



BETTER SHIPS, BLUE OCEANS

Vervolgstappen validatie methodieken t.b.v. transitie naar emissieloze scheepvaart

Referentie schepen en hun missie profiel en stand der techniek van alternatieve energiedragers en -omzetters

Rapport nr. : 32360-2-SHIPS
Datum : December 2020
Versie : 1.1
Eindrapport

Vervolgstappen validatie methodieken t.b.v. transitie naar emissieloze scheepvaart

Referentie schepen en hun missie profiel en stand der techniek van alternatieve energiedragers en -omzetters

Opdrachtgever : Ministerie van I&W
Dir. Maritieme Zaken
Afd. Binnenvaart en Vaarwegen
J.C.M. van Gent
Rijnstraat 8
Den Haag
Postbus 20904
2500 EX Den Haag

Gerapporteerd door : Cemil Bekdemir (TNO), Jorrit Harmsen (TNO) en
Christian Veldhuis (MARIN)
Gecontroleerd door : Ruud Verbeek (TNO) Moritz Krijgsman (MARIN)

Versie	Datum	Status	Gecontroleerd door
0.7	December 2020	Draft	Ruud Verbeek (TNO) Moritz Krijgsman (MARIN)
1.1	December 2020	Final	

INHOUD**PAGINA**

1	INTRODUCTIE.....	1
1.1	Doel van de studie	1
1.2	Werkzaamheden binnen de studie	2
1.3	Leeswijzer	2
2	TAAK 1: SCHEEPSTYPEN, MISSIEPROFIELEN EN EMISSIES	3
2.1	Scheepstypen	3
2.1.1	De meest vervuilende schepen in de wereldvloot	3
2.1.2	De meest aanwezige schepen uit de Nederlandse vloot	5
2.1.3	Meest herkenbare schepen voor de Nederlandse maakindustrie	5
2.2	Missieprofielen.....	6
2.3	Emissies	14
3	TAAK 2: STAND DER TECHNIEK ENERGIEDRAGERS EN -OMZETTERS	17
3.1	Onderzochte energiedragers en -omzetters en hun ‘volwassenheid’	17
3.2	Verwacht effect op CO ₂ -emissies.....	19
3.3	Verwacht effect op luchtverontreinigende emissies	20
3.4	Verwacht effect op investeringskosten.....	22
3.5	Verwacht effect op operationele kosten	22
3.6	Aansluiting bij resultaten NMT studie	23
4	CONCLUSIES EN VERVOLGSTAPPEN	24
	REFERENTIES.....	27

1 INTRODUCTIE

Met de op 19 juli 2019 gepubliceerde Green Deal Zeevaart, Binnenvaart en Havens is de invulling van het regeerakkoord van het kabinet Rutte III van 10 oktober 2019 verder vorm gegeven.

Binnen de Green Deal is er budget beschikbaar gesteld voor de periode 2020-2024 (max 1ME per jaar) waarmee de maritieme sector een breed scala aan duurzame maritieme oplossingen kan valideren. Aldus beschreven in de Green Deal CS203 Artikel 19, lid 8: "I&W is bereid om binnen de relevante wettelijke kaders en in overeenstemming met de toepasselijke mededingingsregels een financiële bijdrage van maximaal €1 miljoen per jaar gedurende de looptijd van de Green Deal voor de in artikel 23, vierde lid, genoemde beoordeling en validatie van technieken beschikbaar te stellen."

Om tot een correcte evaluatie en onderlinge waardering van de voorgestelde oplossingen te komen, hebben MARIN en TNO voor de beoordeling een inventarisatie opgesteld van bestaande validatiemethodieken, hun toepassingsgebied en nog benodigde vervolgstappen voor aanwezige blinde vlekken. Dit is gerapporteerd in TNO-MARIN rapport TNO 2019 R12156 (MARIN rapport 32360-1-SHIPS, [Ref 7.]).

In een vervolgstudie, waarvan het huidige rapport het resultaat is, is er gekeken naar twee taken:

1. Het bepalen van referentie schepen, hun missieprofiel en daarbij behorende emissies^{*)}, om de impact van de emissiereductietechnieken^{**)} te kunnen bepalen.
2. Het bepalen van de hoofdthema's voor emissie reductie op basis van alternatieve energiedragers en -omzetters en de bijbehorende stand der techniek.

In dit rapport worden de resultaten gerapporteerd. Naast het werk van TNO en MARIN heeft er gedurende deze periode een aantal werksessies met het ministerie I&W, RVO, NMT, KVNR, TNO en MARIN, hierna de *betrokken partijen* genoemd, plaatsgevonden. De uitkomsten daarvan zijn waar mogelijk verwerkt in dit rapport.

^{*)} met emissies worden, zoals eerder in de Green Deal Validatie bepaald door de betrokken partijen, bedoeld vervuilende stoffen (polutants) en broeikasgassen (GHG's). De nadruk ligt op broeikasgassen.

^{**)} onder emissiereductietechnieken wordt o.a. verstaan, alternatieve energiedragers en –omzetters, wind assisted propulsion, route optimalisatie, weerstandsvermindering. Meer voorbeelden zijn te vinden in [Ref 7.]. Bij alternatieve energiedrager en –omzetters dient te worden opgemerkt het toepassen hiervan grote gevolgen kan hebben voor de verdere vermogensdistributie in het schip. Een andere vermogensoutput, bijvoorbeeld elektrisch vermogen uit een brandstofcel in plaats van mechanisch vermogen uit een verbrandingsmotor zorgt voor een volledig andere machinekamer architectuur. Bij het beoordelen en valideren van deze technieken moet deze impact op het schip in ogenschouw genomen worden. Dat zal gedurende de Green Deal validatie gedaan worden in de verschillende validatie casussen waar mogelijk.

1.1 Doel van de studie

Taak 1

De impact van emissiereductietechnieken is zeer sterk afhankelijk van de inzetbaarheid/geschiktheid van de techniek voor verschillende scheepstypen (bijv. containervaart, baggervaart, visserij, etc.). Het doel van deze taak is om te komen tot een representatieve lijst van scheepstypen en hun globale missie profiel om hiermee de emissie uitstoot van de referentie te bepalen. Dit maakt concreet waarop de emissiereductietechnieken worden toegepast en maakt het mogelijk om voor elk te valideren emissiereductietechniek de emissiereductie t.o.v. deze referentie te bepalen (de 'lat' te leggen).

De missieprofielen bepaald in deze taak zijn globaal van aard en gaan primair over de vermogensvraag van de systemen per typische operationele conditie (denk hierbij aan transit, manoeuvreren, liggen in de haven, dynamic positioning, baggeren, ...) en welk deel van de tijd op deze condities gevaren wordt. De missieprofielen zijn dus nog niet specifiek gemaakt en geven bijvoorbeeld nog geen inzicht in de details van de vermogensvariaties op de tijdsschaal van uren en seconden. Afhankelijk van de te valideren emissiereductie techniek later in de Green Deal Validatieregeling zal verschillende diepgang aangebracht moet worden. Wind assist als emissiereductietechniek vereist vaargebieden (routes) en windcondities, alternatieve brandstoffen en energieomzetters vragen om detaillering in de vermogensvraag. Dat zal verder uit gewerkt moeten worden als een specifieke validatiecase daarom vraagt. Het missieprofiel uit deze taak zal een representatief missieprofiel zijn voor het scheepstype, maar zeker niet alles afdekkend. Er zullen altijd schepen zijn die 'anders' opereren.

Taak 2

Op basis van een inventarisatie van NMT onder maritieme stakeholders (zie [Ref 6.]) is een overzicht gemaakt van de verschillende emissiereductie maatregelen. In overleg met de betrokken partijen is er voor gekozen dat TNO zich in deze taak richt op een overzicht van de stand der techniek specifiek voor alternatieve energiedragers en -omzetters. Dit gebeurt op basis van een literatuuranalyse. In de analyse is de technologische rijpheid, de verwachte bijdrage aan emissiereductie en de kostenontwikkeling van verschillende opties meegenomen. Gedurende de Green Deal zal dit overzicht worden aangepast met de stand der techniek van andere emissiereductie technieken en aangevuld met resultaten uit de Green Deal validatie casussen.

1.2 Werkzaamheden binnen de studie

De werkzaamheden in de studie zijn als volgt onder te verdelen:

- Taak1:
 - o Vaststellen scheepstypen op basis van literatuur en door betrokken partijen aangedragen informatie.
 - o Vaststellen missie profielen
 - o Vaststellen huidige emissies per scheepstype op basis van de missieprofielen.
- Taak 2: Vaststellen stand der technieken voor alternatieve energiedragers en -omzetters.

1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 zal ingegaan worden op taak 1: scheepstypen, missieprofielen en emissies. Hoofdstuk 3 beschrijft taak 3: overzicht van de stand der techniek van de alternatieve energiedragers en -omzetters. In hoofdstuk 4 worden de conclusies en vervolgstappen besproken.

Tabel 1-1: De rapporten binnen project 32360

Rapport nr.	Bevat	Datum
32360-1-SHIPS (TNO rapport nummer TNO 2019 R12156)	Rapportage Validatie methodieken	December 2019

2 TAAK 1: SCHEEPSTYPEN, MISSIEPROFIELEN EN EMISSIES

2.1 Scheepstypen

Na overleg met de betrokken partijen is ervoor gekozen de scheepstypen te kiezen op basis van drie richtlijnen:

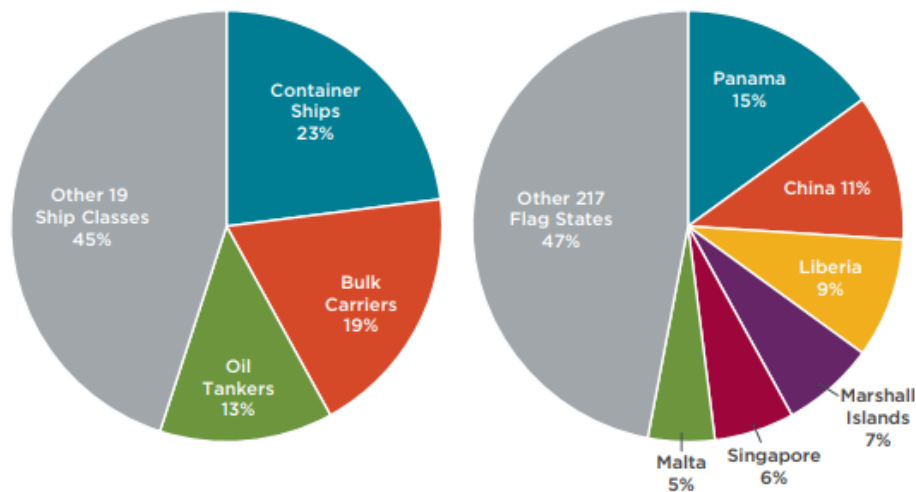
1. De drie grootste vervuilers in de wereldvloot.
2. De drie meest aanwezige schepen in de Nederlandse vloot (database KVNR).
3. Bovenstaande moet voor de NL maakindustrie resulteren in voldoende herkenning.

De wereldvlootschepen zijn goed om mee te nemen in validatiecasussen. Echter, de focus moet liggen op scheepstypen die belangrijk zijn voor de Nederlandse markt.

Hieronder volgen per set van drie de overwegingen.

2.1.1 De meest vervuilende schepen in de wereldvloot

Op dit vlak is veel online literatuur beschikbaar. Een selectie, gericht op broeikasgassen is getoond in Figuur 2-1 en Tabel 2-1.



Figuur 2-1: CO₂ emissie deel per scheepstype (links) en per land (rechts). Bron [Ref 1.]

Op basis van deze gegevens zijn de volgende schepen gekozen als referentie schepen uit de wereldvloot:

1. Handymax bulker.
2. Post Panamax container.
3. VLCC tanker.

Dit is overeenkomstig met de veel gebruikte term de “Drie grote vervuilers” en bevestigt wat reeds bekend was.

Tabel 2-1: Emissie statistieken per scheepstypen en grootte. Rode cirkels markeren de grootste bijdragen per scheepstype. Bron [Ref 2.]

Typical Vessel types and sizes per vessel segment	Number of vessels in size group	Average Ship					Total CO ₂ yr (tonnes)	Total bunkers, YR	Total tonne-kms, yr	gr CO ₂ PER TONNE-KM	per size bracket		
		Payload	Speed	Sea days %	Port days %	cargo capacity utilization at sea					total CO ₂ per size bracket (million)	% of total	Total billion MT-km per size bracket
Small Vessels 0-5'	517	1,937	12	70	30	60%	4,717	1,488.00	139,158,763	33.9	2.44	1.60	72
Coastal 5-15'	236	9,895	12	70	30	60%	10,641	3,356.80	710,876,741	15.0	2.51	1.70	168
Handysize 15'-35'	1774	24,876	14	70	30	60%	18,513	5,840.00	2,084,935,872	8.9	32.84	21.70	3,699
Handymax 35'-60'	1732	43,522	14	70	30	60%	22,804	7,193.60	3,647,781,825	6.3	39.50	26.20	6,318
Panamax 60'-85'	1383	68,469	14	70	30	60%	27,095	8,547.20	5,738,689,444	4.7	37.47	24.80	7,937
Post-Panamax 85'-120'	98	87,129	14	80	20	60%	37,066	11,692.80	8,345,885,855	4.4	3.63	2.40	818
Capesize >120'	722	160,425	15	80	20	60%	45,202	14,259.20	16,464,276,593	2.7	32.64	21.60	11,887
Total Dry Bulk	6462						166,037		37,131,605,092	4.5	151.03		30,898
Feeder (0-500)	363	5,169	13	70	30	70%	14,810	4,672.00	469,332,853	31.6	5.38	2.00	170
Feedermax (500-1000)	757	9,873	16.5	70	30	70%	22,773	7,184.00	1,137,846,685	20.0	17.24	6.40	861
Handysize (1000-2000)	1,143	19,515	20	70	30	70%	37,279	11,760.00	2,726,036,069	13.7	42.61	15.80	3,116
Sub-Panamax (2000-3000)	689	34,088	20	70	30	70%	58,328	18,400.00	4,761,738,206	12.2	40.19	14.90	3,281
Panamax (3000-4400)	568	47,907	21	70	30	70%	94,502	29,811.20	8,030,486,625	11.8	53.68	19.90	4,561
Post Panamax(>4400 TEU)	712	75,190	24	70	30	70%	155,000	48,896.00	14,404,444,807	10.8	110.36	41.00	10,256
Total Container	4,232						382,693		31,529,885,245	12.1	269.45		22,246
Small tanker (0-10)	115	3,159	12	80	20	50%	6,289	1,984.00	216,120,361	29.1	0.72	0.70	25
Handysize (10-60)	240	37,841	14.5	80	20	50%	32,664	10,304.00	3,128,483,055	10.4	7.84	7.40	751
Panamax (60-80)	177	64,838	15	80	20	50%	36,113	11,392.00	5,545,193,472	6.5	6.39	6.00	981
Aframax (80-120)	648	97,921	14.7	80	20	50%	46,460	14,656.00	8,207,170,707	5.7	30.11	28.30	5,318
Suezmax (120-200)	332	146,099	15	80	20	50%	51,329	16,192.00	12,495,006,794	4.1	17.04	16.00	4,148
VLCC/ULCC (>200)	516	279,208	15	80	20	50%	85,615	27,008.00	23,879,106,183	3.6	44.18	41.60	12,322
Total Crude oil	2,028						258,469		53,471,080,573	5	106.00		23,545
LNG (0-50)	29	23,588	17	80	20	50%	52,167	16,456.50	1,902,263,069	27.4	1.51	7.60	55
LNG (>50)	221	71,099	19	80	20	50%	83,400	26,309.00	6,408,488,501	13.0	18.43	92.40	1,416
Total LNG	250						135,567		8,310,751,570	16.3	19.94		1,471
LPG (0-5)	651	2,012	13	80	20	50%	6,137	1,936.00	130,496,886	47.0	4.00	26.80	85
LPG (5-20)	235	9,069	15	80	20	50%	17,093	5,392.00	678,646,370	25.2	4.02	26.90	159
LPG 20-40	68	25,764	16	80	20	50%	29,194	9,209.60	2,056,555,856	14.2	1.99	13.30	140
LPG (>40)	135	48,904	17	80	20	50%	36,356	11,468.80	4,147,643,575	8.8	4.91	32.90	560
Total LPG	1,089						88,780		7,013,342,687	12.7	14.91		944

2.1.2 De meest aanwezige schepen uit de Nederlandse vloot

In overleg met de betrokkenen is gekozen om te kijken naar het aantal schepen in de vloot, niet naar de scheepsgrootte of de grootste bijdrage aan de uitstoot. Het argument hierbij is dat de energietransitie, die mede door de Green Deal versneld moet gaan worden, baat heeft bij veel schone eindgebruikers. Hiermee kunnen emissietechnieken veelvuldig ingezet worden, kan de techniek sneller vervolmaakt worden en wordt er een breed draagvlak in de sector gecreëerd.

De KVNVR heeft haar schepen database gedeeld (zie Tabel 2-2).

Tabel 2-2: KVNVR Schepen database. Links: absolute aantallen, rechts: percentages t.o.v. totaal aantal schepen. Rood omcirkeld de drie meest bijdragende scheepstypen.

	< 500 GT		< 5000 GT		< 20000 GT		> 20000 GT			<500 GT	<5000GT	<20000GT	>20000GT		
	Small		Medium		Large		Very Large			Percentage: number of ships in a cat / total number of ships					
	#	%	#	%	#	%	#	%	Total	%	%	%	%	%	w.r.t. total fleet #
General Cargo/Multipurpose	1	0.68	290	64.88	200	52.91	1	1.04	492	0%	27%	19%	0%	46%	
Refrigerated Cargo			5	1.12	40	10.58			45	0%	0%	4%	0%	4%	
Heavy Load					20	5.29			20	0%	0%	2%	0%	2%	
Container			12	2.68	32	8.47	12	12.50	56	0%	1%	3%	1%	5%	
Ro-Ro Cargo					3	0.79	10	10.42	13	0%	0%	0%	1%	1%	
Bulk Carrier					5	1.32	38	39.58	43	0%	0%	0%	4%	4%	
Oil Tanker			4	0.89	6	1.59	2	2.08	12	0%	0%	1%	0%	1%	
Chemical Tanker			30	6.71	20	5.29			50	0%	3%	2%	0%	5%	
Gas Carrier			13	2.91	21	5.56	1	1.04	35	0%	1%	2%	0%	3%	
Passenger Ship			2	0.45	1	0.26	14	14.58	17	0%	0%	0%	1%	2%	
Ro-Ro Passenger Ship					1	0.26	6	6.25	7	0%	0%	0%	1%	1%	
Offshore Supply	42	28.57	28	6.26	7	1.85			77	4%	3%	1%	0%	7%	
Special Purpose Ship			2	0.45	2	0.53	2	2.08	6	0%	0%	0%	0%	1%	
Tug	33	49.66	12	2.68	4	1.06			89	7%	1%	0%	0%	8%	
Other Special Activities	31	21.09	47	10.51	12	3.17	7	7.29	97	3%	4%	1%	1%	9%	
Other			2	0.45	4	1.06	3	3.13	9	0%	0%	0%	0%	1%	
Total	147	100	447	100	378	100	96	100	1068	14%	42%	35%	9%	100%	

Uit deze data volgt dat de meest voorkomende schepen in de Nederlandse (KVNVR) vloot zijn:

4. Klein tot middel grote general Cargo / Multipurpose schepen.
5. Kleine offshore supply schepen.
6. Kleine sleepboten.

De uiteindelijk gekozen scheepsafmetingen en geïnstalleerde vermogens (zie Tabel 2-5) zijn in overleg met de KVNVR bepaald.

2.1.3 Meest herkenbare schepen voor de Nederlandse maakindustrie

Consultatie van NMT en hun jaarverslag van 2019 (zie [Ref 1.]) laat de volgende lijst met belangrijke schepen zien:

- Droge lading ships en tankers.
- Superjachten.
- Baggerschepen.
- Werkschepen, sleepboten en service schepen.

De eerste komt overeen met de General Cargo uit de KVNVR lijst (§2.1.2). Na overleg met de betrokken partijen is besloten om de volgende scheepstypen te kiezen:

7. Superjachten.
8. Baggerschepen.
9. Kleine werkschepen: specifiek crew transfer vessels.

De uiteindelijk gekozen scheepsafmetingen en geïnstalleerde vermogens (zie Tabel 2-5) zijn in overleg met NMT bepaald.

2.2 Missieprofielen

Voor het vaststellen van de operationele missieprofielen is ware grootte data een goede informatiebron. Echter, het verkrijgen van goede ware grootte data is niet vanzelfsprekend. Schippers vullen veelal een noon rapport in waarin per 24 uren o.a. wordt gerapporteerd met welke snelheid gevaren wordt, met welke belading en in welke weeromstandigheden. Echter, vaak is het invullen handwerk en gaat het gepaard met de nodige onvolkomenheden waardoor er veel variatie in de data ontstaat. In deze opdracht heeft KVNR, in eerste instantie voor het general cargo schip, gepoogd binnen haar ledenbestand aan de juiste operationele data te komen. Dit is helaas niet gelukt, hetgeen ook laat zien dat het beeld hoe het schip ingezet wordt niet eenvoudig verkregen kan worden.

Een andere bron is AIS data. Deze data is tegen betaling opvraagbaar, maar kan ook verschillen in kwaliteit en (wereld) dekking. Een andere tekortkoming bij het gebruik van AIS is het gebrek aan inzicht in het daadwerkelijk gevraagde vermogen: voortstuwend vermogen en hulpvermogen. De hulpvermogenvraag voor transport schepen zal klein zijn en AIS data kan goede input zijn om tot een schatting van het voortstuwend vermogen te komen. Echter, voor baggerschepen en jachten kan de hulpvermogenvraag aanzienlijk zijn, hetgeen meegenomen moet worden in het missieprofiel.

MARIN heeft recent in haar achtergrondonderzoek gekeken naar de mogelijkheid om uit AIS data een operationeel profiel te halen [Ref 4.]. Ook hier bleek dat niet elke AIS data provider goede data kan leveren en er met zorg gekozen moet worden. Binnen dit achtergrondonderzoeksproject is er AIS data bekeken van meerdere schepen, deels overlappend met de bovenste drie scheepstypen (zie Tabel 2-3 en Figuur 2-2 en Figuur 2-3).

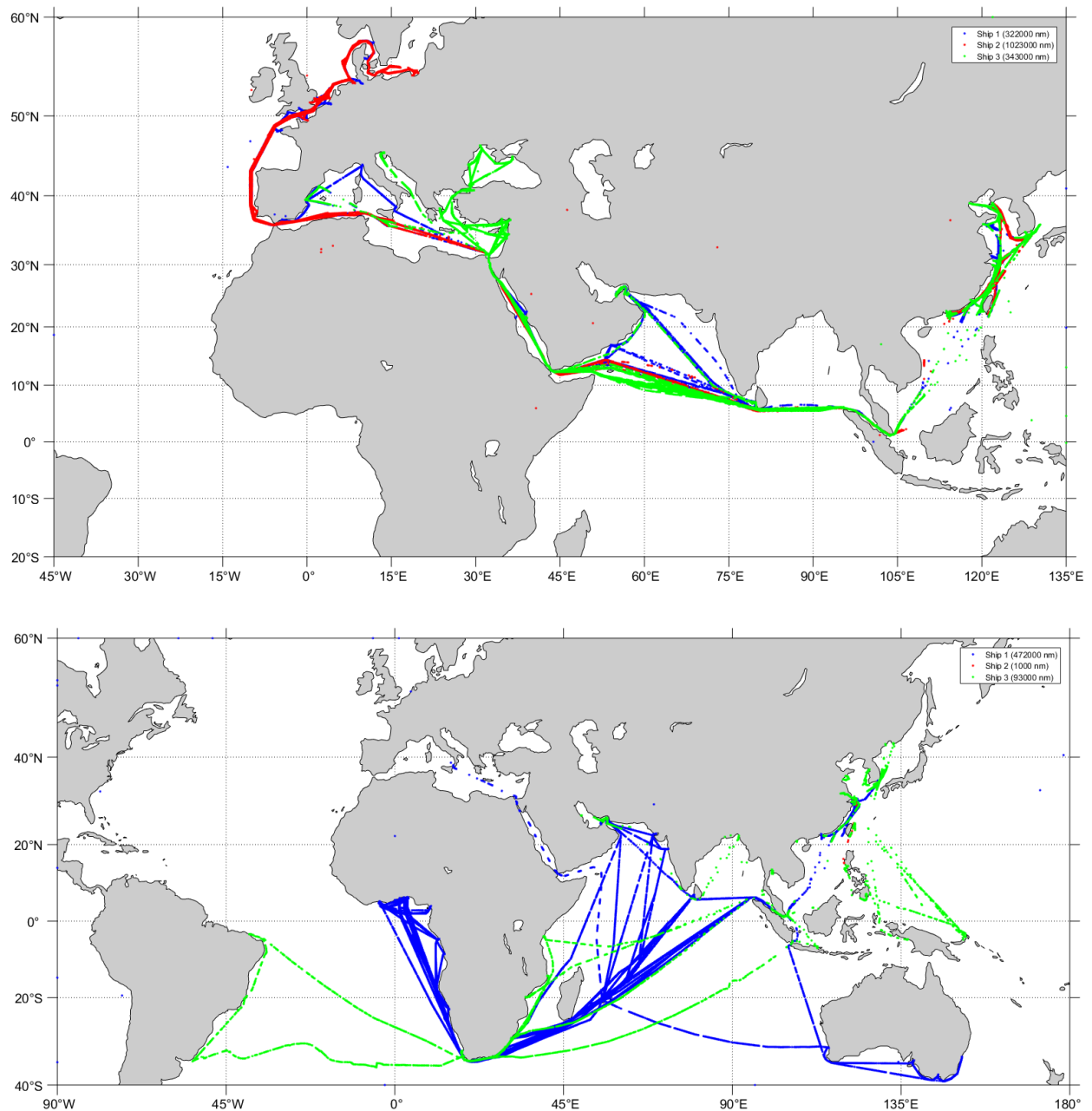
Tabel 2-3: Onderzochte scheepstypen in “AIS achtergrond onderzoek project” [Ref 4.]

Ship type	Length (rounded at 10 metres)	Breadth (rounded at 5 metres)	Routes
Container	400	55	Eurasia
Container	400	60	Eurasia
Container	300	50	Eurasia
Container	260	30	South and East
Bulker	170	25	South and East
Bulker	290	45	Worldwide
General cargo	180	30	Worldwide
Oil tanker	240	40	Atlantic/Europe
Oil tanker	90	15	Atlantic/Europe
General cargo	100	15	Atlantic/Europe

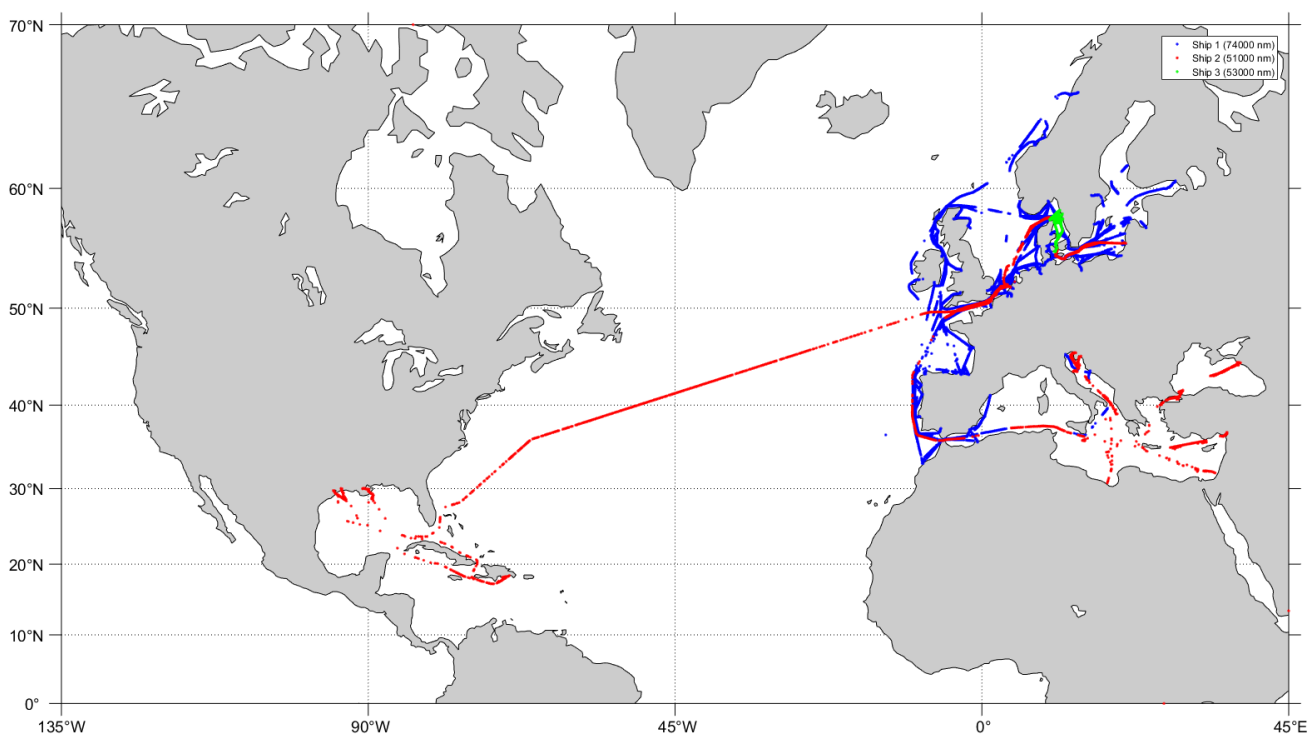
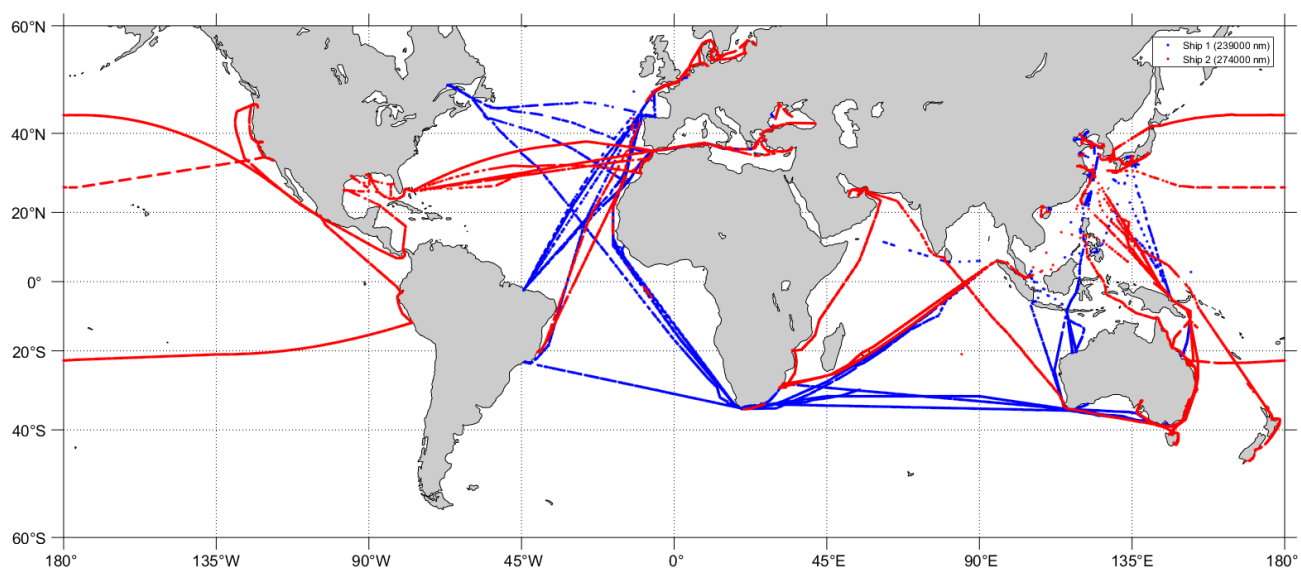
Op basis van deze AIS data is gekeken naar de diepgangen en vaarsnelheden (zie Figuur 2-4). De vaarprofielen variëren logischerwijs per schip en ook per scheepstype.

De tankers en bulk carriers laten een duidelijkere scheiding zien in diepgang (ballast of beladen), waarbij de snelheid iets toeneemt in ballast. Voor de tanker en bulk carrier wordt uitgegaan van de helft beladen varen en de helft in ballast varen.

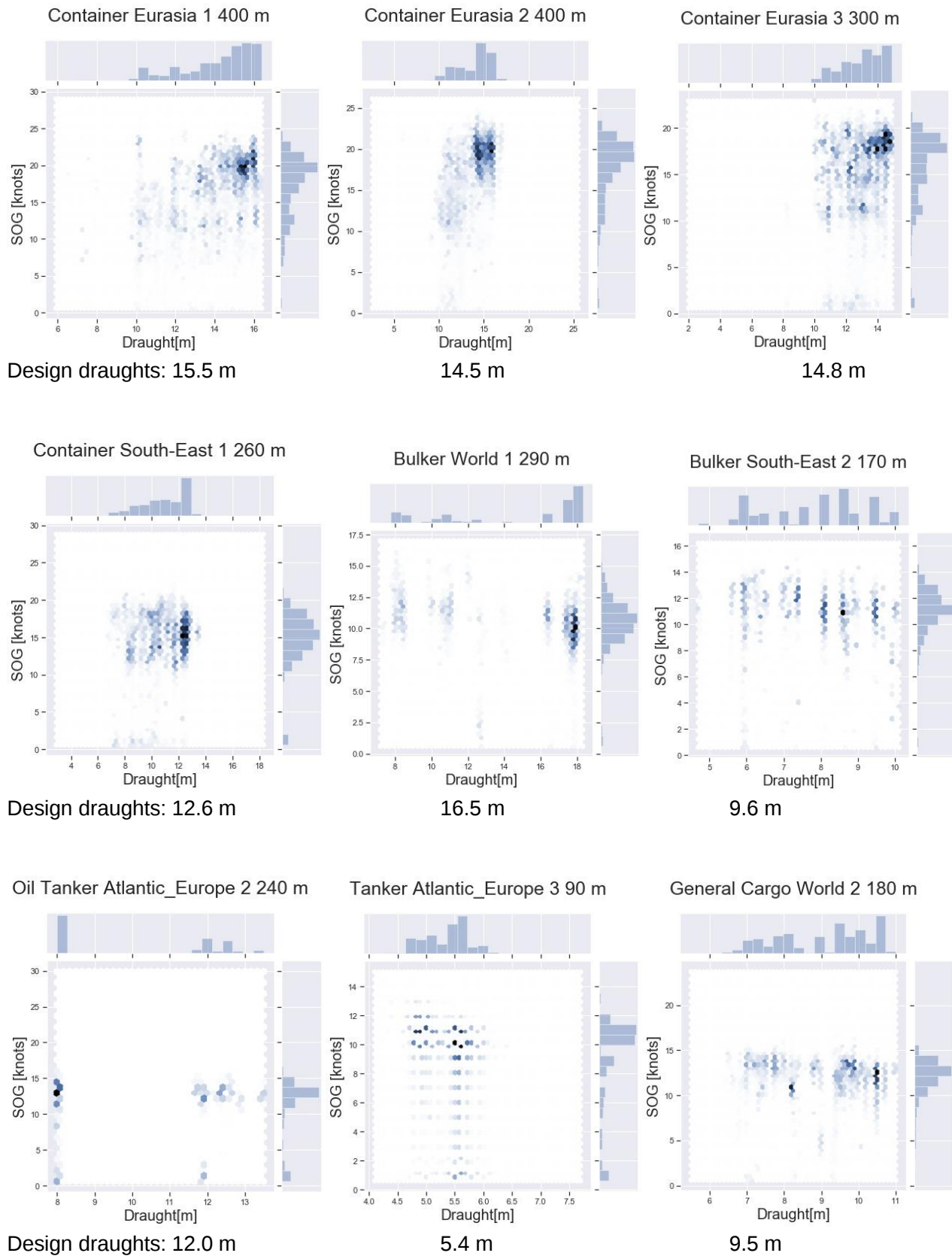
De containerschepen varen met diepgangen, die dicht bij elkaar in de buurt liggen. Dit zijn allemaal te verklaren en logische observaties. Echter, door de variaties is hier niet eenvoudig een representatief vaarprofiel uit te halen. Voor het container schip is er uiteindelijk teruggevallen op typische “vaarprofiel” data, die MARIN krijgt aangeleverd in commerciële projecten. Op basis hiervan is een gemiddeld missieprofiel vastgesteld.



Figuur 2-2: AIS data van koopvaardij schepen [Ref 4.]. Boven: schip 1: Container ship 400 m, schip 2: Container ship 400 m, schip 3: Container ship 300 m. Onder: schip 1: Container ship 260 m, schip 2: Bulker 170 m, schip 3: dezelfde bulk carrier 170 m met andere eigenaar.



Figuur 2-3: AIS data van koopvaardij schepen [Ref 4.]. Boven: schip 1: Bulk carrier 290 m, schip 2: General Cargo 180 m. Onder: schip 1: General Cargo 100 m, schip 2: Olie tanker 240 m, schip 3: Olie tanker 90 m.



Figuur 2-4: Vaarprofielen van de verschillende schepen [Ref 4].

Ook voor de Nederlandse schepen moet een missieprofiel worden vastgesteld. Aangezien voor deze schepen geen geanalyseerde openbare (AIS) data voorhanden is, zijn de missieprofielen opgezet op basis van een combinatie van ervaringen uit verschillende projecten en expert opinies / schattingen.

Naast vaarsnelheden, belading en de duur dat er op een conditie wordt gevaren moet er ook een uitspraak gedaan worden over de actuele vermogensvraag voor voortstuwing en hulpbedrijf. De voortstuwingsvermogens kunnen redelijkerwijs volgen uit de MARIN modelproefdatabase met een correlatie naar het voor de Green Deal gewenste scheepstype. Voor vermogens in transit is dit een goede manier om tot een vermogen te komen. Voor vermogens voor bijvoorbeeld manoeuvreren werkt deze aanpak niet. In dat geval wordt het vermogen geschat op basis van ervaring. Het hulpvermogen is voor de transportschepen over het algemeen laag, vergeleken met het voortstuwingsvermogen. Het hulpvermogen is daarom alleen voor het baggerschip en het superjacht meegenomen in het missieprofiel. Voor het baggerschip is een redelijk gedetailleerd missieprofiel beschikbaar met varende en werkende operationele omstandigheden. Voor het jacht is gebruik gemaakt van informatie over gemiddelde hulpvermogens van verschillende grote jachten. Dit laat een gemiddeld hulpvermogen zien van 600kW, hetgeen gebruikt wordt in stilliggende conditie voor anker en varend. Kanttekening hierbij is dat de hulpvermogensvraag zal variëren over de verschillende condities. Deze detaillering zal pas meegenomen worden in de Green Deal validatie casussen, indien geschikte data voor handen is. Voor alle schepen geldt dat voor de tijd in de haven de vermogensvraag op nul is gesteld.

Om te komen tot emissies moet ook het huidige geïnstalleerde vermogenssysteem en de brandstof bekend zijn. Hiervoor is teruggevallen op online beschikbare data en informatie uit verschillende projecten.

Uiteindelijk zijn de missieprofielen van de 6 Nederlandse referentie schepen samengesteld op basis van een combinatie van:

- beschikbare operationele data (AIS data, operationele monitoring data aan boord).
- vermogens correlatie met tankproefresultaten.
- schatting op basis van ervaring gelinkt aan (commerciële) projecten.

Hierbij moet worden opgemerkt dat de referentie schepen en bijbehorende missie profielen dienen als referentie zodat emissiereductie technieken vergeleken kunnen worden in een representatieve setting. Het heeft niet als doel om een exacte, nauwkeurige weergave te geven van de werkelijkheid. Als dat laatste het geval zou zijn dan zou een veel uitgebreider bronnen onderzoek en data analyse moeten plaatsvinden. Binnen de specifieke validatie casussen die volgen in de Green Deal zal verdere verdieping volgen. In die casussen zal het onderzoek zich richten op 6 schepen: de 3 vanuit de Nederlandse vloot en de 3 vanuit de Nederlandse maakindustrie, De 3 grote schepen uit de wereldvloot en hun missieprofielen zijn op dit moment met name bepaald als referentie. Indien de betrokken partijen het gewenst achten deze 3 schepen ook in de komende onderzoeken mee te nemen dan zal dit worden besproken en waar mogelijk opgepakt.

Tabel 2-5 geeft het resultaat voor de vaarprofielen van de verschillende referentie schepen.

Tabel 2-4: *Herkomst van vaarprofiel data per scheepstype*

Scheepstype	Bron operationele condities	Bron bijbehorend vermogen
General cargo	AIS, Ervaringen uit meerdere projecten	Transit: Correlatie Manoeuvreren: schatting
Sleep boot	Ervaring uit Safetug project ([Ref 5.])	Transit: Correlatie Manoeuvreren: schatting
Offshore supply schip	Ervaringen uit meerdere projecten	Transit: Correlatie Manoeuvreren: schatting
Crew Tender	Ervaringen uit meerdere projecten	Transit: Correlatie Manoeuvreren: schatting
Baggerschip	Operationele meetdata beschikbaar	Operationele meetdata beschikbaar
Superjacht	Ervaring uit meerdere projecten	Transit: Correlatie Manoeuvreren: schatting Hulpvermogen: schatting
Container schip	AIS, Ervaringen uit meerdere projecten	Transit: Correlatie
Bulk carrier	AIS, Ervaringen uit meerdere projecten	Transit: Correlatie
Tanker	AIS, Ervaringen uit meerdere projecten	Transit: Correlatie

Tabel 2-5: Referentie schepen en hun missieprofiel. Voor baggerschepen en jachten is het hulpvermogen meegenomen. Voor de transportschepen is het hulpvermogen laag en in deze globale missieprofielen niet meegenomen.

	Lengte m	Breedte m	Geinstal. vermogen kW	Waternver- plaatsing m ³	DWT ton	Auto- nomie dagen	Operationele conditie	Snelheid kts	Tijdsdeel %	Vermogen kW	Huidig geïnstalleerd systeem Huidige brandstof
General Cargo											4-stroke ICE-direct, medium speed MGO
	112	18.2	4290	12800	9216	30	transit	13	55	3861	
							manoeuvreren	5	10	557.7	
							in haven	0	35	0	
Sleep boot											Z-drive ICE-direct, high speed Diesel
	32	12	5000	1140	285	15	transit	12.5	25	4275	
							slepen	4	25	4275	
							wachten/haven	0-2	50	500	
Offshore supply											4-stroke ICE-electric, high speed MGO
	82	17.5	6000	5800	2900	5	transit	14.5	45	5130	
							manoeuvreren	2	25	600	
							in haven	0	35	0	
Crew tender catamaran											4-stroke ICE-direct, high speed Diesel
	25	9	2100	90	20	3	transit	23.5	40	1850	
							manoeuvreren + on-/off loading	5	10	210	
							in haven	0	50	0	
Baggerschip											4-stroke ICE-direct, medium speed MGO
	125.00	28.00	12000	29750	21000	14	Transit	16	22	7814	
							baggeren	2	31	8730	
							Varen,dumpen door pomp	1	12	5567	
							varen, dumpen door deuren	1	14	6126	
							lossen aan kade	0	12	9948	
							in haven	0	10	0	
Superjacht											4-stroke ICE-electric- hybrid, high speed Diesel
	100	17.2	13000	4600	460	14	top snelheid	22	5	12300	
							cruise snelheid	18	10	6450	
							endurance snelheid	12	20	2550	
							manoeuvreren	4	10	1250	
							voor anker	0	20	600	
							in haven	0	35	0	

	Lengte m	Breedte m	Geinstal. vermogen kW	Waternver- plaatsing m ³	DWT ton	Auto- nomie dagen	Operationele conditie	Snelheid kts	Tijdsdeel %	Vermogen kW	Huidig geïnstalleerd systeem Huidige brandstof
Container schip											2-stroke ICE-direct, low speed HFO/VLSO
	390	61	64000	247000	200000	60	transit scantling	18	24	32500	
							transit design	21	28	51000	
							transit ballast	14	12	14000	
							transit ballast	18	16	30000	
							in haven	0	20	0	
Bulker											2-stroke ICE-direct, low speed HFO/VLSO
	175	30	7000	44000	37000	55	transit beladen	13.8	40	5600	
							transit leeg	14.1	40	5600	
							in haven	0	20	0	
Tanker											2-stroke -ICE-direct, low speed HFO/VLSO
	324	60	24500	324000	320000	70	transit beladen	15	40	18300	
							transit leeg	16	40	18300	
							in haven	0	20	0	

2.3 Emissies

Om inzicht te hebben in het oplossend vermogen van verschillende innovaties dient een referentie te worden vastgesteld. In dit hoofdstuk wordt voor elk missieprofiel de CO₂- en luchtverontreinigende emissies (NO_x, PM en SO_x) bepaald. De emissies zijn in kaart gebracht voor twee zichtjaren:

- Emissies van een schip uit bouwjaar 2008 in zichtjaar 2008. De doelstellingen van de IMO zijn gebaseerd op de emissies uit dit jaar. In 2030 moeten de CO₂-emissies per transport 40% lager zijn dan het niveau in 2008. Hiermee is het belangrijk om dit per scheepstype vast te stellen.
- Emissies in de huidige situatie. Hiervoor is een schip met bouwjaar 2018 en Tier II emissiestandaard als basis genomen.

Voor het berekenen van de emissies is uitgegaan van de missieprofielen uit Tabel 2-5. Verder zijn de volgende aannames gemaakt:

- Voor schepen die varen met medium of high speed motoren op MGO of diesel is uitgegaan van een zwavelgehalte in de brandstof van 0.1% voor 2008 en 2018. NO_x is vastgesteld op basis van aangenomen motortoerental van:
 - 1800 RPM voor High Speed diesel elektrisch;
 - 1500 RPM voor High Speed direct drive; en
 - 700 RPM voor Medium Speed.
- Voor de schepen welke varen op MGO, MDO (ULSFO) wordt uitgegaan van de ECA zone met een zwavelgehalte in de brandstof van 0,1%. Voor schepen die varen met low speed motoren is uitgegaan van HFO in 2008 en LSFO, in 2020. Hierbij wordt voor de zwavelberekening uitgegaan van 3.5% in 2008 en 0.5% in 2018. NO_x op basis van aangenomen motortoerental van 100 RPM.

De resultaten staan samengevat in onderstaande tabellen. In Tabel 2-6 en Tabel 2-7 staat de relatieve waarden voor brandstofverbruik (in kg/ uur) en de emissies (in g/ kWh). Deze waarden geven inzicht in de onderliggende waarden van de uitstoot van de schepen.

Tabel 2-6: Relatieve brandstofverbruik en emissies voor referentieprofielen voor bouwjaar 2008 in zichtjaar 2008. (Tier I emissiestandaard).

Scheepstype	Motortype	Brandstof-	Brandstofverbruik	CO ₂	NO _x	PM ¹	SO _x
			kg/u	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
General Cargo	4-stroke, medium speed	MGO	399	581	10,6	0,23	0,37
Sleep boot	Z-drive diesel direct	MDO	437	581	9,1	0,23	0,37
Offshore supply	Diesel-elektrisch 4-stroke diesel	MGO	392	581	8,7	0,23	0,37
Crew Tender	4-stroke, high speed	MDO	139	581	9,1	0,23	0,37
Baggerschip	4-stroke, medium speed	MGO	1438	581	10,6	0,23	0,37
Superjacht	diesel-elektrisch, high speed	MDO	369	581	8,7	0,23	0,37
Container	2-stroke, low speed	HFO	5998	533	14,8	1,2	11,8
Bulker	2-stroke, low speed	HFO	941	533	14,8	1,2	11,8
Tanker	2-stroke, low speed	HFO	3074	533	14,8	1,2	11,8

¹ Inclusief PM van zwavelgehalte brandstof

Tabel 2-7: Relatieve brandstofverbruik en emissies voor referentieprofielen voor bouwjaar 2018 in zichtjaar 2020 (Tier II emissiestandaard)

Scheepstype	Motortype	Brandstof-	Brandstofverbruik	CO ₂	NO _x	PM ¹	SO _x
			kg/u	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
General Cargo	4-stroke, medium speed	MGO	392	571	9,1	0,23	0,36
Sleep boot	Z-drive diesel direct	Diesel ULSFO	430	571	7,6	0,23	0,36
Offshore supply	Diesel-elektrisch 4-stroke diesel	MGO	385	571	7,3	0,23	0,36
Crew Tender	4-stroke, high speed	Diesel ULSFO	137	571	7,6	0,23	0,36
Baggerschip	4-stroke, medium speed	MGO	1414	571	9,1	0,23	0,36
Superjacht	diesel-elektrisch, high speed	Diesel ULSFO	363	571	7,3	0,23	0,36
Container	2-stroke, low speed	VLSFO	5891	524	13,4	0,33	1,7
Bulker	2-stroke, low speed	VLSFO	924	524	13,4	0,33	1,7
Tanker	2-stroke, low speed	VLSFO	3020	524	13,4	0,33	1,7

¹ Inclusief PM van zwavelgehalte brandstof

Vervolgens worden in Tabel 2-8 en Tabel 2-9 de totale emissies per referentieprofiel per jaar gepresenteerd.

Tabel 2-8: Totale emissies voor referentieprofielen per jaar voor bouwjaar 2008 in zichtjaar 2008 (ton per jaar)

Scheepstype	CO ₂	NO _x	PM ¹	SO _x
	Ton/ jaar	Ton/ jaar	Ton/ jaar	Ton/ jaar
General Cargo	11.092	202	4	7
Sleep boot	12.151	190	5	8
Offshore supply	10.889	164	4	7
Crew tender	3873	60	2	2
Baggerschip	39.995	727	16	25
Superjacht	10.255	154	4	6
Container	166.686	4.625	388	3.678
Bulker	26.147	726	61	577
Tanker	85.444	2.371	199	1.885

¹ Inclusief PM van zwavelgehalte brandstof

Tabel 2-9: *Relatieve brandstofverbruik en emissies voor referentieprofielen voor bouwjaar 2018 in zichtjaar 2020 (ton per jaar)*

Scheepstype	CO ₂	NO _x	PM ¹	SO _x
	Ton/ jaar	Ton/ jaar	Ton/ jaar	Ton/ jaar
General Cargo	10.901	173	4	7
Sleep boot	11.942	159	5	8
Offshore supply	10.702	137	4	7
Crew tender	3.806	51	2	2
Baggerschip	39.307	624	16	25
Superjacht	10.079	129	4	6
Container	163.872	4.188	104	516
Bulker	25.705	657	16	81
Tanker	84.001	2.147	53	265

¹ Inclusief PM van zwavelgehalte brandstof

3 TAAK 2: STAND DER TECHNIEK ENERGIEDRAGERS EN -OMZETTERS

In dit hoofdstuk wordt een toelichting gegeven van de belangrijkste technieken op het gebied van alternatieve energiedragers voor gebruik in verbrandingsmotoren en brandstofcellen. Achtereenvolgens wordt een overzicht gegeven van de alternatieven die zijn meegenomen en de technologische rijpheid hiervan, de verwachte bijdrage aan emissiereductie en de kostenontwikkeling.

Aan het begin van dit hoofdstuk moeten een paar belangrijke kanttekeningen geplaatst worden over de machinekamer architectuur in relatie tot andere energiedragers en –omzetters.

Er zijn verschillende soorten voortstuwingsaandrijflijnen en vermogensdistributiesystemen. De bekendste en meest toegepaste is de direct mechanische aandrijflijn van de voortstuwing met een verbrandingsmotor. Opwekking en distributie van het hulpvermogen is dan óf volledig van de voortstuwing gescheiden óf parallel gekoppeld aan de voortstuwingsaandrijftrein via een asgenerator. Een andere vorm van opwekking en distributie van vermogen en aandrijving van de voortstuwing is de geïntegreerde elektrische uitvoering. Het vermogen kan dan worden opgewekt door diverse vermogensomzetters, zoals elektrogeneratoren met verbrandingsmotoren, brandstofcellen en batterijen. Tenslotte zijn er ook nog hybride voortstuwingsaandrijfsystemen.

In hoeverre verbrandingsmotoren, die lopen op alternatieve brandstoffen geschikt zijn voor directe mechanische aandrijving van de voortstuwing is sterk de vraag. De transiente responsie van dergelijke nieuwe toepassingen is vaak slechter dan met diesel. De hedendaagse oplossing dat dynamische verstoringen worden opgevangen met meer insputting van dieselolie is op termijn ongewenst, omdat dan de vervuiling toeneemt. Onderzoek en ontwikkeling zullen uitwijzen welke oplossingen voor transiente responsie mogelijk zijn. Op de korte termijn zal direct door verbrandingsmotoren aangedreven voortstuwing niet geschikt zijn voor volledig bedrijf met alternatieve brandstoffen.

3.1 Onderzochte energiedragers en -omzetters en hun ‘volwassenheid’

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de verschillende energiedragers en –omzetters, die in de analyse zijn meegenomen. Alternatieve energiedragers kunnen verschillen in het type (bijvoorbeeld methanol of waterstof), maar daarbinnen zijn er ook verschillende varianten als gevolg van het productieproces (bijvoorbeeld een fossiele bron, een bio route of gebruik van een synthetisch productieproces).

Voor elke energiedrager is per productiemethode het bijbehorende TRL (Technology Readiness Level) niveau gegeven (gebaseerd op verschillende bronstudies), zowel voor dit moment en de verwachte kennisontwikkeling naar 2030. De schaal hiervan loopt van 1 (fundamenteel onderzoek) tot 10 (volwassen). Het TRL level van 2030 is onzeker omdat dat sterk afhankelijk is van de ontwikkelingen (projecten, productontwikkeling, demonstraties) welke tussen 2020 en 2030 plaats zullen vinden. Dit is meestal afhankelijk van financieringsinstrumenten van de overheid (wereldwijd, Europees, nationaal). Opgemerkt moet worden dat deze lijst niet uitputtend is en dat binnen de varianten ook ontwikkeling is. Voor bijvoorbeeld batterijen wordt nog gewerkt aan verschillende innovaties in accutechnologie en ook bij biobrandstoffen zijn er nog nieuwe herkomstbronnen in ontwikkeling.

Tabel 3-1: Verwachte TRL van verschillende energiedragers en aandrijflijnen

Alternatief	Brandstof	TRL 2020	TRL 2030
1. Alternatieve brandstoffen in een verbrandingsmotor	MGO	10	10
	HFO (0.5 % S)	10	10
	HVO	10	10
	FAME	10	10
	E-diesel	5/6	6/8
	GTL	10	10
	LPG	10	10
	BLPG	10	10
	LNG	10	10
	LBG (bio-LNG)	6/8	9/10
	e-LG	5/6	6/8
	Methanol (grijs)	6/8	9/10
	Biomethanol	6/8	9/10
	E-Methanol	5/6	6/8
	DME	6/8	9/10
	BioDME	6/8	9/10
	E-DME	5/6	6/8
	Ethanol Lignocellulosic hydrolysis	6/8	9/10
	Ethanol - Sugar / starch hydrolysis	10	10
	Ammonia (grijs)		
	Waterstof (Grijs)	6/8	8/9
	Waterstof (Elektrolyse)	5/6	6/8
2. Alternatieve energiedragers met een andere energieomzetter	Batterij-Elektrisch (NL groen)	6/8	9/10
	Waterstof (Grijs) in PEM-brandstofcel	6/8	8/9
	Waterstof (elektrolyse) in brandstofcel	5/6	6/8
	Methanol (grijs) in brandstofcel	6/8	8
	Biomethanol in brandstofcel	6/8	8
	E-Methanol in brandstofcel	4/5	?
	Ammonia (grijs) in brandstofcel	6/8	8
	E-Ammonia in brandstofcel	5/6	6/8
	LOHC in brandstofcel	5/6	8
	Waterstof (ijzerpoeder) in brandstofcel	4	?
	LCH4 in brandstofcel	4/5	?

Bron [Ref 8.]

3.2 Verwacht effect op CO₂-emissies

Bij het in kaart brengen van de CO₂-uitstoot van alternatieve energiedragers wordt gekeken naar twee type emissies:

- Emissies in de productieketen (de upstream of well-to-tank emissies); en
- Het effect op emissies in het vaartuig zelf (tank to propeller emissies).

De well-to-tank emissies worden met name bepaald door de herkomst van de energiedragers (feedstock). Voor eenzelfde brandstof kunnen meerdere feedstock routes bestaan. De tank-to-propeller emissies hangen samen met de samenstelling van de energiedrager en de efficiëntie van het energieomzetting. Deze is niet afhankelijk van de herkomstbron.

Uit literatuur komt naar voren dat de productieroute leidend is in de CO₂-uitstoot over de gehele keten heen. Dit geldt voor energiedragers in een verbrandingsmotor, maar ook bij gebruik van alternatieve aandrijfmotoren zoals batterij-elektrische aandrijving of het gebruik van brandstofcellen. In het geval van bijvoorbeeld waterstof is er geen of nauwelijks sprake van een CO₂-reductie wanneer deze een fossiele herkomstbron heeft. Onderstaande tabel geeft hiervoor een overzicht. In de tabel zijn voor de meeste brandstoffen niet de NH₄ en N₂O waarden opgenomen, omdat deze in de meeste gevallen een marginale bijdrage levert. Uitzondering hierop is het gebruik van vloeibaar gas (LNG, LBG of e-LG). De emissies van methaanslip zijn significant.

Tabel 3-2: Well-to-wake CO₂-emissies voor verschillende energiedragers bij verschillende productieroutes (in g CO_{2eq}/MJ)

WTW CO ₂ -emissies g/MJ	Fossiele brandstof	Biobrandstof/ carbon-recycled	E-brandstof
EN590/ HVO/E-diesel	85,8	8,1 - 56	0 - 6,8
LNG/ LBG/ e-LG	93,5 ¹	40 – 70 ¹	20 – 31 ¹
Methanol	84,2 - 94,3	2,2 - 6,6	0 - 6,8
Waterstof	115,2		0 - 10
LOHC			0 - 10
LCH ₄			0 - 10
NH ₃	96,8		0 - 10
DME	79,3 - 97,7	2 - 6,8	0 - 6,8
Elektriciteit	98,6	23,8	0 - 10

¹ Inclusief uitstoot van methaanslip (20 g CO_{2eq}/ MJ). Hierbij wordt gerekend over een periode van 100 jaren. Bronnen [Ref 8.] t/m [Ref 12.].

3.3 Verwacht effect op luchtverontreinigende emissies

Het effect van inbouw van nieuwe energiedragers op luchtverontreinigende emissies (NO_x, SO_x, PM) is van een aantal factoren afhankelijk. De uitstoot van SO_x is afhankelijk van het zwavelgehalte in de brandstof. Voor NO_x en PM is de uitstoot afhankelijk van de energiedrager en het verbrandingsproces van de motoren van het schip. Uitstoot van luchtverontreinigende emissies kunnen daarnaast op het schip worden opgevangen door een nabehandelingssysteem. Voor een aantal energiedragers (DME, ethanol, ammonia) is nog weinig meetdata beschikbaar bij verbrandingsmotoren.

Bij retrofit op een bestaand schip hangt het effect op NO_x af van de emissieklasse van de motor (afhankelijk van het jaar van productie). Voor veel schepen leidt een alternatieve energiedrager tot een reductie van de NO_x (en PM₁₀).

Voor het halen van Tier III NO_x eis, zal voor de meeste energiedragers in combinatie met een verbrandingsmotor een emissiecontrole systeem noodzakelijk zijn. Voor diesel en biodiesel zal dat over het algemeen SCR nabehandeling zijn. Voor methanol en ethanol, kan nabehandeling of waterbijmenging bij de methanol of ethanol worden toegepast. Voor diesel, biodiesel, methanol, ethanol en DME kan in veel gevallen ook via EGR (exhaust gas recirculation) het Tier III niveau gehaald worden. Voor elke technologie zal een afweging gemaakt worden welke optie de laagste TCO heeft, hetgeen ook af kan hangen van het aandeel van de tijd dat het schip in de ECA zone vaart.

Reductie van NO_x voor nieuwe schepen met een tier III motor is niet vanzelfsprekend. Voor sommige energiedragers in combinatie met een verbrandingsmotor zal toepassing van een nabehandelingssysteem nog steeds noodzakelijk zijn. Dit geldt bijvoorbeeld voor toepassing van biobrandstoffen of methanol in een verbrandingsmotor. Bij toepassing van LNG (monofuel) of het gebruik van batterij-elektrische aandrijving of brandstofcellen is nabehandeling over het algemeen niet nodig.

Additieven zijn niet als een aparte case toegevoegd. Er zijn verschillende soorten additieven in de markt te verkrijgen, bijvoorbeeld voor betere smering of anti-fouling in het brandstof systeem. Metingen laten in veel gevallen geen of een zeer beperkt effect zien op emissies en brandstofverbruik.

Tabel 3-3: Luchtverontreinigende emissies van verschillende energiedragers en aandrijflijnen

Aandrijflijn	Brandstof	NOx (g/kWh) (medium Speed motor Engine out (Tier II equivalent)	NOx nabehandeling noodzakelijk voor Behalen Tier III	PM g/kWh	SOx g/kWh
1. Alternatieve brandstoffen in een verbrandings motor	MGO	8.6	Ja	0.23	0.36
	HFO (0.5 % S)	12.4	Ja	0.74	2
	MGO + SCR	2,3	Ja, SCR	0.74	2
	LNG	2	Nee	0.02	0.009
	Methanol (grijs)	~ 5	EGR, SCR of water bijmenging	0.034	0.007
	DME	?	Geen recente meetdata bekend.	?	~0
	Ethanol	?	EGR, SCR of water bijmenging		~0
	Ammonia	?	Waarschijnlijk SCR	?	~0
2. Alternatieve energiedrage rs met een andere energieomze tter	Elektrisch (NL groen)	~0	Nee	~0	~0
	Waterstof (elektrolyse) in brandstofcel	~0	Nee	~0	~0
	Methanol in brandstofcel	~0	?	~0	~0
	Ammonia in brandstofcel	~0	?	~0	~0
	LOHC in brandstofcel	0	Nee	0	0
	Waterstof (ijzerpoeder) in brandstofcel	0	Nee	0	0
	LCH4 in brandstofcel				

Bronnen: [Ref 16.], [Ref 17.] en [Ref 18.]

3.4 Verwacht effect op investeringskosten

De ontwikkeling van investeringskosten is onzeker. Twee belangrijke posten kunnen worden onderscheiden: de kostprijsontwikkeling van de verschillende aandrijflijntechnieken, bijvoorbeeld de kosten van innovatieve batterijtechnologie en brandstofcellen, en de kosten van het brandstofsysteem. Op basis van de informatie uit de SPEC-tool van Marin is een eerste inschatting gemaakt van de kosten van de verschillende opties. In onderstaande tabel staat een overzicht van de verwachte meerprijs van de investeringskosten voor de verschillende varianten ten opzichte van een investering in een (reguliere TIER III verbrandingsmotor. Deze meerkosten zijn lager voor opties met een verbrandingsmotor dan bij het gebruik van alternatieve aandrijflijnen. De ontwikkeling van de meerkosten zal samenhangen met de technologische ontwikkeling van optie (TRL) en de commerciële rijpheid (Commercial Readiness Level of CRL).

Tabel 3-4: Range meerprijs investeringskosten energiedrager, -omzetter en vermogensdistributie ten opzichte van een TIER III

Aandrijflijn	Brandstof	Kost
1. Alternatieve brandstoffen in een verbrandingsmotor	MGO	0%
	HFO (0.5 % S)	0%
	LNG	30% - 40%
	Methanol (grijs)	20% - 30%
	DME	30% - 40%
	Ethanol	N/A
	Ammonia (grijs)	N/A
2. Alternatieve energiedragers met een andere energieomzetter	Elektrisch (NL groen)	150% - 200%
	Waterstof (elektrolyse) in brandstofcel	150% - 200%
	Methanol in brandstofcel	150% - 200%
	Ammonia in brandstofcel	150% - 200%
	LOHC in brandstofcel	N/A
	Waterstof (ijzerpoeder) in brandstofcel	N/A
	LCH4 in brandstofcel	N/A

Bron: Input SPEC-tool MARIN, [Ref 13.]

3.5 Verwacht effect op operationele kosten

De ontwikkeling van de operationele kosten hangen samen met bredere ontwikkelingen voor fossiele, bio- en synthetische brandstoffen:

- Naar verwachting van belangrijke instituten (IEA en EIA) blijft de komende jaren de prijs van fossiele brandstoffen op een stabiel niveau, onder meer door de opkomst van schalieolie en –gas. EIA voorspelt dit zelfs in scenario met hoge wereldwijde economische groei. Een prijsopdrijvend effect zal vooral worden ingegeven door beleid, met name op internationaal niveau. Voorbeeld hiervan is de inzet van CO₂-beprijzing.
- Voor biobrandstoffen is de marktprijs op korte (binnen 5 jaren) en middellange (2025-2030) termijn sterk afhankelijk van beleid (RED II) en de prijsstelling bij aanbieders. De ondergrens van de prijs in onderstaande tabel is inclusief de waarde van verhandelbare Hernieuwbare Brandstofeenheden (HBE's). Op lange termijn wordt voor nieuwe biobrandstoffen zoals methanol en DME een daling verwacht tussen de 5% en 30% (TNO 2020), onder meer door verbeteringen in de productiemethoden en het in gebruik nemen van nieuwe bronnen.
- Voor de synthetische brandstoffen (E-fuels) is de prijsstelling zeer onzeker. Belangrijke factoren zijn de ontwikkeling van de elektriciteitsprijs (groei aanbod duurzame energie), wat de basis is voor de prijs van waterstofproductie en de prijs van duurzame bron van CO₂ (direct air capture).

Tabel 3-5: Verwachte prijsontwikkeling van verschillende energiedragers op de lange termijn (na 2030) (Euro per GJ)

Euro per GJ	Fossiele brandstof	Biobrandstof/ carbon-recycled	E-brandstof
EN590/ HVO/ E-diesel	9 - 19	14 - 35	28 - 62
LNG/ LBG/ e-LG	9 - 13	12 - 35	28 - 59
Methanol	9 - 22	11 - 33	28 - 68
Waterstof	12 - 16		24 - 46
LOHC	N/A		N/A
LCH4	N/A		N/A
NH3	14 - 30		28 - 56
DME	9 - 22	11 - 33	28 - 68
Elektriciteit			8 - 19

Bronnen [Ref 8.], [Ref 14.] en [Ref 15.]

3.6 Aansluiting bij resultaten NMT studie

De resultaten die hierboven zijn benoemd liggen in lijn met de uitkomsten van de enquête die is uitgevoerd door NMT bij maritieme stakeholders. Uit de enquête komt naar voren dat er een sterke correlatie is tussen de perceptie van de technisch inpasbaarheid van oplossingen door stakeholders en het TRL-niveau die in deze reportage zijn benoemd. Concepten die werken in een diesel motor (additieven, biobrandstoffen zoals Fame en HVO, GTL) wordt gezien als het makkelijkst toepasbaar (hoog TRL level). Alternatieve energiedragers die eveneens al een relatief hoge TRL hebben, zoals LNG en elektrische aandrijving) laten een gemengd beeld zien. Andere oplossingen zoals DME en waterstof hebben scoren laag.

De enquête laat daarnaast zien dat de stakeholders een relatief beperkt effect op emissies verwachten van additieven en laagwaardige biobrandstoffen, een relatief hoger effect verwachten van alternatieve brandstoffen in verbrandingsmotoren en een zeer hoge reductie verwachten van alternatieve energieomzetters. De stakeholders nemen in hun afwegingskader nog beperkt de verschillende productieroutes mee. Uit de resultaten in dit hoofdstuk komt naar voren dat dit wel een belangrijke parameter is.

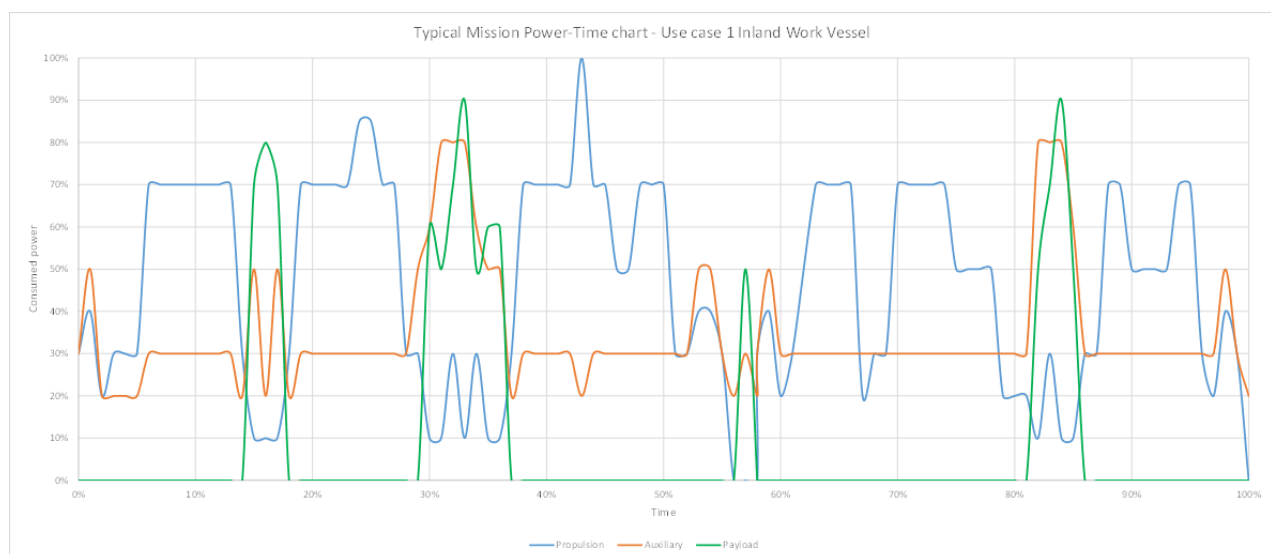
4 CONCLUSIES EN VERVOLGSTAPPEN

Scheepstypen en missie profielen

Negen representatieve scheepstypen zijn bepaald als referentie schepen binnen de Green Deal Validatie studie: zes scheepstypen representatief voor de Nederlandse sector en de drie grootste vervuilende schepen uit de wereldvloot. De scheepsspecificaties (zoals afmetingen en huidig geïnstalleerd vermogenssysteem) zijn vastgesteld in overleg met NMT en KVNVR, zodat voor de sector relevante schepen bekeken worden. Een globaal missieprofiel is bepaald voor deze negen schepen. Op basis hiervan is een referentie emissie vastgesteld die kan dienen als basis aan het begin van de Green Deal Validatie werkzaamheden. In de validatie casussen die gaan volgen binnen de Green Deal zal het onderzoek zich richten op 6 schepen: de 3 vanuit de Nederlandse vloot en de 3 vanuit de Nederlandse maakindustrie. De 3 grote schepen uit de wereldvloot en hun missieprofielen zijn op dit moment met name bepaald als referentie. Indien de betrokken partijen het gewenst achten deze 3 schepen ook in de komende onderzoeken mee te nemen dan zal dit worden besproken en waar mogelijk opgepakt.

De huidige missieprofielen zijn globaal en indicatief van aard. Dit was de insteek binnen de huidige opdracht, die een beperkte diepgang toeliet. Daarnaast bleek bij het uitvoeren van het werk dat binnen de looptijd van de opdracht een gebrek was aan ware grootte monitoringsdata. De missieprofielen zijn uiteindelijk verkregen door een combinatie van resultaten uit eerdere studies en 'expert opinion'. Ze beschrijven de gemiddelde vermogensvraag voor de belangrijkste scheepsoperaties en het tijdsdeel waarvoor deze vermogensvraag geldt. Tijdens de daadwerkelijke validatie casussen zal meer detail in de missieprofielen worden aangebracht. Dit detailniveau zal afhankelijk zijn van de te valideren emissiereductie techniek. Indien bijvoorbeeld een wind assist oplossing bekeken gaat worden zal er ook bepaald moeten worden op welke routes en met welke weersomstandigheden gevaren wordt. Indien er gekeken gaat worden naar een andere vermogens- en energiesysteem (bijvoorbeeld een waterstof brandstofcel oplossing) dan is het van belang om meer detail aan te brengen in de vermogensvraag.

Om een missieprofiel goed en met voldoende detail te kunnen bepalen moet er gekeken worden naar de "mission power-time chart" van het voortstuwend vermogen, hulpvermogen en, indien significant, het pay load vermogen. Deze mission power time chart geeft op een schaal van uren aan wat de vermogensvraag is (zie Figuur 4-1 voor een typisch voorbeeld).



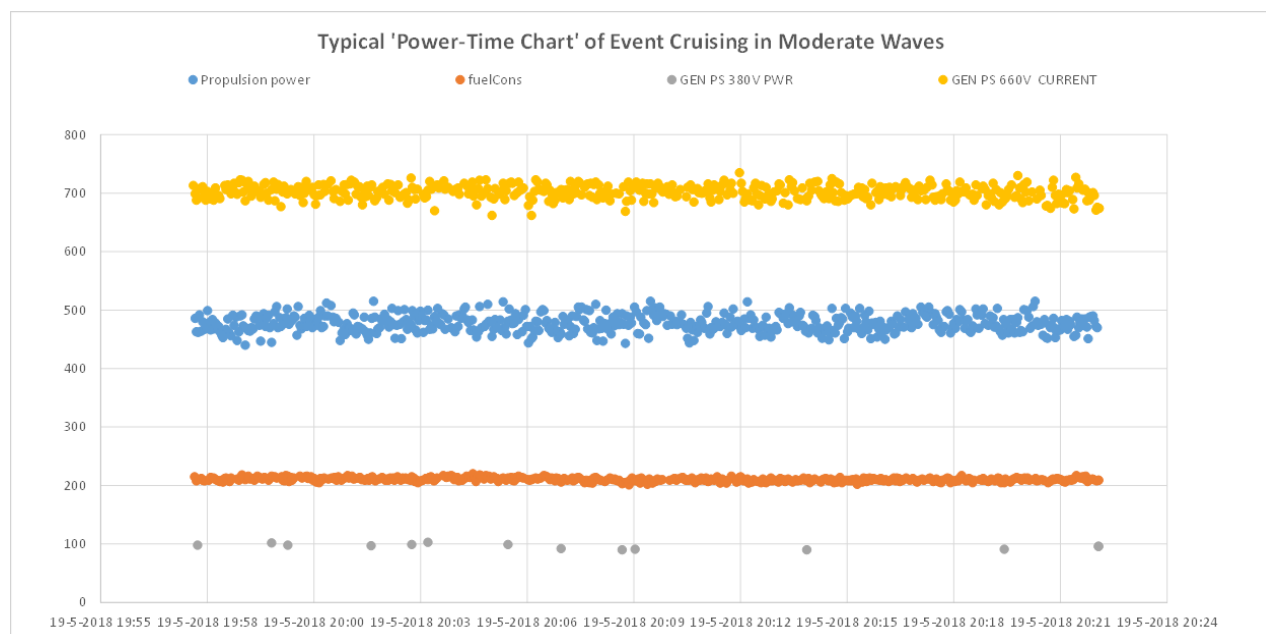
Figuur 4-1: Voorbeeld van een Mission Power Time chart van een werkschip.

Hieraan gekoppeld zijn de 'events': wat is het schip op dat moment aan het doen (zie Tabel 4-1 voor een voorbeeld). Een analyse van dit soort data zal leiden tot een missieprofiel zoals ook in dit rapport getoond. Echter, de onderliggende analyse gaat veel verder dan binnen het tijdsbestek van de huidige opdracht gedaan kon worden. Bij de daadwerkelijke validatie casussen zal hier wel dieper op ingegaan moeten worden. Ervaring leert dat hulpvermogen sterk kan variëren; van oliekachels, die 's winters op vol vermogen draaien tot waste heat recovery systemen voor o.a. verwarming. Echter voor dat laatste is er wel waste-heat nodig welke bijvoorbeeld bij een batterij-elektrische oplossing ontbreekt. De werkzaamheden in de toekomstige validatie casussen kunnen mogelijk leiden tot nieuwe inzichten en daarmee aanpassingen van de globale referentie missieprofielen.

Tabel 4-1: Power time chart gekoppeld aan events.

Typical Power-Time graph in % of max installed consumer power per autonomous mission Inland Work Vessel					
Time [%]	Event	Consumed power [%]			
		Propulsion	Payload	Auxiliary	
0%	Unberthing	30%	0%	30%	
1%	Manoeuvring	40%	0%	50%	
2%	Slow sailing	20%	0%	20%	
3%	Slow sailing	30%	0%	20%	
4%	Slow sailing	30%	0%	20%	
5%	Slow sailing	30%	0%	20%	
6%	Economic cruising	50%	0%	30%	
7%	Economic cruising	50%	0%	30%	
8%	Economic cruising	50%	0%	30%	
9%	Economic cruising	50%	0%	30%	
10%	Cruising	70%	0%	30%	
11%	Cruising	70%	0%	30%	
12%	Cruising	70%	0%	30%	

Bij de uiteindelijke validatie casussen met vermogenssystemen zal naast de power time chart en de daarbij behorende events ook op kleinere tijdschaal gekeken moeten worden naar "Event time charts": Hoe varieert de vermogensvraag per ~seconde? (zie Figuur 4-2 voor een voorbeeld). Dit is van belang om het vermogenssysteem dynamisch te kunnen testen en te kijken naar inzetbaarheid van het systeem en uiteindelijk de emissiereductie realisatie.



Figuur 4-2: Voorbeeld van een Event power time chart.

Stand der techniek

De stand der techniek is getoond voor alternatieve energiedragers en –omzetters. Gedurende de Green Deal zal dit overzicht worden aangepast met de stand der techniek van andere emissiereductie technieken en aangevuld met resultaten uit de Green Deal validatie casussen

Er dient te worden opgemerkt dat het toepassen van andere energiedragers en –omzetters grote gevolgen kan hebben voor de verdere vermogensdistributie in het schip. Een andere vermogensoutput, bijvoorbeeld elektrisch vermogen uit een brandstofcel in plaats van mechanisch vermogen uit een verbrandingsmotor zorgt voor een volledig andere machinekamer architectuur. Bij het beoordelen en valideren van deze technieken moet deze impact op het schip in ogenschouw genomen worden. Dat zal gedurende de Green Deal validatie gedaan worden in de verschillende validatie casussen waar mogelijk.

De huidige lijst geeft reeds aan het begin van de Green Deal inzicht in de stand der techniek voor de maritieme sector. Binnen de Green Deal zal gewerkt worden met een jaarverslag en online dashboards. Daarvoor zal dit overzicht een van de bronnen zijn. In een vervolgstap moet worden bepaald hoe deze data naar de sector inzichtelijk gemaakt kan worden zodat met een eenvoudig overzicht wordt aangegeven waar een emissiereductie techniek staat, kijkend naar emissies, kosten, inzetbaarheid en product volwassenheid.

Voor de keuze van de te onderzoeken emissiereductietechnieken zal gebruik gemaakt worden van de inventarisatie (marktbehoefte) van NMT. Hierbij zal bij elke validatie casus goed gekeken moeten worden wat de markt daadwerkelijk bedoelt als er een emissiereductie techniek als interessant aangestipt wordt. Als voorbeeld: een alternatieve brandstof in een verbrandingsmotor kan veel betekenen (verschillende soorten brandstoffen, mengverhoudingen, soort motoren). Dit rapport heeft reeds enkele van deze aspecten laten zien. Het is zaak om tijdens de validatie casussen voldoende specifiek te worden wat gevalideerd moeten worden, maar ook om telkens de terugkoppeling te maken naar de NMT marktinventarisatie en te kijken of de sector voldoende heeft aan de geleverde validatie resultaten. Op deze manier kan nog beter inzichtelijk gemaakt worden wat de Green Deal bijdraagt aan het overzicht van de stand der techniek waar de markt om vraagt.

Wageningen, december 2020
MARITIME RESEARCH INSTITUTE NETHERLANDS



Ir. G. Gaillarde
Manager Ships

REFERENTIES

- [Ref 1.] https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Global-shipping-GHG-emissions-2013-2015_ICCT-Report_17102017_vF.pdf
- [Ref 2.] <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.615.7105&rep=rep1&type=pdf>
- [Ref 3.] Sector jaarverslag NMT 2019, <https://maritimetechnology.nl/jaarverslagen/>
- [Ref 4.] A. Cotteleer, “AIS data as source for an operational profile”, MARIN rapport 80165-19-RD, januari 2020
- [Ref 5.] Ervaringen uit MARIN project SAFETUG 21938
- [Ref 6.] Arnold de Bruijn, “Inventarisatiestudie validatie van effecten van duurzame maritieme oplossingen”, NMT rapport, 17 juli 2020
- [Ref 7.] Ann Delahaye, Christian Veldhuis, “Verkenning validatie methodieken voor de transitie naar emissieloze zeevaart”, TNO-MARIN rapport, TNO 2019 R12156, MARIN rapport 32360-1-SHIPS, december 2019.
- [Ref 8.] Ruud Verbeek (TNO), Pieter 't Hart (MKC), Jeroen Pruyn (TU Delft), Jurrit Bergsma (TNO) “Final Report: Assessment of alternative fuels for seagoing vessels using Heavy Fuel Oil”, 2020. MKC, TNO and TU Delft
- [Ref 9.] IPCC. “Anthropogenic and natural radiative forcing”, Cambridge University Press, 2013
- [Ref 10.] JRC. “JEC Well-To-Wheels Analysis”, Publications office of the European Union, 2014
- [Ref 11.] Ruud Verbeek, Jorrit Harmsen, Pim van Mensch “Towards an alternative fuels strategy for the Port of Rotterdam – A review of options until 2050”, 2017. TNO
- [Ref 12.] P.S. van Lieshout, V. de Jonge, R. Verbeek, A.W. Vredeveltdt, S. Finner “Green Maritime Methanol: WP3 factsheet and comparison with diesel and LNG”, 2020 TNO 2020 R11822
- [Ref 13.] SPEC tool MARIN, zie ook <https://sustainablepower.application.marin.nl/>
- [Ref 14.] Gerwin Zomer, Shari Finner, Jorrit Harmsen, Lex Vredeveltdt, Paula van Lieshout “Green Maritime Methanol Operational aspects and the fuel supply chain”, 2020 TNO 2020 R11105
- [Ref 15.] TNO, “Power-2-Fuel Cost Analysis”, 2020
- [Ref 16.] Brynolf, S., Fridell, E., & Andersson, K., “Environmental assessment of marine fuels: liquefied natural gas, liquefied biogas, methanol and bio-methanol”, Journal of cleaner production, 86-9, 2014
- [Ref 17.] R. Verbeek, M. Verbeek: “LNG for trucks and ships: fact analysis: Review of pollutant and GHG emissions”, TNO report 2014 R11668. February 2015
- [Ref 18.] M.C. ter Brake, K.F. Kauffman, J. Hulskotte: Sea Shipping Emissions, “Netherlands Continental Shelf, 12 Mile Zone and Port Areas”, MARIN Report No. 31270-1-MSCN-rev.1, 2017

