



**BETTER SHIPS, BLUE OCEANS**

## **Brandstofverbruik en emissies binnenvaart bij verschillende waterstanden, vervolgonderzoek**

Rapport nr. : 34961-1-SHIPS  
Datum : februari 2024  
Versie : 1.3  
Definitief rapport

# Brandstofverbruik en emissies binnenvaart bij verschillende waterstanden, vervolgonderzoek

MARIN opdrachtnummer : 34961  
MARIN Project Manager : Nicole van Spronsen

Aantal pagina's : 51

Opdrachtgever : Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving  
Lange Kleiweg 34  
2288 GK Rijswijk

Order document : "Infra voor klimaatneutrale schepen vd toekomst"  
Referentie : Project: Duurzame Binnenvaart  
Zaaknummer 31189003, 9 juni 2023

Opgesteld door : Erik Rotteveel, Nicole van Spronsen  
Gecontroleerd door : Patrick Hooijmans

Versie	Datum	Versie omschrijving
1.0	27 oktober 2023	Eerste conceptversie ter controle voor RWS
1.1	12 december 2023	Bijgewerkte versie n.a.v. opmerkingen RWS
1.2	17 januari 2024	Enkele figuren en bijbehorende uitleg bijgewerkt
1.3	23 februari 2024	Tekstuele aanpassingen

<b>INHOUDSOPGAVE</b>	<b>PAGINA</b>
OVERZICHT VAN TABELLEN EN FIGUREN.....	III
SAMENVATTING.....	V
1 INLEIDING .....	1
2 AANPAK.....	3
2.1 Scope.....	3
2.2 Aanpak.....	4
2.3 Achtergrondinformatie .....	6
3 VOORBEREIDEN SCENARIO'S EN SIMULATIES .....	7
3.1 Uitwerking geschematiseerde vervoer scenario's.....	7
3.1.1 Periodes bij normale, lage en extreme lage waterstand.....	7
3.1.2 Te onderzoeken sloopstypes .....	8
3.1.3 Scenario's met onbeladen schepen.....	9
3.1.4 Aantal reizen .....	9
3.1.5 Herverdeling van lading bij lage waterstanden .....	10
3.1.6 Aantal scenario's.....	11
3.2 Voorbereiden reissimulaties .....	11
3.2.1 Kalibratie snelheids-vermogensrelatie .....	12
3.2.2 Bepalen vaarsnelheid.....	12
3.2.3 Modelleren emissies en brandstofverbruik .....	12
3.2.4 Route en omgevingscondities.....	14
4 RESULTATEN REISSIMULATIES .....	17
4.1 Brandstofverbruik en emissies voor vloot, ladingtypes en sloopstypes.....	17
4.2 Opsplitsing van gevolgen van lagere waterstand.....	20
4.2.1 Opsplitsing van gevolgen per reis.....	22
4.2.2 Opsplitsing van gevolgen per scenario .....	25
5 DISCUSSIE.....	30
5.1 Vergelijking met het voorgaande onderzoek.....	30
5.2 Gevolgen en maatregelen bij zeer lage waterstand.....	31
5.3 Kleinere schepen bij lage waterstand.....	31
5.4 Gelijkblijvend ladingvolume per week - vertrekpunt van de studie.....	32
6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN.....	33
6.1 Conclusies .....	33
6.2 Aanbevelingen.....	34
REFERENTIES.....	35
APPENDIX I: RESULTATEN ALLE SIMULATIES .....	36
APPENDIX II: OPDELING LOGISTIEKE EFFECTEN VERSCHILLENDE SCENARIOS .....	37
APPENDIX III: GEVOLGEN VAN LAGERE WATERSTAND OP HET SCHIP.....	38
APPENDIX IV: OVERZICHT SCHEEPSKLASSEN EN AFMETINGEN.....	39

## OVERZICHT VAN TABELLEN EN FIGUREN

### Tabellen

Tabel 1:	Overzicht gekozen scenario's .....	5
Tabel 2:	Relevante scheepsklassen per situatie, verdeeld in een groot lading aandeel (10 tot 100 procent) en een klein ladingaandeel (5 tot 10 procent). De scheepstypen zijn geordend op hun ladingaandeel, van groot naar klein. Niet alleen schepen uit de kolom 10% tot 100% zijn meegenomen, zie tabel 1 voor het volledige overzicht van gesimuleerde scheepstypen.....	8
Tabel 3:	Overzicht van gebruikte waardes voor weerstands- en vermogensberekeningen met vermogen per motor, aantal schroeven (en motoren), schroefdiameter en snelheid bij 100% vermogen. ....	12
Tabel 4:	Correctie PM-emissie bij verschillende motorbelasting .....	14

### Figuren

Figuur 1:	Emissies en brandstofverbruik per ton lading bij normale, lage en extreem lage waterstand. Emissie van fijnstof (PM) is uitgedrukt in een andere eenheid om de balk zichtbaar te maken. ....	vi
Figuur 2:	Debiet bij Lobith in 2018 .....	7
Figuur 3:	Scheepspassages stroomopwaarts en stroomafwaarts, voor beladen (ongeacht ladingsoort) en onbeladen toestand bij drie waterstanden. Het totaal aantal getelde vaarten, van schepen opgenomen in de studie, per week bedraagt 563, 854 en 928 voor normale, lage en extreem lage waterstand.....	9
Figuur 4:	Verdeling van lading over scheepstypen per combinatie van waterstand, ladingtype en vaarrichting.....	10
Figuur 5:	Verdeling van leegvarende ladingcapaciteit per combinatie van waterstand en vaarrichting	11
Figuur 6:	SFC-Diagram [g/kWh] op basis van het model van Shi [4] .....	13
Figuur 7:	NO <sub>x</sub> -uitstoot zoals gemodelleerd in Gulliver op basis van het model van Sui, vergeleken met verschillende niveaus van emissie-eisen.....	13
Figuur 8:	De gebruikte route voor de simulaties; van Rotterdam naar Duisburg.....	15
Figuur 9:	Waterdiepte langs route (Rotterdam-Duisburg) in week 18 (normale waterstand, 1800 m <sup>3</sup> /s), 30 (lage waterstand, 1020 m <sup>3</sup> /s) en 42 (extreem lage waterstand, 700 m <sup>3</sup> /s) in 2018, inclusief de meetpunten van waterniveau (pegels) langs de vaarroute.....	15
Figuur 10:	Stroomsnelheid langs route (Rotterdam-Duisburg) in week 18 (normale waterstand, 1800 m <sup>3</sup> /s), 30 (lage waterstand, 1020 m <sup>3</sup> /s) en 42 (extreem lage waterstand, 700 m <sup>3</sup> /s) in 2018, inclusief de meetpunten van waterniveau (pegels) langs de vaarroute.....	16
Figuur 11:	Brandstofverbruik en emissies per ton lading over de gehele vloot bij drie waterstanden en de toename ervan in lage en extreem lage waterstand ten opzichte van normale waterstand. PM (fijnstof) emissie is weergegeven in een andere eenheid om de balk zichtbaar te maken. ....	17
Figuur 12:	CO <sub>2</sub> emissie [ton] voor elk ladingtype (en lege vaart) bij drie waterstanden en de toename ervan in lage en extreem lage waterstand ten opzichte van normale waterstand.....	18
Figuur 13:	CO <sub>2</sub> emissie per ton lading [ton/ton-lading] voor elk ladingtype bij drie waterstanden en de toename ervan in lage en extreem lage waterstand ten opzichte van normale waterstand..	18
Figuur 14:	CO <sub>2</sub> emissie per ton lading [kg/ton-lading] per scheepstype bij drie waterstanden en de toename ervan in lage en extreem lage waterstand ten opzichte van normale waterstand..	19
Figuur 15:	Totale verandering (links) van CO <sub>2</sub> -emissie per reis en de impact van losse hydromechanische effecten (rechts) op de verandering, voor M8 schepen met droge bulk, stroomopwaarts (boven) en –afwaarts (onder).....	22
Figuur 16:	Totale verandering (links) van CO <sub>2</sub> -emissie per reis en de impact van losse hydromechanische effecten (rechts) op de verandering, voor M8 schepen met natte bulk, stroomopwaarts (boven) en –afwaarts (onder).....	23
Figuur 17:	Totale verandering (links) van CO <sub>2</sub> -emissie per reis en de impact van losse hydromechanische effecten (rechts) op de verandering, voor M8 schepen met containers, stroomopwaarts (boven) en –afwaarts (onder).....	24

Figuur 18:	Totale verandering (links) van CO <sub>2</sub> -emissie per reis en de impact van losse hydromechanische effecten (rechts) op de verandering, voor M8 schepen in lege vaart, stroomopwaarts (boven) en –afwaarts (onder).....	25
Figuur 19:	Totale verandering (links) van CO <sub>2</sub> -emissie en de impact van hydromechanische en logistieke effecten (rechts) op de verandering, voor M8 schepen met droge bulk, stroomopwaarts (boven) en –afwaarts (onder).....	26
Figuur 20:	Totale verandering (links) van CO <sub>2</sub> -emissie en de impact van hydromechanische en logistieke effecten (rechts) op de verandering, voor droge bulk, stroomopwaarts (boven) en –afwaarts (onder).....	27
Figuur 21:	Totale verandering (links) van CO <sub>2</sub> -emissie en de impact van hydromechanische en logistieke effecten (rechts) op de verandering, voor gehele vloot, stroomopwaarts (boven) en –afwaarts (onder).....	28
Figuur 22:	Totale verandering (links) van CO <sub>2</sub> -emissie en de impact van hydromechanische en logistieke effecten (rechts) op de verandering, voor gehele vloot exclusief lege vaart, stroomopwaarts (boven) en -afwaarts (onder).....	29
Figuur 23:	Verandering van brandstofverbruik voor scenario's opgenomen in het voorgaande onderzoek .....	30
Figuur 24:	Figuur 12 uit MARIN rapport no. 34255-1-SHIPS.....	31

## SAMENVATTING

Droogte, in combinatie met bodemerrosie, vormt de grootste bedreiging voor de bevaarbaarheid van het hoofdvaarwegennet. Bij vrij afstromende rivieren (zoals de Waal) leidt droogte tot afname van de vaardiepte (en vaarweg breedte). Door klimaatverandering neemt de waterafvoer steeds verder af in droge periodes en ook de duur van de droogte wordt langer<sup>1</sup>.

MARIN heeft in dit kader de opdracht gekregen te onderzoeken hoe klimaatverandering het vervoer over binnenwater raakt op het gebied van duurzaamheid. De studie beoogt inzicht te geven in het brandstofverbruik en emissies van binnenvaartschepen tijdens laagwaterperiodes. De huidige studie is een vervolg en uitbreiding op een eerder uitgevoerde verkenning. In de huidige studie is een extra waterstand opgenomen, wordt duwvaart uitgebreider geanalyseerd en is ook lege vaart meegenomen in de berekeningen.

Middels reissimulaties voor de route Rotterdam - Duisburg is onderzocht hoeveel brandstof er nodig is om een vaste hoeveelheid lading te vervoeren en hoeveel CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> en PM emissies daarbij vrij komen. Deze studie is uitgevoerd voor drie waterstanden: een normale waterstand, een lage waterstand en een extreem lage waterstand. Deze waterstanden worden gekenmerkt door debieten van respectievelijk 1800, 1020 en 700 m<sup>3</sup>/s bij Lobith. Een aantal representatieve scheepstypen, geselecteerd op basis van hun aandeel in het totale vervoersvolume, is gesimuleerd in zowel de opvaart als de afvaart. In totaal zijn 189 scenario's geanalyseerd waarbij een scenario geldt als een combinatie van waterstand, ladingtype, scheepsklasse en vaarrichting. Tijdens de simulaties zijn omgevingscondities zoals de stroomsnelheid, bodemligging en verhanglijnen meegenomen.

Het uitgangspunt van de analyse is, per combinatie van vaarrichting en ladingtype, een gelijkblijvend ladingvolume voor elk van de drie waterstanden. Dit vast te houden ladingvolume werd bepaald bij normale waterstand op basis van data van scheepspassages aangeleverd door Rijkswaterstaat. Het ladingvolume wordt vastgehouden per combinatie van vaarrichting en ladingtype maar niet per scheepsklasse: het herverdelen van lading tussen scheepsklassen wat bijvoorbeeld plaatsvindt doordat duwvaart vrijwel onmogelijk wordt bij extreem lage waterstand is toegepast.

Voor de lage en extreem lage waterstanden geldt dat de laadcapaciteit door diepgangsbepalingen afneemt. Hierdoor moet het aantal reizen toenemen om aan het ladingvolume te voldoen. Daarnaast nemen de waterdiepte en stroomsnelheid af. Effecten hiervan op brandstofverbruik en emissies zijn per reis bepaald met reissimulaties. Door de resultaten daarvan te corrigeren met het aantal reizen voor de drie waterstanden zijn de effecten van lage waterstand op brandstofverbruik en emissies berekend.

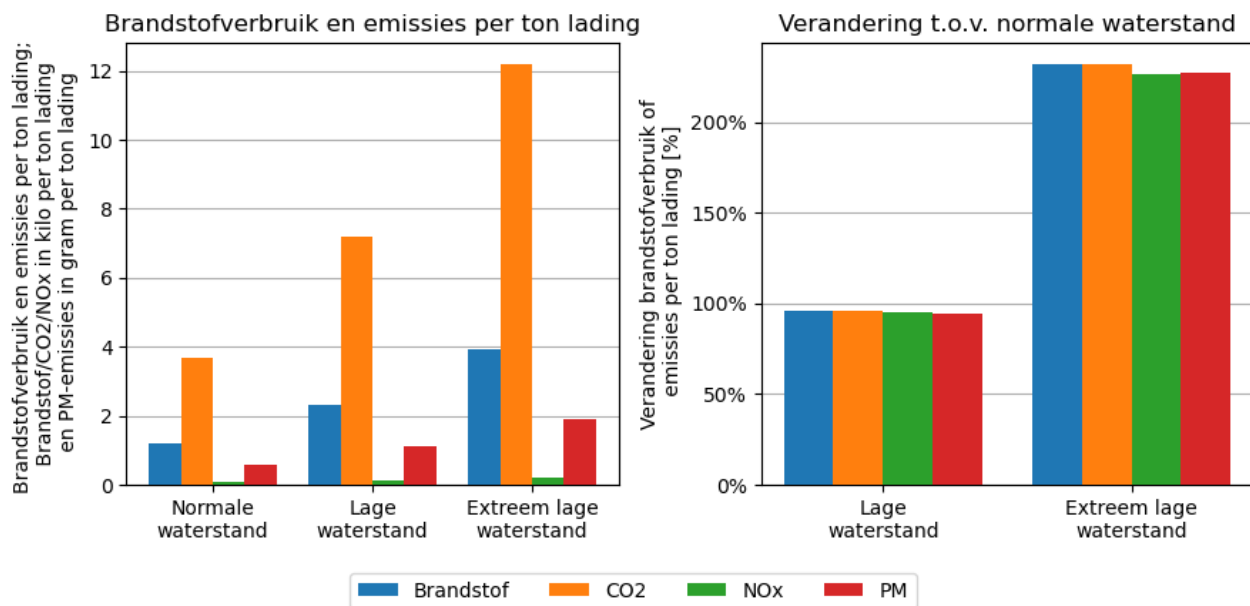
De reissimulaties zijn uitgevoerd met een motorinstelling die zo werd aangepast dat de reistijd gelijk bleef voor elke waterstand. In de voorgaande verkenning werd geconcludeerd dat dit een betere aanpak is dan het constant houden van de motorinstelling omdat dit laatste leidt tot een verandering van de reistijd en daarmee niet aan het uitgangspunt van de studie kan worden voldaan.

De resultaten van dit onderzoek laten zien dat brandstofverbruik en de verschillende emissies in gelijke mate toe- of afnemen ten gevolge van een lagere waterstand. Over alle 189 scenario's gecombineerd, voor het totale ladingvolume, wordt een toename van brandstofverbruik en emissies van circa 95% berekend voor lage waterstand en een toename van 225% voor extreem lage waterstand (zie Figuur 1). Als we de resultaten vergelijken met de uitkomsten van de voorgaande verkennende studie is dit een toename: in die studie werd voor lage waterstand een toename van 74% berekend. Dit komt doordat in de huidige studie ook lege vaart is meegenomen wat een grote bijdrage levert aan de toename van brandstofverbruik en emissies. Zonder lege vaart wordt in de huidige studie een toename van 68% gevonden, wat goed in lijn ligt met het resultaat van de verkennende studie.

---

<sup>1</sup> Klimaatbestendige Netwerken: Stresstest Hoofdvaarwegennet - Deelrapport Droogte

De toenames van emissies en brandstofverbruik worden ook gerapporteerd per ladingtype en scheepsklasse (zie appendix IV voor uitleg scheepsklassen). Per ladingtype blijkt dat de toename van emissies bij lage waterstand het grootst is voor droge bulk en het kleinst voor containervervoer. Dit is in lijn met de voorgaande verkenning. Bij extreem lage waterstand geldt echter dat de relatieve toename van emissies en brandstofverbruik voor containervervoer het grootst is. Dit blijkt te komen door een combinatie van de grote bijdrage van scheepsklassen M11 en M12 aan het containervervoer en de mate waarin deze schepen beperkt worden in diepgang bij lagere waterstanden. Bij lagere waterstanden kunnen deze schepen maar beperkt afladen waardoor ze per ton lading minder efficiënt zijn. Daarnaast geldt ook dat deze toenames voor containervaart in extreem lage waterstand aanzienlijk groter zijn dan de toenames bij lage waterstand: bij lage waterstand wordt containervaart nog niet sterk beperkt in diepgang terwijl dat bij extreem lage waterstand wel het geval is.



*Figuur 1: Emissies en brandstofverbruik per ton lading bij normale, lage en extreem lage waterstand. Emissie van fijnstof (PM) is uitgedrukt in een andere eenheid om de balk zichtbaar te maken.*

In deze studie is ook onderzocht hoe de toename van brandstofverbruik en emissies verdeeld is over verschillende effecten. Dit is gedaan per reis en per scenario. Per reis worden de hydromechanische effecten opgesplitst in gevolgen door waterdiepte, stroming en diepgang. Per scenario is een opsplitsing gemaakt tussen hydrodynamische effecten (i.e. de gecombineerde effecten per reis) en twee logistieke effecten: de herverdeling van lading over scheepsklassen en de toename van het aantal reizen.

Per reis wordt gezien dat stroming het grootste effect heeft. Ook geldt dat stroming dempend werkt op de toename van brandstof in opvaart, terwijl het versterkend werkt in afvaart. Dit komt doordat er bij lagere waterstanden minder stroom tegen is in de opvaart, terwijl er juist minder stroom *mee* is in de afvaart (zie bijlage III voor een illustratie). Waterdiepte heeft een iets kleiner effect. Het effect van verkleinde diepgang werkte dempend, maar varieert tussen de ladingtypes: de diepgangbeperking bij containervervoer is relatief klein waardoor dit effect voor dat ladingtype kleiner is. Door de grote impact van stroming geldt dat de combinatie van hydromechanische effecten een dempend effect heeft op de toename van emissies in opvaart, terwijl het een versterkend effect heeft op de toename van emissies in de afvaart.

Voor de opdeling van logistieke effecten geldt dat de bijdrage van hydromechanische effecten, zoals hierboven beschreven, dempend werkt in opvaart maar juist versterkend werkt in de afvaart. Het effect van de toename van het aantal reizen is het grootst. Het effect van herverdeling van lading, waarbij bijvoorbeeld schepen van type C3I of C4 ladingvolume overnemen van duwkonvoeien, werkt dempend op de toename van emissies in laag water. Dit kan verklaard worden doordat bijvoorbeeld duwvaart niet

meer vaart bij extreem lage waterstand. Had duwvaart nog wel operatief geweest, dan had het aantal reizen enorm moeten stijgen om aan de ladingvraag te voldoen, met zeer grote toenames van brandstofverbruik en emissies tot gevolg. In plaats daarvan nemen andere, kleinere schepen (M6, M8, C3I, C4) het ladingaandeel over. Deze schepen kunnen een groter deel van hun laadcapaciteit benutten en zijn daarmee efficiënter bij lagere waterstand.



## 1 INLEIDING

Rijkswaterstaat (RWS) realiseert een serie onderzoeken rond twee onderwerpen voor een toekomstbestendige binnenvaart: de energietransitie en hoe om te gaan met klimaatverandering.

In dit kader zijn de vastgestelde beleidsdoelstellingen:

- Nederland is in 2050 klimaatbestendig en waterrobuust ingericht (Deltabeslissing Ruimtelijke Adaptatie)<sup>2</sup>
- De binnenvaart is in 2050 nagenoeg emissievrij en klimaatneutraal<sup>3</sup>

Vanuit het RWS project Duurzame Binnenvaart is de volgende vraagspecificatie opgesteld; "Infrastructuur voor klimaat neutrale schepen van de toekomst: ondieptes en emissies in de binnenvaart vervolgonderzoek", zaaknummer 31189003, gedateerd 5 april 2023. In deze vraagspecificatie ligt de focus op de kennisontwikkeling van de effecten van ondieptes op het brandstofverbruik en de emissies in de binnenvaart.

Bij een lagere afvoer, wat voorkomt in periodes van droogte, spelen verschillende effecten. Als eerste neemt de waterdiepte af. Hierdoor neemt de kielspeling af en wordt de weerstand van een schip groter en verbruiken schepen meer brandstof. In het onderzoek naar vaargedrag dat RWS en MARIN samen uitvoeren is een verkenning naar dat brandstofverbruik bij laag water uitgevoerd voor een enkel schip, dit is gerapporteerd<sup>4</sup>. Naast de waterdiepte neemt ook de stroomsnelheid af. Dit zorgt voor minder verbruik en uitstoot tijdens de opvaart, maar juist voor meer verbruik en uitstoot tijdens de afvaart. Verder zal de diepgang van schepen beperkt worden, waardoor er minder lading vervoerd kan worden per reis. Ook de vaarweg breedte neemt af dus passeren schepen elkaar dichterbij. Dat is in deze studie buiten beschouwing gelaten.

In 2022 is door MARIN een eerste verkenning uitgevoerd waarbij onderzocht is hoe emissies en brandstofverbruik veranderen bij lagere waterstanden. Op basis van de resultaten is besloten in 2023 een vervolgonderzoek uit te voeren. Op 9 juli 2023 heeft Rijkswaterstaat MARIN opdracht gegeven dit vervolgonderzoek uit te voeren. Het doel van deze opdracht voor RWS is inzicht krijgen in het brandstofverbruik en de emissies van schepen bij een normale waterstand, een lage waterstand en een extreem lage waterstand.

De hoofdvraag zoals vermeld in de vraagspecificatie luidt: *Welke effecten hebben ondieptes op brandstofverbruik, broeikasgassen (CO<sub>2</sub>) en luchtmissies (PM/NOX) voor verschillende type schepen en goederensoorten?*

Hiervoor dienen de volgende deelvragen te worden beantwoord:

- 1) Wat zijn het brandstofverbruik en de emissies van schepen bij verschillende waterstanden? → Een volledig vlootprofiel onderzoeken.
- 2) Hoe verandert de vlootsamenstelling in periodes van lage waterstanden om dezelfde hoeveelheid goederen te kunnen vervoeren? → Lading herverdelen over scheepsklassen.
- 3) Duwvaart modelmatig onderzoeken.
- 4) Systeembeschouwing o.b.v. modelresultaten.

---

<sup>2</sup> In de Deltabeslissing Ruimtelijke Adaptatie (DPRA) hebben het Rijk, de provincies, gemeenten en waterschappen de gezamenlijke ambitie vastgelegd, dat Nederland in 2050 klimaatbestendig en waterrobuust is ingericht. Vanuit het programma Klimaatbestendige Netwerken (KBN) wordt meer inzicht gegeven in de impact van klimaatverandering op het hoofdvaarwegennetwerk.

<sup>3</sup> Bron: Green Deal Zeevaart, Binnenvaart en Havens (2019)

<sup>4</sup> MARIN report 30957-15-SHIPS-MO\_Final, Effect of small changes in draught and keel clearance on performance of an inland ship, January 2022.

In de door MARIN uitgevoerde studie zijn reissimulaties voor de corridor Rotterdam-Duisburg uitgevoerd om het brandstofgebruik en de emissies voor 30 combinaties van scheepsklassen en ladingtypes te bepalen bij drie waterstanden. Het totale transportvolume is vooraf besproken met Rijkswaterstaat. Ter beperking van de scope is dit als vereenvoudiging gelijk genomen voor alle waterstanden. Simulaties zijn uitgevoerd voor zowel de opvaart als voor de afvaart. In totaal zijn 189 scenario's (combinaties van scheepsklasse, ladingtype, vaarrichting en waterstand) geanalyseerd.

Hoofdstuk 2 beschrijft de aanpak in meer detail. Hierin wordt ook de scope en beperkingen daaraan beschreven. Hoofdstuk 3 presenteert de analyse en resultaten van het uitgevoerde werk. De belangrijkste conclusies en aanbevelingen van het onderzoek worden samengevat in hoofdstuk 4.

## 2 AANPAK

### 2.1 Scope

Deze studie richt zich op het brandstofverbruik en de emissies tijdens het vervoer van goederen, onderverdeeld in drie ladingsoorten: droge bulk, natte bulk en containers. De corridor in beschouwing is Rotterdam – Duisburg. De beschouwde energiedrager is diesel.

De vraagspecificatie noemt de volgende schepen die in beschouwing genomen moeten worden:

- 50 m schip (M2)
- 55 m schip (M3)
- 80 m schip (M6)
- 110 m schip (M8)
- 135 m schip (M9)
- 135 m x 14.2 m motorschip (M11)
- 135 m x 17.5 m motorschip (M12)
- 11.4 m breed koppilverband (C3I)
- 22.8 m breed koppilverband (C4)
- Duwvaart (BII-4, BII-6B, BII-6L)  
(zie appendix IV voor uitleg scheepsklassen).

Behalve een uitbreiding van het aantal scheepstypen ten opzichte van de verkennende studie project (MARIN Rapport No. 34255-1-SHIPS) is ditmaal ook duwvaart in afvarige richting meegenomen. Verder zijn ook lege vaarten opgenomen in de analyse. Dit laatste omdat afvarige duwvaart doorgaans leeg is zoals te zien is in de data van scheepspassages die door RWS werd aangeleverd [7] en het negeren van andere onbeladen reizen een vertekening van het resultaat zou kunnen opleveren.

Bovenop de scheepstypen genoemd in de vraagspecificatie zijn ook M12 schepen en C4 koppilverbanden opgenomen in de analyse. Uit analyse van data van scheepspassages bleek het vervoersaandeel van deze scheepstypes niet verwaarloosbaar. C4 is meegenomen voor de scenario's met droge bulk en containervaart. M12 is voor alle scenario's meegenomen.

Een toevoeging aan de scope in het huidige project ten opzichte van het voorgaande project is ook de verandering van de vloot bij laag en extreem laag water meegenomen. Zo geldt bijvoorbeeld dat koppilverbanden van type C4 bij normale waterstand nauwelijks voorkomen, terwijl deze bij lage waterstand juist een groot deel van de lading van de duwvaart overnemen.

Niet in scope:

- Verkeersafwikkeling op de rivier, vaarwegcapaciteit. In deze studie wordt de capaciteit van de vaarweg buiten beschouwing gelaten.
- Er is geen rekening gehouden met stoppen van schepen bij terminals onderweg.
- Effecten van (reverse) modal shift zijn niet meegenomen in de studie.
- Afstemming van vaarsnelheden tussen op- en afvaart: in deze studie wordt de vaarsnelheid in afvaart bijvoorbeeld niet aangepast om te zorgen dat er voldoende schepen voor de opvaart beschikbaar zouden zijn. De vaarsnelheid wordt zo gekozen dat de reistijd binnen één scenario gelijk blijft tussen de verschillende waterstanden.
- Afstemming van aantal beladen of onbeladen reizen in opvaart en afvaart: er wordt in deze studie geen rekening gehouden met een gefixeerd aantal schepen dat beschikbaar is in de vloot. Lege vaarten worden meegenomen maar het aantal daarvan wordt voor elke waterstand gebaseerd op de verhouding vol/leeg bij normale waterstand.

## 2.2 Aanpak

Het vertrekpunt van de studie is dat per ladingtype en vaarrichting het wekelijks ladingvolume van alle scheepstypen bij elkaar niet veranderd bij lage of extreem lage waterstand. Daarnaast wordt binnen elk scenario de reistijd gelijk gehouden tussen de waterstanden, door bij lage en extreem lage waterstand de motorinstelling aan te passen.

Voor de normale, lage en extreem lage waterstand worden voor de scheepsklassen in scope reissimulaties uitgevoerd om per scheepsklasse het brandstofverbruik en de emissies te bepalen alsook deze tussen de waterstanden te vergelijken.

Het onderzoek is in 4 fasen opgebouwd en uitgevoerd:

- WP1 Start up, definiëren vereenvoudigde scenario's.
- WP2 Voorbereiding modellen;  
Per scheepsklasse voorbeeldschip zoeken, een "snelheid – vermogen" relatie voor de te onderzoeken diepgangen bepalen.  
Data voor reissimulatie model: bodemligging, verhanglijnen, stroomsnelheden (Rotterdam – Duisburg).
- WP3 Realiseren reissimulaties per goederensoort, per scheepsklasse, opvaart en afvaart. Analyse.
- WP4 Rapportage en afronding.

Rijkswaterstaat heeft de data aangeleverd ten aanzien van;

1. De relevante periodes behorende bij debieten van 1800, 1020 en 700 m<sup>3</sup>/s.
2. De hoeveelheden per goederensoort in opvaart en afvaart over de periode met normale waterstand.
3. Voor droge en natte bulk de beladingsgraad van de per scheepsklasse in de opvaart en de afvaart bij de normale waterstand en bij de lage waterstand.
4. Voor de containers de beladingsgraad per scheepsklasse of de gemiddelde gewichten per TEU in de opvaart en de afvaart, bij de normale waterstand en bij de lage waterstand.

In WP1 zijn in overleg met Rijkswaterstaat de relevante periodes behorende bij normale, lage en extreem lage waterstand gedefinieerd. Daarnaast zijn de te analyseren scheepstypen vastgelegd. De gekozen periodes betroffen de weeknummers 18, 30 en 42 in 2018. Voor elk van deze periodes werd scheepspassagedata in 2018 geanalyseerd om te bepalen welke scheepstypen opgenomen moesten worden in het onderzoek. Tabel 1 geeft de scenario's vereenvoudigd weer. De scheepsklassen zijn gekozen op basis van hun aandeel in het totale transportvolume gedurende de relevante periodes bij normale, lage en extreem lage waterstand. De scenario's worden verder uitgewerkt in paragraaf 3.1.

Tabel 1: Overzicht gekozen scenario's

Waterstand	Type lading	Vaarrichting	Scheepsklassen
Normaal (1800 m <sup>3</sup> /s)	Container	Stroomopwaarts	C3I, C4, M6, M8, M9, M11, M12
		Stroomafwaarts	C3I, C4, M6, M8, M9, M11, M12
	Droge bulk	Stroomopwaarts	BII-4, BII-6B, BII-6L, C3I, C4, M2, M3, M6, M8, M9, M11, M12
		Stroomafwaarts	C3I, C4, M2, M3, M6, M8, M9, M12
	Natte bulk	Stroomopwaarts	C3I, M6, M8, M9, M12
		Stroomafwaarts	C3I, M2, M3, M6, M8, M9, M12
Laag (1020 m <sup>3</sup> /s)	Container	Stroomopwaarts	C3I, C4, M6, M8, M9, M11, M12
		Stroomafwaarts	C3I, C4, M6, M8, M9, M11, M12
	Droge bulk	Stroomopwaarts	BII-4, BII-6B, C3I, C4, M2, M3, M6, M8, M9, M11, M12
		Stroomafwaarts	C3I, C4, M2, M3, M6, M8, M9, M12
	Natte bulk	Stroomopwaarts	C3I, M6, M8, M9, M12
		Stroomafwaarts	C3I, M2, M3, M6, M8, M9, M12
Extreem laag (700 m <sup>3</sup> /s)	Container	Stroomopwaarts	C3I, C4, M6, M8, M9, M11, M12
		Stroomafwaarts	C3I, C4, M6, M8, M9, M11, M12
	Droge bulk	Stroomopwaarts	BII-4, C3I, C4, M2, M3, M6, M8, M9, M11, M12
		Stroomafwaarts	C3I, C4, M2, M3, M6, M8, M9, M12
	Natte bulk	Stroomopwaarts	C3I, M6, M8, M9, M12
		Stroomafwaarts	C3I, M2, M3, M6, M8, M9, M12

Uitleg scheepsklassen APPENDIX IV

Het vetrekpunt van de studie is een gelijk transportvolume per ladingtype en vaarrichting bij alle waterstanden terwijl lading binnen een ladingtype en/of vaarrichting wel herverdeeld kan worden tussen de verschillende scheepstypen. Doordat de diepgang gereduceerd moet worden bij de lage waterstand, moet het aantal reizen toenemen om het transportvolume gelijk te houden. Het aantal reizen is berekend door het totale transportvolume per scheepsklasse in de gekozen periode bij de hoge waterstand te delen door de laadcapaciteit gegeven de diepgang. De diepgang werd bepaald uit de aangeleverde data, terwijl de laadcapaciteit van de schepen, gegeven de diepgang, is geschat met de methode van Dorsser [3].

In WP2 is de invoer voor de reissimulaties voorbereid. Dit betreft de snelheids-vermogensrelatie van de verschillende scheepsklassen, de modellering van brandstofverbruik en emissies en de relevante omgevingscondities. Voor de snelheids-vermogensrelaties is gebruik gemaakt van op MARIN beschikbare (statische) voorspellingen of ware-grootte metingen van vergelijkbare schepen. Deze gegevens komen uit oudere projecten. Ten opzichte van de verkennende studie zijn de snelheids-vermogensrelaties nauwkeuriger uitgewerkt. Voor het modelleren van brandstofverbruik en emissies is gebruik gemaakt van beschikbare literatuur en modellen die reeds in de reissimulatie-software aanwezig zijn. WP2 resulteerde in een set invoergegevens voor de reissimulaties die daarmee uitgevoerd zijn. De toegepaste modellen en formules worden beschreven in 3.2.3.

Het modelleren van omgevingscondities vindt plaats aan de hand van historische pegelstanden, betrekkinglijnen (bestaande uit stroming en waterniveau per hectometer of kilometer voor variërend debiet) en bathymetriedata (bodempligging). Per locatie en tijdstip worden de twee dichtstbijzijnde pegels geselecteerd. De locatie van de pegels en de waterstand wordt gebruikt om via de betrekkinglijn om te rekenen naar het debiet op het betreffende tijdstip. Met behulp van het debiet kan ook de stroming bij elk van de twee geselecteerde pegels op het betreffende tijdstip geschat worden. Hierna wordt de betrekkinglijn gebruikt om de juiste waterstand, het verhang en de stroming tussen de twee geselecteerde pegels te interpoleren. Hierna kan met behulp van de bathymetrie de waterdiepte bepaald worden.

In WP3 zijn de verschillende reissimulaties uitgevoerd. In de simulaties voor lage en extreem lage waterstand werd het toegepaste vermogen gecorrigeerd zodat de reisduur bij normale, lage en extreem lage waterstand gelijk blijft.

De reizen zijn uitgevoerd met MARIN's reissimulatieprogramma Gulliver. In Gulliver wordt een route samengesteld waarover het schip zal varen. Deze route wordt opgedeeld in segmenten van ongeveer 100 meter. Op elk segment van de route bepaalt Gulliver de omgevingscondities op basis van locatie en tijdstip. Dit gebeurt doorgaans op basis van historische (hind-cast) datasets. Daarna gebruikt Gulliver een (vereenvoudigd) fysisch model van het schip om gegeven een motor-instelling de snelheid, en eventueel roerhoek en drifthoek, te bepalen. Dit geeft een evenwichtsconditie waarbij bijvoorbeeld schroeftoerental en scheepsweerstand met elkaar in overeenstemming zijn. Voor deze conditie kan Gulliver nog meer data bepalen waaronder brandstofverbruik en emissies. De snelheid in de evenwichtsconditie wordt bepaald om de tijdsduur op het huidige segment, en daarmee ook het tijdstip van het volgende segment, vast te stellen.

In WP4 is het huidige rapport opgesteld, door Rijkswaterstaat gecontroleerd en waar nodig door MARIN bijgewerkt.

### **2.3 Achtergrondinformatie**

Rijkswaterstaat heeft achtergrondinformatie geleverd in de volgende rapporten;

- [1] Stress Droogte Rijntakken – Impact op de Scheepvaart, Deltares, v1.1 14 dec 2020
- [2] Toestand van het systeem en Kwetsbaarheid gebruiksfunctie, Deltares, v1.1, 7 mei 2021
- [3] Klimaatbestendige Netwerken, Stresstest Hoofdvaarwegennet – Deelrapport Droogte, RWS, 14 april 2022

Rapport [3] geeft inzicht in beladingsgraad (Nijmegen) van schepen per ladingsoort (H4, figuur 69) en aantal vaarbewegingen per scheepstype (H4, figuur 70).

In Rapport [1] is die verdeling gegeven voor twee afvoeren: Q1800 en Q1020 (figuur 4.13) en is (onafhankelijk van ladingsoort) een verdeling gegeven van diepgangen voor (o.a.) deze twee debieten. Waarbij in rapport [2] in hoofdstuk 5 de representatieve vaardiepte bij die debieten zijn bepaald (3.80 en 2.20 m).

### 3 VOORBEREIDEN SCENARIO'S EN SIMULATIES

#### 3.1 Uitwerking geschematiseerde vervoer scenario's

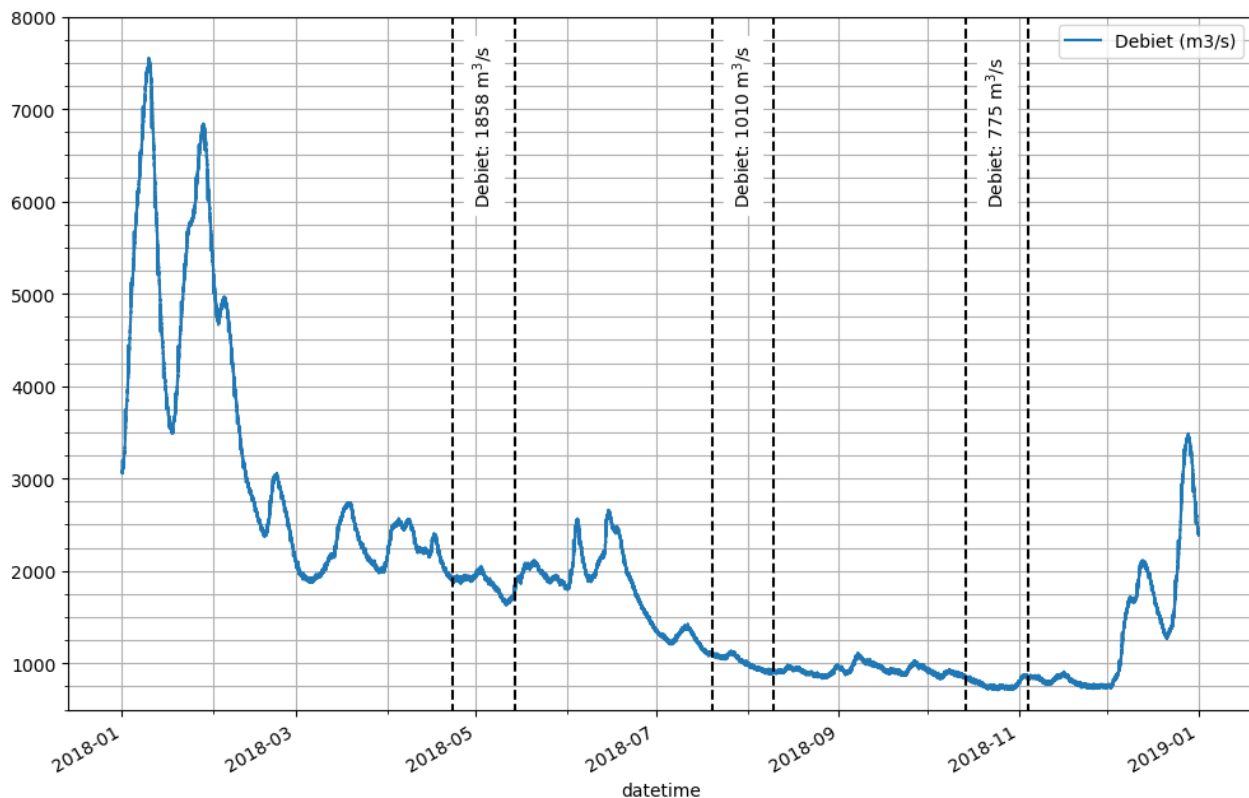
Elk te onderzoeken scenario wordt gedefinieerd als een combinatie van waterstand, scheepstype, ladingtype en vaarrichting. De gedefinieerde scenario's bevatten 3 waterstanden. Deze staan voor een normale waterstand, een lage waterstand en een extreem lage waterstand. De bijbehorende debieten (bij Lobith) zijn 1800, 1020 en 700 m<sup>3</sup>/s. Voor de lage en extreem lage waterstand is bepaald hoe emissies en brandstofverbruik toenemen ten opzichte van een normale waterstand. Dit wordt op scheepsniveau maar ook op vlootniveau bekeken. De precieze samenstelling van de vloot varieert tussen de waterstanden, en wordt afgeleid uit een door Rijkswaterstaat aangeleverde dataset van scheepspassage op de corridor Rotterdam-Duisburg.

##### 3.1.1 Periodes bij normale, lage en extreme lage waterstand

Om de vlootsamenstelling bij elk van de waterstanden te bepalen, is als eerste onderzocht in welke periodes de betreffende waterstanden van toepassing waren. Hiervoor is monitoring-data van het verloop van het debiet bij Lobith gebruikt. Het verloop van het debiet over 2018 is weergegeven in Figuur 2. De drie gekozen periodes zijn ook weergegeven:

1. 23 april t/m 14 mei voor normale waterstand
2. 20 juli t/m 10 augustus voor lage waterstand
3. 14 oktober t/m 4 november voor extreem lage waterstand

Er zijn steeds periodes van 3 weken geselecteerd, om de variaties in transportvolumes over de tijd glad te strijken en zo te voorkomen dat een toevallige verandering van transportvolume in één bepaalde week tot een afwijking in de resultaten zou leiden. In Figuur 2 zijn ook de gemiddelde debieten over de genoemde periodes weergegeven. Te zien is dat een debiet van 700 m<sup>3</sup>/s niet voorkwam in 2018 in een periode van 3 weken. Daarom is de analyse verder uitgewerkt bij een debiet van 775 m<sup>3</sup>/s.



Figuur 2: Debiet bij Lobith in 2018

### 3.1.2 Te onderzoeken scheepstypes

De dataset van scheepspassages [7] bevatte volgende relevante data per scheepspassage:

- Datum/tijd van doorkomst
- Scheepstype
- Hoofdafmetingen van het schip
- Laadcapaciteit
- Actueel ladinggewicht
- Ladingsoort
- Actuele diepgang
- Vertrekhaven en bestemmingshaven

Dankzij bovenstaande gegevens kan voor elk van de drie waterstanden het totaal – door de gehele vloot – vervoerde ladinggewicht bepaald worden: dit is vervolgens uitgesplitst per scheepsklasse, vaarrichting en ladingtype (dus per scenario). Om te bepalen welke scheepsklassen opgenomen moesten worden in het onderzoek, is gekeken naar het aandeel van elk scheepstype in het totale ladingvolume van een situatie (combinatie waterstand, ladingtype en richting). In Tabel 2 zijn de relevante scheepsklassen per situatie in twee groepen verdeeld op basis van hun vervoersaandeel: een groep met 10% tot 100% aandeel, en een groep met 5% tot 10% aandeel.

*Tabel 2: Relevante scheepsklassen per situatie, verdeeld in een groot lading aandeel (10 tot 100 procent) en een klein ladingaandeel (5 tot 10 procent). De scheepstypen zijn geordend op hun ladingaandeel, van groot naar klein. Niet alleen schepen uit de kolom 10% tot 100% zijn meegenomen, zie tabel 1 voor het volledige overzicht van gesimuleerde scheepstypen.*

Scenario			10% - 100%	5% - 10%
Normale waterstand	Droge bulk	op	BII-6L	C4, C3I, M9, BII-4, BII-6B, M8
		af	M8, M9, C3I	M7, M6
	Natte bulk	op	M8, M6	M9
		af	M8, M6	M9
	Containers	op	M11, M12, C3I	M9, C4, M8
		af	M11, M12, C3I, M8	M9, C4
Lage waterstand	Droge bulk	op	BII-4, C4, M9	C3I, M8
		af	M8, C3I, M9	M6, M5
	Natte bulk	op	M8, M6	M9
		af	M8, M6	M9, M12
	Containers	op	M11, M12, C3I, M9	M8, C4
		af	M11, C3I, M9, M8, M12	C4
Extrem lage waterstand	Droge bulk	op	C4, M9, C3I	M8, M11
		af	M8, M9, M6	C3I, M4, M7, M5, C4
	Natte bulk	op	M8, M6	M9
		af	M8, M6	M9, C3I
	Containers	op	M11, M12, C3I	M9, C4, M8
		af	M11, C3I, M9, M8, M12	C4

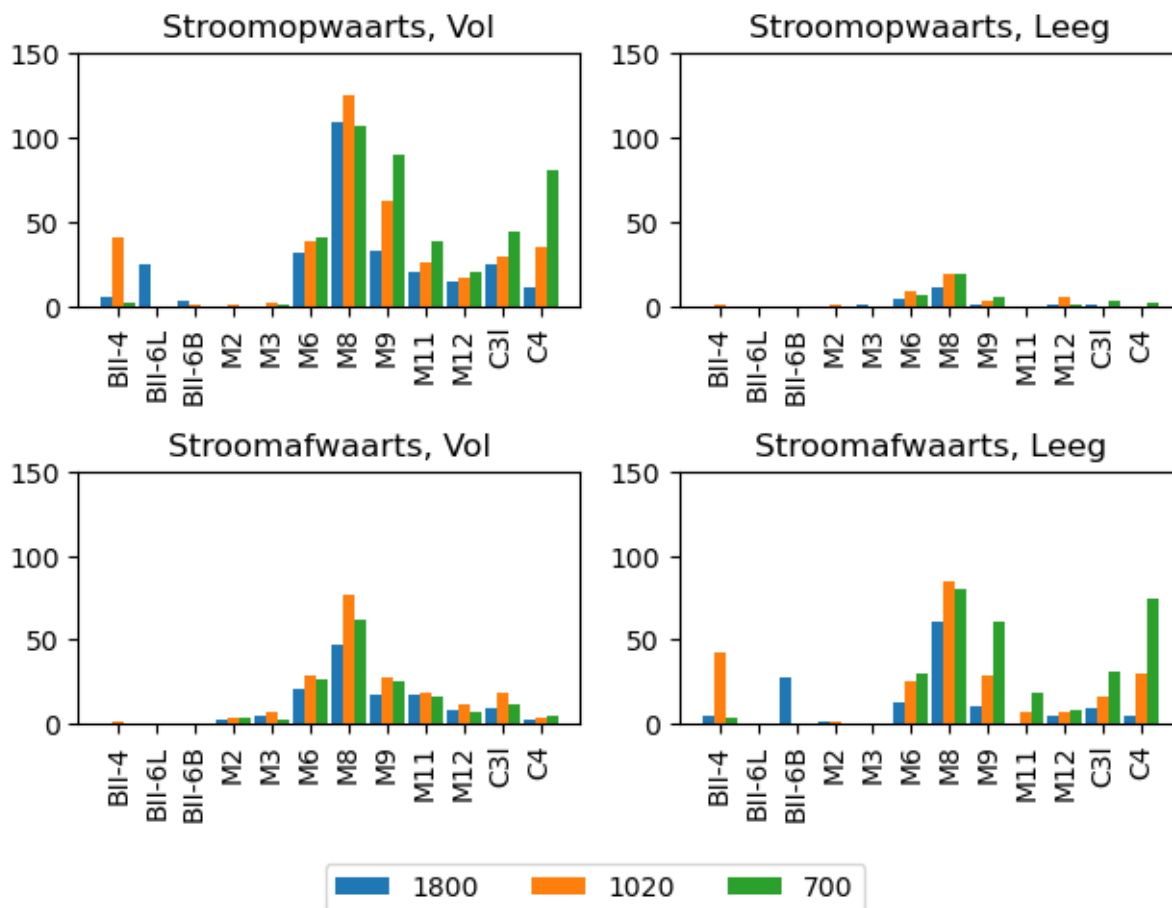
Op basis van Tabel 2 is gekozen om, bovenop de scheepstypen die genoemd zijn in de vraagspecificatie, ook scheepstypen M12 en C4 toe te voegen. Tabel 2 laat verder zien dat ook klassen als M7 en M5 in sommige situaties relevant zijn, maar deze zijn niet meegenomen in het onderzoek.



### 3.1.3 Scenario's met onbeladen schepen

Analyse van de data van scheepspassages van Rijkswaterstaat liet ook zien dat er een significant aantal passages van lege schepen plaatsvindt, met name bij lage waterstanden. Dit is te zien in Figuur 3. Het aantal lege vaarten van scheepstypen M9 en C4 is erg groot bij extreem lage waterstand. Daarnaast laat de figuur zien dat in stroomafwaartse richting er altijd een groot aantal lege vaarten plaatsvindt, in orde grootte gelijk aan het aantal beladen vaarten en niet veel minder dan het aantal beladen vaarten in stroomopwaartse richting. Hierom is besloten om ook lege vaarten in de analyse op te nemen.

#### Aantal scheepspassages in beladen en onbeladen toestand.



*Figuur 3: Scheepspassages stroomopwaarts en stroomafwaarts, voor beladen (ongeacht ladingsoort) en onbeladen toestand bij drie waterstanden. Het totaal aantal getelde vaarten, van schepen opgenomen in de studie, per week bedraagt 563, 854 en 928 voor normale, lage en extreem lage waterstand.*

Bij de lege vaarten wordt géén lading vervoerd, en de hoeveelheid lege vaarten heeft daarom geen invloed op het wel of niet voldoen aan het vertrekpunt van de studie: gelijk ladingvolume bij elke waterstand. Echter zal in de praktijk wel gelden dat er een correlatie is tussen de hoeveelheid vervoerde lading en het aantal lege vaarten. In de passagedata kan een afname van het totaal ladingvolume waargenomen worden bij lage en extreem lage waterstand. Hiervoor is gecorrigeerd voor de simulaties bij beladen vaart. Een vergelijkbare correctie is toegepast op het aantal lege vaarten bij lage en extreem lage waterstand.

### 3.1.4 Aantal reizen

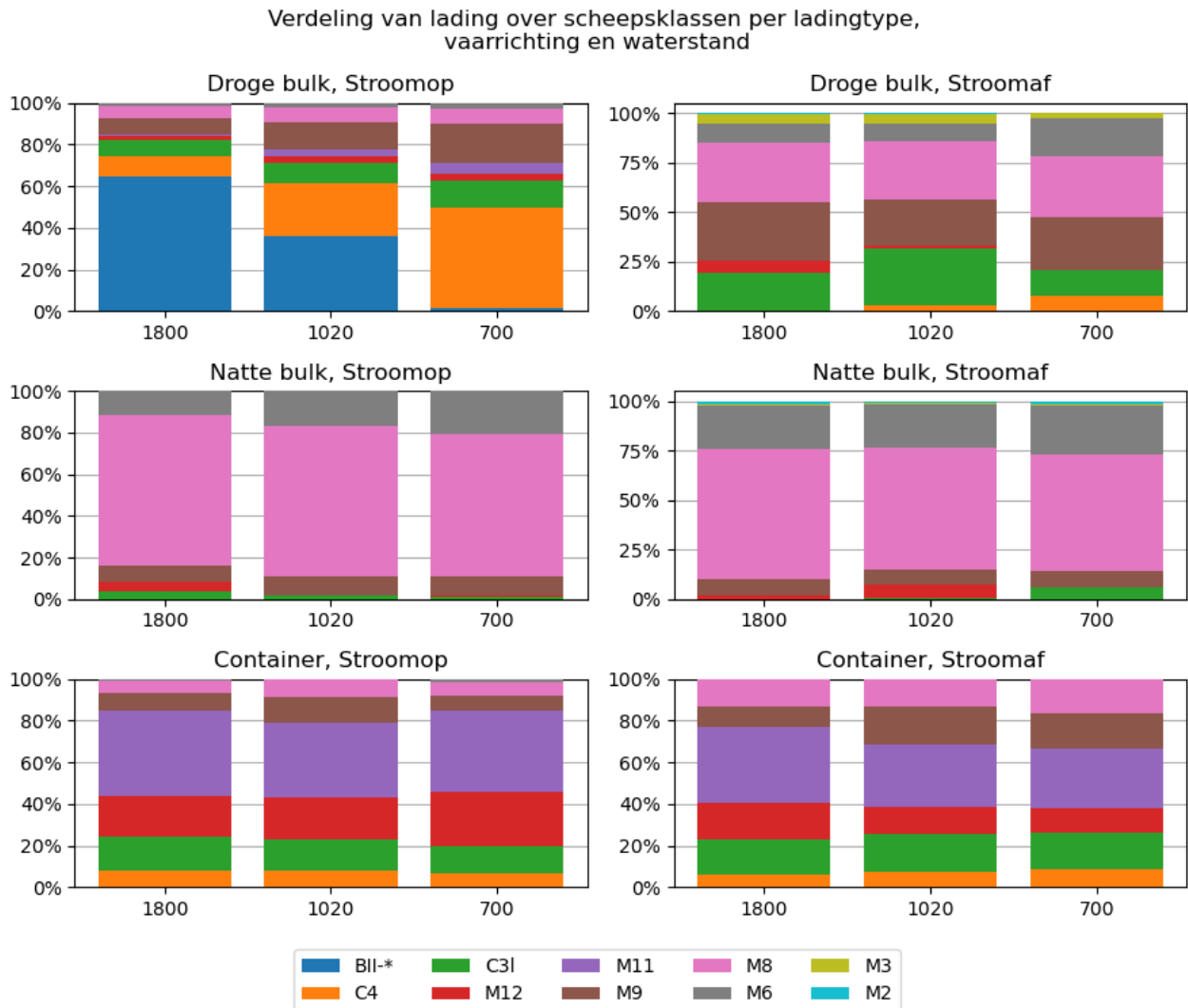
Het aantal reizen kan bepaald worden op basis van ladingvolume en de gemiddelde diepgang. Beide waren gegeven in de data die werd aangeleverd door Rijkswaterstaat. Het ladingvolume en de gemiddelde diepgang waren gegeven per vaarrichting, ladingtype en scheepstype. Het ladingvolume

wordt voor lage en extreem lage waterstand gecorrigeerd om te zorgen dat het totaal lading volume gelijk is bij elke waterstand. Met behulp van een formule van Dorsser [3] kan daarna per scheepstype de laadcapaciteit, gegeven de diepgang, bepaald worden. Dit wordt berekend per vaarrichting, ladingtype en scheepstype. De laadcapaciteit en het ladingvolume geeft vervolgens het aantal reizen.

Voor de lege vaart wordt per scheepstype en per waterstand op basis van de data van scheepspassages bepaald wat de verhouding was tussen het totaal aantal beladen passages in beide richtingen en het aantal onbeladen passages in opvarige en afvarige conditie. Deze verhouding wordt vervolgens gebruikt om in alle condities het aantal lege vaarten te bepalen.

### 3.1.5 Herverdeling van lading bij lage waterstanden

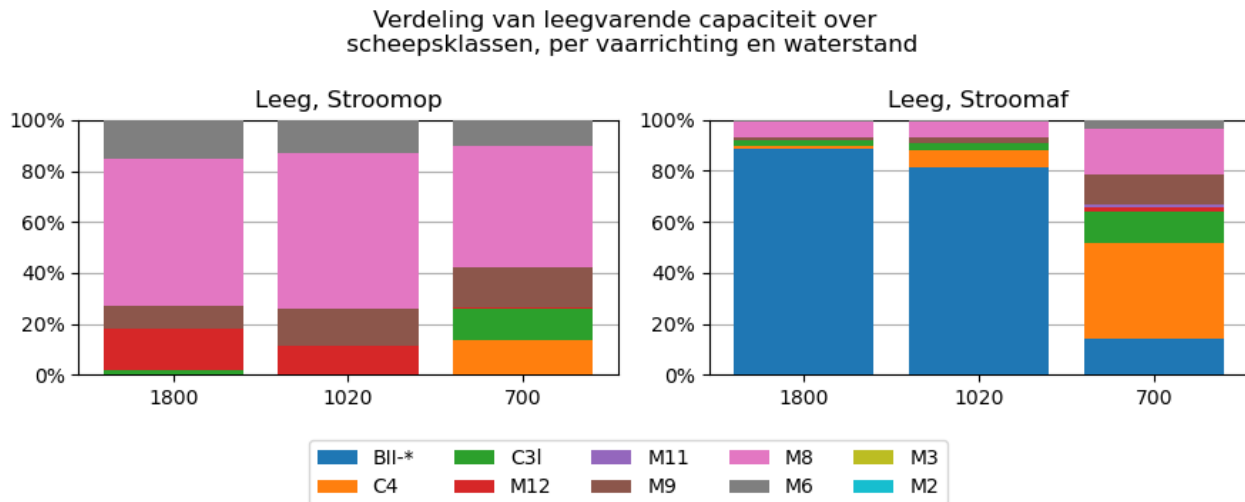
Bij veranderende waterstand verandert ook de samenstelling van de vloot die een bepaald volume en type lading vervoert. Voor droge bulk, waar de duwvaart bij normale waterstand een groot aandeel in heeft, geldt bijvoorbeeld dat het aantal bakken bij lage waterstand (1020 m<sup>3</sup>/s) beperkt wordt tot 4. Bij extreem lage waterstand wordt de maximale diepgang zelfs zo klein dat verschillende duwbotten uit de operatie gehaald worden. Dit heeft tot gevolg dat de vraag naar droge bulk opgevangen moet worden door andere scheepstypen.



Figuur 4: Verdeling van lading over scheepstypen per combinatie van waterstand, ladingtype en vaarrichting.

In Figuur 4 is weergegeven hoe deze verdeling verandert. Duwvaart is samengevoegd tot BII-\*. De grootste veranderingen zijn te zien voor stroomopwaartse vaarrichting met droge bulk. Te zien is dat het aandeel van duwvaart (BII-\*), dat bij normale waterstand ruim 60% is, terugvalt naar vrijwel niets bij extreem lage waterstand. Dit wordt voornamelijk opgevangen door koppelverbanden van type C4, maar ook de ladingaandelen van typen M9 en C3I nemen wat toe.

Voor lege vaart is de verdeling anders berekend. In plaats van het percentage van de hoeveelheid lading, is het percentage van de hoeveelheid capaciteit getoond. Dit is getoond in Figuur 5. Te zien is dat de afvaart gedomineerd wordt door de duwvaart.



Figuur 5: Verdeling van leegvarende ladingcapaciteit per combinatie van waterstand en vaarrichting

### 3.1.6 Aantal scenario's

In totaal werden 189 scenario's geanalyseerd met daarin 3 waterstanden, 4 ladingtypen (waaronder lege vaart), 12 scheepstypen (zie lijst schepen vraagspecificatie, hoofdstuk 1) en twee vaarrichtingen. De 135 beladen scenario's zijn weergegeven in Tabel 1. Daarnaast zijn er nog 54 scenario's voor lege vaart. Een volledige matrix van waterstanden (3), ladingtypen (4), scheepstypen (12) en vaarrichtingen (2) had tot 288 scenario's geleid. Maar Tabel 1 en Tabel 2 geven aan dat in verschillende scenario's slechts een deel van de scheepstypen relevant zijn. Dit leidt daarom tot een uitgedunde matrix. Duwkonvoeien worden bijvoorbeeld alleen meegenomen met droge bulk en bij extreem lage waterstand worden ook typen BII-6L en BII-6B niet meer meegenomen. Type M11 komt vrijwel alleen voor onder containerschepen. C4 wordt niet geanalyseerd voor natte bulk.

Voor een deel van de scenario's dat geanalyseerd is geldt dat deze geen waargenomen passages kenden in de door RWS aangeleverde data van scheepspassages. In de resultaten per scenario's geldt daarom een aantal reizen van 0 voor deze scenario's zodat ze geen invloed hebben op de resultaten van dit onderzoek. Ze zijn meegenomen zodat voor elk scenario een vergelijk tussen normale, lage en extreem lage waterstand gemaakt kan worden. Het gaat hierbij om 14 scenario's.

## 3.2 Vorbereiden reissimulaties

Voor de reissimulaties met Gulliver moest het fysisch model van het schip voorbereid worden. De voornaamste onderdelen van deze voorbereiding was het kalibreren van de snelheidsvermogensrelatie van het schip en het modeleren van de uitstoot van CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> en PM emissies.

### 3.2.1 Kalibratie snelheids-vermogensrelatie

Voor de scheepsklassen genoemd in Tabel 2 zijn snelheids-weerstand en snelheids-vermogensrelaties bepaald. Dit is gedaan met behulp van data van ware-grootte metingen op verschillende schepen, testresultaten uit MARIN's modellendatabase en statistische schattingen. Dit heeft geleid tot de in Tabel 3 getoonde gegevens om in de reissimulaties het vermogen (en daaruit later brandstofverbruik en emissies) van de motor(en) te bepalen.

Tabel 3: *Overzicht van gebruikte waardes voor weerstands- en vermogensberekeningen met vermogen per motor, aantal schroeven (en motoren), schroefdiameter en snelheid bij 100% vermogen.*

	M2	M3	M6	M8	M9	M11	M12	C3I	C4	BII-X
Motor [kW]	180	240	480	1100	750	1200	1350	800	1100	1360
Schroeven [-]	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3
Diameter [m]	1.45	1.45	1.50	1.80	1.70	1.75	1.80	1.90	1.90	2.05
Snelheid [km/h]	15.2	16.0	17.4	20.2	20.8	21.7	21.3	19.1	18.1	18.2

### 3.2.2 Bepalen vaarsnelheid

Zoals genoemd in hoofdstuk 2 wordt de reistijd per scenario (combinatie van vaarrichting, ladingtype en scheepstype) gelijk gehouden tussen de verschillende waterstanden. Dus als een schip van type M8 met droge bulk in opvaart bij normale waterstand (1800 m<sup>3</sup>/s) in de simulatie 20 uur nodig heeft om van Rotterdam naar Duisburg te varen, dan wordt er in de simulatie voor gezorgd dat het schip ook 20 uur voor dezelfde reis nodig heeft bij lage en extreem lage waterstand (respectievelijk 1020 en 700 m<sup>3</sup>/s).

Dit wordt gedaan door de motorinstelling aan te passen in de simulaties voor lage en extreem lage waterstand. Bij normale waterstand staat de motorinstelling op 50%. Voor het hierboven genoemde scenario geldt een reistijd van 17 uur en 45 minuten. Bij zowel lage en extreem lage waterstand blijkt dat een motorinstelling van 44% ervoor zorgt dat deze reistijd vastgehouden kan worden.

Doordat de reistijd vastgehouden wordt zal de gemiddelde snelheid over de vaarroute ook gelijk zijn tussen de verschillende waterstanden. Over het verloop van het traject kan de snelheid echter variëren. Op ondiepe delen van het traject zal het schip meer weerstand ondervinden en daarom langzamer varen, bijvoorbeeld.

### 3.2.3 Modelleren emissies en brandstofverbruik

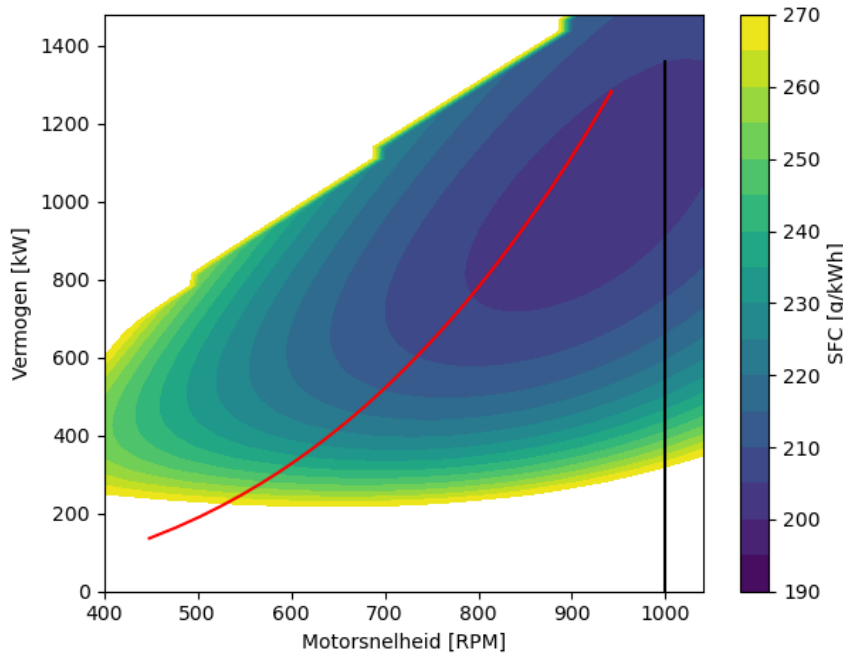
#### 3.2.3.1 Brandstofverbruik

Brandstofverbruik wordt gemodelleerd met een model dat is gepubliceerd door Shi [4]. Dit model bepaalt het specifiek brandstofverbruik (specific fuel consumption, SFC) in gram per kilowattuur (g/kWh) gegeven het koppel dat de motor op enig moment levert en de snelheid waarbij dat gebeurt. Het model wordt gekalibreerd met het nominale SFC, nominaal vermogen en de nominale snelheid van de motor. Daarnaast worden een vijftal parameters ingesteld. Deze parameters werden ingesteld op waarden die geadviseerd worden in Shi [4]. Nominaal SFC, vermogen en snelheid werd overgenomen uit datasheets van voortstuwingsmotoren die in de binnenvaart gebruikt worden. Met het model kan een zogeheten mossel-diagram worden opgesteld zoals getoond in Figuur 6.

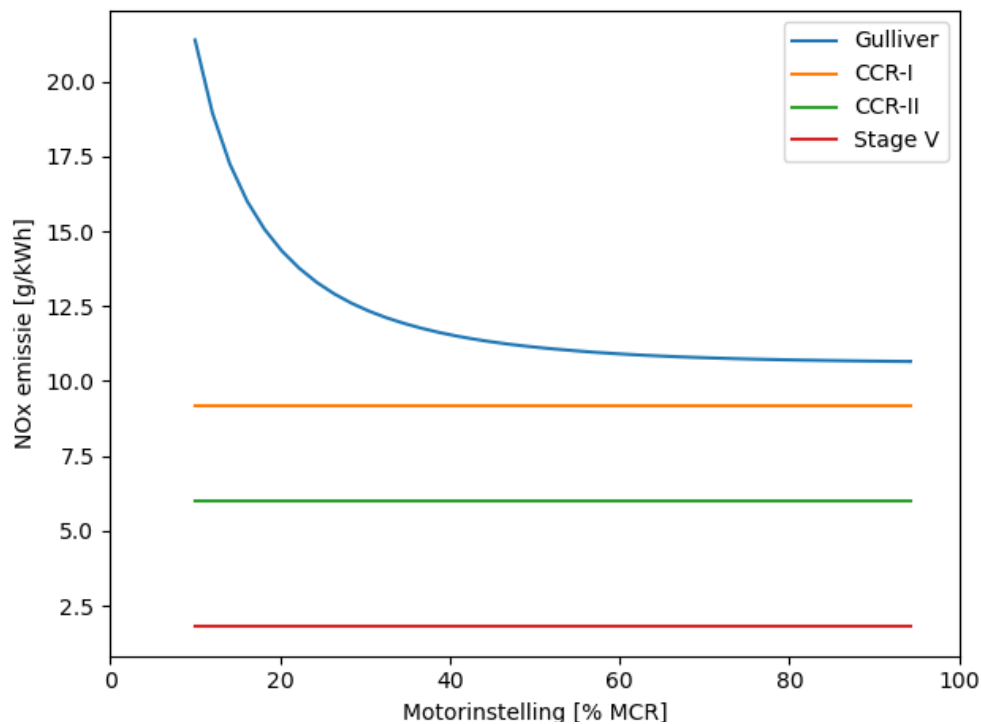
Binnen de reissimulaties wordt het model gebruikt om per tijdstap de SFC te bepalen. Per tijdstap kan de motorbelasting veranderen. Daarnaast kan, als gevolg van wisselende waterdiepte of stroming, de verhouding tussen motortoerental en vermogen ook wijzigen. Het SFC model staat toe om deze effecten ook mee te wegen in het brandstofverbruik van het schip.

### 3.2.3.2 CO<sub>2</sub> emissies

De emissies in dit rapport zijn TTW-emissies (Tank to Wake), ontstaan bij het gebruik van de brandstof aan boord van het schip. De CO<sub>2</sub> uitstoot is evenredig genomen aan brandstofverbruik. De gebruikte dichtheid van de brandstof (diesel / MDO) is 843.5 kg/liter en de CO<sub>2</sub> uitstoot bedraagt 3.1144 kg CO<sub>2</sub> per kg verbruikte brandstof.



Figuur 6: SFC-Diagram [g/kWh] op basis van het model van Shi [4]



Figuur 7: NO<sub>x</sub>-uitstoot zoals gemodelleerd in Gulliver op basis van het model van Sui, vergeleken met verschillende niveaus van emissie-eisen.

### 3.2.3.3 NO<sub>x</sub> emissies

Het modelleren van NO<sub>x</sub> emissies werd gedaan op basis van een model gepubliceerd door Sui [6]. Dit model is vergelijkbaar met het 5-parameter model dat gebruikt werd om SFC te bepalen. Door Rijkswaterstaat was ook data aangeleverd over (onder andere) NO<sub>x</sub> emissie. Met deze data, opgesteld door TNO, kon de NO<sub>x</sub> uitstoot (in g/kWh) geschat worden voor een schip gegeven de klasse en het bouwjaar. Dit laatste gegeven is onbekend voor de scenario's die binnen dit onderzoek zijn geanalyseerd. Een voorbeeld uit de dataset geeft een NO<sub>x</sub> uitstoot van 9.2 g/kWh voor scheepsklasse M8 uit bouwjaar 2005. Dit komt overeen met de CCR fase I eisen op het gebied van NO<sub>x</sub>. In Figuur 7 is te zien dat dit niveau lager is dan het niveau dat bepaald wordt op basis van het model van Sui [6]. Hierdoor gaven de reissimulaties een uitstoot hoger dan toegestaan volgens de CCR-I eisen. Gegeven het doel van de huidige studie (verkenning naar toename van emissies en brandstofverbruik in laag water perioden) leidt dit niet tot afwijkende conclusies.

In dit onderzoek is geen rekening gehouden met het al dan niet aanwezig zijn van een nabehandelingssysteem om NO<sub>x</sub> uit de uitlaatgassen te filteren (SCR). Zogenaamde katalysatoren kunnen de NO<sub>x</sub> uitstoot significant verlagen, en zijn praktisch gezien een vereiste om te kunnen voldoen aan stage V eisen.

### 3.2.3.4 PM emissies

Voor de fijnstof-emissies is gebruik gemaakt van een model beschreven door de Marine Environment Protection Committee [5]. Voor MDO/MGO wordt de volgende formule beschreven:

$$PM = 0.23 + SFC \cdot 7 \cdot 0.02247 \cdot (S - 0.0024)$$

Waarin  $S$  het aandeel zwavel in brandstof beschrijft. De MEPC [5] beschrijft dat deze factor voor MDO uit 2018 of nieuwer 0.0007 is. Dit model is gecombineerd met een correctie voor de belastinggraad van de motor, ontvangen van Rijkswaterstaat:

Tabel 4: Correctie PM-emissie bij verschillende motorbelasting

5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	100
2.44	1.63	1.32	1.19	1.12	1.08	1.05	1.03	1.01	1.01	1.00	1.00	0.99	0.99	0.08	0.98	0.97	0.97

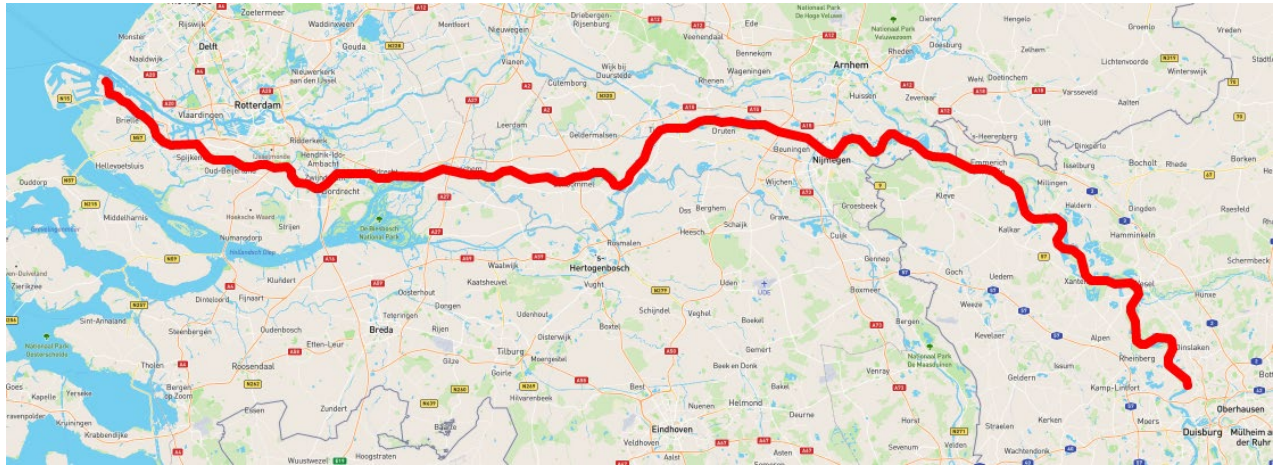
De bovenstaande formule geeft een PM-uitstoot van 0.175 g/kWh. In de TNO-data die werd aangeleverd door Rijkswaterstaat wordt bij een M8 schip uit 2005 een PM-uitstoot van 0.300 g/kWh gegeven. Dit is bijna tweemaal hoger dan de uitstoot die in de reissimulaties bepaald wordt, maar net als voor NO<sub>x</sub> emissies zal dit gezien het doel van de huidige studie niet tot afwijkende conclusies leiden.

## 3.2.4 Route en omgevingscondities

### 3.2.4.1 Route

De route gebruikt in de simulaties loopt van het havengebied in Rotterdam naar Duisburg, ter hoogte van pegel Ruhrort. De route is gevisualiseerd in Figuur 8.

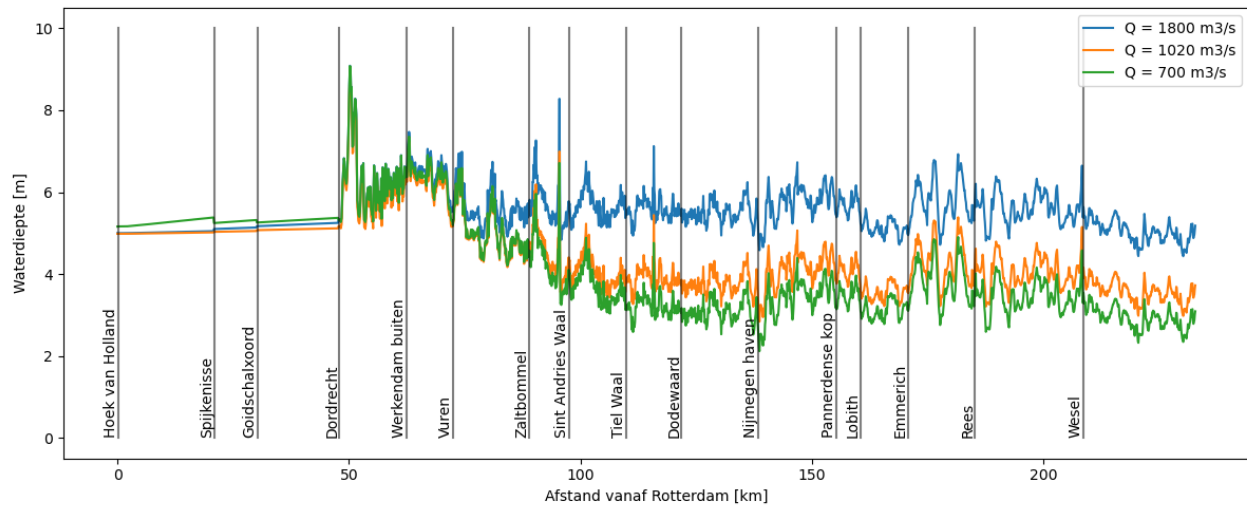




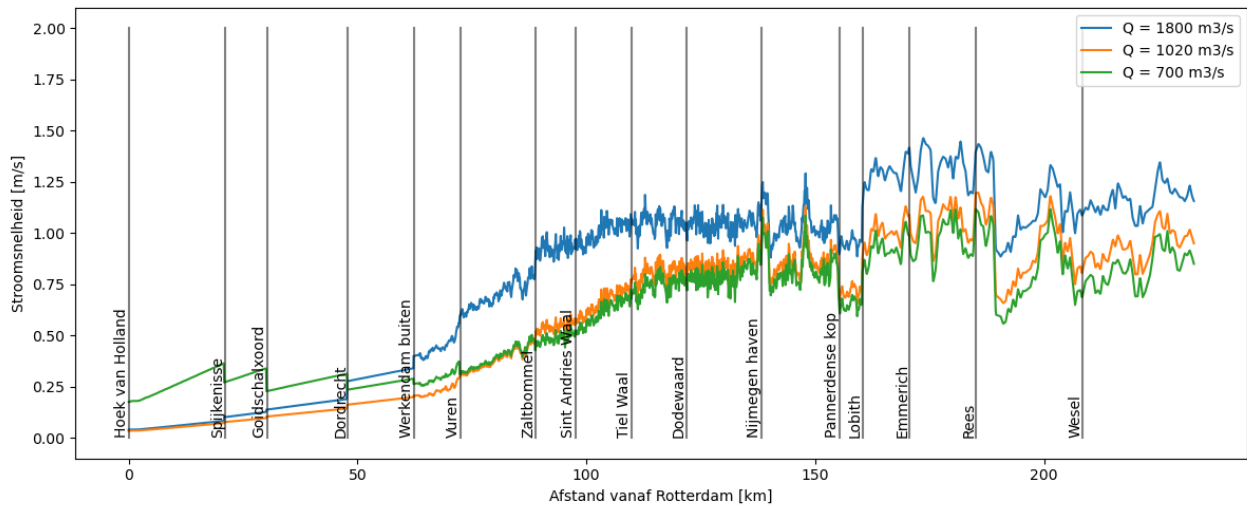
Figuur 8: De gebruikte route voor de simulaties; van Rotterdam naar Duisburg

### 3.2.4.2 Omgevingscondities

Voor het bepalen van de omgevingscondities is gebruik gemaakt van historische pegelstanden en beschikbare betrekkinglijnen. Hiermee is een database opgesteld waarmee de reissimulatiesoftware gegeven een tijdstip en locatie de waterdiepte en stroomsnelheid kan bepalen. In Figuur 9 en Figuur 10 zijn respectievelijk de waterdiepte en stroomsnelheid langs de route gegeven, voor een vast tijdstip.



Figuur 9: Waterdiepte langs route (Rotterdam-Duisburg) in week 18 (normale waterstand,  $1800 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 30 (lage waterstand,  $1020 \text{ m}^3/\text{s}$ ) en 42 (extreem lage waterstand,  $700 \text{ m}^3/\text{s}$ ) in 2018, inclusief de meetpunten van waterniveau (pegels) langs de vaarroute.



Figuur 10: Stroomsnelheid langs route (Rotterdam-Duisburg) in week 18 (normale waterstand, 1800 m<sup>3</sup>/s), 30 (lage waterstand, 1020 m<sup>3</sup>/s) en 42 (extreem lage waterstand, 700 m<sup>3</sup>/s) in 2018, inclusief de meetpunten van waterniveau (pegels) langs de vaarroute.

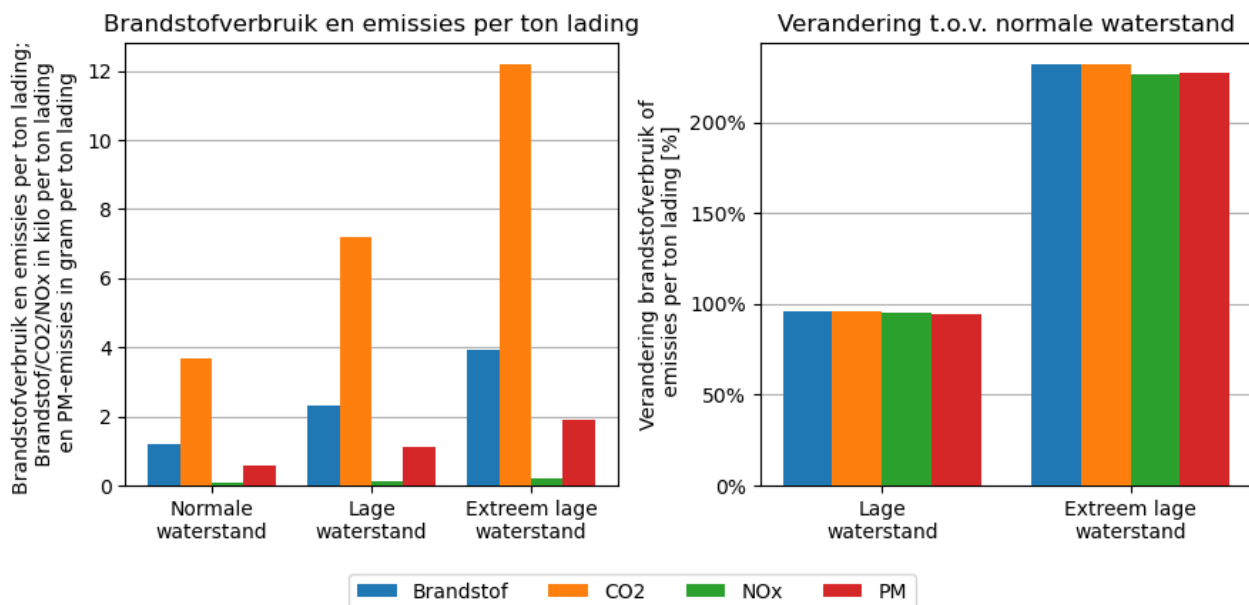


## 4 RESULTATEN REISSIMULATIES

Reissimulaties zijn uitgevoerd voor de in Tabel 1 genoemde scenario's en voor een aantal scenario's met onbeladen toestand. Uit de reissimulaties zijn voor elke tijdstap het brandstofverbruik en de emissies berekend, in g/kWh. Dit wordt vermenigvuldigd met het berekende motorvermogen en de tijdsduur van elke stap in de simulatie. Dit samen geeft het totale brandstofverbruik en de totale emissie van CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> en PM, per reis. De data is daarna vermenigvuldigd met het aantal reizen om de emissies en het brandstofverbruik per week te bepalen. Dit is daarna weer gedeeld door het ladingvolume per week om tot de emissie per ton lading te komen.

### 4.1 Brandstofverbruik en emissies voor vloot, ladingtypes en scheepstypes

Figuur 11 laat zien dat brandstofverbruik en emissies per ton lading over de gehele vloot toenemen (ten opzichte van normale waterstand) met ongeveer 100% bij lage waterstand (1020 m<sup>3</sup>/s) en toeneemt met ongeveer 225% bij extreem lage waterstand (700 m<sup>3</sup>/s).



Figuur 11: Brandstofverbruik en emissies per ton lading over de gehele vloot bij drie waterstanden en de toename ervan in lage en extreem lage waterstand ten opzichte van normale waterstand. PM (fijnstof) emissie is weergegeven in een andere eenheid om de balk zichtbaar te maken.

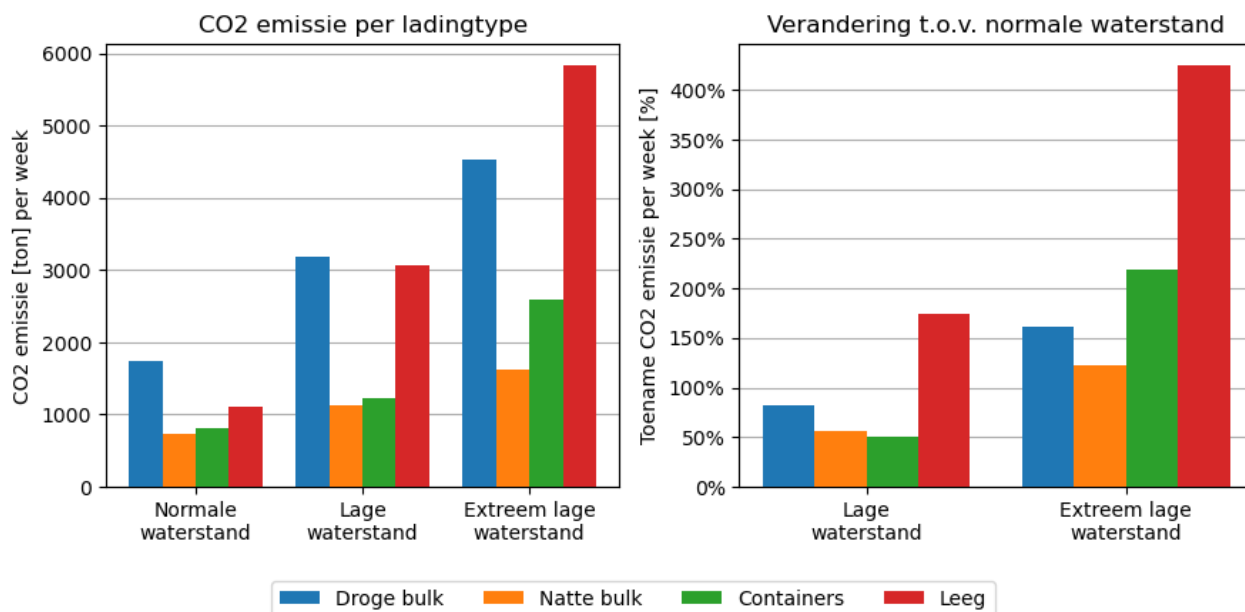
Figuur 11 laat ook zien dat er in de toenames van brandstofverbruik en/of emissies nagenoeg geen verschil te zien is. Dit volgt uit de manier van modelleren. Zowel brandstofverbruik als emissies zijn in de basis gemodelleerd als een hoeveelheid gewicht uitstoot/verbruik per kilowattuur door de motor(en) geleverde energie. Er wordt een correctie toegepast voor motorbelasting, maar deze correctie is alleen significant bij zeer lage motorbelasting. Daarom zullen in het vervolg van dit rapport de toenames alleen gepresenteerd worden voor CO<sub>2</sub> emissies.

De verdeling onder ladingsoorten en scheepstypes kan ook geanalyseerd worden. Dit wordt voor de verschillende ladingsoorten gedaan in Figuur 12 en Figuur 13. De eerste laat de absolute waarden van CO<sub>2</sub> uitstoot zien, terwijl de tweede de emissie per ton lading laat zien. Figuur 12 laat zien dat de grootste absolute toenames van CO<sub>2</sub> emissies plaatsvinden bij droge bulk en lege vaart.

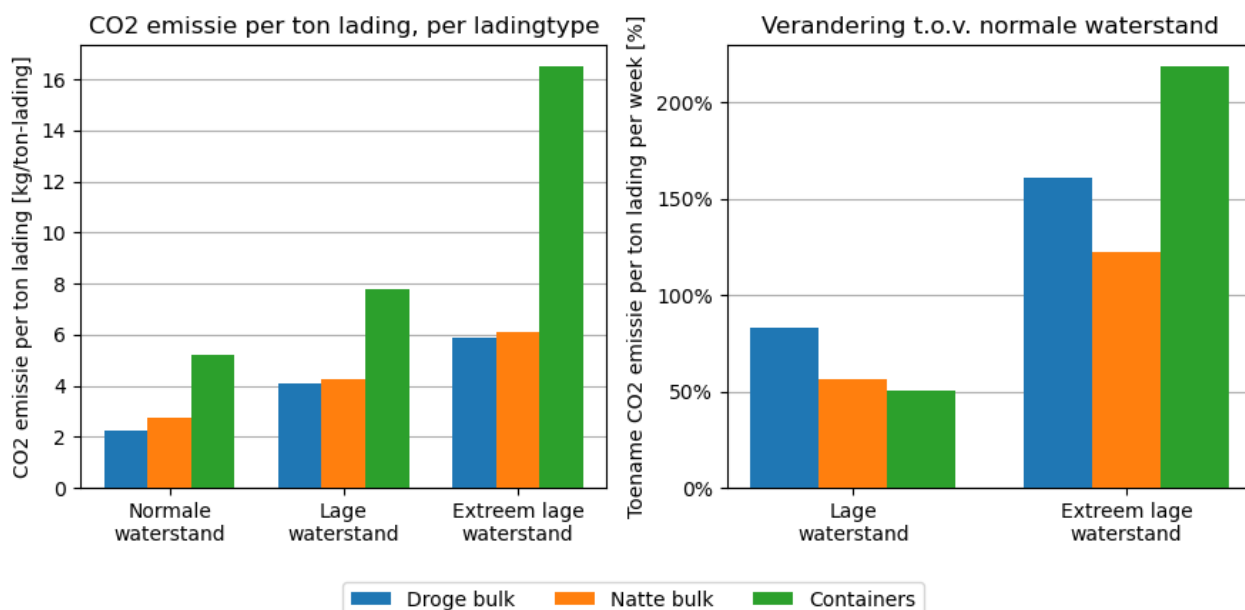
In geval van de droge bulk wordt de sterke toename verklaard door de grote hoeveelheid vaarbewegingen van duwkonvoien bij lage waterstand en van C4 koppelverbanden bij extreem lage waterstand. Bij lage waterstand is de diepgang beperkt en zijn er dus aanzienlijk meer reizen nodig om aan het ladingvolume te voldoen. Bij extreem ondiep water nemen C4 koppelverbanden een groot deel van het ladingvolume van droge bulk over van duwstellen. Deze laatsten kunnen bij zeer lage

waterstand niet meer opereren doordat de vereiste diepgang van het duwschip te groot is. C4 koppelverbanden zijn hydromechanisch minder efficiënt, naast het feit dat er met beperkte diepgang gevaren moet worden. Beide leiden tot een hoger brandstofverbruik.

De toename van CO<sub>2</sub> emissie bij natte bulk is relatief klein. Bij dit ladingtype geldt dat bij extreem laag water bijna 90% van het ladingvolume vervoerd wordt door M8 en M6 schepen. Met name de M6 schepen ondervinden slechts een beperkte reductie van diepgang, waardoor de afname van transportefficiëntie gedempt wordt. Bij het containervervoer valt op dat de toename van brandstofverbruik beperkt is in laag water, maar groot is bij zeer laag water. Dit komt doordat scheepstypen M11 en M12 een groot deel van het containertransport bedienen, wat ook te zien is in Tabel 2. Deze schepen ondervinden een duidelijke beperking van diepgang bij zeer laag water, waardoor het aantal reizen sterk toe moet nemen om het ladingvolume gelijk te houden. De afname van transportefficiëntie is dan ook duidelijk te zien in Figuur 13.



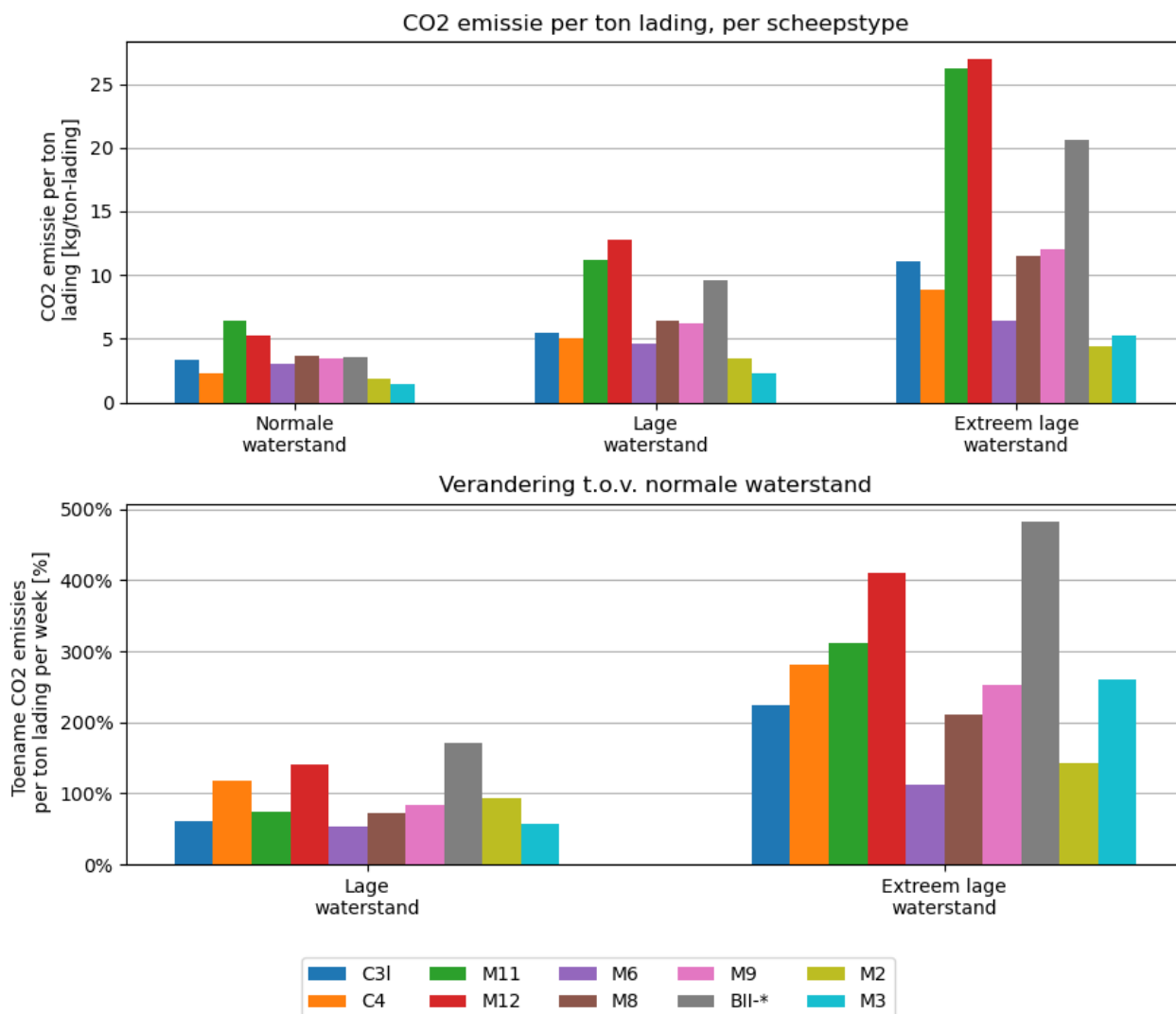
Figuur 12: CO<sub>2</sub> emissie [ton] voor elk ladingtype (en lege vaart) bij drie waterstanden en de toename ervan in lage en extreem lage waterstand ten opzichte van normale waterstand.



Figuur 13: CO<sub>2</sub> emissie per ton lading [ton/ton-lading] voor elk ladingtype bij drie waterstanden en de toename ervan in lage en extreem lage waterstand ten opzichte van normale waterstand.

Figuur 12 en Figuur 13 laten zien voor het containervervoer dat dit niet in lijn is met de bevindingen uit het voorgaande onderzoek. Echter was M12 niet meegenomen in dat onderzoek, terwijl juist dat scheepstype een groot aandeel van het containervervoer op zich neemt en ook een sterke beperking van diepgang heeft bij zeer laag water. Figuur 14 hierna laat ook zien dat de toenames voor scheepstypen M11 en M12 erg groot zijn. Deze beide scheepstypen nemen een groot deel van het ladingvolume van containers voor hun rekening, te zien in Figuur 4.

Verder geeft Figuur 12 duidelijk de impact van lege vaart weer. Door de grote toename in vaarbewegingen van lege schepen bij lage waterstanden (zoals te zien in Figuur 3) nemen emissies van lege vaart sterk toe. Deze toename van lege vaarten vindt daarbovenop vooral plaats in afvaart, waar de (relatieve) toename van emissies sterker is dan in opvaart. Dit heeft ook zijn weerslag op de toenames van de vlootbrede emissies zoals te zien in Figuur 11.



**Figuur 14:** CO<sub>2</sub> emissie per ton lading [kg/ton-lading] per scheepstype bij drie waterstanden en de toename ervan in lage en extreem lage waterstand ten opzichte van normale waterstand.

Figuur 14 laat zien hoe brandstof per ton lading verandert tussen de drie onderzochte waterstanden, verdeeld per scheepstype. Per scheepstype zijn ook de lege vaarten inbegrepen in de cijfers<sup>5</sup>. Te zien is dat scheepstypen M11 en M12 in alle waterstanden minder efficiënt zijn dan andere scheepstypes. Dit komt onder andere doordat M11 en M12 schepen vaak containers vervoeren welke een relatief laag

<sup>5</sup> Leegvaart kan meegenomen worden in emissie per ton lading door de emissie van alle reizen (beladen én onbeladen) op te tellen en te delen door de gesommeerde lading van de beladen reizen

gewicht hebben. Hiervoor valt de efficiëntie per ton lading lager uit. Daarnaast is ook te zien dat duwstellen relatief veel brandstof per ton lading verbruiken. Ondertussen geldt dat schepen van type M6, M8 en M9 relatief efficiënt zijn. Hetzelfde is te zien voor koppelverbanden van type C3I.

Het hoge brandstofverbruik per ton lading van duwstellen (aangegeven met BII-\*) is te verklaren doordat de schepen vrijwel altijd leeg terugvaren (stroomafwaarts). Ditzelfde geldt ook voor schepen van het type C4: bij extreem laag water worden deze ingezet om droge bulk te vervoeren ter vervanging van de duwkonvooien, en gelijk aan de operatie van duwkonvooien varen ze dus doorgaans leeg stroomafwaarts. Dit is te zien in Figuur 5.

Over het algemeen is te zien dat kleinere scheepsklassen (M2 t/m M9) efficiënter zijn in alle waterstanden. Het verschil met andere scheepsklassen neemt toe bij lage en extreem lage waterstand. Dit volgt uit het kleinere motorvermogen dat in kleinere schepen geïnstalleerd is: minder vermogen betekent langzamer varen, minder energieverbruik per vervoerde ton lading en dus minder verbruik en/of emissies per vervoerde ton lading. Daarnaast worden kleinere schepen minder beperkt in hun diepgang bij lagere waterstanden, waardoor het verschil met andere scheepstypen toeneemt in lage en extreem lage waterstand.

## 4.2 Opsplitsing van gevolgen van lagere waterstand

Een uitbreiding op het voorgaande onderzoek is het uitvoeren van een systeembeschouwing. Dit moet inzicht bieden in hoe verschillende gevolgen van lage (of extreem lage) waterstand het brandstofverbruik en het brandstofverbruik per ton lading beïnvloeden.

De systeembeschouwing is in twee delen opgesplitst, die elk zijn verveeld in drie onderdelen.

1. Impact op één reis. Dit zijn gevolgen van de hydromechanische veranderingen in de situatie (zie bijlage III voor illustratie). Er worden drie veranderingen onderscheiden:
  - a. Verandering waterdiepte: doordat het debiet (bij Lobith) afneemt zakt het waterniveau, en daarmee de waterdiepte en ook kielspeling (ruimte tussen schip en vaarwegbodem). Dit leidt voor schepen tot een hogere weerstand en daarmee bij gelijke snelheid tot een hoger brandstofverbruik en meer emissies.
  - b. Verandering van stroomsnelheid: de stroomsnelheid zal afnemen bij een kleiner debiet. Dit betekent voor schepen die tegen de stroom in varen (stroomopwaarts) dat de weerstand bij gelijke snelheid over de grond afneemt bij lagere waterstand, met een verlaging van brandstofverbruik en emissies tot gevolg. Voor stroomafwaarts varende schepen zal de weerstand toenemen bij lagere waterstand. Dit leidt bij stroomafwaarts varen tot een toename van brandstofverbruik en emissies.
  - c. Verandering van diepgang: door de lagere waterstand neemt de waterdiepte af en het gevolg daarvan is dat schepen minder diep *kunnen* afladen. De diepgangsbeperving wordt opgelegd door de ondiepste gedeeltes op het traject. Schepen zullen bij lage waterstand dus met minder diepgang varen. Op hydromechanisch vlak leidt dit bij gelijke vaarsnelheid tot een afname van de scheepsweerstand, en daarmee een afname van brandstofverbruik en emissies.
2. Impact op het scenario: dit bevat zowel de gevolgen binnen één reis (die werken door) als gevolgen van logistieke wijzigingen bij lage waterstand. Er worden drie veranderingen onderscheiden:
  - a. Hydromechanische effecten: de effecten genoemd onder 1a, 1b en 1c leiden samen tot een verandering van het brandstofverbruik en de emissies binnen een enkele reis, wat doorwerkt in de veranderingen voor het scenario als geheel.
  - b. Verandering aantal reizen: een gevolg van afname van diepgang. De afname van diepgang leidt tot een beperking van laadcapaciteit. Om aan een bepaald ladingvolume per week te voldoen zullen dus meer reizen gevaren moeten worden.

- c. Herverdeling van lading: bij lagere waterstand verplaatst een bepaald ladingaandeel van het ene scheepstype naar het andere. Dit geldt bijvoorbeeld voor droge bulk die normaal grotendeels door duwstellen vervoerd wordt; bij lage waterstand zullen C4 schepen dit overnemen. Dit leidt tot een verandering van het ladingvolume en dus een verandering van het aantal benodigde reizen.

In de uitgevoerde reissimulaties waarvan de resultaten in 4.1 zijn beschreven, zijn alle bovengenoemde effecten verwerkt. Om de impact van de losse effecten te bepalen, zijn voor de hydromechanische aparte simulaties uitgevoerd waarbij steeds één gevolg “uitgeschakeld” was. Zo werd om de impact van waterdiepte te bepalen een simulatie uitgevoerd waarbij waterdiepte ingesteld was op de situatie bij normale waterstand, terwijl stroming en diepgang wel conform lage en extreem lage waterstand ingesteld waren. Door de resultaten van die aangepaste simulatie te vergelijken met die van een normale simulatie, kon de impact van waterdiepte op een enkele reis bepaald worden.

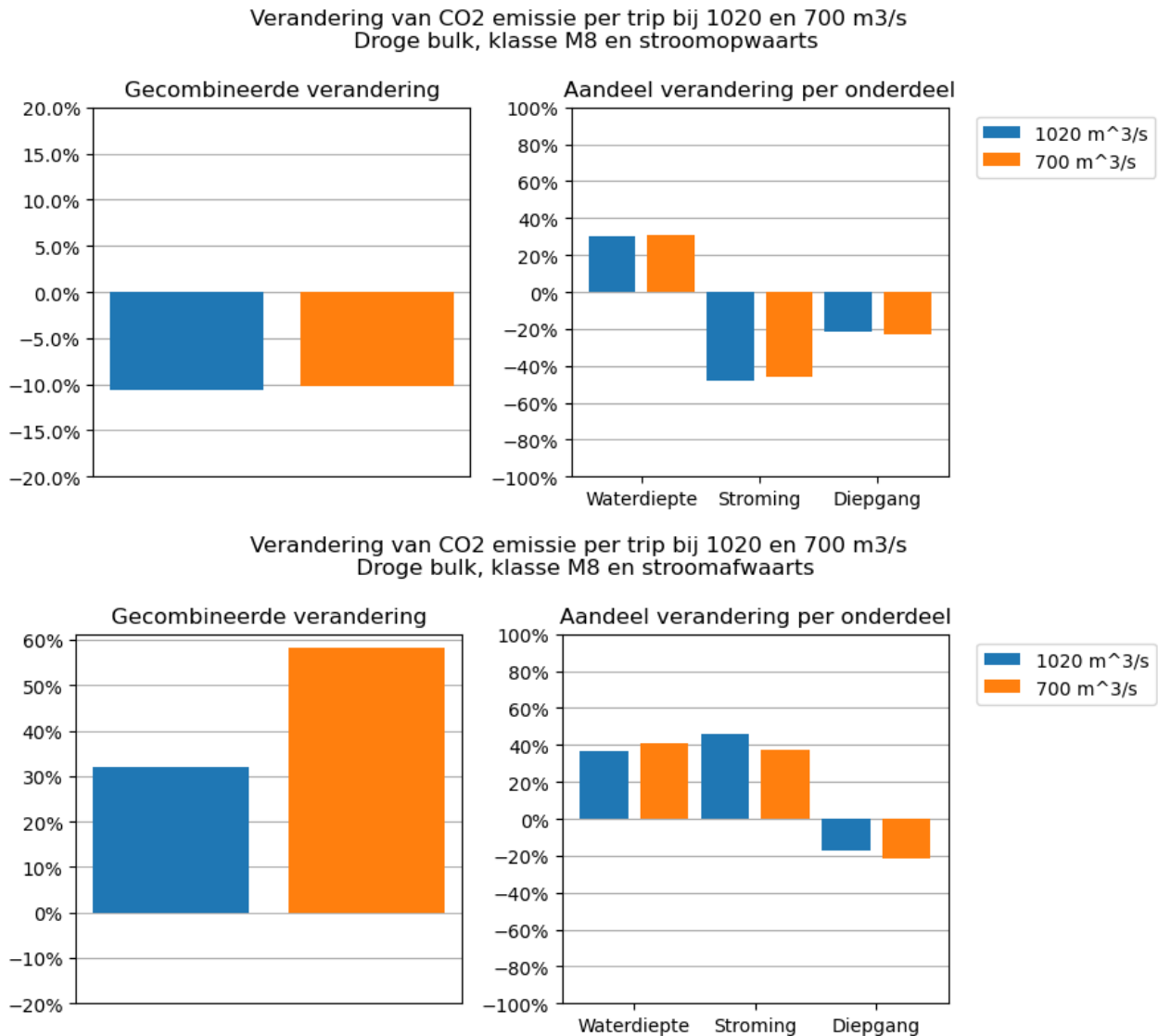
De systeembeschouwing is uitgevoerd voor elk scenario. Daarnaast werd het tweede deel van de systeembeschouwing ook op gecombineerde scenario's toegepast: bijvoorbeeld voor het vervoer van droge bulk als geheel, of zelfs op alle scenario's bij elkaar.

Hieronder zijn een aantal voorbeelden uitgewerkt en gepresenteerd:

1. Per reis (4.2.1):
  - a. M8, droge bulk, stroomop en -afwaarts
  - b. M8, natte bulk, stroomop en -afwaarts
  - c. M8, containers, stroomop en -afwaarts
  - d. M8, leeg, stroomop en -afwaarts
2. Per scenario (4.2.2):
  - a. M8, droge bulk, stroomop en -afwaarts
  - b. Alle scheepsklassen, droge bulk, stroomop en -afwaarts
  - c. Alle scheepsklassen, alle ladingtypen inclusief lege vaart, stroomop en -afwaarts
  - d. Alle scheepsklassen, alle ladingtypen exclusief lege vaart, stroomop en -afwaarts

In de bijlagen zijn meer opsplitsingen te vinden voor andere scheepstypen en ladingsoorten.

#### 4.2.1 Opsplitsing van gevolgen per reis



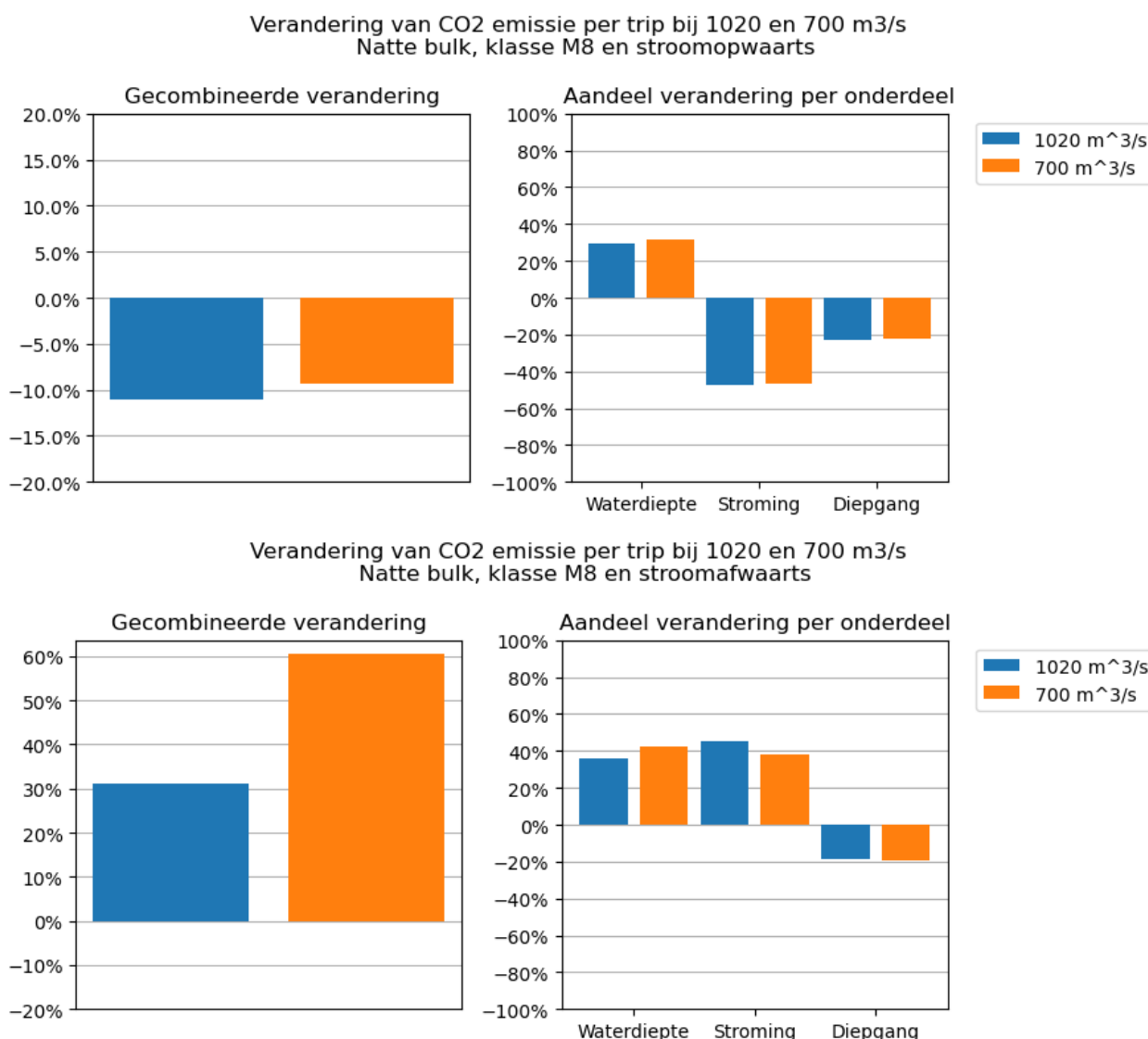
**Figuur 15:** Totale verandering (links) van CO<sub>2</sub>-emissie per reis en de impact van losse hydromechanische effecten (rechts) op de verandering, voor M8 schepen met droge bulk, stroomopwaarts (boven) en -afwaarts (onder).

In Figuur 15 is de systeembeschouwing per reis voor scheepsklasse M8 en droge bulk lading getoond voor respectievelijk stroomopwaartse en stroomafwaartse vaarrichting. De grafieken laten zien dat het brandstofverbruik per reis bij lagere waterstanden (ten opzichte van normale waterstand) afneemt in stroomopwaartse richting, terwijl het toeneemt in stroomafwaartse richting.

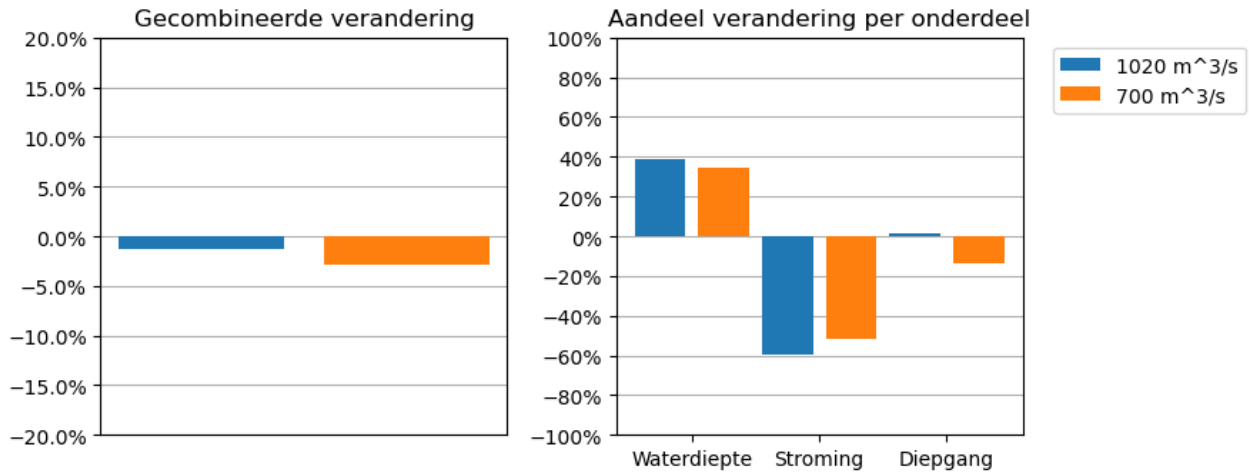
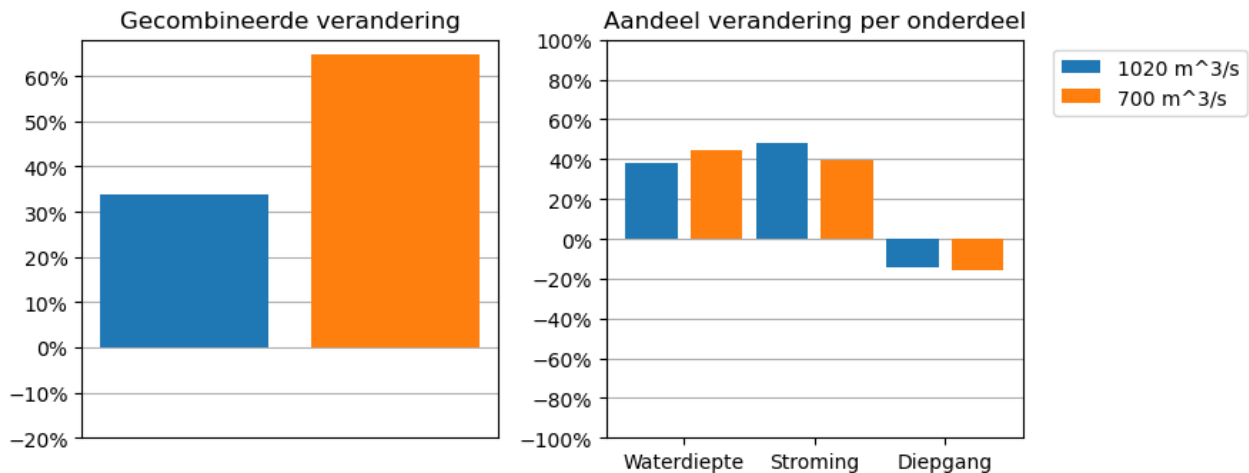
De losse onderdelen in elke rechter grafiek tellen samen op tot 100% waarbij elke balk als positief percentage geteld moet worden. Te zien is dat strooming bij stroomopwaartse vaarrichting een dempend effect op de toename van brandstofverbruik heeft, terwijl dat bij stroomafwaartse vaarrichting juist versterkend is. Het effect van waterdiepte is in beide vaarrichtingen versterkend op de toename van brandstofverbruik, terwijl het effect van verminderde diepgang in beide gevallen dempend is.

In stroomopwaartse vaarrichting is de toename van brandstofverbruik bij lage en extreem lage waterstand, ten opzichte van normale waterstand, vergelijkbaar. Bij stroomafwaartse vaarrichting is de toename bij extreem lage waterstand aanzienlijk groter dan bij lage waterstand. Dit komt door de manier waarop de effecten van waterdiepte en strooming samenwerken: bij stroomopwaartse vaart heffen deze elkaar deels op. De losse effecten worden wel sterker, maar samen leidt dit niet tot een grotere toename

van brandstofverbruik. Bij stroomafwaartse vaart versterken de veranderde waterdiepte en stroming elkaar, waardoor de toename van brandstofverbruik bij extreem laag water sterker is dan bij laag water. In Figuur 16 en Figuur 17 is de opsplitsing gemaakt voor natte bulk en containervaart, zowel stroomopwaarts als stroomafwaarts. Voor natte bulk geldt dat de resultaten vergelijkbaar zijn met die van droge bulk. De verandering van de situatie is dan ook vergelijkbaar: zowel natte als droge bulk ondervinden een vergelijkbare afname van beschikbare diepgang. Voor containervaart is echter te zien dat de toename in stroomopwaartse richting kleiner is. Dit volgt uit de kleinere afname van diepgang bij containervaart, met name doordat deze ook bij normale waterstand beperkt afladen. Het aandeel van veranderende diepgang in de totale toename van brandstofverbruik, te zien in de rechtergrafieken van Figuur 17, is dan ook kleiner dan bij droge en natte bulk. De toenames bij stroomafwaartse vaarrichting zijn iets groter, wat ook volgt uit de kleinere afname van diepgang: bij droge en natte bulk heeft het effect van verminderde diepgang een dempend effect op de toename van brandstofverbruik. Dit effect is kleiner voor containervaart, waardoor de totale toename van brandstofverbruik gedempt wordt en dus kleiner is.



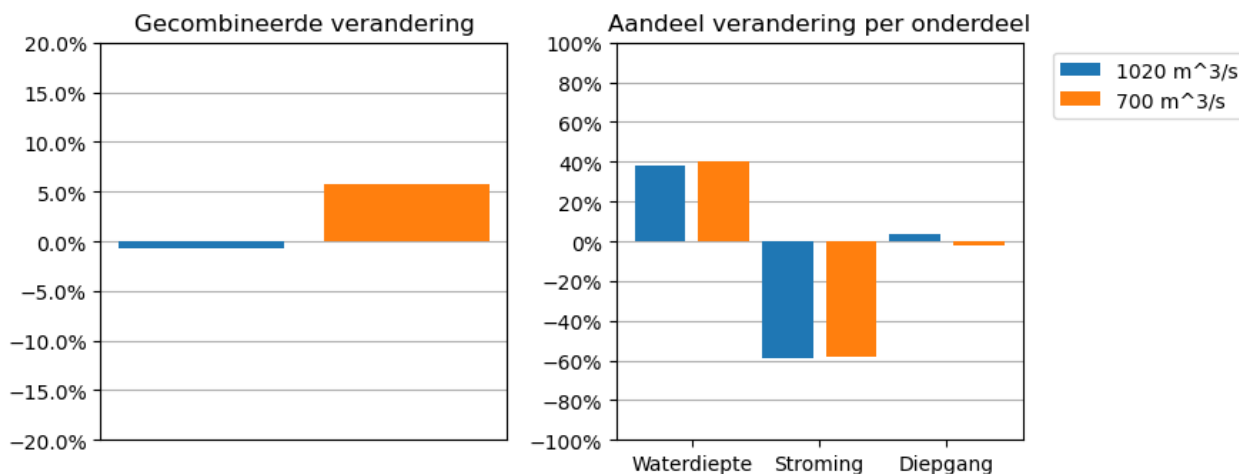
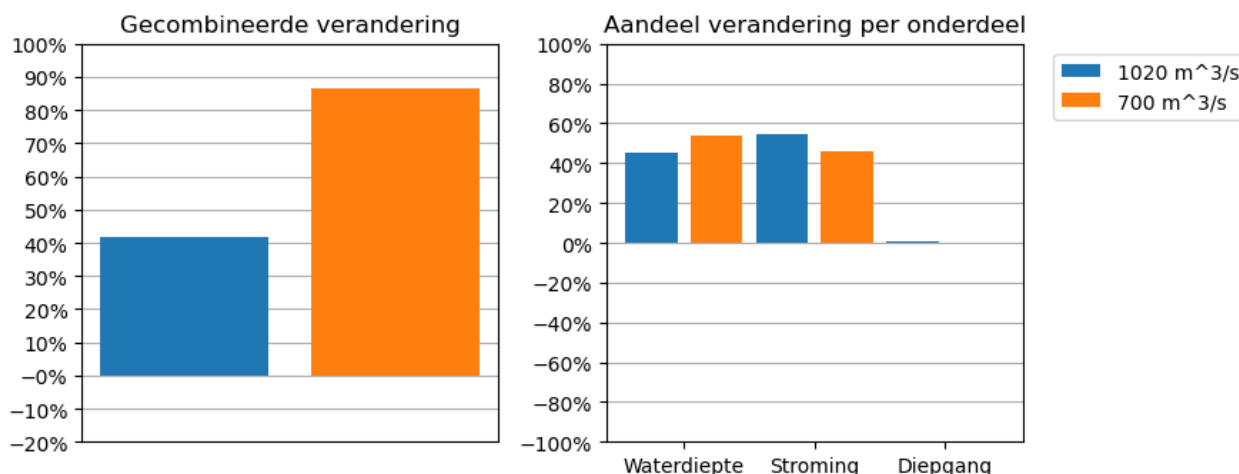
**Figuur 16:** Totale verandering (links) van CO<sub>2</sub>-emissie per reis en de impact van losse hydromechanische effecten (rechts) op de verandering, voor M8 schepen met natte bulk, stroomopwaarts (boven) en -afwaarts (onder).

Verandering van CO2 emissie per trip bij 1020 en 700 m<sup>3</sup>/s  
 Containers, klasse M8 en stroomopwaarts

 Verandering van CO2 emissie per trip bij 1020 en 700 m<sup>3</sup>/s  
 Containers, klasse M8 en stroomafwaarts


*Figuur 17: Totale verandering (links) van CO2-emissie per reis en de impact van losse hydromechanische effecten (rechts) op de verandering, voor M8 schepen met containers, stroomopwaarts (boven) en -afwaarts (onder).*

In Figuur 18 is de opsplitsing gemaakt voor lege vaart met M8 schepen, in opvarige en afvarige richting. De totale toename is kleiner dan voor beladen schepen. In lage waterstand is de totale toename vergelijkbaar met die bij containervaart: zowel leeg varende schepen als containerschepen ondervinden in die waterstand nog geen beperking van diepgang. Bij extreem lage waterstand is voor lege vaart een toename te zien terwijl er voor containervaart een afname te zien is: containerschepen gaan minder diep afladen, wat de toename dempt (zover dat er een afname overblijft). Lege schepen blijven bij gelijke diepgang varen waardoor slechts effecten van waterdiepte en stroming overblijven die samen tot een toename van emissies en/of brandstofverbruik leiden.



Verandering van CO<sub>2</sub> emissie per trip bij 1020 en 700 m<sup>3</sup>/s  
 Leegvaart, klasse M8 en stroomopwaarts

 Verandering van CO<sub>2</sub> emissie per trip bij 1020 en 700 m<sup>3</sup>/s  
 Leegvaart, klasse M8 en stroomafwaarts


Figuur 18: Totale verandering (links) van CO<sub>2</sub>-emissie per reis en de impact van losse hydromechanische effecten (rechts) op de verandering, voor M8 schepen in lege vaart, stroomopwaarts (boven) en -afwaarts (onder).

#### 4.2.2 Opsplitsing van gevolgen per scenario

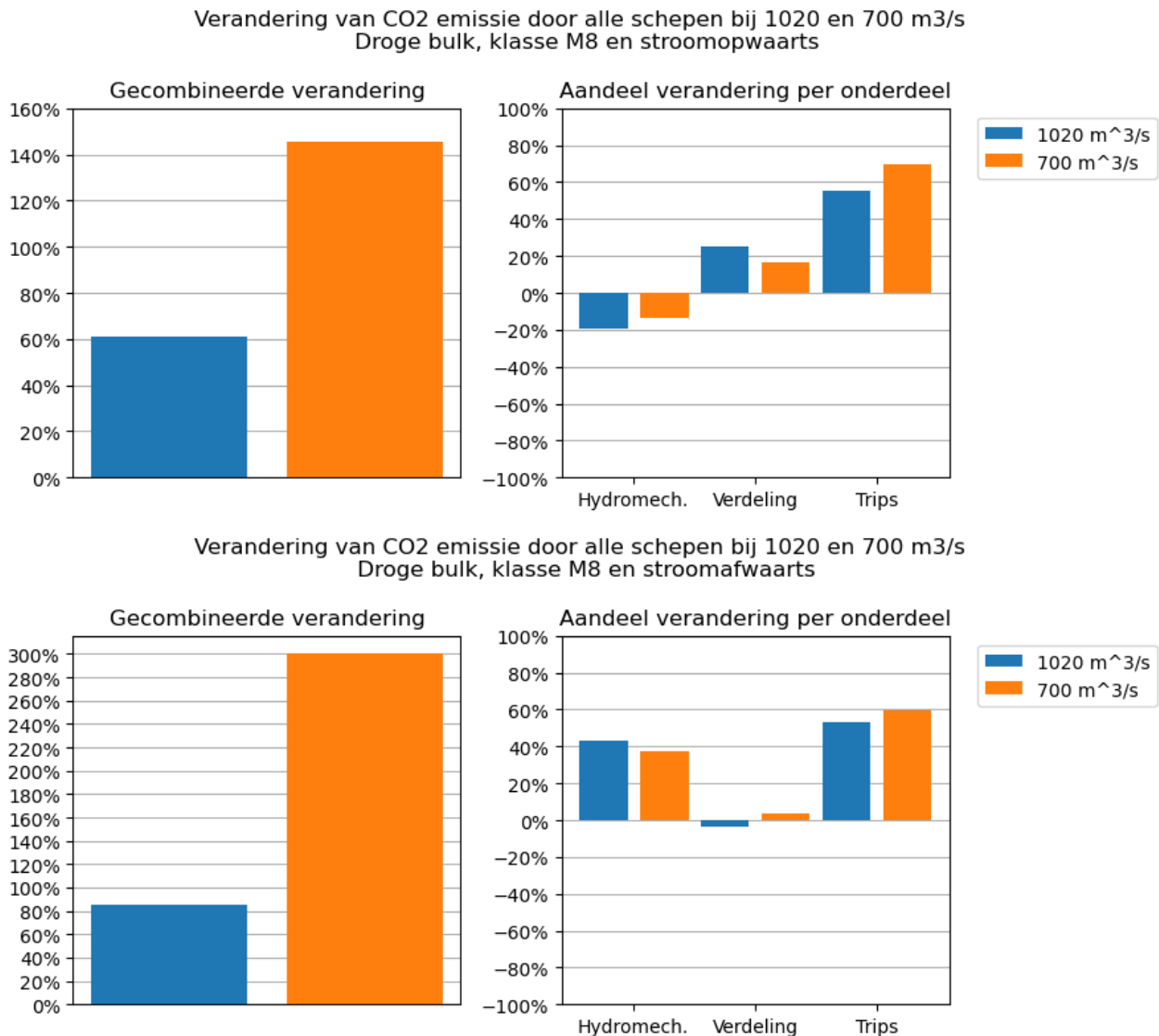
Wanneer de logistieke effecten inbegrepen worden, wordt de opdeling gemaakt tussen hydromechanische effecten (combinatie van gevolgen door waterdiepte, stroming en diepgang), het herverdelen van lading over de vloot en het toenemen van het aantal reizen. Ten opzichte van de effecten per reis worden hier dus twee extra effecten meegenomen: het totale ladingvolume wordt gedeeltelijk herverdeeld tussen de scheepstypen, en het aantal reizen neemt toe omdat schepen door de diepgangsbepanking minder lading mee kunnen nemen per reis.

Als eerste wordt de analyse gemaakt per scheepstype en ladingtype (hierna is dit voor M8 met droge bulk getoond). Hierbij wordt gekeken naar de absolute CO<sub>2</sub> emissie, en niet naar de CO<sub>2</sub> emissie per ton lading. In de CO<sub>2</sub> emissie per ton lading per scheepsklasse en ladingtype heeft het herverdelen van lading namelijk géén effect: de hoeveelheid lading verandert als een gevolg van herverdeling. Dit verandert het aantal reizen en daarmee de CO<sub>2</sub> emissie (over alle reizen). Om CO<sub>2</sub> emissie per ton lading te krijgen moet weer gedeeld worden door de hoeveelheid lading, waarmee het effect van de verandering (van de hoeveelheid lading) ten gevolge van de herverdeling weer teniet wordt gedaan.

Als tweede worden de deelanalyses ook uitgevoerd over alle scheepsklassen (en daarna ook over alle ladingtypen). Hier geldt juist weer dat het niet uitmaakt of er gekeken wordt naar totale CO<sub>2</sub> emissie of CO<sub>2</sub> emissie per ton lading: de hoeveelheid lading over alle scheepsklassen samen (per ladingtype en vaarrichting) is namelijk gelijk voor alle waterstanden, conform het vertrekpunt van de studie. Hierdoor zijn de toenames van totale CO<sub>2</sub> emissie en CO<sub>2</sub> emissie per ton lading gelijk aan elkaar. Voor consistentie wordt daarom in alle hierop volgende grafieken gekeken naar de totale CO<sub>2</sub> emissie.

#### 4.2.2.1 Scenario M8, droge bulk

In Figuur 19 wordt de toename van brandstofverbruik getoond voor droge bulk met M8 schepen in respectievelijk stroomopwaartse en stroomafwaartse vaarrichting. Te zien is dat in opwaartse richting, het brandstofverbruik (over alle M8 schepen met droge bulk) bij lage waterstand met 60% toeneemt, en bij extreem lage waterstand met 140%. In stroomafwaartse richting is dat 85% respectievelijk 300%. Voor beide waterstanden en vaarrichtingen geldt dat de grootste bijdrage aan deze toename het gegroeide aantal reizen is. Tegelijkertijd is te zien dat hydromechanische effecten dempend werken voor stroomopwaartse vaarrichting, maar versterkend werken in stroomafwaartse vaarrichting. De bijdrage van het herverdelen van lading is, in vergelijking met de toename van het aantal reizen, klein.



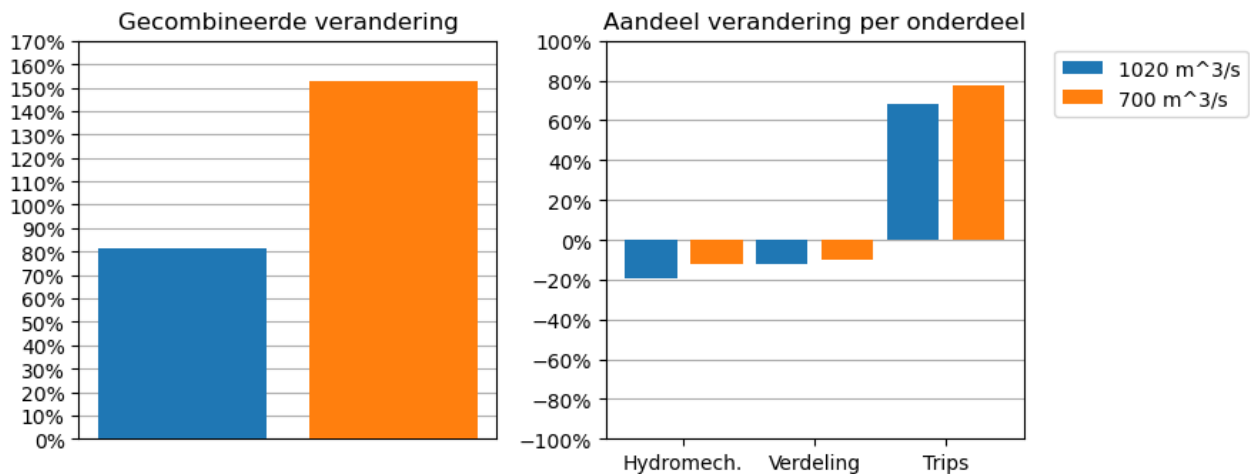
**Figuur 19:** Totale verandering (links) van CO<sub>2</sub>-emissie en de impact van hydromechanische en logistieke effecten (rechts) op de verandering, voor M8 schepen met droge bulk, stroomopwaarts (boven) en -afwaarts (onder).

In de figuren tot nu toe wordt steeds gekeken naar de toename van het absolute brandstofverbruik. Dit geeft namelijk per reis het beste beeld van de gevolgen omdat het brandstofverbruik per ton lading vertekend zou worden door logistieke effecten zoals het herverdelen van lading. Voor de opdeling tussen logistieke effecten (en hydromechanische effecten) geldt daarnaast dat de weergave van de effecten op verbruik per ton lading vrijwel gelijk is aan die van het de deeleffecten op het absolute verbruik, zeker wanneer de effecten van herverdeling beperkt zijn.

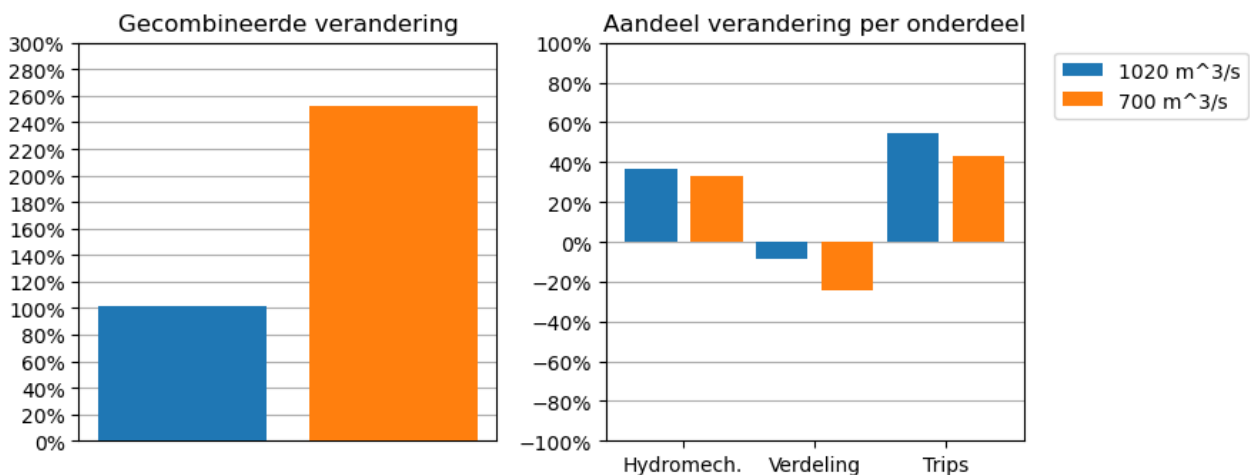
#### 4.2.2.2 Scenario droge bulk (alle scheepsklassen)

Brandstofverbruik per ton lading is een maat voor de efficiëntie van transport en daarmee is het nuttig om dit te bekijken voor bijvoorbeeld de gehele stroom van droge bulk in een bepaalde vaarrichting. Figuur 20 laat dit zien voor op- en afwaartse vaarrichting. Voor opwaartse richting gelden toenames van verbruik per ton lading van 80 en 150 procent bij lage en extreem lage waterstand ten opzichte van normale waterstand. De opsplitsing van effecten laat een dempend effect van hydromechanica en herverdeling zien. Het verplaatsen van ladingvolume – bij lage en extreem lage waterstand – van duwvaart naar andere scheepstypes geeft dus een hogere transportefficiëntie dan wanneer duwvaart hetzelfde ladingvolume zou vervoeren ongeacht de waterstand. Tegelijkertijd is te zien dat de toename van het aantal reizen de grootste bijdrage levert aan de afname van transportefficiëntie: er moeten veel meer reizen gemaakt worden om het lading volume gelijk te houden.

Verandering van CO2 emissie door alle schepen bij 1020 en 700 m<sup>3</sup>/s  
Droge bulk, alle klassen en stroomopwaarts



Verandering van CO2 emissie door alle schepen [m<sup>3</sup>] bij 1020 en 700 m<sup>3</sup>/s  
Droge bulk, alle klassen en stroomafwaarts



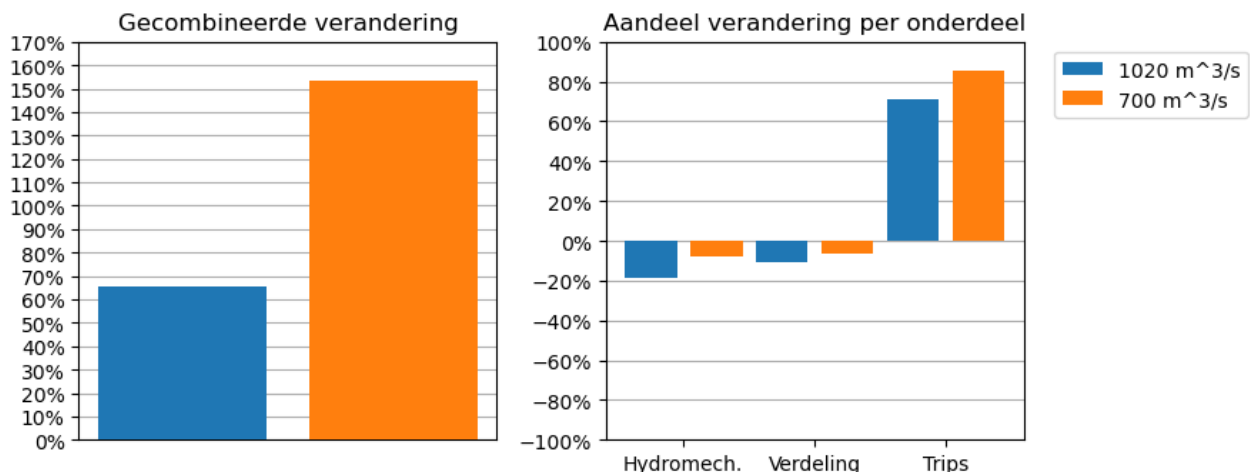
Figuur 20: Totale verandering (links) van CO<sub>2</sub>-emissie en de impact van hydromechanische en logistieke effecten (rechts) op de verandering, voor droge bulk, stroomopwaarts (boven) en –afwaarts (onder).

Voor stroomafwaartse richting gelden toenames van brandstofverbruik per ton lading van 100 en 250 procent bij lage en extreem lage waterstand. Hoewel de groei van het aantal reizen nog altijd de grootste invloed hierop heeft, zijn de gevolgen van hydromechanische veranderingen en herverdeling van lading ook groot. Dat de hydromechanische bijdrage groter is voor stroomafwaarts volgt uit het samenwerken van gevolgen van veranderingen in waterdiepte en stroming, terwijl deze bij stroomopwaarts elkaar tegenwerken wat netto tot een kleinere invloed van hydromechanische effecten leidt.

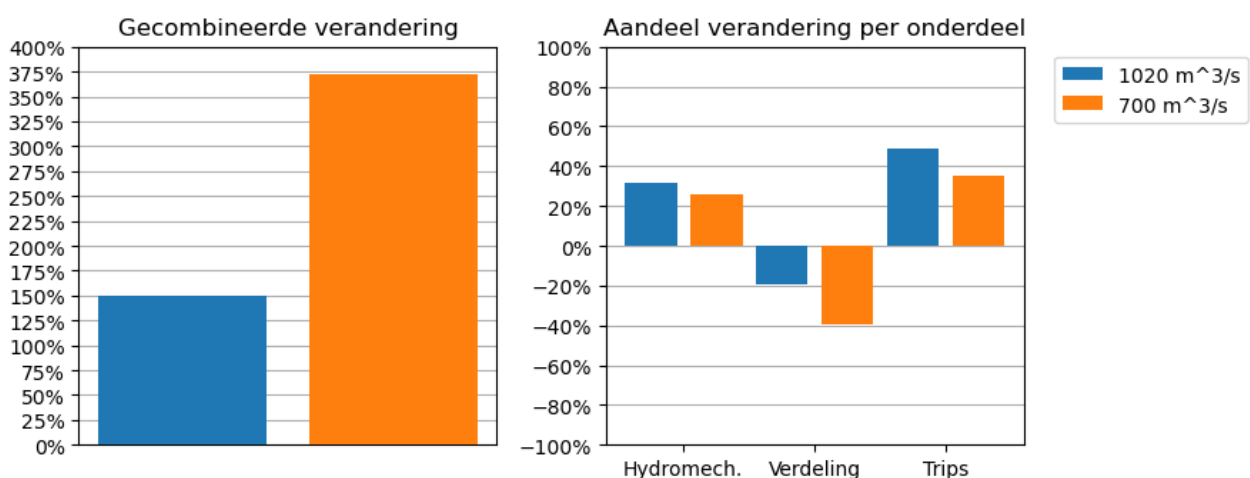
#### 4.2.2.3 Scenario gehele vloot inclusief lege vaart

De opdeling kan ook gemaakt worden voor de gehele vloot en alle ladingtypen. Hierin zijn ook lege vaarten opgenomen. Dit is getoond in Figuur 21 voor stroomopwaartse en stroomafwaartse vaarrichting. Te zien is dat het totale brandstofverbruik per ton toeneemt met 65% en 155% in opvaart voor lage en extreem lage waterstand. Voor afvaart gelden percentages van 150% en 375%. Voor opvaart geldt dat het grootste deel van de toenames veroorzaakt wordt door de toename van het aantal reizen. Het herverdelen van lading heeft een licht dempend effect op de toename van emissies. Dit kan verklaard worden doordat kleinere scheepstypes, die per ton lading wat efficiënter blijven (zie Figuur 14) een groter aandeel van de transportvolume voor hun rekening nemen.

Verandering van CO2 emissie door alle schepen bij 1020 en 700 m<sup>3</sup>/s alle ladingssoorten, alle klassen en stroomopwaarts



Verandering van CO2 emissie door alle schepen bij 1020 en 700 m<sup>3</sup>/s alle ladingssoorten, alle klassen en stroomafwaarts



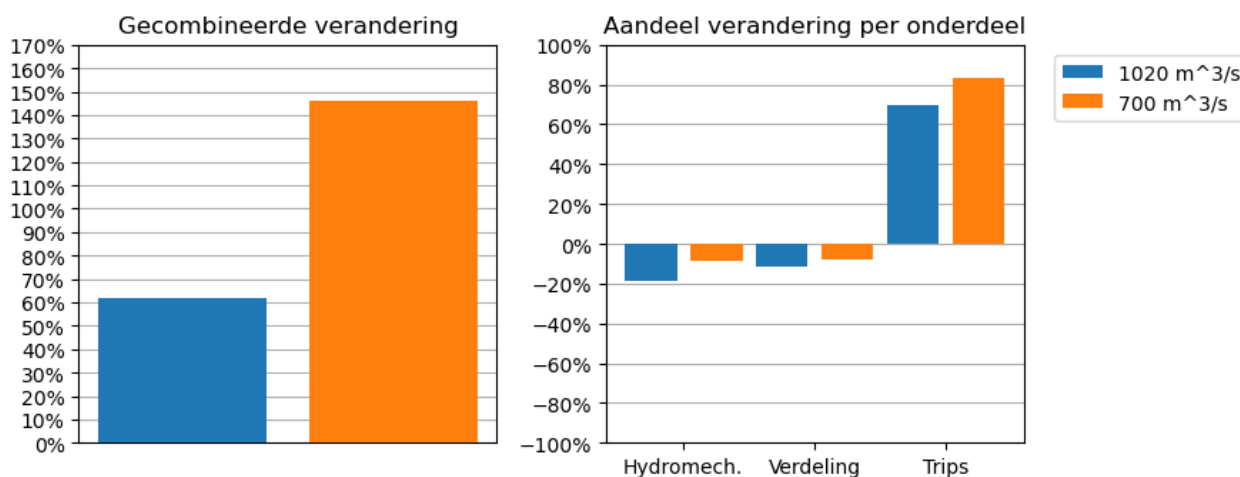
Figuur 21: Totale verandering (links) van CO<sub>2</sub>-emissie en de impact van hydromechanische en logistieke effecten (rechts) op de verandering, voor gehele vloot, stroomopwaarts (boven) en -afwaarts (onder).

In lijn met de observaties per reis geven de hydromechanische effecten in opvaart een dempend effect op de toename van CO<sub>2</sub> emissies. In de afvaart geldt dat zowel de hydromechanische effecten en die van herverdeling en reizen een redelijk vergelijkbare impact hebben op de toename van de emissie per ton lading.

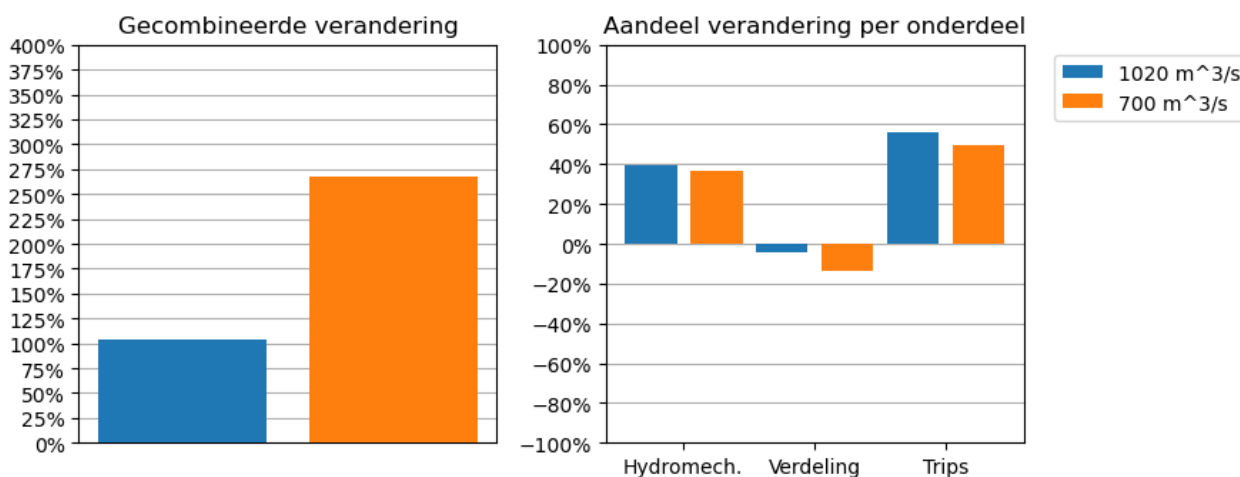
#### 4.2.2.4 Scenario gehele vloot exclusief lege vaart

De grote toename bij met name stroomafwaartse vaarrichting, zoals getoond in Figuur 21, wordt mede versterkt door het meenemen van lege vaart. In Figuur 22 zijn toenames van emissie per ton lading getoond voor alle lading soorten *exclusief* lege vaart. Opvaart laat hier toenames zien van 60% en 145% voor respectievelijk lage en extreem lage waterstand. Voor opvaart is de impact van lege vaart dus klein (bovenzijden Figuur 21 en Figuur 22 zijn vergelijkbaar). Voor afvaart laat Figuur 22 nu toenames van 100% en 270% zien: aanzienlijk kleiner dan de toenames in Figuur 21 voor afvaart. Figuur 11 liet een totale toename van brandstofverbruik en emissies zien van 225%, wanneer deze figuur gemaakt zou worden zónder lege vaart zou deze toename 170% zijn.

Verandering van CO<sub>2</sub> emissie door alle schepen bij 1020 en 700 m<sup>3</sup>/s alle ladingsoorten, alle klassen en stroomopwaarts



Verandering van CO<sub>2</sub> emissie door alle schepen bij 1020 en 700 m<sup>3</sup>/s alle ladingsoorten, alle klassen en stroomafwaarts



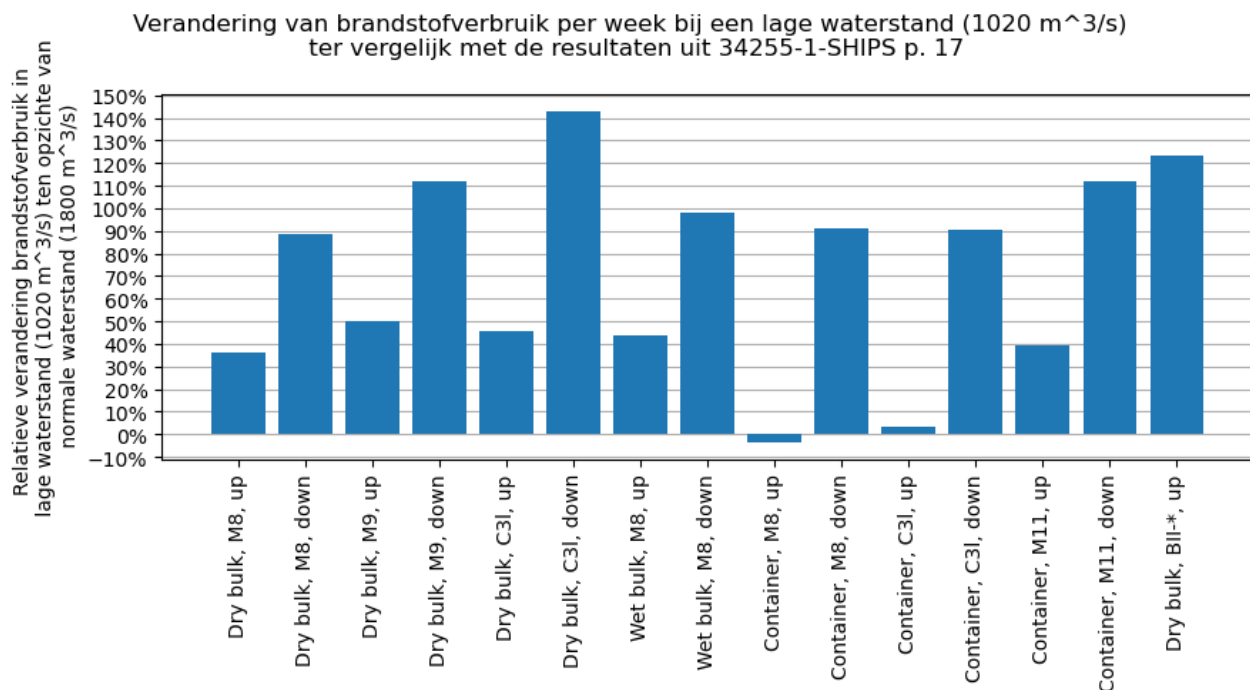
Figuur 22: Totale verandering (links) van CO<sub>2</sub>-emissie en de impact van hydromechanische en logistieke effecten (rechts) op de verandering, voor gehele vloot exclusief lege vaart, stroomopwaarts (boven) en -afwaarts (onder).

## 5 DISCUSSIE

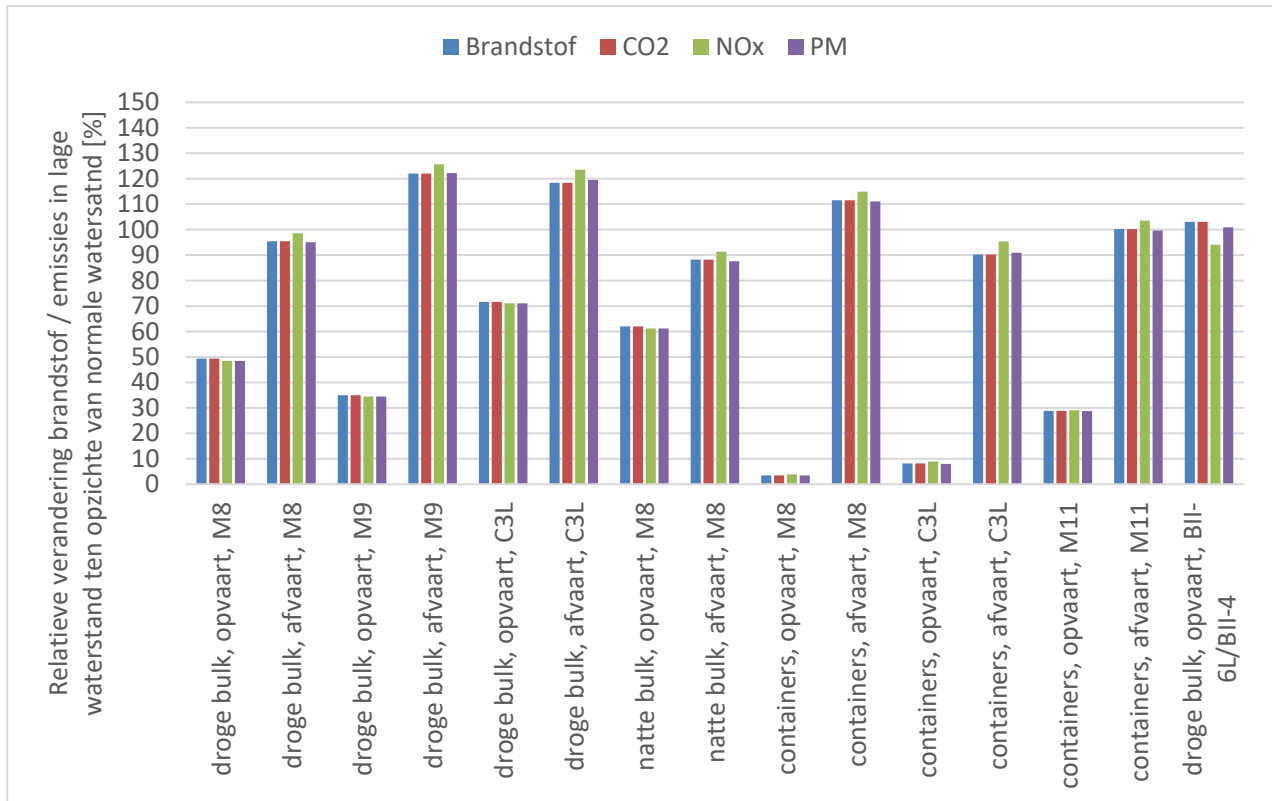
### 5.1 Vergelijking met het voorgaande onderzoek

In het voorgaande onderzoek, gerapporteerd in MARIN Rapport No. 34255-1-SHIPS, werd een toename van brandstofverbruik en emissies van circa 74% bepaald. Dit gold voor een debiet bij Lobith van  $1020 \text{ m}^3/\text{s}$  ten opzichte van een debiet van  $1800 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dit is hetzelfde lage debiet als gebruikt in het huidige onderzoek. In het huidige onderzoek wordt een toename, vlootbreed, van circa 95% bepaald voor de lage waterstand. Deze 95% toename bevat echter ook de gevolgen voor lege vaart, iets wat in het voorgaande onderzoek niet was opgenomen. Wanneer de huidige toename echter berekend wordt zónder lege vaart, geeft dit een toename (vlootbreed) van circa 68%. Dit ligt goed in lijn met de resultaten van het voorgaande onderzoek. De resterende afwijking kan het gevolg zijn van het meenemen van meer scheepstypen en de gebruikte data van scheepspassages, die ditmaal gebaseerd is op data uit 2018 in plaats van 2021. Daarbovenop zijn ook de weerstandscurves en voortstuwingsmodellen van verschillende scheepstypes bijgewerkt.

In Figuur 23 zijn de toenames van brandstofverbruik gepresenteerd voor dezelfde scenario's als gebruikt in het voorgaande onderzoek. Ter vergelijking is Figuur 12 uit rapport 34255-1-SHIPS toegevoegd. Dit laat zien dat de veranderingen globaal gezien goed overeen komen met het voorgaande onderzoek. In Figuur 23 is een negatieve verandering te zien voor opvarige containerschepen van klasse M8. In dit scenario is de waterdiepte kleiner maar is er ook minder stroom tegen. Voor dit specifieke scenario is het effect van minder stroom tegen sterker waardoor het brandstofverbruik en de uitstoot van emissies afneemt.



Figuur 23: Verandering van brandstofverbruik voor scenario's opgenomen in het voorgaande onderzoek



Figuur 24: Figuur 12 uit MARIN rapport no. 34255-1-SHIPS

## 5.2 Gevolgen en maatregelen bij zeer lage waterstand

Figuur 11 laat een ruime verdrievoudiging van emissies per vervoerde ton lading zien bij extreem lage waterstand. Dit zal de klimaatambities van de overheid en Rijkswaterstaat bemoeilijken. Tegelijkertijd laat de analyse van de effecten op de vlootbrede toenames zien dat 50 tot 80 procent van deze toename een gevolg is van de toename van het aantal reizen dat gemaakt moet worden. Dit laatste is een gevolg van de diepgangsbepering. In Figuur 9 is te zien dat deze diepgangsbepering het grootst is bij Nijmegen. Hier ligt een verharde bodem en het is daarmee een kunstmatige beperking, die mogelijk verholpen kan worden. Het vergroten van de haalbare diepgang zorgt voor minder reizen en zal de toename van emissies bij extreem laag water verzachten.

## 5.3 Kleinere schepen bij lage waterstand

Figuur 14 laat zien dat schepen van types M2, M3 en M6 efficiënt zijn. Er moet echter bedacht worden dat dit schepen zijn met een beperkt geïnstalleerd vermogen waardoor ze relatief langzaam varen. De uitstoot per ton lading wordt direct beperkt door dit kleine motorvermogen. Hierdoor lijken ze op het eerste gezicht efficiënt, maar de lage snelheid en geringe laadcapaciteit zullen dergelijke scheepstypen niet in staat zijn aan de vervoersvraag te voldoen.

In de huidige studie neemt het aantal reizen toe om met gelijke reistijd per reis het totale ladingvolume per week gelijk te houden ondanks de beperkte diepgang van schepen. In de praktijk kan het aantal reizen maar beperkt toenemen. Mogelijk kunnen delen van de Nederlandse vloot ingezet worden op kritische corridors of kunnen meer schepen gebouwd worden die als backup klaarliggen voor laagwaterperiodes. Wellicht is een nieuw soort grote laagwaterschepen een optie. Maar wanneer de volledige vloot benut wordt is er maar één optie om het ladingvolume gelijk te houden: harder varen. Dit zal de toename van emissies en brandstofverbruik nog verder versterken. Daarnaast is het voor kleinere scheepstypes waarschijnlijk niet mogelijk – vanwege beperkt motorvermogen maar ook door hydromechanische beperkingen op snelheid vanwege de korte lengte – om hogere snelheden te varen.



Bovenstaande geeft dus aan dat hoewel sommige gegevens het idee geven dat kleinere schepen een oplossing zijn bij laag water, hier in de praktijk belangrijke beperkingen aan zullen zitten. Overigens geldt wel dat er corridors kunnen bestaan waar kleinere schepen een belangrijkere rol spelen in het ladingvolume. Dit zullen corridors zijn waar ook bij normale waterstand geen grote schepen (groter dan klasse 5) kunnen varen, of waar al snel beperkingen ingevoerd (moeten) worden bij lagere waterstanden. Dit zijn bijvoorbeeld de IJssel of de Maas.

#### **5.4 Gelijkblijvend ladingvolume per week - vertrekpunt van de studie**

Bovenstaande stelt ook het vertrekpunt van de studie ter discussie. Het vertrekpunt in de huidige studie is een gelijkblijvend ladingvolume per week. Om daaraan te voldoen neemt het aantal reizen toe ter compensatie van beperkte laadcapaciteit door kleinere diepgang. Hierboven wordt al benoemd dat het aantal reizen in de praktijk niet oneindig toe kan nemen.

Een alternatieve aanpak kan zijn om sneller varen mee te nemen in de simulaties, en dit te combineren met een toename van het aantal reizen. Door sneller te varen wordt de round-reis tijd namelijk gereduceerd en kan het aantal reizen dus inderdaad toenemen. Wel moet bedacht worden dat de vaartijd slechts een deel van de totale round-reis tijd is: het laden en lossen, net als het aan- en afmeren kost ook tijd. Door sneller varen mee te nemen in de studie zal het resultaat van de studie waarschijnlijk zijn dat de emissies nóg verder toenemen.

Een alternatieve onderzoeksrichting is het opnemen van de modal shift. Vervoer over spoor of over de weg kan toenemen indien er voldoende capaciteit beschikbaar is. In situaties met extreem laag water stijgen brandstofverbruik en emissies per ton lading voor binnenvaartschepen, mogelijk tot niveaus dat het vervoer over spoor of weg per ton lading efficiënter zou kunnen zijn. Dit is niet onderzocht in deze studie, maar het meenemen van een modal shift kan betekenen dat de totale toename van emissies (en ook emissies per ton lading) kleiner is dan in deze studie gepresenteerd werd.

De door RWS aangeleverd data laat zien dat er bij laag water, en bij extreem laag water, minder vervoerd wordt. Naast een modal shift zou dit ook kunnen betekenen dat in periodes van normale (of hoge) waterstand juist meer vervoerd wordt om voorraden op te bouwen of juist aan te vullen. In plaats van een modal shift vindt daarmee dus een uitstel of herplanning van transport plaats.



## 6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

In dit onderzoek is met behulp van reissimulaties een verkenning gedaan naar de toename van brandstofverbruik en emissies bij lage waterstand (debiet 1020 m<sup>3</sup>/s) en extreem lage waterstand (debiet 700 m<sup>3</sup>/s) ten opzichte van een normale waterstand (debiet 1800 m<sup>3</sup>/s) op de corridor Rotterdam-Duisburg. 189 verschillende scenario's zijn onderzocht, waarbij elk scenario een combinatie is van waterstand, ladingtype, scheepsklasse en vaarrichting. Daarnaast is onderzocht hoe de toename van brandstofverbruik in verschillende (combinaties van) scenario's verdeeld is tussen hydromechanische en logistieke effecten. In dit hoofdstuk worden de belangrijkste conclusies en aanbevelingen samengevat.

### 6.1 Conclusies

Wanneer gevaren wordt met gelijke reistijd in de verschillende waterstanden wordt gevonden:

- Dat de totale emissies en het brandstofverbruik per week, gecombineerd over alle geanalyseerde scenario's, toenemen met 95% bij lage waterstand en 225% bij extreem lage waterstand.
- Dat de impact van lagere waterstand vrijwel gelijk is voor brandstofverbruik en de verschillende emissies, mede door de kleine veranderingen van motorbelastingen tussen de bestudeerde waterstanden. Hierdoor is het voldoende om alleen naar emissies van bijvoorbeeld CO<sub>2</sub> te kijken en daarmee ook conclusies te trekken over andere emissies.
- Emissies en brandstofverbruik in afvarige scenario's nemen sterker toe dan in de opvarige scenario's doordat beide gevolgen van lage waterstand negatief doorwerken: minder stroom mee én minder waterdiepte. Deze effecten compenseren elkaar in opvarige condities: minder waterdiepte, maar ook minder stroom *tegen*. Zie bijlage III voor een illustratie.
- Het meenemen van lege vaart zorgt voor een versterking van de toename van brandstofverbruik en emissies bij lage en extreem lage waterstand. Door lege vaart mee te nemen in de analyse, stijgt de toename voor extreem lage waterstand van 170% naar 225%. Voor opvaart is de impact van lege vaart relatief klein: de toename van brandstofverbruik en emissies bij extreem lage waterstand verandert van 145% naar 155%. In afvaart verandert deze toename van 270% naar 375% door het meenemen van lege vaarten.
- Tussen normale en lage waterstand is de grootste toename van emissies en brandstofverbruik per ton lading te zien bij droge lading. Droogladingschepen varen bij normale waterstand doorgaans met maximale diepgang. Hierdoor is de diepgangsbepending bij lage waterstand direct merkbaar.
- Tussen normale en extreem lage waterstand is de grootste relatieve toename van emissies en brandstofverbruik te zien bij containervaart. Dit komt onder meer door het grote aandeel in ladingvolume dat scheepstypen M11 en M12 hebben in containervaart. Deze scheepstypen worden sterk beperkt in hun diepgang bij extreem lage waterstand, wat leidt tot een toename van brandstofverbruik en/of emissies.
- De opsplitsing van toenames van emissies en brandstofverbruik laat zien dat hydromechanische effecten in opvaart leiden tot een vermindering van uitstoot en verbruik, terwijl dit bij afvaart zorgt voor een verhoging ervan.
- Van de hydromechanische effecten, die spelen per reis, heeft stroming meestal het grootste effect. Het effect van waterdiepte is wat kleiner en is versterkend of dempend afhankelijk van de vaarrichting. Het effect van diepgang is het kleinst en hangt van het ladingtype af: containers ondervinden een beperkte afname van diepgang en daarmee is het effect van diepgang het kleinst voor containervervoer.
- De toename van het aantal reizen heeft de grootste invloed op brandstofverbruik en emissies. Dit wordt gevolgd door de hydromechanische effecten die de toename van verbruik en uitstoot dempen. Het herverdelen van lading heeft een wisselend effect.

## 6.2 Aanbevelingen

Het aantal reizen heeft de grootste invloed op de toename van brandstofverbruik en emissies. Het aantal reizen volgt uit de diepgangsbepanking. Deze diepgangsbepanking wordt op het Nederlandse deel van de corridor bepaald door de ondiepte bij Nijmegen. Een onderzoek in de richting van het vergroten van de maximale diepgang bij Nijmegen kan een indicatie geven over de mate waarin dit kan bijdragen aan het beperken van de toename van emissies bij lage en extreem lage waterstand. De mate waarin de toename van emissies gedempt wordt door de maatregel kan met behulp van reissimulaties worden onderzocht.

Het vertrekpunt van de studie is dat zelfs bij extreem laag water, de hoeveelheid lading die vervoerd wordt gelijk blijft per ladingtype en per vaarrichting. Echter is het de vraag of de binnenvaartvloot voldoende schepen van de juiste afmetingen telt om het aantal reizen te maken om deze hoeveelheid te vervoeren. Daarnaast is het de vraag of binnenvaart bij extreem lage waterstand nog wel de meest efficiënte keuze is. Een gedeeltelijke modal shift van binnenvaart naar spoorvervoer of wegvervoer zou wellicht kunnen leiden tot een netto lagere uitstoot per ton lading. Dit is niet onderzocht in de huidige studie.

De hierboven genoemde conclusies en aanbevelingen overstijgen geen van de bevindingen in de voorgaande hoofdstukken, tabellen en figuren. Met andere woorden: daar waar de conclusies en/of aanbevelingen de inhoud van het rapport tegenspreken of tegen lijken te spreken, is de inhoud van het rapport leidend.

Wageningen, februari 2024  
MARITIME RESEARCH INSTITUTE NETHERLANDS



Guilhem Gaillarde  
Manager Ships Department

**REFERENTIES**

- [1] Transitie naar emissieloze binnenvaart: analyse van scheepsprestaties en vaarbereik met reissimulaties. Analyse van scheepsprestaties en vaarbereik met reissimulaties. MARIN Report 31120-2-POW, september 2019
- [2] Optimalisatie inzet duwstellen ThyssenKrupp Veerhaven, Effect van variatie van diepgang en snelheid op transportkosten (november 2018), presentatie voor Telematica dag. (MARIN project 31019)
- [3] The effect of low water on loading capacity of inland ships, Cornelis van Dorsser e.a., 2020
- [4] Shi, W., Grimmelius, H.T., and Stapersma, D. Analysis of Ship Propulsion System Behaviour and the Impact on Fuel Consumption. International Shipbuilding Progress, vol. 57, no. 1-2, pp. 35-64, 2010
- [5] MEPC 75/7/15 – Reduction of GHG Emissions from ships – fourth IMO GHG Study 2020, Final report. July 2020.
- [6] Congbiao Sui, Peter de Vos, Douwe Stapersma, Klaas Visser and Yu Din (2020). Fuel consumption and emissions of ocean-going cargo ship with hybrid propulsion and different fuels over voyage. Journal of Marine Science and Engineering, volume 8, No. 588.
- [7] Passage van schepen Ernst Bolt, RWS, 2023
- [8] Richtlijnen Vaarwegen 2020, pp 26-27 RWS, 2020

## **APPENDIX I: RESULTATEN ALLE SIMULATIES**

Deze bijlage is beschikbaar gemaakt als apart document.

In dit document zijn de resultaten van 14 scenario's met geel gemarkeerd. Dit zijn de scenario's die zijn toegevoegd ondanks dat er geen waargenomen scheepspassages waren in door RWS aangeleverde data.

## APPENDIX II: OPDELING LOGISTIEKE EFFECTEN VERSCHILLENDE SCENARIOS

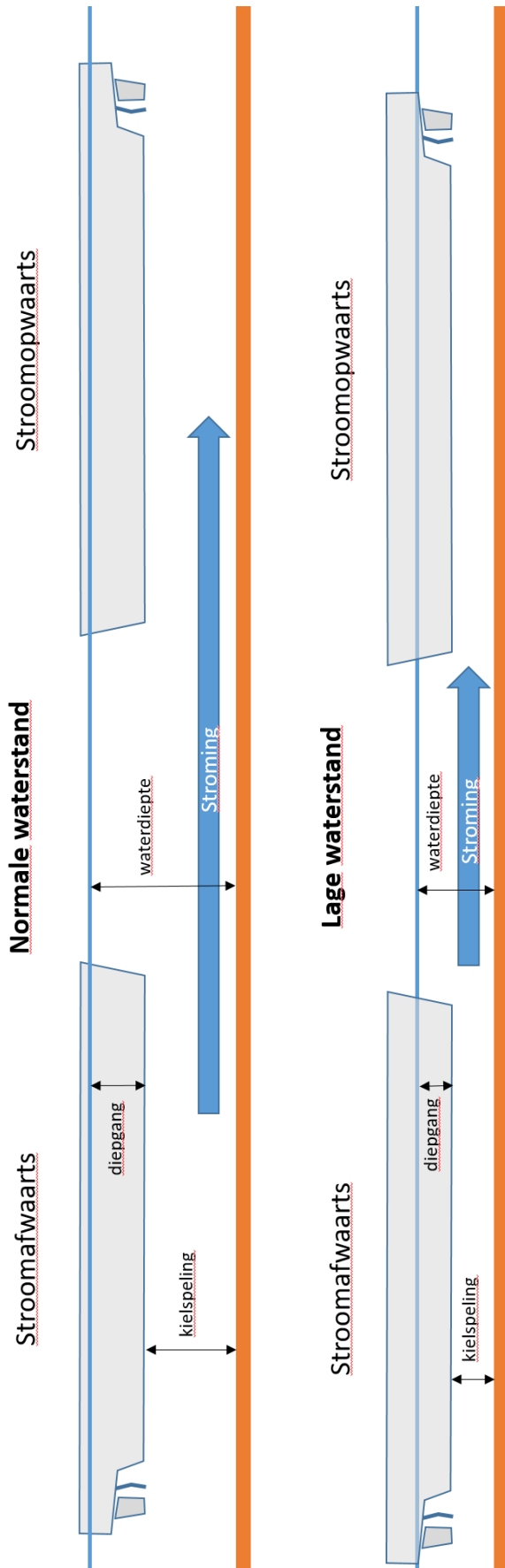
Deze bijlage is beschikbaar gemaakt als apart document.

Deze bijlage bevat voor alle combinaties van scheepstype, ladingtype en vaarrichting de toename van CO<sub>2</sub> emissies bij lage en extreem lage waterstand ten opzichte van normale waterstand. Dit wordt getoond conform de opdeling beschreven in sectie 4.2.

Voor de opdeling in effecten per scenario, dat wil zeggen de gevolgen van hydromechanische effecten, het herverdelen van lading en de toename van het aantal reizen zijn in sommige gevallen zeer grote stijgingen waar te nemen:

- Voor klasse BII-4 geldt bijvoorbeeld dat deze vrijwel niet toegepast worden bij normale waterstand, terwijl een groot deel van de lading uit BII-6L overgenomen wordt door BII-4 bij lage waterstand. Hierdoor is een zeer grote stijging van emissies te zien, maar ook kan de opsplitsing in effecten niet goed berekend worden, wat te zien is aan de grote negatieve bijdrage van 'verdeling'.
- Bovenstaande is ook te zien bij leegvaart. Bij normale waterstand varen duwschepen terug als een konvooi van type BII-6B, maar bij lagere waterstand is dit alleen type BII-4. Dit geeft specifiek voor BII-4 een zeer sterke toename.
- Voor C4 schepen geldt dat ze bij normale waterstand ook vrijwel niet gebruikt worden, terwijl ze veel lading van duwvaart overnemen bij extreem lage waterstand. Dit laat dan ook een emissietoename van 1200% zien.
- Voor M11 schepen geldt voor droge bulk hetzelfde als voor C4 schepen. Ook deze worden vrijwel niet gebruikt voor droge bulk bij normale waterstand, maar bij extreem lage waterstand worden ze wel ingezet voor dit ladingtype.

**APPENDIX III: GEVOLGEN VAN LAGERE WATERSTAND OP HET SCHIP**



*Bij lagere waterstand kleinere waterdiepte, minder stroming en kleinere diepgang*

Kleinere waterdiepte: meer weerstand  
Kleinere diepgang: minder weerstand  
Minder stroom mee: meer weerstand

Netto: groter brandstofverbruik per trip

Kleinere waterdiepte: meer weerstand  
Kleinere diepgang: minder weerstand  
Minder stroom tegen: minder weerstand









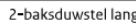

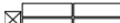
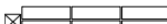

Netto: vergelijkbaar brandstofverbruik per trip

**Effecten**

**APPENDIX IV: OVERZICHT SCHEEPSKLASSEN EN AFMETINGEN**




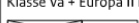



Bron referentie [8]: Richtlijnen Vaarwegen 2020

Tabel 8: Classificatie van de binnenvaartvloot, Rijkswaterstaat 2010

CEMT-Klasse	Motorvrachtschepen (Motorvessels)							Duwstellen (Barges)			
	RWS Klasse	Karakteristieken maatgevend schip**				Classificatie		RWS Klasse	Karakteristieken maatgevend duwstel**		
		Naam	Breedte	Lengte	Diepgang (geladen)	Laadvermogen	Breedte en lengte		Combinatie	Breedte	Lengte
			m	m	m	t	m			m	m
	M0	Overig				1-250	B ≤ 5,00 of L ≤ 38,00				
I	M1	Spits	5,05	38,5	2,5	251-400	B = 5,01-5,10 en L > 38,01	BO1		5,2	55
II	M2	Kempenaar	6,6	50-55	2,6	401-650	B = 5,11-6,70 en L > 38,01	BO2		6,6	60-70
III	M3	Hagenaar	7,2	55-70	2,6	651-800	B = 6,71-7,30 en L > 38,01	BO3		7,5	80
	M4	Dortmund Eems (L ≤ 74 m)	8,2	67-73	2,7	801-1050	B = 7,31-8,30 en L = 38,01-74,00	BO4		8,2	85
	M5	Verl. Dortmund Eems (L > 74 m)	8,2	80-85	2,7	1051-1250	B = 7,31-8,30 en L > 74,01				
IVa	M6	Rijn-Herne Schip (L ≤ 86 m)	9,5	80-85	2,9	1251-1750	B = 8,31-9,60 en L = 38,01-86,00	BI	Europa I duwstel 	9,5	85-105
	M7	Verl. Rijn-Herne (L > 86 m)	9,5	105	3,0	1751-2050	B = 8,31-9,60 en L > 86,01				
IVb											
Va	M8	Groot Rijnschip (L ≤ 111 m)	11,4	110	3,5	2051-3300	B = 9,61-11,50 en L = 38,01-111,00	BII-1	Europa II duwstel 	11,4	95-110
		Verlengd Groot Rijnschip (L > 111 m)	11,4	135	3,5	3301-4000	B = 9,61-11,50 en L > 111,01	BIIa-1	Europa IIa duwstel 	11,4	92-110
	BII-1	Europa II Lang 	11,4	125-135							
Vb								BII-2I	2-bakduwstel lang 	11,4	170-190
VIa	M10	Maatg. Schip 13,5 * 110 m	13,50	110	4,0	4001-4300	B = 11,51-14,30 en L = 38,01-111,00	BII-2b	2-bakduwstel breed 	22,8	95-145
	M11	Maatg. Schip 14,2 * 135 m	14,20	135	4,0	4301-5600	B = 11,51-14,30 en L > 111,01				
	M12	Rijnmax Schip	17,0	135	4,0	>= 5601	B >= 14,31 en L >= 38,01				
VIb								BII-4	4-bakduwstel (incl. 3-baks lang) 	22,8	185-195
VIc								BII-6I	6-bakduwstel lang  (incl. 5-baks lang)	22,8	270
VIc								BII-6b	6-bakduwstel breed  (incl. 5-baks breed)	34,2	195

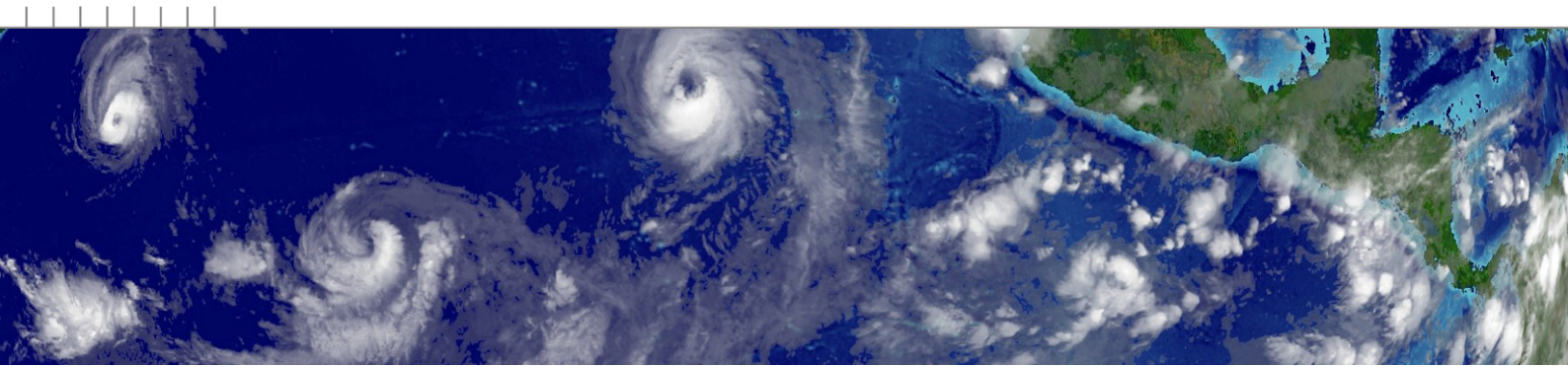
\* Bij de klassen I, IV, V en hoger zijn de doorvaarthoogtes aangepast voor 2 respectievelijk 3 en 4-laags containervaart. (doorvaarthoogte t.o.v. MHWS)

\*\* De karakteristieken van het maatgevend schip hebben in de lengte een marge van ± 1 meter en in de breedte van ± 10 cm

Duwstellen (Barges)			Koppverbanden (Convoys)						Doorvaarthoogte*	
Classificatie			RWS Klasse	Karakteristieken maatgevend koppverband**			Classificatie		incl. 30 cm schrikhoogte	
Diepgang (geladen)	Laadvermogen	Breedte en lengte		Combinatie	Breedte	Lengte	Diepgang (geladen)	Laadvermogen		Breedte en lengte
m	t	m		m	m	m	t	m	m	
1,9	0-400	B<=5,20 en L=alle	C11 C1b	2 spitsen lang  2 spitsen breed 	5,05 10,1	77-80 38,5	2,5 2,5	<= 900 <= 900	B<= 5,1 en L=alle B=9,61-12,60 en L<= 80,00	5,25* 5,25*
2,6	401-600	B=5,21-6,70 en L=alle								6,1
2,6	601-800	B=6,71-7,60 en L=alle								6,4
2,7	801-1250	B=7,61-8,40 en L=alle								6,6 6,4
3,0	1251-1800	B=8,41-9,60 en L=alle								7,0* 7,0*
			C21	Klasse IV + Europa II lang 	9,5	170-185	3,0	901-3350	B=5,11-9,60 en L=alle	7,0*
3,5	1801-2450	B=9,61-15,10 en L<=111,00								9,1*
4,0	2451-3200	B=9,61-15,10 en L<=111,00								9,1*
4,0	3201-3950	B=9,61-15,10 en L=111,01-146,00								9,1*
3,5-4,0	3951-7050	B=9,61-15,10 en L>=146,01	C31	Klasse Va + Europa II lang 	11,4	170-190	3,5-4,0	3351-7250	B=9,61-12,60 en L>=80,01	9,1*
3,5-4,0	3951-7050	B=15,11-24,00 en L<=146,00	C2b	Klasse IV + Europa I breed 	19,0	85-105	3,0	901-3350	B=12,61-19,10 en L<=136,00	7,0* alleen voor klasse IV koppverband
			C3b	Klasse Va + Europa II breed 	22,8	95-110	3,5-4,0	3351-7250	B>19,10 en L<=136	9,1*
3,5-4,0	7051-12000 (7051-9000)	B=15,11-24,00 en L=146,01-200	C4	Klasse Va + 3 Europa II 	22,8	185	3,5-4,0	>=7251	B>12,60 en L>=136,01	9,1*
3,5-4,0	12001-18000 (12001-15000)	B=15,11-24,00 en L>=200,01								9,1*
3,5-4,0	12001-18000 (12001-15000)	B>=24,01 en L=alle								9,1*

- Opm:
- 1: Een maatgevend schip is een schip waarvan de afmetingen bepalend zijn voor de dimensionering van de vaarweg en de kunstwerken daarin.
  - 2: Bij nieuwbouw of vaarwegverruiming wordt uitgegaan van het grootste maatgevende schip binnen een CEMT-klasse.
  - 3: Klasse M3, M4, M6, M8, M10 en M11 mag alleen worden toegepast bij renovatie van bestaande vaarwegen, sluisen en bruggen.
  - 4: De kleinste afmetingen van een maatgevend schip vormen de ondergrens om een vaarweg in een bepaalde gestandaardiseerde klasse in te delen.



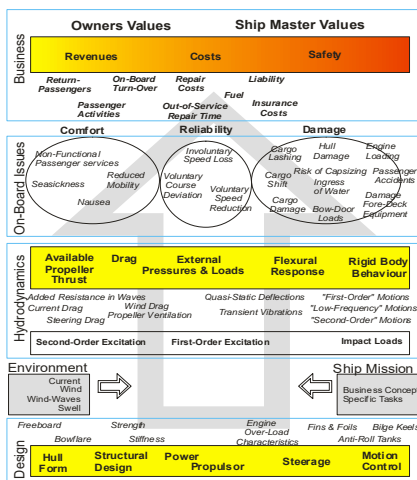


# GULLIVER

Ship route scenario simulations

MARIN internal use only

At MARIN the program GULLIVER is available for so-called ship route scenario simulations. It simulates the operation of a ship on a fixed route over a long period. The basic elements are the ship's calm water and seakeeping characteristics, the environment (wind, waves, current) and an operational scenario representing the captain's reaction to actual and predicted conditions.



## Backgrounds and motivation

A well-balanced design for service leads to a competitive edge for both the ship builder and the ship owner. A problem with this balance is the complexity of the performance assessment.

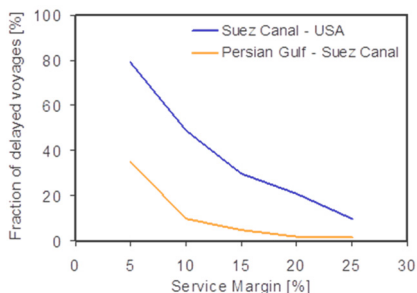
This should encompass a complete description of:

- The hydrodynamic characteristics of a design
- The environmental conditions on the route
- A scenario for the captain's reaction to the encountered conditions

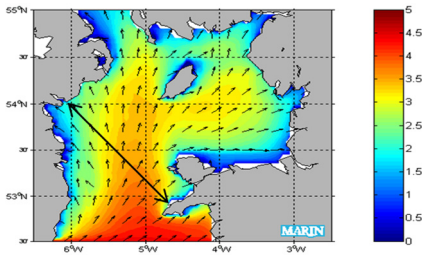
For a long time the lack of a practical evaluation tool for this mixture of complex issues (see figure above) and lack of insight into the impact of seakeeping on the in-service economy have been major obstacles in design for service. This situation changed with the introduction of improved numerical models for ship hydrodynamics and wind-wave interaction, fast computer facilities and advanced programming techniques. Combination of these developments in the GULLIVER software facilitates simulation of ship performance in unprecedented detail over a long period of service.

The application of GULLIVER is not limited to detailed performance assessments of new designs. A careful reproduction of existing ship and fleet performance yields valuable insight into the impact of seakeeping on shipping economy.

Weather impact on a ship's earning capacity



Risk on delay as function of service margin and route



Significant wave height and direction on Irish Sea

### Application

GULLIVER has been used in a wide variety of projects, for example:

- Service reliability and comfort study for a large cruise vessel
- Service margin study for an LNG carrier
- Safety study for a sea-river ship
- Comfort study for a passenger ferry

For more information contact MARIN:

SOSC

T +31 317 49 32 37

E [sosc@marin.nl](mailto:sosc@marin.nl)

## Time domain approach

A practical way around the problems and limitations of a statistical approach is based on a deterministic step-wise simulation of a given “mission”. The use of hind cast data as input for wind and waves solves the problem of accounting for the right coherence between wind and waves and the varying spectral characteristics of the waves. Such a time domain approach accounts for the persistence of adverse weather and the reaction of the master on past and future ship behaviour.

## Environmental conditions

Within GULLIVER, wave and wind parameters on open ocean routes are available from various sources and comprise wind sea and swell parameters and the wind speed. The complete wave spectrum is reconstructed from these parameters by adding assumptions on the spectral shape and the directional spreading. Waves in the coastal zone can be represented by two-dimensional wave spectra at arbitrary time steps. The figure below shows a typical example: the wave field on the Irish Sea driven by the local wind and swell from the south. Ocean and tidal currents are obtained from multi-parameter models.

## Scenario

A common way to characterise the motion characteristics is based on the use of linear and quadratic transfer functions. The transfer functions are stored in a RAO-database, containing the rigid body motions and the relative water motion, local accelerations, shear forces and bending moments.

The involuntary speed loss is obtained by comparing the total resistance, from calm water, wind and waves, with the available thrust. In GULLIVER, four different engine settings are available; constant power, constant torque, constant RPM and a controllable pitch propeller (CPP) setting.

Commonly used operational scenarios are “just in time”, “constant power”, “constant speed” and scenarios related to comfort and/or safety.

## Output

GULLIVER generates long term statistics for virtually any quantity:

- Environmental parameters, e.g. significant wave height, wind speed, current speed
- Ship behaviour, e.g. (relative) motions, local accelerations, bending moments, green water and slamming
- Trip duration, sustained speed and voluntary speed reduction
- Engine load, fuel consumption
- Crew and passenger comfort e.g. MIR, VDV, MSI and MII

Output is generated in the form of animations, time traces, (polar) histograms, probability of exceedance diagrams and tabulated form. Scatter diagrams of all environmental parameters can be generated as well.

MARIN  
P.O. Box 28

6700 AA Wageningen  
The Netherlands

T +31 317 49 39 11  
E [info@marin.nl](mailto:info@marin.nl)

I [www.marin.nl](http://www.marin.nl)  
   