gemakkelijk los van elkaar te koppelen. Aan de andere kant gaan schippers ook op verschillende manieren om met stroming, en dan ook apart stroomopwaarts en stroomafwaarts, waarin de belading ook vaak verschillend is. De ene schipper probeert de snelheid meer constant te houden, terwijl de andere schipper de toerentallen en het brandstofverbruik constant probeert te houden. Vooral stroomopwaarts lijkt de snelheid van schepen ten opzichte van vaste grond beperkt gerelateerd te zijn aan schroefsnellheid, maar vooral aan lokale variaties in de stroming.

Het was de intentie om ook de praktijk data over de NO_x uitstoot mee te nemen in deze studie, maar de hoeveelheid data en de kwaliteit van de data is onvoldoende gebleken om een representatief beeld te geven. Er wordt in deze rapportage kort ingegaan op de status en de issues omtrent de NO_x uitstoot van binnenvaartschepen.

In deze context worden oplossingen voor brandstofbesparing al snel afgedaan als niet relevant voor de situatie van een individuele schipper, op een gegeven route en met een deadline. De simpelste oplossing voor brandstofbesparing is langzamer varen, maar in de huidige markt heeft dat zijn beperkingen. In de gevolgde aanpak wordt vooral geprobeerd om een compleet en samenhangend beeld te schetsen van aspecten die het brandstofverbruik beïnvloeden. Dit biedt ook aanknopingspunten om kwantitatief de bepaalde strategieën te beoordelen voor een route en met een tijdschema. Ook stelt het mensen in staat om heersende beelden te ontcrachten, waarvoor bijvoorbeeld in de nationale totalen expliciet rekening mee gehouden wordt, zoals het effect van kielspeling op vaarweerstand. Bijvoorbeeld voor de meeste routes naar Duitsland lijkt op dit moment het Nederlandse deel niet kritisch qua waterdiepte en kielspeling, omdat vaak de ondiepe punten waarvoor de lading verminderd moet worden over de grens in Duitsland liggen.

Om specifiek in te gaan op besparingsopties en kritische factoren in brandstofverbruik is er per schip een model gemaakt van het brandstofverbruik voor de snelheid ten opzichte van het water. Dit is gekoppeld aan schroefsnellheid en voortstuwingskracht. Daaruit blijkt, naar de geëigende curve, die het verband tussen snelheid en brandstofverbruik aangeeft, twee belangrijke aspecten van brandstofverbruik. Ten eerste, het hoge brandstofverbruik bij stilstand (het stationair draaien van hoofdmotoren), dat verschilt van schip tot schip, en dit kan een substantieel aandeel in het totale brandstofverbruik zijn. Ten tweede het extra brandstofverbruik van een leeg schip dat afwijkt van de standaard proportionaliteitsrelatie tussen gewicht (schip en lading) en brandstofverbruik, bij een vaste snelheid. Dus: lagere belading geeft een extra hoge g per ton*km voor het schip.

Het ontwerp van het schip is ook een grote, maar vaste factor in het brandstofverbruik. Ten eerste is de grootte van de motor is een grote factor. Een te grote motor geeft veel extra motorverliezen en daardoor een hoger brandstofverbruik. Er zijn tijdens deze (beperkte) meetperiode meerdere schepen die de motor beperkt belasten, en in deze periode toe hadden gekund met een kleinere motor in normaal gebruik. Ten tweede, de diepgang van het schip bij een gegeven lading bepaalt, zeker bij laag water, het brandstofverbruik per eenheid vervoerde lading. Gegeven het optimaliseren van de kielspeling op een route, heeft een schip met een kleinere diepgang een voordeel.

In elke fase van de inzet van het schip zijn er besparingsopties om rekening mee te houden: bij het ontwerp, bij de belading en routes, en bij het varen zelf. Dit rapport biedt een basis om op elk van deze opties te optimaliseren. Maar een belangrijke conclusie van het onderzoek is dat elke combinatie van scheepstype, route, ladingstype, belading, ofwel het type schip en de inzet daarvan weer eigen aspecten heeft die generieke oplossingen moeilijk maken. Dit onderzoek laat ook het spectrum zien van deze inzet, en de bijbehorende aspecten.

2 Achtergrondkennis

Huidig onderzoek op basis van monitoringsdata dient ertoe om bestaande inzichten te nuanceren en bij te stellen die nu gangbaar zijn voor de CO₂ uitstoot van binnenvaartschepen, waaruit kentallen worden afgeleid. Bijvoorbeeld, volgens alle formules zouden grotere schepen een lager energiegebruik, en een lager brandstofverbruik, moeten hebben per ton vervoerde lading. In de monitoringsdata is dat niet zichtbaar, en het resultaat van een combinatie van factoren: vaarsnelheid, route, en geïnstalleerd motorvermogen. Maar zonder deze basiskennis, zijn de analyses in de volgende hoofdstukken niet herkenbaar als een stap voorwaarts in inzicht in de details van de klimaatimpact van binnenvaartschepen. Voor compleetheit wordt deze basiskennis gegeven in dit hoofdstuk, die, zover mogelijk, vergeleken wordt met de gegevens uit dit onderzoek.

In experimenten voor scheepweerstandmodellen varen schepen bij voorkeur constant, rechtuit, en in diep, breed en stilstaand water. Alles wat extra is wordt veelal afgeleid uit modellen, die bijvoorbeeld de stroomsnelheid van het water langs het schip corrigeren. Ook de stroomsnelheid zelf in een rivier is geen simpel gegeven voor de hele doorsnede en langs de hele lengte, en daarmee niet eenvoudig in formules te vatten omdat de noodzakelijke stromingsgegevens ontbreken.

In dit hoofdstuk worden de basale regels en verbanden, zoals deze uit experiment en theorie volgen op een rij gezet, als een startpunt voor analyses.¹ Dit is de basis waarmee de metingen vergeleken worden. In een aantal gevallen zijn er afwijkingen gevonden van deze formules, en zijn effecten minder relevant dan algemeen verondersteld lijken.

De onderliggende oorzaken van vaarweerstand van schepen is sinds het werk van Froude in de negentiende eeuw goed bekend. Het natte oppervlak en haar ruwheid van het schip is bepalend voor de weerstand. Daarmee hebben, per ton totaalgewicht, grotere schepen een lagere weerstand, en dat drijft deels de trend naar grotere schepen en bredere en diepere vaarwegen. De tweede belangrijke oorzaak van vaarweerstand is de snelheid. Totdat de boeggolf de helft van de lengte van het schip bereikt is de vaarweerstand, in termen van kracht, proportioneel met het kwadraat van de snelheid. Daarmee is de simpele aanname van de vaarweerstand F:

$$F[N] \sim 16 * M[\text{ton}] * (v[\text{km/h}]/L_w[\text{m}]^{1/2})^2$$

waarbij $L_w[\text{m}]$: de lengte langs de waterlijn in meters, $v[\text{km/h}]$ de snelheid in kilometers per uur, $M[\text{ton}]$; het totaalgewicht van schip en lading in tonnen, en $F[N]$: de vaarweerstand in Newton is. Deze formule is geldig voor schepen van een normale verhouding van lengte en breedte en vorm, en een snelheid onder de $v[\text{km/h}] < 4.5 * L_w[\text{m}]^{1/2}$. Bij hogere snelheden ontstaat er een boeggolf van de lengte van het schip en neemt de weerstand toe. Vergelijk een trekker-oplegger met een binnenvaartschip van 110 meter die 15 km/h vaart, dan is het verschil in weerstand een factor 3 tot 4 in het voordeel van het binnenvaartschip, afhankelijk van de snelheid van de trekker-oplegger, waarbij het schip ook een groter aandeel heeft van de lading in haar totaalgewicht.

¹ Zie bijvoorbeeld: Van Lammeren: Weerstand en voortstuwing van schepen, Baxter: Naval architecture, Van Zuilekom: Snelheid, vermogen en brandstofverbruik, Lighthill: Waves in fluid, E. Bolt: Energiegebruik binnenvaartschepen, Newman: Marine Hydrodynamics.

Deze formule bevat belangrijke aannames, die in dit onderzoek worden genuanceerd. De proportionaliteit met totaalgewicht (en waterverplaatsing) en afhankelijkheid van scheepsgrootte werken niet simpel zo door in brandstofverbruik van binnenvaartschepen, blijkt uit de monitoringsdata.

De arbeid (in kJ) per afgelegde kilometer is gelijk aan de kracht (in N: arbeid is kracht maal afstand). Daarbovenop moeten nog ongeveer 10%-30% omzettingsverliezen opgeteld worden om tot de gevraagde arbeid van de motor te komen. Deze factor hangt samen met het ontwerp van het schip voor de gegeven belading. Grofweg vraagt elke 5 Newton kracht 1 gram CO₂ per kilometer. Dit is de tweede basale regel:

$$380 * FC [\text{lit}/\text{km}] \sim \text{CO}_2 [\text{g}/\text{km}] \sim 0.2 * F[\text{N}]$$

Lagere snelheid en grotere schepen, voor lagere vaarweerstand en minder arbeid per ton vervoerd gewicht als CO₂ reductiemaatregelen, volgen uit deze basale relatie. De toename van de lengte van binnenvaartschepen, en het aanpassen van vaarwegen en sluizen om deze lengte toe te laten kan gezien worden als de belangrijkste oorzaak van de afname van het specifiek brandstofverbruik in gram per ton*km. Maar de werkelijkheid is complexer. Ten eerste moet de kracht voor voortstuwing geleverd worden door een schroef aangedreven door een motor. De optimale schroefvormen, na de brede introductie rond 1865², zijn bekend sinds de jaren dertig van de twintigste eeuw. Maar een optimale schroefvorm hangt samen met de belading en de snelheid, die op binnenwateren meestal niet constant of optimaal is. Een ontwerp dat wellicht minder geoptimaliseerd is voor een specifieke combinatie van belading en snelheid (typisch “death weight” of “displacement” en “design speed”) maar in meerdere omstandigheden goed functioneert, kan een voordeel leveren.

2.1 Impact van binnenvaart op milieu en klimaat

De uitstoot van de motor is de grootste bron van de impact van schepen op milieu en klimaat. De uitstoot van CO₂, NO_x, en fijnstof zijn hiervan de oorzaak. Een schone en zuinige motor is daarvoor de beste oplossing. In de afgelopen vijftig jaar zijn de eisen aan motoren steeds verder aangescherpt. Dat heeft de uitstoot van NO_x en fijnstof sterk gereduceerd, maar de CO₂ uitstoot, direct gekoppeld aan de energie-inhoud van de brandstof, en daarmee de vaarweerstand is beperkt gereduceerd, met ongeveer 1% per jaar hoor hogere motorefficiëntie.

Het reduceren van de energievraag, voor de gegeven transportvraag, is de andere mogelijkheid om uitstoot te verminderen. Deze vraag staat centraal in dit rapport. Maar omdat moderne motoren vooral worden getest voor de typegoedkeuring bij hogere motorlast, is de lagere motorlast mogelijk een probleem bij moderne NO_x reductiesystemen. Dit vraagt speciale aandacht, om motorbelasting onder de 20% van de maximale motorbelasting te reduceren. In de huidige studie is er slechts beperkt informatie over de NO_x uitstoot in de praktijk beschikbaar, maar de problemen met de emissiecontrole technologie zijn bekend vanuit vrachtwagens en mobiele werktuigen.

² Het experiment van de Britse Admiraliteit tussen twee zusterschepen: de HMS Rattler en de HMS Alecto, de eerste met een schroefaandrijving en de tweede met schoepenradaandrijving in 1845 wordt als keerpunt gezien. Zie D.K. Brown, Before the ironclad.

Een tweede reden om lage motorlast te beperken zijn de interne motorverliezen. Motorverliezen zijn 3% tot 6% van het maximale vermogen van de motor, afhankelijk van de aandrijving en hoeveel systemen op de drijfas meedraaien. Bij een motorlast van 10%, wordt ongeveer een derde van de brandstof gebruikt om de motor draaiende te houden, en slechts twee-derde nuttige arbeid. Zeker bij veel inzet bij lagere motorlast is het belangrijk om motorgrootte goed te kiezen en motorverliezen te minimaliseren. Hybridiseren is een alternatief, maar het is belangrijk om rekening te houden met de verliezen bij omzetting, van motor naar elektriciteit en terug, en bij opslag van energie in batterijen. Het mediane gebruik over de tijd zou bij voorkeur via een directe aandrijving zijn.

2.2 Voortstuwing van schepen

De vleugelvorm van de schroef zorgt voor de voortstuwing van het schip. De kracht is grofweg proportioneel met het kwadraat van de schroefsnelheid. Een deel daarvan is weerstand, en een deel is voortstuwingskracht. Deze verhouding voor een moderne schroef is ongeveer 10%/90% bij optimale snelheid en configuratie. De variabele diepte, interactie van de waterstroom met de romp en het roer, en beperkte kielspeling reduceren allemaal de efficiëntie van de schroef voor voortstuwing. Het effect van de variabele diepte en interactie met de romp kan worden afgeleid uit de extra weerstand bij lage belading ten opzichte van de theoretische curve. In het rapport worden deze analyses uitgevoerd op de data.

2.3 Arbeid van de motor

De koppelkromme is het verband tussen de schroefsnelheid en de koppel ("*torque*"). Voor een schip wordt dit bepaald door de vorm van de schroef, en is er slechts een kleine afwijking, met de belading en manoeuvreren van het schip. Het brandstofverbruik van de motor is het resultaat van een combinatie van interne verliezen, energiegebruikers op de motor, en de schroef. De koppelkromme is in principe een interessant gegeven, maar slechts een "tussenstap" tussen brandstofverbruik en voortstuwing. In deze studie wordt er een directe relatie tussen brandstofverbruik en schroefsnelheid bepaald. De interne verliezen van de motor, de energiegebruikers, en de pompverliezen van de motor variëren met de snelheid van de motor. In dit rapport wordt de directe relatie tussen brandstofverbruik en snelheid van schroef en schip gebruikt, om complicaties in het bepalen van de arbeid te omzeilen. In het geval van vervanging van de motor of het voortstuwingconcept, of het anders van energie voorzien van energiegebruikers op een schip is het relevant om de arbeid te weten.

2.4 Toerental en schroefkromme

De schroefkromme, de relatie tussen de snelheid van de schroef en de snelheid van het schip is een fundamentele relatie die de voortstuwing karakteriseert. In het geval van stroming op een rivier biedt deze relatie aanknopingspunten om de snelheid ten opzichte van het water te bepalen. Dat is natuurlijk wel afhankelijk van de lading. Een schroef die deels boven water komt is minder efficiënt voor het genereren van voortstuwing, en, in mindere mate kan een nauw kanaal of een kleine kielspeling de werking van de schroef verminderen.

2.5 Effect van belading

De simpelste aanname van de vaarweerstand is een proportionaliteit met het totale gewicht. Des te meer lading ten opzichte van het gewicht van het lege schip, reduceert daarmee de emissies per vervoerde lading.

Maar een leeg schip veroorzaakt dezelfde wervelingen en heeft hetzelfde oppervlakte aan de onderkant (lengte x breedte) als een beladen schip. Voor elk schip is er daarmee, in eerste orde, een groter effect van de eerste ton dan de laatste ton belading op het brandstofverbruik. Dat maakt het specifiek brandstofverbruik in g per ton*km nog sterker afhankelijk van de lading die meegenomen kan worden bij de geldende omstandigheden (zoals waterstanden). In een simpele relatie telt elke ton evenveel. In de analyses wordt getoond in hoeverre de praktijkdata afwijkt van dit verband. Dat verband wordt uitgedrukt in een factor waarmee het leeggewicht van het schip moet worden vermenigvuldigd om het proportionele verband tussen gewicht en brandstofverbruik vast te stellen. Schepen geschikt voor ondiep water: breder en langer, maar minder diep, hebben mogelijk een grotere basisweerstand dan andere schepen, door het grote oppervlak van de bodem.

2.6 Configuratie van schepen

Duwbakken zijn gemeengoed geworden op de grote vaarwegen. Daarmee kunnen lange en brede combinaties gemaakt worden, waardoor de inzet geoptimaliseerd kan worden. De grootste vaarwegen staan tegenwoordig zeskakduwvaart (CEMT klasse VI-c) toe. Ook kunnen er bakken langsrij liggen. De configuratie zou mogelijk uit het AIS signaal ("*message 5*") gehaald kunnen worden en beschikbaar komen om afhankelijkheden te onderzoeken. Tot dusverre waren er onvoldoende verschillen en signalen om het effect van de configuratie op het brandstofverbruik te onderzoeken.

2.7 Stroming in de rivier als grote onbekende

De stroomsnelheid van de rivier hangt af van de doorsnede en ruwheid van de rivierbodem, de afstand tot de kant, en de bochten in de rivier. Een vast getal, zoals dat nu algemeen beschikbaar is voor lange stukken vaarweg, heeft slechts beperkte waarde voor de daadwerkelijke locatie, en plaats op de rivier, waar het schip zich bevindt en de belading van het schip. In dit onderzoek waren er alleen vaste getallen voor lange segmenten van de vaarroute beschikbaar. Deze generieke stroomsnelheidsgegevens bleken onvoldoende te correleren met de brandstofverbruiksgegevens. Mogelijk is het tweedimensionale stromingsprofiel, met afstand tot de kant en diepte vanaf de bodem (waar het water stil staat vanwege de vaste bodem, afhankelijk van de ruwheid van de bodem) essentieel om tot een goede afhankelijkheid te komen. Het is wel gebleken dat stroming in combinatie met bochten een substantieel effect hebben op het brandstofverbruik. In de buitenbocht is het effect het grootst. Dat is ten gevolge van een combinatie van hogere stroomsnelheden in de buitenbocht en de hogere weerstand van het schip door de trim (roerstand) om de bocht te doorkruisen. Bij Nijmegen lijkt dit een groter effect voor de meeste schepen dan de verschillen in diepte van de rivier en de kielspeling.

2.8 Kielspeling en belading, waterstand

Lage waterstanden, met warme zomers en winters en beperkte neerslag, halen regelmatig het nieuws. Het is daarmee niet automatisch zo dat schepen dicht bij de bodem komen (de kielspeling), maar vooral een lagere belading hebben om de minimale kielspeling te handhaven. Verschillende waterstanden zijn daarmee vooral zichtbaar in de verschillende beladingen van schepen, waarbij het brandstofverbruik per ton*km hoger wordt bij lagere belading, maar het absolute brandstofverbruik per schip over het algemeen lager. Deze relatie is een onderzoeksvraag in deze studie. Ook is een locatie een ondiep punt met lage waterstand vaak beperkt tot een klein deel van de route, waar ter plekke de weerstand verhoogd is.

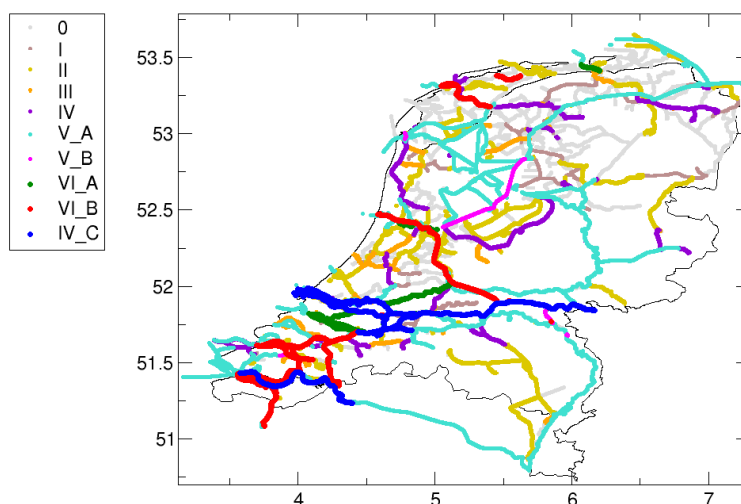
Het is daarmee beperkt van invloed in de totale afstand. In combinatie met de lagere belading ten opzichte van de situatie met een hogere waterstand is het moeilijk om het effect van kielspeling op brandstofverbruik te isoleren.

2.9 Breedte van de vaarweg

Vaarwegen van schepen worden ingedeeld volgens de CEMT klasse, en daarmee gekoppeld aan de grootste schepen die daar kunnen varen.

De klassen zijn:

- 0: recreatievaart
- I: Spits
- II: Kempenaar
- III: Dortmund-Eemskanaal
- IV: Rijn-Hernekanaal
- V: Rijnschip (a: éénbaksduwstel, b: lange tweebaksduwstel)
- VI: Hoofdroutes (a: brede tweebaksduwstel, b: vierbaksduwstel, c: zesbaksduwstel)



Figuur 2.1: Voor de verschillende CEMT grootteklassen van schepen de beschikbare routes in Nederland en noorden van België.

Als een schip groot is met betrekking tot de beschikbare vaargeul, dan ontstaat er meer vaarweerstand omdat het water moeilijker langs het schip naar achteren gaat. Dat geeft twee effecten: hogere stroomsnelheden langs het schip, en een opstuwing van water voor het schip.

Op sommige routes zijn vooral de sluisen, bochten, en brugpijlers, de beperkende factor voor de grootte van het schip. Schepen moeten elkaar op de meeste routes kunnen passeren, daarmee is het effect van de breedte over het algemeen beperkt, en vooral zichtbaar in de monitoringsdata bij bruggen.

2.10 Bochten, wind en golven

Daar waar op open water wind en golven een rol spelen bij de vaarweerstand, lijken op vaarwegen de bochten mee te spelen, omdat de trim (roerstand) de werking van de schroef kan beïnvloeden. In principe zijn er gegevens om dit te onderzoeken, en beschikbaar via de KNMI, maar de verwachting is dat dit voor binnenvaart beperkte effecten zijn op het totaal. Het frontaal oppervlakte, ofwel loodrecht op de vaarrichting, boven water van schepen is rond 40 m² wat een weerstand oplevert bij harde wind van 10 m/s van ongeveer 2400 Newton, die bij een vaarsnelheid van 5 m/s, een extra vermogen van 12 kW vraagt. Dat is minder dan 5% van het typische gevraagde vermogen. Omdat vaarsnelheden beperkt zijn, in de invloed van de wind ook beperkt. Vooral bij hoog beladen containerschepen, bijvoorbeeld met veel lege containers, kan het effect groter zijn.

2.11 Laden, lossen, en energiegebruikers aan boord

Er is een groot verschil in energieverbruik bij stilliggen. In sommige gevallen, zoals tankers, is er energie nodig om het schip te laden en lossen. Ook kan in sommige gevallen het conditioneren van de lading energie vragen. Maar ook de bewoning aan boord vraagt energie. Net zoals bij gewone huizen en kantoren kan het energieverbruik verschillen. Maar ook de energiebron, de hoofdmotor of kleinere motoren, bepalen de hoeveelheid brandstof die nodig is om deze energie te leveren.

2.12 Ontwerpkeuzes

Optimalisatie op een gegeven belading en snelheid (ontwerpsnelheid) kan de efficiëntie bij andere belading en snelheid beperken. Zeker bij lage belading, zoals bij lage waterstand, kan dit leiden tot suboptimale inzet. In het ontwerp, zeker met de droge periodes kunnen aangepaste ontwerpen, zoals dubbele en driedubbele schroeven, een verbetering geven. Kleinere schroeven blijven bij lage belading, bij lage waterstand, beter onder water, en hebben daarmee een optimale werking.

2.13 Operationele keuzes

Naast de gemiddelde vaarsnelheid zijn belading en laad- en loslocaties om de optimale, ofwel maximale, belading te hebben op elk deel van de route de aspecten die een lager brandstofverbruik per ton*km mogelijk maken. Dat grijpt aan op een breed scala aan randvoorwaarden bij het vervoer van lading, zowel economische, tijdsdruk, als ook veiligheid.

3 De scheepseigenschappen en inzet

Er zijn 19 verschillende schepen gemeten, waarvan vier droge bulk, vijf tankers en tien containerschepen. Vier van deze schepen varen in koppelverband. De scheepseigenschappen en inzet tijdens de meetperiode volgen in dit hoofdstuk. De schepen hebben monitoringapparatuur aan boord die elke twee seconde alle beschikbare data logt.

De schepen zijn geanonimiseerd, en worden aangeduid met de code type-grootte-volgnummer, bijvoorbeeld: C-V-2 is het tweede containerschip, met de grootteklasse V (Rijnschip). Het motorvermogen van deze schepen schaalt grofweg met de lengte x breedte van het schip. Terwijl grotere schepen relatief minder vaarweerstand hebben (zie Hoofdstuk 2) en met een minder grote motor dan op basis van de grootte van het schip toe zouden kunnen bij dezelfde vaarsnelheden. De letter “K” duidt een koppelverband, maar de configuratie van het koppelverband, bijvoorbeeld lang of breed (2x3 of 3x2) is niet beschikbaar in de data.

3.1 Technische eigenschappen

De belangrijkste technische eigenschappen zijn de grootte, gewicht en vermogen van de schepen. In de tabel worden deze gegevens op een rij gezet. Het totale gewicht van het schip is een combinatie van het leeggewicht van het schip, relevant voor de vaarweerstand bij leeg varen en lage belading, en het totaalgewicht (schip + lading). Het motorvermogen is het gecombineerd motorvermogen van alle voortstuwingmotoren aan boord. In meeste schepen zijn er een stuurboord (SB) en bakboord (BB) motor, van hetzelfde vermogen aan boord, die in de meeste gevallen allebei aanstaan tijdens varen.

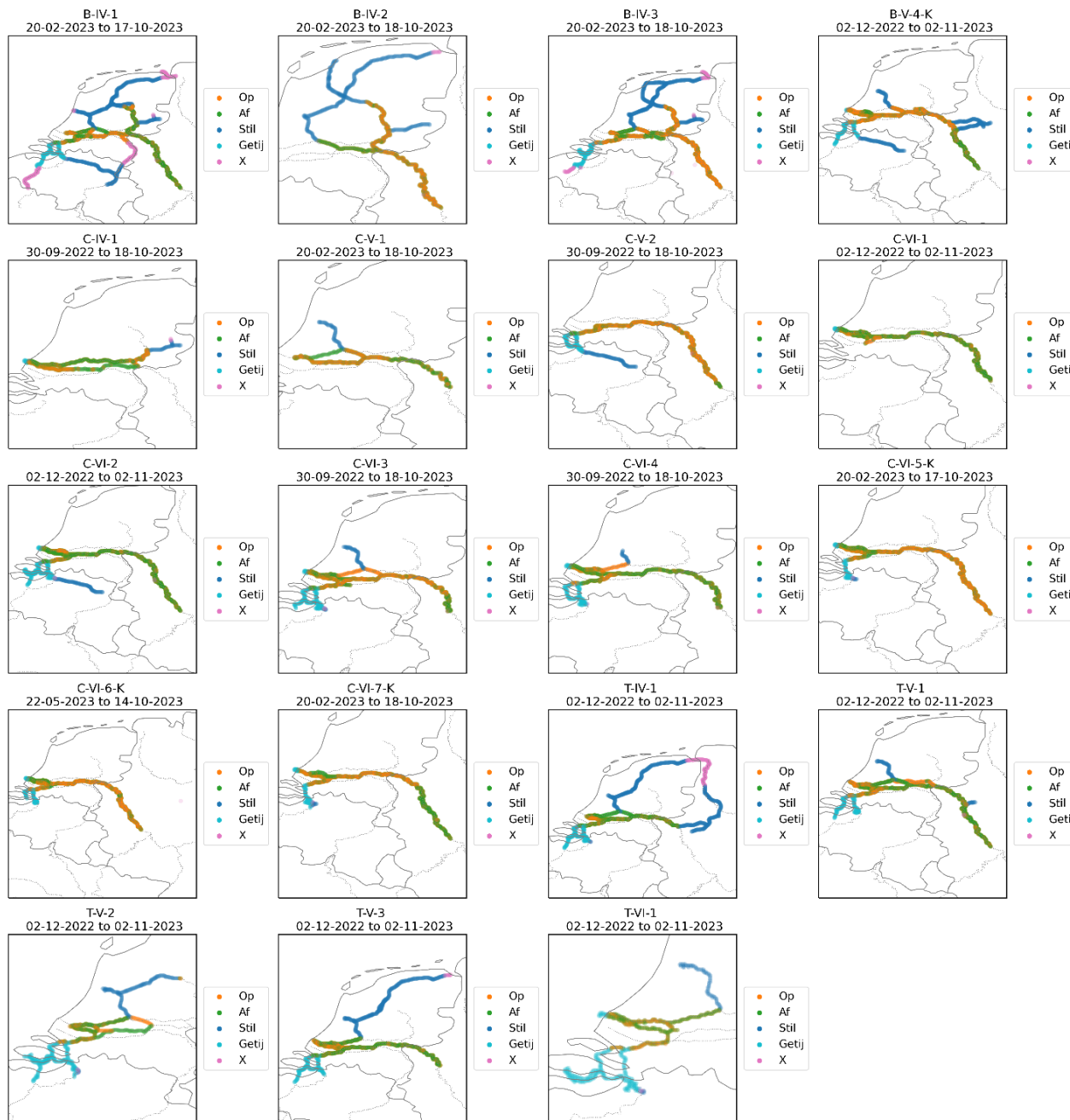
Tabel 3.1: Benaderde technische eigenschappen van de 19 gemeten schepen. De eerste parameter van de schipalias geeft het type lading (B – droge bulk, C – container, T – tanker/natte bulk) aan, de tweede parameter een indicatie van CEMT klasse en vierde of het een koppelverband (K) betreft.

Schip	Lengte [m]	Breedte [m]	Tonnage [ton]	Leeggewicht [ton]	Bouwjaar	Aantal hoofdmotoren	Totaalvermogen hoofdmotor(en) [kW]
B-IV-1	105	10.5	2608	836		1	1100
B-IV-2	105	10.52	2407	780		1	1115
B-IV-3	110	9.5	2348	724		1	1115
B-V-1-K	178	9.6	3476	777	2020	2	735
C-IV-1	90	11.45	1672	788		1	1115
C-V-1	110	11.45	3244	882		1	1175
C-V-2	135	11.45	3878	1190		2	1760
C-VI-1	135	14.2	5208	1255	2003	2	2235
C-VI-2	135	14.2	5209	1255	2001	2	2030
C-VI-3	135	14.2	4332	1656		2	1875
C-VI-4	135	15.15	5053	1519		2	2205
C-VI-5-K	177	11.45	3743	871		2	1490
C-VI-6-K	178	11.45	3743	1413		2	1565
C-VI-7-K	178	11.45	3719	1416		2	1490
T-IV-1	86	9.6	1632	492	2020	2	735
T-V-1	110	11.4	2348	886	2005	1	1050
T-V-2	110	11.45	3392	879	2021	1	1040
T-V-3	135	11.45	4558	1183	2003	2	1490
T-VI-1	135	17.5	8773	1846	2021	2	2240

3.2 Gevaren routes

Binnenvaart is een internationale aangelegenheid. De schepen worden binnen en buiten Nederland ingezet ([Figuur 3.1](#)). De meeste schepen zijn de helft van de tijd in het buitenland, zeker in de Rijnvaart, waar het stuk van de Duitse grens naar Rotterdam nog 140 kilometer is. De gemeten schepen laten veel van de belangrijke routes in Nederland en naar het buitenland zien. De kleinere schepen, klasse IV en een V, varen op de route over de Friese meren naar Groningen, en naar Hengelo, terwijl de grootste schepen, de meeste V en alle VI, op de routes naar Duitsland en de haven van Antwerpen varen. Afhankelijk van de route is er ook stromingsafhankelijkheid, op de rivier, maar ook getijdestroming in het kustgebied.

De definities van stroming variëren enigszins, maar de in deze studie gehanteerde definitie is zichtbaar in de kaart. Dit is belangrijk om de relatie tussen snelheid en vermogen goed te kunnen vaststellen op stil water zonder de variabele invloed van stroming.



Figuur 3.1: Routes die gevaren zijn tijdens de meetperiode, per schip. De kleuren geven de stroming van de waterweg aan: stroomopwaarts (oranje) en -afwaarts (groen), kanalen/stil wateren (donkerblauw), getijden (licht blauw).

De verschillende type schepen worden ingezet in verschillende regio's. De gemeten containerschepen worden vooral ingezet op de Rijn van en naar het ARA-gebied (Amsterdam-Rotterdam en -Antwerpen). De bulk- en tankerschepen worden ook ingezet in het noorden van het land.

Vooral in het buitenland is niet altijd met zekerheid vast te stellen of er stroming is in een vaarweg. Dat is met “X” (magenta) aangeduid in de kaarten.

3.3 Draaiuren en vaarkilometers

De eerste meetdata kwam binnen vanaf september 2022, met een deel historische data van eerdere maanden, en is doorgelopen tot november 2023. De analyses zijn gebaseerd op data tot oktober 2023, en voor veel schepen is er meer dan 4000 uur aan data beschikbaar, en geven een goed jaargemiddeld beeld van de schepen. In deze tijd is er gemiddeld 20.000 kilometer afgelegd, met een substantiële variatie tussen de schepen, afhankelijk van inzet.

Tabel 3.2: Gemeten schepen en de totale afstand en uren die gemeten zijn in de meetperiode. De meeste schepen zijn meer dan 4000 uur gemonitord. Deze totalen zijn inclusief de data die beschikbaar is tijdens stilliggen, manoeuvreren en varen.

Schip	Startdatum	Totale afstand [km]	Totale uren
B-IV-1	20-2-2023	13464	4251
B-IV-2	20-2-2023	21117	5210
B-IV-3	20-2-2023	18291	4831
B-V-1-K	2-12-2022	25326	6054
C-IV-1	30-9-2022	28136	5239
C-V-1	20-2-2023	8552	2009
C-V-2	30-9-2022	42972	7343
C-VI-1	2-12-2022	46784	6627
C-VI-2	2-12-2022	34600	6940
C-VI-3	30-9-2022	44455	8718
C-VI-4	30-9-2022	34273	6519
C-VI-5-K	23-2-2023	36769	5096
C-VI-6-K	22-5-2023	16416	2303
C-VI-7-K	20-2-2023	34120	5216
T-IV-1	2-12-2022	25057	6824
T-V-1	2-12-2022	42915	6721
T-V-2	2-12-2022	14226	7199
T-V-3	2-12-2022	21856	6397
T-VI-1	2-12-2022	19443	7511

4 Data beschikbaarheid en kwaliteit

Monitoren op basis van sensoren en loggers is niet hetzelfde als een kostbare meetcampagne met gevalideerde en gecertificeerde meetinstrumenten. Er zijn basale afspraken gemaakt over de data en de resolutie, maar de kwaliteit van de data zal toch deels volgen uit de analyses later in dit rapport. De belangrijke signalen zijn goed vastgelegd, maar andere signalen, zoals stroming, om deze afhankelijkheid te bepalen, is slechts rudimentair beschikbaar op enkele meetlocaties in de vaarwegen na.

Om een goed beeld te creëren van de inzet en het brandstofverbruik van de schepen, en de afhankelijkheden daarvan, is data van een goede kwaliteit en nauwkeurigheid nodig. In [Tabel 4.1](#) worden de gevraagde gegevens toegelicht, en in [Tabel 4.2](#) wordt een overzicht gegeven van de beschikbaarheid van de voor deze analyse meest relevante signalen per schip. Om de data goed te analyseren worden een aantal signalen eerst bewerkt. De bewerking hiervan wordt toegelicht in [Tabel 4.3](#).

Tabel 4.1: Gevraagde gegevens, relevante eenheid en nauwkeurigheid, en opmerkingen over hun beschikbaarheid

Categorie/gegevens	Eenheid (frequentie : 1 Hz)	Opmerking
Tijd	[sec (UTC)] xxxxxxxx	
GPS latitude	[decimale graden] xx.xxxxx	
GPS longitude	[decimale graden] xx.xxxxx	
GPS course	[graden] xxx	
GPS snelheid	[m/s] xx.x	
Ship heading	[graden] xxx	
Kielspeling	[m] xx.x	Er komt regelmatig "0" metingen voor in kiepspeling, bijvoorbeeld door turbulentie. Deze waarden zijn weggelaten in de analyse.
Diepgang	[m] xx.x	
Belading	[ton] xxx	De beladingmeter is alleen betrouwbaar op het moment dat het schip stilligt. De meter kan ook worden uitgezet waardoor gaten in de data inzameling ontstaan.
Stroomsnelheid	[m/s] xx.x	Stroomsnelheid is vaak op alleen vaarwegniveau beschikbaar, en dan niet op voldoende detail om geschikt te zijn voor deze toepassing. Dit is ook meestal afkomstig van een model en is niet een exact gemeten snelheid (de data laat zien dat hier heel vaak 1 staat)
Stroomrichting	[graden] xx	Op vaarwegniveau gemiddelde beschikbaar, niet dekkend
Breedte vaarweg	[m] xxx	Op vaarwegniveau gemiddelde beschikbaar, niet dekkend

Categorie/gegevens	Eenheid (frequentie : 1 Hz)	Opmerking
Waterstand	[m] xx.x	Alleen geschikt voor vergelijkingen per schip op dezelfde vaarweg in verband met verschillende nulpunten en referentiekaders van de beschikbare data
Toerental (per motor)	[1/min] xxxx	Niet voor alle schepen beschikbaar in verband met beperkte toegang tot het uitlezen van motorsignalen
Brandstofverbruik (per motor)	[g/s] xxx.x	Wordt geleverd in L/uur per hoofdmotor, vaak wel gelimiteerd tot 0.1 L/uur resolutie, wat beperkingen heeft bij het bepalen van motorverliezen bij kleinere motoren.
NOx emissie (per motor)	[mg/s] xxx	Voor maar slechts één schip beschikbaar gesteld
Windsnelheid	[m/s] xx.x	
Windrichting	[graden] xxx	
Roerstanden	[graden] xx	
Brandstofverbruik kleine auxiliary motoren	[g/s] xxx.x	Niet beschikbaar gemaakt

Een signaal zoals motor (en schroef) snelheid kan mogelijk als alternatief gebruikt worden om het effect van stroming zichtbaar te maken. De schroefsneldheid heeft namelijk een directe relatie met de voortstuwingskracht. De GPS snelheid van het schip is ten opzichte van de vaste grond. De snelheid ten opzichte van het water is niet beschikbaar.

Tabel 4.2: Beschikbaarheid van de signalen (exclusief GPS) die meest relevant zijn in deze onderzoek. 'x' geeft aan dat de signaal beschikbaar is, '?' dat de signaal beschikbaar is, maar deze niet als voldoende betrouwbaar wordt beschouwd.

Schip	Brandstofverbruik hoofdmotor(en) [L/uur]	Toerental [RPM]	Kielspeling [m]	Belading [ton]	NO _x [mg/s]
B-IV-1	x	x	x	x	
B-IV-2	x	x	x	x	
B-IV-3	x	x	x	x	
B-V-1-K	x	x	x	x	
C-IV-1	?	x	x	x	?
C-V-1	x	?	x	x	
C-V-2	x	x	x	x	?
C-VI-1	x	x	x	x	
C-VI-2	x	x	x	Niet alle data	
C-VI-3	x	x	x	x	?
C-VI-4			x	x	
C-VI-5-K	x	x	x	x	
C-VI-6-K	x	x	x	x	

Schip	Brandstofverbruik hoofdmotor(en) [L/uur]	Toerental [RPM]	Kielspeling [m]	Belading [ton]	NO _x [mg/s]
C-VI-7-K	x	x		x	
T-IV-1	x	x	x	x	
T-V-1	x	x	x	x	
T-V-2	x	x	x	x	x
T-V-3	x	x	x	x	
T-VI-1	x	x	x	x	

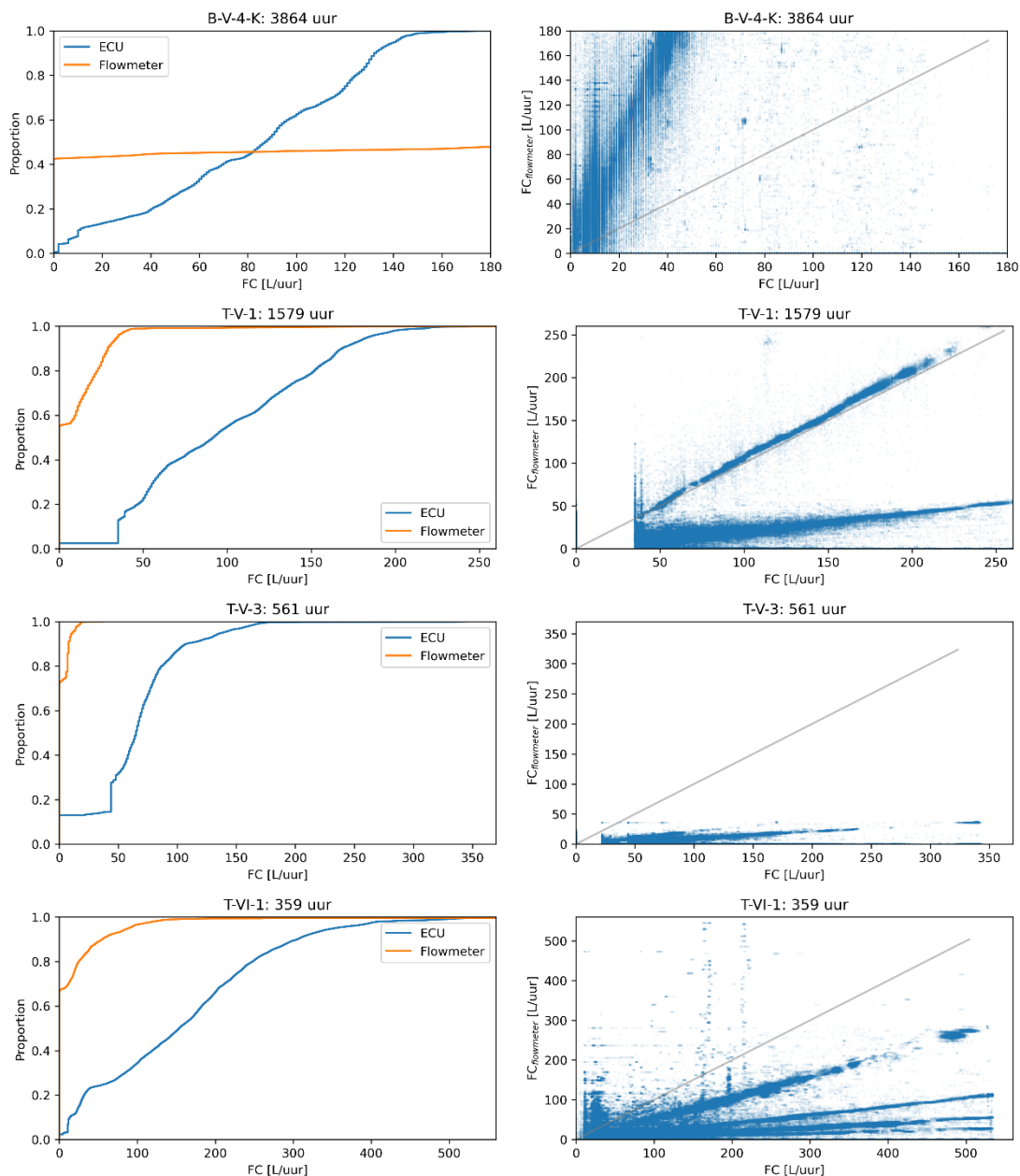
Een aantal signalen veranderen niet tijdens de trip, zoals belading, en zijn in sommige gevallen alleen beschikbaar of betrouwbaar als het schip stil ligt. Andere signalen zoals kielspeling hebben soms last van verstoringen, waardoor er tijdelijke afwijkende waarden worden gerapporteerd, en moeten daarvoor gecorrigeerd worden. Voor de locatie van stroming zijn er verschillende cijfers aangeleverd voor dezelfde locatie. Daaruit is de meest betrouwbare waarde geschat voor alle locaties. Vaarwegen met stilstaand water worden gebruikt om het verband met snelheid te kunnen vastleggen. Verder worden signalen van verschillen motoren gecombineerd tot een enkelvoudig signaal voor de voortstuwing. In de tabel hieronder wordt een overzicht gegeven. De waterstanden zijn in verschillende metriek gerapporteerd, zoals lokaal en ten opzichte van NAP, daar is uiteindelijk niets mee gedaan, omdat kielspeling beter bruikbaar bleek om effecten van waterstanden te analyseren.

Tabel 4.3: Bewerking van de beschikbare data die plaatsvindt voor de analyse.

Categorie/gegevens	Bewerking
Trip	Scheepsbeweging van tenminste 1 km met een snelheid > 0.1 m/s met een gewichtsverandering van tenminste 10 ton in vergelijking met de vorige trip.
Stroming en richting	Vaarwegen worden opgesplitst via gps-locatie, en de ship heading per stukje vaarweg wordt gebruikt om onderscheid te maken tussen stroom op- en afwaarts. Kanalen en gebieden die beïnvloed kunnen worden door getijden worden gefilterd doormiddel van alleen gps-locatie.
Kielspeling	Signaal wordt gesmoothed om uitschieters weg te halen. Hier ontstaat wel het gevaar dat deze uitschieters wel echte punten zijn van lage kielspeling (e.g. aanwezigheid rotsen)
Belading	De laatste 5 punten voordat het schip gaat varen als deel van een trip worden gemiddeld en doorgetrokken naar de volgende stop met een massawijziging
Toerental	Toerental (RPM) van alle beschikbare hoofdmotoren wordt bij elkaar opgeteld. RPM kleiner of gelijk aan nul wordt niet meegenomen in het modeleren
Brandstofverbruik	Het brandstofverbruik van alle beschikbare hoofdmotoren wordt bij elkaar opgeteld. Brandstofverbruik kleiner of gelijk aan nul wordt niet meegenomen in het modeleren

Vier schepen waren uitgerust met flowmeters, waarvan de correlatie tussen de signalen wordt in getoond in [Figuur 4.1](#). Voor B-V-4-K ligt minder dan de helft van de flowmeter data (waar de data van de hoofdmotoren bij elkaar opgeteld zijn) binnen de verwachte range (de bijna horizontale oranje lijn net boven 0,4 laat zien dat heel veel hiervan ook 0,0 is). Voor T-V-1 is zo'n 55% van de flowmeter data 0,0, maar voor een deel komt de ECU (Engine Control Unit) en flowmeter wel overeen (rechter paneel, tweede van boven).

Voor T-VI-1 zijn er vier verschillende verhoudingen tussen ECU en flowmeter, te zien aan de vier lijnen die door de puntjes gevormd worden (onder rechts). Er is nog geen uitgebreide analyse aan gewijd (bijvoorbeeld een vergelijking per motor en potentiële oorzaken van afwijkingen), maar flowmeter monitoring lijkt bewerkelijk en kan beter eerst gevalideerd worden in een gecontroleerd experiment. In dit rapport wordt verder gebruik gemaakt van de ECU voor het brandstofverbruik. Over het algemeen in ECU data van motoren betrouwbaar. In een aantal gevallen lijkt bij stationair draaien een onderschatting te zijn van het brandstofverbruik.



Figuur 4.1: (Links) de distributie van het totale brandstofverbruik van de hoofdmotoren zoals aangegeven door de ECU (blauw) en zoals gemeten met de geïnstalleerde flowmeter (oranje), als cumulatieve relatieve-frequentieverdeling. De verwachting zou zijn dat deze distributies overeen zouden komen. (Rechts) Verhouding tussen brandstofverbruik zoals aangegeven door de ECU en flowmeter, waar elk puntje een datapunt is. De grijze lijn geeft $y = x$ aan. De x-assen zijn geschaald naar totaal geïnstalleerd vermogen

5 Analyses

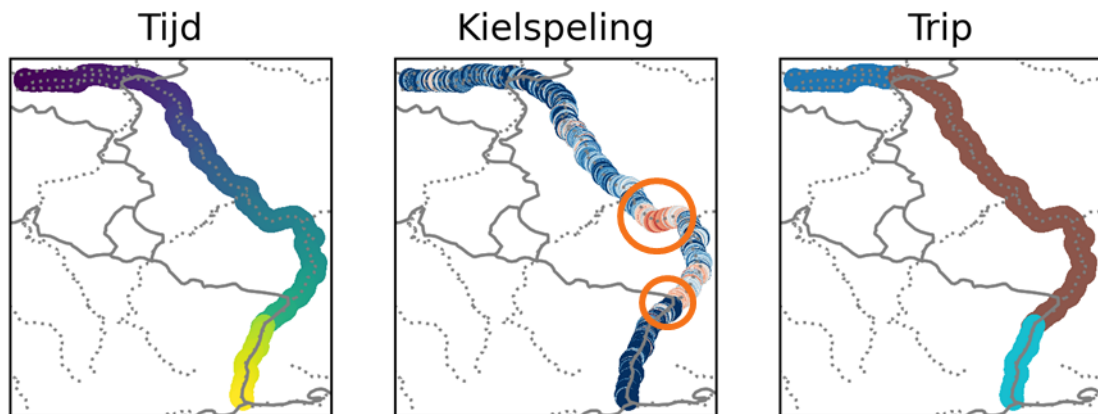
Op basis van algemene inzichten uit Hoofdstuk 2 zijn er vragen en hypothesen geformuleerd, die met behulp van de data onderzocht zijn. In sommige gevallen gaat het om parameters per schip over de relatie tussen snelheid, belading, en brandstofverbruik. In andere gevallen worden effecten van kielspeling en stroming onderzocht. De derde type analyses zijn de vergelijkingen tussen schepen op dezelfde route. De beschikbare data wordt op deze verschillende manieren geanalyseerd. Een aantal analyses dienen ertoe om basisgetallen beschikbaar te maken. Dit gebeurt per maand en per schip. Voor elk schip als geheel, per trip/route en op basis van verwachte afhankelijkheden. Tabellen van de maandelijkse gemiddeldes zijn toegevoegd als extra databestand.

5.1 Kielspeling

In de gemeten periode is er geen sprake geweest van extreem lage waterstanden, zoals dat in de zomer van 2018 het geval was.³ De spreiding in gemeten kielspeling ([Figuur 5.2](#)) laat zien dat de gemiddelde kielspeling tijdens varen voor alle schepen boven de twee meter zit, en daarmee beperkt invloed heeft op de vaarweerstand. De punten waar de kielspeling het laagst is zijn op een andere manier belangrijk. De ondiepe punten in de route bepalen namelijk de maximale belading, en in veel gevallen wordt het schip daarop beladen. In veel gevallen liggen de ondiepste punten in de rivier in het buitenland, met name in Duitsland.

Per trip kan de kielspeling per route worden bekeken om de locatie te vinden waar de minimum kielspeling zich bevindt (oftewel een 'bottleneck'). [Figuur 5.1](#) laat de plekken van lage kielspeling zien tussen Dordrecht en Bazel. Afhankelijk van de trip is dit minimum ook bepalend voor de maximum belading die vervoerd kan worden. Voor de meest gevaar routes is de minimum kielspeling per trip geplot in [Figuur 5.3](#) - [Figuur 5.5](#). Hierin is te zien dat de meeste container- en tankschepen op een bepaalde kielspeling varen: 37 cm voor container en 31 cm voor tankers. In de bulkschepen is er een stuk meer variatie, afhankelijk van de route, waarschijnlijk omdat deze schepen vaker leeg varen. Wel is het zo dat deze 'bottlenecks' maar voor een heel beperkt aandeel van de trip van invloed zijn: het heeft dus waarschijnlijk een groter effect op het brandstofverbruik vanwege de lagere belading die effect heeft op het brandstofverbruik per ton.km, dan een grotere weerstand alleen ter plaatse van de maatgevende kleine kielspeling. Het ook belangrijk om te realiseren dat op ondiepe plekken de stroming hoger is dan op andere stukken van dezelfde route. Dezelfde hoeveelheid water moet zich namelijk door een kleinere oppervlakte (breedte x diepte) verplaatsen en stroomt daarom sneller. Maar aan de zijkant van de rivier, dicht bij de oever kan de stroomsnelheid juist lager zijn dan in het midden, en gunstiger bij het stroom opwaarts varen.

³ Extreem laag water wordt hier aangeduid als de waterdoorvoer bij Lobith minder dan 900 m³/s, dat in 2018 voor het laatst voorkwam, op het moment van deze studie. Laag water is bij een doorvoer van minder dan 1000 m³/s.



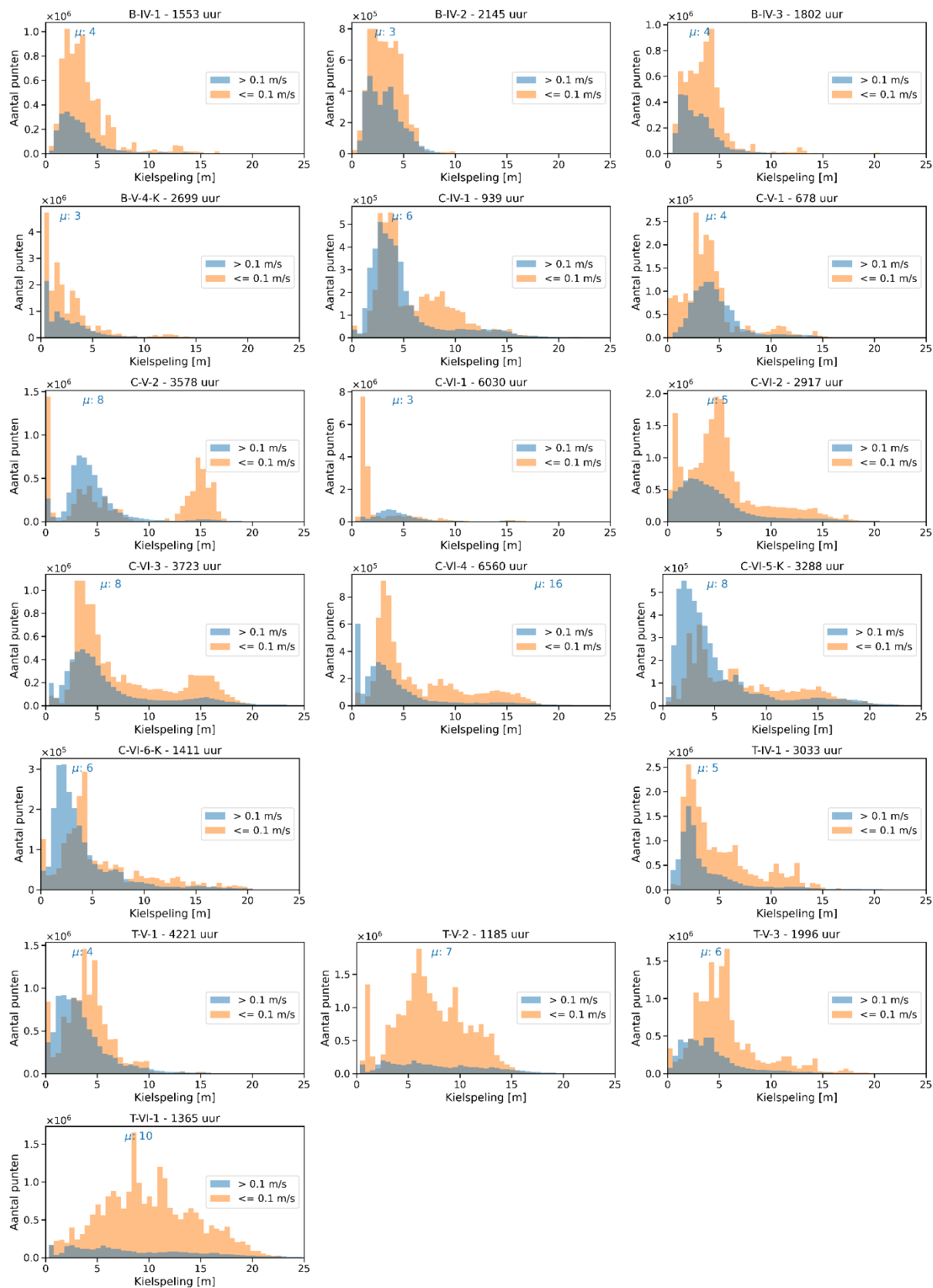
Figuur 5.1: Vaarroute de Rijn op voor C-VI-5-K, waar kleuren (van links naar rechts respectievelijk) de tijd, kielspeling, en tripnummer aangeven, met twee laad-los locaties. In het middelste figuur worden de locaties van de 'bottlenecks' tussen Dordrecht en Basel aangegeven. (voor bottlenecks per trip voor alle schepen, zie ook [Figuur 5.6](#)). Het schip los delen van de lading bij het stroomopwaarts varen, en dat wordt gezien als een andere trip.

De bovenstaande figuur is een voorbeeld, later in het rapport worden overzichten gegeven voor alle schepen. Dergelijke grafieken zijn gemaakt voor alle schepen en gecombineerd met de inzichten in de spreiding in kielspeling. De kielspeling is gemiddeld meerdere meters, met een bandbreedte tussen 37 cm en 15 meter. Zie de Figuur hieronder. De verdeling in kielspelingdata is scheef verdeeld, met ruim twee meter als de meest voorkomende kielspeling. Bij stilliggen, in de havens, is de kielspeling in sommige gevallen veel groter tot 15 meter, deze schepen leggen mogelijk aan in zeehavens. Dit lijkt vooral het geval bij tankers. In een aantal gevallen was kielspelingdata niet betrouwbaar bevonden, en zijn de schepen weggelaten uit de figuur.

De spreiding in de kielspeling laat zien dat voor het grootste deel van de tijd de afstand tussen de bodem van de vaarweg en het schip groot is, en maar op een klein gedeelte beperkt is tot 30-50 centimeter, met een effect voor de vaarweerstand. Maar deze resultaten laten nog niet zien hoe dat samenhangt met de inzet van het schip. Voor verschillende scheepstypen, bulk, container, en tanker, en op verschillende routes is het beeld duidelijk anders. Bulkschepen laten grotere variatie zien op een gegeven route dan containerschepen. Terwijl tankers de meest nauwe band hebben dicht tegen de maximale belading, behorende bij de minimale kielspeling. In alle groepen van schepen en routes zijn er een aantal uitzonderingen, maar het globale beeld is dat tankers precies afgeladen worden, opgevolgd door containerschepen, en met de grootste variatie, maar nog steeds beperkt, de bulkschepen.

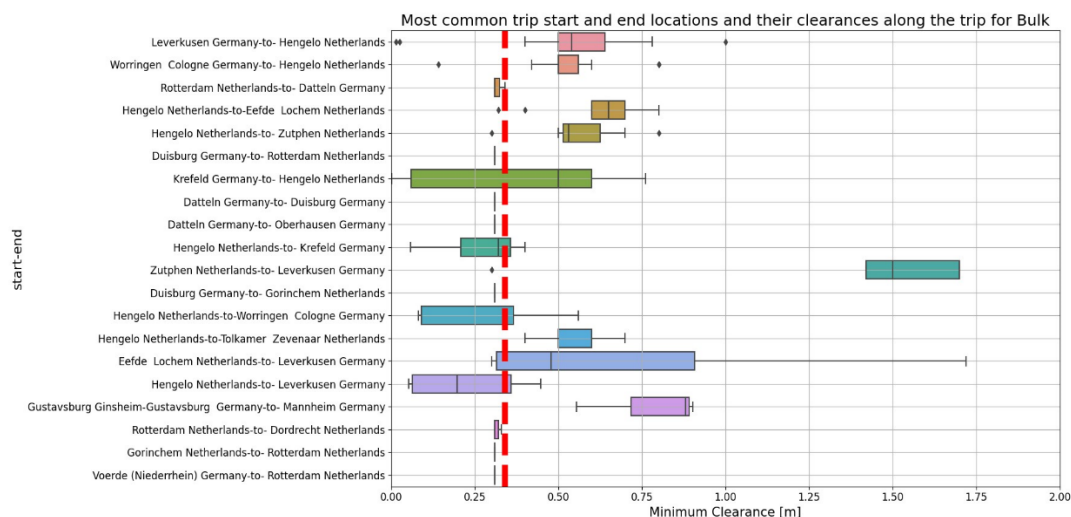
De kielspeling is daarom vooral een belangrijke factor in de inzet van schepen, en, zoals we verderop zullen zien, bepalend voor de kentallen in uitstoot per ton*km. Een route met ondiepe punten, en een schip dat tussentijds niet kan laden en lossen, omdat de lading voorbij dat ondiepe punt moet, heeft ongunstige kentallen die niet vergelijkbaar zijn met andere routes, en zelfs andere type lading. Dit is de voornaamste reden dat kentallen niet zozeer een eigenschap is van het schip, maar vooral van de inzet.

In de huidige modellen voor energieverbruik van binnenvaartschepen is er veel aandacht voor de extra vaarweerstand door beperkte diepte en breedte van de vaarweg. Uit de data van deze schepen volgt dat dat een beperkt effect geeft in Nederland. Er is geen significante correlatie gevonden, los van het effect van stroming, met de kielspeling, zeker niet op de totale trip. Andere stromingseffecten, deels geassocieerd met ondiep water, zoals bochten in rivieren, lijken groter te zijn.



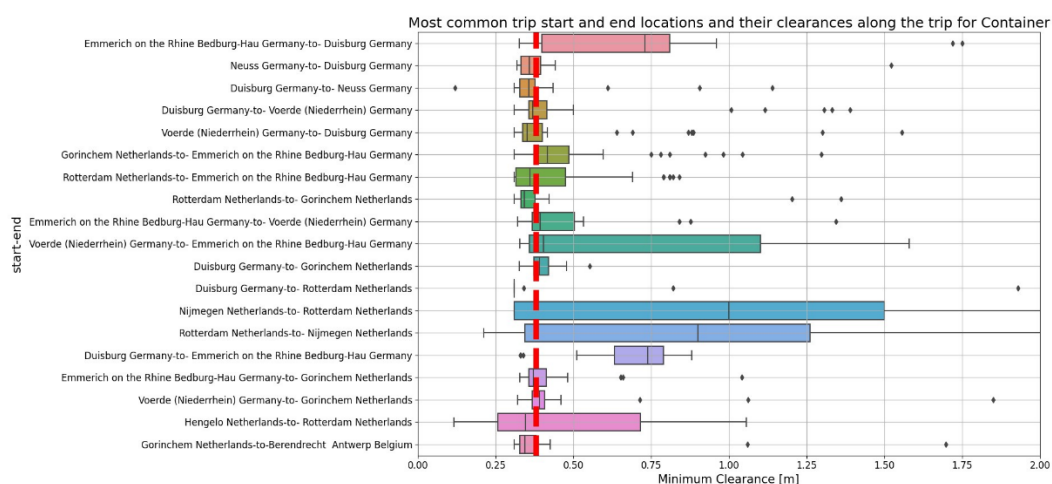
Figuur 5.2: Spreiding van de kielspeling voor snelheden boven (blauw), en onder (oranje) de 0,1 m/s. De gemiddelde kielspeling varend (snelheid groter dan 0,1 m/s) wordt weergegeven in blauwe tekst.

Per route is het beeld aanvullend op de spreiding per schip. De route lijkt bepalend voor de typische minimale kielspeling, vanwege het ondiepste punt op verschillende routes. De gemiddelde kielspeling op de route is altijd velen malen groter dan de minimale.



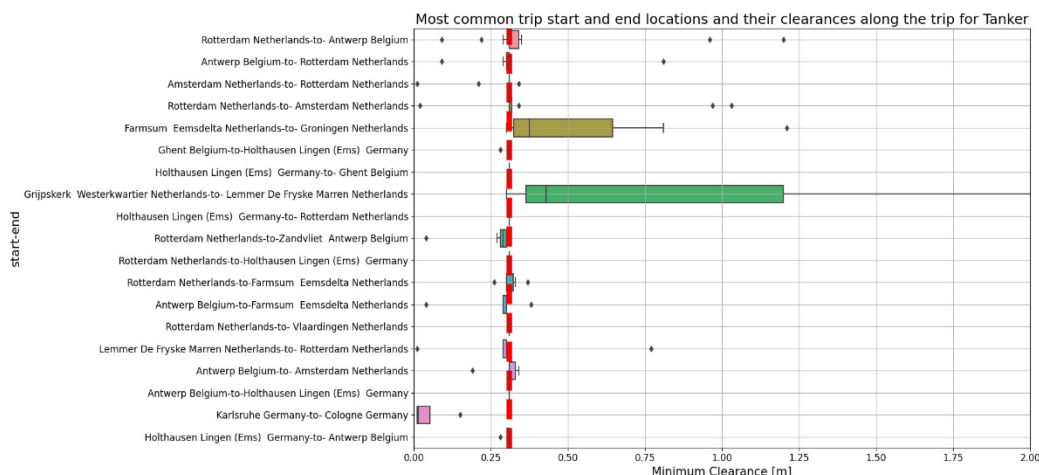
Figuur 5.3: Minimum kielspeling op de door bulkschepen meest gevaren routes. De rode lijn geeft de mediaan van 34 cm aan. Vooral de binnenlandse routes laten veel variatie in de route zelf zien. Deze figuur wordt gegenereerd door te kijken naar de begin en eind locaties van elke trip waar de tripafstand langer is dan 30 km. De 20 routes met de grootste aantal trips worden hier weergegeven – er is geen ondergrens gesteld aan de aantal schepen dat deze routes vaart.

Het verschil tussen bulk en container is duidelijk een beter gebruik van de minimale kielspeling bij containerschepen dan bij bulkschepen, maar de bandbreedte voor containerschepen is groter, wat mogelijk samenhangt met de meerdere laad- en loslocaties en daarmee trips.



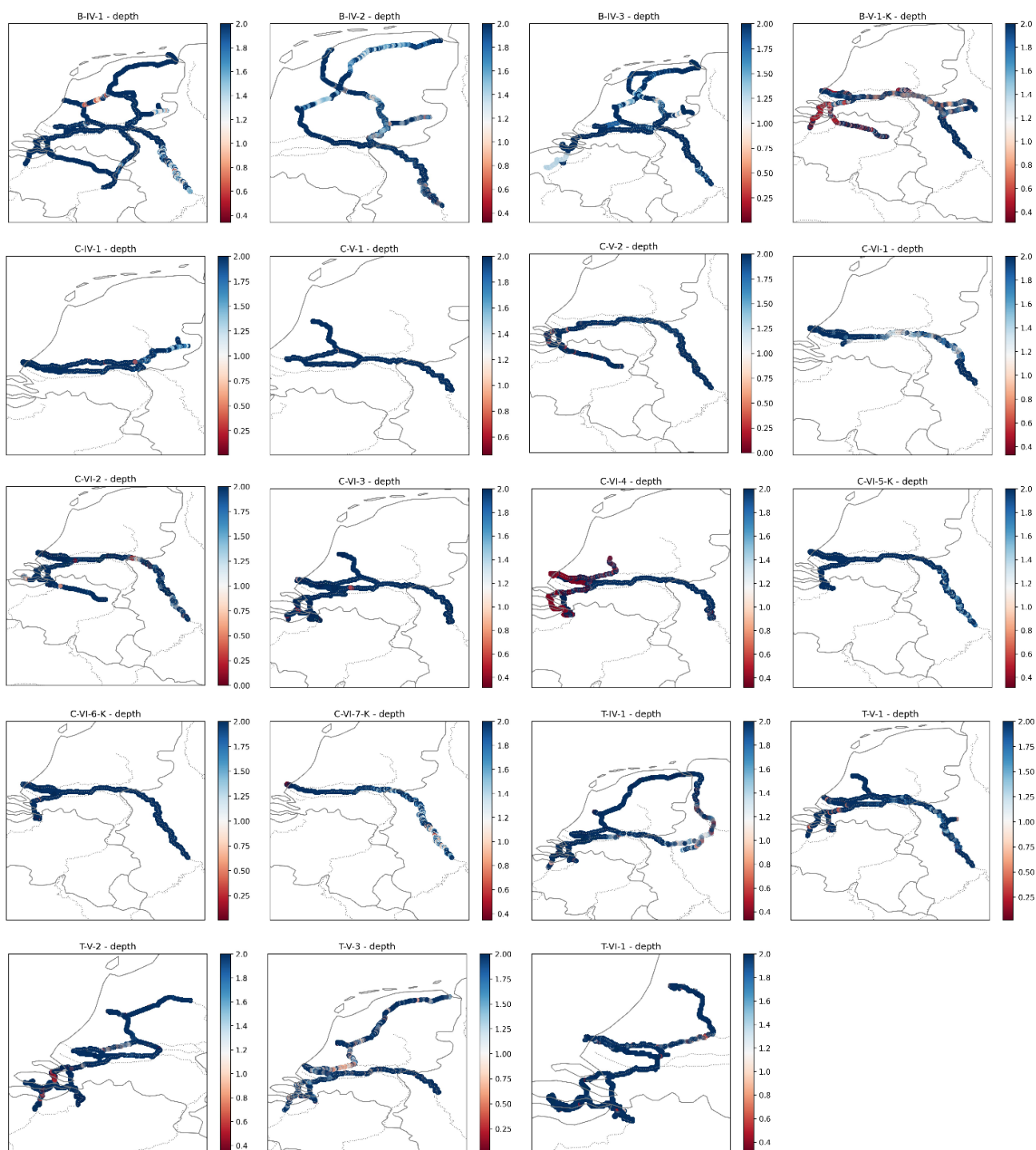
Figuur 5.4: Minimum kielspeling op de door containerschepen meest gevaren routes. De rode lijn geeft de mediaan van 38 cm aan. Deze figuur wordt gegenereerd door te kijken naar de begin en eind locaties van elke trip waar de tripafstand langer is dan 30 km. De 20 routes met de grootste aantal trips worden hier weergegeven – er is geen ondergrens gesteld aan de aantal schepen dat deze routes vaart.

Tankschepen hebben duidelijk de meest nauwkeurige belading om de minimale kielspeling te garanderen. Dat hangt mogelijk ook samen met de vaste routes die de schepen varen en de ervaring opgedaan op deze routes door de schippers.



Figuur 5.5: Minimum kielspeling op de door tankschepen meest gevaren routes. De rode lijn geeft de mediaan van 31 cm aan. Vooral op de Twentekanaal is een grote variatie in kielspeling te zien. Deze figuur wordt gegenereerd door te kijken naar de begin en eind locaties van elke trip waar de tripafstand langer is dan 30 km. De 20 routes met de grootste aantal trips worden hier weergegeven – er is geen ondergrens gesteld aan de aantal schepen dat deze routes vaart.

Om het beeld dat de kielspeling over het algemeen zo rond de 2 meter ligt op de meeste routes te illustreren, zijn de kielspelingen van de verschillende schepen geplot op de kaarten. Let wel, dit hangt niet direct samen met de diepte van de waterweg, maar vooral met de belading op een gegeven route. Zo kunnen in het westen van Nederland, waar vaarwegen over het algemeen diep zijn om toegang te geven aan CEMT VI schepen, de kielspelingen kleiner dan op de rivieren naar het oosten.

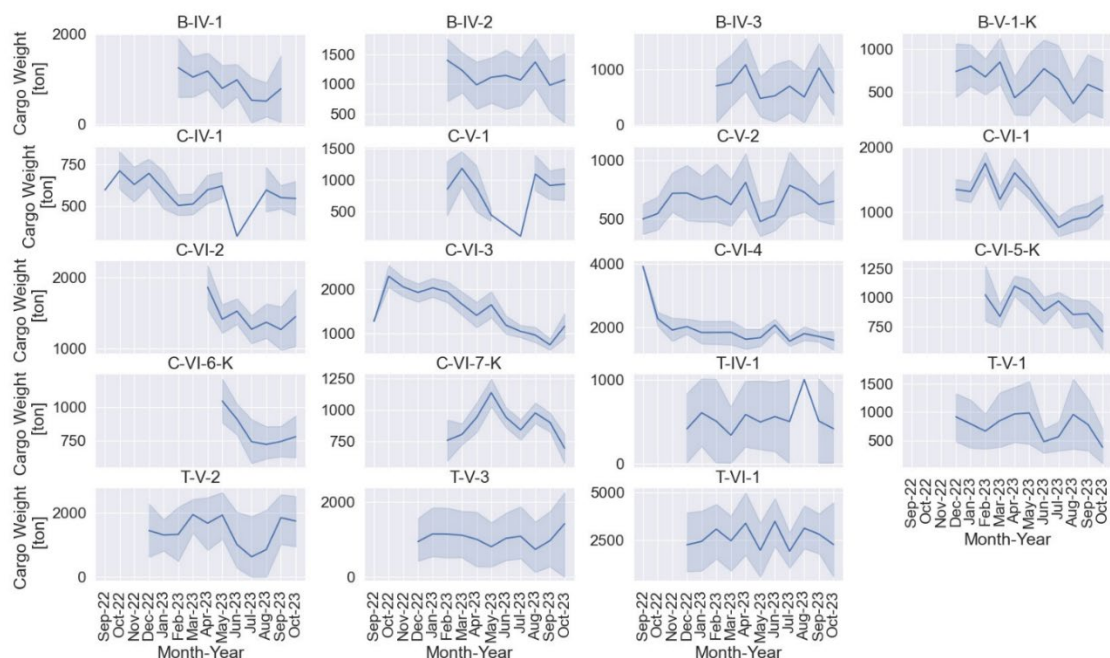


Figuur 5.6 Kielspeling gedurende de meetperiode.

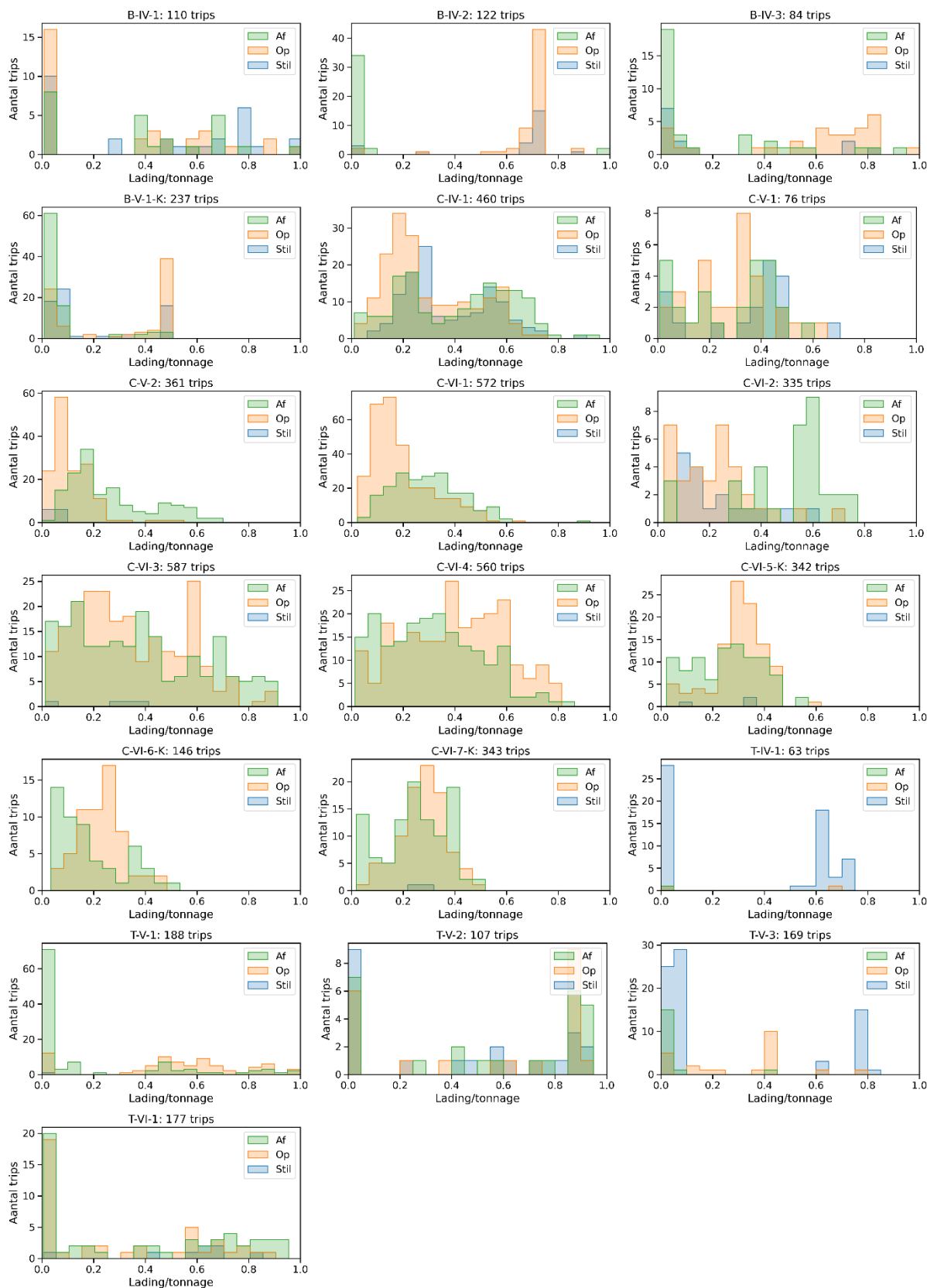
5.2 Belading en waterstand

De minimale kielspeling op een gegeven route bepaalt de hoeveelheid lading die er meegenomen kan worden. Bij laag water kan de belading sterk beperkt zijn, maar met de waterstanden in de zomer van 2022 zijn voor een beperkt aantal schepen een beperkt effect gezien. In de bandbreedte van de belading die er meegenomen wordt, waren de maanden juni en juli een dip voor een aantal containerschepen en twee tankers. Een aantal schepen heeft ook minder gevaren in deze periode, die in de zomervakantie viel, zodat er geen goede bandbreedte vastgesteld kon worden.

In de maandelijkse analyse van belading ([Figuur 5.7](#)) is een variatie aan trends te zien. Voor veel tankers is de gemiddelde belading constant, terwijl er voor een aantal bulk en containers een dalende trend te zien is. In de Figuur is er een duidelijk dip in juli voor meerdere schepen. Er is onvoldoende data om de precieze interacties tussen, routes, beladingsgraad, waterstand en transportvolumevraag te ontrafelen.



Figuur 5.7: Maandelijkse afhankelijkheden van de gemiddelde belading tijdens een trip. Per maand wordt de massa van lading terwijl een schip vaart gemiddeld, lading tijdens stilliggen en manoeuvreren wordt hier dus weggelaten (zie ook [Tabel A.1](#))

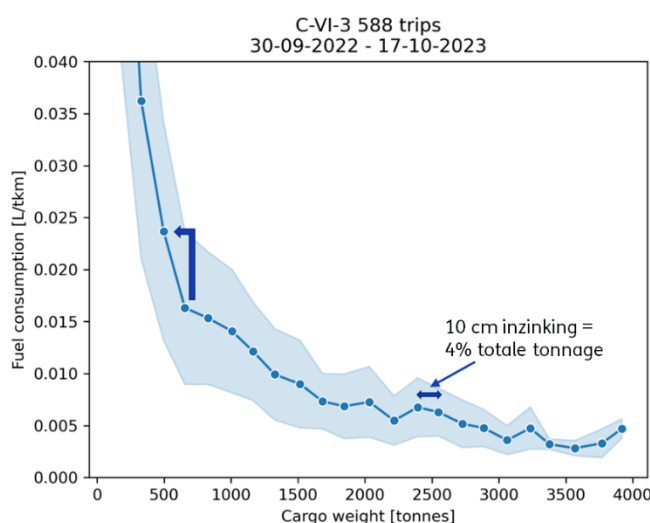


Figuur 5.8: Distributie van ladingsfractie (oftewel de belading gedeeld door de tonnage van het schip) per trip voor stroomopwaarts, -afwaarts, en op stil wateren.

5.2.1 Lage kielspeling beïnvloedt vooral lading

Om verder in te gaan op het effect van kielspeling op de uitstoot per ton*km, is een containerschip met een grote variatie in belading nader geanalyseerd. Naarmate de belading lager wordt neemt het brandstofverbruik per ton*km verder toe. Het containerschip, C-VI-3, heeft een leeggewicht van 1656 ton. (Zie sectie 3.1.) Daarmee zou bij een lading van 1656 ton, de helft van het gewicht lading zijn, en de g/ton*km twee keer zo hoog dan bij $3 * 1656 = 4968$ ton belading, volgens de aannames uit Hoofdstuk 2. Het effect lijkt iets groter te zijn, wat verder wordt onderzocht in Hoofdstuk 7. Dit geeft aan dat een lagere belading om boven de minimale kielspeling te blijven een grote invloed heeft op de g/ton*km. Bij stapjes van 10 centimeter hogere waterstand, en dus meer kielspeling, laat de data zien dat het brandstofverbruik per vervoerde lading snel afneemt. Een verschil van 10 centimeter inzinking is typisch een verschil in belading van 4%.

De ‘bottlenecks’ waar lage kielspeling voorkomen zijn maar voor een heel beperkt aandeel van een trip van invloed op de vaarweerstand. Omdat er wel op dit punt beladen wordt, heeft lage kielspeling een groter effect op het brandstofverbruik vanwege de lagere belading die mee kan, dan de grotere weerstand vanwege lage kielspeling op die punten. Voor C-VI-3 (Figuur 5.9) zou tussen een lading van 660 en 500 ton een verschil in inzinking van 10 cm zijn. Dit verschil van 24% in tonnage leidt tot een verhoging van 45% brandstof per ton*km (zie ook pijl in Figuur 5.9). Verder kan een 30 cm verschil in diepgang vanaf 1500 ton leiden tot een 30% verschil in belading en een verhoging in brandstofverbruik per ton*km van 55%. Als dit schip minder diepgang bij dezelfde lading zou hebben, zou het verbruik per ton*km dus afnemen.



Figuur 5.9: Brandstofverbruik in L/t.km als functie van de belading per trip voor alle trips van C-VI-3. Elk puntje is op een interval van 10 cm inzinking, dit verschil is gemiddeld 4% van de totale tonnage. De gemiddelde belading van C-VI-3 is ca. 1600 ton.

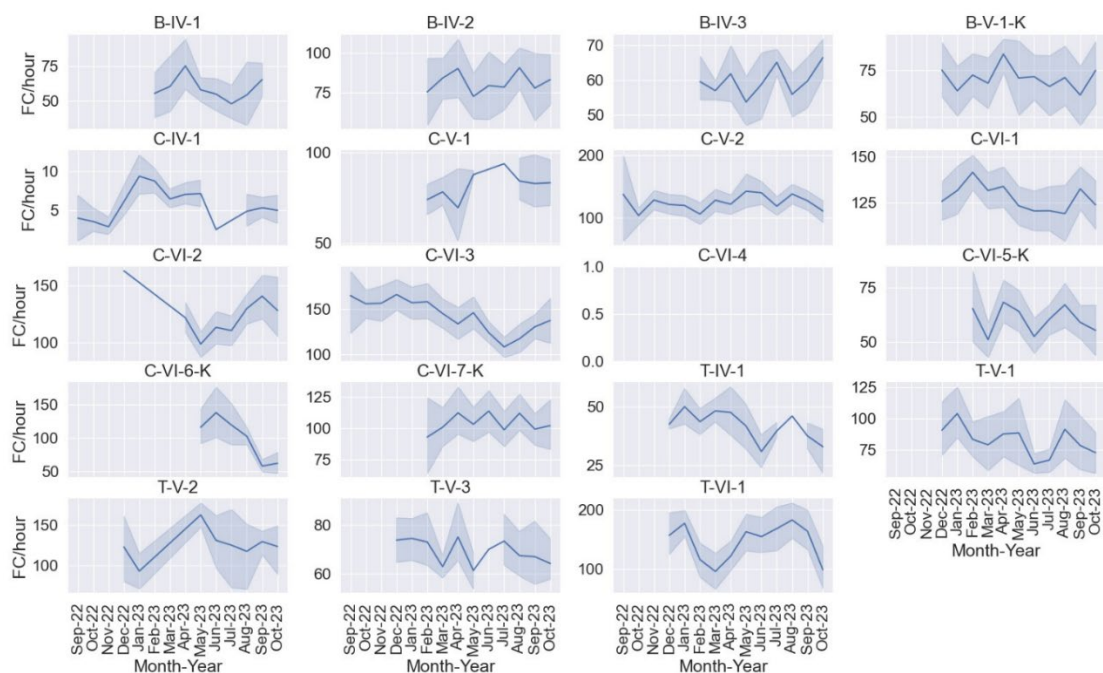
5.3 Brandstofverbruik

Naast geobserveerde verschillen en afhankelijkheden geeft de data ook de mogelijkheid om gemiddelden in brandstofverbruik, per uur, per kilometer en per lading weer te geven voor een typisch beeld van binnenvaartschepen. Schepen hebben een typisch brandstofverbruik varend dat hoort bij een motorbelasting van rond de 30%. Per kW geïnstalleerd vermogen is het maximaal brandstofverbruik per uur daar ongeveer een kwart van.

Bijvoorbeeld, met een vermogen van 1000 kW, is het maximaal brandstofverbruik ongeveer 250 liter per uur. In de praktijk is het brandstofverbruik ongeveer 75 liter per uur, wat overeenkomt met een motorbelasting van 30%. Het brandstofverbruik per uur en per schip vertoont minder variatie dan het brandstofverbruik per ton*km, of per km.

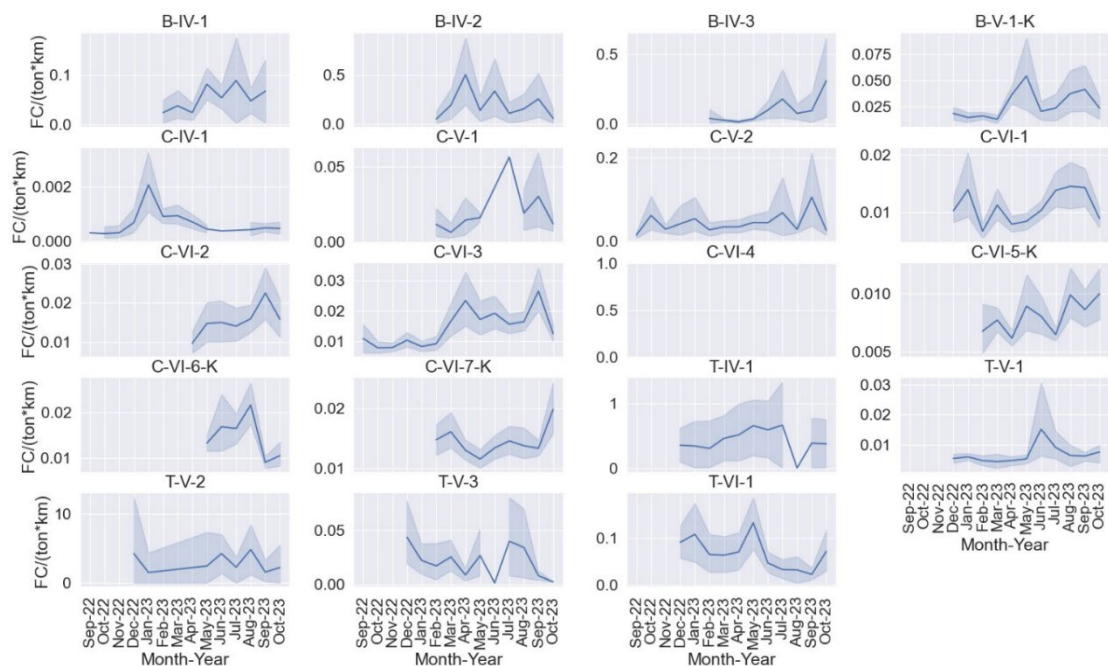
5.3.1 Trip analyse

Gedurende de meetperiode lijken veel schepen een redelijk stabiele (varend) brandstofverbruik per uur te tonen. Wel is er een correlatie met de belading, met lagere gemiddeldes in juli ([Figuur 5.10](#)). Wat betreft brandstofverbruik per tonkilometer is er een grote variatie tussen de schepen, en ook met de tijd ([Figuur 5.11](#)).



Figuur 5.10: Maandelijks gemiddelde van het brandstofverbruik in L/uur tijdens een trip (exclusief stationaire en manoeuvreren brandstofverbruik).

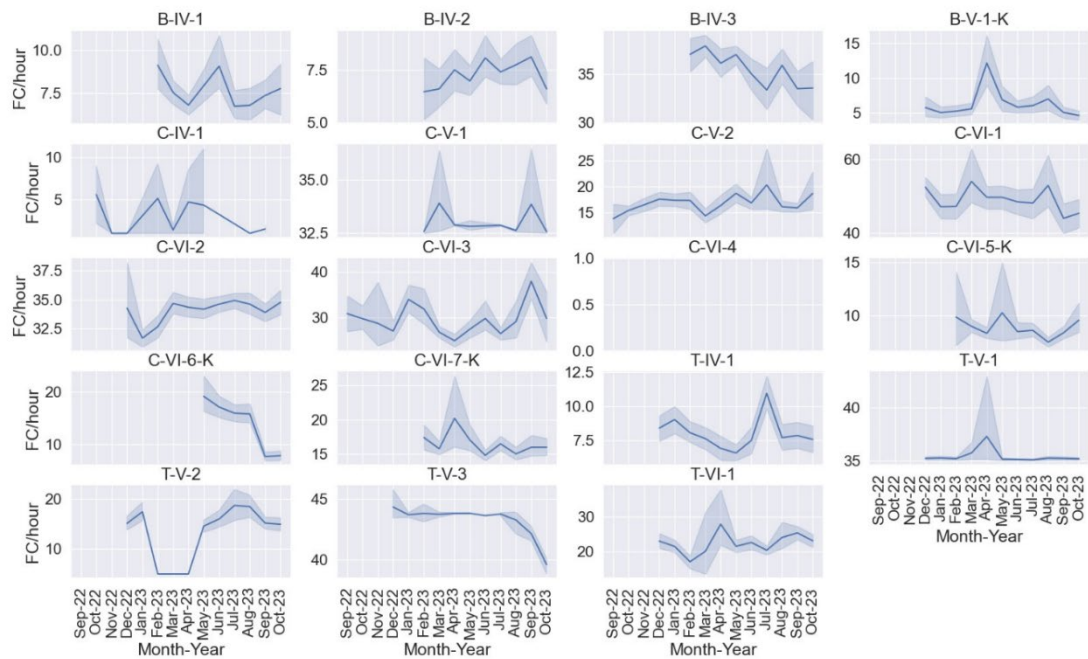
Zoals al eerder geconcludeerd, zijn de brandstofverbruikscijfers in liter per ton*km sterk onderhevig aan de belading. De laagste waarden komen uit op de kentallen die gangbaar zijn, zoals GLEC, en daarmee dus geassocieerd met de ideale situatie van de maximale belading. De uitschieters naar boven kunnen oplopen tot 10 keer de ideale brandstofverbruikscijfers per ton*km.



Figuur 5.11: Maandelijks tripgemiddelde van het brandstofverbruik in L/ton.km tijdens een trip (exclusief stationaire en manoeuvreren brandstofverbruik). Hierbij worden de totale brandstof gebruik in L opgeteld en gedeeld door de totale kilometers keer de gemiddelde lading per trip.

Bij stilliggen met de motor aan is het brandstofverbruik lager, maar zeker niet verwaarloosbaar, met 5 tot 50 liter per uur afhankelijk van het schip. In deze studie is het niet mogelijk geweest de oorzaken van deze verschillen te achterhalen, maar dergelijke hoge waarden en grote verschillen bieden mogelijk aanknopingspunten om brandstof te besparen.

De minimale interne verliezen om wrijving te overwinnen en lucht door de motor te persen van een motor zijn rond de 3% van met maximaal vermogen. Dat betekent dat een motor van 1000 kW tenminste 7 liter per uur verbruikt bij stationair draaien. In sommige gevallen zijn de gerapporteerde waarden lager. De vraag is of daar een systematische afwijking van het gerapporteerde brandstofverbruik is. Dat vraagt nader onderzoek, bijvoorbeeld door vergelijking met geijkte brandstofmeters. Dit valt buiten de scope van huidig onderzoek, omdat daarvoor nog beperkt data beschikbaar en betrouwbaar is.



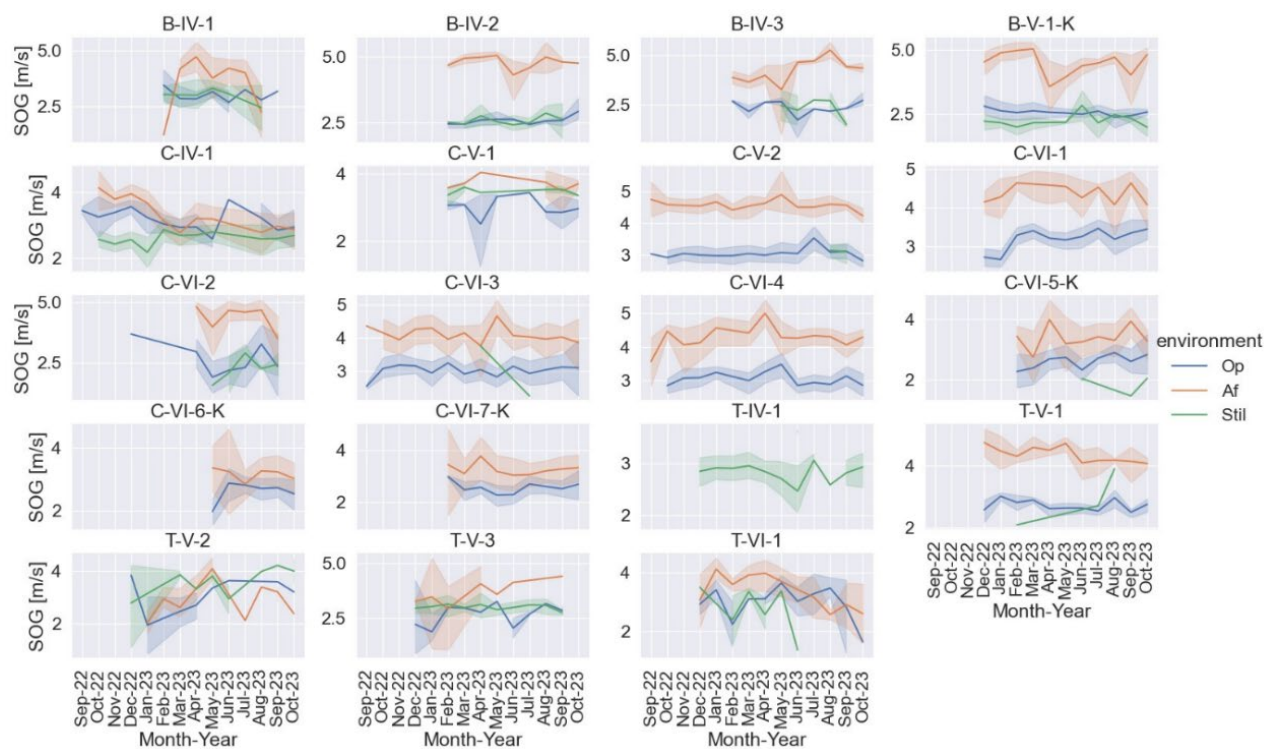
Figuur 5.12: Maandelijks gemiddelde van alle stationaire brandstofverbruik in L/uur (totale brandstofverbruik gedeeld door totale uren)

De hoeveelheid brandstof bij het stilliggen varieert tussen de 1% en 19% van het totale brandstofverbruik, maar typisch enkele procenten van het totaal. Niet in alle gevallen kan de motor bij stilliggen uitgezet worden, vanwege veiligheid of regelgeving. In sommige gevallen kan het gevraagd vermogen geleverd worden door een andere, kleinere motor, waarmee de verliezen beperkt blijven.

Tabel 5.1: Het brandstofverbruik tijdens stilliggen als percentage van totale brandstofverbruik

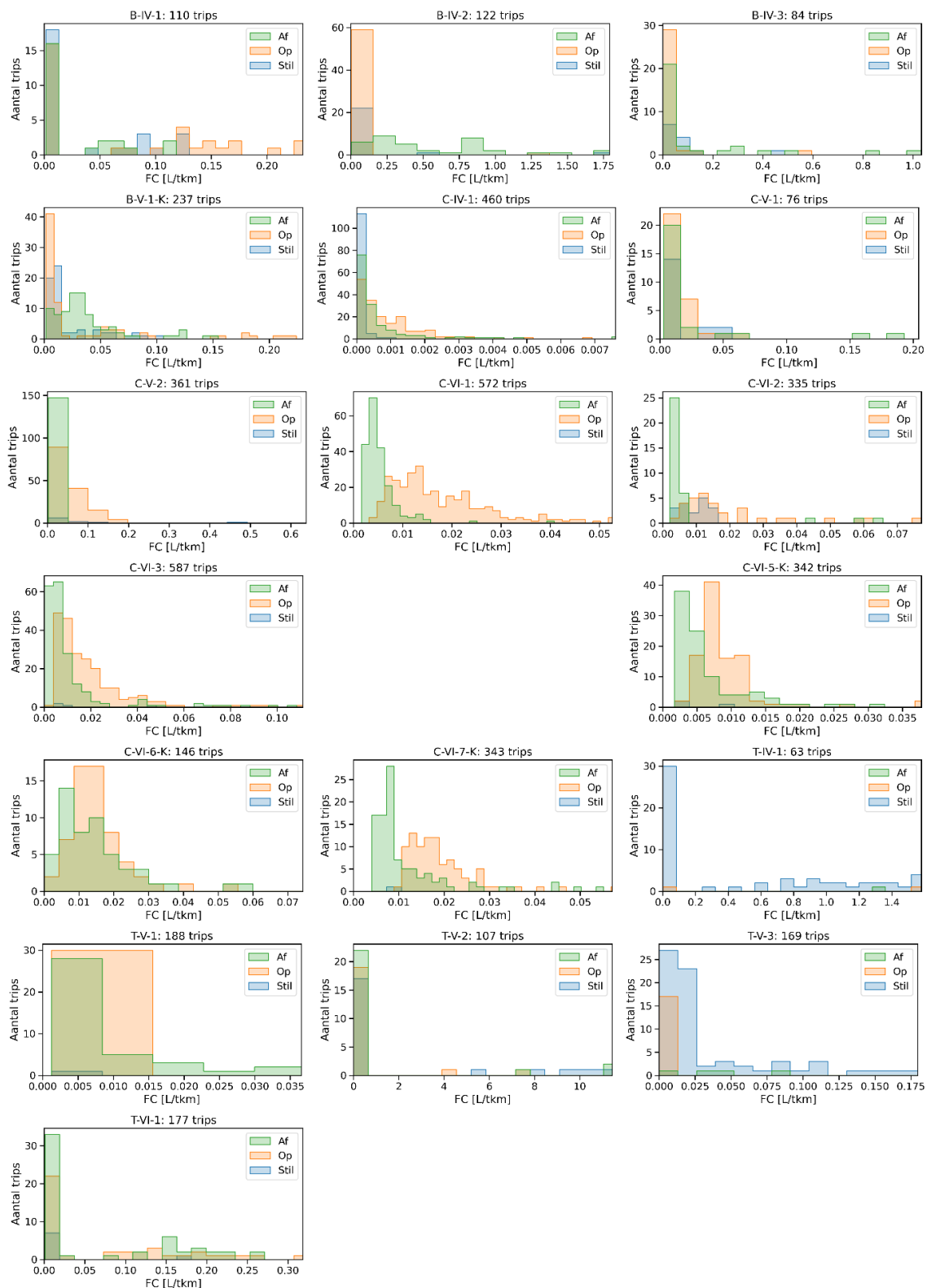
Schip	Stillig brandstof van totaal [%]	Stillig tijd van totaal [%]
B-IV-1	1	11
B-IV-2	1	9
B-IV-3	6	11
B-V-4-K	1	13
C-V-1	5	12
C-V-2	1	9
C-VI-1	19	44
C-VI-2	5	19
C-VI-3	4	18
C-VI-5-K	1	12
C-VI-6-K	1	13
C-VI-7-K	2	14
T-IV-1	4	16
T-V-1	8	20
T-V-2	4	29
T-V-3	7	11
T-VI-1	4	24

Een belangrijke variatie in het brandstofverbruik hangt samen met de stroming, maar ook in combinatie met de snelheid stroom op en stroom af. Hierin laten de verschillende schepen en schippers de grootste verschillen zien. De meeste gevallen hebben betrekking op de Rijnvaart, maar wel met verschillende bestemmingen.



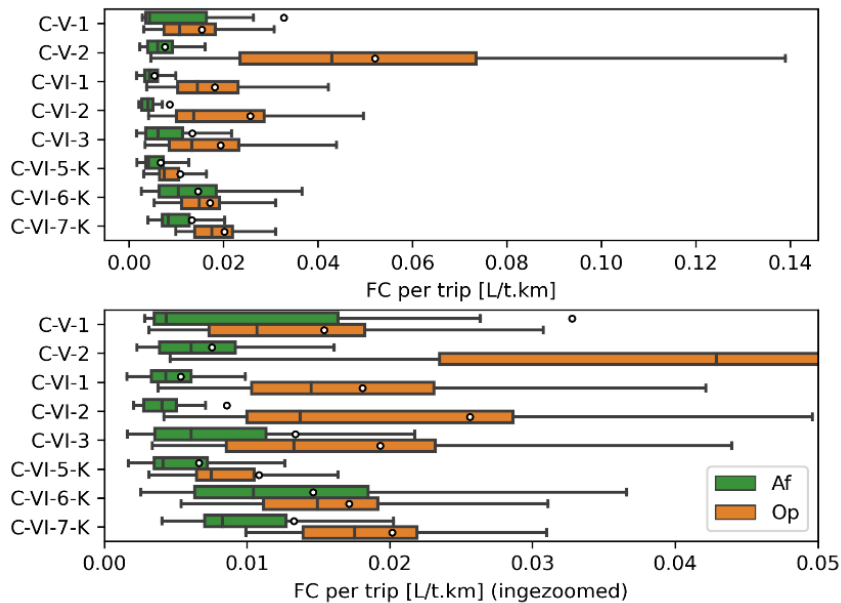
Figuur 5.13: Gemiddelde snelheid per maand voor stroomop- en afwaarts, en stil wateren

In Hoofdstuk 5.4 wordt een specifiek stuk van de route genomen om schepen te vergelijken op dezelfde vaarweg en daar is hetzelfde effect zichtbaar. Een typisch maximaal verschil in snelheid tussen stroom op en stroom af varen is een factor twee met 2,5 m/s tegen 5,0 m/s, zoals voor B-IV-2. Andere schepen laten kleinere verschillen zien.



Figuur 5.14: Distributie van brandstofverbruik in L/t.km als functie voor stroomop- en afwaarts en voor stil wateren.

In het brandstofverbruik van de B-IV-2 is ook duidelijk zichtbaar dat het schip volgeladen stroomopwaarts vaart, met een ideale uitstoot per ton kilometer, en stroomafwaarts nauwelijks beladen is. De verschillen tussen de belading stroomopwaarts en stroomafwaarts zijn duidelijk zichtbaar voor alle schepen, en laat zien dat in de inzet dit een extra complexiteit is voor de vertaling naar kentallen per schip. Over het algemeen is het brandstofverbruik per ton*km hoger stroomopwaarts, maar grote verschillen worden geobserveerd door het verschil in belading in beide richtingen. Daarbovenop komt nog de keuze van snelheid stroomafwaarts.



Figuur 5.15: Brandstofverbruik per trip per stroomaf- en opwaarts voor containerschepen. De onderste paneel laat een ingezoomde versie zien. Stroomafwaarts heeft structureel lager brandstofverbruik in L/t.km. De balken geven de 25^e – 75^e percentielen aan, de witte stipjes de gemiddelde en de lijnen de buitenste punt dat binnen 1.5 keer de tussenkwartiel afstand valt van de balk.

Het is niet mogelijk simpele kentallen af te leiden voor het verschil tussen stroomopwaarts en stroomafwaarts. Dat komt door vier effecten die door elkaar lopen: Ten eerste varen verschillende schepen op verschillende routes met verschillende belading vanwege ondiepe punten, en ten tweede zijn er verschillen in stroming op delen van de route. Ten derde is de belading stroomopwaarts en stroomafwaarts vaak verschillend. Ten vierde is de keuze van de snelheid, vooral stroomafwaarts, sterk bepalend voor het brandstofverbruik.

5.3.2 Spreiding in brandstofverbruik laat verschillen in inzet zien

De motorbelasting, zichtbaar in het brandstofverbruik per uur, is een belangrijk gegeven om de inzet van schepen en keuzes van de schipper te analyseren. Een schipper kan bijvoorbeeld kiezen om een vaste snelheid te varen, of met een vast vermogen of toerental. Met de stroming in een rivier zal in het laatste geval de snelheid variëren. Terwijl in het eerste geval het vermogen varieert. Brandstofverbruikscijfers in frequentie waarin verschillende liters per uur voorkomen zijn daarmee een soort fingerprint van de insteek van de schipper.

Duidelijke pieken in het brandstofverbruik geven aan dat een schipper een vaste motorlast voor stroomopwaarts, stroomafwaarts, en op stil water kiest. Een grotere spreiding in de het instantaan brandstofverbruik duidt mogelijk op een keuze van een vaarsnelheid.

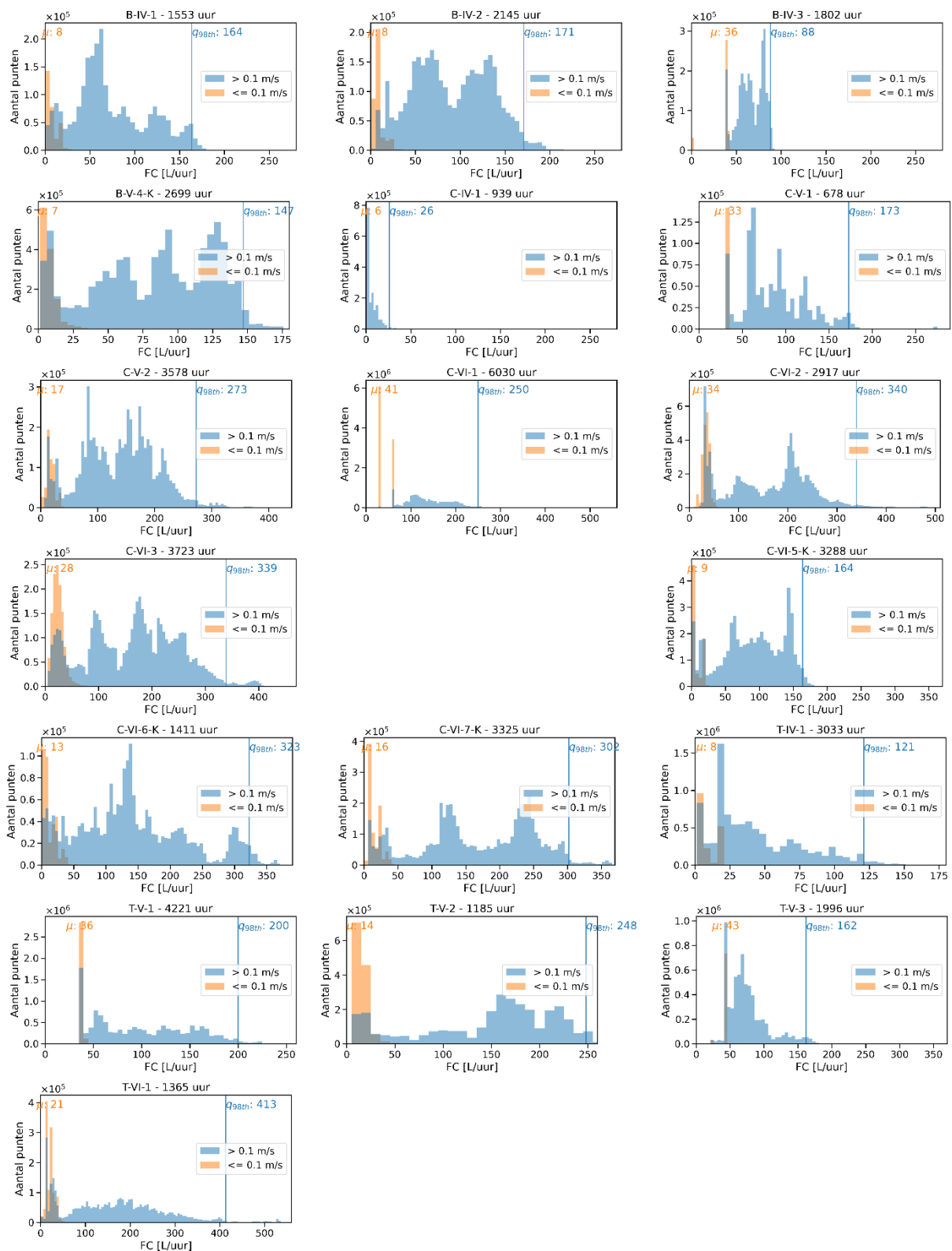
Om dit verder te analyseren is er ook gekeken hoe het brandstofverbruik met de vaarsnelheid stroomopwaarts en stroomafwaarts samenhangt. En inderdaad, schepen met een grote spreiding in brandstofverbruik stroomopwaarts lijken vast te houden aan een gegeven snelheid. Daarmee is het ook moeilijk uit dergelijke data een relatie tussen snelheid en brandstofverbruik af te leiden, omdat de schipper de motor harder laat draaien om een vaste snelheid te houden bij stroming.

De distributie in brandstofverbruik per uur van alle datapunten die verzameld zijn tonen de verschillen in inzet ([Figuur 5.16](#)). Bijvoorbeeld voor B-IV-2 zijn er twee duidelijke pieken te zien voor snelheid > 0.1 m/s, terwijl er voor B-IV-4-K drie pieken zijn. C-VI-2 heeft daarentegen een hele duidelijke piek rond 200 L/uur, waarschijnlijk een reflectie van een operationele keuze ([Figuur 5.17](#)). De 98^e percentiel van de brandstofverbruik laat zien welk deel van het totale geïnstalleerde motorvermogen in deze meetperiode wordt ingezet. Voor containerschepen is dit gemiddeld 63%, voor tankers 71% en voor bulkschepen 59%. De distributie van het stationair brandstofverbruik laat ook variaties zien. Sommige schepen hebben maar een duidelijke smalle piek, terwijl anderen een bredere piek hebben. C-VI-1 heeft twee pieken, hetgeen waarschijnlijk wordt verklaard door deze keuze of één of twee van de hoofdmotoren draaien terwijl het schip stilligt. Ook het gemiddelde stationair brandstofverbruik wordt in [Figuur 5.16](#) weergegeven. Dit is een brandstofverbruik dat kan worden beschouwd als efficiëntieverlies van de motor, omdat deze energie nodig is om de motor draaiende te houden en dit niet bijdraagt aan de voortstuwing van het schip. Des te groter de motor, des te groter de absolute verliezen qua brandstofverbruik: gemiddeld zijn hier de verliezen 5% van het totale geïnstalleerde vermogen.

De verhouding tussen aandeel brandstofverbruik tijdens stilliggen ten opzichte van het totaal, en de tijd daarvan varieert tussen schepen en inzet. Die van bulkschepen ligt bijvoorbeeld lager dan die van tankers, misschien in verband met hulpfuncties op de hoofdmotor die nodig zijn voor het laden en lossen van tankers. Waarschijnlijk is er wel een ondergrens waaraan een bepaald schip moet voldoen met betrekking tot minimum stilligverbruik, maar in het geval van C-VI-1 lijkt er zeker ruimte om de stilligemissies te verlagen: 19% van het brandstofverbruik gebeurt tijdens het stilliggen.

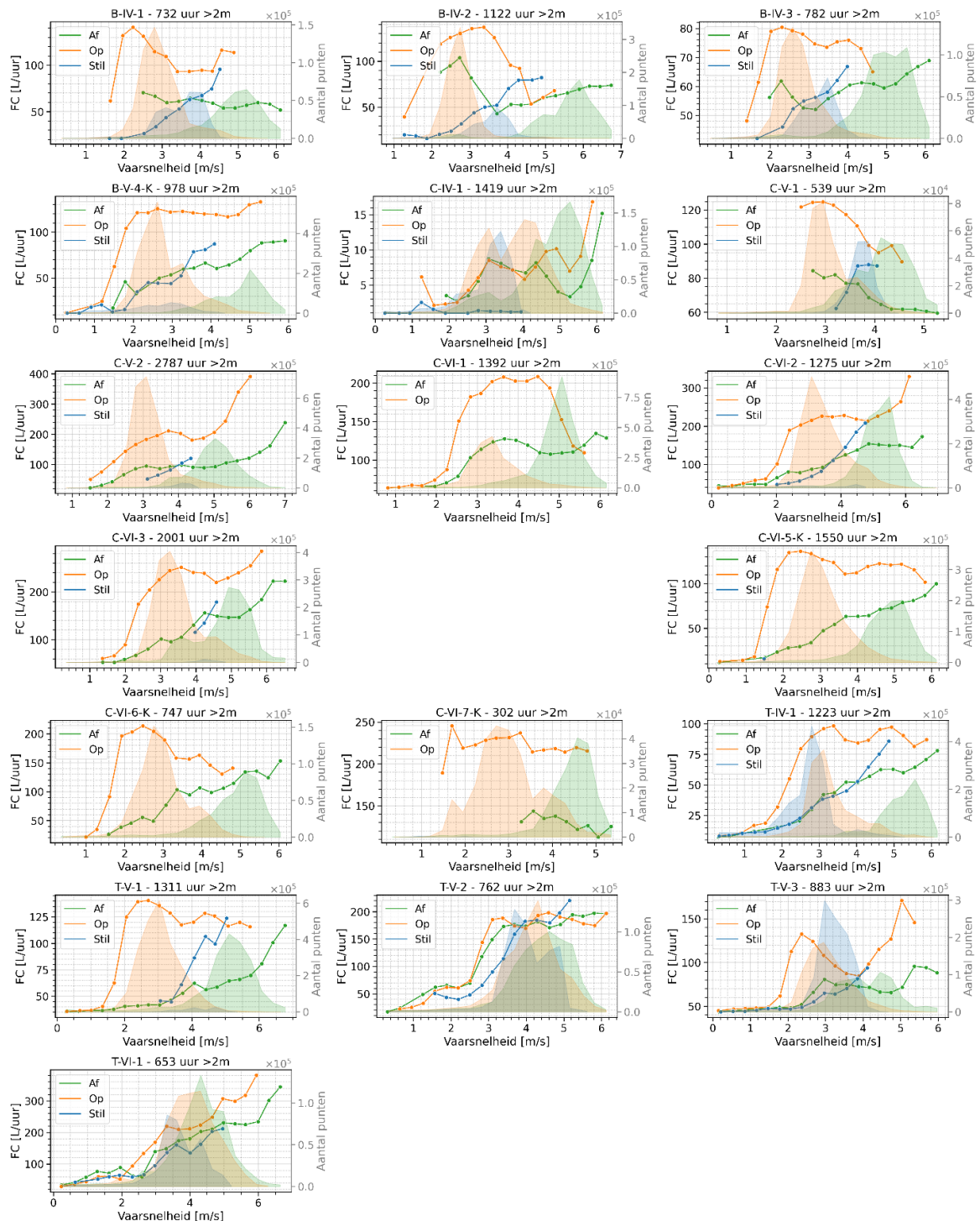
De inzet verschillen zijn ook duidelijk te zien in [Figuur 5.17](#) waar het brandstofverbruik als functie van snelheid wordt getoond. Voor veel schepen is het brandstofverbruik stroomopwaarts hoger dan stroomafwaarts, maar dat geldt niet voor C-IV-1. Bij T-V-2 en T-VI-1 is te zien dat deze schepen met bijna dezelfde snelheid op en afwaarts varen, waardoor het brandstofverbruik ook hoger is. Verder is er voor meerdere schepen te zien dat er een scherpere piek in de snelheid stroomopwaarts is, die de suggestie opwekt dat er met een vast toerental de rivier op wordt gevaren.

De trend van brandstofverbruik met snelheid is niet altijd positief zoals zou worden verwacht, maar kan ook negatief of vlak zijn, door de keuze van de schipper. De verschillende factoren die meespelen en invloed uitoefenen op brandstofverbruik (zoals ook in Hoofdstuk 5 wordt toegelicht) maakt het lastig om dit in groot detail te voorspellen of generaliseren.



Figuur 5.16: Spreiding van brandstofverbruik in liters/uur voor snelheden boven (blauw), en onder (oranje) de 0,1 m/s. Gemiddelde brandstofverbruik van < 0,1 m/s wordt weergegeven in oranje tekst, terwijl de 98^e percentiel van > 0,1 m/s wordt weergegeven in het blauw. De x-as is geschaald op het totale vermogen van de motor.

Om het verband tussen snelheid en brandstofverbruik te bepalen hieronder was het wel noodzakelijk om de data te beperken tot stukken waar de snelheid constant is, zonder versnellen of vertragen, wat het beeld verstoort.

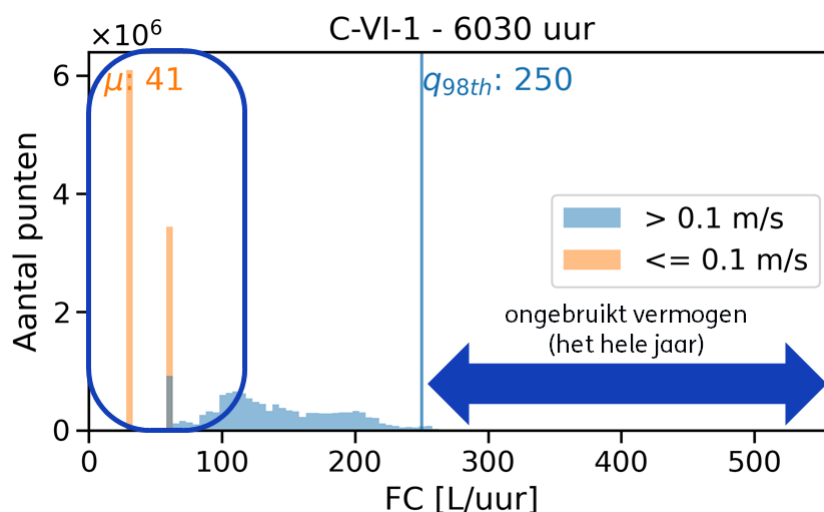


Figuur 5.17: Brandstofverbruik in liters per uur in verschillende stromingen (gekleurde lijnen) als functie van vaarsnelheid, waar de vaarsnelheid constant is en meer dan 1 m/s, en met een kielspeling meer dan 2 meter. De gekleurde vlakken geven de aantal gemeten punten per snelheid, oftewel de snelheidsdistributie.

Een aantal schepen laat het bekende beeld zien zoals dat ook in Hoofdstuk 2 beschreven staat, maar veel schepen wijken hiervan af en geven geen typische parabolische relatie tussen snelheid en brandstofverbruik. Dit is de keuze van de schipper, waarbij een dip in brandstofverbruik een indicatie is van een hogere snelheid, daar waar het mogelijk is zonder de motor zwaar te belasten. Dit is een indicatie van strategisch varen door de schipper.

5.3.3 Kleiner motoren hebben minder interne verliezen

Vaak wordt een motor geïnstalleerd met oog op toekomstige mogelijkheden, met een grotere motor is er mogelijkheid tot een koppelverband of kan een schip 'goed doorverkocht worden'. Met een grotere motor zijn wel de interne verliezen hoger, dit is extra brandstofverbruik (en dus CO₂ uitstoot) dat elke uur wordt uitgestoten. In het geval van C-VI-1 (Figuur 5.18) zou het gebruik van een kleinere 1040 kW motor in plaats van het totaal geïnstalleerd vermogen van 2200 kW 51000 liter per jaar kunnen besparen gebaseerd op het vermogen dat werd ingezet tijdens de meetperiode.



Figuur 5.18: Brandstofverbruik distributie tijdens stilliggen (oranje) en varen (blauw). De x-as is geschaald naar het totaal geïnstalleerd vermogen. De blauwe pijl geeft aan hoeveel hiervan niet gebruikt wordt. Het gemiddelde brandstofverbruik tijdens stilliggen kan worden gezien als de interne verliezen (in blauwe cirkel).

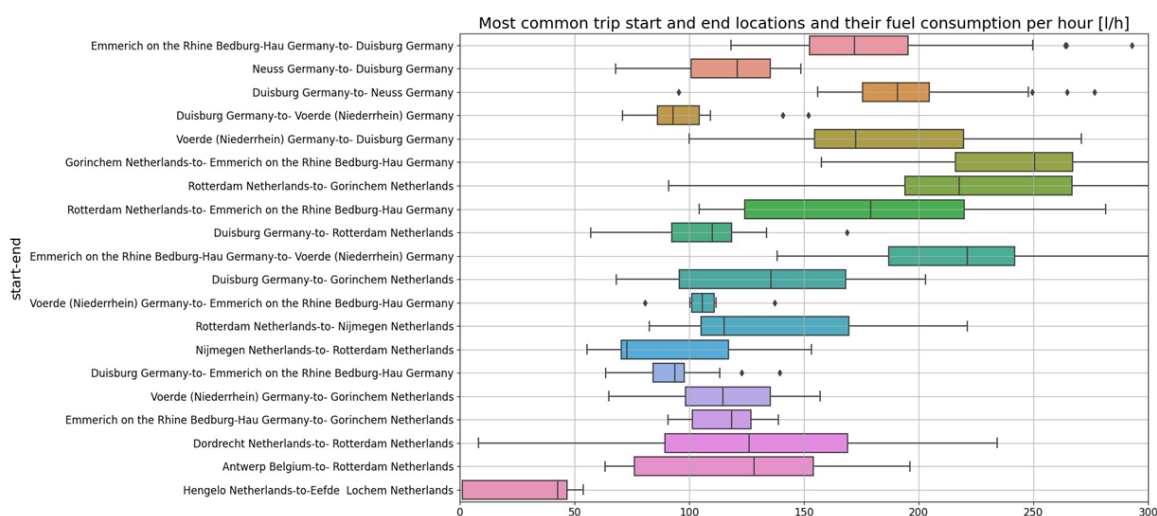
Zoals eerder aangegeven zijn de verliezen van de motor geassocieerd met de grootte van de motor. Bij het stationair draaien levert de motor geen arbeid, en is het brandstofverbruik volledig nodig voor het overkomen van de interne wrijving en arbeid om de motor zelf draaiende te houden. Dat is de ondergrens van het brandstofverbruik die voortkomt uit de interne weerstand van de motor. Bij hogere toerentallen kunnen de verliezen tot 100% hoger zijn, maar is de efficiëntie vaak beter dan een kleinere motor. Een goede vuistregel is dat het stationair brandstofverbruik een conservatieve maat is voor de verliezen van de motor, en daarmee de verschillen tussen grote en kleinere motoren aangeeft.

Aan de andere kant lijkt het motorvermogen proportioneel toe te nemen met groeiende oppervlakte (lengte x breedte) van het schip. Op basis van de vaarweerstand, zou een kleinere toename te verwachten zijn. De motorvermogens nemen relatief toe met de grootte van het schip, en daarmee ook de interne verliezen. Dat is zichtbaar in schepen met een maximaal brandstofverbruik boven de 250 l/uur (meer dan 1000 kW geïnstalleerd vermogen), die vaker een gerealiseerd brandstofverbruik in een bandbreedte ruim onder

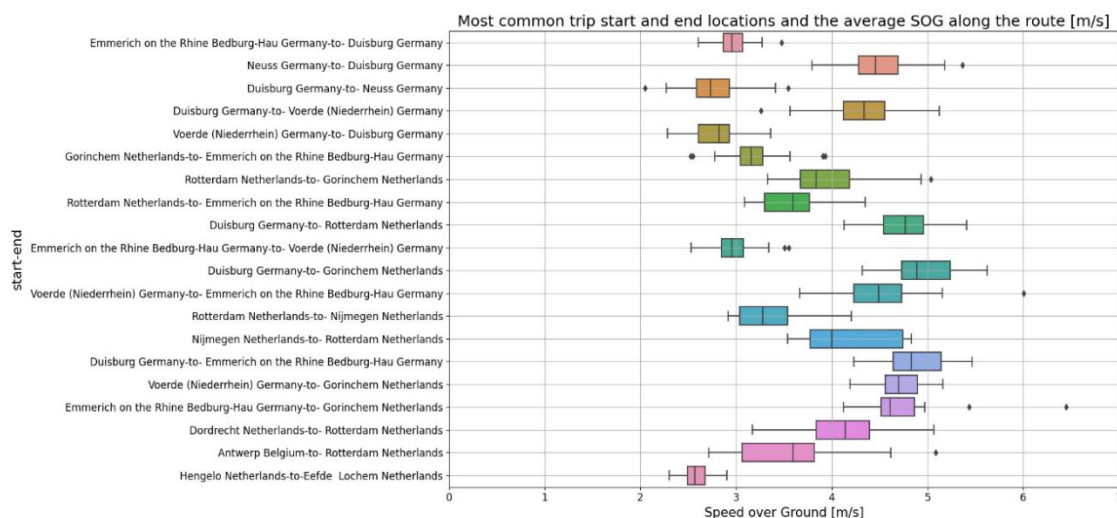
dat maximum. Als vuistregel kan worden aangenomen dat daarmee brandstofverbruik 3% of meer is dan bij een passend motorvermogen.

5.4 De meest voorkomende routes

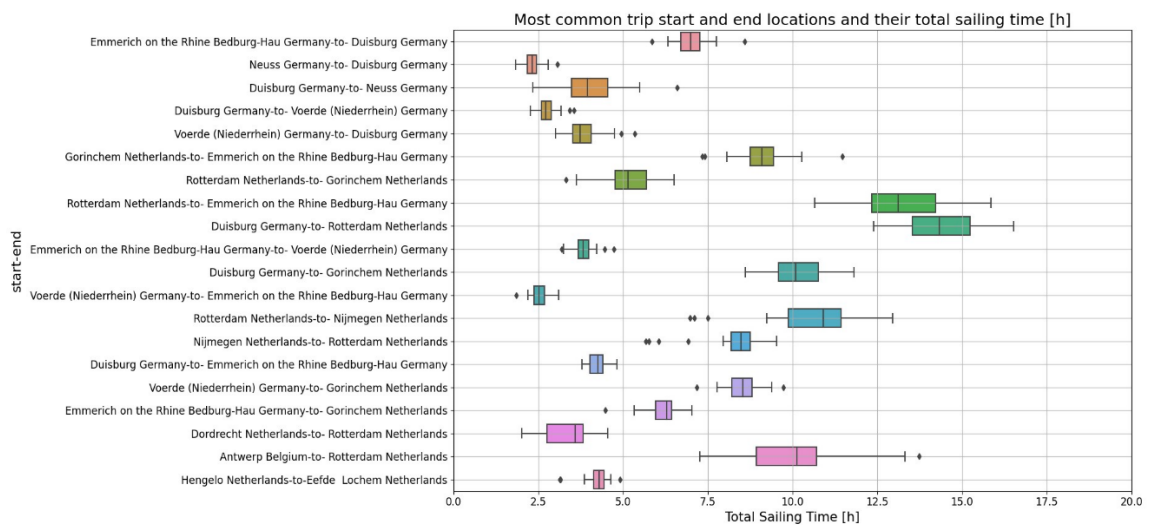
Het brandstofverbruik, gemiddelde snelheid, en duur van de 20 routes die het meest gevaaren waren, worden in de figuren hieronder weergegeven. Deze routes zijn niet altijd herkenbaar, omdat ze gebaseerd zijn op laad en los-locaties, en niet op begin- en eindpunt. Maar voor kentallen in g/ton*km, is het onderscheid in deze trip essentieel om brandstofverbruik te vertalen naar de vervoersvraag. Er is een grote variatie in brandstofverbruik (Figuur 5.19) die ook deels afhankelijk is van de verschillende schepen.



Figuur 5.19: Gemiddelde brandstofverbruik per trip voor de 20 meest voorkomende tripvaarroutes. De balken geven de 25^e – 75^e percentielen aan, de witte stipjes de gemiddelde en de lijnen de buitenste punt dat binnen 1.5 keer de interkwartielafstand valt van de balk



Figuur 5.20: Gemiddelde snelheid per trip voor de 20 meest voorkomende tripvaarroutes



Figuur 5.21: Gemiddelde tijd per trip voor de 20 meest voorkomende tripvaarroutes

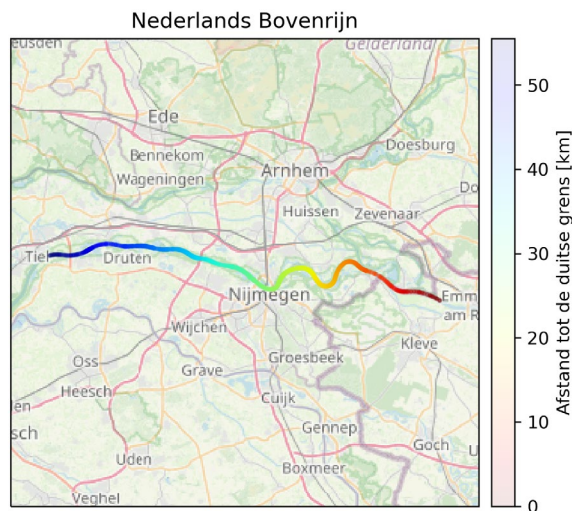
5.4.1 De Nederrijn/Waal als vergelijkingstraject

Omdat de verschillende schepen op verschillende routes varen, zijn ze daarmee niet goed vergelijkbaar, omdat brandstofverbruik sterk van de route afhangt. Doordat sommige schepen verder Duitsland in varen komen ze langs ondiepere punten en is de belading minder, vaak ook in Nederland. Schepen en hun brandstofverbruik zijn beter vergelijkbaar op dezelfde route. Door het vergelijken op een route waar veel schepen varen is de spreiding in deze data minder, en de vergelijking minder onderhevig aan verschillen in inzet.

Veel van de schepen varen op de Nederlandse “Bovenrijn” (**Figuur 5.22**) tussen Tiel en de Duitse grens. Daardoor is er voldoende data om dit traject te gebruiken om de schepen te vergelijken. Zo is in **Figuur 5.23** het gemiddelde brandstofverbruik en snelheid per 100 m vanaf de grens stroom op- en afwaarts vergeleken. Veel schepen lijken met een vrij constante snelheid stroomopwaarts te varen, rond de 3 m/s. Daarbij is er een aantal container schepen die sneller varen. Verder is er voor de meeste schepen een piek in brandstofverbruik te zien stroomopwaarts rond 26 km van de Duitse grens in combinatie met een dip in snelheid. Dit wordt veroorzaakt door het manoeuvreren door de bochten in de rivier ten oosten van Nijmegen. Voor B-V-1-K valt op dat het brandstofverbruik per ton per uur stroomopwaarts lager is dan stroomafwaarts, waarschijnlijk is de lagere belading stroomafwaarts hier de oorzaak van.

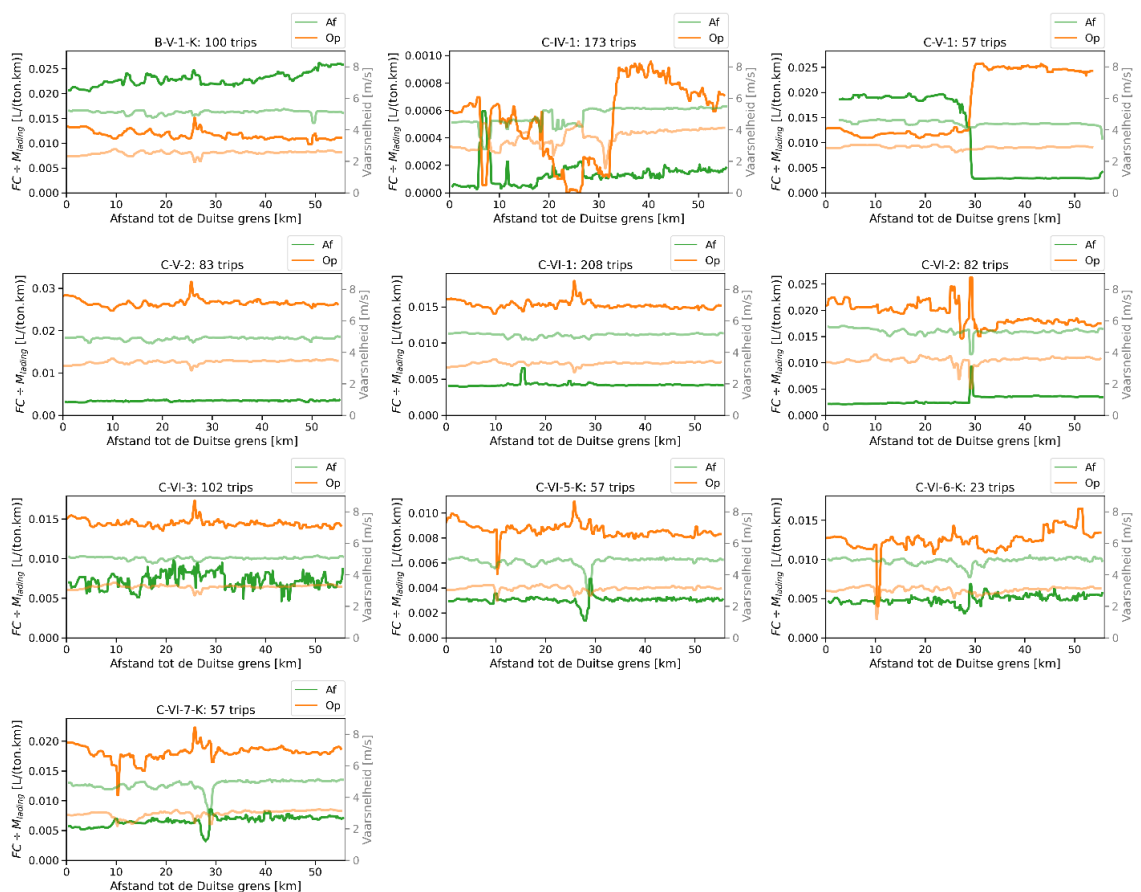
Voor C-VI-2 en C-VI-3 is er wel een verschil in stroomafwaarts brandstofverbruik te zien. Ook al gaan beide schepen met een snelheid van circa 5m/s stroomafwaarts, toch is het verbruik van schip C-VI-2 een stuk stabiel.

Vanuit ervaring was er oorspronkelijk verwacht dat er een variatie in het motorvermogen of snelheid in de verschillende delen van de rivier zou zijn, afhankelijk van de stroming (daar waar de rivier breder is zou de stroming minder zijn). De ene schipper zou de snelheid stabiel houden, waardoor de vermogensvraag zou variëren, en de andere schipper zou het vermogen constant houden, waardoor de snelheid zou variëren. Vanuit deze analyse is daar geen duidelijke aanwijzing voor.



Figuur 5.22: De Nederlandse Bovenrijn (d.w.z. Nederrijn en Waal) tussen Tiel en de Duitse grens. De kleuren geven de afstand tot de Duitse grens aan.

De vaarsnelheid van schepen is redelijk constant op deze route, zoals zichtbaar in vagere lijnen in de figuur hieronder. De motorbelasting, in de duidelijkere lijnen, varieert meer.



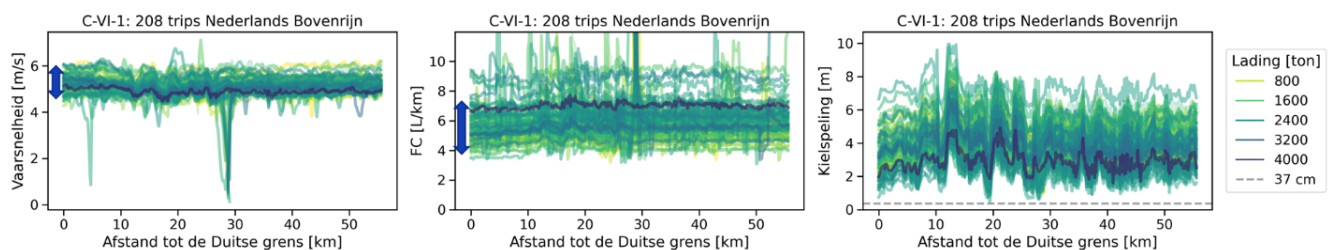
Figuur 5.23: Brandstofverbruik per ton lading (donkere lijnen) en gemiddelde snelheid (lichte lijnen) stroom op- (oranje) en afwaarts(groen) per 'hectometerpaaltje' langs de Nederlandse Bovenrijn.

Sommige schepen compenseren stroomopwaarts deels de hogere vaarweerstand, schijnbaar geassocieerd met bochten op locaties 10 tot 20 kilometer van de Duitse grens, omdat het brandstofverbruik omhoog gaat en de snelheid omlaag. In andere gevallen is er nauwelijks een duidelijke trend te ontdekken, behalve dat brandstofverbruik meer en onregelmatiger varieert dan de snelheid, zowel stroomopwaarts als stroomafwaarts. Wat wel duidelijk opvalt zijn de grote verschillen in brandstofverbruik tussen de verschillende schepen stroomafwaarts, ook geassocieerd met verschillen in snelheid, die wel veel kleiner zijn, omdat de stroming van de rivier een deel van de snelheid ten opzichte van de grond bepaalt.

5.4.1.1 Langzamer met de stroom mee varen bespaart brandstof

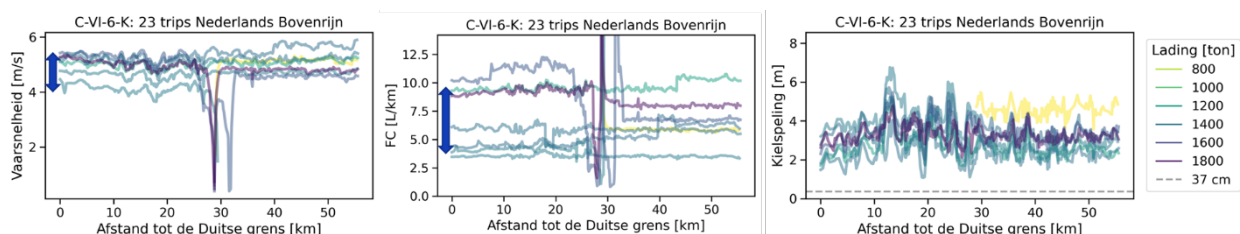
Langzamer varen bespaart over het algemeen brandstof, maar heeft nadelige effecten voor de vaartijd. Stroomafwaarts zijn de nadelige effecten beperkter, en kiezen sommige schippers ervoor om langzamer te varen. Het verschil in brandstofverbruik stroomafwaarts wordt nog duidelijker als er niet naar het gemiddelde zoals hierboven wordt gekeken, maar naar de individuele bewegingen op dezelfde route van een individueel schip met beperkte verschillen in belading, zodat scheepseigenschappen hetzelfde blijven. Een klein verschil in snelheid van 1 m/s realiseert grote verschillen tot 50% in brandstofverbruik. Ook is in deze data te zien dat er geen correlatie is met kielspeling.

Door minder hard te varen met de stroom mee kan significante brandstofbesparing gerealiseerd worden (Figuur 5.24). Omdat brandstofverbruik niet lineair is, kan een snelheid verhoging van 25% tot 55% extra brandstofverbruik leiden. Over een stuk van 30 km zou het snelheidsverschil tot een tijdsverschil van 20 minuten leiden, wat in overwegingen meegenomen kan worden.



Figuur 5.24: Vaarsnelheid, brandstofverbruik in L/km, en kielspeling *stroomafwaarts* op de Rijn van de Duitse grens naar Tiel voor C-VI-1.

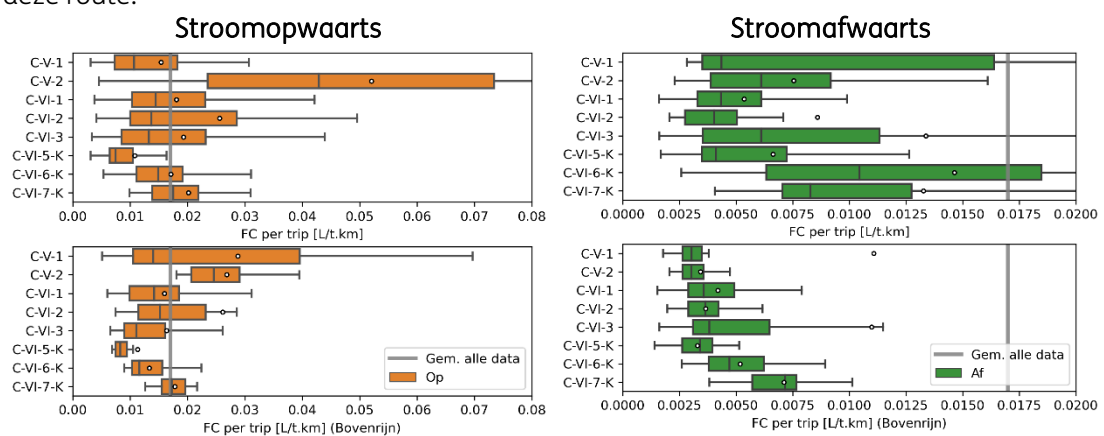
Een tweede schip met minder data laat een vergelijkbare verschillen zien. De dip in de data bij 30 km is geassocieerd met een stop.



Figuur 5.25: Vaarsnelheid, brandstofverbruik in L/km, en kielspeling *stroomafwaarts* op de Rijn van de Duitse grens naar Tiel voor C-VI-6-K.

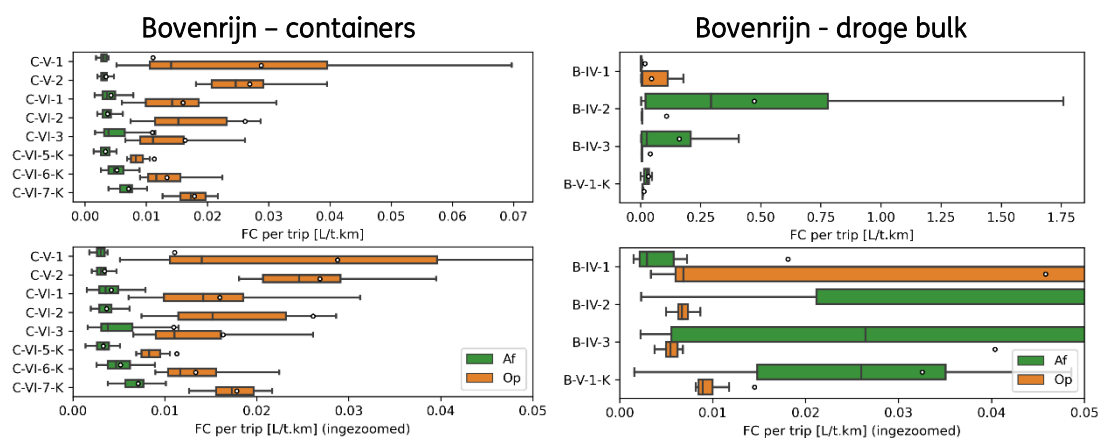
5.4.2 Variatie per trip op de Nederlandse Bovenrijn en Amsterdam-Rijnkanaal

Vanwege de variatie in routes voor de verschillende schepen is de analyse op een vast stuk route ook nuttig om de data meer vergelijkbaar te maken. De verschillen en variaties zijn minder groot op een gegeven vaarweg, dan wanneer alle data bij elkaar wordt genomen. Voor alle data is stroomopwaarts de variatie tussen de gemiddelde een factor vijf, en de spreiding in de data twee keer zo groot als het gemiddelde. Voor het stuk van de Nederrijn/Waal is stroomopwaarts (de onderste rij plots) deze spreiding in de resultaten ongeveer gehalveerd. Stroomafwaarts is het effect groter, de gemiddelde zijn een stuk lager, en de spreiding is slechts een kwart van de spreiding in alle data. De geobserveerde verschillen tussen schepen zijn deels weer terug te leiden naar de gekozen vaarsnelheid op deze route.



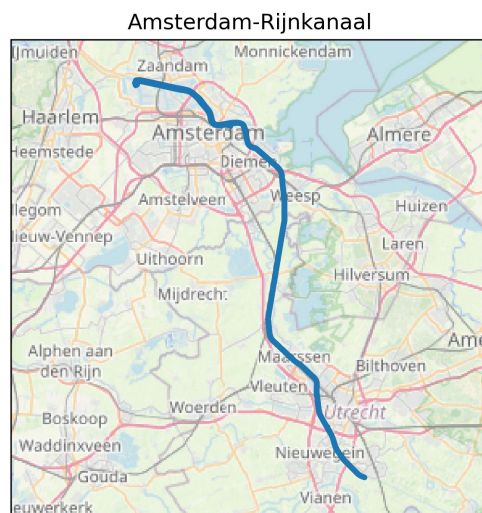
Figuur 5.26: Brandstofverbruik per trip per stroomaf- en opwaarts voor containerschepen op (boven) alle vaarwegen, en (onder) alleen de Nederlandse Bovenrijn. Stroomafwaarts heeft structureel lager brandstofverbruik in L/t.km, en dus een andere schaal. De spreiding op de Bovenrijn is een stuk minder dan als alle data in beschouwing wordt genomen. C-V-1 stroomopwaarts vormt hier een uitzondering, dit schip laadt en lost in Nijmegen waardoor er een groot variatie in belading is op dit traject.

Bovenstaande figuur heeft alleen betrekking op containerschepen. Voor droge bulk is het beeld minder consistent.



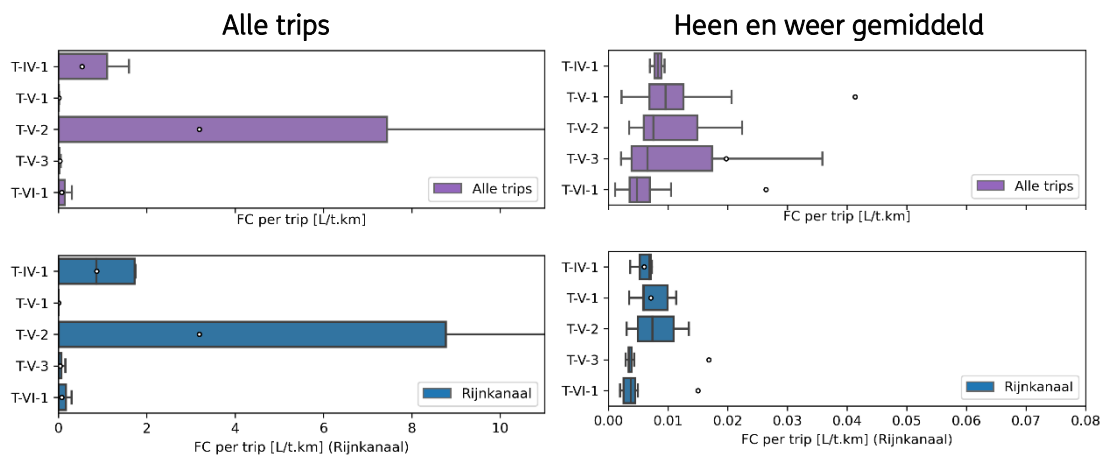
Figuur 5.27: Brandstofverbruik per trip per stroomaf- en opwaarts voor container- en bulkschepen op de Nederlandse Bovenrijn. Omdat droge bulkschepen ook leeg varen is de spreiding in L/t*km groter.

De Bovenrijn heeft de meeste schepen en data, maar het nadeel dat hier stroming is. Dit is de reden waarom er ook nog gekeken is naar het Amsterdam-Rijnkanaal zonder stroming van betekenis. Er wordt hier ook veel leeg gevaren, waardoor de spreiding groot is. Als daarom beide richtingen samen worden genomen is het beeld consistent. Op het Amsterdam-Rijnkanaal is daarmee de spreiding een stuk kleiner dan op alle routes, wat nogmaals bevestigt dat kentallen niet alleen aan schepen, maar ook aan vaarroutes gekoppeld moeten worden.



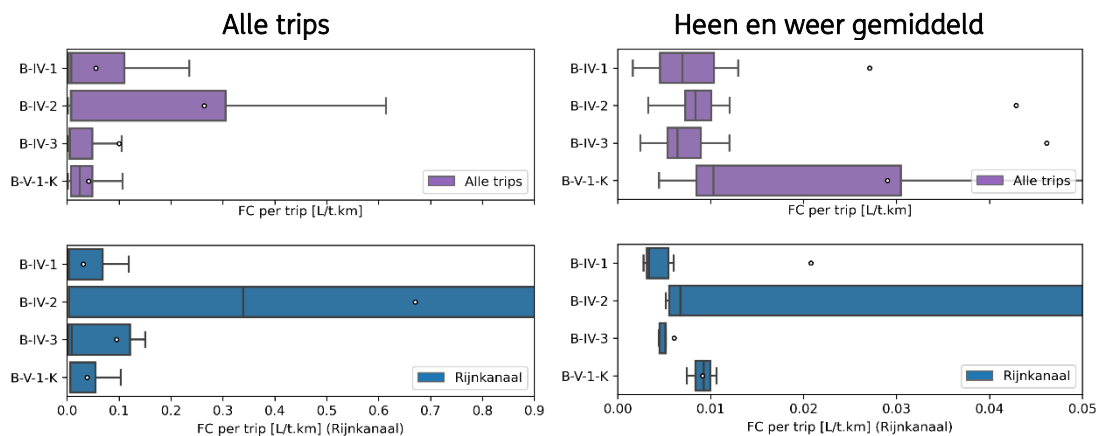
Figuur 5.28: Een deel van de Amsterdam-Rijnkanaal die gebruikt wordt als vergelijkingstraject

De variatie in brandstofverbruik, zeker als een deel van de trips leeg wordt gevaren, is binnen een bandbreedte alleen in combinatie van heen en terug en op een vaarweg.



Figuur 5.29: Brandstofverbruik per trip voor tankschepen op de Amsterdam-Rijnkanaal. Omdat tankers ook leeg varen is de spreiding in L/t*km groot (links), als er wordt gemiddeld over twee trips (rechts) is de brandstofverbruik beter vergelijkbaar.

Schepen die rond varen, en dus niet heen en terug, zijn op deze manier moeilijker te corrigeren voor de combinatie van leegvaren en vaarroutes.



Figuur 5.30: Brandstofverbruik per trip voor bulkschepen op de Amsterdam-Rijnkanaal. Omdat bulkschepen ook leeg varen is de spreiding in L/t.km groot (links), als er wordt gemiddeld over twee trips (rechts) is de brandstofverbruik beter vergelijkbaar.

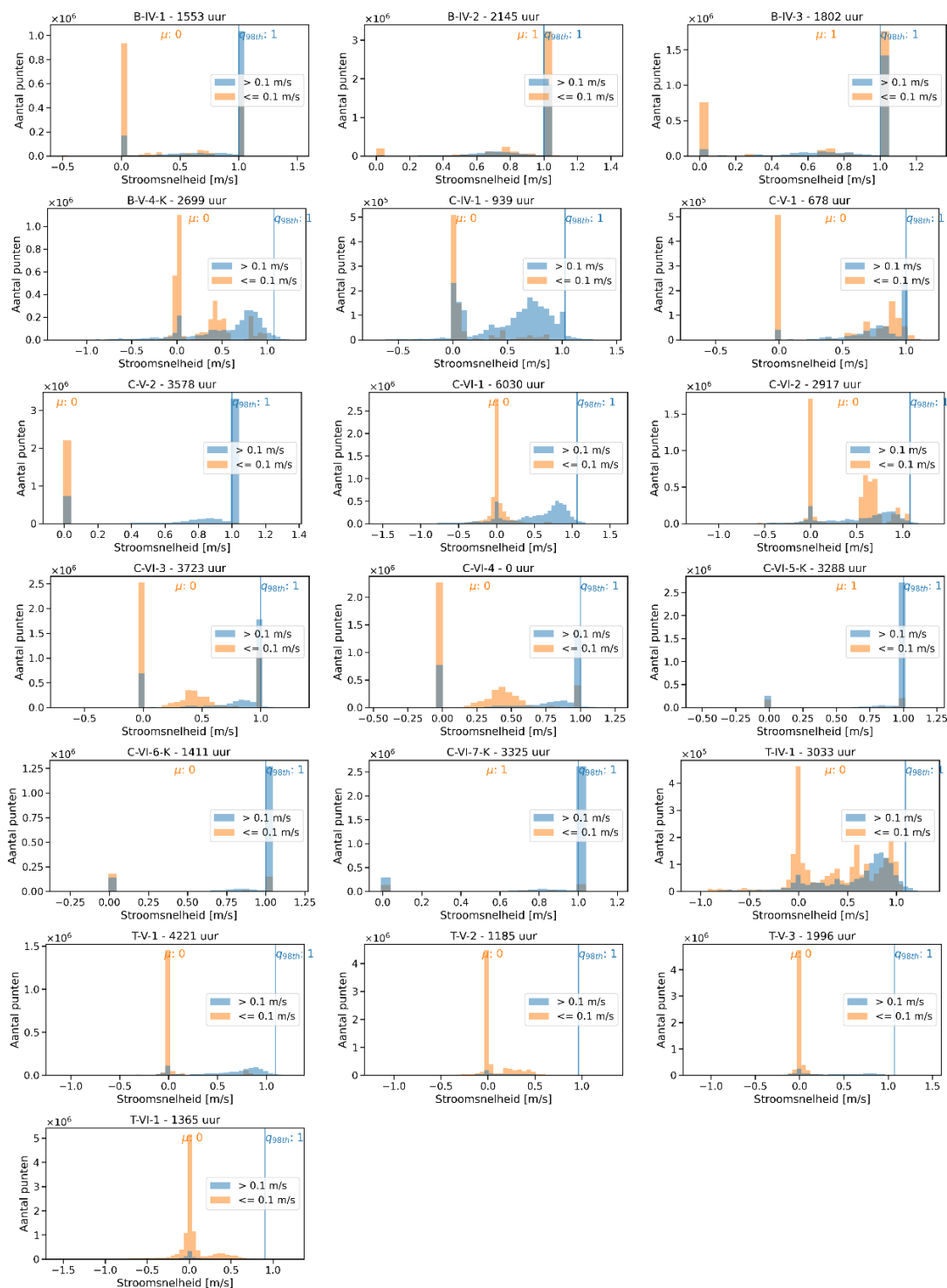
5.5 Mogelijkheden voor verdere analyse

Stroming is een complex gegeven, die tussen plekken in de rivier ten opzichte van de oever en langs de lengte van de rivier verschilt. De snelheid ten opzichte van het water bepalen is moeilijk, ook omdat de stroming rond het schip een dergelijke meting sterk beïnvloedt. Er zijn verschillende pogingen gedaan om het effect van stroming te isoleren. Dat heeft geen betrouwbare resultaten geleverd. De beschikbare stromingsinformatie is erg generiek, een constante waarde langs tientallen kilometers van de rivier. Deze informatie correleert slecht met de gegeven relaties tussen snelheid over water, belading en brandstofverbruik. De conclusie is dat er mogelijk een factor twee is in de stroming ten opzichte van de gemiddelden. Deze analyses geven geen goed beeld, waardoor ervoor is gekozen om deze niet op te nemen in het onderzoek. Er is wel verder onderzoek gedaan om het effect van stroming te isoleren. Dit is onvoldoende gelukt, omdat schippers keuzes in snelheden maken op basis van lading, en daarmee vergelijkingen tussen snelheden vaak neerkomen op vergelijkingen tussen beladingen. Het onderzoek is wel hoopgevend, en er is zeker aanleiding voor vervolgonderzoek in iets meer gecontroleerde condities, om tot betrouwbare conclusies te komen. De vervolganalyses zijn vooral belangrijk om het Nederlandse binnenvaartmodel voor Emissieregistratie te verbeteren. Met een verbeterd model, kan naast de resultaten voor Emissieregistratie, ook onderzoek gedaan worden naar maatregelen om het energieverbruik en de luchtverontreinigende emissies te verminderen.

5.5.1 Toerentallen voor een inschatting van stroomsnelheid

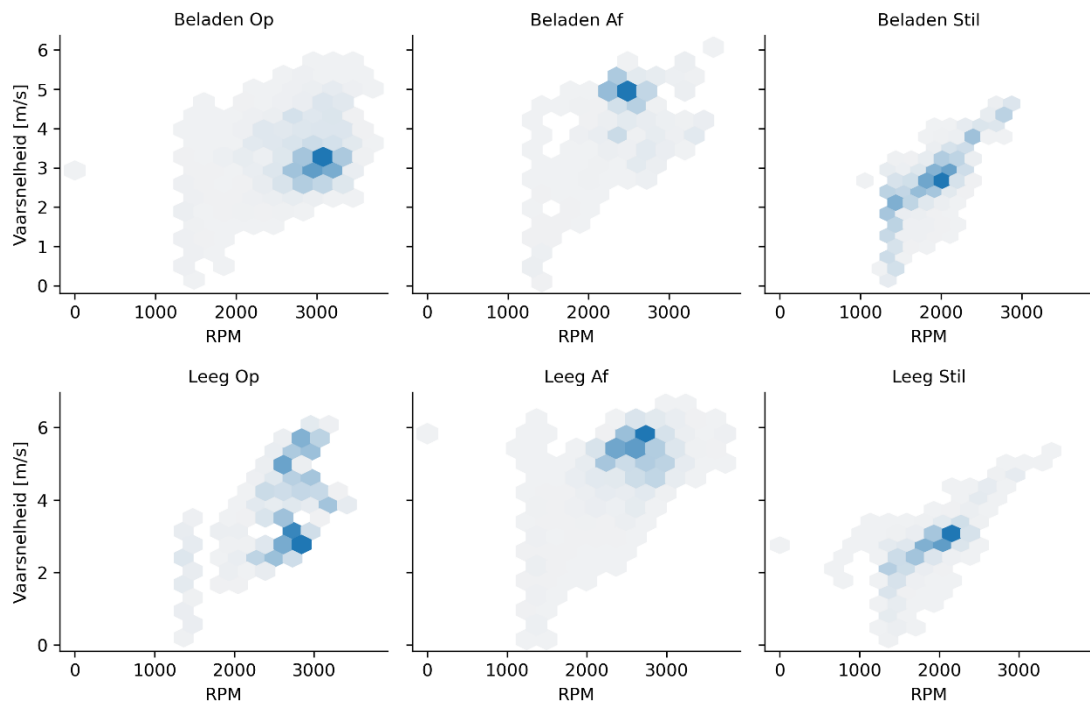
Met kleine verschillen, eerder benoemd, geeft de schroef bij een gegeven snelheid een vaste voortstuwingskracht. De snelheid van het schip ten opzichte van het water wordt daarmee bepaald door de scheepsweerstand die weer voor het grootste deel afhankelijk is van het totaalgewicht met de verschillen eerder in dit rapport besproken. Uit toerentallen en belading is het daarom mogelijk om snelheid over water af te leiden, en met GPS, te vergelijken met de snelheid over grond. Daaruit volgt dan de gemiddelde stromingsweerstand, en de effectieve stroomsnelheid rond het schip. Deze gemiddelde stroomsnelheid is een combinatie van snelheden aan het oppervlak en snelheden dichterbij de bodem van de rivier.

Dergelijke analyses geven de resultaten zoals hieronder. Dat is een combinatie van het vaststellen van de scheepseigenschappen bij diep en stil water, en dan deze resultaten toepassen op een rivier. Stroomsnelheden tot 1 m/s (3,6 km/h) worden geobserveerd in de data, maar ook lagere snelheden.



Figuur 5.31: Spreiding van de aangegeven stroomsnelheid voor snelheden boven (blauw), en onder (oranje) de 0,1 m/s. Gemiddelde stroomsnelheid k van $< 0,1$ m/s wordt weergegeven in oranje tekst, terwijl de 98^e percentiel van $> 0,1$ m/s wordt weergegeven in het blauw.

Een deel van de complexiteit van deze analyses ligt in het feit dat belading stroomopwaarts en stroomafwaarts niet altijd vergelijkbaar is. Daarnaast kan ook de luchtweerstand een kleine rol spelen vooral bij containerschepen waarbij de lading hoog boven het wateroppervlak kan uitsteken. In de figuren hieronder is te zien dat de situatie nog complexer is door de verschillende snelheden in de verschillende situaties.



Figuur 5.32: Distributie van snelheid en RPM voor T-IV-1 afhankelijk van belading (beladen of leeg) en stroming (stroomopwaarts, -afwaarts, en stil), waar donkerblauw aangeeft waar het meeste data is.

De figuur geeft het gebrek aan overlap aan en daarmee gebrek aan vergelijkbare data waardoor effecten, zoals stroming, niet goed geïsoleerd kunnen worden van belading en snelheid zonder veel aannames over de relatie.

5.5.2 Correlatie tussen snelheid en belading

Met hogere belading gaat de snelheid over het algemeen beperkt omlaag, maar het motorvermogen omhoog. Er zijn grote verschillen tussen de verschillende schippers, schepen en vaarwegen, maar generieke, gemiddelde waarden kunnen helpen om een algemeen beeld te geven. Hiervoor is het waarschijnlijk nodig om de verschillende scheepsgroottes en motorvermogens op een goede manier te normaliseren, zodat er ze vergelijkbaar worden en daarmee samengenomen kunnen worden in een simpele relatie tussen motorvermogen, snelheid, en belading.

Een dergelijke relatie helpt ook om het nationale beeld van de binnenvaartactiviteit, op basis van AIS data, te koppelen aan beladingen en motorbelastingen. Op basis van schepen die een bepaalde snelheid varen ten opzichte van hun normale of gemiddelde snelheid op een gegeven vaarweg kan een schatting gemaakt worden van de belading. Dergelijke informatie ontbreekt in de huidige modellen en daarvoor worden nu generieke aannames over zaken als belading gemaakt, ontkoppeld van specifieke inzet.

5.5.3 Kwantificering invloed lage kielspeling op brandstofverbruik

Met groeiende maten van de nieuwe schepen en de toename in periodes van lage waterstanden is er een natuurlijke aandacht voor kleine kielspeling, en de staat van de waterwegen. Dat is in dit rapport uitgebreid onderzocht. Het effect van kielspeling op de vaarweerstand is een kleine stap, maar in deze data niet betrouwbaar vast te stellen, deels ook omdat dat samenhangt met stromingssnelheid op de locaties waar het speelt, maar vooral omdat het effect klein lijkt bij normale inzet van binnenvaartschepen.

Lage kielspeling en smalle vaarwegen spelen ook in kanalen, maar ook daar lijkt er geen duidelijk beeld te ontstaan uit analyses. Het zijn vooral de passages van bruggen, met pijlers in het water die mogelijk iets van een effect leveren. De veelal theoretische studies die aanleiding zijn om de vaarwegen te verbreden en uit te diepen lijken ervoor gezorgd te hebben dat de invloed van kielspeling overschat wordt. Ook kan meespelen dat de vaarwegen in Nederland goed op orde te lijken te zijn ten opzichte van het buitenland, waardoor ondiepe stukken beperkt voorkomen, behalve bij lage waterstanden.

5.5.4 Generalisatie naar de vloot

Tot dusverre worden schepen in grootteklassen ingedeeld en gemiddelde waarden gebruikt voor deze scheepklassen, in modellen en rapportages. Naast verschillen in motorvermogen, zijn verschillen in routes en beladingen, die allemaal invloed hebben op het brandstofverbruik. Het strekt de aanbeveling dat de aanpak, voor nationale totalen en beleidsadvies vereenvoudigd wordt, maar wel rekening houdend met de belangrijke scheepsinformatie, zoals motorvermogen. Een simpele aanpak zou zijn om een generalisatie te maken op basis van de gevaren kilometers, de ton*kilometers, indien beschikbaar, en de draaiuren. Deze gegevens zouden ook gescheiden moeten worden in uren en kilometers op Nederlands grondgebied en daarbuiten.

6 NO_x metingen

In de huidige studie zijn er onvoldoende NO_x resultaten verzameld om goede conclusies te trekken. Het meten van de NO_x uitstoot is relevant, vanwege de bijdrage van de binnenvaart aan de nationale NO_x uitstoot en de stikstofdepositie, zeker ook omdat binnenvaartschepen langs kwetsbare natuurgebieden varen. Met het uitblijven van de milieuzone in de Rotterdamse haven, en elders in Nederland, zijn er beperkte incentives om SCR installaties te monteren, om zo de NO_x uitstoot te verminderen. Elk jaar wordt er slechts een handvol schepen zo geretrofit, en de subsidiepot daarvoor is bij lange na nog niet leeg. De verandering moet komen van de nieuwe Stage V motoren met strengere NO_x eisen en brede toepassing van SCR.

Moderne motoren, met SCR, gebruiken ook NO_x sensoren om de SCR regeling voor het omzetten van NO_x naar onschadelijke stoffen, met behulp van AdBlue reagens. Er is dus, in principe, de mogelijkheid om de NO_x uitstoot van moderne schepen te monitoren met de techniek die al aan boord is. Tot dusverre is er beperkt medewerking geweest van de leveranciers van de systemen om de data te ontsluiten, en dat is de grootste hindernis geweest om NO_x uitstoot van de schepen beschikbaar te krijgen. Een alternatief is het installeren van een losse NO_x sensor, zoals TNO dat regelmatig doet, om NO_x emissies te monitoren. Dat vraagt toegang en monitoringsapparatuur. Het bedrijf Multitronic levert commercieel ook deze service, bijvoorbeeld in het CLINSH project, maar regelmatig onderhoud blijft noodzakelijk om deze systemen betrouwbaar en werkend te houden. Het vermoeden is dat het uitvallen van NO_x monitoringssystemen samenhangen met het uitvallen van de SCR zelf.

De laboratoriumtestprocedures (CCRI, CCRII, Stage IIIA, Stage-V) voor motoren in de binnenvaart zijn beperkt, en daarom kunnen er grote afwijkingen zijn tussen de emissies op de test, en in de praktijk. De strenge emissielimieten wordt niet altijd bereikt in de praktijk, omdat de laboratoriumomstandigheden idealer zijn. Ook is de ene SCR installatie de andere niet, en een factor 10 tussen verschillende SCR installaties, op basis van de ontwerpe en afstelling, is normaal, tussen 0,4 tot 4 g/kWh. Stage IIIA (CCRII, 2009) heeft een limiet van 7,8 tot 11,0 g/kWh (NO_x + HC) en vraagt geen SCR. Stage V IWA/IWP heeft een limiet van 1,8 tot 2,1 g/kWh, die een SCR noodzakelijk maakt, zeker als er geen EGR wordt toegepast. Deze IWA/IWP limiet is zwak vergeleken met Euro-VI voor vrachtwagens en Stage V voor mobiele werktuigen (NRE), die staan op 0,4 g/kWh, met ook meer toepasselijke (praktijkgerichte) testprocedures. De NRE en Euro VI motoren worden echter ook toegepast in binnenschepen, wat gunstig kan uitwerken, mits er controle op is.

De technologie bestaat voor lage NO_x emissies, voorbij de huidige wettelijke eisen aan specifieke binnenvaartmotoren (type IWA/IWP). Maar daarvoor, nog meer dan voor CO₂ waarvoor er alternatieven bestaan via brandstofverbruik en vermogen, is het essentieel om te monitoren. Het verbruik van AdBlue bijhouden is een minimale vorm van monitoren, omdat elke liter AdBlue 460 gram NO_x omzet in de SCR. De reagens AdBlue kost wel geld, en de economische incentives om SCR aan te laten staan bij retrofitoplossingen zijn momenteel beperkt.

In het bijzonder werken SCR systemen slecht bij lage motorbelasting, onder de 20% van het maximaal vermogen, omdat de uitlaatgassen voor de SCR werking niet warm genoeg worden. Dat hangt direct samen met het geïnstalleerd vermogen en de inzet van het schip. Het is daarom belangrijk dat er inzicht komt in welke situaties de NO_x emissies hoog zijn, en hoe dat voorkomen kan worden. Op dit moment zal er nog op algemene vuistregels en oudere informatie vertrouwd moeten worden.

In principe, met een correct geïnstalleerd vermogen voor de inzet van het schip, is de motorbelasting constant rond de 30%-50%. Een SCR installatie kan optimaal werken in die omstandigheden, en de NO_x emissies kunnen daarmee een factor 10 tot 50 gereduceerd worden, afhankelijk van de afstelling van de SCR.

In deze studie, zoals in eerdere studies, zoals CLINSH en PROMINENT, blijkt dat de SCR zeker niet altijd aan staat, en in sommige gevallen zelfs defect lijkt. Dat is een belangrijke zorg, richting de toekomst. Voor officiële Stage V motoren geldt wel de mogelijkheid van monitoring zodat er betere controle en handhaving zijn.

6.1 NO_x uitstoot van de binnenvaart

In en door Nederland varen ongeveer 10.000 binnenvaartschepen waarvan ongeveer de helft onder Nederlandse vlag. Samen zijn zij verantwoordelijk voor een substantieel aandeel van de totale NO_x uitstoot in het binnenland. Niet elk schip zal daar hetzelfde aan bijdragen, maar op de kleinste schepen na, en schepen die beperkt ingezet worden, vertalen eisen van 4 tot 11 g/kWh voor oudere schepen (CCR1 en CCR2) en 1,8 tot 2,1 g/kWh voor de laatste generatie (Stage V-IWP/IWA) binnenvaart motoren tot 1 tot 5 kilogram NO_x per uur, en meerdere tonnen NO_x per schip per jaar. Alternatieve motoren, zoals Stage V (NRE) en Euro-VI hebben een veel strengere eis van 0,4 g/kWh, en deze waarden worden in de praktijk veelal gehaald, vooral bij een constante vermogensvraag boven de 20%-25% motorlast. Dat levert een NO_x reductie van 80%-95%. Bij een motor op maat is dat het geval voor het grootste deel van de inzet van deze schepen, blijkt uit de data. Indien een deel van de vermeden maatschappelijke kosten, van enkele tientallen Euro's per kilogram NO_x, terugvloeien naar de schipper, is het rendabel om een betere motor of uitlaatgasnabehandeling te installeren op schepen die nog vijf jaar of langer meegaan. Het is wel belangrijk om de vermeden NO_x emissies te monitoren, want een SCR installatie kan simpel uitgezet worden. Elke liter AdBlue voor de SCR reduceert 460 gram NO_x maar kost minder dan een Euro. Dit project toont vooral aan dat monitoring van NO_x niet eenvoudig is, en dat samenwerking tussen de betrokken partijen, of goede onafhankelijke monitoring van de uitstoot, essentieel is voor een structurele NO_x reductiemaatregel in de binnenvaart.

7 Modellen en formules

De algemene formules, zoals gegeven in Hoofdstuk 2, zijn toepasbaar gemaakt voor de verschillende schepen door de parameters te fitten. Deze parameters zijn ook nuttige informatie omdat ze het brandstofverbruik geven als functie van het schip, gefit voor variaties in lading en vaarsnelheid. Ze zijn daarmee parameters die sterker aan het schip gekoppeld zijn, en minder aan inzet, dan de meeste andere resultaten in dit rapport.

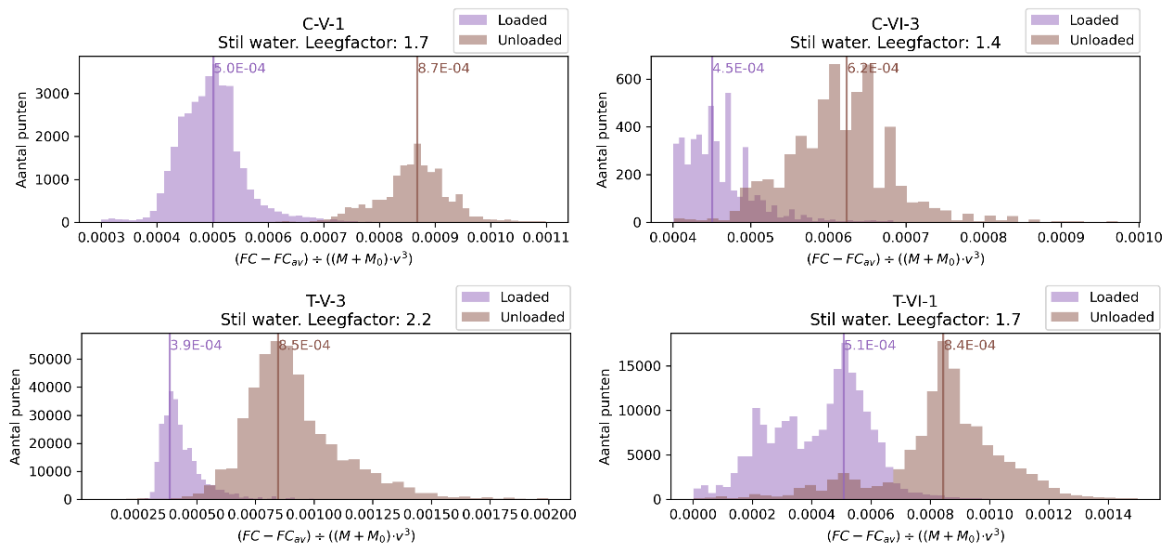
7.1 Brandstof per trip

Vanwege de grote variatie in brandstofverbruik per trip in $\text{lit}/\text{ton}\cdot\text{km}$ ([Figuur 5.14](#)), is het niet mogelijk om een generieke brandstof per trip te modelleren. Er worden operationele keuzes gemaakt door de schipper, afhankelijk van onder andere de mogelijke belading (beschikbare waterdiepte) en de stroming. Een vrachtwagen rijdt op de snelweg altijd dezelfde snelheid waardoor een verband te zien is tussen verbruik en belading; zelfs seizoeneffecten zijn zichtbaar. Daarentegen kiest een schipper bij een hogere belading waarschijnlijk een lagere snelheid waardoor hoog en lage belading niet vergelijkbaar zijn en het mogelijk is dat bij hogere belading het brandstofverbruik lager is door de lagere snelheid.

7.2 Brandstof in liters per uur

Onder aannames uit Hoofdstuk 2 zou het brandstofverbruik bij een gegeven snelheid proportioneel zijn met het totaalgewicht van het schip. Bij stroming of kleine kielspeling is dat moeilijk te controleren, omdat dan andere invloedfactoren groter zijn. Maar bij de juiste selectie van de data, zoals diep en stilstaand water, is dat wel te onderzoeken. Dat bevestigt het vermoeden dat belading een groter effect heeft op de uitstoot per $\text{ton}\cdot\text{km}$ dan op basis van het gewicht alleen te verwachten was. Een leeg schip heeft een extra vaarweerstand, die zich laat vertalen naar het feit dat het gewicht van het schip twee keer zo zwaar (1,7 tot 3) meetelt in de simpele relatie tussen het gewicht en de lading.

Om verschillende data te kunnen vergelijken, is de data genormaliseerd naar totaalgewicht en snelheid van het schip. Als het vermogen voor voortstuwing proportioneel zou zijn aan het gewicht zou de data voor beladen en onbeladen schepen vergelijkbaar zijn. Het verschil tussen beide geeft aan de extra weerstand van het onbeladen schip, die als een factor van het leeggewicht meegenomen kan worden.



Figuur 7.1: De impact van leegvaren op brandstofverbruik voor vier van de gemeten schepen. FC is het brandstofverbruik in L/uur, FC_{av} het totale gemiddelde brandstofverbruik voor het schip, M de massa van de belading in ton, M_0 de massa van het lege schip en v de snelheid van het schip in m/s. Paars geeft aan dat het schip beladen is (meer dan 0.2 van totale tonnage aan boord, zie ook [Figuur 5.8](#)) en bruin dat het leeg is (minder dan 0.2 van totale tonnage).

Door de basale relatie te gebruiken tussen brandstofverbruik, gewicht en snelheid, kan de parameter in dat verband geschat worden. Zie [Figuur 7.2](#). Zoals eerder gezien in [Figuur 5.17](#) zijn er grote verschillen in de trends tussen brandstofverbruik in liters per uur en snelheid. Toch kan de data ingezet worden om op specifieke manieren naar afhankelijkheden te kijken.

Eerst wordt het varen met constante snelheid op stil water (kanalen), waar de kielspeling meer dan twee meter is, bekeken om het brandstofverbruik in ieder geval zonder invloed van stroming en lage kielspeling te bekijken. Een aantal schepen varen leeg of geladen op kanalen, deze tonen een duidelijk verschil in brandstofverbruik of ze leeg of vol zijn, ook al wordt er gekeken naar het brandstofverbruik genormaliseerd naar massa ([Figuur 7.1](#)). Gemiddeld is er een extra factor twee invloed op het brandstofverbruik als gevolg van het varen met een leeg schip.

Brandstofverbruik kan daarom worden beschreven door (excl. hotel- en hulpvermogen)

Vergelijking 7.1:

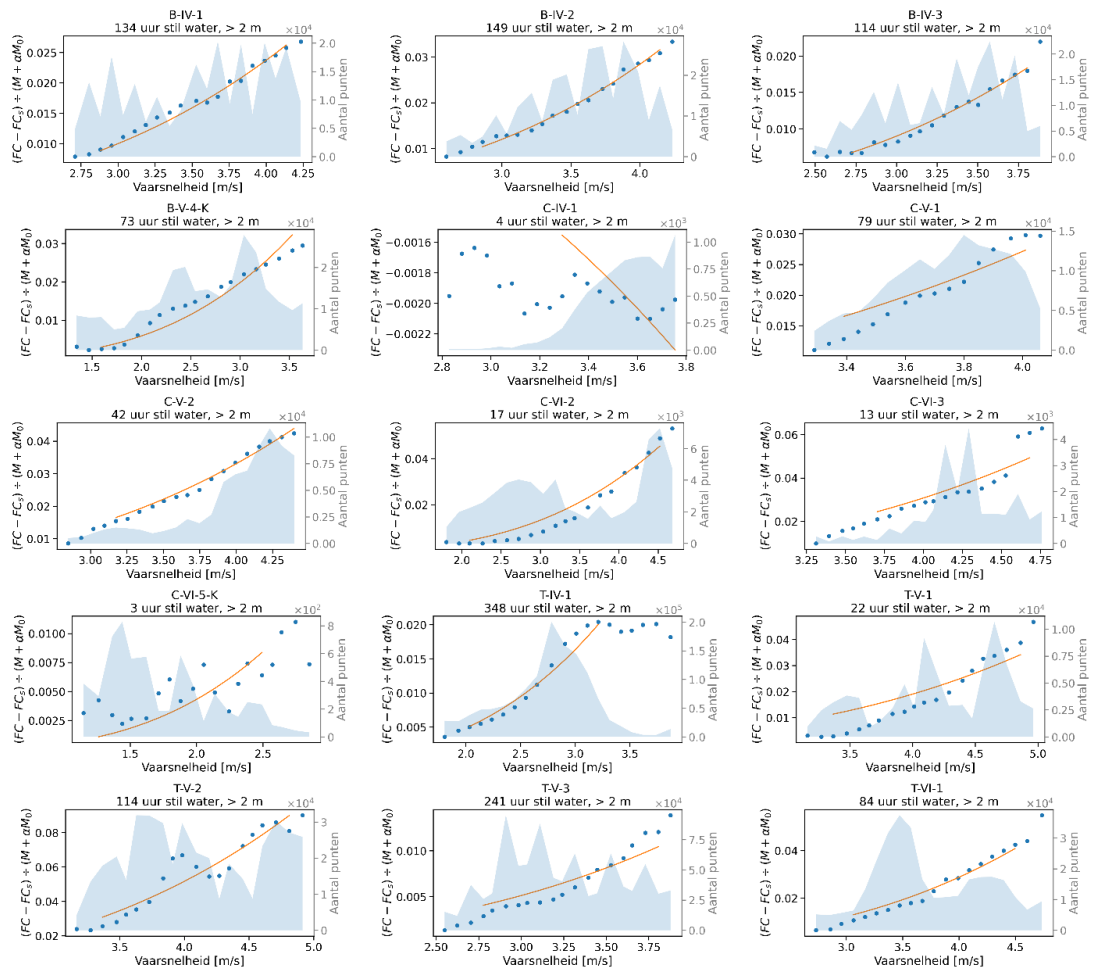
$$FC[\text{L/uur}] = A \times (M + \alpha M_0) v^3 + FC_{stat}$$

Waar FC het brandstofverbruik in L/uur is, FC_{stat} het totale gemiddelde brandstofverbruik voor dat schip terwijl het stationair draait, M de massa van de belading in ton, α de extra factor vanwege het lege schip, M_0 de massa van het lege schip en v de snelheid van het schip in m/s, en A een coëfficiënt die gefit kan worden die wordt gegeven in [Tabel 7.1](#). Gemiddeld is er een afwijking van ca. 4 L/uur tussen de voorspelling en gemeten waarde. Vooral T-V-2 lijkt een secundair effect te hebben die de voorspelling beïnvloed ([Figuur 7.3](#)). [Figuur 7.3](#) omvat het genormaliseerde brandstofverbruik $(FC - FC_{stat}) / (M + \alpha M_0)$ als functie van de vaarsnelheid. Dat is het totale brandstofverbruik verminderd met het

verbruik bij stationair draaien gedeeld door de totale massa van het schip. Het stationair brandstofverbruik hangt samen met de verliezen, onafhankelijk van de voortstuwing.

Tabel 7.1: Coëfficiënten die toegepast kunnen worden in [Vergelijking 7.1](#) om de brandstof in L/uur te berekenen als functie op stil wateren. De gemiddelde en standaard deviatie van $FC - (A \times (M + \alpha M_0)v^3 + FC_{stat})$ geven aan hoe goed de voorspelling is

Schip	A	α	FC_{stat}	Gemiddelde afwijking [L/uur]	Standaard deviatie afwijking [L/uur]	Hoeveelheid data [uur]
B-IV-1	3.7E-04	1.95	8.0	-0.3	10.5	147
B-IV-2	4.4E-04	1.95	7.8	-3.1	20.0	168
B-IV-3	3.3E-04	1.7	36.0	-1.9	8.4	132
B-V-1-K	7.3E-04	1.95	6.6	1.7	14.5	81
C-IV-1	-4.4E-05	1.95	5.5	0.4	1.1	241
C-V-1	4.2E-04	1.7	33.1	-3.2	12.4	85
C-V-2	5.2E-04	1.95	16.8	-0.6	11.6	46
C-VI-2	4.9E-04	1.95	34.1	-5.8	31.7	19
C-VI-3	4.8E-04	1.4	27.5	-1.8	82.0	14
C-VI-5-K	5.4E-04	1.95	8.8	2.4	16.3	4
T-IV-1	6.1E-04	3	8.1	-2.3	13.4	385
T-V-1	3.0E-04	1.95	35.7	-6.7	18.7	24
T-V-2	8.1E-04	1.95	13.8	-16.4	64.8	157
T-V-3	1.9E-04	2.3	43.0	-1.7	10.7	290
T-VI-1	4.5E-04	1.7	20.9	-14.6	56.2	93

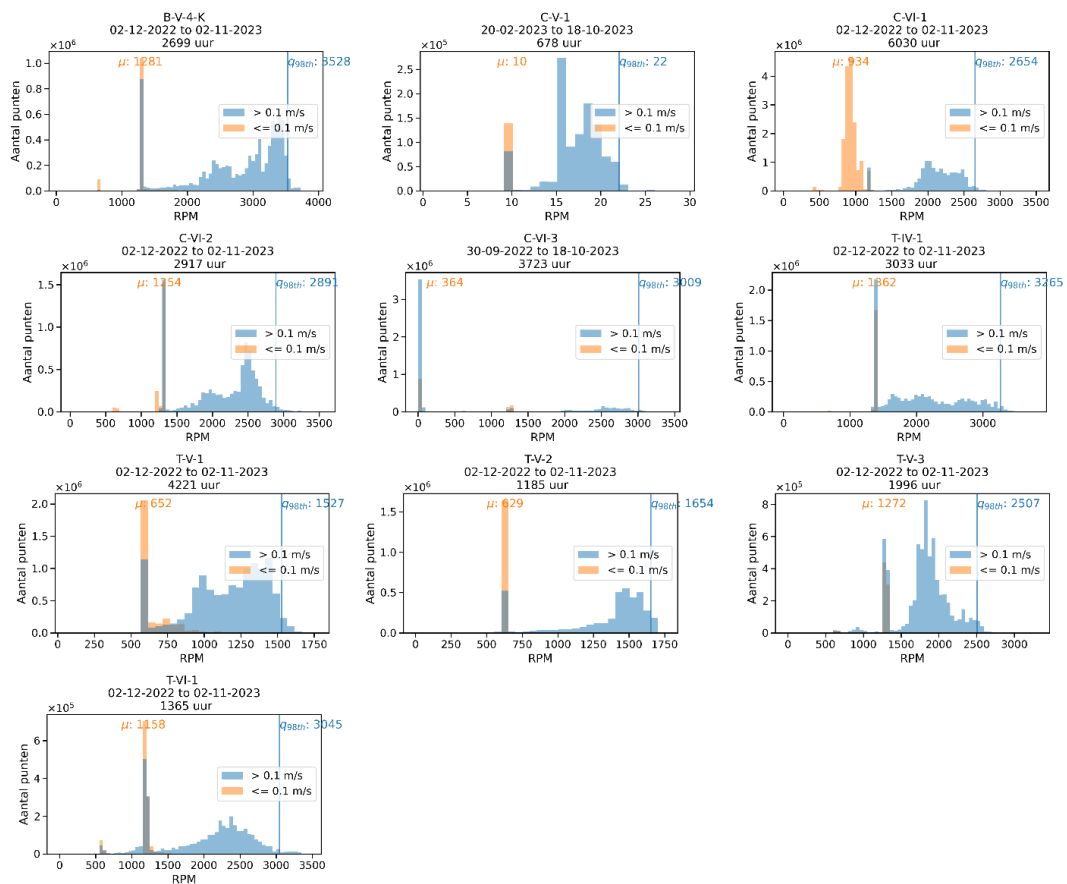


Figuur 7.3: $(FC - FC_{stat}) / (M + \alpha M_0)$ als functie van vaarsnelheid (blauwe punten) voor varen met constante snelheid in stil water/kanalen en kielpeling meer dan 2 m. De fit die gegeven wordt door de $A \times v^3$ van bovenstaand tabel wordt weergegeven met een oranje lijn. De blauwe vlak toont de snelheidsdistributie

De kwaliteit van de bovenstaande fits is het beste visueel te controleren in de plots. De afwijking van C-IV-1 wordt daaruit ook gelijk duidelijk. De afwijkingen van de verwachte curves, zoals bij de schepen C-IV-1, C-VI-5-K, en T-V-2, hangen mogelijk samen met de keuze van snelheid bij een gegeven belading, en hoge interne verliezen bij sommige schepen in verhouding met de motorbelasting.

7.3 Schroefkrommes

Een interessant gegeven zijn de schroefkrommes, ofwel het brandstofverbruik als functie van toerental. Het toerental van de schroef kan weer gerelateerd worden aan de voortstuwing, en daarmee de snelheid ten opzichte van het water voor een gegeven belading.



Figuur 7.4: Spreiding van totale toerental in RPM voor snelheden boven (blauw), en onder (oranje) de 0,1 m/s. Gemiddelde toerental van < 0,1 m/s wordt weergegeven in oranje tekst, terwijl de 98^e percentiel van >0,1 m/s wordt weergegeven in het blauw.

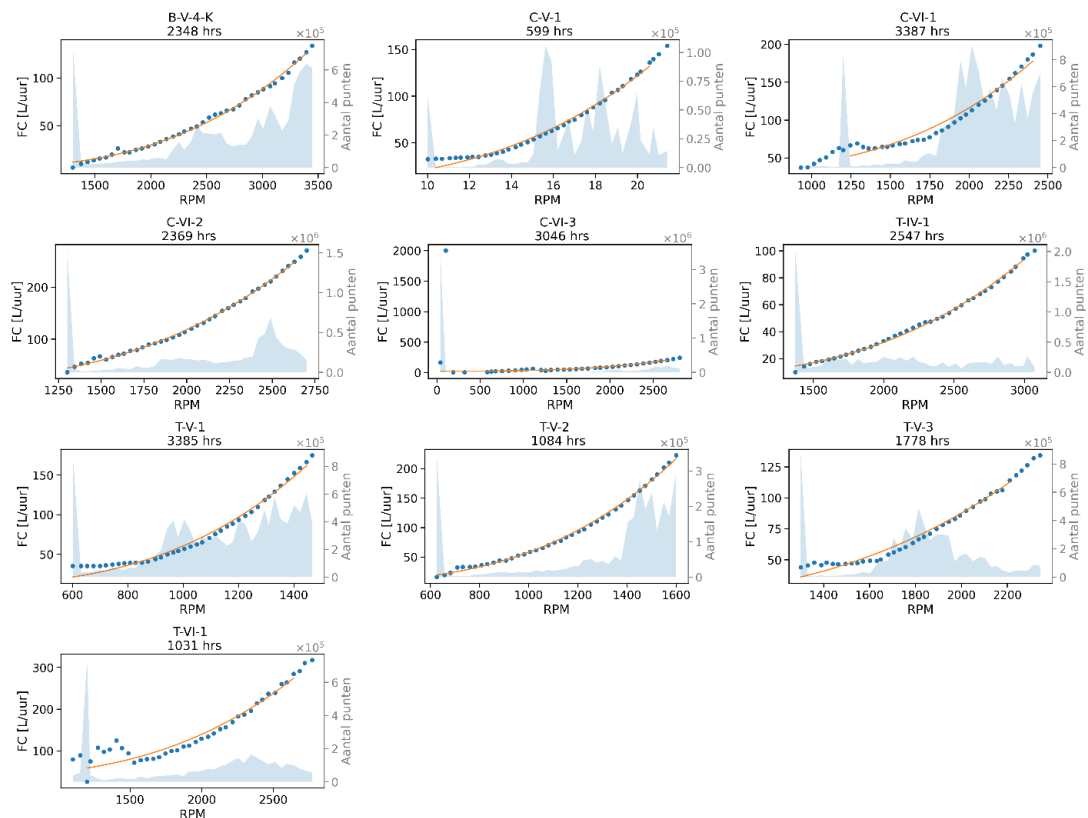
Veel schepen hebben een spreiding in de toerentalen van de motor tussen, bijvoorbeeld tussen 1500 en 3000 toeren per minuut. Het brandstofverbruik en de voortstuwingskracht varieert daardoor met meer dan een factor twee, omdat de motorkoppel toeneemt met de snelheid. In de schroefkrommes wordt dat expliciet gemaakt.

Met behulp van schroefkrommes kan het brandstofverbruik geschat wordt als functie van toerental. Dit maakt het mogelijk om op een simpelere manier een schatting te krijgen van het totale brandstofverbruik, en vooral de variatie over de tijd en met de inzet.

Vergelijking 7.2:

$$FC [L/uur] = A \times RPM^3 + B$$

Met FC het brandstofverbruik in L/uur (met snelheid > 0,1 m/s), RPM toerental, en A, B coëfficiënten die gefit kunnen worden. Deze krommes worden getoond in [Figuur 7.5](#), en de coëfficiënten in [Tabel 7.2](#). C-VI-3 heeft de grootste afwijking van de voorspelling vanwege het veel hogere brandstofverbruik bij lage toerental dan verwacht, en bij C-VI-2 is het verbruik bij het laagste toerental juist lager, waardoor de gemiddelde afwijking ook lager is. Vanwege de grote hoeveelheid tijd bij het laagste toerental heeft deze een grote invloed op deze voorspelling.



Figuur 7.5: Brandstofverbruik in L/uur als functie van toerental (blauwe punten) met snelheid > 0,1 m/s. De fit die gegeven wordt door onderstaand tabel wordt weergegeven met een oranje lijn. De blauwe vlak toont de toerental distributie.

De schroefkrommes voldoen niet altijd aan de perfecte derdegraads. In veel gevallen is er een afwijking te zien bij lagere toerentallen, die mogelijk samenhangen met omstandigheden waarin deze lage toerentallen voorkomen, waar de weerstand van de schroef in het water hoger is. Deze afwijking is over het algemeen minder relevant. De constante, ofwel de verliezen en constante energieverbruikers op de hoofdmotoren zijn relevanter, zoals ook te zien is uit bij het brandstofverbruik in Hoofdstuk 5.

Tabel 7.2: Coëfficiënten die toegepast kunnen worden in [Vergelijking 7.2](#) om de brandstof in L/uur te berekenen als functie van RPM. De gemiddelde en standaard deviatie van $FC = (A \times RPM^3 + B)$ geven aan hoe goed de voorspelling is. De toerentallen van C-V-1* zijn waarschijnlijk een factor 60 [s⁻¹] of met een decimaal verschil factor honderd hoger, waarmee A in rond de 1E-08 uitkomt.

Schip	Totale vermogen [kW]	A	B	Gemiddelde afwijking [L/uur]	Standaarddeviatie afwijking [L/uur]
B-IV-4-K	736	3.1E-09	5.2	-0.1	5.3
C-V-1	1173	1.4E-02*	7.4	0.9	5.3
C-VI-1	2234	1.0E-08	32.4	2.0	10.4
C-VI-2	2030	1.3E-08	16.3	-1.0	12.9
C-VI-3	1877	9.5E-09	23.4	93.6	138.5

Schip	Totale vermogen [kW]	A	B	Gemiddelde afwijking [L/uur]	Standaarddeviatie afwijking [L/uur]
T-IV-1	734	3.2E-09	6.0	-0.6	4.5
T-V-1	1050	5.0E-08	10.2	1.5	7.4
T-V-2	1038	5.1E-08	7.0	0.7	9.8
T-V-3	1490	8.9E-09	16.5	0.2	6.4
T-VI-1	2240	1.3E-08	36.7	-5.5	28.9

De verschillen tussen de motoren zijn deels te verklaren uit de snelheidsrange van de schroef. Alleen voor C-V-1 zijn deze waarden, tussen 10-25 min⁻¹, niet realistisch. Vermoedelijk, is dat 600-1500 of 1000-2500 min⁻¹ en moet de coëfficiënt A een factor miljoen lager zijn, ofwel 1.4E-08, wat goed in de range valt.

8 Vergelijkingen met kentallen

In Nederland worden verschillende getallen en emissiefactoren gebruikt om de impact van binnenvaartschepen te bepalen. Voor de nationale totalen, en daarmee ook voor de effecten van beleid zijn de resultaten van de Emissieregistratie de basis. Sinds dit jaar worden deze met behulp van scheepsverplaatsingsdata, AIS, vastgesteld, en is het dus mogelijk om op individueel scheepsniveau een vergelijking te maken met tussen de voorspelling per schip en de monitoringsdata in dit onderzoek, over de periode van overlap, voor de beschikbare schepen. Daarnaast zijn er kentallen beschikbaar voor zelfevaluatie in het GLEC raamwerk. Dat zijn meer generieke getallen, die geen rekening houden met de specifieke inzet en route, en zijn per scheepsklasse, zonder verdere details.

Deze studie geeft een vergelijking tussen de gemeten waarden, en de beschikbare inzichten zoals uit GLEC en Emissieregistratie (ER). Het beeld is complex, waarbij de GLEC getallen duidelijk gunstiger uitvallen, en de ER getallen gemiddeld per schip soms hoger en soms lager uitvallen. Als er meer naar de details van de ER getallen gekeken wordt, lijkt er een systematische afwijking waarbij CO₂ uitstoot bij varen overschat lijkt te worden, en de stilligemissies en motorverliezen onderschat. Mogelijk hangt dat samen met een te hoog ingeschatte gemiddelde belading in de ER, maar dit is niet verder onderzocht. In dat geval zal het effect systematisch zijn, en emissies te veel op de vaarwegen, en te weinig in de havens. Dergelijke analyses zijn niet mogelijk voor de GLEC kentallen, omdat de details ontbreken. De achtergrond van de GLEC en de ER getallen, en daarmee het verschil met de monitoringsdata uit dit onderzoek zijn niet in detail onderzocht.

8.1 Vergelijking met Emissieregistratie

Om een toetsing van huidige kengetallen te maken is er een vergelijking gemaakt tussen de gemeten waarden en de waarden die voor deze zelfde schepen worden berekend voor de Emissieregistratie (ER). Wel is het zo dat de ER getallen inclusief hulpmotoren zijn berekend, waarbij er van uit is gegaan dat terwijl het schip stationair draait *alleen* de hulpmotoren draaien. In deze meetcampagne zijn hulpmotoren niet meegenomen, maar is gebleken dat de hoofdmotor wel draait als het schip stilstaat.

Voor het totale brandstofverbruik gemiddeld naar L/uur zijn de gemeten getallen meestal lager dan de ER ([Tabel 8.1](#)), voor containerschepen is de absolute afwijking gemiddeld 22%, voor tankers 22% en voor bulk 50%.⁴ In het geval van brandstofverbruik tijdens varen (in L/km, [Tabel 8.2](#)), is de absolute afwijking gemiddeld 19% voor containerschepen, voor tankers 22% en 47% voor bulk. De tijdsafhankelijke getallen worden weergegeven in [Figuur 8.1](#) en [Figuur 8.2](#). Er is voor de L/uur gemiddeldes een vrij goede overlap (e.g. C-V-1, C-VI-3), maar voor varende is er voor de meeste schepen een duidelijk over- of onderschatting.

⁴ Hier wordt de absolute afwijking gemiddeld zodat positieve en negatieve afwijking elkaar niet opheffen

Tabel 8.1: Vergelijking van totale gemiddelde brandstofverbruik in L/uur zoals gemeten in dit project, en die van de Emissieregistratie. De afwijking wordt berekend ten opzichte van de gemiddelde van de drie ER getallen (exclusief outliers die met *italics* aangegeven worden).

Schip	Gemeten [L/uur]	ER 2020 [L/uur]	ER 2021 [L/uur]	ER 2022 [L/uur]	Afwijking [%]
B-IV-1	13.9	39.7	38.3	37.3	-64
B-IV-2	24.0	27.7	34.0	33.0	-24
B-IV-3	17.2	34.4	36.3	38.6	-53
B-V-1-K	34.1	9.8	27.2	27.2	59
<i>C-IV-1</i>	<i>1.1</i>	<i>50.3</i>	<i>51.9</i>	<i>44.7</i>	
C-V-1	23.6	33.4	38.2	31.9	-32
C-V-2	44.1	<i>121.8</i>			
C-VI-1	80.8	68.6	66.7	70.3	18
C-VI-2	49.1	74.2	79.8	75.4	-36
C-VI-3	57.1	77.7	69.6	65.9	-20
<i>C-VI-4</i>		<i>83.5</i>	<i>81.4</i>	<i>72.0</i>	
C-VI-5-K	31.0	48.6	50.5	40.3	-33
C-VI-6-K	44.9	55.7	38.8	3.8	37
C-VI-7-K	57.6	54.3	48.1	34.7	26
T-IV-1	17.5	3.2	13.3	26.2	11
T-V-1	30.2	47.5	38.4	31.5	-23
T-V-2	16.1			17.8	
T-V-3	17.3	40.4	24.0	32.4	-46
T-VI-1	21.8			27.6	-21

De verschillen in de resultaten zijn veelal het resultaat van de verschillen tussen de meting en het modelleren van het brandstofverbruik. De tijden en afstanden uit de AIS data onder de Emissieregistratie komen goed overeen met de gemeten afstanden en tijden.

Tabel 8.2: Vergelijking van totale gemiddelde brandstofverbruik tijdens varen (snelheid meer dan 0.514 m/s) in L/km zoals gemeten in dit project, en die van de Emissieregistratie. De afwijking wordt berekend ten opzichte van de gemiddelde van de drie ER getallen (exclusief outliers die met *italics* aangegeven worden).

Schip	Gemeten [L/km]	ER 2020 [L/km]	ER 2021 [L/km]	ER 2022 [L/km]	Afwijking [%]
B-IV-1	5.5	8.9	9.3	8.9	-39
B-IV-2	6.1	8.1	8.5	8.4	-26
B-IV-3	6.0	11.0	11.0	10.0	-43
B-V-1-K	8.0	4.5	4.5	4.5	77
<i>C-IV-1</i>	<i>0.2</i>	<i>10.5</i>	<i>9.5</i>	<i>8.5</i>	
C-V-1	7.3	8.9	9.0	8.6	-18
C-V-2	10.3	11.1			-7

Schip	Gemeten [L/km]	ER 2020 [L/km]	ER 2021 [L/km]	ER 2022 [L/km]	Afwijking [%]
C-VI-1	11.5	16.1	16.0	16.0	-28
C-VI-2	13.1	16.0	16.2	15.7	-18
C-VI-3	13.0	13.3	14.1	14.0	-6
C-VI-4		16.1	16.5	16.3	
C-VI-5-K	6.7	8.8	8.9	8.6	-24
C-VI-6-K	9.7	8.8	8.2	7.3	20
C-VI-7-K	12.5	8.6	8.2	8.2	50
T-IV-1	4.9	7.1	7.3	7.4	-33
T-V-1	8.0	9.6	9.3	9.1	-14
T-V-2	9.0			9.7	-7
T-V-3	6.3	11.6	11.5	12.3	-46
T-VI-1	14.1			17.5	-20

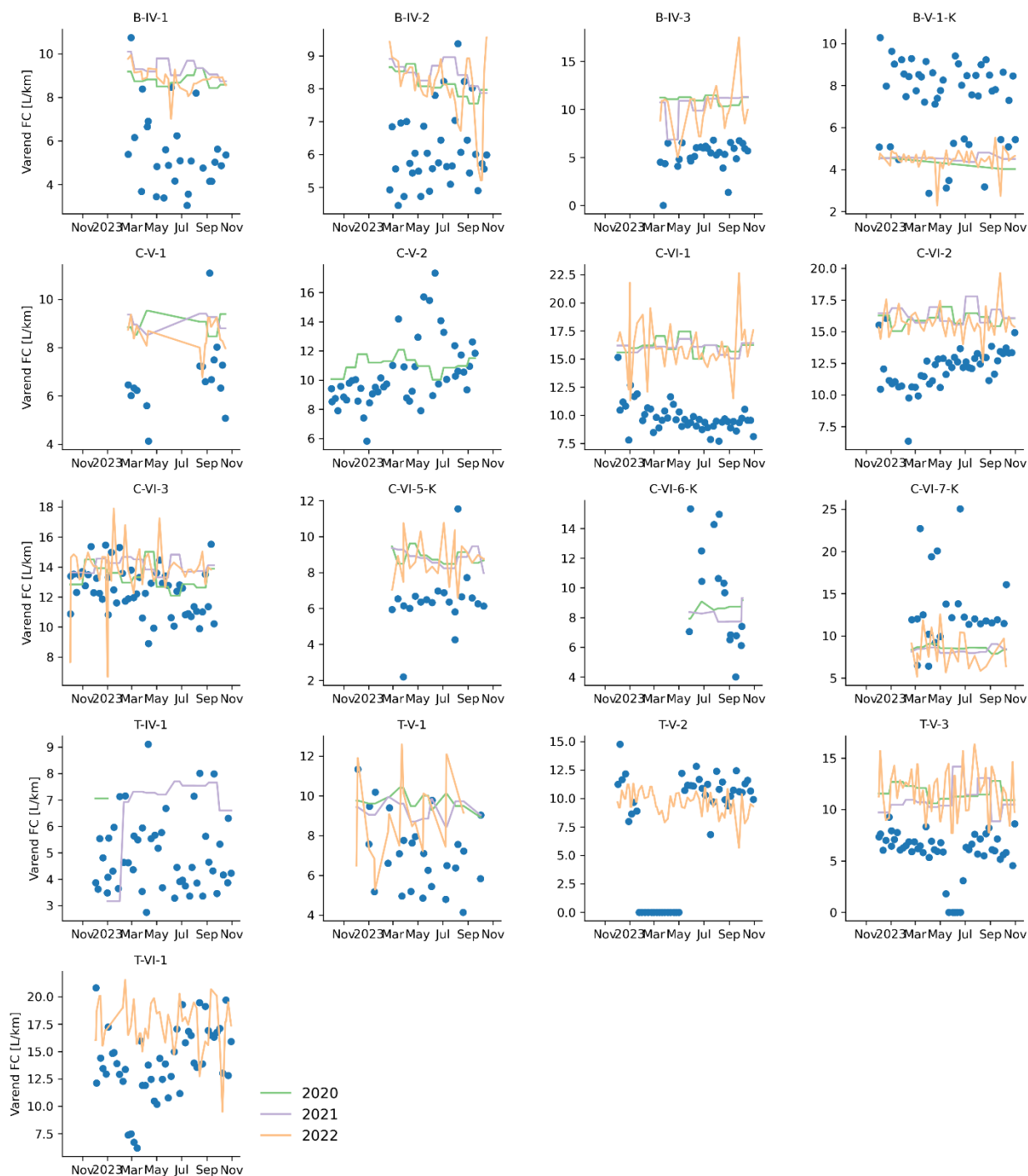
Het voordeel van de gedetailleerde data, gekoppeld aan de inzet van schepen, is de mogelijkheid om naar details te kijken. Daaruit volgt ook of de variatie in de data voor de verschillende schepen een bandbreedte geeft waarbinnen de verschillen vallen. In veel gevallen is er een systematische afwijking, groter dan de spreiding, tussen de metingen en de voorspellingen op basis van een model gebaseerd op AIS. Echter is dit niet altijd een afwijking naar boven of beneden.

De systematische afwijking zit wel in de opbouw van de emissies. Bij het totaal wordt een groter aandeel van de CO₂ uitstoot aan varen toegekend dan dat uit de praktijkdata volgt. Er is een groter systematisch verschil voor varen alleen, waarbij de Emissieregistratie de uitstoot lijkt te overschatten. Dat wordt zichtbaar als deze data apart geplot wordt. Tien schepen hebben een significante overschatting (met bijna alle weken hoger), terwijl twee een onderschatting geven. Voor de andere schepen ontbreekt de data voor een vergelijking.

Geconcludeerd wordt dat er flinke verschillen zijn tussen de meetwaarden (in liter per uur en per km) en de berekende waarden volgens Emissieregistratie. De verschillen kunnen zowel positief als negatief zijn. Voor het l/uur verbruik kan de meting tot 64% lager of tot 59% hoger uitvallen dan ER. Voor het l/km verbruik is dit tot 39% lager of tot 50% hoger.



Figuur 8.1: Vergelijking van totale gemiddelde brandstof per uur zoals gemeten in dit project (blauwe punten, week gemiddelden, voor 2022-2023), en die van Emissieregistratie getallen voor 2020 en 2021 (groen en paarse lijnen, maand gemiddelden), en 2022 (oranje lijn, week gemiddelden)

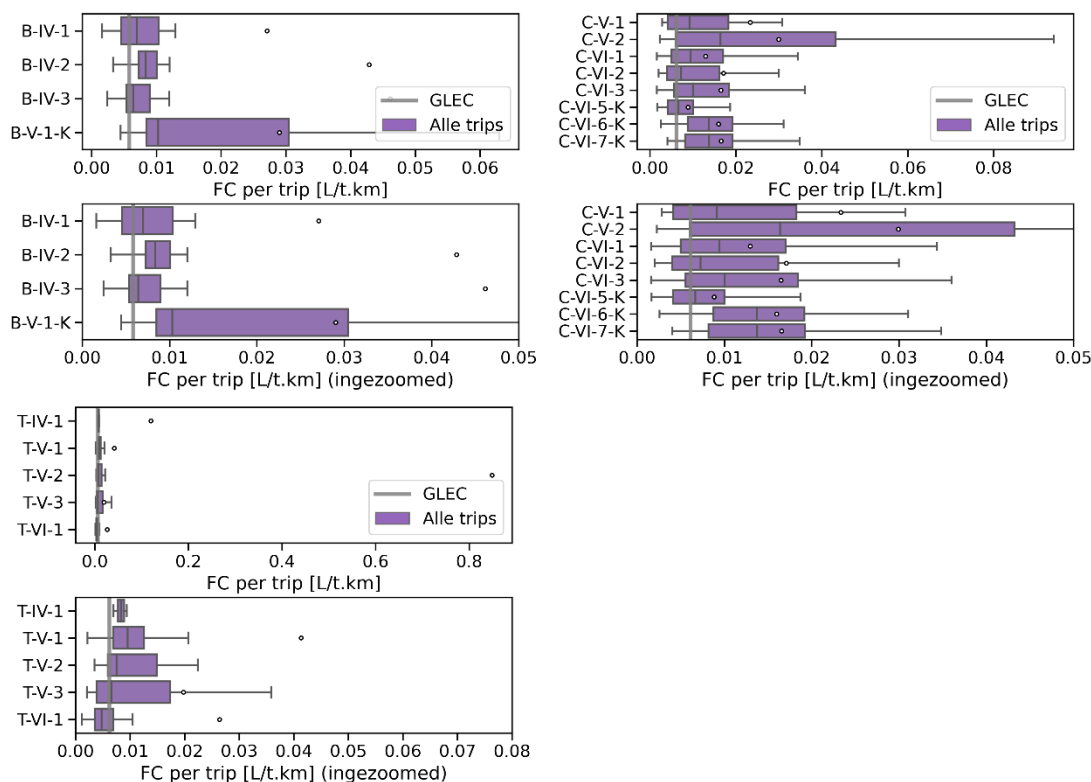


Figuur 8.2: Vergelijking van gemiddelde varend brandstof per km zoals gemeten in dit project (blauwe punten, week gemiddelden), en die van Emissieregistratie getallen voor 2020 en 2021 (groen en paarse lijnen, maand gemiddelden), en 2022 (oranje lijn, week gemiddelden)

De oorzaken van deze verschillen zijn niet onderzocht, maar er lijkt weinig samenhang te zijn met het type schip of de grootte.

8.2 Vergelijking kengetallen GLEC

In de binnenvaartsector zijn GLEC getallen beschikbaar⁴ om een CO₂ toekenning te doen aan logistieke activiteiten, waaronder binnenvaart. De getallen staan in Appendix A, Tabel A.6. De gangbare kengetallen ("*emission intensity factors*", gram per ton*km) kunnen vergeleken worden met de metingen. Deze getallen zijn niet gedetailleerd op inzet, belading, snelheid, of route, zoals dat voor de Emissieregistratie wel beschikbaar is. De vergelijking is daarom rudimentair en beperkt. Dergelijke kentallen zijn voor de gecertificeerde beoordeling van CO₂ uitstoot niet algemeen bruikbaar of toegestaan. Er is vanuit gegaan dat deze factoren het gemiddelde beeld geven van verschillende schepen, en daarom is alle data meegenomen in deze vergelijking. De metingen zijn factor 2 tot 3 hoger dan de gangbare kentallen voor brandstofverbruik en CO₂ die nu door, o.a., GLEC opgegeven worden. Het gevolg is dat resultaten op basis van deze primaire, gemeten data waarschijnlijk veel slechter uitkomen dan de generieke, secundaire data, ofwel de gemiddelde kentallen. Hierin is het verbruik van de hulpmotoren, zoals vereist in het GLEC beoordelingskader, nog niet meegenomen. Kentallen zouden een worst case inschatting moeten zijn, op basis van de bovenkant van de hier geobserveerde bandbreedte, om de juiste incentive te geven om beter te rapporteren, middels gebruik van '*primary data*' en daarop te sturen.



Figuur 8.3: Gemiddeld brandstofverbruik per trip in L/t.km berekend volgens de GLEC *framework*. De GLEC-kengetal wordt weergegeven door een grijze lijn. Witte stipjes geven de gemiddelde aan, de balk 25^e – 75^e percentiel.

Een vergelijking is ook gemaakt tussen het gemeten brandstofverbruik en de kengetallen van de GLEC *framework* (Figuur 8.3).⁵ Deze kentallen zijn een stuk lager dan brandstofverbruik berekend per trip volgens de methode die is beschreven. Dit geldt voor alle schepen voor het gemiddelde brandstofverbruik in L/ton.km, maar in de meeste gevallen ook voor de mediaan (Tabel 8.3).

Tabel 8.3: Vergelijking van totale gemiddelde brandstofverbruik in L/ton*km zoals gemeten in dit project, en die van de GLEC *framework*. De afwijking wordt berekend ten opzichte van de GLEC-kengetal, voor het gemiddelde en de kwartielen (exclusief outliers die met *italics* aangegeven worden).

Alias	FC gemiddeld [L/ton.km]	25 ^e percentiel [L/ton.km]	50 ^e percentiel [L/ton.km]	75 ^e percentiel [L/ton.km]	FC GLEC [L/ton.km]	Afwijking GLEC tov FC gem. [%]	Afwijking GLEC tov FC 50 ^e per. [%]
B-IV-1	5.1E-02	2.9E-03	8.0E-03	9.8E-02	5.8E-03	779%	38%
B-IV-2	2.3E-01	5.3E-03	7.9E-03	2.7E-01	5.8E-03	3866%	36%
B-IV-3	8.9E-02	4.4E-03	2.2E-02	6.1E-02	5.8E-03	1434%	279%
B-V-1-K	2.4E-02	6.2E-03	1.2E-02	3.1E-02	5.2E-03	362%	131%
<i>C-IV-1</i>	<i>7.3E-04</i>	<i>4.4E-05</i>	<i>2.9E-04</i>	8.5E-04	<i>7.9E-03</i>	-91%	-96%
C-V-1	1.9E-02	3.9E-03	7.2E-03	1.8E-02	7.9E-03	141%	-9%
C-V-2	4.8E-02	6.6E-03	1.9E-02	4.3E-02	6.1E-03	687%	211%
C-VI-1	1.0E-02	4.6E-03	7.4E-03	1.3E-02	6.1E-03	64%	21%
C-VI-2	1.5E-02	4.7E-03	8.1E-03	1.5E-02	6.1E-03	146%	33%
C-VI-3	1.5E-02	5.4E-03	9.0E-03	1.6E-02	6.1E-03	146%	48%
C-VI-4					<i>6.1E-03</i>		
C-VI-5-K	8.0E-03	4.7E-03	6.5E-03	9.1E-03	6.1E-03	31%	7%
C-VI-6-K	1.5E-02	7.7E-03	1.2E-02	1.8E-02	6.1E-03	146%	97%
C-VI-7-K	1.4E-02	8.7E-03	1.2E-02	1.6E-02	6.1E-03	130%	97%
T-IV-1	4.8E-01	4.2E-03	2.4E-01	9.6E-01	6.6E-03	7173%	3536%
T-V-1	7.7E-03	3.5E-03	6.0E-03	7.9E-03	6.6E-03	17%	-9%
T-V-2	2.8E+00	3.5E-03	7.0E-03	4.8E+00	6.6E-03	42324%	6%
T-V-3	2.6E-02	2.4E-03	7.7E-03	2.3E-02	6.6E-03	294%	17%
T-VI-1	6.2E-02	2.5E-03	7.5E-03	1.2E-01	6.6E-03	839%	14%

De GLEC kentallen liggen vaak buiten, of op de rand van, de normale bandbreedte van 25% tot 75% van de meetwaarden. Deze verschillen zouden nader onderzocht moeten worden.

⁵ Greene, S.; Lewis, A. *Global Logistics Emissions Council Framework for Logistics Emissions Accounting and Reporting, Version 2.0*, Smart Freight Centre, 2019.

9 Conclusies

Dit onderzoek is gebaseerd op praktijkgegevens. Met de combinatie van belading en stroming kiest de schipper, op voor de auteurs onbekende gronden, een motorvermogen en snelheid. Daarom komen niet alle combinaties voor en zijn vergelijkingen tussen keuzes beperkt tot de daadwerkelijke inzet van de schepen. Onderliggend aan de keuzes zijn de route en de maximale belading om een minimale kielspeling te bereiken op ondiepe punten in de gegeven route een belangrijke factor in inzet van schepen en het brandstofverbruik.

Kengetallen (*emission intensity factors*, ofwel uitstoot per ton*km) die uit de metingen komen zijn vaak een factor 2 tot 3 hoger dan die nu door o.a. GLEC opgegeven worden, en lijken samen te hangen met optimale inzet. Het grote nadeel daarvan is dat koplopers die op daadwerkelijke metingen rapporteren daardoor slechter uitkomen dan de generieke waarden, en daadwerkelijke brandstofbesparing niet herkend wordt op basis van deze referentie. De ER getallen zijn gemiddeld vergelijkbaar, maar per schip zijn de afwijkingen groot. Het ER model heeft duidelijk tekortkomingen, die ook deels zichtbaar zijn in een te hoge toedeling aan varen, en de afgelegde afstand.

Stroomopwaarts zijn de routes, en laad- en loslocaties, sterk bepalend voor de uitstoot per ton*km. Dat komt vooral door de maximale aflaaddiepte (effecten van ondiepe punten in de route) in de betreffende vaarweg, hetgeen afhankelijk is van waterstanden die sterk fluctueren. Dat betekent dat een voorspelling op basis van kengetallen gedifferentieerd moet worden gemaakt: de route en de maximale aflaaddiepte zijn bepalend voor het kengetal (brandstofverbruik per ton*km).

Bewust sturen op lager verbruik (actief aanpassen vaargedrag door schipper) kan grote verschillen in uitstoot per ton*km geven. Stroomafwaarts is het verschil tot wel 50% of meer. Voor stroomopwaarts is dat effect beperkt, ook vanwege de substantieel langere vaartijden bij lagere snelheden. Bewuste keuzes vragen veelal om het goed instrumenteren van een schip (flowmeters en telematica).

Het effect van lage waterstanden is groter dan op basale regels, namelijk proportionaliteit met totaalgewicht, geconcludeerd kan worden. Bij lage belading, vanwege laag water, zijn de marginale toename van uitstoot per ton*km al snel dat 10 cm minder diepte bij laag water kan leiden tot +30% meer uitstoot per ton*km. Met deze data is het mogelijk om de economische en uitstoot effecten van laag water in de Rijn beter te kwantificeren.

Het is de vraag of de gewenste kentallen in g/ton*km wel de juiste zijn om aan vast te houden voor de binnenvaart. Het is duidelijk dat vanuit de logistiek dit de gewenste metriek is, maar in de dagelijkse inzet van binnenvaartschepen, en de variatie daarin, drijft het niet zozeer de laagste CO₂ bij een gegeven inzet, maar eerder de gunstige inzet. Bijvoorbeeld, een schipper die lege containers terugvaart naar het containerdepot, komt zeer slecht uit in de g/ton*km vanwege het lage gewicht en grote volume van zijn lading, maar dat maakt zijn specifieke inzet niet minder relevant of noodzakelijk. Sturen op lagere g/ton*km helpt deze schipper niet in zijn taak.

Vanwege de beperkingen in de normale gebruiksdata kunnen verschiltesten samen met schippers helpen om de effecten van “anders varen” kwantitatief te meten.

Schippers hebben zelf gevoel en ervaring of overlevering van wat wel en niet werkt. Als testen in de praktijk laten zien hoeveel verschil dat nu uitmaakt, kunnen andere schippers daarmee ook hun voordeel doen. Ook testen van wat negatief uit zou moeten werken (en hoeveel dan) is waardevol.

Kunnen rapporteren met primaire, gemeten, data op basis van instrumentatie kan koplopers een concurrentievoordeel geven. Dat vraagt om default secundaire, generieke, data die duidelijk hogere uitstoot waardes, aan de veilige kant van de onzekerheidsmarge, geeft dan best-of-class schippers. Het is belangrijk dat ook de verladers dit verschil begrijpen om betrouwbare data te stimuleren.

Stationair draaien van de hoofdmotoren geeft in een enkel geval van deze 19 schepen een verrassend hoge bijdrage aan de uitstoot van CO₂, tot 17% op basis van 44% stilliggen. In een aantal gevallen is de bijdrage boven de 5%. Dat is niet altijd te voorkomen met bestaande schepen, maar is de aandacht zeker waard.

Het effect van grote motoren op verbruik is aanzienlijk, stationair en varend. Inzet van verbrandingsmotoren afgestemd op een mogelijke piekvraag aan vermogen die echter zelden voorkomt leiden tot een fors extra sluipverbruik door het jaar tot 17% van het totale verbruik, in het meest extreme geval. Dat een schip niet meer dan 55% van het vermogen heeft nodig gehad. Als dit ook de situatie is voor de gehele levensduur van de motoren het schip dat is er een evidente mogelijkheid om veel brandstof te besparen. Andere schepen laten een kleiner effect zien, maar meerdere schepen hebben meer dan 5% extra brandstofverbruik door een groot geïnstalleerd, maar ongebruikt, vermogen.

Voor het ongebruikt vermogen worden alternatieve aandrijvingen voorgesteld om deze verliezen te beperken. Hybride aandrijvingen met meerdere gen-sets of gecombineerde mechanisch-elektrische hybride zijn flexibeler, maar het specifieke ontwerp is van belang om de voordelen van hybride aandrijving niet teniet te doen in verliezen in omzetting van energie en vermogen.

Het meten van NO_x op dezelfde manier zou ook kunnen werken als motorfabrikanten toegang geven tot het motormanagementsysteem. Moderne Stage V motoren hebben SCR installaties met regelingen op basis van geïnstalleerde NO_x-sensoren. Deze gegevens beschikbaar maken kan ertoe leiden dat inzet en motorbelastingen met hoge NO_x-uitstoot vermeden kunnen worden, en problemen met de installatie tijdig gesignaleerd worden. Nu is het onduidelijk of en wanneer de SCR goed functioneert met een typische reductie van de NO_x-emissies met 85%-98% (Stage V (NRE) en Euro VI motoren).

10 Aanbevelingen

Deze studie is gebaseerd op verbruiksdata van binnenvaartschepen tijdens hun normale inzet. De redenen achter de keuzes van de schippers om langzamer of sneller te varen en een hoger motorvermogen te wensen, en daar mogelijk achter de keuzes van de verladers en details van contracten zijn onbekend. Alleen de effecten van de praktijkinzet zijn zichtbaar. Het beeld is een complexe wisselwerking tussen de keuzes van de schipper, het schip, de route, de belading, de waterstand, en de stroming. Er is geen standaard belading of snelheid, maar deze is afhankelijk van de kleinste kielspeling op de route. Waarbij de kielspeling weer afhankelijk is van de route en de scheepsbeladingen ten gevolge van dynamische waterstanden op specifieke delen de route.

10.1 De binnenvaartmarkt

Langzamer varen, zeker stroomafwaarts, en voller beladen zijn de simpele maatregelen om de uitstoot per ton*km te verminderen. Daarnaast kan het kiezen voor een schip en motor die optimaal is voor de gebruikelijke routes verdere blijvend besparing geven. Maar deze studie laat zien dat daar beperkingen aan zijn, bijvoorbeeld door kielspeling, en dat schippers zelf mogelijk verdere beperkingen hebben, zoals contractuele verplichtingen en kleine marges of hoge vaste kosten (kosten voor kapitaal en bemanning), die in deze studie niet aan het licht komen, waardoor zij dergelijke adviezen niet altijd kunnen volgen. Tijdsdruk en flexibiliteit van inzet zijn, in een kosten gedreven markt, vaak belangrijke factoren die bepalen of het mogelijk is om met simpele maatregelen brandstof te reduceren en CO₂-uitstoot te verminderen. Alle partijen moeten daarin samenkomen om snelheid te verlagen daar waar het zin heeft en loont, belading te verhogen, daar waar het mogelijk is, en de restwaarde van de op inzet geoptimaliseerde schepen te behouden. Dit vraagt een gezamenlijke ambitie en aanpak in de markt.

10.2 Vervolgstappen

De huidige kentallen voor de binnenvaart zijn te generiek, en ze doen geen recht aan aspecten van de inzet die niet altijd onder controle zijn van de schipper. Kentallen voor binnenvaartschepen zouden opgesplitst moeten worden in segmenten vaarwegen, van 30 tot 100 kilometer, per richting, bij specifieke waterstanden, met vergelijkbare omstandigheden zoals stroming en ondiepe stukken waardoor de lading beperkt moet worden. In dat geval kunnen effecten van stroming realistisch meegenomen worden, op basis van metingen en monitoring van voldoende schepen. Verder zouden kentallen rekening moeten houden met basale aspecten van de inzet, zoals snelheid, type lading en beladingsgraad.

Grofweg telt het leeggewicht van het schip tweemaal zo zwaar dan de belading bij een brandstofverbruik op basis van het totaal gewicht, en is een lage belading nog nadeliger daardoor. Verder zouden grotere schepen gunstiger moeten zijn, vanwege de lagere vaarweerstand per gewicht. Maar het lijkt erop dat het hoge geïnstalleerde vermogen bij grotere schepen, dat voordeel teniet doet. Al met al, met de variatie per vaarweg en schip, snelheid, en seizoen, is het de vraag of deze kentallen nuttiger zijn dan simpele kentallen op basis van het motorvermogen en/of toerentallen.

De schroefkromme geeft een goede indicatie van het gevraagde motorvermogen, en met ongeveer 33% motorlast is het brandstofverbruik per uur, in liters per uur 1/12 van het maximaal vermogen in kW. Bijvoorbeeld, in een binnenvaartschip, een 1000 kW motor draait typisch op 330 kW vermogen en verbruikt daarvoor 125 liter per uur.

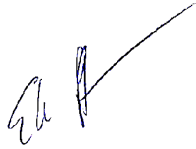
Uiteindelijk bepaalt het doel van het kentallen wat de beste manier is om deze getallen af te leiden. Bij het ontwerp van een schip zijn andere details belangrijk, dan bij de inzet, of om modaliteiten te vergelijken. Voor toekenning van CO₂ emissies aan een vervoersvraag zijn er überhaupt fundamentele en principiële vragen, hoe de extra CO₂ wordt toegekend aan laag water, of passages langs ondiepe punten die cruciaal zijn voor de specifieke inzet.

In termen van onderzoek is de belangrijkste conclusie dat complete monitoringsdata, zoals hier gebruikt, haar beperkingen heeft, omdat de combinatie van vaarweg, belading, en vaar-richting, er verschillende snelheden wordt gevaren. Daarom kan er moeilijk een vergelijking gemaakt kan worden die effecten isoleert. In een vervolgonderzoek is het relevant om meer gecontroleerde vaarinstructies te hebben waarmee deze effecten wel geïsoleerd kunnen worden, zodat er specifieke adviezen voor brandstofbesparing afgeleid kunnen worden. Dergelijke vergelijkingen kunnen breed inzicht geven aan de schippers en andere belanghebbenden, en daarmee sturen op goed onderbouwde keuzes.

Nederland zit sinds de uitspraak van de Raad van State in 2019 in een stikstofcrisis. Veel discussies gaan over landbouw en ammoniak (NH₃), maar voor woningbouw, verkeer en vervoer, en industrie is altijd dezelfde NO_x uitstoot de belemmerende factor aan de ontwikkeling. Die sectoren zouden elkaar kunnen helpen als het geregeld wordt. Binnenvaart kan daar een grote positieve rol in spelen, omdat het reduceren van NO_x emissies in de binnenvaart zeer kosteneffectief is, in vergelijking met andere NO_x bronnen. Een binnenvaartschip met een paar jaar oude of oudere motor stoot per uur enkele kilogrammen NO_x uit, wat met Stage V (NRE) of Euro-VI motoren teruggebracht kan worden tot een paar honderd gram. Als per kilogram vermeden NO_x (bijvoorbeeld op basis van het AdBlue verbruik, waarbij 1 liter Adblue 460 gram NO_x reduceert) slechts een fractie van de maatschappelijke kosten vergoed worden aan de schipper, is dat al een goed verdienmodel voor de binnenvaart. Dat vraagt de installatie van motoren met minder dan 1 g/kWh NO_x (Stage V (NRE) of Euro-VI), en registratie-, monitoring-, en controlemechanismen. Met 2000 uur varen per jaar per schip is de NO_x reductie al snel 5 ton per jaar, vergelijkbaar met de uitstoot van al het wegverkeer op een kilometer snelweg per jaar. Met 100.000 tot 150.000 Euro investering, en enkele duizenden Euro operationele kosten blijven slechts enkele honderden kilogrammen NO_x uitstoot over.

Ondertekening

TNO › Mobilitv & Built Environment › Den Haag, 21 december 2023



Ellen Hofbauer
Plv. Research Manager



Jessica M. de Ruiter
Auteur

Bijlage A

Tabellen

Tabel A.1: Gemiddelde, 25^e, 50^e, en 75^e percentiel van belading tijdens de hele meetperiode. Per maand wordt de massa van lading terwijl een schip vaart gemiddeld, lading tijdens stilliggen en manoeuvreren wordt hier dus weggelaten

Alias	Schip tonnage [ton]	Lading gemiddeld [ton]	25 ^e percentiel [ton]	50 ^e percentiel [ton]	75 th percentiel [ton]
B-IV-1	2608	928.1	38.6	1029.0	1751.2
B-IV-2	2407	1143.1	11.5	1686.9	1762.1
B-IV-3	2348	712.2	69.3	218.4	1433.0
B-V-1-K	3476	663.2	154.2	277.1	1636.8
C-IV-1	1672	590.9	339.2	502.2	862.8
C-V-1	3244	966.3	546.6	1071.9	1376.6
C-V-2	3878	661.6	292.7	537.4	792.3
C-VI-1	5208	1284.6	758.9	1148.8	1718.4
C-VI-2	5209	1448.1	661.8	1203.6	2038.5
C-VI-3	4332	1508.5	700.3	1352.3	2199.2
C-VI-4	5053	1835.8	1121.3	1852.6	2570.0
C-VI-5-K	3743	927.2	621.7	951.7	1220.5
C-VI-6-K	3743	795.7	500.0	789.0	1048.6
C-VI-7-K	3719	914.0	691.9	892.1	1146.1
T-IV-1	1632	505.1	2.7	9.4	1008.4
T-V-1	2348	723.5	0.0	237.5	1381.0
T-V-2	3392	1589.2	1.6	1764.3	2936.7
T-V-3	4558	1025.6	22.4	263.2	2003.7
T-VI-1	8773	2750.2	60.1	1697.9	5387.5

Tabel A.2: Gemiddelde, 25^e, 50^e, en 75^e percentiel van brandstofverbruik in L/uur tijdens de hele meetperiode (exclusief stationaire en manoeuvreren brandstofverbruik).

Alias	FC gemiddeld [L/uur]	25 ^e percentiel [L/uur]	50 ^e percentiel [L/uur]	75 ^e percentiel [L/uur]
B-IV-1	59.6	40.3	52.4	76.0
B-IV-2	82.1	53.4	72.6	110.9
B-IV-3	59.4	53.0	59.4	69.8
B-V-1-K	71.0	36.1	77.4	95.8
C-IV-1	6.3	1.6	4.6	9.3
C-V-1	81.3	62.2	75.4	93.3

C-V-2	124.6	82.8	120.7	159.2
C-VI-1	128.2	95.8	121.6	160.2
C-VI-2	119.5	71.1	110.4	157.4
C-VI-3	139.8	88.0	131.1	183.7
C-VI-4				
C-VI-5-K	60.1	37.7	56.1	75.7
C-VI-6-K	94.3	50.3	81.1	130.9
C-VI-7-K	104.7	64.6	89.8	134.9
T-IV-1	41.6	36.2	40.7	47.5
T-V-1	80.2	52.3	67.1	102.6
T-V-2	123.7	90.2	139.9	153.6
T-V-3	70.0	57.3	69.1	76.6
T-VI-1	148.6	88.3	146.7	193.5

Tabel A.3: Gemiddelde, 25^e, 50^e, en 75^e percentiel van brandstofverbruik in L/ton.km tijdens de hele meetperiode. Hierbij worden de totale brandstof gebruik in L opgeteld en gedeeld door de totale kilometers keer de gemiddelde lading per trip.

Alias	FC gemiddeld [L/ton.km]	25 ^e percentiel [L/ton.km]	50 ^e percentiel [L/ton.km]	75 ^e percentiel [L/ton.km]
B-IV-1	5.1E-02	2.9E-03	8.0E-03	9.8E-02
B-IV-2	2.3E-01	5.3E-03	7.9E-03	2.7E-01
B-IV-3	8.9E-02	4.4E-03	2.2E-02	6.1E-02
B-V-1-K	2.4E-02	6.2E-03	1.2E-02	3.1E-02
C-IV-1	7.3E-04	4.4E-05	2.9E-04	8.5E-04
C-V-1	1.9E-02	3.9E-03	7.2E-03	1.8E-02
C-V-2	4.8E-02	6.6E-03	1.9E-02	4.3E-02
C-VI-1	1.0E-02	4.6E-03	7.4E-03	1.3E-02
C-VI-2	1.5E-02	4.7E-03	8.1E-03	1.5E-02
C-VI-3	1.5E-02	5.4E-03	9.0E-03	1.6E-02
C-VI-4				
C-VI-5-K	8.0E-03	4.7E-03	6.5E-03	9.1E-03
C-VI-6-K	1.5E-02	7.7E-03	1.2E-02	1.8E-02
C-VI-7-K	1.4E-02	8.7E-03	1.2E-02	1.6E-02
T-IV-1	4.8E-01	4.2E-03	2.4E-01	9.6E-01
T-V-1	7.7E-03	3.5E-03	6.0E-03	7.9E-03
T-V-2	2.8E+00	3.5E-03	7.0E-03	4.8E+00
T-V-3	2.6E-02	2.4E-03	7.7E-03	2.3E-02
T-VI-1	6.2E-02	2.5E-03	7.5E-03	1.2E-01

Tabel A.4: Gemiddelde, 25^e, 50^e, en 75^e percentiel van stationaire brandstofverbruik in L/uur (totale brandstofverbruik gedeeld door totale uren)

Alias	Stationair FC gemiddeld [L/uur]	25 ^e percentiel [L/uur]	50 ^e percentiel [L/uur]	75 ^e percentiel [L/uur]
B-IV-1	7.6	5.2	6.3	8.6
B-IV-2	7.4	5.8	6.4	8.0
B-IV-3	35.6	31.9	38.7	39.5
B-V-1-K	5.8	2.7	5.1	7.1
C-IV-1	2.6	1.0	1.0	2.1
C-V-1	33.1	32.4	32.6	32.8
C-V-2	16.8	12.4	15.5	20.1
C-VI-1	49.3	33.9	57.4	59.9
C-VI-2	34.2	31.0	33.3	37.1
C-VI-3	29.4	21.2	26.6	32.3
C-VI-5-K				
C-VI-6-K	8.8	6.2	7.4	9.6
C-VI-7-K	13.2	6.4	11.9	16.1
T-IV-1	16.4	12.0	14.3	18.3
T-V-1	7.9	4.2	6.8	10.8
T-V-2	35.4	35.0	35.0	35.0
T-V-3	16.2	11.9	14.6	19.6
T-VI-1	43.4	43.6	43.9	44.0

Tabel A.5: Gemiddelde, 25^e, 50^e, en 75^e percentiel van snelheid in m/s tijdens de hele meetperiode

Alias	Snelheid gemiddeld [m/s]	25 ^e percentiel [L/uur]	50 ^e percentiel [L/uur]	75 ^e percentiel [L/uur]
B-IV-1	3.3	2.7	3.3	3.7
B-IV-2	3.3	2.5	2.6	4.6
B-IV-3	3.1	2.3	2.8	4.3
B-V-1-K	3.2	2.3	2.7	4.4
C-IV-1	3.0	2.4	3.1	3.6
C-V-1	3.3	2.9	3.4	3.7
C-V-2	3.8	2.9	3.8	4.5
C-VI-1	3.7	3.0	3.6	4.5
C-VI-2	3.0	1.3	3.5	4.3
C-VI-3	3.5	2.9	3.6	4.3
C-VI-4	3.6	2.9	3.7	4.4
C-VI-5-K	3.0	2.3	2.9	3.6
C-VI-6-K	2.9	2.3	2.9	3.5
C-VI-7-K	2.9	2.2	2.8	3.5

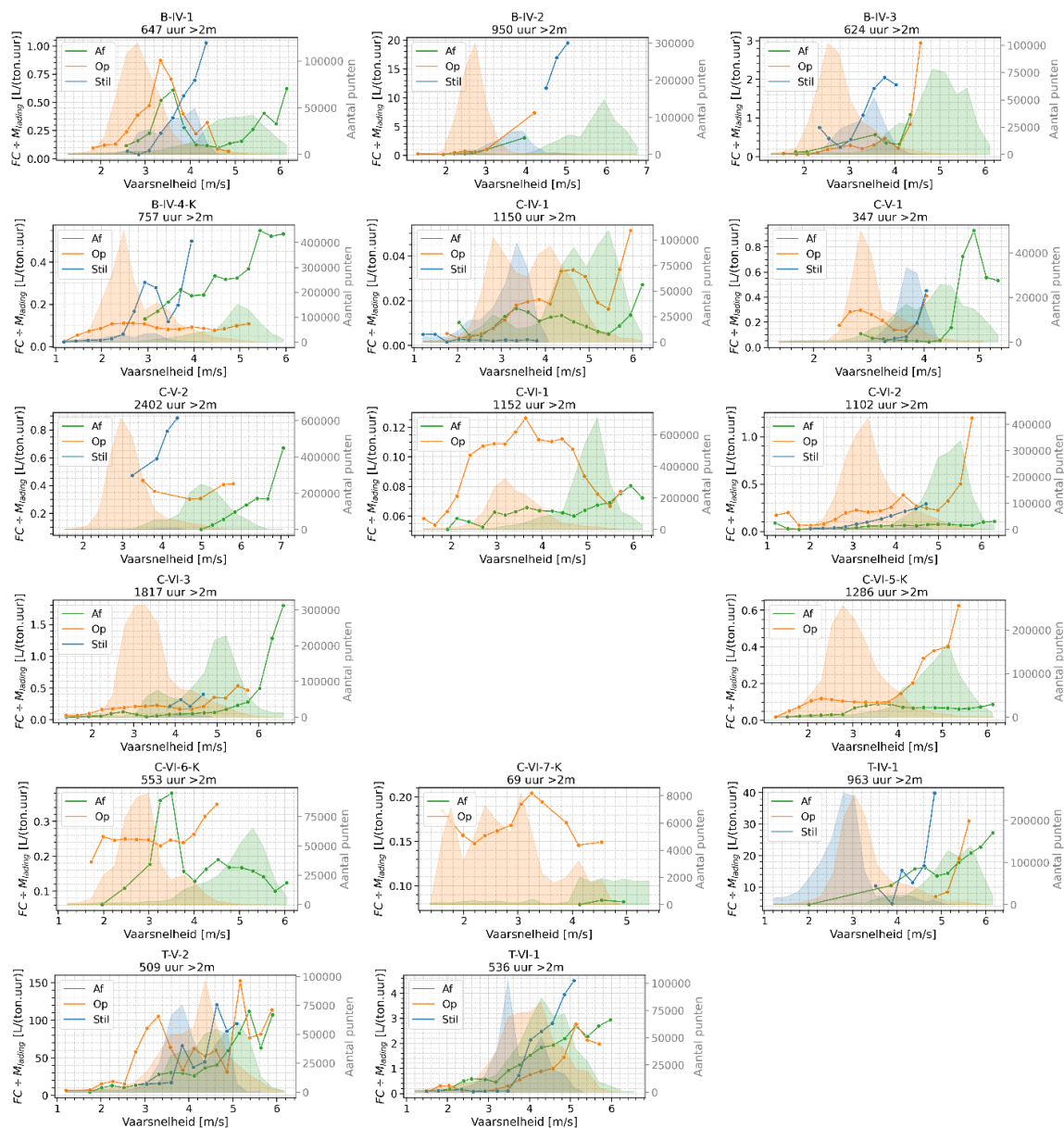
T-IV-1	2.8	2.6	2.9	3.2
T-V-1	3.7	2.8	3.7	4.6
T-V-2	3.0	2.4	3.2	3.7
T-V-3	3.0	2.6	3.0	3.4
T-VI-1	3.1	2.5	3.2	3.8

Tabel A.6: Getallen uit het GLEC raamwerk, waarmee vergeleken is.

Table 36. Inland waterways transport emissions intensity factors							
Vehicle characteristics and size	Loading Basis	Fuel	Consumption factor (kg/t-km)	Consumption factor (l/t-km)	Emission intensity (g CO ₂ e/t-km)		
	Combined Load Factor & Empty Running				WTT	TTW	WTW
Motor vessels < 80 m (< 1000 t)	55%	Diesel	0.0076	0.0091	5.2	24	30
Motor vessels 85–110 m (1000–2000 t)	52%		0.0048	0.0058	3.3	15	19
Motor vessels 135 m (2000–3000 t)	50%		0.0049	0.0059	3.4	16	19
Coupled convoys (163–185 m)	61%		0.0044	0.0052	3.0	14	17
Pushed convoy – push boat + 2 barges	70%		0.0044	0.0053	3.1	14	17
Pushed convoy – push boat + 4/5 barges	70%		0.0025	0.0030	1.7	8.0	10
Pushed convoy – push boat + 6 barges	70%		0.0019	0.0023	1.3	6.1	7.4
Tanker vessels	65%		0.0055	0.0066	3.8	18	21
Container vessels 110 m	75%		0.0065	0.0079	4.5	21	26
Container vessels 135 m	75%		0.0051	0.0061	3.5	16	20
Container vessels – Coupled convoys	68%		0.0051	0.0061	3.5	16	20

Bijlage B

Figuren



Figuur B.1: Brandstofverbruik in liters per ton vervoerde lading in verschillende stromingen (lijnen) als functie van vaarsnelheid waar de vaarsnelheid constant is en meer dan 1 m/s, en met een kielspelings meer dan 2 meter. De gekleurde vlakken geven de aantal gemeten punten per snelheid, oftewel de snelheidsdistributie.

Mobility & Built Environment

Anna van Buerenplein 1
2595 DA Den Haag
www.tno.nl