



BETTER SHIPS, BLUE OCEANS

Emissie reductie duwboten, een verkenning

Onderzoek naar mogelijke energiedragers en impact op scheepsindeling

Rapport nr. : 32933-1-SHIP
Datum : maart 2021
Versie : 1.1
Eindrapport

Emissie reductie duwboten, een verkenning

Onderzoek naar mogelijke energiedragers en impact op scheepsindeling

MARIN projectnummer. : 32933
MARIN Project Manager : Wytze de Boer

Aantal pagina's : 52

Opdrachtgever : Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Postbus 2232
3500 GE UTRECHT

Gerapporteerd door : Joost Schot, Alex Grasman, Wytze de Boer
Gecontroleerd door : Christian Veldhuis

Versie	Datum	Status	Gecontroleerd door
1.1	10 maart 2021	Update (redactie)	Wytze de Boer
1.0	16 februari 2021	Definitief	Wytze de Boer
0.9d	20 januari 2021	concept	Christian Veldhuis
0.9	18 december 2020	concept	direct betrokkenen

INHOUDSOPGAVE	PAGINA
SAMENVATTING.....	III
1 INTRODUCTIE.....	1
2 ACHTERGROND	2
2.1 Emissie doelen	2
2.2 Emissie reductie mogelijkheden voor duwboten	2
3 VOORBEELDSCHEPEN EN OPERATIONEEL PROFIEL	5
3.1 Grote duwboot	5
3.1.1 Hoofdkenmerken Veerhaven duwbotten.....	5
3.1.2 Operationeel profiel Veerhaven duwbotten.....	6
3.1.3 Impact ondiep water op hoofdkenmerken grote duwboot	8
3.1.4 Operationeel profiel ontwerp grote duwboot	9
3.2 Kleinere duwboot	9
3.2.1 Hoofdkenmerken duwboot Donau	10
3.2.2 Operationeel profiel duwboot Donau	10
3.2.3 Hoofdkenmerken emissiearm ontwerp kleinere duwboot	12
3.2.4 Operationeel profiel emissiearm ontwerp kleinere duwboot	12
4 VERKENNEN EN RANGSCHIKKEN OPLOSSINGEN	15
4.1 Grote duwboot	15
4.2 Kleinere duwboot.....	20
4.3 Ontwikkelingen alternatieve energiedragers	22
4.3.1 Bio-diesel.....	22
4.3.2 Bio-LNG.....	23
4.3.3 Waterstof.....	24
4.3.4 Methanol.....	24
4.3.5 Ammoniak	25
4.4 Ontwikkelingen motoren en emissie eisen	25
4.5 Discussie alternatieve energiedragers	27
5 CONCEPTUELE INDELING/ONTWERP	30
5.1 Grote duwboot	30
5.2 Kleinere duwboot.....	34
6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	37
REFERENTIES.....	39
APPENDIX 1: STAGE V EMISSIE EISEN	A1.1 – A1.2

SAMENVATTING

In deze studie zijn oplossingen verkend voor significante emissiereductie voor een duwboot ontwerp. Daarbij is met name de Green Deal doelstelling voor 2030 gehanteerd: tenminste 55% CO₂ reductie in 2030. Voor het borgen van inbreng uit de praktijk is contact gezocht met twee reders en een scheepswerf.

Er zijn twee bestaande duwbotten als vertrekpunt genomen: een “grote duwboot”, een duwboot van Veerhaven, en een kleinere, de “Donau” van Frank Rycquart Scheepvaart. In deze studie is een ontwerp op hoofdlijnen gerealiseerd met hulp van Scheepswerf gebroeders Kooiman. Voor beide duwbotten vormde het operationeel profiel (het vaargebied en de wijze waarop de duwbotten worden ingezet) de basis. Daarnaast is bij het ontwerp van de grote duwboot ook rekening gehouden met langere periodes van laag water.

Op basis van dat operationeel profiel en de maximale afmetingen van de duwbotten zijn de mogelijkheden voor verschillende energiedragers verkend. Met als belangrijkste vragen;

- Met welke energiedrager (welke alternatieve “brandstoffen”) kan de beoogde emissiereductie bereikt worden?
- Is de techniek voor de opslag van “brandstof” aan boord, en voor de energie-omzetters (“motoren”) zo ver gevorderd dat je deze binnen enkele jaren kan toepassen bij de bouw van zo’n duwboot? En wordt daarbij ook rekening gehouden met de Stage V emissienorm?
- Wat is de verwachting qua beschikbaarheid van die alternatieve brandstof langs de vaarroute?

Gegeven het beschikbare gewicht voor brandstof en motoren is per alternatieve brandstof de autonomie (de vaarduur zonder te bunkeren) berekend en vergeleken met de autonomie die de duwboot met duwbakken tenminste moet kunnen realiseren. Daarna is een indeling gemaakt om zo de belangrijkste componenten in te passen in de beschikbare ruimte.

De vergelijking van de verschillende alternatieve brandstoffen leverde het volgende inzicht op (situatie eind 2020);

- Batterijen en waterstof bieden het meeste potentie voor het reduceren van broeikasgassen en andere schadelijke emissies. Echter toepassing van batterijen betekent op dit moment een zeer beperkte autonomie, en ook waterstof vraagt zoveel ruimte en gewicht dat dit alleen bij een vaarprofiel met een beperkte autonomie toegepast kan worden.
- Met methanol en ammoniak kunnen de broeikasgassen ook sterk gereduceerd worden. Bij beide is een beperkte hoeveelheid diesel nodig voor de ontbranding en beide vereisen nabehandeling om de overige schadelijke emissies te reduceren. Methanol scoort iets beter als het gaat om de reductie van andere emissies
- Bij toepassing van bio-LNG is een forse reductie van broeikasgassen mogelijk, maar wat minder dan de aangescherpte doelstelling voor 2030 (55% reductie). Bio-LNG scoort goed qua (geringe) uitstoot van schadelijke emissies.
- Bij gebruik van bio diesel is de reductie van broeikasgassen afhankelijk van het type bio diesel. Daarbij is ook nabehandeling vereist.

Op basis van die vergelijking is een keuze gemaakt voor een alternatieve brandstof om het ontwerp op hoofdlijnen te gaan ontwikkelen. Het dilemma hierbij was de afweging: is de beoogde CO₂ reductie in 2030 te realiseren als je de duwboot omstreeks 2023 wilt bouwen. Zijn de technieken voldoende volwassen en is de alternatieve brandstof beschikbaar als het schip in 2024 in de vaart komt?

De combinatie tenminste 55% CO₂ reductie en in 2023 de duwboot bouwen is naar onze inzichten nu niet haalbaar. In 2023 bouwen betekent kiezen voor biodiesel of bio-LNG, met als belangrijk aandachtspunt dat het systeem ook Stage V gecertificeerd moet zijn. In dat geval wordt, naar onze

huidige inzichten, de beoogde CO₂ reductie van 55% niet bereikt. Meer dan 55% CO₂ reductie betekent een ontwerp dat niet in 2023 kan worden gebouwd én een alternatieve brandstof die naar verwachting in 2024 niet voldoende beschikbaar is.

Uiteindelijk is niet gekozen voor het uitwerken van een ontwerp met biodiesel of bio-LNG. Er is voldoende ervaring met het ontwerpen van een duwboot met dieselmotoren en er zijn ook ontwerpen van een duwboot op LNG. Op basis van de te behalen autonomie zijn methanol en ammoniak nu de belangrijkste kandidaten. Vanwege de giftige eigenschappen van ammoniak, en de nog minder uitontwikkelde technieken (inzicht eind 2020) is besloten een indeling van de duwbotten bij gebruik van methanol uit te werken.

Voor de grote duwboot is een diepgangseis van 1.60m gehanteerd voor het varen bij laag water situaties. Dat leidde tot twee oplossingen, beide met een grotere breedte dan de huidige Veerhaven duwboot. In deze beide ontwerpen was het mogelijk de methanol tank op het dek te plaatsen.

1. Een concept ontwerp met een directe aandrijving op de schroefas, lengte 40m, breedte 18.5m
2. Een concept ontwerp met een elektrische aandrijving op de schroefas, lengte 40m, breedte 20m. Dit ontwerp is zwaarder, met name vanwege het extra gewicht door toepassing van generatoren in combinatie met elektromotoren. Om toch met een geringe diepgang te kunnen opereren is de breedte vergroot tot 20m.

Ook voor de kleine duwboot zijn twee oplossingen uitgewerkt, een oplossing met een directe aandrijving van de schroefas en een oplossing met generatoren in het voorschip en zogenaamde “azimuth thrusters” (roerpropellers) met een elektromotor voor de aandrijving. In deze ontwerpen is geen ruimte voor een methanol tank aan dek vanwege de beperkte afmetingen van de duwboot. De beschikbare ruimte aan dek is nodig voor de accommodatie en de stuurhut. Er is in dit geval genoeg ruimte om tanks onderdeks te plaatsen met voldoende loze ruimte rondom de methanol tanks (80 cm). Voor deze duwboot is er geen aanvullende eis voor een minimale diepgang.

De belangrijkste conclusies van deze studie zijn (zie ook hoofdstuk 6):

1. Voor een duwboot die in 2021 wordt ontworpen en in 2022/2023 gebouwd zijn de stage V eisen leidend en is toepassing van bio-diesel of bio-LNG de meest haalbare optie voor een forse broeikasgas reductie. Aandachtspunt daarbij is de wijze waarop de bio-brandstof wordt geproduceerd. Daarnaast zorgt het vrijkomen van methaan (methaanslip) ervoor dat de reductie van broeikasgassen van bio-LNG beperkter is. Met zo'n ontwerp lijkt een reductie van 55%, zoals beoogd in 2030, niet haalbaar.
2. Voor ontwerp en bouw van een zoveel mogelijk klimaat neutrale duwboot, die omstreeks 2024 in bedrijf wordt genomen lijkt een “dual fuel” verbrandingsmotor met methanol en diesel een technisch haalbare optie, maar dat geldt niet voor de commerciële beschikbaarheid van motoren. Daarbij wordt ook aangetekend dat er voor de verkrijgbaarheid van methanol langs de vaarweg vooralsnog geen duidelijke roadmap is. Op basis van de huidige inzichten is bio-methanol een factor 2 duurder dan diesel. Echter, de productiemogelijkheden zijn beperkt. De kosten voor het gebruik van synthetische methanol worden nu een factor 4 tot 5 hoger ingeschat vergeleken met toepassing van diesel. Aandachtspunt hierbij is dat zo'n motor ook aan de stage V eisen moet voldoen.

Dit leidt tot de volgende aanbeveling:

Gelet op de urgentie van de klimaatdoelstelling is snel duidelijkheid nodig over de verkrijgbaarheid van groene brandstoffen langs de binnenvaarwegen. Uitgangspunt is de tijdige beschikbaarheid in combinatie met toepasbaarheid voor de verschillende type binnenschepen met hun operationeel profiel. Dit vormt dan de basis voor de roadmap van leveranciers, ontwerpers, regelgevers en classificatie bureaus.

1 INTRODUCTIE

In het voorjaar van 2020 heeft Rijkswaterstaat MARIN verzocht een voorstel te doen voor een vervolg van de verkenning uit 2019. Op basis van het onderzoek in 2019 adviseerde MARIN om te focussen op het realiseren van concrete concept ontwerpen (retrofit en/of nieuwbouw) op basis van de broeikasgas emissie doelstellingen van de Green Deal (voor de binnenvaart is doelstelling om in 2030 de CO₂ gereduceerd te hebben met 40-50% ten opzichte van 2015 [Ref 1.]). En die ontwerpen te realiseren voor enkele veel voorkomende type schepen. Eind 2019 heeft MARIN dit geadresseerd door in haar R&D in 2020 een verkenning voor een retrofit oplossing voor een 180m * 11.40m koppilverband op te nemen. Daarbij is de samenwerking gezocht met de praktijk. Dit onderzoek wordt in 2021 afgerond.

In de lopende pilot projecten in Nederland zijn nu nog weinig oplossingsrichtingen te vinden voor de middelgrote en grote duwboten die in het ARA gebied (ARA - Antwerpen-Rotterdam-Amsterdam) en op de rivieren opereren. In het overleg over de scope van dit project is afgesproken om een verkenning naar mogelijk brandstoffen voor duwboten uit te voeren en op basis daarvan voor een grote duwboot en voor een kleinere duwboot concept indelingen uit te werken om zo een betere indruk te krijgen van bruikbare oplossingen die qua volume en gewicht passen in de beperkte afmetingen van deze schepen. Ook vanuit het perspectief: als er nu een duwboot wordt ontworpen, zijn er dan oplossingen voorhanden om aan de doelen van de Green Deal in 2030 te voldoen. In juni 2020 is dit vastgelegd in een opdracht van Rijkswaterstaat aan MARIN, met het zaaknummer 31160994.

Gelet op het beoogd resultaat en de expertise binnen MARIN is inbreng vanuit een operator/reder/eigenaar en vanuit een ontwerp/bouw perspectief een vereiste voor een goede aansluiting op de praktijk. Scheepswerf gebroeders Kooiman, thyssenkrupp Veerhaven en Frank Rycquart Scheepvaart zijn bereid gevonden gedurende deze studie met ons van gedachten te wisselen en hun inzichten/ervaringen in te brengen.

Deze studie is als volgt aangepakt;

1. Er zijn twee voorbeeldschepen gekozen: een grote duwboot (lengte 40m) en een kleinere duwboot (lengte 22.5m). Deze zijn gebruikt voor de vertrekpunten vanuit vaarprofiel/missie en autonomie (aantal dagen/uren kunnen varen zonder bunkeren).
2. De verkenning naar mogelijke groene brandstoffen is uitgevoerd met behulp van de MARIN SPEC Tool (Ship Power and Energy Concept Design). Daarbij is gekeken wat op korte termijn mogelijk is en wat opties zijn voor de langere termijn. De data in deze tool is beschikbaar via de link <https://sustainablepower.application.marin.nl/>.
3. Met de resultaten van stap 2 is een keuze gemaakt voor een oplossing die tenminste een CO₂ reductie van 55% kan realiseren (aangescherpte eis Green Deal in 2030) en die technisch gezien (min of meer) binnen handbereik is. Daarbij is ook gelet op de eisen ten aanzien van de overige schadelijke emissies. Voor die oplossingen zijn op een hoog niveau de consequenties bepaald in termen van de impact op volume en op gewicht van de belangrijkste componenten voor de energieopslag en de omzetting van die energie in voortstuwing en hulpvermogen.
4. Vervolgens is dit voor de twee duwboten uitgewerkt in een indelingsplan waarbij de belangrijkste "bouwblokken" zijn ingepast in de beschikbare ruimte en in het beschikbare gewicht van de duwboot. Daarbij is beoogd een concept ontwerp te realiseren dat aan de emissie doelstellingen van 2030 kan voldoen, waarbij ontwerp en de bouw in 2022/2023 plaatsvinden en de duwboot in 2024 in bedrijf wordt genomen.

2 ACHTERGROND

2.1 Emissie doelen

In de Green Deal voor zeevaart, binnenvaart en havens worden de ambities en doelstellingen voor de binnenvaart uitgewerkt binnen het nationale klimaatakkoord. In de Green Deal wordt voor de binnenvaart de ambitie gesteld om in 2030 de CO₂ gereduceerd te hebben met 40-50% ten opzichte van 2015 [Ref 1.] en om in 2035 de milieuverontreinigende stoffen door de binnenvaart met 35% tot 50% gereduceerd te hebben. Verder wordt het doel gesteld om in 2024 een CO₂ reductie van minimaal 20% te bereiken en een reductie van 10% in milieuverontreinigende stoffen. In september 2020 heeft de EU bekendgemaakt de ambities voor 2030 te willen aanscherpen naar een reductie van CO₂-emissies van 55%. In 2050 wordt een nagenoeg emissievrije en klimaat neutrale binnenvaart beoogd.

Hiernaast zal de Stage-V emissie norm vanaf 2021 volledig van kracht zijn voor nieuw te bouwen binnenvaartschepen. Deze regels omvatten alle motoren voor voortstuwing met een vermogen groter dan 37 kW en meer dan 560 kW voor hulpvermogen. Deze norm richt zich op de reductie van schadelijke emissies, niet op de uitstoot van broeikasgassen. Een overzicht van de emissie eisen is gegeven in Appendix 1.

In dit project is met name de CO₂ emissie reductie gekwantificeerd en gerelateerd aan de huidige operatie van de betreffende duwbotten. De reductie van emissies van schadelijke stoffen zijn kwalitatief (mee) in beschouwing genomen. Daarbij is de CO₂ equivalente uitstoot gebruikt. Dit is het gecombineerde effect van CO₂, CH₄ (methaan) en N₂O (lachgas) uitgedrukt in een equivalente hoeveelheid CO₂. Op deze wijze worden de verschillende bijdragen gecombineerd en in één getal uitgedrukt.

2.2 Emissie reductie mogelijkheden voor duwbotten

Er lopen al een flink aantal projecten voor de ontwikkeling en realisatie naar meer klimaat neutrale binnenschepen. Dit betreft met name ferry's en vrachtschepen, zie ook [Ref 5.]. Voor duwbotten die op langere trajecten varen zijn nu geen concrete projecten bekend (herfst 2020). Gelet op de samenstelling van de Nederlands vloot kunnen duwbotten niet "achterblijven". In onderstaande overzichten is dat geïllustreerd. In 2018 omvatte de Nederlandse vloot 778 duwbotten, zie Tabel 2-1.

Tabel 2-1: Verdeling laadvermogen over scheepsgrootte van de NL vloot in 2018, ontleend aan [Ref 2.].

Scheepsklassen (situatie 2018)		Aantal (afgerond)	Laadvermogen totaal (afgerond)	Gemiddeld laadvermogen per schip/samenstel
t/m CEMT klasse III	Kleinere schepen	1.850	1.190 kton	640 ton
CEMT klasse IV	Middelgrote schepen	660	1.020 kton	1.545 ton
CEMT klasse V&VI	Grote schepen	1.040	3.240 kton	3.115 ton
Samenstellen (CEMT IV, V, VI)	Koppverbanden	130	630 kton	4.845 ton
Duwbotten (en bijbehorende duwbakken) (CEMT I, II, III)	Kleinere duwstellen (diverse samenstellingen en afmetingen)	269	60 kton	220 ton
Duwbotten (incl. duwbakken) (CEMT IV & V)	Middelgrote en grotere duwstellen	497	934 kton	1.880 ton
Duwbotten CEMT VI	4 & 6 baks duwstellen	12	175 kton	14.600 ton (met 6 bakken)

Voor de Rijnvloot is in het Prominent project [Ref 3.] geïnteriseerd hoeveel vermogen er is geïnstalleerd, zie Tabel 2-2 hieronder.

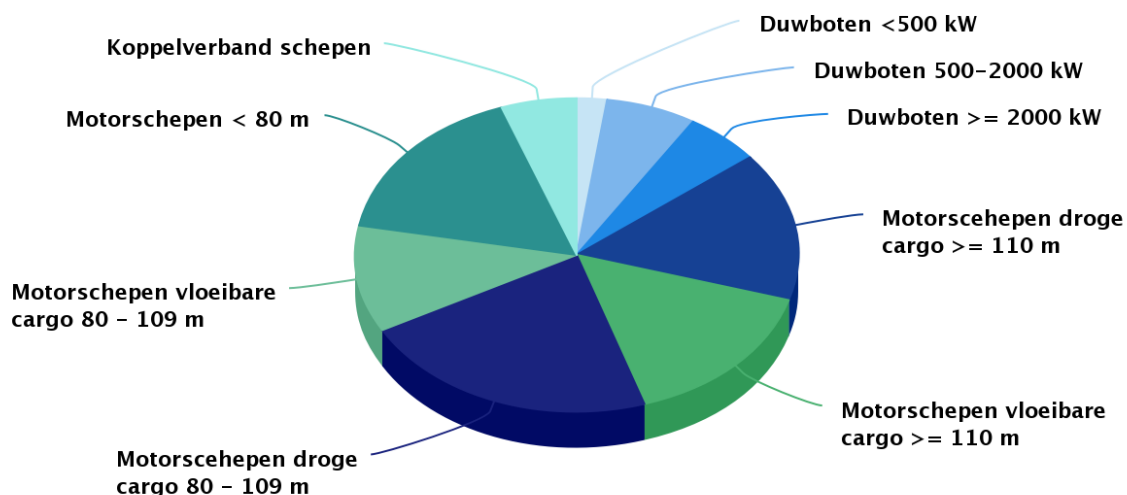
Tabel 2-2: *Kentallen ten aanzien motoren en vermogens van verschillende binnenvaartscheepstypes in West Europa [Ref 3.].*

Fleet families identified in PROMINENT	Average number of engines installed	Power (in kW) per propulsion engine installed			Average total engine power installed (kW)
		25 th percentile	Mean	75 th percentile	
Passenger vessels (hotel/cruise vessels)	1.4	110	304	385	482
Push boats < 500 kW (total engine power)	1.2	137	216	275	247
Push boats 500-2000 kW (total engine power)	1.6	351	542	700	847
Push boats ≥2000 kW (total engine power)	2.7	1,251	1,288	1,360	3,458
Motor vessels dry cargo ≥110m length	1.3	1,118	1,337	1,617	1,742
Motor vessels liquid cargo ≥110m length	1.3	1,118	1,390	1,660	1,780
Motor vessels dry cargo 80-109m length	1.1	520	707	880	764
Motor vessels liquid cargo 80-109m length	1.1	640	853	985	954
Motor vessels <80 m. length	1.1	165	280	368	302
Coupled convoys	1.9	956	1,178	1,388	2,237

Ten aanzien van het brandstofverbruik van de verschillende scheepstypen is in het Prominent project een inschatting gemaakt voor de gehele Europese binnenvaart vloot, zie Figuur 2-1.

Aandeel brandstofverbruik in % per scheepstype in Europa

Bron: Prominent | Jaar: 2015



Figuur 2-1: *Aandeel brandstofverbruik per scheepstype in Europa [Ref 4.].*

De verdelingen in bovenstaande tabellen en figuren kunnen niet één op één op de Nederlandse vloot worden toegepast, maar dienen als indicatie.

Door de gegevens van Tabel 2-1 en Tabel 2-2 te combineren kan op basis van deze gegevens een inschatting worden gemaakt van het totale geïnstalleerd vermogen in duwboten, zie Tabel 2-3.

Tabel 2-3: *Inschatting totaal vermogen per scheepsklasse.*

	aantal	gemiddeld geïnst. vermogen [kW]	totaal kw [kW]
kleinere schepen	1850	302	558,700
middelgr schepen	660	954	629,640
grote schepen	1040	1750	1,820,000
koppelverbanden	130	2237	290,810
duwboter klein	270	247	66,690
duwboter groot/mid	491	847	415,877
duwboter grootste	19	3458	65,702
totalen:	4460 schepen	n.v.t.	3,847,419 kW

Er zijn in dit overzicht totaal 780 duwboten (ruim 17% van het aantal schepen), die goed zijn voor ruim 14% van het geïnstalleerd vermogen. De daadwerkelijke uitstoot hangt af van het vermogen dat daadwerkelijk wordt gebruikt en de uren dat er wordt gevaren. Voor de inschatting van de uitstoot wordt hetzelfde percentage aangenomen: de duwboten nemen ruim 14% van de uitstoot van de NL binnenvaartvloot voor hun rekening.

Dit kan worden vergeleken met de cijfers uit de prominent studie, zie Figuur 2-1. Voor alle duwboten in Europe komt het aandeel in het verbruik van de duwboten uit op ruim 19% in 2015. Dit is een wat groter aandeel.

De uitstoot van CO₂ van de binnenvaart in NL is ruim 1.8 a 1.9 Mton per jaar, ontleend aan [Ref 2.], dit betreft de uitstoot van "Tank to Wake". Qua aandeel van de duwvaart wordt de eerder genoemde "ruim 14%" afgerond op 15%. Dat geeft een geschatte uitstoot door de duwboten van ca 0.27 Mton per jaar ("Tank to Wake", waarbij "Well to Tank" plus "Tank to Wake" de uitstoot over de hele keten geeft: "Well to Wake").

De verschuivingen in ladingstromen als gevolg van de wereldwijde transitie naar zero emissie en een meer circulaire economie is in dit (beperkte) onderzoek niet in beschouwing genomen.

3 VOORBEELDSCHEPEN EN OPERATIONEEL PROFIEL

In deze verkenning naar alternatieve energiedragers voor duwboten zijn twee duwboten als vertrekpunt genomen: een grote duwboot, lengte 40m, geschikt voor vier- en zesbaks-duwvaart (een Veerhaven duwboot) en een kleinere duwboot, lengte 22.5m, die met één of twee duwbakken vaart. Deze duwboten zijn al geruime tijd in de vaart en kunnen ook als referentie dienen voor wat betreft de inschatting qua CO₂ emissies.

De verkenning betreft de opties qua energiedragers en het inpassen van de energieopslag en energie omzetters in een duwboot. Voor de 40m duwboot is ook de eis van Veerhaven omtrent opereren bij lage waterstanden in beschouwing genomen. Voor de 22.5m duwboot is qua vaarprofiel en missie uitgegaan van de duwboot "Donau" van Frank Rycquart Scheepvaart.

In dit hoofdstuk worden de kenmerken van deze schepen beschreven die de invoer zijn voor het uitwerken van de implicaties van een transitie naar emissie arme energiedragers.

3.1 Grote duwboot

3.1.1 Hoofdkenmerken Veerhaven duwboten

De hoofdkenmerken van dit type duwboot zijn gebaseerd op de "Veerhaven" duwboten van thyssenkrupp Veerhaven BV. Deze schepen varen het grootste deel van het jaar met 6 duwbakken erts en kolen vanuit Rotterdam, Amsterdam en Antwerpen naar Duisburg. Voor nieuwe schepen wil Veerhaven tot een (minimale) diepgang van 1.60 kunnen varen om langer door te kunnen varen bij lagere waterstanden. De hoofdkenmerken van de Veerhaven duwboot zijn gegeven in Tabel 3-1.

Tabel 3-1: Hoofdkenmerken Veerhaven duwboot.

Lengte over alles	40.0	m
Breedte over alles	15.0	m
Ontwerp diepgang	1.75	m
WATERVERPLAATSING	785	m ³
Aantal schroeven	3	-
Schroef diameter	2.05	m

De hoofdkenmerken van de duwbakken zijn gegeven in Tabel 3-2. De configuratie van de bakken is verschillend tussen de beladen bergvaart en de onbeladen dalvaart.

Tabel 3-2: Hoofdkenmerken duwbakken.

Configuratie duwbakken bergvaart (aantal in lengte * aantal in de breedte)	3 * 2	-
Configuratie duwbakken dalvaart	2 * 3	-
Lengte bak	76.50	m
Breedte bak	11.45	m
Diepgang minimaal beladen	1.60	m
Diepgang max	4.02	m
Diepgang leeg	0.63	m
WATERVERPLAATSING bak minimaal beladen (ca)	1250	m ³
WATERVERPLAATSING bak beladen op 3.60m	2950	m ³

In Tabel 3-3 is het vermogen van de aandrijflijn van de Veerhaven duwboot gegeven.

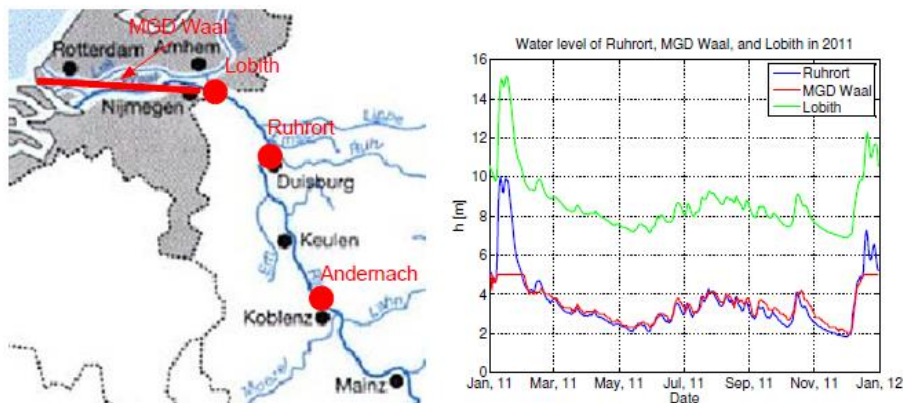
Tabel 3-3: Kenmerken aandrijflijn Veerhaven duwboot.

Geïnstalleerd vermogen hoofdvoortstuwing (diesel – direct)	3 x 1360	kW
Geïnstalleerd hulpvermogen	4 x 315	kW

3.1.2 Operationeel profiel Veerhaven duwbotten

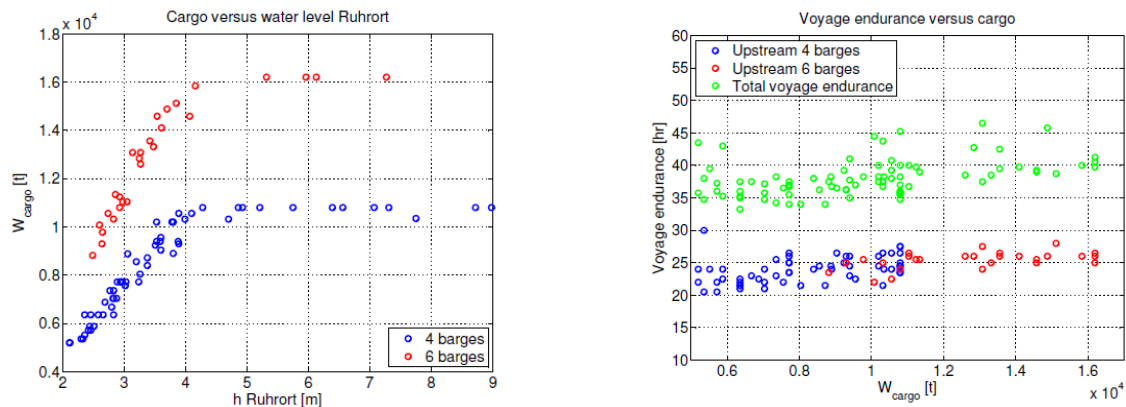
De Veerhaven duwbotten varen voornamelijk de route tussen Rotterdam en Duisburg, een afstand van ongeveer 230 km [Ref 6.]. Tijdens de operatie zijn er een aantal condities te onderscheiden. In de bergvaart zijn de bakken vol beladen, tot een diepgang die wordt bepaald door de waterstand op de rivier. Bij de dalvaart zijn de bakken leeg. Daarnaast moet het schip tijdens laden en lossen manoeuvreren om de bakken te koppelen.

Als maximale diepgang wordt 3.9m gehanteerd en er wordt met minimaal 0.1m kielspeling gevaren bij Ruhrort [Ref 6.]. Als de waterstand bij Lobith lager is dan NAP +8.5m moet met 4 bakken in plaats van 6 gevaren worden. Naast de waterdiepte van Lobith zijn ook de “pegels” van Andernach en Ruhrort relevant. Daarnaast is de Minst Gepeilde Diepte op de Waal relevant voor de operatie. Een voorbeeld van de waterdiepte variatie over het jaar is gegeven in Figuur 3-1.



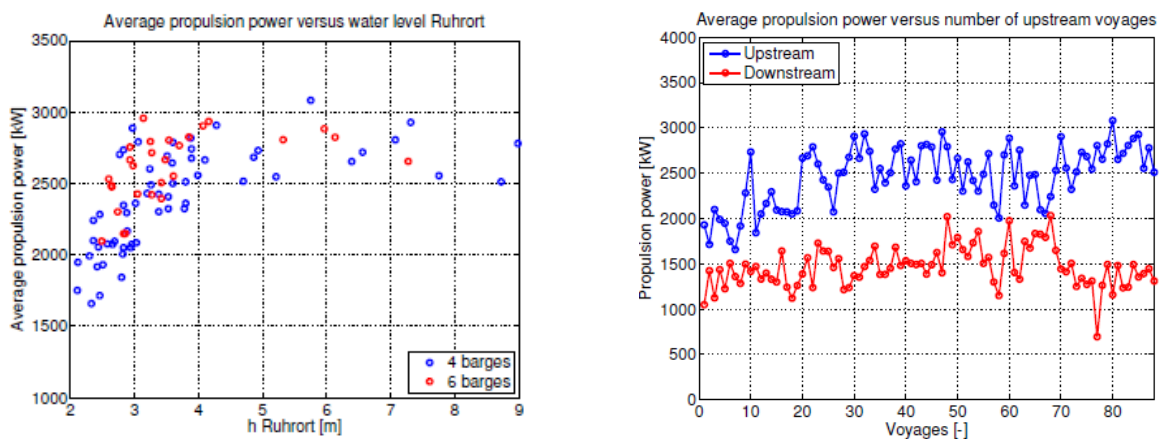
Figuur 3-1: Waterdiepte gedurende het jaar 2011 voor de verschillende peil locaties. Hogere waterdiepten dan 5m voor MGD Waal worden weergegeven als 5m. zie [Ref 6.].

De massa van de lading per trip en de duur van de reis variëren met de waterdiepte op de rivier. Beschikbare meetresultaten over een operationele periode van zes maanden geeft de verdeling te zien in Figuur 3-2. Vanzelfsprekend neemt de massa van de vracht af bij lage waterdieptes. Het gemiddelde vervoerde gewicht per trip is ca. 11 kton (11.000 ton). De duur van de reis blijft min of meer gelijk. De reisduur neemt beperkt af wanneer minder vracht wordt meegenomen bij lagere waterstanden. De bergvaart duurt tussen de 20 tot 28 uur, terwijl de dalvaart 12 tot 15 uur duurt [Ref 6.]. Uit de totale reistijd kan afgeleid worden dat manoeuvreren voor laden en lossen 2 tot 3 uur in beslag neemt. Hieruit volgt dat tijdens de bergvaart gemiddeld 9.9 km/h gevaren wordt en in de dalvaart tot ca. 19 km/h, dit zijn snelheden “over de grond”.

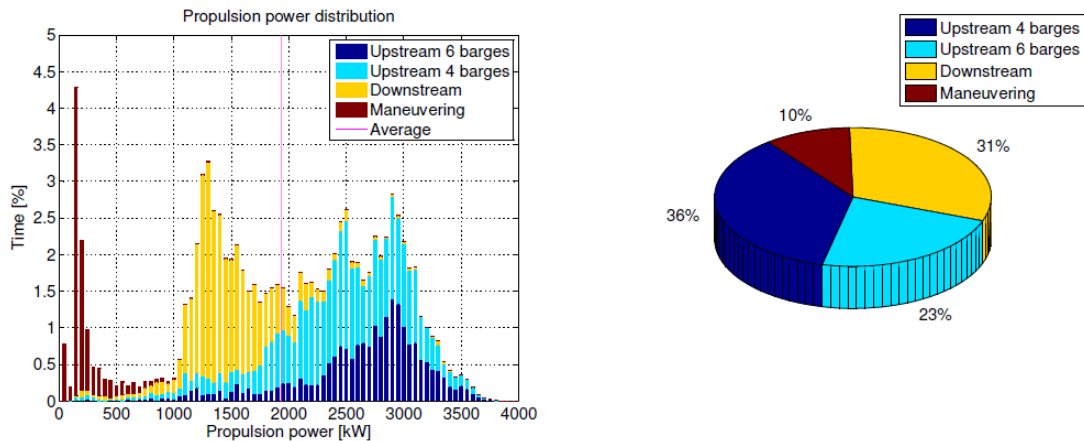


Figuur 3-2: Vervoerde lading versus de waterdiepte (Pegel Ruhrort) en reisduur versus vervoerde lading.

Naast de beladingscapaciteit is ook het gebruikt vermogen afhankelijk van de waterdiepte. Dit zal met name variëren als gevolg zijn wisselende belading en dus de wisselende waterverplaatsing van het duwstel als geheel. Dit is weergegeven in Figuur 3-3. Tenslotte is in Figuur 3-4 de verdeling van het gebruikte voortstuwingsvermogen over de tijd en de verdeling over de operationele condities gegeven, zie [Ref 6.]. Het gemiddelde totale voortstuwingsvermogen over alle operationele condities komt uit op 1935 kW (asvermogen). Voor de elektrische systemen is een hulpvermogen van 100 kW aangenomen [Ref 6.]. Het vermogen voor de boegschroef is buiten beschouwing gelaten.



Figuur 3-3: Gebruikt voortstuwingsvermogen afhankelijk van de waterdiepte gemeten bij Ruhrort (links) en de verschillen in vermogen tussen de berg en dalvaart over verschillende reizen.



Figuur 3-4: Verdeling van totaal voortstuwingsvermogen over de tijd getoond met een interval van 50 kW en de verdeling van de operationele condities over de tijd.

In Tabel 3-4 is het operationeel profiel vereenvoudigd in een bergvaart en een dalvaart en is de manoeuvreer conditie verwaarloosd. Dit is een conservatieve aanname als de totale vaartijd wordt genomen voor verdere analyse, omdat het gebruikt vermogen tijdens manoeuvreren lager is.

Tabel 3-4: Aangenomen operationeel profiel en prestaties Veerhaven duwboot.

		Bergvaart	Dalvaart
Tijd	[uur]	24	13,5
Tijd relatief in %	[%]	64	36
Snelheid over de grond	[km/h]	9,6	17,0
Lading	[ton]	9.800	0
Asvermogen voortstuwing (shaftpower)	[kW]	2.319	1.374
Elektrisch vermogen hulpsystemen	[kW]	100	100

Noot: Gemiddelde lading is ontleend aan [Ref 6.], de lading varieert van 5.000 tot 16.000 ton, afhankelijk van de waterstand.

3.1.3 Impact ondiep water op hoofdkenmerken grote duwboot

Ten aanzien van de operationele eisen is in dit project rekening gehouden met een langere inzetbaarheid bij laag water in vergelijking met de huidige duwbotten van Veerhaven. Dit vereist een kleinere diepgang (1.60m). Om toch voldoende draagvermogen te realiseren heeft dit een grotere breedte tot gevolg (18.50m). De hoofdkenmerken van de ondiep water duwboot zijn gegeven in Tabel 3-5.

Tabel 3-5: Hoofdkenmerken grote duwboot aangedreven door vier schroeven.

Lengte over alles	40.0	m
Breedte over alles	18.5	m
Ontwerp diepgang	1.60	m
Waterverplaatsing	850	m ³
Aantal schroeven	4	-
Schroef diameter	1.95	m

3.1.4 Operationeel profiel ontwerp grote duwboot

Het benodigde totaal asvermogen is lager ingeschat in vergelijking met de Veerhaven duwbotten door twee aanpassingen. Door de grotere breedte kunnen 4 of zelfs 5 schroeven ingepast worden. Door het groter gecombineerd schroefoppervlak neemt de voortstuwing efficiëntie toe. In deze studie, op basis van vereenvoudigde berekeningen, is de toename ingeschat op respectievelijk 4% en 7%. Dit effect wordt ook wel “distributed propulsion” genoemd, hierin speelt de toename van het schroefoppervlak en het benutten van het zogenaamde volgstroomveld een belangrijke rol.

Deze inschatting voor effect van het aantal schroeven is afgeleid van de Ka schroefserie met “optimale toeren” in het operationele werkpunt van de schroeven. Hierbij zijn de interactie coëfficiënten (w , t , η_r) constant verondersteld. Dit wordt ook verondersteld in [Ref 9.].

De toename van de weerstand als gevolg van de extra breedte van de duwboot is in deze studie niet in beschouwing genomen.

Daarnaast is er in het recente verleden onderzoek gedaan naar de extra weerstand van de visstaart roeren ten opzichte van andere roerprofielen en zijn ook de manoeuvreer prestaties vergeleken [Ref 8.]. Visstaartroeren worden toegepast om de manoeuvreerprestaties te verbeteren, dit gaat ten koste van extra weerstand. In deze studie is daarom uitgegaan van NACA profiel roeren, wat het benodigd vermogen verminderd met ca. 10%. Daarmee wordt wat ingeleverd op met name de draaicapaciteit bij lage vaarsnelheid.

Samenvattend vermindert de vermogensbehoefte van het ontwerp van de emissie arme duwboot ten opzichte van de Veerhaven duwboot. De toegepaste aanpassingen in het ontwerp waaronder vier in plaats van drie schroeven en minder weerstand door toepassing van een ander roerprofiel, geven een significante reductie in de vermogensbehoefte voor de voortstuwing van gemiddeld 13%. Dit draagt direct bij aan de beoogde emissie besparing.

De gegevens zijn voor het ontwerp van de emissie arme duwboot zijn samengevat in Tabel 3-6. Let op: in deze tabel is geen rekening gehouden met de toenemende periodes met laag water op de rivier.

Tabel 3-6: *Aangenomen operationeel profiel en prestaties grote duwboot voor ondiep water met vier schroeven.*

		Bergvaart	Dalvaart	Gemiddelde
Tijd	[uur]	24	13.5	
Tijd relatief in %	[%]	64	36	
Gemiddelde snelheid over de grond	[km/h]	9,6	17,0	
Lading	[ton]	9.800	0	
Schroefvermogen voortstuwing	[kW]	2.003	1.161	1.700
Elektrisch vermogen hulpsystemen	[kW]	100	100	

NB: snelheid over de grond is hier bepaald door afstand (ca. 227 km.) te delen door de reistijd, zie ook [Ref 6.]. In de dalvaart worden in de praktijk ook wat hogere snelheden over de grond gerealiseerd.

3.2 Kleinere duwboot

Voor de kleinere duwboot is uitgegaan van het schip “Donau” waarvan informatie beschikbaar is gesteld door de eigenaar.

3.2.1 Hoofdkenmerken duwboot Donau

Het schip heeft de hoofdkenmerken zoals gegeven in Tabel 3-7. De kenmerken van de duwbakken zijn gegeven in Tabel 3-8. Er wordt met een of twee bakken gevaren, waarvan de afmetingen van de bakken kunnen verschillen.

Tabel 3-7: Hoofdkenmerken kleine duwboot aangedreven door twee schroeven.

Lengte over alles	22.50	m
Breedte over alles	10.04	m
Maximale diepgang	2.35	m
Waterverplaatsing	312	m ³
Aantal schroeven	2	-
Schroef diameter	1.7	m

Tabel 3-8: Hoofdkenmerken duwbakken.

Configuratie bakken	Twee lang of twee breed	-
Gemiddelde lengte bak	70.0 (geschat Europa I)	m
Gemiddelde breedte bak	10.50	m
Diepgang leeg	Onbekend	m
Gemiddelde diepgang beladen	2.70	m
Gemiddelde waterverplaatsing bak leeg	400	m ³
Gemiddelde waterverplaatsing bak beladen	1670	m ³

Tenslotte zijn in de tabel hieronder de vermogens van de huidige configuratie voor de duwboot "Donau" gegeven.

Tabel 3-9: Kenmerken aandrijflijn duwboot "Donau".

Geïnstalleerd vermogen hoofdvoorstuwing	2 x 803	kW
Geïnstalleerd hulpvermogen (boegschroef)	394	kW

3.2.2 Operationeel profiel duwboot Donau

Voor de kleinere duwboot is het operationeel profiel opgesteld op basis van afgelezen motordata en bunker gegevens van de duwboot Donau. Het gemiddelde brandstofgebruik is:

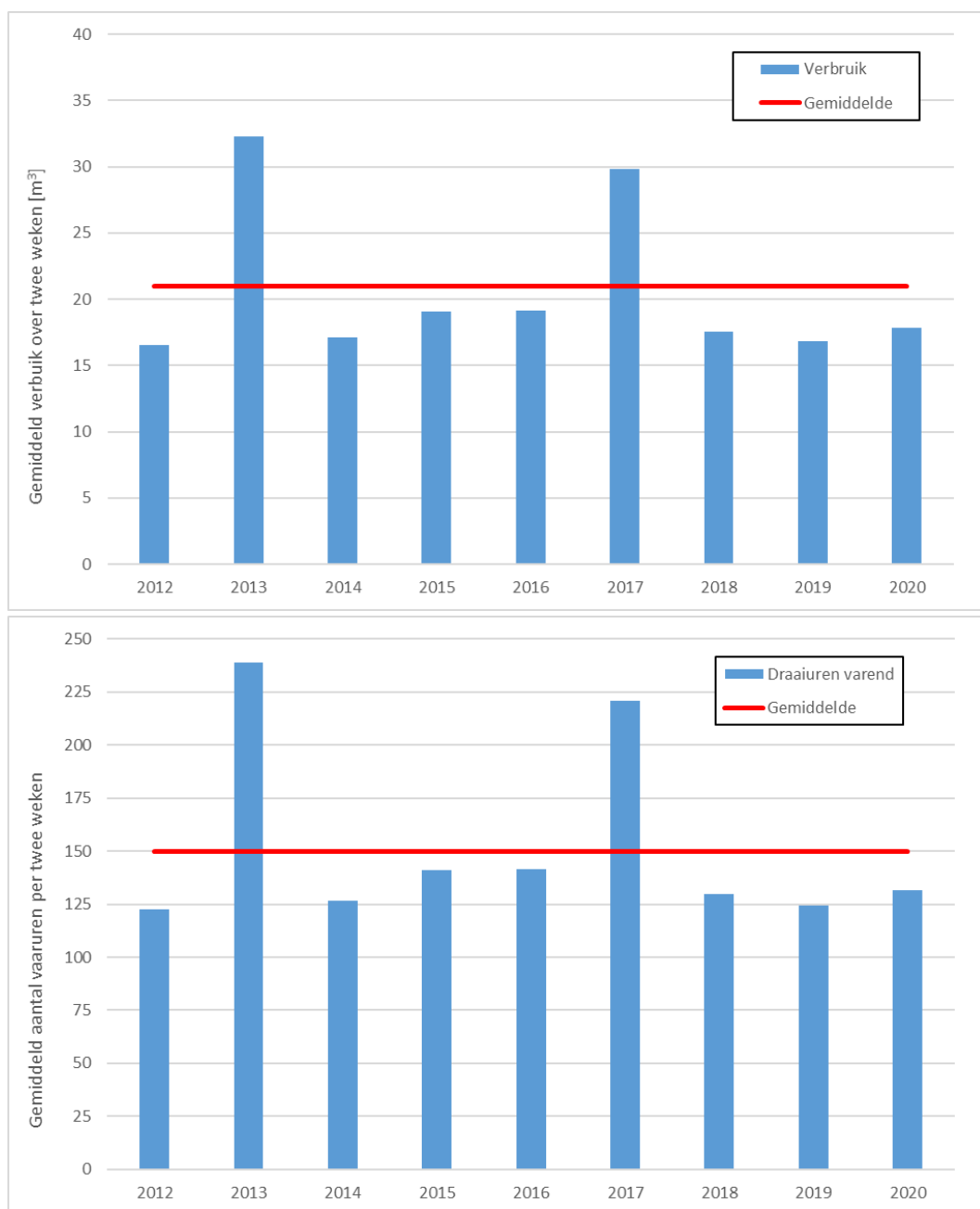
- In operationele conditie ca 64.5 l/h per motor.
- Stationair 7 tot 9 l/h per motor.

Hieruit is het gemiddelde vermogen afgeleid op basis van een aangenomen specifiek brandstofverbruik van 205 g/kWh en een brandstof dichtheid van 845 kg/m³.

Het schip vaart met name vanuit Rotterdam of Amsterdam, en gaat richting Drachten, Meppel, Zwolle, Wansum, Oss, Veghel of Grobbendonk in België. Hierbij is een gemiddelde snelheid van 13.5 km/h aangenomen. Grofweg zal er hierom maximaal rond de 300 km gevaren moeten worden voor een retour tocht. Er worden geen restricties toegepast op de diepgang van deze duwboot (voor ondiep water condities), in dit vaargebied is dat niet aan de orde, en de geladen bakken hebben een grotere diepgang dan de duwboot.

Het schip vaart met een of twee duwbakken van variabele afmetingen met een gemiddelde breedte van 10.5m en een gemiddelde beladen diepgang van 2.7m. Er wordt 65% van de tijd met twee bakken gevaren en aangenomen is dat de overige 35% met één bak wordt gevaren. Daarbij wordt de helft van de tijd wordt met volle bakken gevaren, de andere helft van de tijd wordt met lege bakken gevaren.

Verder zijn voor het schip bunker data beschikbaar gesteld voor de periode 2012-2020. Hieruit is het verbruik per week af te lezen. Door gebruik te maken van het brandstofgebruik in operationele conditie en stationair zijn hieruit de vaaruren afgeleid. Op dit moment wordt er om de twee weken gebunkerd, waarbinnen gemiddeld 21 m³ brandstof gebruikt wordt. De berekende vaartijd berekend over deze periode is 150 uur. De spreiding per jaar is te zien in Figuur 3-5. Het stationair verbruik en verbruik voor hulpvermogen is in deze studie niet expliciet meegenomen. De duwboot Donau beschikt over een as generator die maximaal 65 kW levert. Omdat het brandstofverbruik van de hoofdmotoren ook het aandrijven van de as-generator betreft, is dit hulpvermogen impliciet meegenomen.



Figuur 3-5: Gemiddeld verbruik en aantal vaaruren over twee weken afgeleid uit de bunker gegevens van De Donau.

Op basis van deze praktijkinformatie is een inschatting gemaakt van het gebruikte vermogen in de verschillende situaties. Dit is gegeven in Tabel 3-10.

Tabel 3-10: Aangenomen operationeel profiel en prestaties duwboot de Donau.

		Onbeladen		Beladen	
Aantal bakken	[-]	2	1	2	1
Tijd	[uur/jaar]	1170	630	1170	630
Tijd relatief in %	[%]	32.5	17.5	32.5	17.5
Snelheid over de grond	[km/h]	13.5	13.5	13.5	13.5
Lading	[ton]	0	0	2540	1270
Schroefvermogen voortstuwing	[kW]	420	280	780	540
Elektrisch vermogen hulpsystemen	[kW]	71	71	71	71

3.2.3 Hoofdkenmerken emissiearm ontwerp kleinere duwboot

De hoofdkenmerken van het emissiearme ontwerp van de kleinere duwboot wijken af van het referentie schip “de Donau”. Er is uitgegaan van een voller onderwater schip met een hogere waterverplaatsing dan ontvangen voor “de Donau”. Uit overleg met Kooiman blijkt dit een gangbare schatting voor een gemiddeld schip van dit scheepstype, al kan dit nadelig zijn voor de aanstroom naar de schroef. Daarnaast is uitgegaan van een roerconfiguratie met twee visstaart roeren per schroef. Voor dit ontwerp is gekeken naar het relatieve effect van het vergroten van het schroefoppervlak, om de hydrodynamische efficiëntie van de voortstuwing te verhogen. Daarnaast is het effect van roerpropellers en andere typen roeren op het brandstofverbruik onderzocht.

Tabel 3-11: Hoofdkenmerken kleine duwboot aangedreven door twee schroeven.

Lengte over alles	22.50	m
Breedte over alles	10.04	m
Maximale diepgang	2.35	m
Waterverplaatsing	370	m ³
Aantal schroeven	2 roer-propellers of 3 schroeven	-
Schroef diameter	2.04 (2 roer-propellers) of 1.65 (3 schroeven)	m

3.2.4 Operationeel profiel emissiearm ontwerp kleinere duwboot

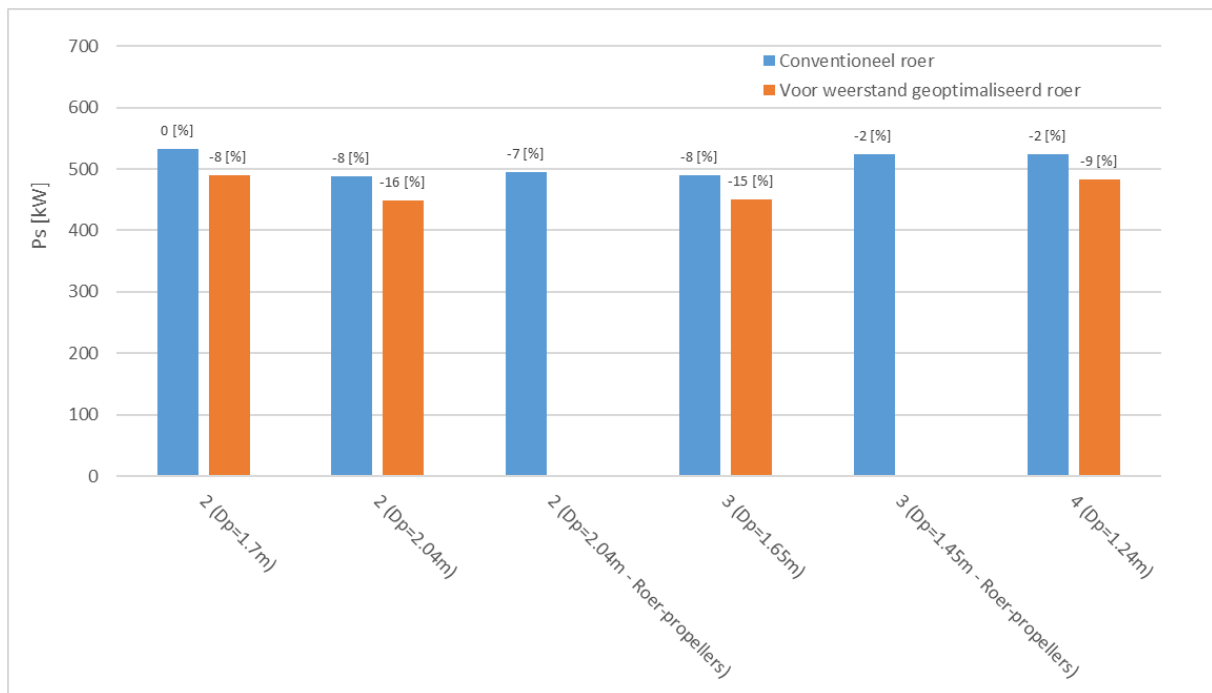
Voor het emissiearme ontwerp van de kleinere duwboot is gekeken naar de toepassing van een grotere schroefdiameter of een groter aantal (kleinere) schroeven. Hiernaast is een schatting gedaan voor het effect van een voor weerstand geoptimaliseerd roer ten opzichte van de twee visstaart roeren die nu per schroef zijn toegepast op basis de resultaten uit [Ref 8.].

Bij toepassing van een elektrische overbrenging zouden zogenaamde “azimuthing thrusters”, ook wel roerpropellers een optie kunnen zijn. Daarom zijn deze ook opgenomen in het overzicht in Figuur 3-6.

De afstand tussen de schroeven is bepaald door een afstand van 0.75 keer de straalbuis diameter aan te nemen voor de uitvoering met vaste aslijnen en een afstand van 1.0 keer de straalbuis diameter voor roerpropellers. Er is een grotere afstand tussen de roerpropellers aangenomen zodat deze in staat zijn om te draaien. De volgende alternatieven zijn in beschouwing genomen:

- Alternatief roerprofiel.
- Twee schroeven met grotere schroefdiameter (D_p – “Diameter propeller”).
- Toepassing twee roerpropellers (in plaats van vaste schroef/straalbuis en roer).

- Drie vaste schroeven met straalbuis (in plaats van twee).
- Drie roerpropellers.
- Vier vaste schroeven met straalbuis.



Figuur 3-6: Verandering in het totaal schroefvermogen per alternatief.

In bovenstaande figuur is het vermogen aan de schroefas voor de verschillende alternatieven vergeleken ten opzichte van de situatie met de originele schroefdiameter van 1.7m. Per alternatief is het percentuele verschil weergegeven.

Tenslotte zijn uitgangspunten voor de operationele profielen bepaald en hieronder samengevat.

Tabel 3-12: Aangenomen operationeel profiel en prestaties kleinere duwboot (2 roerpropellers).

		Onbeladen		Beladen		Gemiddelde
Aantal bakken	[-]	2	1	2	1	
Tijd	[uur/jaar]	1170	630	1170	630	
Tijd relatief in %	[%]	32.5	17.5	32.5	17.5	
Snelheid over de grond	[km/h]	13.5	13.5	13.5	13.5	
Lading	[ton]	0	0	2540	1270	
Schroefvermogen voortstuwing	[kW]	391	260	725	502	500
Elektrisch vermogen hulpsystemen	[kW]	71	71	71	71	

Tabel 3-13: Aangenomen operationeel profiel en prestaties kleinere duwboot (3 schroeven).

	Onbeladen		Beladen		Gemiddelde
Aantal bakken [-]	2	1	2	1	
Tijd [uur/jaar]	1170	630	1170	630	
Tijd relatief in % [%]	32.5	17.5	32.5	17.5	
Snelheid over de grond [km/h]	13.5	13.5	13.5	13.5	
Lading [ton]	0	0	2540	1270	
Schroefvermogen voortstuwing [kW]	357	238	663	459	450
Elektrisch vermogen hulpsystemen [kW]	71	71	71	71	

4 VERKENNEN EN RANGSCHIKKEN OPLOSSINGEN

Voor het behalen van de emissie reductie ambities zoals gesteld in de Green Deal zeevaart, binnenvaart en havens, worden in dit hoofdstuk de implicaties van alternatieve energiedragers besproken. Hierbij wordt in dit onderzoek specifiek naar het behalen van de gestelde ambities voor het reduceren van de broeikasgas emissies in termen van de equivalente CO₂ uitstoot gekeken. Hierbij is uitgegaan van een te behalen reductie van 55% in 2030, waarbij als referentie het huidig ontwerp van de grote en kleinere duwboot is gekomen. Er is hierbij aangenomen dat de operatie in termen van vaargebied, te vervoeren lading en gemiddelde snelheid ongewijzigd blijft.

Voor de overgang naar een andere energiedrager spelen naast de te behalen CO₂ emissie reductie verschillende andere aspecten een rol:

1. Reductie van schadelijke emissies, de Stage V eisen zijn hier leidend.
2. De inpasbaarheid in het scheepsontwerp, waarbij de ingenomen volume en massa een belangrijke rol spelen. Hierdoor kan de oplossing in zijn geheel niet inpasbaar zijn, of er wordt minder "brandstof" meegenomen, waardoor de autonomie, de vaarafstand zonder te bunkeren, afneemt.
3. De bedrijfsvoering, waarbij zowel de installatie kosten als de brandstofkosten een belangrijke rol spelen.
4. De aan de oplossing verbonden risico's, zowel met betrekking tot de techniek als onzekerheid in het beschikbaar komen van componenten en de brandstof. Dit aspect is in eerste instantie meegenomen door middel van het "Technical Readiness Level" (TRL). Dit varieert van 1 (basis principe bekend) tot 9 (systeem beproeft in operationele omstandigheid). Hierbij is van niveau 4-6 de techniek in ontwikkeling en wordt deze vanaf niveau 7-8 gedemonstreerd door middel van prototypes in operationele omstandigheden.
5. De maatschappelijke acceptatie en de veiligheid van een energiedrager. Deze aspecten zijn niet gekwantificeerd maar de geschiktheid van een energiedrager op maatschappelijk vlak wordt wel genoemd in paragraaf 4.3.

Voor oplossingen die op de korte termijn (hier 2024) toegepast kunnen worden is een TRL groter dan 7 aangenomen (inschatting Q3 2020). Voor de langere termijn (hier 2030) hangt het af van de snelheid van de ontwikkelingen en is een minimum TRL waarde (Q3 2020) van 5 gehanteerd. Er kan een TRL waarde worden toegekend aan verschillende facetten: aan het productieproces van de energiedrager, aan de opslag van de energiedrager aan boord, en aan de omzetting van de energiedrager naar vermogen (door verbrandingsmotor ofwel brandstofcel). In de praktijk willen reders zekerheid over een oplossing en zullen oplossingen met een hogere TRL willen toepassen.

4.1 Grote duwboot

Het concept ontwerp van de grote duwboot is gebaseerd op de "Veerhaven" duwboten, zie paragraaf 3.1. Veerhaven wil dat nieuwe duwboten met een kleinere diepgang kunnen varen in vergelijking met de bestaande duwboten, in verband met de verwachte toename van laagwater periodes. Hiervoor zijn in het verleden ontwerpstudies gedaan met LNG als brandstof [Ref 9.]. Daarnaast is een uitgebreide studie verricht naar verschillende machinekamer configuraties [Ref 6.].

Op basis van de bekende gegevens van de bestaande duwboot is het overzicht van de gemiddelde equivalente CO₂ uitstoot in ton per uur afgeleid, zie Tabel 4-1. Hierbij is uitgegaan van de zogenoemde "Well-To-Wake" emissies, waarbij ook de (soms negatieve) emissies tijdens de productie van de brandstof verwerkt zijn. Dit is noodzakelijk om een goed beeld te krijgen van de emissie besparing door het overstappen naar een andere energiedrager. ("Well to Wake" = "Well to Tank" + "Tank to Wake", met "wake" de volgstroom. Vergelijk "Well to Wheel" = "Well to Tank" + "Tank to Wheel" bij onder andere vrachtauto's.)

Tabel 4-1: Overzicht referentie en te behalen emissies voor de grote duwboot.

	“Well-To-Wake” CO ₂ emissies [t/h]
Emissies “Veerhaven” duwboot (referentie)	1.73
Emissies ondiep water ontwerp (hydrodynamische besparing)	1.49 (-14.0%)
Te behalen emissies in 2024 (20% reductie)	1.38
Te behalen emissies in 2030 (55% reductie)	0.78

Voor de selectie van de energiedragers is eerst op hoofdlijnen gekeken of het inpasbaar is binnen het ontwerp van de duwboot op basis van gewicht en volume met behulp van de SPEC methode (Ship Power and Energy Concept design), zie het documentatieblad in dit rapport.

(en <https://sustainablepower.application.marin.nl/>).

De kentallen die in deze methode worden gebruikt worden regelmatig geactualiseerd.

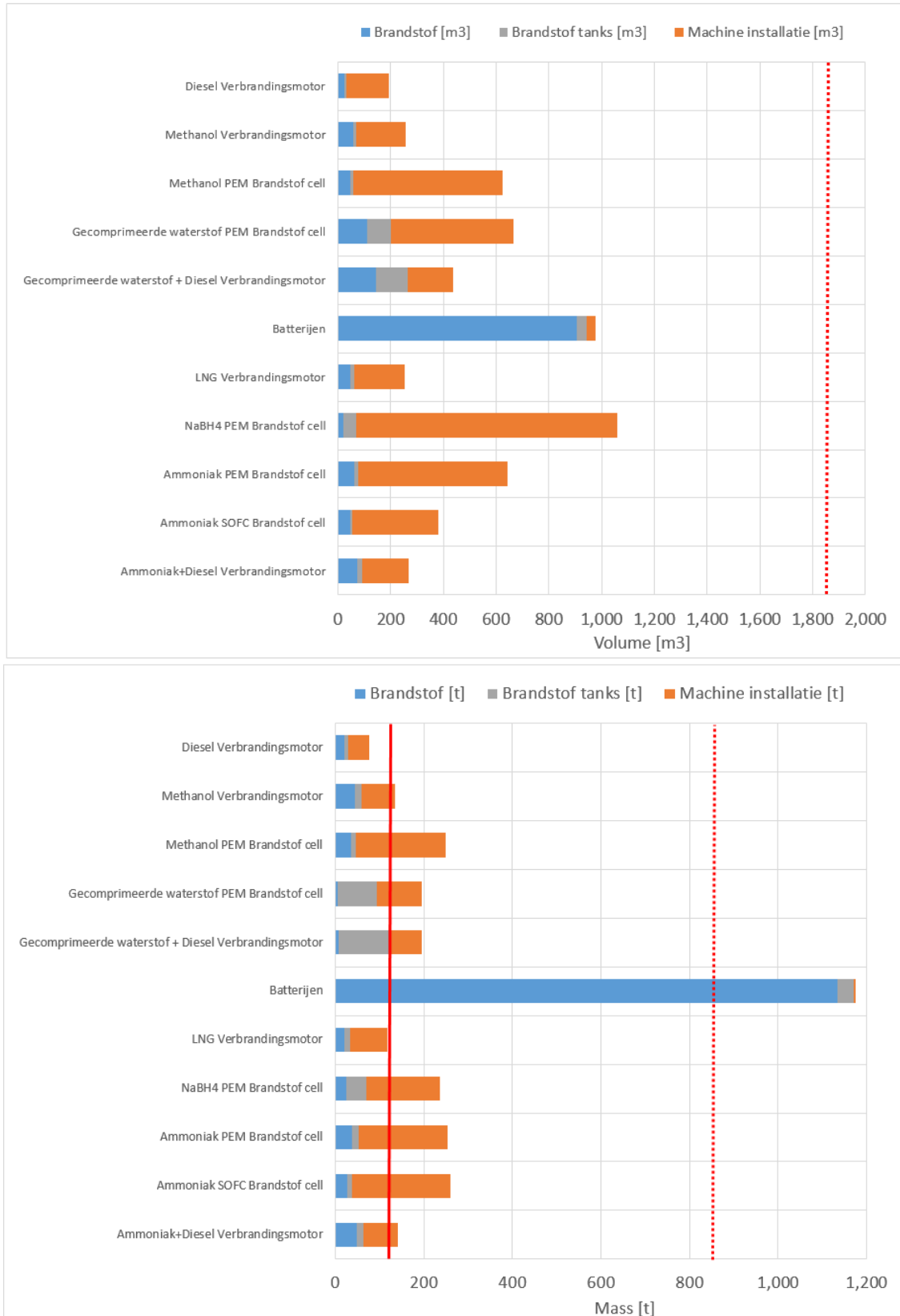
Voor toepassing van een energiedrager in een duwboot is in deze studie uitgegaan van oplossingen met een minimaal TRL niveau van 5 of meer¹. Op bovengenoemde website is te zien dat vele oplossingen mogelijk zijn, de lijst met oplossingen waarvan de TRL op alle systeemaspecten hoger dan 5 scoort is nog redelijk beperkt. Hieruit volgen de mogelijke energiedragers en systemen, zie Figuur 4-1. In de figuur is de impact van een oplossing op massa en volume weergegeven per energiedrager. Voor het toetsen van de inpasbaarheid is in samenspraak met Scheepswerf gebroeders Kooiman een gewicht schatting opgesteld, daaruit is het maximale gewichtsbudget voor energieopslag en motoren/machines bepaald. Hieruit volgt, voor dit concept ontwerp, dat het maximaal toegestane gewicht van de machine installatie en brandstof 125 ton is (gewicht van de brandstof zelf en het gewicht van de machines en constructie van de tanks en leidingen). Dit gewicht is direct afgeleid uit de maximale scheepsdiepgang (Tabel 3-5) en de vaste gewichtsposten van het schip: casco, accommodatie, hulpsystemen, etc.

Uit dit overzicht kunnen twee dingen worden afgeleid:

1. De energiebehoefte van het ontwerp is te groot om van een systeem met batterijen uit te gaan. De autonomie zou hierdoor ver onder de 48 uur uitkomen.
2. De massa en benodigde volumes van een systeem met brandstofcellen zijn significant groter dan bij toepassing van een verbrandingsmotor. Dit komt doordat er veel brandstofcellen nodig zijn voor de vermogens behoefte.

Gelet op de mogelijkheden binnen de randvoorwaarden voor een duwboot vallen batterijen en brandstofcellen af, de vereiste autonomie van 48 uur kan niet worden gerealiseerd. Hierbij moet genoemd worden dat brandstofcellen in de toekomst compacter en lichter zullen zijn, waardoor deze op termijn mogelijk wel inpasbaar kunnen zijn. Bij gebruik van gecompriëerde waterstof zullen de volumes en gewichten nog wel een beperkende factor blijven.

¹ Voor daadwerkelijk toepassing hanteren de reders een TRL niveau van tenminste 8.



Figuur 4-1: Massa en benodigd volume voor verschillende oplossingen berekend op basis van 48 uur autonomie met de SPEC methode met algemene scheepsparameters. De dikke rode lijn geeft de beschikbare massa in het schip en de gestippelde lijn de totale massa en inhoud van het schip.

Vervolgens is de analyse meer in detail toegespitst op een duwboot en is daarbij nagegaan wat de autonomie wordt bij de maximale massa van 125 ton van de tanks en de machines/installaties.

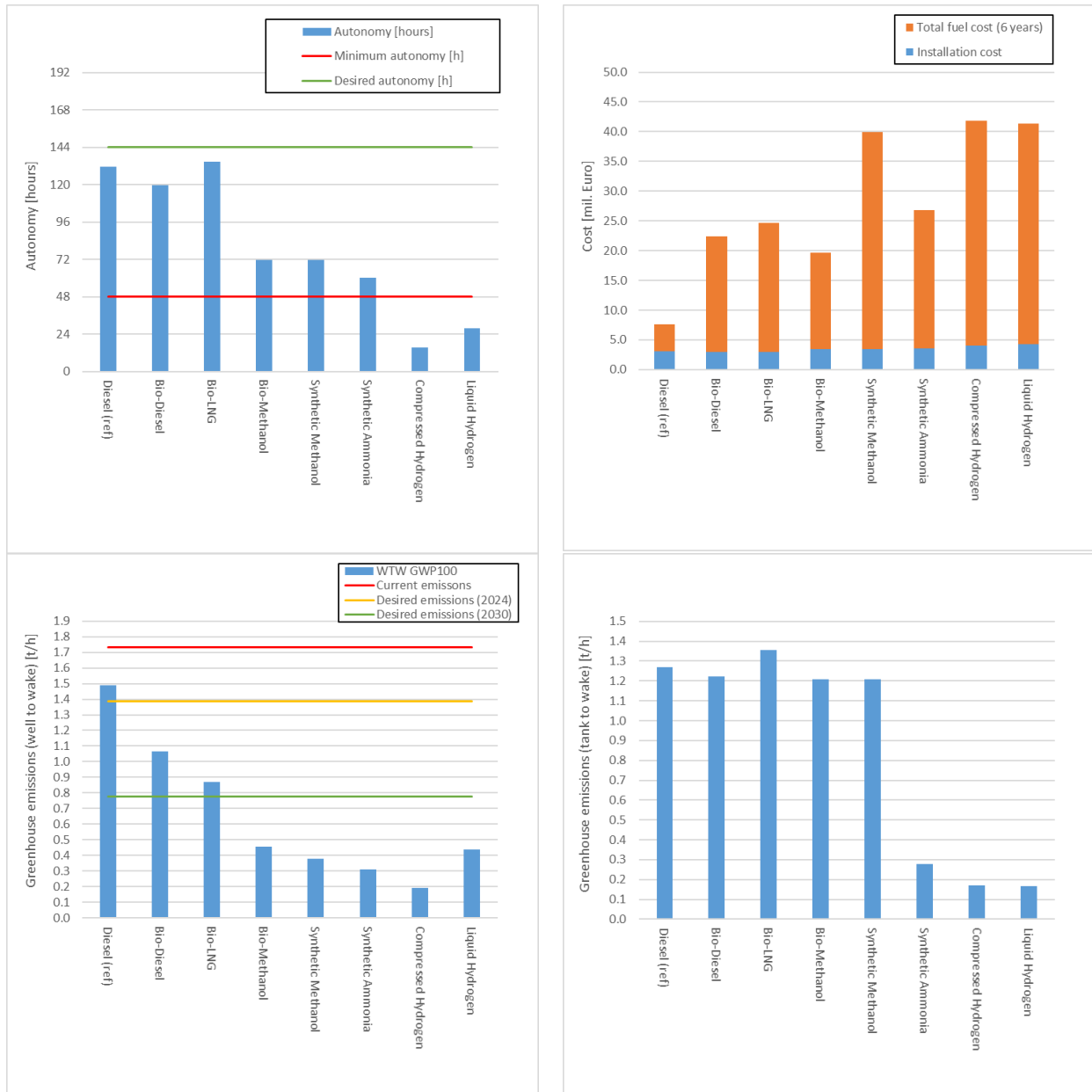
In de analyse is de maximale CO₂ equivalente reductie en de beoogde CO₂ equivalente reductie ingeschat. Hierbij zijn de oplossingen in Tabel 4-2 in beschouwing genomen. Om de inschatting te kunnen maken is ervan uitgegaan dat de technologie van de verbrandingsmotoren beschikbaar is voor verschillende brandstoffen. Voor de verschillende brandstoffen, opslag en hulpsystemen aan boord is wel sprake van een verschillend TRL niveau (inschatting Q3, Q4 2020).

Tabel 4-2: Geselecteerde oplossingen.

Energiedrager	Energieconversie	TRL energiedrager		TRL energieconversie
		productie [1]	opslag schip	
Diesel	"Compression Ignition" verbrandingsmotor	9	9	9
LNG	"Spark Ignition" verbrandingsmotor	9	9	9
Methanol en diesel	"Dual Fuel" verbrandingsmotor	5 (synthetisch) 7 (bio)	7	7
Gecomprimeerde waterstof en diesel	"Dual Fuel" verbrandingsmotor	8	6	7
Ammoniak en diesel	"Dual Fuel" verbrandingsmotor	5	6	5

De berekende CO₂ equivalente reductie is weergegeven in Figuur 4-2. De referentie met fossiele diesel heeft hierbij al een reductie door de grotere hydrodynamische efficiëntie van het ontwerp. Verder valt op dat bij gebruik van LNG en diesel de grootste autonomie wordt gerealiseerd. De afmetingen van de benodigde tanks voor de opslag van LNG lijken moeilijk inpasbaar in het ontwerp, waardoor de autonomie lager uit kan vallen. De emissie reductie voor diesel en LNG wordt bereikt door gebruik te maken van bio brandstoffen. Voor diesel is het gebruikt van biodiesel (50% HVO, 50% grijze diesel) onvoldoende om de beoogde emissie reductie te behalen. Hetzelfde geldt voor bio-LNG, waarbij "methaan slip" bijdraagt aan de CO₂ equivalente uitstoot. Dit is aardgas dat zelf vrijkomt bij de verbranding en een sterk broeikasgas is. Bij toepassing van methanol en ammoniak kan de vereiste minimale autonomie worden gehaald (Figuur 4-2).

De operationele kosten van bio-methanol en bio-LNG zijn het laagst. De huidige kosten van synthetische brandstoffen liggen hoger en zijn afhankelijk van de groene elektriciteitsprijs.



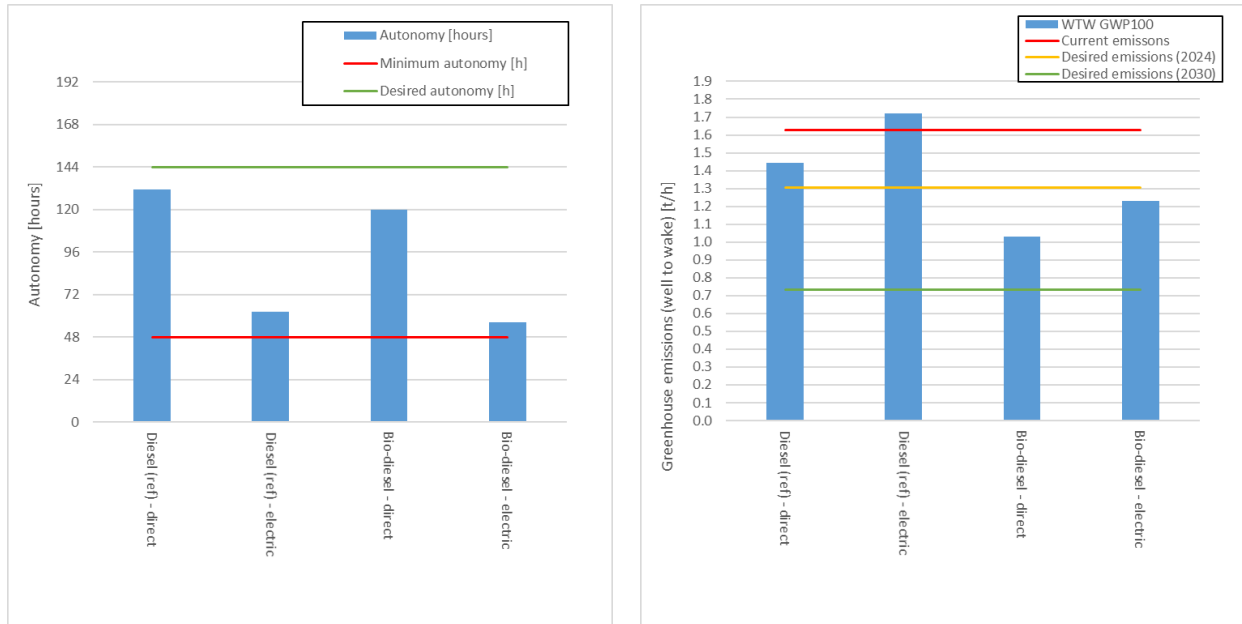
Figuur 4-2: Resultaten van de SPEC methode met specificatie scheepsparameters voor de grote duwboot. Hierbij is de massa die de aandrijfinstallatie met brandstof in beslag mag nemen vastgelegd en van de maximaal haalbare CO₂ reductie uitgegaan.

Door het afvallen van de brandstof cellen en batterijen lijkt het minder logisch om een elektrische overbrenging te selecteren bij continue belaste motoren. Dit kan tot meer overbrengingsverliezen en een grotere massa van de installaties leiden. Hierdoor zullen de operationele brandstofkosten toenemen en neemt de te behalen autonomie af.

Een elektrische overbrenging kan wel op basis van andere argumenten verkozen worden, denk aan:

- Meer flexibiliteit bij een overstap naar een andere energie/motor oplossing als die beschikbaar komt.
- Bij lage vermogens is het mogelijk alle schroeven aan te drijven ook met minder draaiende generatoren.
- Mogelijkheid voor "oprekken" van het onderhoudsinterval van de motoren (in situaties met lagere vermogensvraag kan een motor/generator uitgeschakeld worden).
- Meer flexibiliteit voor de indeling van de machinekamer.

Voor het halen van de stage-V emissie eisen worden toepassingen van relatief lichte high-speed motoren met een nominaal toerental rond de 1600-1800 RPM in combinatie met elektrische overbrenging toegepast. Het effect hiervan op de autonomie en verwachte CO₂ equivalente emissies is weergegeven in Figuur 4-3.



Figuur 4-3: Resultaten van de SPEC methode met specificatie scheepsparameters voor de grote duwboot voor het effect van directe en elektrische overbrenging met lichte “high-speed” motoren. Hierbij is de massa die de aandrijfinstallatie met brandstof in beslag mag nemen vastgelegd en van de maximaal haalbare CO₂ reductie uitgegaan.

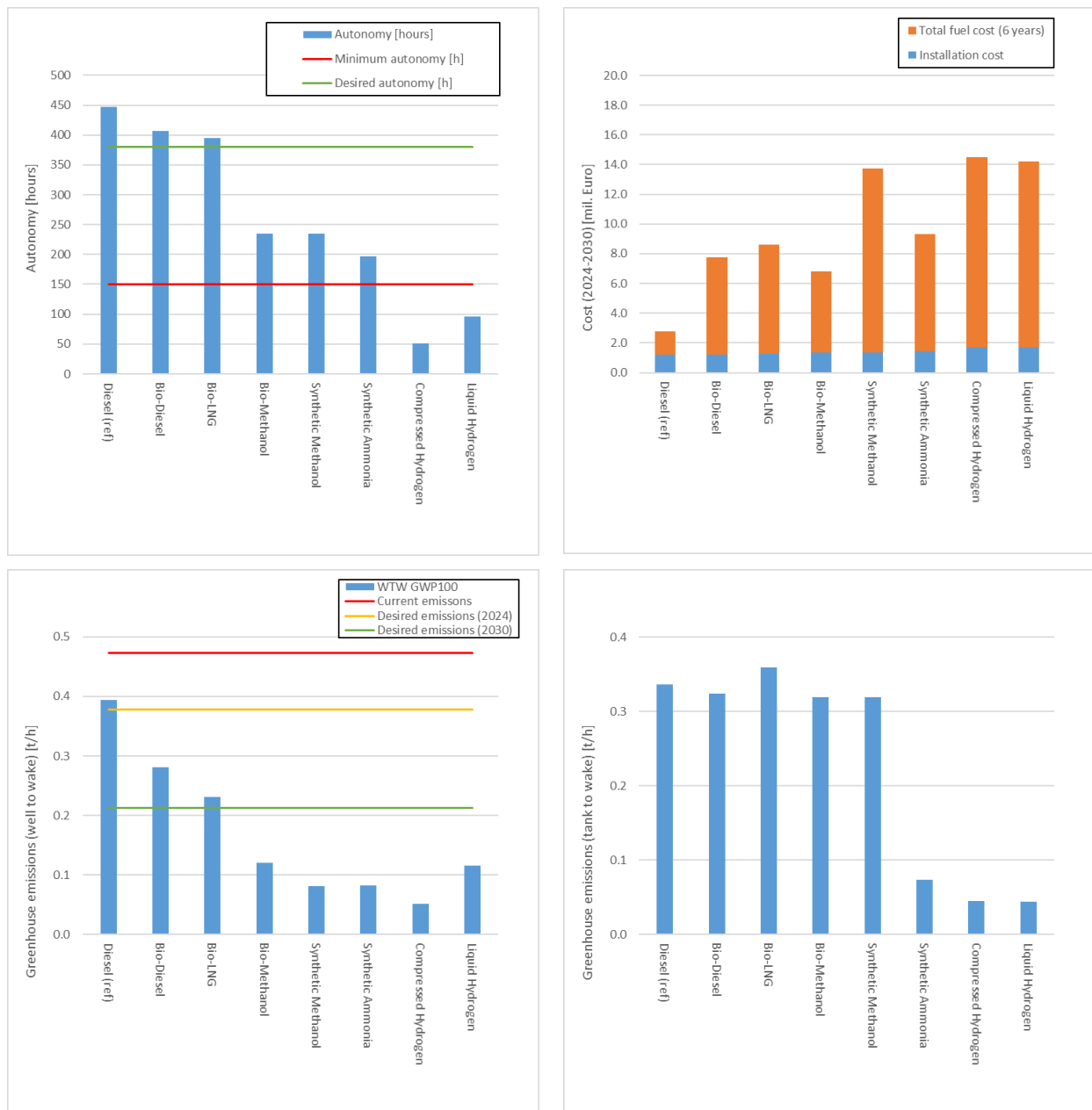
4.2 Kleinere duwboot

Voor de kleinere duwboot zijn dezelfde meest realistische opties in beschouwing genomen als voor de grote duwboot, gegeven in Tabel 4-2. De doelen en aanzien van te behalen emissie reductie staan in onderstaande tabel. Voor de analyse is uitgegaan van het drie-schroeven ontwerp, omdat in dat geval de grootste hydrodynamische besparing mogelijk is. Voor de analyse is uitgegaan van het “massa budget” (maximaal gewicht) voor de aandrijflijn en brandstofopslag van 85t op basis van het referentie schip “Donau”. In het ontwerpproces bleek dat er meer ruimte was voor de tanks en installaties, waardoor het massa budget toenam tot maximaal 140t. Het extra beschikbaar gewicht is slechts ten dele benut, omdat het beschikbare volume maatgevend bleek voor dit ontwerp.

Tabel 4-3: Overzicht referentie en te behalen emissies voor de kleine duwboot.

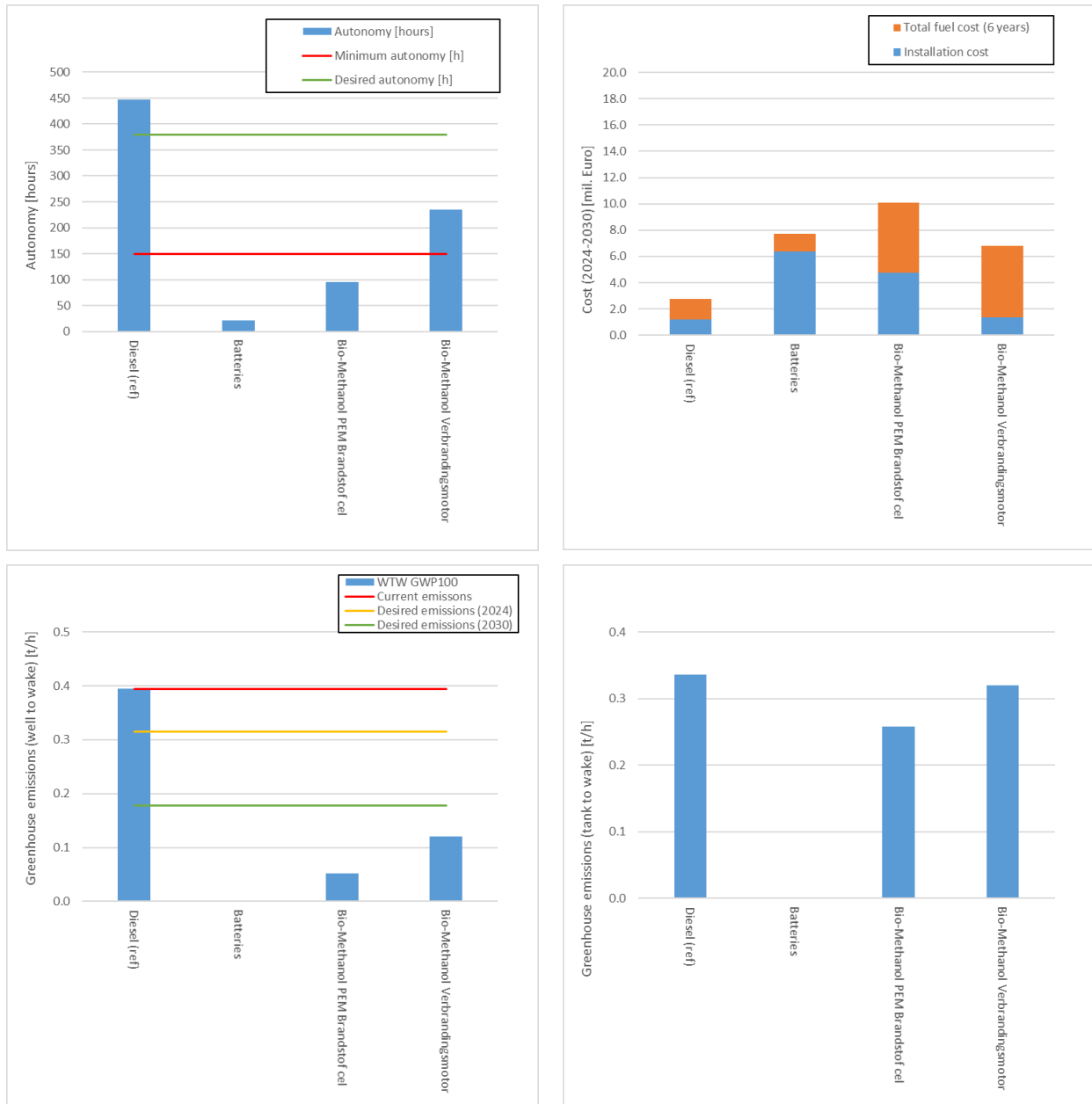
	“Well-To-Wake” CO ₂ equivalent emissions
	[t/h]
Emissies “De Donau” duwboot (referentie)	0.47
Emissies ontwerp 3 schroeven (hydrodynamische besparing)	0.40 (-16.0%)
Te behalen emissies in 2024 (20% reductie)	0.38
Te behalen emissies in 2030 (55% reductie)	0.21

In Figuur 4-4 hieronder zijn dezelfde opties getoond als voor de grote duwboot in Figuur 4-2. Hier vallen dezelfde conclusies aan te verbinden. Zowel methanol als ammoniak geven de beoogde emissie reductie bij minder autonomie tegen hogere brandstofkosten.



Figuur 4-4: Resultaten van de SPEC methode met specificatie scheepsparameters voor de kleine duwboot. Hierbij is de massa die de aandrijfinstallatie met brandstof in beslag mag nemen vastgelegd.

Door de relatief grotere beschikbare massa kunnen in dit concept ontwerp ook brandstofcellen en batterijen een optie zijn. Een oplossing met waterstof is geen alternatief omdat dit teveel volume vereist, dat volume is niet beschikbaar in deze duwboot. Voor de oplossing met methanol-brandstofcellen geldt dat hierdoor de flexibiliteit van een “dual-fuel” oplossing afvalt en de autonomie in de orde van 75 uur uitkomt. Voor batterijen zijn de installatie kosten hoger, maar dit zou op kunnen wegen tegen de lage operationele kosten. “Batterij-elektriciteit” is goedkoper is dan de toepassing van bijvoorbeeld bio of synthetische methanol. Wel is de autonomie zeer beperkt, ongeveer 20 uur, en bij het benutten van het maximaal gewicht van 140t zou dit op kunnen lopen tot 40 uur (bij toepassing van batterijen). Deze opties zijn weergegeven in Figuur 4-5.



Figuur 4-5: Resultaten van de SPEC methode met specificatie scheepsparameters voor de kleine duwboot. Hierbij is de massa die de aandrijfinstallatie met brandstof in beslag mag nemen vastgelegd.

4.3 Ontwikkelingen alternatieve energiedragers

4.3.1 Bio-diesel

Het principe van bio-diesel (renewable diesel fuels) is om diesel uit fossiele brandstoffen te vervangen door koolwaterstoffen met vergelijkbare verbrandingseigenschappen uit hernieuwbare natuurlijke bronnen. Dit heeft als groot voordeel dat de infrastructuur en het scheepsontwerp nauwelijks aangepast hoeven te worden. Omdat stage-V certificering van een motor direct is gekoppeld aan de toegepaste brandstof kunnen onder de stage-V emissie eisen zeer waarschijnlijk niet zomaar dit soort brandstoffen toegepast worden. De motor moet eerst voor die brandstof worden gecertificeerd. De uitstoot van broeikasgassen uit de schoorsteen van het schip blijft hiermee vergelijkbaar, al kan door de samenstelling van de brandstof andere vormen van schadelijke uitstoot wel verminderen. Via de productie van de benodigde grondstoffen wordt weer broeikasgas opgenomen, wat de “well-to-wake” emissies vermindert. Het is hierbij belangrijk dat de productie daadwerkelijk een groot deel van de

broeikasgas emissies wegneemt en geen grote negatieve invloed heeft op de omgeving. Een probleem kan zijn dan de productie van de biologische grondstoffen ten koste gaat van de voedselproductie. Ook kan dit ten koste gaan van vrije natuur, wat niet alleen biodiversiteit beïnvloedt, maar ook de CO₂ opname.

Een voorbeeld van bio-diesel zijn “Hydrotreated Vegetable Oils” (HVO) dat gewonnen kan worden uit bijvoorbeeld afval olie, koolzaad, zonnebloem, soja of palm olie. Hierbij wordt de olie bewerkt door een reactie met waterstof. Deze methode wordt gebruikt door onder andere Neste met vier fabrieken waaronder één in Nederland met een productie capaciteit van 1 miljoen ton per jaar. Hiernaast kan “Fatty Acid Methyl Ester” (FAME) uit vergelijkbare bronnen gebruikt worden door plantaardig vet (glycerine) te veresteren met behulp van methanol om zo de brandstof dunner te maken. Dit kan echter voor problemen zorgen bij het gebruik van deze bio-diesel. De brandstof trekt water aan en is hierdoor minder lang houdbaar en heeft een groot gehalte aan vetzuren wat lak, rubber en kunststoffen aan kan tasten en heeft verhoogde NO_x uitstoot [Ref 12.]. Hierdoor kan maximaal mogelijke bijmenging sterk gelimiteerd kan zijn. Dit bio-diesel probleem speelt niet voor HVO.

Hiernaast kan diesel ook synthetisch geproduceerd worden door middel van het zogenaamde Fischer-Tropsch proces. Hierbij wordt aardgas (methaan) gebruikt als grondstof. Deze synthetische diesel wordt ook wel naar het productieproces GTL (Gas-to-Liquid) genoemd. Een voorbeeld van een bestaande fabriek is gevestigd in Qatar met een productie capaciteit van 140.000 vaten per dag, zie [Ref 13.], wat overeen komt met ongeveer 700 m³ per uur of 5 miljoen ton per jaar. Het gebruikte aardgas moet uiteraard wel een duurzame bron hebben zoals bijvoorbeeld reststoffen, afval en rioolwater of hout. Ook is deze methode duurder dan de productie van HVO door de grote energie behoefte. Wel zijn de geschikte grondstoffen ruimer voorradig dan die voor HVO, [Ref 12.].

4.3.2 Bio-LNG

Net als diesel kan ook aardgas uit natuurlijke bronnen gewonnen worden (renewable LNG). Ten opzichte van diesel kent deze brandstof nadelen, zoals moeilijkere opslag aan boord en er kan “methane slip” optreden. Hierbij komt een klein deel van de methaan vrij na de verbranding, wat zelf een sterk broeikasgas is. Dit vermindert het positieve effect van LNG uit fossiele bronnen op de CO₂ reductie. Hiertegenover staat dat andere schadelijke emissies wel sterk gereduceerd worden met deze brandstof. De uiteindelijk te realiseren NO_x reductie en hoeveelheid “methane slip” zijn afhankelijk van het type motor. Hiermee zou LNG een methode kunnen zijn om zonder nabehandeling aan de stage-V emissie eisen te voldoen, zolang er geen “dual-fuel” oplossing met diesel gebruikt wordt. In dit project is niet nader onderzocht wat de opties zijn om de “methane slip” te reduceren.

Bio-LNG wordt in tegenstelling tot bio-diesel niet uit een plantaardige olie gewonnen, maar uit het vergisten van natuurlijk materiaal. Ook kan met vergassing op relatief hoge temperatuur bio-LNG geproduceerd worden, waarvoor bijvoorbeeld ook hout gebruikt kan worden. Op deze manier verkregen bio-LNG kan weer als grondstof dienen voor de synthetische diesel of voor de productie van methanol. Hiernaast kan LNG ook op een synthetische manier geproduceerd worden door middel van een chemische reactie tussen waterstof en CO₂. De benodigde waterstof kan door middel van elektrolyse geproduceerd worden. De kosten van synthetische LNG zijn op de korte termijn hoger dan voor bio-LNG, met name door de grote hoeveelheid groene energie benodigd voor de productie van waterstof. Een voorbeeld van de productie van synthetische methaan is Audi e-gas in Duitsland met een productie van 1000 t per jaar.

4.3.3 Waterstof

Waterstof (H_2) wordt geproduceerd door middel van elektrolyse met behulp van groene elektriciteit (wind, zon, waterkracht). Er vindt (momenteel) vooral productie van waterstof plaats via *steam methane reforming*, waarbij fossiel aardgas als grondstof gebruikt wordt. Dit geeft onder aan de streep meer emissie dan het gebruik van diesel, en daarom is het eerstgenoemde productieproces als uitgangspunt genomen voor de analyses in dit rapport. Waterstof is, naast een grondstof voor andere energiedragers (respectievelijk methanol en ammoniak), zelf ook een energiedrager. De productie van waterstof uit groene elektriciteit kent momenteel nog een erg kleine productiecapaciteit, echter zijn er veel initiatieven gaande om dit de komende jaren significant te verhogen. Naast de maritieme sector zijn er veel andere sectoren die interesse tonen voor waterstof als onderdeel van emissiereductieplannen.

De toepassing van waterstof aan boord van schepen is reeds gedemonstreerd op kleine schaal, initiatieven met flessenracks van 300 – 700 bar waterstof die per vrachtauto gewisseld kunnen worden. Daarnaast zijn er ook ontwikkelingen om waterstof vloeibaar op te slaan bij temperaturen van $-253\text{ }^\circ\text{C}$, vergelijkbaar met aardgas maar dan nog aanzienlijk kouder. Dit geeft een hogere energiedichtheid, maar deze vloeibare variant is in deze studie niet meegenomen vanwege het lagere TRL niveau. In het algemeen vereist opslag en gebruik aan boord van waterstof dat strikte maatregelen genomen worden om het explosiegevaar te minimaliseren. O.a.: gasdetectie in de technische ruimtes, opslag in de open lucht, volledig redundante systemen, dubbelwandig leiding werk. Waterstof kan toegepast worden in een PEM brandstofcel, en kan toegepast worden in een verbrandingsmotor. Bij gebruik in een brandstofcel is waterstof emissievrij, in een verbrandingsmotor komt NO_x vrij. In het laatste geval zal een nabehandelingssysteem voor Stage V naar verwachting noodzakelijk zijn (meer informatie in Paragraaf 4.4).

4.3.4 Methanol

Methanol (CH_3OH) wordt geproduceerd door het combineren van waterstof (H_2) en koolstofmonoxide (CO). Deze componenten genaamd "syngas" of "synthesis gas" worden voor grijze methanol gewonnen uit fossiele bronnen, genaamd "feed stock". Als fossiele bron wordt voornamelijk methaan (CH_4) gebruikt. Echter het gebruik van grijze methanol geeft netto een toename aan CO_2 uitstoot ten opzichte van diesel. Voor het produceren van bio-methanol wordt voor de feed stock een optie met natuurlijke oorsprong gekozen, waardoor er netto wel een forse reductie in CO_2 uitstoot op kan treden. Een voorbeeld hiervan is BioMCN in Nederland met een productie van 200 kt per jaar op basis van glycerol [Ref 24.].

De benodigde waterstof kan ook geproduceerd worden door elektrolyse van water door middel van elektriciteit. De gewonnen waterstof wordt gecombineerd met CO_2 om methanol te vormen. In dit chemisch proces wordt 1.37 ton CO_2 per ton geproduceerde methanol afgevangen in de meest gunstige chemische reactie [Ref 20.]. Bij gebruik van groene elektriciteit resulteert dit in groene methanol. In de praktijk wordt deze techniek gebruikt door Carbon Recycling International in IJsland met een productie van 1.6 kt per jaar [Ref 24.]. De kosten worden bepaald door de elektriciteitsprijs vanwege de grote energie behoefte van de elektrolyse en hierdoor zijn de kosten een stuk hoger dan die van grijze of bio-methanol. Daarnaast is het mogelijk om CO_2 direct uit de atmosfeer te winnen, maar door de lage concentratie is dit erg inefficiënt.

Methanol is een licht ontvlambare stof met gelijkenissen met benzine voor wat betreft de verbranding. Voor de opslag moet rekening gehouden met de ontvlambare en giftige dampen die zwaarder zijn dan lucht. Als methanol vrijkomt in de omgeving is het waarschijnlijk dat het zich oplost in water. In vergelijking met bestaande brandstoffen is dit relatief een beperkte vervuiling. Wel bestaat gevaar voor ontbranding. De brandstof heeft een koolstofverbinding waardoor er wel CO_2 uitgestoten wordt, maar dit kan afgevangen worden bij de productie. Er komt geen fijnstof vrij bij de verbranding van enkel methanol, en emissie van NO_x neemt sterk af t.o.v. diesel. Door de strenge eisen uit de Stage V normering zijn nabehandelingssystemen mogelijk nog wel noodzakelijk (voor meer informatie zie Paragraaf 4.4).

4.3.5 Ammoniak

Ammoniak (NH_3) wordt geproduceerd door het combineren van stikstof (N_2) en waterstof (H_2) in het Haber-Bosch proces. De waterstof voor grijze ammoniak wordt gewonnen uit fossiele bronnen, net als bij het “syngas” voor grijze methanol. Hierbij wordt voornamelijk methaan (CH_4) gebruikt. De stikstof kan uit de atmosfeer gewonnen worden waar een relatief hoge concentratie beschikbaar is. Net als bij methanol levert het gebruik van grijze ammoniak geen CO_2 reductie op.

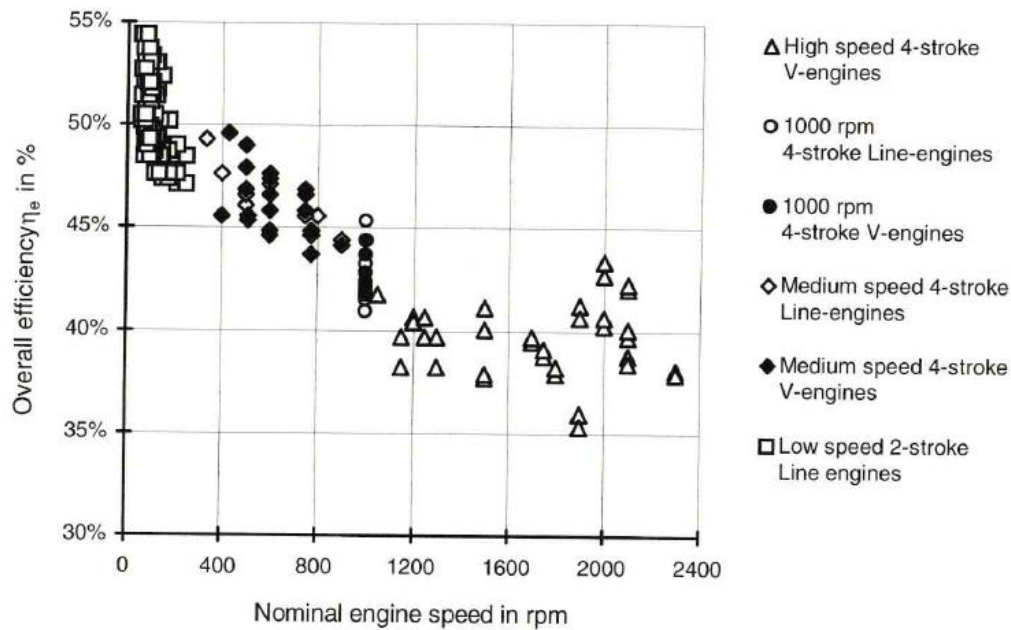
Het is mogelijk om een feed stock met natuurlijke oorsprong te kiezen. Ook kan elektrolyse worden toegepast om de benodigde waterstof te winnen. Hierbij wordt geen afgevangen, maar dit is niet nodig, want bij het verbranden van ammoniak komt er ook geen CO_2 vrij. Er is wel stikstof (N_2) nodig, maar door de relatief grote concentratie hiervan in de atmosfeer kost de opname hiervan aanzienlijk minder energie dan die van CO_2 . Ook bij de productie van groene ammoniak is een grote hoeveelheid elektriciteit nodig, wat een belangrijke parameter is voor de kosten.

Ammoniak is een giftige stof in geconcentreerde vorm en hierom geclassificeerd als “hazardous substance” [Ref 25.] . Er zijn hierom strenge eisen omtrent de veiligheid voor ammoniak. De brandstof is beperkt ontvlambaar wat aan één kant minder veiligheidsrisico's met zich mee brengt, maar tegelijk geeft dit ook uitdagingen bij het gebruik als brandstof. Een groot voordeel van ammoniak is dat er geen koolstof verbinding in aanwezig is en hierdoor geen CO_2 wordt uitgestoten aan boord van het schip. Wel is er een risico op hogere NO_x uitstoot en het vrijkomen van onverbrande ammoniak. De slechte verbranding kan ertoe leiden dat meer diesel als “lead fuel” gebruikt moet worden dan bij bijvoorbeeld methanol. Een alternatief is het gebruik van waterstof als “lead fuel”, die waterstof kan aan boord van het schip uit ammoniak gemaakt worden. Ammoniak lijkt met name door de giftigheid minder geschikt voor gebruik op binnenlandse waterwegen.

4.4 Ontwikkelingen motoren en emissie eisen

De conversie efficiëntie van verbrandingsmotoren hangt af van het type motor en van de eigenschappen van de gebruikte brandstof. (Conversie efficiëntie: de efficiëntie waarmee de energie wordt omgezet in beweging.) Voor diesel worden “compression ignition” (CI) motoren gebruikt waar verbranding optreedt door de hoge temperatuur, die hoge temperatuur ontstaat door compressie. Voor andere brandstoffen zoals benzine, LNG en methanol kunnen ook “spark ignition” (SI) motoren gebruikt worden waar ontbranding wordt veroorzaakt door een ontsteking. Hiernaast is er de optie om een CI motor in “Dual Fuel” (DF) operatie te gebruiken, waarbij een “pilot fuel” voor de ontbranding zorgt. Als pilot fuel wordt vaak diesel gebruikt wordt.

Naast de verbrandingsmethode en de brandstof is ook het absolute vermogen en de toeren van de motor belangrijk voor de efficiëntie. De thermische en mechanische verliezen van grote, langzaam lopende motoren zijn significant lager dan van kleine snellopende motoren, zoals te zien is in Figuur 4-6. Wel is het gewicht per eenheid van vermogen gunstiger voor de kleine snellopende motoren. Vanuit efficiëntie is het beter, wanneer mogelijk, om een kleiner aantal grote motoren te plaatsten. In een situatie met een ontwerp met meerdere schroeven neemt dat voordeel af. Onder andere vanwege de vereiste overbrenging naar de schroeven (meer dan één schroef per motor), de resulterende deellast operatie (en daarmee lagere efficiëntie) en het grote gewicht van deze motoren.



Figuur 4-6: Conversie efficiëntie van verschillende typen dieselmotoren, [Ref 16].

Voor CI motoren moet de ontbrandingstemperatuur gehaald kunnen worden met een redelijke compressie ratio. Aan de andere kant, in een SI motor moet de brandstof niet te snel ontbranden door de compressie, dit kan schade geven aan de motor en wordt “knocking” genoemd. Deze resistentie wordt gegeven door het “octane number”. Een te lage compressie ratio, om knocking te voorkomen, gaat weer ten koste van de efficiëntie. Voor CI motoren is dit geen probleem, omdat de lucht wordt gecompriemd voordat brandstof wordt ingespoten. Het kan hierom voorkomen dat bij toepassing van een andere brandstof de compressie ratio van een motor gereduceerd moet worden, wat ten koste gaat van het maximale vermogen en de efficiëntie [Ref 27].

Ammoniak heeft een zeer hoge compressie ratio nodig voor ontbranding: 35 tot 100 [2], terwijl een dieselmotor een compressie ratio tussen de 12 en 16 heeft. In theorie neemt de efficiëntie toe met hogere compressie ratio, maar dit gaat relatief steeds langzamer waardoor frictie verliezen de overhand krijgen. Hiernaast ontbrandt ammoniak slecht bij toepassing van een ontsteking. Daarom is bij toepassing van ammoniak het gebruik maken van een DF oplossing het meest waarschijnlijk, waarbij een kleine hoeveelheid diesel voor ontbranding zorgt.

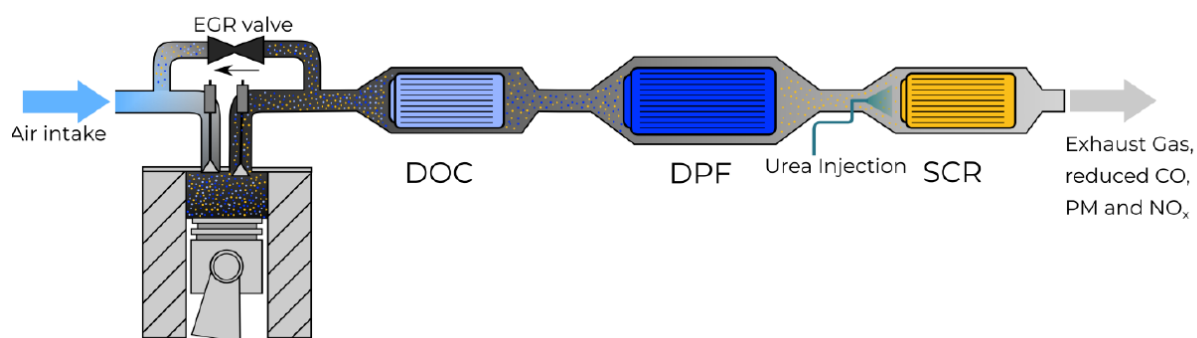
De verbranding van methanol in een SI motor is niet erg problematisch en kan zelfs tot hogere efficiëntie leiden door de eigenschappen van de brandstof [Ref 21.]. Bij toepassing van CI is de ontbranding te onvoorspelbaar en daarom zal ook voor een DF oplossing gekozen moeten worden, waarbij mogelijk ook een verhoging van de efficiëntie bereikt kan worden.

Tenslotte heeft een DF oplossing met diesel als “ontbrandings brandstof” voordelen ten aanzien van operationele beschikbaarheid. Zo nodig kan worden teruggevallen op diesel als methanol of ammoniak niet beschikbaar is.

Waterstof ontbrandt zeer goed, en kan zowel in een SI motor toegepast worden, als in een CI-motor in combinatie met diesel als pilot-fuel, vergelijkbaar met methanol. Waterstof is nog niet toegepast in een SI motor omdat het bij zeer hoge temperaturen ontbrandt en daarmee een zeer hoge NOx emissie geeft. Dit kan gemitigeerd worden door een overmaat aan zuurstof te gebruiken (*lean burn* principe), maar dit gaat sterk ten koste van het vermogen van de motor. Daarom is de vermogensdichtheid van een waterstof motor een stuk lager. Bij toepassing van waterstof in een DF CI-motor speelt dit effect in

mindere mate, en zijn de ontwikkelingen wel verder. Daarnaast dit ook als voordeel dat er zonnig op diesel gevaren kan worden.

Voor het halen van de stage-V emissie eisen is het aannemelijk dat nabehandeling van de uitlaatgassen noodzakelijk is (behalve bij LNG). Voor een systeem op basis van diesel (of gecombineerd met diesel) is op zijn minst een "Diesel Particle Filter" (DPF) nodig om ongeveer 90% van de fijnstof uit de uitlaatgassen te halen [3] en "Selective Catalyst Reduction (SCR) om de NO_x uitstoot te beperken. Deze methode gebruikt een reactie met een water-urea oplossing (AdBlue) die in de uitlaatgassen geïnjecteerd wordt, wat een reductie van 70-90% geeft van de NO_x uitstoot [3]. Het verbruik van AdBlue is ongeveer 5% van het brandstofverbruik. Hiernaast kan ook "Exhaust Gas Recirculation" (EGR) toegepast worden om de NO_x te beperken. Verder kan een "Diesel Oxidation Catalyst" (DOC) toegepast worden om CO en "Hydro Carbon" (HC) emissies door slechte verbranding te beperken. Een overzicht van een dergelijk systeem is weergegeven in Figuur 4-7.



Figuur 4-7: Voorbeeld van een nabehandelingssysteem om stage V emissie eisen te behalen [3].

Voor de stage-V emissie eisen is het waarschijnlijk dat voor de certificering elk type motor per type brandstof langdurig getest moeten worden, samen met de eventuele nabehandeling. Dit maakt de introductie van motor typen voor alternatieve brandstoffen lastig, terwijl deze vaak minder schadelijke stoffen uitstoten dan fossiele diesel. Ook kan het een obstakel zijn bij de introductie van oplossingen die broeikasgas uitstoot reduceren, omdat daarbij ook voldaan moet worden aan de stage-V eisen. Dit kan zelfs tot gevolg hebben dat een oplossing gekozen moet worden die in de praktijk een toename in broeikasgas emissies geeft. Een voorbeeld hiervan is het vervangen van middel snellopende diesels (toerentallen kleiner dan ca 1000 omw./min) door meerdere moderne snellopende (toerentallen 1500 omw./min of meer), stage V gecertificeerd, met relatief kleine vermogens. In een situatie met een elektrische overbrenging, gaat dit gepaard met een wat lager rendement en daarmee hogere broeikasgasemissies. Daarbij moet opgemerkt worden dat de uiteindelijk impact op broeikasgasemissies afhangt van het vaargebied, het type motor en aandrijving die toegepast wordt en het gebruik van de motoren tijdens de operatie.

Ten slotte kan het dynamische gedrag van de motor van invloed zijn op de keuze van de overbrenging. Hiermee wordt de tijd bedoeld die de motor nodig heeft om een gevraagd vermogen te leveren aan de schroef. Dit dynamisch gedrag hangt af van de methode van verbranding en van de brandstof. Met name SI motoren kunnen een grotere responsie tijd hebben, zie [Ref 17.], wat een probleem kan zijn bij bijvoorbeeld manoeuvreren. Om deze reden zou voor korte tijd vermogen uit andere bronnen aangewend kunnen worden, bijvoorbeeld uit batterijen. Dit kan bij een elektrische overbrenging of met een Power Take In (PTI) op de tandwielkast bij mechanische overbrenging.

4.5 Discussie alternatieve energiedragers

Op basis van de verkenning van de verschillende brandstoffen is een overzicht gemaakt van de voor en nadelen. In grote lijnen hebben alternatieve brandstoffen die via groene elektriciteit geproduceerd worden een zeer grote afname in broeikasgas emissies. Het nadeel daarbij is dat door de energie

verliezen bij elk van de tussenliggende productie stappen de brandstofprijs toeneemt. Hierdoor zal synthetische methanol en ammoniak duurder zijn dan groene elektriciteit opgeslagen in batterijen. Het gebruik van batterijen is echter niet altijd mogelijk.

Voor toepassing in duwbotten met een acceptabeel autonomie is de massa van batterijen om voldoende energie te vervoeren (nu nog) te groot. Voor gasvormige energiedragers zoals waterstof en aardgas is het aantal productie stappen wel lager, maar is de opslag en het transport lastiger en hiermee duurder. De ruimte en het gewicht ingenomen door de tanks aan boord kan ook beperkingen opleveren.

Voor bio-brandstoffen ligt de brandstofprijs wat lager dan voor duurzame synthetische brandstoffen en daarmee kan nog steeds een redelijke reductie van broeikasgas emissies bereikt worden. Bij het gebruik van bio-diesel (bijvoorbeeld HVO) kan met zeer weinig tot geen aanpassingen een redelijke tot goede besparing op de broeikasgas emissies gehaald worden afhankelijk van het mengpercentage.

Met bio-LNG is een iets kleinere maximale CO₂ equivalente besparing te realiseren dan het gewenste niveau in 2030. Deze brandstof draagt wel bij aan een grote reductie van andere schadelijke emissies. De specifieke bron ("feedstock") waarmee de bio-brandstof wordt geproduceerd bepaalt de daadwerkelijke besparing.

Met bio of syntactische methanol en ammoniak kan een zeer grote reductie in broeikasgas emissies gehaald worden, waarbij ammoniak als voordeel heeft dat er geen CO₂ via de schoorsteen van het schip wordt uitgestoten. Het nadeel is dat ammoniak een zeer giftige stof is wat het gebruik op binnenwater in de weg kan staan. Beide oplossingen lijken redelijk inpasbaar in een duwboot ontwerp.

Voor ammoniak, waterstof en batterijen geldt dat in theorie een gesloten kringloop zonder uitstoot en zonder CO₂ opname gerealiseerd kan worden, al lijken, waterstof en batterijen in de nabije toekomst moeilijk in te passen in een duwboot. Voor wat betreft ammoniak is dat afhankelijk van de technische ontwikkeling en de eisen ten aanzien van veiligheid bij toepassing op binnenwateren.

In onderstaande tabel is dit samengevat in een kwalitatieve vergelijking.

Tabel 4-4: Vergelijking alternatieve brandstoffen t.o.v. diesel.

Brandstof	Broeikasgassen	Reductie overige schadelijke uitstoot aan boord	Brandstof kosten	Inpasbaarheid in scheepsontwerp duwboot
Grijze diesel	+/-	+/- (met nabehandeling)	+/-	+/-
Grijze-LNG	+/-	++	+/-	-
Bio-diesel	+ (50% HVO) ++ (Fischer-tropsch)	+ (met nabehandeling)	- (50% HVO) -- (Fischer-tropsch)	+/-
Bio-LNG	+	++	-	-
Bio of synthetische methanol	++	+ (bij gebruik pilot diesel voor ontbranding en toepassing nabehandeling)	- (bio) -- (synthetisch)	-
Synthetische ammoniak	++	+/- (bij gebruik pilot diesel voor ontbranding en toepassing nabehandeling)	-	-
Waterstof	++	+ (bij gebruik pilot diesel voor ontbranding en toepassing nabehandeling) ++ (bij gebruik brandstof cellen)	--	alleen inpasbaar bij kleinere autonomie
Batterijen	++	++	+	inpasbaar bij zeer beperkte autonomie

*De classificering wordt als volgt gegeven:

- Veel slechter dan diesel
- Slechter dan diesel
- /+ Vergelijkbaar met diesel
- + Beter dan diesel (2024 broeikas emissie limiet)
- ++ Veel beter dan diesel (2030 broeikas emissie limiet)

5 CONCEPTUELE INDELING/ONTWERP

Op dit punt is een keuze gemaakt voor een alternatieve energiedrager waarmee een eerste concept ontwerp is uitgewerkt. Dit was een lastig dilemma. Wil je significant reductie in broeikasgassen realiseren CO₂ én uiterlijk in 2023 bouwen, dan lijkt toepassing van biodiesel of van bio-LNG de enig haalbare optie. Aandachtspunt hierbij is de zekerheid dat deze motor voor die brandstof ook stage V gecertificeerd moet zijn.

In deze studie is voor methanol gekozen vanwege de inpasbaarheid in een duwboot en omdat de techniek op dit moment binnen enkele jaren beschikbaar lijkt te komen. Ontwerpen voor toepassing van bio-diesel wijken niet veel af van bestaande ontwerpen en in het verleden zijn al ontwerpen gemaakt voor LNG, zie o.a. [Ref 9.] En bij toepassing van biodiesel of bio-LNG voldoet een nieuw ontwerp niet aan de doelstelling die voor 2030 is gesteld (55% CO₂ reductie i.c.m. stage V). Op basis van de nu beschikbare informatie is methanol kansrijk om in een duwboot toe te passen. Bij toepassing van groene methanol zijn in dat geval forse reducties van CO₂ mogelijk. Ook ammoniak wordt als een goede kandidaat gezien. Echter vanwege de giftige eigenschappen, en de nu nog minder uitontwikkelde technieken is in deze studie besloten een indeling van de duwbotten op basis het gebruik van methanol uit te werken.

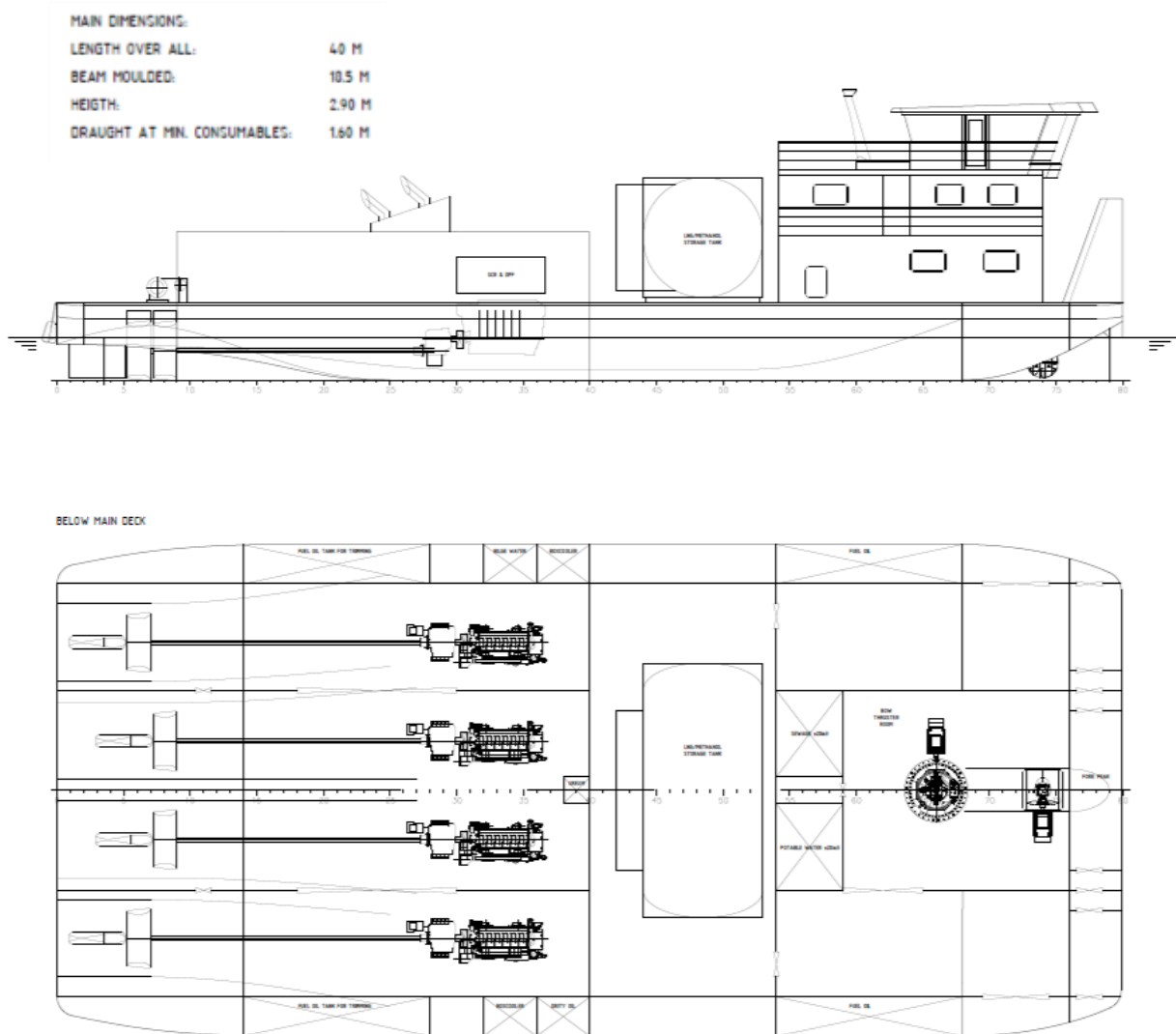
De uitwerking met methanol als brandstof is gestart met een uitsplitsing van de gewichten van de hoofdcomponenten. Op basis van deze gewichten is een indeling over de lengte van het schip gemaakt zodanig dat er geen, of nauwelijks trimligging ontstaat (de duwboot ligt voor en achter op gelijke diepgang). Hierbij is gekeken of een ruimtelijke indeling gemaakt kon worden waarbij de brandstoftanks voor de brandstoffen veilig geplaatst konden worden.

5.1 Grote duwboot

Hieronder zijn twee conceptindelingen uitgewerkt in de vorm van een eerste opzet van een algemeen plan. Deze analyse is uitgevoerd in samenwerking met Kooiman Marine Group – Scheepswerf Gebr. Kooiman.

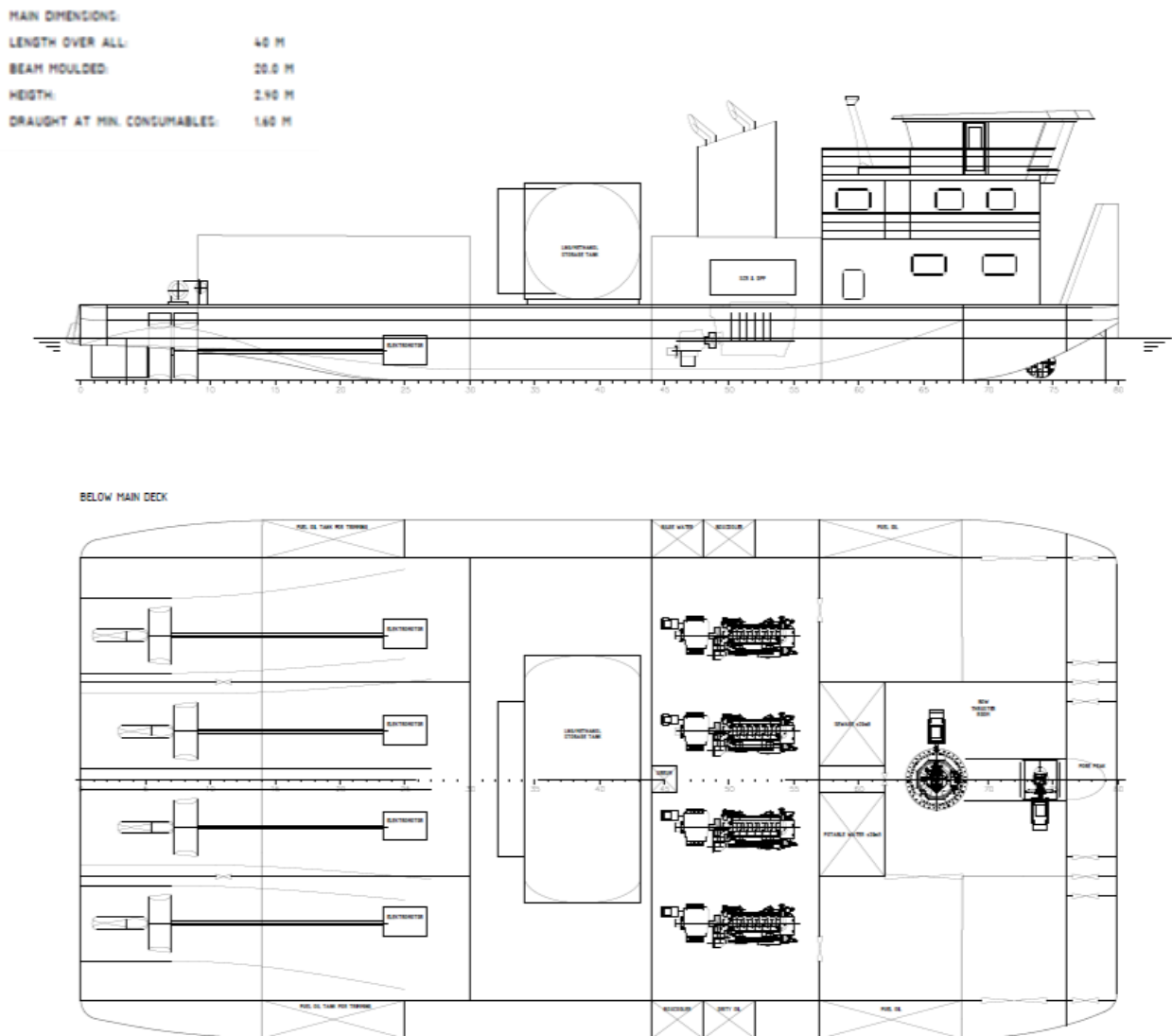
Een oplossing met een “Dual Fuel” verbrandingsmotor ligt voor de hand, waarbij ook diesel gebruikt kan worden als methanol niet beschikbaar is. Het schip heeft als eis dat het op ondiep water, bij een diepgang van 1.6m, minimaal 48 uur kan varen op methanol of diesel. Daarnaast is aannemelijk dat bij hogere waterstand meer brandstof gebunkerd wordt om langer te kunnen varen. Dat betekent grotere methanol en diesel tanks. Om dan toch aan de ondiep water eis te voldoen is met name het leeggewicht van de grotere methanol tanks een beperkende factor. De diesel tanks zijn geïntegreerd in de constructie van de romp en de gewichtstoename van deze tanks is beperkt als de capaciteit toeneemt.

De methanol tank staat bovendeks, met voldoende ruimte tussen de tank en het dekhuis. Voor het onderdeks plaatsen van de methanol tanks is onvoldoende ruimte, ook omdat een kofferdam (een loze ruimte) van tenminste 80cm rondom de tank vereist is [Ref 10.].



Figuur 5-1: Concept indeling grote duwboot, directe aandrijving.

In Figuur 5-1 is het concept met een directe aandrijving weergegeven. Vanwege de breedte (18.5m) in combinatie met de kleine diepgang zijn 4 schroeven toegepast (in een straalbuis). De schroeven worden direct aangedreven.



Figuur 5-2: Concept indeling grote duwboot, elektrische aandrijving op de schroefas, generatoren.

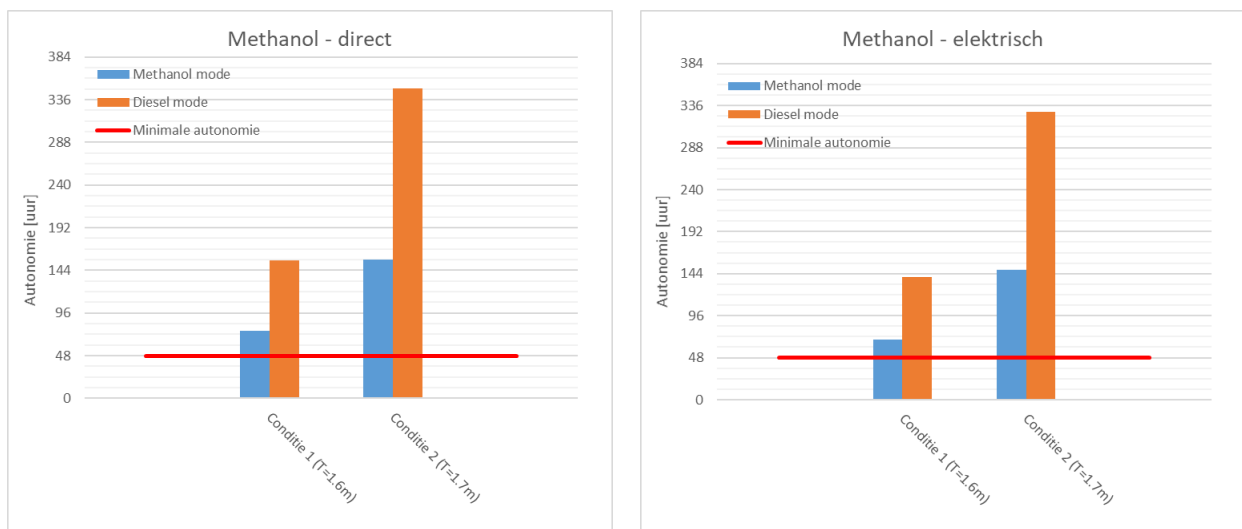
In Figuur 5-2 is het concept weergegeven waarin een elektrische aandrijving op de schroefas is toegepast. Dit ontwerp is zwaarder met name vanwege het extra gewicht door toepassing van generatoren in combinatie met elektromotoren. Om toch met een geringe diepgang te kunnen opereren is de breedte vergroot tot 20m. Het verbreden van het duwboot ontwerp betekent ook een toename van het gewicht van de duwboot zelf. Voor een dieselektrische variant met veel lichtere snellopers lijkt het wel mogelijk om een redelijke autonomie te halen met de breedte van 18.5m, maar in een dergelijk ontwerp zal een besparing in CO₂ equivalente uitstoot van 55% waarschijnlijk niet realiseerbaar door een lager rendement. Dit is in deze studie niet verder uitgewerkt.

Tabel 5-1: Samenvatting capaciteit brandstoftanks grote duwboot.

	Directe overbrenging	Elektrische overbrenging	
Breedte duwboot	18.5	20.0	[m]
Conditie 1 (diepgang 1.6 m)			
Totaal	56.1	56.1	[t]
Methanol	38.9	38.9	[t]
Diesel	17.2	17.2	[t]
Conditie 2 (diepgang 1.7 m)			
Totaal	125.8	131.5	[t]
Methanol	108.6	114.3	[t]
Diesel	17.2	17.2	[t]
Leeggewicht	798.8	868.6	[t]

In conditie 1 is voor beide aandrijfliijnen uitgegaan van een gelijke hoeveelheid brandstof, daarmee voldoen beide aan de minimale autonomie.

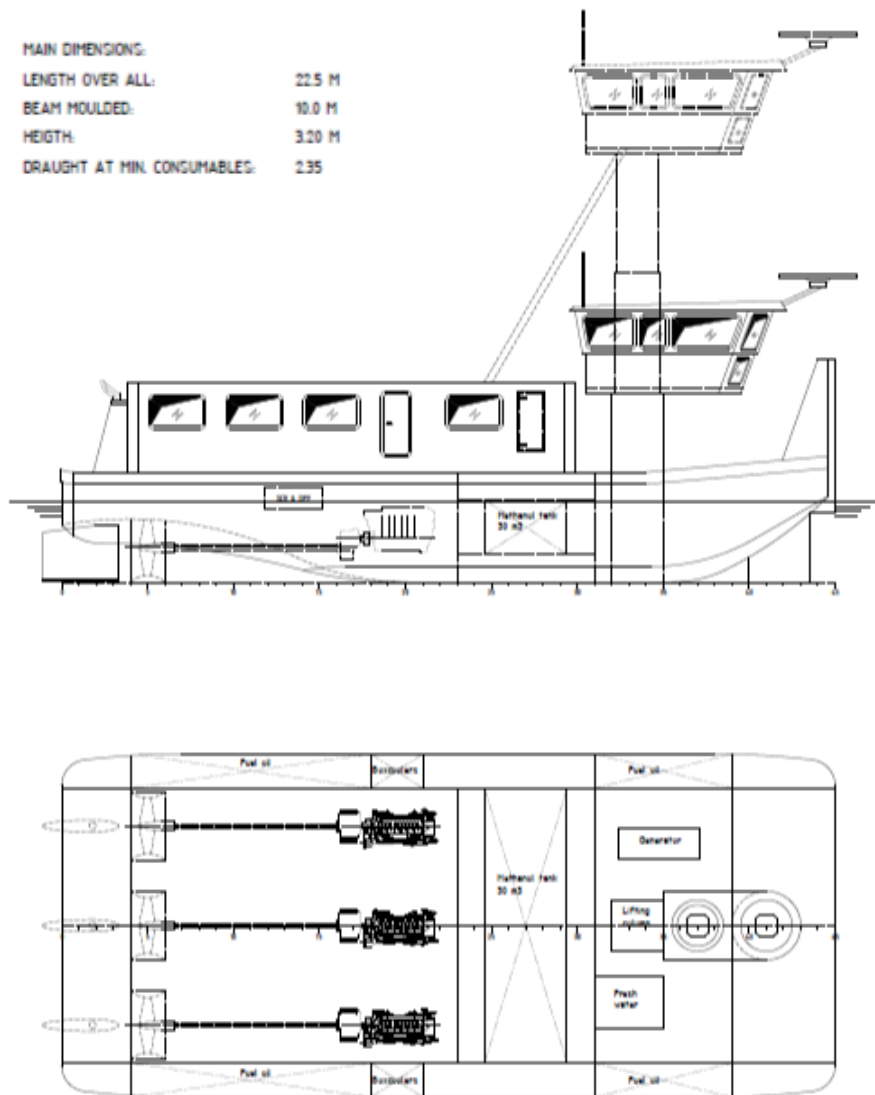
De maximale diepgang bleek uit te komen rond de 1.7m. Bij toepassing van grotere tanks kwam de minimale autonomie op ondiep water in het geding vanwege het eigen gewicht van de tanks en installaties. Op basis van de nu bekende maximale tankinhoud is de autonomie teruggerekend voor het schip opererend in diesel mode en methanol mode.



Figuur 5-3: Autonomie voor de twee beladingscondities, "directe overbrenging" links, "elektrische overbrenging" rechts.

5.2 Kleinere duwboot

Ook voor de kleinere duwboot zijn twee indelingen op basis van toepassing van methanol uitgewerkt. In dit ontwerp is geen ruimte voor een methanol tank aan dek vanwege de beperkte afmetingen van de duwboot. De beschikbare ruimte is nodig voor de accommodatie en de stuurhut. Voor deze duwboot is geen eis gesteld om bij lage waterstanden op de rivieren te opereren. Dat bood de mogelijkheid om tanks onderdeks te plaatsen met voldoende loze ruimte rondom de methanol tanks (80 cm).

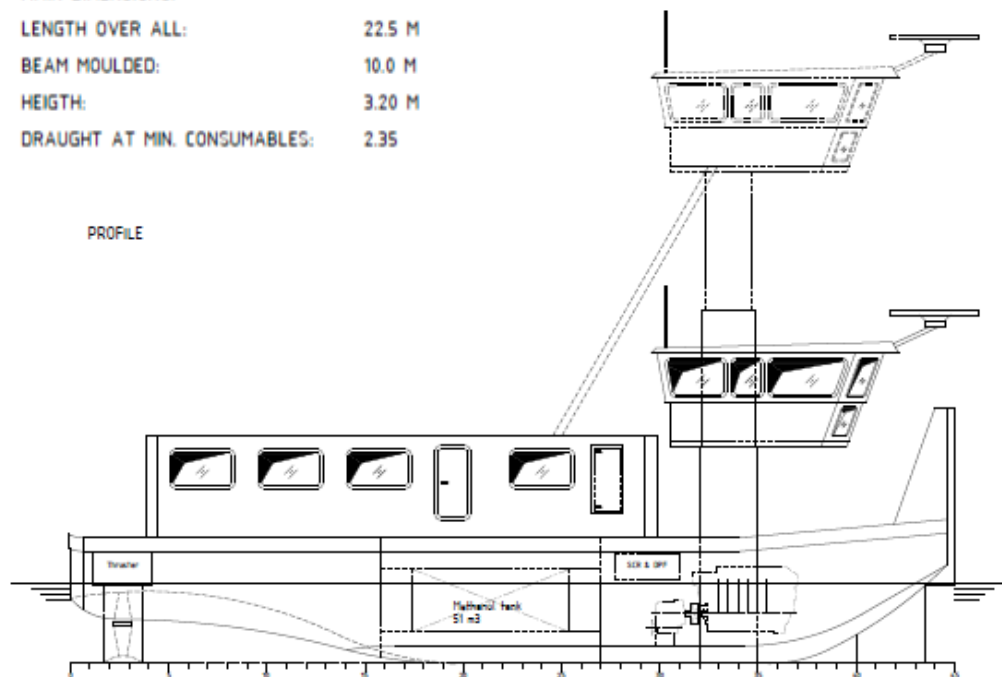


Figuur 5-4: Concept indeling kleinere duwboot, directe op de schroefas.

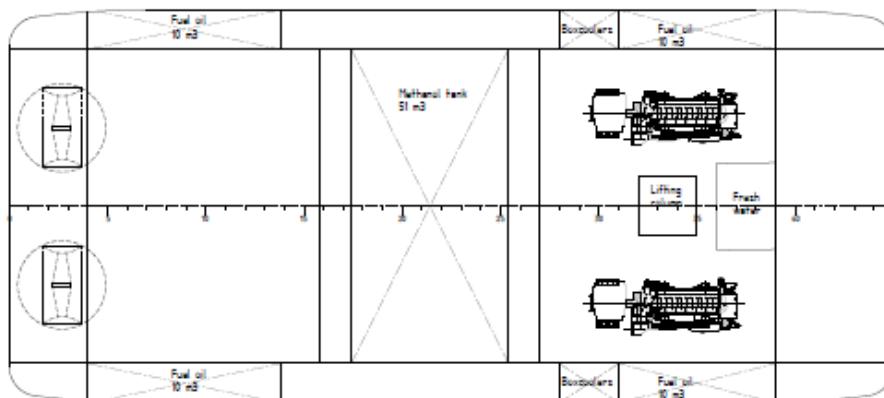
En is een variant mogelijk met generatoren in het voorschip en azimuth thrusters (roerpropellers) met een elektromotor voor de aandrijving

MAIN DIMENSIONS:

LENGTH OVER ALL:	22.5 M
BEAM MOULDED:	10.0 M
HEIGHT:	3.20 M
DRAUGHT AT MIN. CONSUMABLES:	2.35



BELOW MAIN DECK



Figuur 5-5: Concept indeling kleinere duwboot, generatoren en roerpropellers.

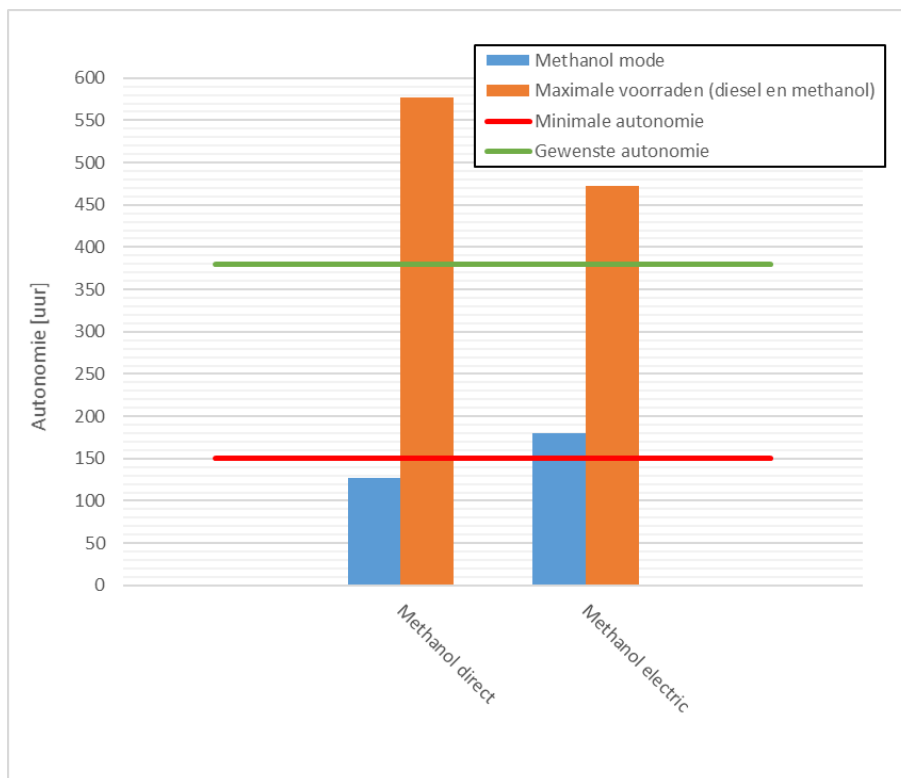
Bij het opstellen van de concept indeling blijkt dat bij de direct aangedreven variant maximaal 30 m^3 methanol ingepast kan worden in het ontwerp, wat overeenkomt met 23.5 t.

Bij het toepassen van een methanol – elektrische voortstuwingsinstallatie in combinatie met roerpropellers is er meer flexibiliteit in het plaatsen van componenten, vanwege de elektrische overbrenging. Hierbij is een grotere hoeveelheid methanol mee te nemen van maximaal 51 m^3 wat overeenkomt met 40.3 t.

Tabel 5-2: Samenvatting capaciteit brandstoftanks kleinere duwboot.

	Directe overbrenging	Elektrische overbrenging	
Maximale voorraden			
Diepgang	2.14	2.28	[m]
Totaal	66.5	74.3	[t]
Methanol	23.5	40.3	[t]
Diesel	43.0	34.0	[t]
Alleen methanol			
Diepgang	1.94	2.10	[m]
Totaal	24.9	42.6	[t]
Methanol	23.5	40.3	[t]
Diesel	1.4	2.3	[t]
Leeggewicht	270.8	292.7	[t]

Dan volgt dat het ontwerp met de aandrijving direct op de vaste schroeven, bij toepassing van methanol, niet voldoet aan de gestelde eis qua autonomie. Ondanks de wat lager ingeschatte overall efficiëntie heeft het concept ontwerp met een generator set op methanol en elektrisch aangedreven roerpropellers wel voldoende autonomie. Dit ontwerp bood meer mogelijkheden om de vereiste hoeveelheid methanol in te passen.



Figuur 5-6: Autonomie voor de directe en elektrische overbrenging bij varen op methanol en bij maximale bunkers voor methanol en diesel.

6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Op basis van de analyses met de SPEC tool, de inzichten uit recente studies, situatie eind 2020, en de verkenning naar haalbare indelingen voor duwbotten kunnen de volgende conclusies worden geformuleerd voor de toepassing van meer klimaat neutrale brandstoffen voor duwbotten:

1. De hier onderzochte grote duwbotten zijn vanuit het ontwerp gezien kritisch qua gewicht door de beperkte diepgang. Voor de kleinere duwboot is in deze studie het beschikbare volume het meest kritisch (vanwege het beperkte dek oppervlak).
2. De mogelijke hydrodynamische verbetering ten opzichte van de bestaande schepen wordt ingeschat op maximaal ca 15% door de combinatie van het toepassen van een ander roerprofiel (vleugelprofiel) en het toepassen van meer schroeven. Deze inschatting is gebaseerd op eerdere onderzoeken en relatief eenvoudige berekeningen. Bij een compleet ontwerp vereist dit aspect nadere (CFD-) berekeningen en eventueel modelproeven.
3. Op de korte termijn is de stage-V eis leidend in het ontwerp. Dit heeft onder andere te maken met de beperkte beschikbaarheid van gecertificeerde motoren. Deze eis omvat geen restricties aan de CO₂ equivalente emissies, deze kunnen in bepaalde gevallen zelfs toenemen. Er zijn op de korte termijn wel hydrodynamische verbeteringen te realiseren, die leiden tot een lagere energie behoefte van het schip en daarmee tot lagere brandstofkosten. Deze verbeteringen zijn echter onvoldoende om de 20% (eis 2024) en 55% (eis 2030) reductie in CO₂ equivalente emissies te halen bij een gelijk operationeel profiel.
4. Voor een duwboot die in 2021 wordt ontworpen en in 2022/2023 gebouwd zijn de stage V eisen leidend en is toepassing van bio-diesel of bio LNG de meest haalbare optie. Aandachtspunt daarbij is de wijze waarop de bio-brandstof wordt geproduceerd ("de "feedstock"). Daarnaast zorgt het vrijkomen van methaan (methaanslip) ervoor dat de reductie van CO₂ equivalente emissies van bio-LNG beperkter is. Met zo'n ontwerp is CO₂ reductie van 55%, zoals beoogd in 2030 zeer waarschijnlijk niet haalbaar.
5. Voor ontwerp en bouw van een zoveel mogelijk klimaat neutrale duwboot, die omstreeks 2024 in bedrijf wordt genomen lijkt een "dual fuel" verbrandingsmotor met methanol en diesel een technisch haalbare optie. Daarbij wordt aangetekend dat de motoren nog niet commercieel beschikbaar zijn en dat er voor de verkrijgbaarheid van methanol langs de vaarweg vooralsnog geen duidelijke roadmap is. Op basis van de huidige inzichten is bio-methanol een factor 2 duurder dan diesel. Echter, de productiemogelijkheden zijn beperkt. De kosten voor het gebruik van e-methanol worden nu een factor 4 tot 5 hoger ingeschat vergeleken met toepassing van diesel. Aandachtspunt hierbij is dat zo'n motor ook aan de stage V eisen moet voldoen.
6. Een oplossing met ammoniak is in deze studie niet verder uitgewerkt in verband met de giftige eigenschappen en vanwege het (nu nog ingeschatte) lagere TRL niveau.
7. Waterstof vereist (nu) nog veel ruimte, ruimte die schaars is aan boord van een duwboot. De opslag van waterstof aan boord vormt de grote uitdaging. In combinatie met een voldoende autonomie lijkt waterstof nu geen haalbare optie. Voor batterijen geldt hetzelfde vanwege het volume dat batterijen vragen.
8. Met name voor toepassing op riviercondities, waarbij ook rekening gehouden moet worden met laag water, zal de overschakeling op groene brandstoffen ook extra kosten met zich meebrengen omdat vaker gebunkerd moet worden en varend bunkeren waarschijnlijk niet mogelijk zal zijn. Dit aspect is in deze studie niet onderzocht.

9. Het toepassen van elektrische aandrijving op de schroefas of thruster biedt meer flexibiliteit om de hoofdmotor ("de energieomzetter") na verloop van tijd te vervangen door nieuwere, betere oplossingen. Dit gaat deels ten koste van het rendement en van het gewicht van de voortstuwingsinstallatie.
10. In de situatie dat een reder op korte termijn een ontwerp wil starten zijn de opties beperkt: diesel direct, diesel elektrisch, LNG direct en/of LNG elektrisch. Toepassing van dieselelektrische aandrijving met snellopers geeft meer flexibiliteit maar betekent een hoger brandstofverbruik en hogere emissies in vergelijking met een directe aandrijving.

Aanbevelingen

- A. Gelet op de urgentie van de klimaatdoelstelling is snel duidelijkheid nodig over de verkrijgbaarheid van groene brandstoffen langs de binnenvaarwegen. Uitgangspunt is de tijdige beschikbaarheid in combinatie met toepasbaarheid voor de verschillende type binnenschepen met hun operationeel profiel. Dit vormt dan de basis voor de roadmap van leveranciers, ontwerpers, regelgevers en classificatie bureaus.
- B. Belangrijke aandachtspunten voor het ontwerp van een duwboot op basis van deze studie zijn:
 - a. De energie-efficiëntie van het scheepssysteem. Zo kan door toepassing van dieselelektrische aandrijving met snellopers in duwboten de efficiëntie afnemen, en neemt de flexibiliteit toe.
 - b. In het onderwaterschip zijn in een aantal gevallen verbeteringen te realiseren die tot een lager brandstofverbruik kunnen leiden (o.a. een andere roerprofiel en toepassing van meer schroeven).

Wageningen, maart 2021
MARITIME RESEARCH INSTITUTE NETHERLANDS



Ir. G. Gaillarde
Head Ships Business Unit

REFERENTIES

- [Ref 1.] "C-230 Grean Deal zeevaart, binnenvaart en havens," Rijksoverheid, 2019.
- [Ref 2.] Wouter van der Geest, Menno Menist, *Op weg naar een klimaatneutrale binnenvaart per 2050, transitie en rekenmodel binnenvaart*, Panteia, 10 juli 2019, Zoetermeer.
- [Ref 3.] List of operational profiles and fleet families V2, D 1.1, Prominent, Stichting Projecten Binnenvaart, March 3, 2016.
- [Ref 4.] <https://binnenvaartcijfers.nl/aandeel-brandstofverbruik-in-per-scheepstype-in-europa/> (november 2020).
- [Ref 5.] Waterstof in Binnenvaart en Short Sea - Een Inventarisatie van Innovatieprojecten, EICB, juni 2020.
- [Ref 6.] M. Drijver, "Future Pusher Project: Alternative power configuration for a future pusher of thyssekrupp Veerhaven BV," TU Delft, Delft, 2013.
- [Ref 7.] IMO, "Resolution MEPC.308(73)", IMO, 2018.
- [Ref 8.] "31495-2-SHIPS/MO-Effect roerprofiel op vaargedrag duwstellen," MARIN, Wageningen, 2020.
- [Ref 9.] P. Vrolijk, "Paper 24: LNG propulsion for push-tugs," in SMART Rivers, Buenos Aires, Argentina, 2015.
- [Ref 10.] Lloyd's Register (July 2020) Rules for the Classification of Methanol Fuelled ships 5.3.3
- [Ref 11.] R. Verbeek, P. 't Hart, J. Pruyn and J. Bergsma, "Assessment of alternative fuels for seagoing vessels using Heavy Fuel Oil," 31 January 2019. [Online]. Available: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwig1fHkyqLsAhXF-KQKHdBSB40QFjAAegQIBBAC&url=https%3A%2F%2Fwww.mkc-net.nl%2Flibrary%2Fdocuments%2F1133%2Fdownload%2F&usg=AOvVaw3Uu7hEZh2_gsqvskd7kW5L. (Accessed 07 October 2020).
- [Ref 12.] H. Aatola, M. Larmi and T. Sarjovaara, "Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) as a Renewable Diesel Fuel: Trade-off between NOx, Particulate Emission, and Fuel consumption of a Heavy Duty Engine," SAE, 2008.
- [Ref 13.] J. R. Centre, "Well-To-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context," European Commission - Joint Research Centre - Institute for Energy and Transport, Ispra Italy, 2013.
- [Ref 14.] H. Zhang, L. Wang, J. van Herle and F. Marechal, "Techno-economic comparison of green ammonia production process," Applied energy, vol. 259, pp. 114-135, 2019.
- [Ref 15.] P. Dimitriou and R. Javaid, "A review of ammonia as a compression ignition engine fuel," International journal of hydrogen energy, 2019.
- [Ref 16.] H. Klein Woud, D. Stapersma: Design of propulsion and electric power generation systems (2003).
- [Ref 17.] CIMAC (2011): Position paper: Transient response behaviour of gas engines.

Overige referenties, niet specifiek benoemd:

- [Ref 18.] T. Delft, "Move-IT! D4.1 Operational Profiles," TU Delft, Delft, 2019.
- [Ref 19.] H. Binek and E. Muller, "Propulsionversuche mit Schubverbänden auf begrenzter wassertiefe," Institut an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Aachen, 1978.
- [Ref 20.] C. Hank, S. Gelpke, A. Schnabl, R. J. White, J. Full, N. Wiebe, T. Smolinka, H. Henning and C. Hebling, "Economics & Carbon Dioxide Avoidance Cost of Methanol Production based on Renewable Hydrogen and recycled Carbon Dioxide – Power-to-Methanol," Sustainable energy & fuels, vol. 2, pp. 1244-1261, 2018.
- [Ref 21.] Z. Stelmanskiak, "Application of alcohols to dual-fuel feeding the spark-ignition and self-ignition engines," Polish maritime research, vol. 21, pp. 86-94, 2014.
- [Ref 22.] Interreg, "Fact sheet 3: After-treatment," Interreg, 2019.
- [Ref 23.] IMO, "MEPC.308(73) 2018 Guidelines on the method on calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships," IMO, 2018.
- [Ref 24.] E. IRENA, "Production of bio-methanol - Technical brief," ETSAP - IRENA, 2013.
- [Ref 25.] ABS, "Sustainability whitepaper: Ammonia as marine fuel," ABS, 2020.
- [Ref 26.] "Current and future role of Haber-Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape," Energy & environmental science, vol. 13, pp. 331-334, 2020.
- [Ref 27.] S. Weaver and S. H. Turner, "Dual fuel natural gas/diesel engines: Technology, Performance and Emissions," in SAE, Detroit, 1994.

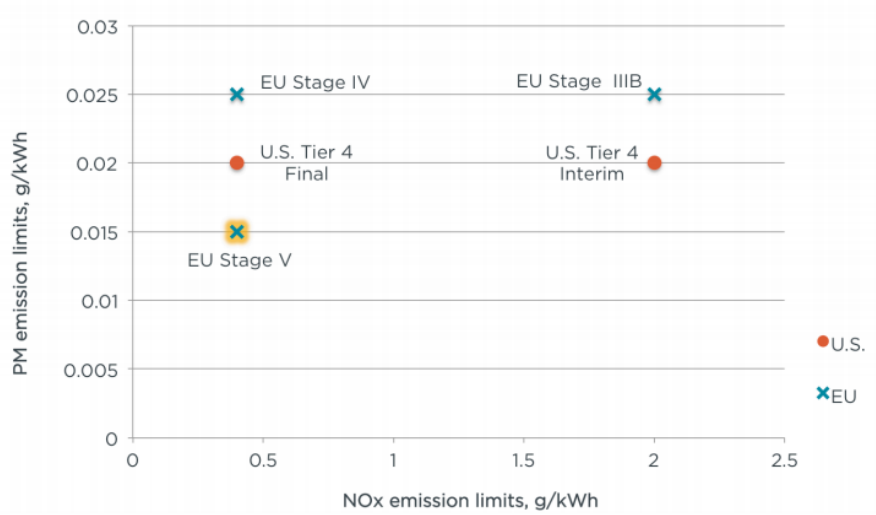
APPENDIX

APPENDIX 1 STAGE V EMISSIE EISEN

Vanaf 2021 is de Stage-V emissie norm volledig van kracht in de binnenvaart. Deze regels omvatten alle motoren voor voortstuwing met een vermogen hoger dan 37 kW en groter dan 560 kW voor hulpvermogen. Een overzicht van de emissie eisen en een vergelijking met andere regelgeving op dit gebied is gegeven in Figuur A-1. De Stage-V eisen zijn hiermee zeer streng. In het diagram zijn de IWP motoren voor voortstuwing en IWA voor hulpvermogen. De beschikbaarheid van gecertificeerde motoren ontworpen voor de binnenvaart die aan deze emissie eisen voldoen is echter beperkt. Hierom wordt gekeken naar het toepassen van motoren oorspronkelijk ontworpen voor andere doeleinden, deze vallen binnen de NRE categorie, hiervan moet het vermogen onder de 560 kW liggen. Een andere optie is om nabehandeling toe te passen, zoals een SCR katalysator en een partikel filter. Dit gecombineerde systeem kan gecertificeerd worden voor de stage 5 emissie norm. Als het systeem niet gecertificeerd is zal de uitstoot gemeten moeten worden, dit gebeurt bijvoorbeeld binnen de "Continuous On-Board Analysis and Diagnosis (COBALD)" Green Deal.

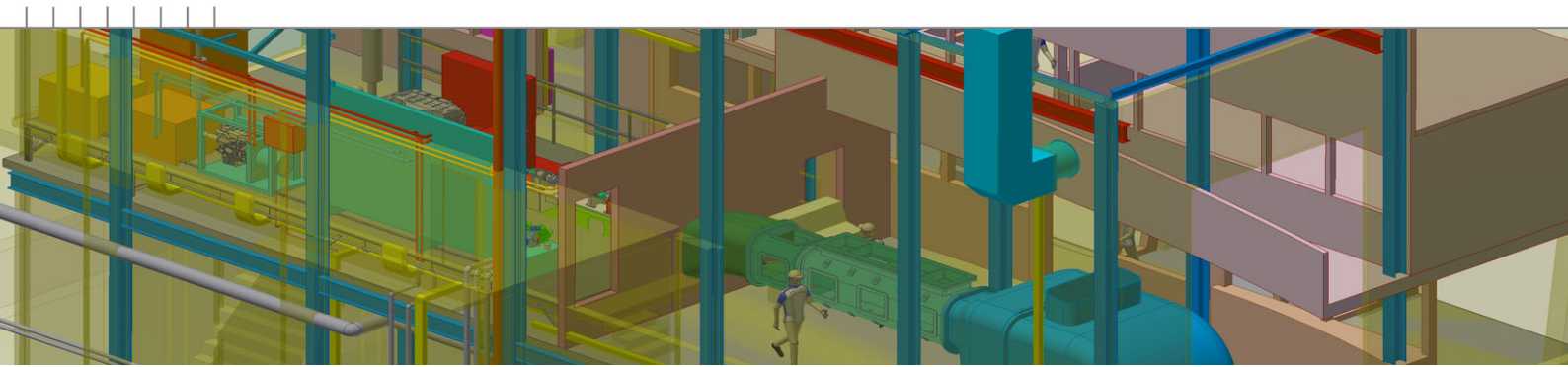
Engine Category	Equipment Type	Power Range (KW)	Engine Type	CO (G/KWH)	HC (G/KWH)	NOx (G/KWH)	PM (G/KWH)	PN (#/KWH)	A [#]
NRE-v-1 NRE-c-1	Other non-road mobile machinery	0<P<8	CI	8.00	HC + NOx ≤ 7.50		0.40	-	1.1
NRE-v-2 NRE-c-2		8≤P<19	CI	6.60	HC + NOx ≤ 7.50		0.4	-	1.1
NRE-v-3 NRE-c-3		19≤P<37	CI	5.00	HC + NOx ≤ 4.70		0.015	1×10 ¹²	1.1
NRE-v-4 NRE-c-4		37≤P<56	CI	5.00	HC + NOx ≤ 4.70		0.015	1×10 ¹²	1.1
NRE-v-5 NRE-c-5		56≤P<130	All	5.00	0.19	0.40	0.015	1×10 ¹²	1.1
NRE-v-6 NRE-c-6		130≤P≤560	All	3.50	0.19	0.40	0.015	1×10 ¹²	1.1
NRE-v-7 NRE-c-7		P>560	All	3.50	0.19	3.50	0.045	-	6.0
IWP-v-1 IWP-c-1	Inland waterway vessels	37≤P<75	All	5.00	HC + NOx ≤ 4.70		0.30	-	6.0
IWP-v-2 IWP-c-2		75≤P<130	All	5.00	HC + NOx ≤ 4.70		0.14	-	6.0
IWP-v-3 IWP-c-3		130≤P≤300	All	3.50	1.00	2.10	0.11	-	6.0
IWP-v-4 IWP-c-4		300≤P≤1000	All	3.50	0.19	1.20	0.22	1×10 ¹²	6.0
IWP-v-5 IWP-c-4		P>1000	All	3.50	0.19	0.40	0.01	1×10 ¹²	6.0
IWA-v-1 IWA-c-a		560≤P<1000	All	3.50	0.19	1.20	0.02	1×10 ¹²	6.0
IWA-v-2 IWA-c-2		P≥1000	All	3.50	0.19	0.40	0.01	1×10 ¹²	6.0

#	Where an "A" factor is defined, the HC emission limits for fully and partially gaseous fueled engines will be calculated with the following formula: $HC = 0.19 + (1.5 \times A \times GER)$, where the gas energy ratio (GER) is the average gas energy ratio over the appropriate cycle. The average GER is determined by the hot-start transient test cycle in both the non-road steady cycle (NRSC) and the transient cycle (NRTC). If the calculated HC limits exceed the value of $0.19 + A$, the limits should be set to $0.19 + A$. Alternatively, any combination of values satisfying the equation $(HC+NOx) \times CO^{0.784} \leq 8.57$, as well as the following conditions: $CO \leq 20.6g/kWh$ and $(HC+NOx) \leq 2.7g/kWh$
CI	Compression-ignition engines (also known as diesel engines)
SI	Spark-ignition engines (also known as internal combustion engines, or petrol engines)



Figuur A-1: Stage-V emissie limiteten voor het binnenvaart segment (links) en een algemeen vergelijking van de Stage V emissie eis met andere regelgeving (rechts) [4]

DOCUMENTATIEBLAD



Ship Power and Energy Concepts

SPEC, our conceptual design method, supports ship owners, designers and operators to define optimal power systems for ships with clean energy

Due to environmental awareness and ever tighter regulations, the maritime world faces an enormous challenge to change from fossil fuels to energy sources that cause minimal emission of greenhouse gasses as well as harmful gasses (NOx, SOx) and particle matter. The impact of this transition to cleaner power sources goes much further than simply replacing the old diesel engine with a modernised one. A multitude of alternative energy sources can be considered, as well as the equipment to convert them into useable power. Beside financial effects, the consequences, however, reach as far as new propulsions arrangements, changes for fuel storage, crew capabilities, necessary shore infrastructure and public support.

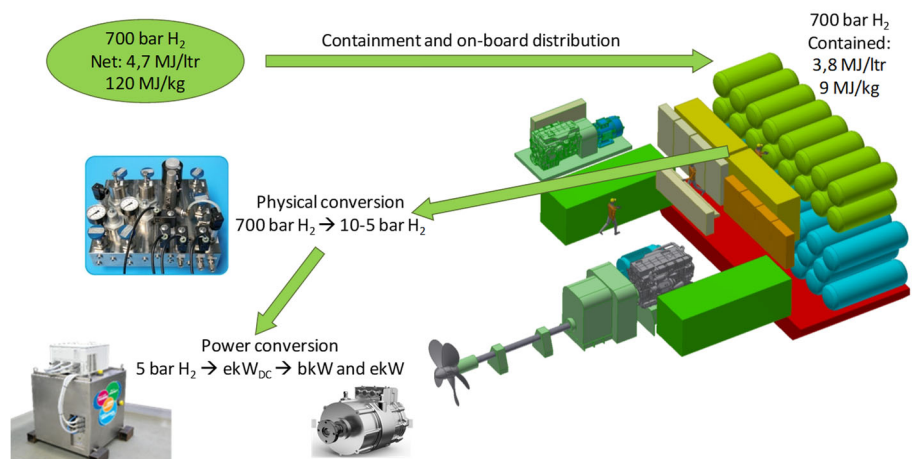


Information about alternative power is available from publications and exhibitions, conferences and symposia. For some applications vendors do offer commercial solutions, others are still very experimental. A clear picture is hard to get because information is often fragmented and offers a confusing perspective. This makes choosing the optimal technology for specific maritime operations a difficult task, and implementing the consequences in the ship design a complicated challenge.

New energy carriers – From energy to power in shipping

Hydro Systems Integration

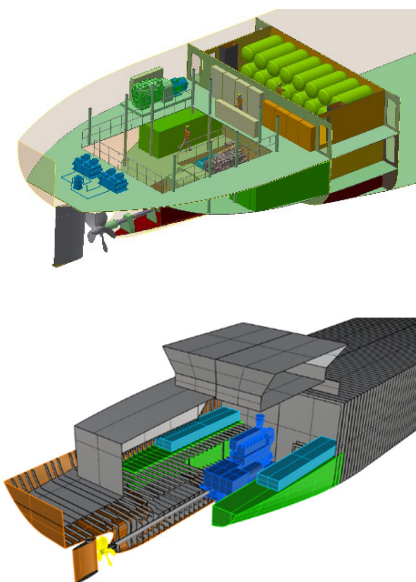
The transition from conventional propulsion and power systems powered by fossil fuels to future systems that do not produce any harmful emissions requires knowledge about the behaviour and control of these systems. Therefore, MARIN is setting up a test environment for digital and physical research on 'Hydro Systems Integration'. This will enable and support the marine sector to implement clean power systems.



Compared to fossil fuels alternative energy carriers have several different properties. Therefore, the complete energy and power chain from tank to propulsion has to be designed outside the conventional framework.

What benefits do MARIN's SPEC based services offer decision makers in ship design?

- An overview of alternative solutions and their properties, vendor-independent and considering the complete optimised system.
- Insight in the consequences of design choices and priorities for the operation and the size and lay-out of the ship.
- A conceptual design and layout of the power and propulsion systems including bunker storage which can be used for further design.
- Clear information enabling a responsible choice for the optimal power concept for specific operations.

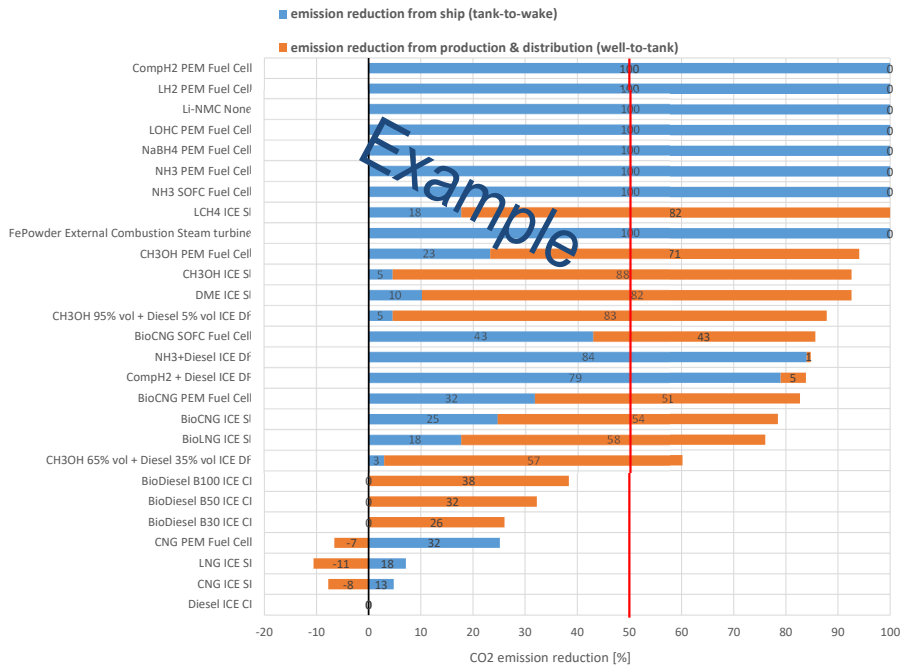


The variety of possible energy carriers, the power conversions and the appropriate propulsion and power configurations require a holistic conceptual design method. This is why MARIN has developed the SPEC method.

Starting point for SPEC are the operational requirements of the ship as well as criteria, objectives and priorities of the owner. A database with properties of all sorts of energy sources, its equipment and storage requirements is used. From here SPEC first starts with a pre-selection to disregarded solutions which do not (at all) fulfil the objective. A multi-criteria ranking can be performed, based on weighing factors for operations and investments. Alternatively, a selection purely on system size or weight can be made using a Ragone chart. The tool does not have an algorithm to determine the 'right' solution. The process is an exploration, which requires involvement of the ship owners at various stages, to provide requirements and preferences.

The criteria cover all sorts of technical, economic, environmental and societal aspects. Initial effects during design and building are considered, as well as long term effects during operations.

By changing the scores and weights of the criteria, future estimates can be made using multiple scenarios for the maritime energy transition. The output of SPEC is an independent, future proof and operations based ranking of a wide selection of solutions.



For more information contact MARIN:
 Department Ships
 T + 31 317 49 34 72
 E ships@marin.nl

For the most attractive solutions a more detailed analysis is performed. How do the effects of such a solution reflect on the ship design? Will it have to be larger, will it require more power? For this analysis we use iterative calculations and typical design coefficients. To come to a potential solution, a concept lay-out can be developed, including the major systems that would be required. This can support proper integration with the ship hull design and its future operations.

MARIN
P.O. Box 28

6700 AA Wageningen
The Netherlands

T +31 317 49 39 11
E info@marin.nl

I www.marin.nl
   