

TNO-rapport**TNO 2018 R10204v2****Handelingsperspectief voor duurzaam
personenvervoer over water in 2022****Traffic & Transport**Anna van Buerenplein 1
2595 DA Den Haag
Postbus 96800
2509 JE Den Haag

www.tno.nl

T +31 88 866 00 00

Datum	5 juli 2018
Auteur(s)	P. van Mensch, R. Verbeek, R. Louman
Exemplaarnummer	2018-STL-RAP-0100312724
Aantal pagina's	51 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	4
Opdrachtgever	Provincie Zuid-Holland, Metropoolregio Rotterdam - Den Haag, Drechtsteden, Havenbedrijf Rotterdam en de gemeente Rotterdam
Projectnaam	Benchmark duurzaamheid personenvervoer over water
Projectnummer	060.29342

Alle rechten voorbehouden.

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

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2018 TNO

Samenvatting

Achtergrond

In de provincie Zuid-Holland vindt personenvervoer over water plaats in de Drechtsteden, de regio Rotterdam en op de Maasvlakte (Waterbus, Watertaxi en FastFerry). Voor dit personenvervoer zijn contracten afgesloten vanuit verschillende overheden, te weten Provincie Zuid-Holland, Metropoolregio Rotterdam - Den Haag (MRDH), Drechtsteden, Havenbedrijf Rotterdam en de gemeente Rotterdam. In de aanloop naar de nieuwe contractperiode die ingaat op 1 januari 2022 zijn de aanbestedende partijen op zoek naar manieren om het vervoer in de nieuwe periode duurzamer te maken (minder CO₂-uitstoot en minder luchtverontreinigende emissies). De provincie Zuid-Holland heeft TNO om advies gevraagd betreffende het stellen van duurzaamheidseisen voor de nieuwe aanbesteding, specifiek voor de lijnen 18 t/m 24 (Waterbus) en het vraag gestuurde vervoer (Watertaxi) over water.

Methode

Om tot dit advies te komen is eerst de huidige situatie van het personenvervoer over water in de Drechtsteden/Rotterdam onderzocht. Het gaat dan om de eigenschappen van de huidige vloot en de vaarprofielen op de verschillende lijnen, die in kaart zijn gebracht door interviews en metingen. Vervolgens is er met een literatuurscan, en binnen TNO beschikbare kennis en ervaring, een inventarisatie gemaakt van beschikbare duurzaamheidsopties. De inventarisatie richtte zich op het identificeren van handelingsperspectief om luchtverontreinigende- en/of broeikasgasemissies te reduceren. Deze inventarisatie is getoetst door diverse partijen die ervaring hebben met dergelijke opties te interviewen. Voor de afweging of de geïnventariseerde opties geschikt zijn voor personenvervoer over water, is een Multi-Criteria-Analyse gebruikt. Na de toetsing op de diverse criteria zijn er zogenaamde 'key-opties' geselecteerd. De key-opties zijn aan de hand van de huidige vaarprofielen verder uitgewerkt om de technische haalbaarheid en het effect op duurzaamheid en kosten in te schatten bij toepassing op de huidige dienstverlening.

Resultaten

Vaarprofiel

Op basis van metingen aan boord van de schepen en modelberekeningen is inzicht gegeven in het vaarprofiel en energiegebruik.

Uit de analyse komt naar voren dat er drie typen vervoer zijn als het aankomt op het vaarprofiel:

- Klein, snel, variabele afstand: Twaalf vraag gestuurde schepen
- Groot, langzaam, korte afstand: Drie grote schepen (60 – 150 pax) die korte afstanden varen op relatief lage snelheden en motorvermogens.
- Groot, snel, lange afstand: Negen grote (catamaran) schepen (60 – 150 pax) die lange afstanden varen op hoge snelheden en motorvermogens.

Inventarisatie en beoordeling duurzaamheidsopties

In het rapport worden vijf hoofdopties voor aandrijflijnen onderscheiden, te weten:

- Dieselmotor met conventionele brandstof: conventionele dieselmotor en schone dieselmotor;

- Schone en/of duurzame brandstoffen: biobrandstoffen en aardgas;
- Hybride in combinatie met schone dieselmotor: met en zonder bijladen aan wal;
- Volledig elektrisch: met batterijen of waterstof;
- Zuiniger varen: efficiënte romp, lichter schip.

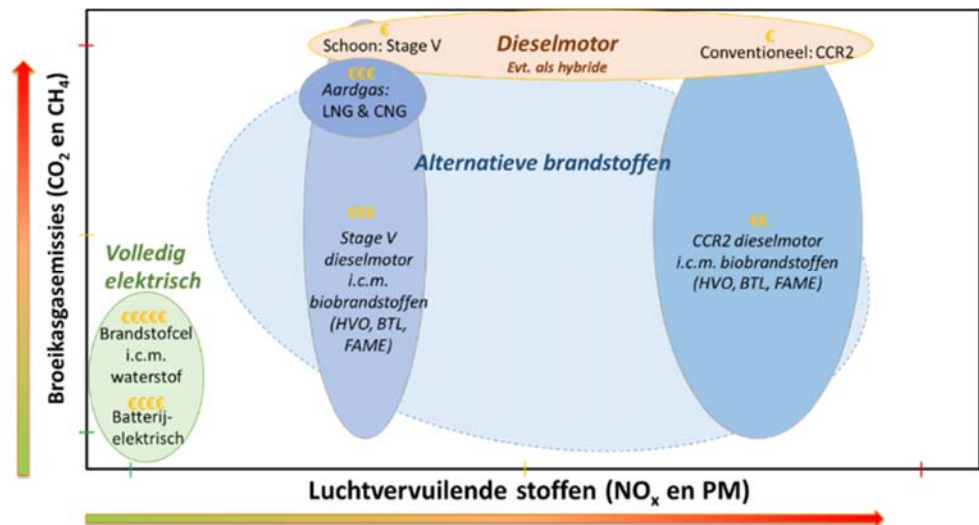
Twee belangrijke vereisten voor de duurzaamheidsopties zijn de marktrijpheid en het in voldoende mate beschikbaar zijn van de benodigde brandstof. De duurzaamheidsopties die naar inschatting hier goed op scoren, zijn vervolgens beoordeeld op onderstaande criteria:

- Effect op duurzaamheid: NO_x, fijnstof en CO₂ (Well-To-Propeller);
- Effect op kosten: OPEX, CAPEX;
- Effect op operatie: range, bunkertijd, flexibiliteit inzetbaarheid schepen (schepen zijn op meerdere routes inzetbaar), bedrijfszekerheid.

Beoordeling van de duurzaamheidsopties

Het onderstaande figuur vat het effect van de duurzaamheidsopties op duurzaamheid en kosten samen. De horizontale as geeft het effect op luchtvervuilende stoffen weer, links is positief en rechts is negatief.

De verticale as geeft het effect op broeikasgasemissies weer, laag is positief en hoog is negatief. De euro's geven indicatief het effect op kosten weer. Zoals te zien in het onderstaande figuur varieert het effect op luchtvervuilende- en broeikasemissies ten opzichte van de conventionele dieselmotor sterk per optie.



Figuur 1: Het effect van de duurzaamheidsopties op luchtvervuilende stoffen, broeikasemissies en kosten. € = lage kosten, €€€€€ = hoge kosten.

Voor wat betreft het 'effect op operatie' scoren de opties die gebruik maken van dieselbrandstof of biobrandstoffen goed. De volledig elektrische opties hebben de grootste impact op de operatie. Vooral de range van het vaartuig vermindert sterk ten opzichte van de opties met een verbrandingsmotor.

Selectie van de duurzaamheidsopties

Op basis van de beoordelingen op de bovengenoemde criteria en overleg met de aanbestedende partijen zijn de volgende key-opties verder uitgewerkt: Stage V-dieselmotor, HVO (synthetische diesel uit plantaardige olie) in Stage V-motor, CNG/LNG (aardgas) die voldoet aan Stage V-norm, niet plug-in hybride en batterij-elektrisch.

Effect van key-opties op duurzaamheid en kosten

De onderstaande tabel geeft een inschatting van het effect op duurzaamheid en kosten per optie. In deze berekeningen worden de kosten voor de verschillende aandrijflijnen en brandstoffen vergeleken. Voor de aandrijflijnen is onderscheid gemaakt tussen de verschillende typen inzet. In de kostenberekeningen zijn de onderstaande aspecten meegenomen:

- OPEX: brandstofkosten (op basis van brandstofprijzen en brandstofverbruik van de huidige vloot), onderhoudskosten (motor + nabehandelingssystemen), gebruik van ureum¹.
- CAPEX: aanschaf motoren, motorrevisiekosten, batterijen.

Tabel 1: Effect op duurzaamheid en kosten (alleen aandrijflijn) van key-opties

Hoofdoptie	Varianten	Indicatie emissiereductie [%]			Indicatie kosten aandrijflijn (OPEX+CAPEX)	
		NO _x	PM	CO ₂ *	Gemiddeld %	Range %
Dieselmotor met conventionele brandstof	CCR 2 motor	0% (baseline)				
	Stage V-motor	50 - 70%	>90%	0 - 10 %	+ 10%	+ 10 tot 15%
Verbrandingsmotor met alternatieve brandstof	50% HVO in Stage V motor	50 - 70%	>90%	20 - 45%**	+ 40%	+ 30 tot 45%
	CNG Stage V***	50% - 70%	>90%	0 - 10 %	- 10%	- 15 tot + 25%
Hybride i.c.m. Stage V dieselmotor	Niet plug-in***	70%	>90%	0 - 10 %	+ 25%	+ 20% tot + 50%
Volledig elektrisch	Batterij-elektrisch***	100%	100%	50 - 100%	- 15%	- 20% tot +25%

* Well-To-Propeller emissies: emissies uit de gehele brandstofkosten zijn meegenomen.

** Exclusief het effect van landgebruik, anders een range van -100 tot 45%.

*** Nieuw schip en extra walinfrastructuur is benodigd.

Conclusies

De grote snelle schepen met een lange inzet zijn dominant in energiegebruik en emissies: lijn 20 zorgt voor bijna 50% van het totale energiegebruik en de totale emissies. Verschoning van deze lijn heeft de meeste impact.

Handelingsperspectief voor emissiereductie op de bestaande vloot

- Voor de reductie van NO_x en fijnstof is de toepassing van een Stage V-motor op de bestaande vloot de meest geschikte optie. De emissies van NO_x en fijnstof worden respectievelijk met ca. 70 en 90% gereduceerd ten opzichte van de motoren die momenteel worden toegepast (CCR2).

¹ Een ureum-wateroplossing is benodigd om NO_x te reduceren in de SCR-katalystor.

De hoeveelheid die nodig is om voldoende NO_x te reduceren kan verschillen per motor. Gemiddeld wordt gerekend met een ureum-wateroplossing van 5% ten opzichte van het brandstofverbruik.

- Als in alle schepen een Stage V-motor wordt geïnstalleerd, leidt dat tot ca. 3 miljoen euro (indicatie) extra kosten over een periode van 14 jaar ten opzichte van de toepassing van CCR2. Hiermee is het de meest economische optie waarbij de levensduur van de huidige vloot wordt volledig wordt benut.
- Vanwege beperkte ruimte in de huidige schepen zijn de afmetingen en het gewicht van de Stage V-motoren een belangrijk aandachtspunt, de keuze voor compacte en lichte motoren heeft de voorkeur.
 - Het is belangrijk om in de praktijk te monitoren of de emissies op het voorgeschreven niveau blijven. Afhankelijk van de opzet liggen de kosten voor continue monitoring (aan boord van het schip) tussen de €2.000 en €3.000 per jaar per schip.
 - Voor de reductie van broeikasgasemissies bij bestaande schepen is de toepassing van de biobrandstof HVO in combinatie met fossiele diesel (50/50) de meest eenvoudige optie vanuit technisch oogpunt. Door de toepassing van 50% HVO kunnen de broeikasgasemissies tot ca. 45% gereduceerd worden. Deze optie is direct toepasbaar in de huidige en toekomstige motoren, maar resulteert wel in een toeslag van bijna 50% op de brandstofkosten. Als in alle schepen een Stage V-motor wordt geïnstalleerd en er wordt 50% HVO toegepast leidt dat tot de ingeschatte kosten van ca. 12 miljoen euro extra kosten over een periode van 14 jaar ten opzichte van de toepassing van CCR2 en fossiele diesel.
 - De meerkosten voor HVO zijn proportioneel aan de bijmengverhouding; echter, een lagere bijmengverhouding zal ook leiden tot een lagere broeikasgasemissie reductie.
 - De biobrandstof FAME is goedkoper dan HVO maar is alleen toepasbaar in blends tussen de 10-30%. FAME zorgt daarnaast voor meer onderhoud en heeft een negatieve invloed op de bedrijfszekerheid. Bij zowel FAME als HVO zijn de grondstof en productiemethode van grote invloed op de potentiële broeikasgasreductie.

Handelingsperspectief voor emissiereductie bij nieuwe schepen

- De grootste reductie (100%) van zowel broeikasgasemissies als luchtverontreinigende emissies kan gerealiseerd worden door een elektrische aandrijflijn die gebruik maakt van groene stroom. Voor de realisatie van een elektrische aandrijflijn is een nieuw schip nodig, alsmede investeringen in de walinfrastructuur.
- Een beperkte reductie in broeikasgasemissies kan gerealiseerd worden door de toepassing van CNG en LNG. Voor deze toepassing is hoogstwaarschijnlijk een nieuw schip nodig, alsmede een bunkerstation aan wal. De luchtvervuilende emissies van CNG en LNG worden gezien als equivalent aan de Stage V-dieselmotor; dit terwijl voor een Stage V-dieselmotor geen nieuw schip vereist is.
- Ook bij de toepassing van een hybride aandrijflijn zijn de voordelen ten aanzien van de totale emissies beperkt, terwijl wederom een nieuw schip benodigd is. Een voordeel van de hybride aandrijflijn is dat er lokaal emissievrij gevaren kan worden.

Technische haalbaarheid van elektrisch varen

- Voor de meeste lijnen wordt een elektrische aandrijflijn als haalbaar beoordeeld. De technische haalbaarheid van een elektrisch schip is voor lijn 20 wel een uitdaging. Dit komt vooral door de hoeveelheid benodigde energie in combinatie met de beperkte tijd voor laden aan wal. Om elektrisch varen ook

voor de meest intensieve lijn (lijn 20) haalbaar te maken, is een aanpassing van de dienstregeling of het vaarprofiel nodig (bijv. langzamer varen). Een alternatief is het inzetten van extra schepen, vaker tussendoor bijladen of nog hogere laadvermogens toepassen.

- Een lichtgewicht en vernieuwde catamaran kan het energiegebruik met ca. 20% reduceren ten opzichte van de huidige catamarans. Dit draagt bij aan de haalbaarheid van elektrisch varen, maar is niet voldoende om lijn 20 (zonder aanpassingen aan het vaarprofiel en/of de dienstregeling of extra schepen) haalbaar te maken.
- Om de bedrijfszekerheid van lijn 20 te waarborgen, kan er eventueel ervoor gekozen worden om een dieselmotor te plaatsen bij de elektrische aandrijving zodat eventuele laadstoringen kunnen worden opgevangen. Hierbij is het wel belangrijk om te waarborgen dat de schepen zoveel mogelijk via de walvoorziening worden bijgeladen.
- Voor het vraag gestuurde vervoer is een elektrische aandrijflijn ook een uitdaging door de sterk variërende inzet en het grote aantal aanmeerlocaties (50). Deze zullen niet allemaal voorzien kunnen worden van een laadstation. Daarnaast zorgt het varen met 50 á 60 km/h voor een grote energiebehoefte.
- Bij het vraag gestuurde vervoer biedt een dieselgenerator de mogelijkheid om langer te kunnen blijven varen. Zo zijn de schepen meer flexibel qua inzet en kunnen ze ook op relatief hoge snelheden blijven varen. Het toepassen van een dieselgenerator maakt het schip wel duurder en zwaarder. Als alternatief kan er ook voor worden gekozen om langzamer te gaan varen.

Kosten & baten van elektrisch varen

- De totale kosten-baten voor een elektrische aandrijflijn (exclusief schip en walinfrastructuur) voor de snelle schepen komen gunstig uit ten opzichte van een conventionele dieselmotor. Dit is gebaseerd op de verwachte lagere accuprijs in 2022 en een laag tarief voor elektriciteit (6 cent per kWh).
- Hoe hoger het energiegebruik van het schip, hoe gunstiger de kosten-baten analyse van een elektrische aandrijflijn uitkomt ten opzichte van een conventionele aandrijflijn met dieselmotor. Dit komt doordat de besparing gerealiseerd wordt door lagere operationele kosten per draaiuur.
- Voor een elektrische aandrijflijn is, in ieder geval voor de catamarans, een nieuw schip nodig. De kosten voor een nieuwe catamaran met een conventionele dieselaandrijving kost ordergrootte 2,5 M€, afhankelijke van gekozen configuratie. De (kleinere) vraag gestuurde schepen kosten ca. €225.000 per schip.
- De totale investering voor het beschikbaar maken van het elektrische vermogen voor het snelladen bij de kades wordt geraamd op ca. €451.000 voor laadstation van 250 kW en €715.000 voor een laadstation van 1000 kW. Afhankelijk van de lokale situatie, zoals de nabijheid van hoogspanning, kunnen grote verschillen optreden.
- Als er nieuw schip wordt aangeschaft, is het afhankelijk van de inzet of de totale kosten-baten van een elektrische aandrijflijn gunstig uitkomt ten opzichte van een conventionele dieselaandrijving. Ook de afschrijvingstermijn van een schip heeft een sterke invloed.
- Bijvoorbeeld: Lijn 20 heeft het hoogste energiegebruik. Indien het technisch lukt om op deze lijn elektrische schepen in te zetten wordt ingeschat dat er over een periode van 14 jaar ca. 2,6 M€ bespaard ten opzichte van een conventionele dieselmotor. Dit betekent dat de business case nog steeds positief is als er twee laadstations geplaatst moeten worden. Daarentegen, als ook de kosten

van vier nieuwe schepen meegerekend worden (ca. 10 M€), is de business case niet meer positief (uitgaande van een afschrijving van de schepen over een concessieperiode van 14 jaar).

Aanbevelingen

Batterij-elektrisch wordt gezien als de meest kosteneffectieve en duurzame optie op lange termijn als er nieuwe schepen aangeschaft worden, omdat gebruik gemaakt wordt van goed betaalbare (duurzame) energie. Een voorwaarde voor het rendabel zijn van een elektrische aandrijflijn, is een reductie van de prijs voor afnemers van elektriciteit (bijv. naar €0,06 per kWh). In de aanloopfase brengt dit hoge kosten met zich mee zoals geheel nieuwe schepen en een kostbare laadinfrastructuur. Gezien de hoge kosten van nieuwe schepen en de benodigde walinfrastructuur, wordt er aangeraden om niet direct de hele vloot te vervangen door elektrische schepen. Waar lijnen niet geëlektrificeerd worden, wordt er aangeraden om de schepen op deze lijn om te bouwen naar Stage V. Bij de keuze welke lijnen het beste geëlektrificeerd kunnen worden, zijn drie overwegingen leidend: de technische haalbaarheid, het effect op de emissies en het effect op de kosten. Deze drie overwegingen kunnen tot tegenstrijdige conclusies leiden. Bijvoorbeeld, een elektrische aandrijving is voor de langzame korte lijnen technisch gezien makkelijker, maar heeft nauwelijks effect op de totale emissies door het relatief lage brandstofverbruik. Hierdoor levert de elektrische aandrijflijn bovendien weinig voordeel in de operationele kosten. Mogelijke scenario's die overwogen kunnen worden, waarin deze overwegingen op verschillende manieren worden meegenomen, zijn:

- Zoals eerder aangegeven, is de toepassing van Stage V-motoren op de gehele bestaande vloot een geschikte optie om de NO_x en fijnstof emissies te reduceren. De emissies van NO_x en fijnstof worden respectievelijk met ca. 70% en 90% gereduceerd ten opzichte van de motoren die momenteel worden toegepast (CCR2). De CO₂-besparing is daarentegen minimaal. Als in alle schepen een Stage V-motor wordt geïnstalleerd, leidt dat tot ca. 3 M€ (indicatie) extra kosten over een periode van 14 jaar ten opzichte van de toepassing van CCR2. Hiermee is het de meest economische optie.
- Lijn 23 + 24 is een lijn met een hoog brandstofverbruik die technisch haalbaar is voor een elektrische aandrijflijn. Een elektrische aandrijflijn levert op deze lijn ook een voordeel op de operationele kosten. Daarnaast komt het schip twee keer langs de Merwekade (eindpunt lijn 23 = begin lijn 24 (zelfde schip), en vice versa). Hierdoor kan er met één laadstation alsnog twee keer worden bijgeladen tijdens een trip. Op dezelfde locatie zijn ook de aanmeerlocaties voor lijn 20 en 22. Hierdoor kunnen in de toekomst kosten voor de walinfrastructuur bespaard worden indien ook op deze lijnen een elektrisch schip toegepast gaan worden. Elektrificatie van lijn 23 + 24 en een ombouw van de resterende vloot naar Stage V levert een reductie van ca. 11% CO₂ ten opzichte van een conventionele dieselmotor. Dit is een hogere besparing dan het elektrificeren van de langzame schepen, bovendien zijn de kosten lager. Ten opzichte van een conventionele dieselmotor worden de meerkosten over 14 jaar ingeschat op een totaal van 5,8 M€ (inclusief het ombouwen naar Stage V).
- Door vervolgens lijn 18 ook te elektrificeren gaat de CO₂-reductie naar 20%. De totale kosten nemen daarentegen ook fors toe door twee extra schepen en twee extra laadstations. Ten opzichte van een conventionele dieselmotor worden de

meerkosten over 14 jaar ingeschat op een totaal van 11,8 M€. Een van de laadpunten van lijn 18 zou echter gecombineerd kunnen worden met lijn 20. Door lijn 18 en lijn 23 + 24 te elektrificeren, ligt de laadinfrastructuur voor lijn 20 klaar voor het moment dat deze lijn technisch haalbaar wordt.

- Een ander mogelijk scenario is dat alle schepen voor lijn 20 en de helft van de vraag-gestuurde vloot worden vervangen door batterij-elektrische schepen. De overige schepen worden dan omgebouwd met Stage V-motoren. De haalbaarheid van dit scenario is echter sterk afhankelijk van de dienstregeling: met de huidige tijd aan wal en het huidige aantal schepen, is dit scenario momenteel niet haalbaar.
Dit scenario is het meeste kosteneffectief voor de uitstootreductie van alle emissies. NO_x, PM en CO₂ worden over de gehele vloot met respectievelijk 89, 97 en 66% gereduceerd. De meerkosten ten opzichte van een conventionele CCR2 motor worden geschat op ca. 11,4 M€. Dit is inclusief nieuwe schepen en walinfrastructuur, maar exclusief een mogelijke uitbreiding van de vloot om de dienstregeling op lijn 20 precies te handhaven. Deze kosten liggen lager dan het scenario waarin 50% HVO wordt toegepast in alle Stage V-motoren, terwijl de emissiereductie hoger is.
- Indien alleen de vier schepen van lijn 20 geëlektrificeerd worden en de vraag gestuurde schepen niet (dus alles Stage V behalve lijn 20), dan worden de meerkosten op 10 M€ geschat met een CO₂-reductie van ca. 50%. Ook deze optie heeft een hogere reductie van emissies en lagere kosten dan de optie van 50% HVO in Stage V-motoren.

Overwegingen voor vervanging van de vloot

De economische aspecten in ogenschouw nemend, is een volledig omgebouwde/vervangen vloot per 2022 lastig te realiseren. Er wordt wel aanbevolen om vanaf 2022 twee tot vier grote schepen per jaar te verduurzamen. Met dit schema zijn in 2027 alle grotere schepen omgebouwd.

De leeftijd van de huidige schepen is een belangrijk aspect dat kan worden meegewogen in de overweging welke schepen het beste vervangen kunnen worden door elektrische schepen. De vloot bevat zes schepen met het bouwjaar 1999. Deze schepen kunnen technisch na 2022 waarschijnlijk nog een concessieperiode mee. Desalniettemin hebben deze schepen wel al 23 jaar afschrijvingstijd gehad in 2022. Om de levensduur van de schepen in de huidige vloot zo goed mogelijk te benutten wordt aanbevolen om de oudste schepen met een hoog brandstofverbruik de hoogste vervangingsprioriteit te geven. Vier schepen met het bouwjaar 1999 worden (roulerend) ingezet op lijn 21, 23 en 24, de andere twee op lijn 20. Economisch gezien is het niet aantrekkelijk om slechts de helft van schepen van een lijn elektrisch te maken omdat de laadstations dan over minder schepen afgeschreven moeten worden. Om lijn 23 + 24 volledig elektrisch te maken, is één elektrisch schip benodigd. Voor lijn 20 is er dan sprake van vier elektrische schepen; twee hiervan vervangen in dit geval een schip uit 1999.

De uiteindelijke keuze zal afhangen van de investeringsbereidheid en gewenste emissiereductie. De afweging tussen luchtverontreinigende emissies en broeikasgasemissies is hierin een belangrijk aspect. Immers, als er

alleen luchtverontreinigende emissies gereduceerd dienen te worden is er niet per se een elektrische aandrijflijn benodigd. Indien er ook een significante broeikasgasreductie gerealiseerd dient te worden, wordt aanbevolen om snelle schepen (deels) te elektrificeren. Dit lijkt economisch aantrekkelijker te zijn dan de toepassing van 50% HVO in alle schepen.

Aanbevelingen voor vervolgwerk

- Gedetailleerde uitwerking van de verschillende scenario's en het ingroeimodel in samenwerking met stakeholders zoals de overheden, scheepswerven, exploitanten en energieleveranciers.
- Onderzoeken wat de praktische mogelijkheden zijn voor de laad-infrastructuur + nadere specificering van de kosten.
- Mogelijkheid tot aanpassing vaarschema's en/of vlootsamenstelling om ruimte te creëren voor het laden van de accu's voor lijn 20.
- Validatie van de TCO-berekening met stakeholders.
- Verder onderzoek naar financieringsconstructies die gebruik maken van Europese en eventueel nationale subsidies om de groei van nieuwe schone schepen te bevorderen.
- Voorafgaand aan de bouw van een nieuw schip:
 - Een nauwkeurige meting van de energiebehoefte van het schip;
 - Het inventariseren van de beschikbare ruimte op de kade voor de laadinfrastructuur en de kosten daarvan.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
	Begrippenlijst	11
1	Inleiding	12
1.1	Achtergrond.....	12
1.2	Doelstelling.....	12
1.3	Aanpak.....	12
2	Huidige situatie personenvervoer over water	14
2.1	Overzicht lijndiensten.....	14
2.2	Huidige vloot.....	14
2.3	Vaarprofiel.....	15
2.4	Huidige situatie in Europa.....	17
3	Inventarisatie, beoordeling en selectie van duurzaamheidsopties voor personenvervoer over water	19
3.1	Inventarisatie duurzaamheidsopties.....	19
3.2	Multi-Criteria-Analyse.....	21
3.3	Selectie van de duurzaamheidsopties.....	25
4	Key-opties toegepast op de huidige vloot	26
4.1	Technische haalbaarheid en aandachtspunten van de key-opties.....	26
4.2	Effect op emissies.....	29
4.3	Effect op kosten.....	29
5	Scenario's voor toepassing van duurzaamheidsopties op de huidige vloot en een voorbeeld ingroeimodel	34
5.1	Scenario's voor toepassing van duurzaamheidsopties op de huidige vloot.....	34
5.2	Ingroeimodel van duurzaamheidsopties.....	36
5.3	Financieringsinstrumenten.....	38
6	Conclusies en aanbevelingen	40
6.1	Conclusies.....	40
6.2	Aanbevelingen.....	42
7	Ondertekening	45
	Bijlage(n)	
	A Wettelijke vereisten	
	B Toelichting hybride aandrijflijn	
	C Resultaten voorselectie	
	D Kostenanalyse	

Begrippenlijst

CO ₂	Carbon dioxide
CNG	Compressed Natural Gas
DPF	Diesel Particulate Filter
FAME	Fatty Acid Methyl Esther
GTL	Gas to Liquid (synthetische diesel uit aardgas)
HVO	Hydrotreated Vegetable Oil (synthetische diesel uit plantaardige olie)
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattuur
Li-ion	Lithium-ion
LNG	Liquefied Natural Gas
NO _x	Stikstofoxide
PM	Particulate Matter of Fijnstof
POW	Personenvervoer Over Water
SCR	Selective Catalytic Reduction

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In de provincie Zuid-Holland vindt personenvervoer over water plaats in de Drechtsteden, de regio Rotterdam en op de Maasvlakte (Waterbus, Watertaxi en FastFerry). Voor dit personenvervoer zijn contracten afgesloten vanuit verschillende overheden, te weten Provincie Zuid-Holland, Metropoolregio Rotterdam - Den Haag (MRDH), Drechtsteden, Havenbedrijf Rotterdam en de gemeente Rotterdam. In de aanloop naar de nieuwe contractperiode die ingaat op 1 januari 2022 zijn de aanbestedende partijen op zoek naar manieren om het vervoer in de nieuwe periode duurzamer te maken (minder CO₂-uitstoot en minder luchtverontreinigende emissies). De provincie Zuid-Holland heeft TNO om advies gevraagd betreffende het stellen van duurzaamheidseisen voor de nieuwe aanbesteding, specifiek voor de lijnen 18 t/m 24 (Waterbus) en het vraag gestuurde vervoer (Watertaxi) over water.

1.2 Doelstelling

De doelstelling van het huidige project is om advies te geven betreffende de verduurzaming van de schepen waarmee personenvervoer over water wordt aangeboden vanaf 2022.

1.3 Aanpak

In het proces om tot dit advies te komen vallen verschillende stappen te onderscheiden:

- Het bepalen van de huidige situatie van het personenvervoer over water (POW) in de Drechtsteden/Rotterdam. Dit omvat het in kaart brengen van de huidige vloot (aandrijving, mogelijkheid tot retrofit) alsmede de vaarprofielen op de verschillende lijnen, aan de hand van on-board metingen en interviews. Deze informatie wordt later in het proces gebruikt om te bepalen welke verduurzamingsopties toepasbaar en effectief zijn.
- Het maken van een overzicht van Europese en nationale wettelijke vereisten, beleidskaders en financieringsinstrumenten.
- Het inventariseren van de (inter)nationale stand van zaken omtrent POW door middel van interviews. Deze informatie is gebruikt om te inventariseren welk duurzaamheidsopties elders in Nederland en Europa worden toegepast.
- Het maken van een inventarisatie van duurzaamheidsopties. Dit is gedaan op basis van binnen TNO beschikbare kennis en ervaring, aangevuld met een literatuurscan en de hiervoor genoemde (inter)nationale inventarisatie. Deze inventarisatie richtte zich op opties die luchtverontreinigende- en/of broeikasgasemissies reduceert. Ervaringen met dergelijke opties zijn getoetst door diverse partijen te interviewen die ervaring hebben met dergelijke opties.
- Het beoordelen van de geïnventariseerde opties middels een Multi-Criteria-Analyse (MCA).

- Het verder uitwerken van de meest effectieve verduurzamingsopties, en daarmee beter inzicht verschaffen in het verduurzamingspotentieel, de kosten en de toepasbaarheid.
- Het voorstellen van een ingroeimodel van de duurzaamheidsopties.

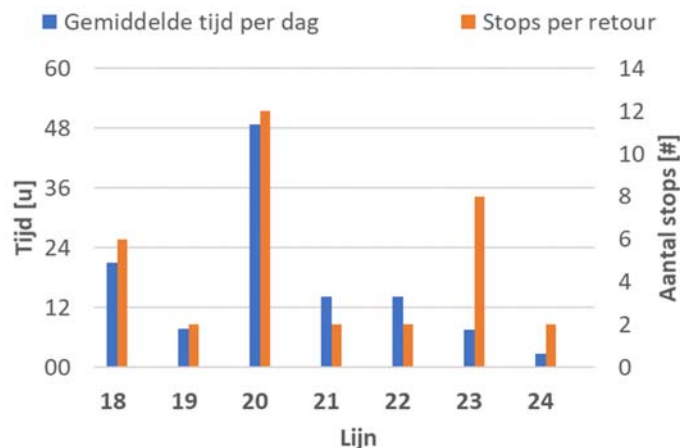
In dit rapport presenteert TNO de methodologie en de uitkomsten van deze stappen, alsmede het advies waar deze toe leiden.

2 Huidige situatie personenvervoer over water

2.1 Overzicht lijndiensten

Figuur 2 geeft een overzicht van de gemiddelde dienstdag (blauwe balken) en het aantal stops per retour (oranje balken) van de lijnen 18 t/m 24.

De gemiddelde dienstdag is bepaald aan de hand van de gegevens van 1 jaar, en omvat dus zowel de zomer- en winterperiode als de weekenden en doordeweekse dagen. Lijn 18 en lijn 20 varen de dienstregeling grotendeels met respectievelijk twee en vier schepen. Lijn 24 ligt in het verlengde van lijn 23; deze lijnen tezamen worden grotendeels met één schip gevaren. Lijn 19, 21, 22 en 24 hebben twee stops per retour, deze steken het water over tussen twee vaste plaatsen. Lijn 18, 20 en 23 varen een traject met meerdere tussenstops.



Figuur 2: Dienstdag per dag voor lijn 18 t/m 24.

Naast de vaste lijndiensten bevat deze studie ook vraag gestuurd personenvervoer over water. Deze schepen hebben een variabele inzet tussen 50 aanmeerlocaties. De schepen worden dag en nacht ingezet maar de meeste personen worden vervoerd tussen 09:00 en 16:00 uur. De drukste dagen zijn typisch vrijdag en zaterdag. Per dag vinden er grofweg tussen twintig en vijftig vaarten plaats per schip. Per uur vinden er typisch tussen de één en acht vaarten per schip plaats. De meest personen worden vervoerd in het centrum van Rotterdam.

2.2 Huidige vloot

Op basis van metingen aan boord van de schepen en modelberekeningen is inzicht verkregen in het vaarprofiel en energiegebruik.

Uit de analyse komt naar voren dat er drie typen vervoer zijn als het aankomt op het vaarprofiel:

- Klein, snel, variabele afstand: Twaalf² kleine schepen (8 - 12 pax) die relatief korte afstanden varen op een hoge snelheid. Dit is geen lijndienst, maar vraag gestuurd. De inzet is daarom variabel.
- Groot, langzaam, korte afstand: Drie grote schepen (60 – 150 pax) die korte afstanden varen op relatief lage snelheden en motorvermogens. Deze schepen maken een oversteek zonder tussenhaltes. Door de korte vaartijd liggen deze schepen relatief vaak aan wal. Dit gaat om lijn 19, 21 en 22.
- Groot, snel, lange afstand: Negen grote (catamaran) schepen (60 – 150 pax) die lange afstanden varen op hoge snelheden en motorvermogens. Deze schepen hebben meerdere tussenstops onderweg. Door de lange(re) afstand liggen deze schepen relatief kort aan wal. Dit gaat om lijn 18, 20 en 23 + 24.

Tabel 2 geeft de belangrijkste typische kenmerken van de huidige vloot weer.

Tabel 2: Typische kenmerken huidige vloot.

Type schip	Lijnen	Aantal schepen	Typisch vermogen	Emissieklasse	Draaiuren per jaar
Kort en snel	-	12	Ca. 300 kW	CCR2	± 3000
Kort en langzaam	19, 21, 22	3	150 - 380 kW*	Pre CCR - CCR2	± 4500
Lang en snel	18, 20, 23+24	9	630 - 900 kW	Overwegend CCR2	± 4500

* Op lijn 21 wordt met verschillende schepen gevaren, sommige schepen hebben hetzelfde vermogen als de categorie 'Lang en snel'.

2.3 Vaarprofiel

Per type schip is een vaarprofiel opgesteld met daarin de belangrijkste operationele karakteristieken. Dit is gedaan op basis van resultaten van het vorige onderzoek in 2013, een interview met de huidige exploitant en een bezoek aan boord bij een schip van elk type. Aan boord van het schip is de vaarsnelheid, het gemiddelde toerental en de tijdsduur van verschillende onderdelen van de reis gemeten. Tegelijkertijd is een interview gehouden met de kapitein. Daarnaast zijn ook de technische specificaties van de huidige motoren opgevraagd. Door een koppeling met de dienstregeling ontstaat een goed inzicht in het vaarprofiel per schip.

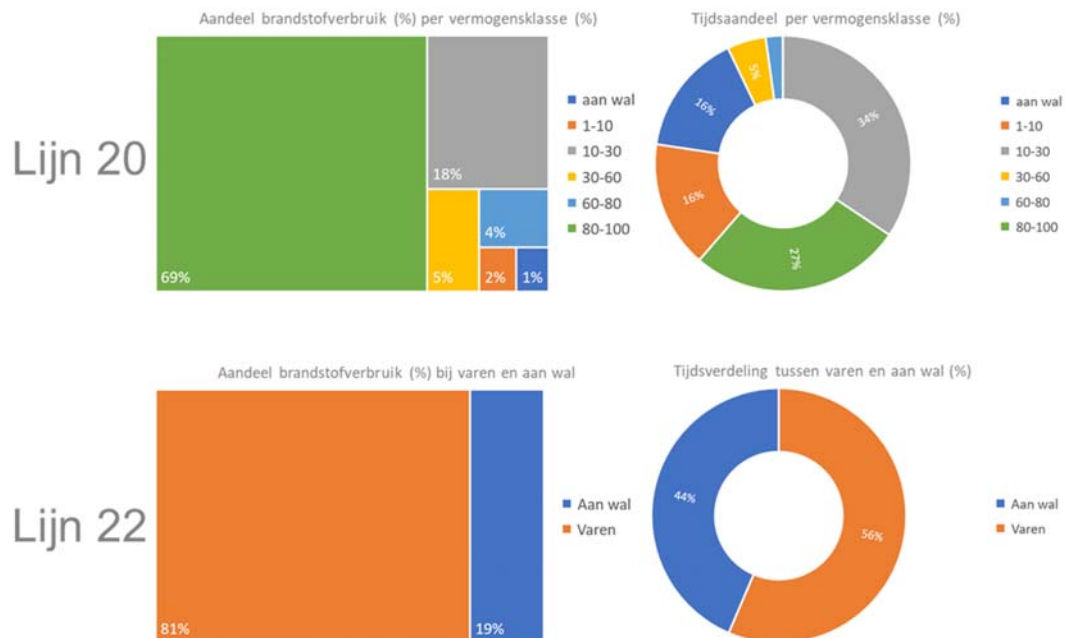
Belangrijke aspecten van het vaarprofiel zijn:

- De inzet per dag;
- Gemiddeld motorvermogen en piekbelasting van de motor;
- Het energie- en dieselverbruik per dag;
- Tijdsduur aan wal;
- Tijdsduur per vermogensklasse;
- Brandstofverbruik per vermogensklasse;

² De exploitant van het vraag gestuurde vervoer heeft meer dan twaalf schepen. De overige schepen varen langzamer. Binnen de scope van dit onderzoek vallen alleen de snelle varianten. De snelle varianten verzorgen ook het grootste aandeel van de vaarten.

Op basis van deze informatie kunnen de technische haalbaarheid en effecten op duurzaamheid van de duurzaamheidsopties ingeschat worden.

Figuur 3 geeft een voorbeeld van informatie die uit de vaarprofielen gehaald kan worden. Voor lijn 20 is het interessant om te zien dat het schip 27% van de tijd op nagenoeg maximaal vermogen vaart; dit zorgt voor 69% van het totale brandstofverbruik. Ook valt op dat de tijd aan wal slechts 16% van het totaal bedraagt, ondanks dat er twaalf stops in de route zitten. Lijn 22 laat juist zien het schip ca. 45% van de tijd aan wal ligt. Bij dit schip zou er dus meer tijd zijn om bij te laden in geval van het elektrische aandrijflijn.



Figuur 3: Voorbeeld vaarprofiel; lijn 20 versus lijn 22.

Tabel 3 geeft een weergave van de inschatting van het gemiddelde energie- en dieselverbruik per dag.

Tabel 3: Brandstof- en energiegebruik per dag per lijn

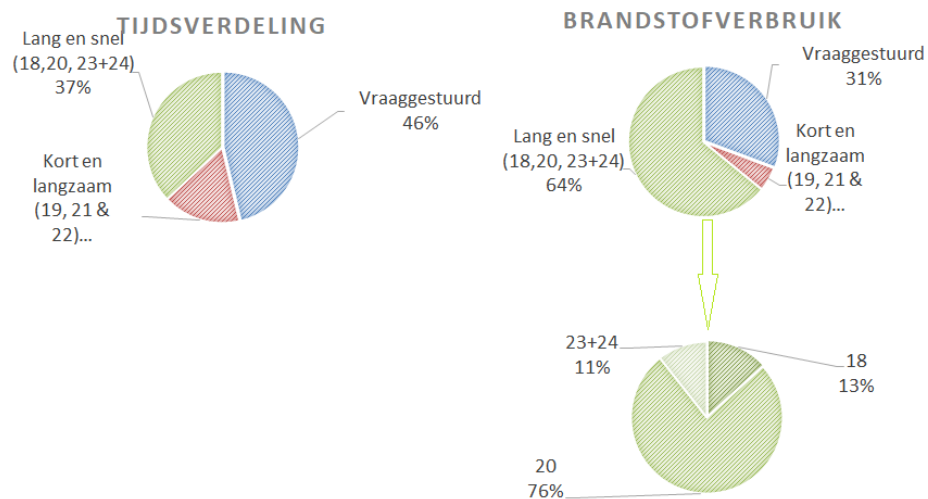
Lijndienst	Gemiddelde inzet per dag	Energiegebruik per dag*	Dieselverbruik per dag*
	[uur]	[kWh]	[L]
18**	21	2.629	704
19	8	309	84
20**	49	15.592	4.045
21	14	561	151
22	14	738	194
23	8	1.974	501
24	3	223	62

Vraag gestuurd	100	10.278	2.544
Totaal	216	32.305	8.285

* Inclusief hulpvermogen

** Meerdere schepen actief op deze lijn

Uit de analyse blijkt ook dat de lange snelle lijnen zorgen voor 37% van de totale duur van de inzet van de drie groepen schepen. Daarnaast zorgt deze groep voor 64% van het brandstofverbruik, zoals te zien in het onderstaande figuur. Duurzaamheidsopties op deze klasse schepen hebben daarom het meeste effect.



Figuur 4: Verdeling diensttijd en brandstofverbruik per type schip

2.4 Huidige situatie in Europa

Deze paragraaf beschrijft de inventarisatie van de (inter)nationale stand van zaken omtrent POW. Het doel was om te inventariseren welke duurzaamheidsopties elders in Nederland en Europa zijn toegepast. Om inzicht te krijgen in de internationale stand van zaken zijn er interviews gehouden met vergelijkbare en (op het gebied van duurzaamheid) vooruitstrevende aanbieders van POW.

Dit zijn:

1. GreenCityFerries (GCF), Zweden
2. GVB, Amsterdam
3. Norled, Noorwegen
4. Aqualiner, Antwerpen

Operationeel en duurzaam POW

1. Bij GCF wordt er gevaren met de plug-in hybride **Movitz**. Dit schip uit 1960 is in 2014 omgebouwd tot een plug-in hybride en kan 98 passagiers tegelijk vervoeren. Movitz wordt ingezet op een oversteek van 45 minuten, de gemiddelde vaarsnelheid hierop bedraagt 15 km/h. De hybride aandrijflijn - bestaande uit twee elektromotoren (beide 100kW), twee batterijen (beide 90kWh) en een dieselgenerator (90kW) - wordt ervaren als betrouwbaarder dan een enkele dieselmotor.

De Movitz vaart viermaal per dag de oversteek heen en weer.

De dieselgenerator wordt alleen gebruikt wanneer de batterij onder 20% van zijn capaciteit raakt. Gedurende dag wordt er 'snelladen' gebruikt om in 15 minuten de batterijen van 20% tot 80% op te laden.

's Nachts wordt op een lager vermogen geladen, om de levensduur van de batterij te verlengen.

2. GCF is mede-ontwikkelaar van de **BB-Green**. De BB-Green is volledig elektrisch en kan hoge snelheden halen (tot ca. 50 km/h). De BB-Green is een demonstrator, er wordt geen vaste dienstregeling mee gevaren. Één van de innovatieve aspecten van de BB-Green is dat deze air-supported is; door luchtballen langs de romp te sturen, neemt de weerstand af. Het is niet de verwachting dat hiermee een lagere wrijvingsweerstand dan de weerstand van een catamaran mee bereikt kan worden.
3. Norled vaart onder andere schepen met een elektrische, hybride (retrofit) en LNG-aandrijflijn. De accu's van de elektrische catamaran **Ampere** worden middels inductie (1600kW) opgeladen; door dit hoge laadvermogen is de 1000kWh batterij in zeer korte tijd bijgeladen. De Ampere wordt ingezet op een oversteek van ongeveer 20 minuten, en kan 360 passagiers en 120 voertuigen vervoeren. Na enkele oversteken, wordt de Ampere in 9 minuten weer bijgeladen.
4. De GVB vaart elf schepen. Hiervan varen twee schepen op GTL (Gas-To-Liquid) en zijn er zeven schepen met een conventionele aandrijflijn zonder uitlaatgasnabehandelingssysteem. Naast deze negen schepen vaart de GVB twee hybride schepen (GTL/diesel) met SCR (Selective Catalytic Reduction) nabehandeling om NO_x te reduceren. Deze hybride schepen kunnen 310 personen vervoeren. De accu's met een totale capaciteit van 136 kWh worden alleen 's nachts opgeladen; dit door middel van walstroom met een vermogen van ~40kW. De tekorten die gedurende de dag optreden, worden opgevuld met de dieselgenerator. Verder is in Amsterdam een convenant met de gemeente gesloten, waarin staat aangegeven dat in 2020 alle bussen en schepen volledig elektrisch zullen zijn; de huidige hybriden worden alleen als tussenstap gezien.

De interviews tonen aan dat elektrisch varen op hoge snelheden mogelijk is, alsmede dat er schepen zijn die met hoge vermogens kunnen laden. Er zijn, echter, geen elektrische schepen bekend die het varen op hoge snelheid met de intensieve dienstregeling van de Waterbus (korte tijd aan wal) combineren.

3 Inventarisatie, beoordeling en selectie van duurzaamheidsopties voor personenvervoer over water

3.1 Inventarisatie duurzaamheidsopties

Op basis van binnen TNO beschikbare kennis³, literatuur en praktijkervaringen van bestaande duurzame schepen in Europa (hoofdstuk 2) is een inventarisatie gemaakt van mogelijke duurzaamheidsopties en hun kenmerken. De geïnterviewde opties staan weergegeven in Tabel 4 en worden daarna verder toegelicht.

Tabel 4: Geïnterviewde duurzaamheidsopties

Type/ hoofdoptie		Varianten
Aandrijflijn	Dieselmotor met conventionele brandstof	CCR2 (referentie)
		Stage V
	Schone en/of duurzame brandstoffen	HVO
		FAME
		GTL
		CNG
		LNG
		Bio-methanol
	Hybride in combinatie met een schone dieselmotor	Niet plug-in
		Plug-in
Volledig elektrisch	Batterij-elektrisch	
	Brandstofcel i.c.m. waterstof	
Schip	Zuiniger varen	Andere rompvorm
		Air lubrication ⁴
		Lichter schip

³ Relevant zijn bijv. de volgende uitgevoerde studies:

- Factsheets van technische mogelijkheden voor het verlagen van de milieubelasting van passagiersschepen in Amsterdam (Factsheets of technical options to reduce the environmental pollution of passenger vessels in Amsterdam). TNO 2012 R10327, 7 december 2012.
- Natural gas in transport: An assessment of different routes. Ruud Verbeek, Norbert Ligterink, Jan Meulenbrugge, Gertjan Koornneef, Pieter Kroon, Hein de Wilde, Bettina Kampman, Harry Croezen, Sanne Aarnink. Joined report CE Delft, ECN, TNO, Publication code: 13.4818.38. May 2013
- Assessment of pollutant emissions with Shell GTL fuel as a drop in fuel for medium and heavy-duty vehicles, inland shipping and non-road machines. TNO report 2014 R10588. Date September 2014

⁴ Air lubrication: Luchttoevoer onder de romp voor een lagere weerstand in het water.

3.1.1 *Dieselmotor met conventionele brandstof*

Een dieselmotor met conventionele brandstof kent in het licht van deze studie twee varianten, een CCR2 en Stage V-motor. Dieselmotoren die momenteel in de markt verkrijgbaar zijn voldoen aan de emissienorm CCR2⁵. In 2019/2020 wordt de nieuwe emissienorm 'Stage V'⁶ van kracht voor nieuwe motoren. De Stage V-emissielimieten zijn veel strenger dan de limieten voor CCR2. De limieten voor Stage V staan weergegeven in bijlage B. De eisen voor motoren met meer dan 300 kW zijn strenger dan voor kleinere motoren. Motoren met een vermogen van meer dan 300 kW hebben zowel een roetfilter (voor reductie fijnstof) nodig als een NO_x reducerend systeem (doorgaans SCR⁷). Deze nabehandelingssystemen kunnen ook als 'retrofit' op bestaande motoren worden geplaatst om de emissies van huidig toegepaste motoren te verlagen. Dergelijke systemen worden primair toegepast om de luchtverontreinigende stoffen NO_x en fijnstof te reduceren. In plaats van Stage V kan ook een gemariniseerde Euro VI dieselmotor uit het wegverkeer worden toegepast. De Euro VI motor voldoet aan nog strengere eisen voor de NO_x emissies. De Euro VI kan overwogen worden als alternatief voor de Stage V-motor, mits er voor de betreffende vloot geschikte typen beschikbaar zullen zijn. Als in dit rapport gerefereerd wordt naar Stage V, dan kan dat geïnterpreteerd worden als Stage V of Euro VI.

3.1.2 *Schone en/of duurzame brandstoffen*

Hydrotreated Vegetable Oil (HVO), Fatty Acid Methyl Esther (FAME) zijn varianten van biodiesel die primair worden toegepast om de emissies van broeikasgassen te verlagen. Aan de uitlaat hebben deze brandstoffen een vergelijkbare broeikasgasemissie als gewone dieselbrandstof. Als de broeikasgasemissie van bron tot schroef bekeken wordt, kan er afhankelijk van de grondstof en productiemethode sprake zijn van een forse daling de broeikasgasemissies. Gas-to-Liquid (GTL) is een synthetische (dieselachtige) brandstof op basis van aardgas. GTL en HVO zorgen ook voor een verlaging van NO_x en fijnstof met zo'n 10% tot 20%. Voor Stage V-motoren is dit onzeker en veel minder relevant. GTL en HVO zijn over het algemeen zowel in bestaande als nieuwe schepen goed toe te passen. FAME kan alleen toegepast worden in een kleinere mengverhouding met diesel (afhankelijk van de motor tussen de 10 en 30%). Aardgas is beschikbaar als brandstof als gecombineerd gas (CNG) en als vloeibaar gas (LNG). Luchtverontreinigende emissies kunnen bij gebruik van CNG en LNG lager uitkomen dan bij conventionele CCR2 dieselmotoren. Bio-methanol is de hernieuwbare variant van fossiele methanol (op basis van aardgas).

3.1.3 *Hybride aandrijving*

Onder hybride aandrijving wordt in dit verband verstaan, de combinatie van een verbrandingsmotor (diesel- of gasmotor) en een elektrische aandrijving. Een hybride aandrijving kan op een groot aantal manieren geconfigureerd worden. Een verkeerd gekozen configuratie kan leiden tot een toename van het energieverbruik en emissies, terwijl een juist gekozen hybride deze parameters kan verbeteren. Dit is vooral afhankelijk van het vaarprofiel. Bijlage B geeft een nadere toelichting van de verschillende typen van hybride.

⁵ Centrale Commissie voor de Rijnvaart.

⁶ Onderdeel van de Non-Road Mobile Machinery emissie-wetgeving zoals beschreven in EU 2016/1628.

⁷ SCR: Selective Catalytic Reduction = katalysator voor NO_x reductie

In deze studie is vooral het verschil tussen plug-in (bijladen aan wal) en een niet plug-in belangrijk (zonder wal-laadaansluiting).

3.1.4 *Volledig elektrisch*

Een volledig elektrische aandrijving kan gerealiseerd worden met verschillende opties voor de energieopslag. Binnen dit project zijn twee opties als energieopslag in overweging genomen:

- 1 Batterijen;
- 2 Waterstof in combinatie met brandstofcel.

Beide opties zijn lokaal uitstootvrij. Als de energiebronnen niet duurzaam worden opgewekt komen er luchtverontreinigende- en broeikasgasemissies vrij bij de productie van de energiebronnen.

Batterij-elektrisch

Een batterij-elektrische aandrijflijn kan op verschillende manieren geconfigureerd worden, zowel qua batterij (type en capaciteit) en laadstrategieën. De keuze voor de juiste batterijsoort hangt af van de benodigde accucapaciteit, de snelheid waarmee moet worden geladen en hoe vaak er geladen moet worden. Qua laadstrategieën kan er gekozen worden om bijv. alleen 's-nachts bij te laden. Ook kan er gekozen worden voor tussendoor bijladen (al dan niet snelladen), of juist een combinatie van de twee.

Elektrische aandrijving met brandstofcel als energiebron

Volledig elektrische aandrijving met een brandstofcel is grotendeels vergelijkbaar met batterij-elektrische aandrijving. Het verschil is dat de accuopslagcapaciteit beperkt is en elektrische energie wordt geleverd door brandstofcellen in plaats vanuit het elektriciteits-netwerk. Waterstof is over het algemeen de energiedrager waar de brandstofcel door binding met zuurstofmoleculen energie uit opwekt.

3.1.5 *Zuiniger varen*

Om zuiniger te varen zijn in deze studie concepten meegenomen die de vaarweerstand verlagen. Dit bijv. door de rompvorm te optimaliseren of door 'Air lubrication' of een lichter schip toe te passen. Langzamer varen is ook een effectieve manier om de weerstand van een schip te verlagen. Dergelijke opties vallen buiten de scope van deze studie. Bovendien wordt het dan moeilijker om de huidige dienstregeling te handhaven.

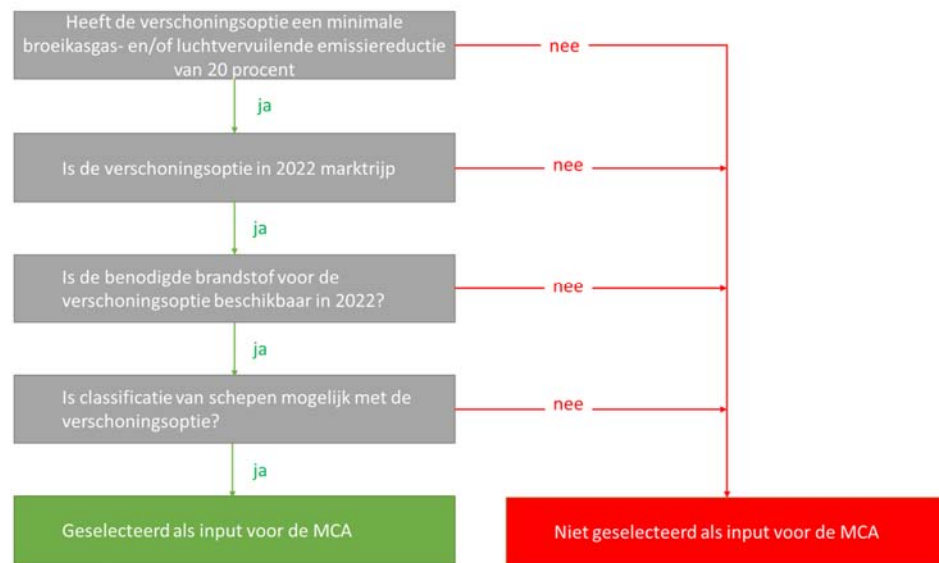
3.2 **Multi-Criteria-Analyse**

Om de grote hoeveelheid aan duurzaamheidsopties voor POW te beoordelen op meerdere, en eventueel conflicterende eigenschappen, is een methodische aanpak benodigd. De 'Multi-Criteria-Analyse' (MCA) methode is hiervoor een geschikte methode.

3.2.1 *Voorselectie*

Om te voorkomen dat de geïnventariseerde brandstoffen allemaal diepgaand geanalyseerd worden terwijl deze bij voorbaat mogelijk ongeschikt zijn voor het doel, vindt er een voorselectie plaats. De onderstaande beslisboom is ontwikkeld voor de selectie van de opties als input voor verdere analyse.

De opties die op alle criteria uit de beslisboom een 'ja' scoren worden geselecteerd voor verdere beoordeling.



Figuur 5: Overzicht selectiecriteria.

Bijlage C geeft de resultaten van de voorselectie weer. Het wordt verwacht dat bio-methanol niet marktrijp is in 2022. Er zijn nog geen motoren commercieel beschikbaar en is het ook niet voorzien dat dit op korte termijn wel het geval is. Ook zijn er nog geen procedures voor classificatie van een schip die gebruik maakt van bio-methanol. Deze optie valt daarom af.

3.2.2 Afwegingskader

Om een afweging te kunnen maken of de verschillende opties geschikt zijn voor POW is afwegingskader ontwikkeld. De verschillende duurzaamheidsopties zijn beoordeeld aan de hand van de volgende hoofd- en sub criteria:

- Effect op duurzaamheid: NO_x, fijnstof en CO₂ (Well-To-Propeller);
- Effect op kosten (inclusief walinfrastructuur): OPEX, CAPEX;
- Effect op operatie: range, bunkertijd, flexibiliteit inzetbaarheid schepen (schepen zijn op meerdere routes inzetbaar), bedrijfszekerheid.

Om de opties te kunnen toetsen is gebruik gemaakt van beschikbare kennis binnen TNO en bestaande literatuur. Daarnaast zijn er telefonische interviews gehouden met experts en stakeholders.

Op basis van de input wordt aan de verschillende duurzaamheidsopties per onderdeel een score gegeven. De beoordeling van de opties wordt gedaan door een score toe te kennen tussen de één en vijf. Hierbij is de score '1' de minste score en '5' de beste score. De score wordt per criterium bepaald op basis van de onderlinge verhoudingen tussen de verschillende brandstofopties op het desbetreffende criterium. Door een wegingsfactor toe te kennen aan de diverse criteria kunnen bepaalde criteria een hogere of lagere relevantie krijgen voor de bepaling van het eindresultaat. In deze studie worden alle hoofdcriteria identiek gewogen (1/3, 1/3, 1/3). Tabel 5 geeft het ingevulde afwegingskader voor de verschillende duurzaamheidsopties weer.

Effect op kosten & duurzaamheid

Een Stage V-motor met conventionele dieselbrandstof levert een beperkte reductie van broeikasgasemissies ten opzichte van een conventionele CCR2 dieselmotor. Daarentegen zorgt deze optie wel voor een forse emissiereductie van NO_x en fijnstof. Aardgasmotoren scoren vergelijkbaar met de Stage V-motor op het gebied van duurzaamheid. Een aardgasmotor zorgt voor hogere investeringskosten, maar ook voor lagere brandstofkosten.

Met de toepassing van biobrandstoffen kan wel een forse broeikasgasreductie worden gerealiseerd. De herkomst van de biobrandstof (grondstof en productiemethode) heeft daarbij een zeer sterke invloed op de mate van de reductie. Met betrekking tot de biobrandstof FAME is een bijmengpercentage van meer dan 10% in de reguliere diesel vaak nog niet goedgekeurd door de motorfabrikanten. Met een bijmengpercentage van 10% is de broeikasreductie minimaal. Bij de toepassing van 50% HVO en 50% reguliere diesel blijft de brandstof binnen de huidige dieselspecificatienorm. In het algemeen heeft de toepassing van biobrandstoffen een negatieve impact op de brandstofkosten ten opzichte van fossiele diesel. HVO is duurder dan FAME.

Een hybride aandrijflijn kan ervoor zorgen dat de dieselmotor in een werkingsgebied met hogere belasting opereert. Hiermee wordt meer zekerheid geboden dat de emissie reducerende systemen van een Stage V-motor goed werken. Hier is niet per se een hybride aandrijflijn voor nodig, de motorfabrikant kan hiervoor ook technieken ontwikkelen. Het wordt niet verwacht dat een hybride aandrijflijn voor een broeikasreductie gaat zorgen, tenzij het schip met (groene) walstroom wordt bijgeladen. Een hybride aandrijflijn zorgt voor hogere investeringskosten. Indien er geen brandstofbesparing plaatsvindt, wordt deze duurzaamheidsoptie ook niet terugverdiend.

De volledig elektrische opties geven zowel een reductie van luchtvervuilende stoffen als broeikasgasemissies. De mate van reductie van broeikasgasemissies is ook bij de elektrische opties sterk afhankelijk van de herkomst van waterstof en elektriciteit. Bij het gebruik van groene energie kan gesproken worden van 'zero-emissie'. De volledig elektrische opties hebben significant hogere aanschafkosten dan een conventionele aandrijflijn. De energiekosten liggen voor de batterij-elektrische optie wel lager in vergelijking met diesel.

Effect op operatie

Voor wat betreft het 'effect op operatie' scoren de opties die gebruik maken van dieselbrandstof of biobrandstoffen goed. Een mogelijk risico is nog wel dat de Stage V-dieselmotor de operationele temperatuur van een katalysator niet bereikt op de lijnen met een korte afstand en laag motorvermogen. Dit gebeurt mogelijk doordat de motor een groot deel van de tijd stationair draait. Daarnaast wordt de uitlaatgastemperatuur mogelijk niet hoog genoeg om het roefilter te kunnen regenereren waardoor die verstopt kan raken. Vandaar een iets lagere score op de bedrijfszekerheid voor de Stage V-motor. Met een hybride aandrijflijn kan deze problematiek voorkomen worden. Zoals eerder vermeld kan ook de motorfabrikant maatregelen treffen voor dergelijke problemen. Aanbevolen wordt om dit aan de markt over te laten, maar wel de daadwerkelijk uitstoot in de praktijk te monitoren. Daarmee kunnen dergelijke risico's ondervangen worden.

Voor de schepen die langere afstanden op hogere vermogens afleggen speelt

deze problematiek niet. Het gebruik van biobrandstoffen of GTL maakt een Stage V-motor mogelijk wat beter geschikt voor korte afstanden. Dit komt doordat er minder NO_x en fijnstof wordt geproduceerd met deze brandstoffen, waardoor het nabehandelingsstelsel minder belast wordt. De biobrandstof 'FAME' scoort minder goed op bedrijfszekerheid dan de biobrandstof 'HVO'. Dit komt doordat er met FAME vaker onderhoud wordt voorgeschreven en dat de ervaring in de praktijk meer motorstoringen laat zien. Ook kan er bacteriegroei in de tank plaatsvinden.

Een schip met aardgas heeft meer systemen aan boord dan een conventioneel schip, hierdoor zijn er ook meer risico's voor de bedrijfszekerheid.

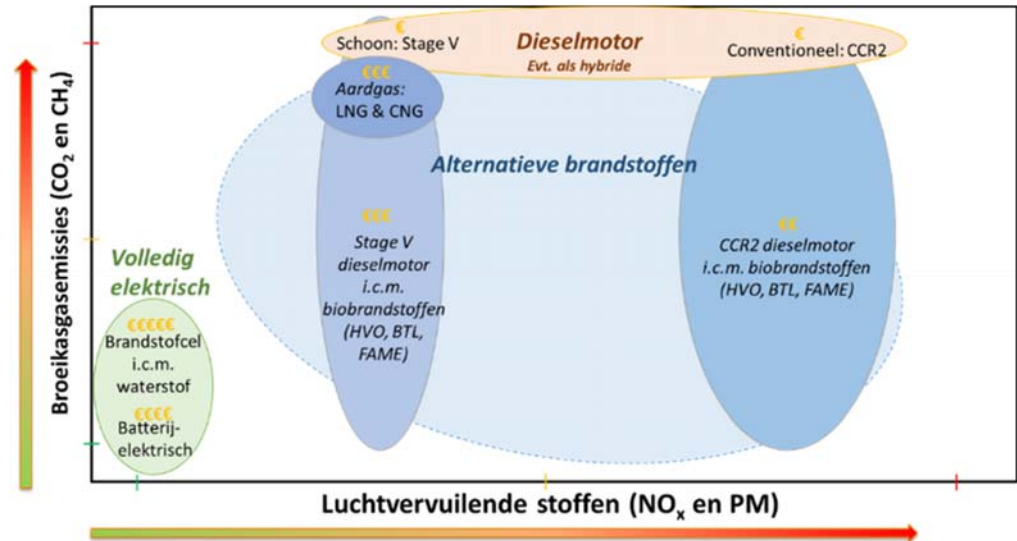
De volledig elektrische opties hebben de grootste impact op de operatie. Vooral de range van het vaartuig verminderd sterk ten opzichte van de opties met een verbrandingsmotor. Hierdoor is er meer tijd nodig aan wal om bij te laden. Dit is vooral van belang voor de grote en snelle schepen die langere afstanden varen en minder vaak aan wal liggen. Dit kan een negatief effect hebben op de flexibiliteit van de inzetbaarheid van de schepen.

Schepen die gebruik maken van waterstof zitten nog meer in de experimentele fase, waardoor de score op bedrijfszekerheid laag is ingeschat.

Tabel 5: Ingevuld afwegingskader voor de verschillende duurzaamheidsopties.

Scoringcriteria											
Type/ hoofdoptie	Varianten	Effect op duurzaamheid		Effect op operatie				Effect op kosten			Score
		Schoon (NO _x , PM)	CO ₂ WTP	Range	Bunker-/laadtijd	Flexibiliteit inzetbaarheid	Bedrijfszekerheid	Brandstof	Aandrijflijn	Walinfrastructuur	
Dieselmotor met conventionele brandstof	CCR 2 motor (baseline)	1	1	5	5	5	5	3	5	5	3,4
	Stage V motor	3	1	5	5	4	4	3	4	5	3,5
Verbrandingsmotor met alternatieve brandstof	HVO (50%) in CCR2 motor	2	4	5	5	5	5	1	5	4	3,8
	FAME (30%) in CCR2 motor	1	3	5	5	5	3	2	5	4	3,4
	HVO (50%) in Stage V motor	3	4	5	5	4	4	1	4	4	3,7
	FAME (30%) in Stage V motor	3	3	5	5	4	3	2	4	4	3,5
	GTL (100%) in Stage V motor	3	2	5	5	4	4	2	4	4	3,4
	CNG direct	3	2	3	4	4	4	4	3	3	3,2
	LNG direct	3	2	4	4	4	4	4	2	2	3,1
Hybride i.c.m. schone dieselmotor	Niet plug-in	4	2	5	5	5	4	3	2	5	3,7
	Plug-in	4	3	5	2	5	4	4	1	2	3,3
Volledig elektrisch	Batterij-elektrisch	5	5	1	1	1	4	5	1	1	3,0
	Waterstof (in verbrandingsmotor of brandstofcel)	5	4	2	1	2	1	1	1	1	2,3

De onderstaande figuur vat het effect van de duurzaamheidsopties op duurzaamheid en kosten samen. De horizontale as geeft het effect op luchtvervuilende stoffen weer, links is positief en rechts is negatief. De verticale as geeft het effect op broeikasgasemissies weer, laag is positief en hoog is negatief. De euro's geven indicatief het effect op kosten weer.



Figuur 6: Het effect van de duurzaamheidsopties op luchtvervuilende stoffen, broeikasemissies en kosten.

3.3 Selectie van de duurzaamheidsopties

Op basis van de beoordelingen op de bovengenoemde criteria en overleg met de aanbestedende partijen zijn de zes key-opties zoals weergegeven in Tabel 6 vastgesteld om verder uit te werken. De optie om biobrandstoffen in een CCR2 motor toe te passen zijn afgefallen door de beperkte reductie op NO_x en fijnstof. Daarnaast is de biobrandstof HVO verkozen ten koste van de biobrandstof FAME. FAME is afgefallen door het lage bijmengpercentage (= beperkte broeikasgasreductie) en de matige beoordeling op bedrijfszekerheid. GTL is afgefallen door de beperkte broeikasgasreductie. Voor wat betreft hybride is er in eerste instantie gekozen voor een configuratie die niet aan wal kan bijladen. Deze optie werd relevant geacht voor de schepen die langzaam varen op korte afstanden. Eventuele winst dient dan te komen uit het beter belasten van de motoren (voor een gunstiger verbruik en hogere uitlaatgastemperaturen voor betere NO_x en fijnstofreductie). Waterstof is afgefallen omdat deze nog als experimenteel is beoordeeld en omdat deze optie hoge investering- en brandstofkosten met zich meebrengt.

Tabel 6: Key-opties van verduurzamingsopties

Verduurzamingsopties		Kort en snel	Kort en langzaam	Lang en snel
Dieselmotor met conventionele brandstof	CCR 2 motor	Ja (referentie)		
	Stage V-motor	Ja	Ja	Ja
Nieuwe verbrandingsmotor met alternatieve brandstof	HVO in Stage V motor	Ja	Ja	Ja
	LNG/CNG	Ja*	Ja*	Ja*
Hybride i.c.m. schone dieselmotor	Niet plug-in, met accu	Nee	Ja*	Nee
Volledig elektrisch	Batterij-elektrisch	Ja	Ja	Ja*

* Voor nieuw schip

4 Key-opties toegepast op de huidige vloot

De key-opties zijn aan de hand van de huidige vaarprofielen verder uitgewerkt om de technische haalbaarheid en het effect op duurzaamheid en kosten in te schatten bij toepassing op de huidige dienstverlening.

4.1 Technische haalbaarheid en aandachtspunten van de key-opties

4.1.1 *Stage V-motor*

Voor de huidige schepen is er maar beperkte ruimte voor een dieselmotor met nabehandelingssysteem, zowel qua ruimte als qua gewichtstoename. Dit geldt vooral voor de catamarans en de kleinere vraag gestuurde schepen. Het is daarom belangrijk om compacte en lichte motoren en/of compacte nabehandelingssystemen te kiezen. Bij vervanging van motoren na 2019 of 2020 is het verplicht om Stage V-motoren te monteren. Bestaande motoren kunnen ook op Stage V-niveau gebracht worden door het monteren van een retrofit nabehandelingssysteem. De voorkeur ligt wel enigszins bij motoren die fabriek-af worden geleverd. De emissiecontrolesystemen kunnen dan optimaal worden afgestemd op de motor.

4.1.2 *HVO*

De biobrandstof HVO wordt momenteel al in diverse toepassingen gebruikt in een mengverhouding van 30 tot 100% met diesel. Bij de toepassing van 50% HVO en 50% reguliere diesel blijft de brandstof binnen de huidige dieselspecificatienorm EN590. Hiermee zijn ook de meeste ervaringen opgedaan. In deze studie wordt een blend van 50% daarom als uitgangspunt genomen. HVO is daarmee direct toepasbaar voor alle schepen binnen de vloot. Door de lagere energiedichtheid van HVO ten opzichte van diesel, ligt het brandstofverbruik met 100% HVO ca. 5% hoger.

4.1.3 *CNG/LNG*

Bij een gasmotor is de goedkeuring van een klasse bureau omvangrijker en complexer dan bij een dieselmotor. Er moet rekening worden gehouden met aanvullende eisen zoals; explosievrije zones in de machinekamer, ventilatie van de machinekamer en ontluchting van de tanks. Ook de plaatsing van de brandstoftanks is een uitdaging door het benodigde volume. Het ombouwen van een bestaand schip met een conventionele aandrijflijn naar aardgas zal naar verwachting moeilijk te realiseren zijn door de hiervoor genoemde beperkingen. Bij een nieuw schip kan er in het ontwerp rekening gehouden worden met dergelijke aspecten. Bovendien is er een installatie nodig aan wal om CNG of LNG te bunkeren. Voor LNG is dit complexer dan voor CNG. CNG is qua systemen aan boord van het schip ook minder complex dan LNG. CNG lijkt daardoor eerder haalbaar dan LNG. In deze studie is daarom gerekend met CNG als uitgangspunt.

Er zijn momenteel nog geen aardgasmotoren voor de binnenvaart in de benodigde vermogensrange die direct aan de schroef gekoppeld kunnen worden. Er zijn wel aardgasmotoren beschikbaar die als generator geplaatst kunnen worden. Een generator levert stroom voor de aandrijving van een elektromotor. Hiermee kan dus een hybride aandrijflijn opgezet worden.

In deze studie is gerekend met een aardas-directe aandrijving om een eerlijk vergelijk te maken met de Stage V-dieselmotor.

4.1.4 *Hybride/elektrisch*

Het ombouwen van de bestaande schepen naar hybride of elektrisch zal, in ieder geval voor het gros van de huidige grote (catamaran) schepen, geen realistische opgave zijn. Zoals eerdergenoemd hebben de bestaande schepen weinig ruimte beschikbaar en kan er nauwelijks extra gewicht worden toegevoegd in de schepen. Voor het installeren van een elektromotor en de accupakketten is deze ruimte en extra gewicht wel benodigd. Ook bij de toepassing van een nieuw schip is de technische haalbaarheid van een elektrische aandrijflijn nog niet eenvoudig, met name vanwege de laadinfrastructuur en de benodigde laadtijd.

Tabel 7 geeft weer wat de benodigde laadstroom en batterijcapaciteit per schip zou moeten zijn om aan de energiebehoefte van de lijn te voldoen. Hiervoor is gerekend met de maximale inzet per dag. Voor lijn 18, 20 en 23 + 24 is gerekend met twee laadstations per route. Bij de overige lijnen is gerekend met één laadstation. Ook voor de vraag gestuurde inzet is met één laadstation gerekend. Voor het vraag gestuurde vervoer is gerekend met twee typen schepen, een schip met normale (snelle = max 60 km/h) inzet en een schip wat maximaal 25 km/h vaart. Om de vloot zo flexibel mogelijk te houden is er gekozen voor twee verschillende laadvermogens en twee verschillende capaciteiten voor het batterijpakket voor de grote schepen. In overleg met een scheepswerf is ingeschat dat de maximale accucapaciteit voor nieuwe grote catamaranschepen ca. 600 kWh is. De maximale laadstroom is voor nu ingeschat op 1200 kW, de haalbaarheid van dergelijke laadstromen tegen acceptabele kosten dient verder onderzocht te worden. Beide varianten van de kleine (vraag gestuurde) schepen hebben een accupakket van 100 kWh en maken gebruik van dezelfde laadstroom als een deel van grotere schepen.

De laatste kolom in Tabel 7 geeft de mate van energieoverschot aan het eind van de dag weer per configuratie. Voor de schepen die worden ingezet op de lijnen die relatief langzaam varen op korte afstanden, lijkt elektrisch varen technisch haalbaar. Deze lijnen hebben met de voorgestelde configuratie voldoende energie over aan het einde van de dag. Bij de lijnen waar snel wordt gevaren over langere afstanden is het een uitdaging. Bij deze lijnen is veel energie benodigd en is er maar beperkte tijd aan wal beschikbaar om te laden. Bij de snelle lijnen 18 en 23 + 24 lijkt elektrificatie mogelijk wanneer er twee laadstations per trip worden geplaatst die met zeer hoge vermogens kunnen laden. Bij lijn 23 + 24 is echter wel iets meer laadtijd benodigd dan nu beschikbaar, dit gaat om ca. twee minuten extra. Bij lijn 20 is het laden met dit hoge vermogen niet voldoende om in korte tijd aan wal voldoende energie bij te laden. In combinatie met de huidige dienstregeling en het huidige vaarprofiel is er met de uitgerekend configuratie slechts 20% van de totaal benodigde energie beschikbaar per dag. Er is ca. tien keer meer laadtijd nodig dan in de huidige dienstregeling beschikbaar is (indien gerekend met twee laadstations) om elektrische aandrijving voor deze lijn technisch haalbaar te maken. Andere opties zijn om rustiger te varen, een extra laadstation te plaatsen, nog hogere laadvermogens toepassen of extra schepen in te zetten.

Voor het vraag gestuurde vervoer is een elektrische aandrijflijn ook een uitdaging. Het is vanwege de sterk variërende inzet en het grote aantal aanmeerlocaties (50)

niet realistisch om na elke vaart op te laden. Indien er langzaam wordt gevaren kunnen er ca. zestien trips (ruim twee uur) gevaren worden voordat er ca. 6 tot 20 minuten geladen moet worden (afhankelijk van het laadvermogen). Indien er snel wordt gevaren ligt energiebehoefte fors hoger waardoor er na ca. vier trips ca. 6 tot 20 minuten bijgeladen moet worden.

Er is nu uitgegaan van een batterijpakket van 100 kWh voor de vraag gestuurde schepen. Er is een nieuw schip nodig om een dergelijk accupakket kwijt te kunnen. Door het accupakket zal het schip ook fors zwaarder worden dan de huidige schepen (ca. 1000 – 2000 kg), de hoge snelheden die met de huidige schepen worden gevaren worden dan mogelijk niet meer behaald.

Niet alle batterijtypen zijn geschikt voor de gepresenteerde hoge laadstromen. Het wordt aanbevolen batterijen te kiezen die hoge laadstromen aankunnen en ook een lange levensduur hebben. Hiervoor zijn LTO (Lithium-titanaat) geschikt. Deze batterijen zijn wel relatief zwaar en hoog in de aanschafprijs.

Tabel 7: Analyse van benodigde laadstroom en batterijcapaciteit per schip om aan de energiebehoefte van de lijn te voldoen.

Lijn/dienst	Energiebehoefte voor retour* of enkel	Beschikbare tijd voor laden (aan 1 of 2* kanten)	Gekozen laadvermogen	Gekozen Accucapaciteit ⁸	Energie overschot eind van de dag
	[kWh]	[min]	[kW]	[kWh]	[%]
18*	79,3	5,0	1200	600	51%
19	10,9	4,0	250	250	101%
20*	407,6	2,0	1200	600	-81%
21	10,9	4,0	250	250	83%
22	14,3	3,3	250	250	18%
23 + 24*	113,7	3,1	1200	600	-30%
Vraag gestuurd_normale inzet	20,9	2,5	250 of 1200	100	26%
Vraag gestuurd_langzaam	5,2	1,0	250 of 1200	100	10%

* Bijladen aan twee kanten

Walinfrastructuur voor elektrische optie

Bij het gebruik van een elektrische aandrijving zal op de wal een infrastructuurvoorziening ontwikkeld dienen te worden. Dit betreft:

- Aansluiting op het elektriciteitsnet.
- Een huisje met daarin een transformator en een gelijkricht installatie ('lader'); en
- Een laadzuil, -portaal of -interface.

Met name voor het transformatorhuis is fysieke ruimte nodig. Deze kan waarschijnlijk met enige mate van flexibiliteit rondom het laadportaal (afstand van ca. 100 meter), maar dit moet wel verder onderzocht worden.

Voor de verschillende onderdelen dient tevens inzichtelijk worden gemaakt of er een impact is op de veiligheid.

⁸ Ontlading kan tot ca. 80% van deze accucapaciteit. De beschikbaar capaciteit is daarom 20% lager.

Laadvoorziening tussen schip en walzijde voor elektrische optie

Een pantograaf aansluiting aan de zijkant van het schip is toegepast bij de Nordled autoveer in Noorwegen. Dit systeem is voor de vloot die beoordeeld wordt in deze studie te groot en te kostbaar, maar kan mogelijk verkleind worden. Naar schatting kan dit met enig maatwerk of aanpassingen van bestaande ontwerpen opgelost worden.

4.2 Effect op emissies

De onderstaande tabel geeft een inschatting van de besparingspercentages per optie.

Tabel 8: Effect op vervuilende en broeikasgasemissies van key-opties

Hoofdoptie	Varianten	Indicatie emissiereductie [%]		
		NO _x	PM	CO ₂
Dieselmotor met conventionele brandstof	<i>CCR 2 motor</i>	0%		
	<i>Stage V-motor</i>	50 - 70%	>90%	0 - 10 %
Verbrandingsmotor met alternatieve brandstof	<i>50% HVO in Stage V motor</i>	50 - 70%	>90%	20 - 45%*
	<i>CNG Stage V</i>	50 - 70%	>90%	0 - 10 %
Hybride i.c.m. Stage V dieselmotor	<i>Niet plug-in</i>	70%	>90%	0 - 10 %
Volledig elektrisch	<i>Batterij-elektrisch</i>	100%	100%	50 - 100%

* Exclusief het effect van landgebruik, anders een range van -100 tot 45%.

4.3 Effect op kosten

4.3.1 *Kosten en baten van de verschillende aandrijflijnconfiguraties*

In deze paragraaf wordt een inschatting gemaakt van het effect op duurzaamheid en kosten per optie. In de berekeningen worden de kosten voor de verschillende aandrijflijnen en brandstoffen vergeleken. Voor de aandrijflijnen is onderscheid gemaakt voor de verschillende typen inzet. In de kostenberekeningen zijn de onderstaande aspecten meegenomen:

- OPEX: brandstofkosten (op basis van brandstofprijzen en brandstofverbruik van de huidige vloot), onderhoudskosten (motor + nabehandelingssystemen), gebruik van ureum⁹.
- CAPEX: aanschaf motoren, motorrevisiekosten, batterijen.
- Kostenberekeningen zijn uitgevoerd over een periode van 14 jaar.

Voor de toepassing van aardgasmotoren, en voor elektrische aandrijflijnen hoogstwaarschijnlijk een nieuw schip nodig. De kosten van een nieuw schip zijn niet meegenomen in de berekeningen. Ook de kosten voor infrastructuur aan de walzijde zijn geen onderdeel van deze vergelijking, deze volgen later.

De berekeningen zijn uitgevoerd ten opzichte van een conventionele motor.

⁹ Een ureum-wateroplossing is benodigd om NO_x te reduceren in de SCR-katalystor. De hoeveelheid die nodig is om voldoende NO_x te reduceren kan verschillen per motor. Gemiddeld wordt gerekend met een ureum-wateroplossing van 5% ten opzichte van het brandstofverbruik.

Tabel 9 is een indicatie van de OPEX + CAPEX weergegeven. De kolom 'gemiddeld' geeft het gemiddelde effect over de gehele vloot weer. De kolom 'range' geeft de range aan van het effect op de verschillende type schepen/diensten. Het kan bijv. zo zijn dat er juist wel of geen besparing plaatsvindt bij een intensieve of niet intensieve lijn. In Bijlage D.1. staan de aannames voor de kostenberekeningen weergegeven in de eerste tabel. In Bijlage D.2. staan de totale kosten over 14 jaar van de verschillende opties per dienst/lijn weergegeven. Figuur 7 geeft een grafische weergave van de kosten-baten ten opzichte van CCRII over een periode van veertien jaar. Dit zijn de CAPEX + OPEX van de aandrijflijn. Walinfrastructuur en nieuwe schepen zijn hierin niet meegenomen.

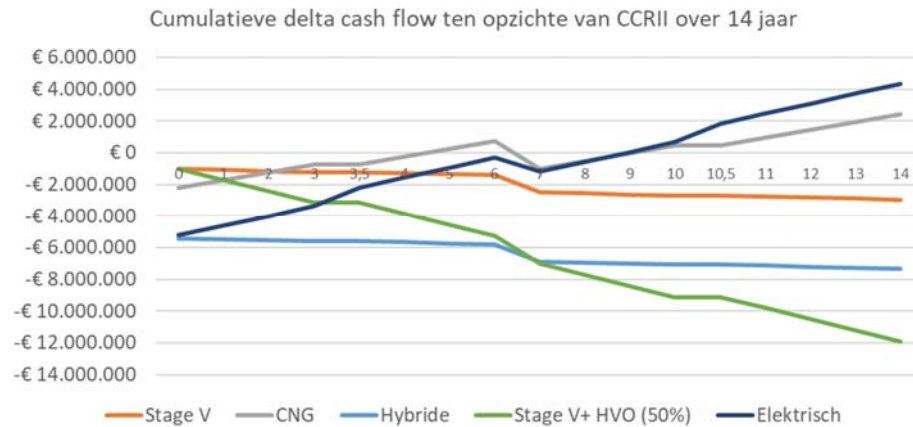
In het algemeen laten de duurzaamheidsopties 'Stage V-motor', 'HVO' en 'hybride' een toename van de kosten zien. Dit is het resultaat van een toegenomen CAPEX en een toegenomen OPEX. De duurzaamheidsopties CNG en volledig elektrisch laten wel een kostenbesparing zien voor de aandrijflijn. De CAPEX is bij deze opties fors toegenomen, maar dit wordt gecompenseerd door de lagere OPEX. Vooral de schepen met een hoog brandstofverbruik hebben hierdoor een reductie in de OPEX. Onder de tabel wordt elke duurzaamheidsoptie nader toegelicht.

Tabel 9: Effect op kosten van key-opties, exclusief kosten infrastructuur (CNG-tankstation of elektrische laadinfrastructuur)

Hoofdoptie	Varianten	Indicatie kosten aandrijflijn (OPEX + CAPEX) *	
		Gemiddeld %	Range %
Dieselmotor met conventionele brandstof	<i>CCR 2 motor (baseline)</i>	0%	
	<i>Stage V-motor</i>	+ 10%	+ 10 tot 15%
Verbrandingsmotor met alternatieve brandstof	<i>50% HVO in Stage V motor</i>	+ 40%	+ 30 tot 45%
	<i>CNG Stage V**</i>	- 10%	- 15 tot + 25%
Hybride i.c.m. schone dieselmotor	<i>Niet plug-in**</i>	+25%	+ 20% tot + 50%
Volledig elektrisch	<i>Batterij-elektrisch**</i>	- 15%	- 20% tot +25%

* Exclusief kosten tank/laadinfrastructuur en bouw nieuw schip indien van toepassing.

** Nieuw schip en extra walinfrastructuur is benodigd.



Figuur 7: Cumulatieve delta cash flow voor de aandrijflijn ten opzichte van CCRII over 14 jaar. Positief = winst t.o.v. conventioneel diesel. Exclusief kosten tank/laadinfrastructuur en bouw nieuw schip indien van toepassing.

Ten opzichte van de conventionele dieselmotor brengt een Stage V-motor ca. 40% hogere investeringen met zich mee door een duurdere motor (inclusief nabehandelingssysteem voor de reductie van NO_x en fijnstof).

Ook de operationele kosten gaan met ca. 3% omhoog door het gebruik van ureum¹⁰. Daarnaast zijn er ca. 5 – 10% extra onderhoudskosten nodig voor het nabehandelingssysteem. Ten opzichte van een conventionele motor nemen de kosten voor een Stage V-motor over de gehele levensduur van de motor, afhankelijk van de lijndienst, met ca. 10% en 15% toe.

De toepassing van HVO in een Stage V-motor zorgt ook voor hogere kosten. De toepassing van 100% HVO zorgt bijna voor een verdubbeling van de huidige brandstofprijs. De meerkosten voor een 50% HVO blend bedragen tussen de 40 en 50%. Ten opzichte van een conventionele motor met diesel, nemen de kosten voor een Stage V-motor met een 50% HVO blend over de gehele levensduur van de motor, afhankelijk van de lijndienst, met ca. 30% en 45% toe. Vooral de lijnen met een hoog brandstofverbruik per jaar laten hoge meerkosten zien.

De toepassing van een aardgasmotor brengt vooral hogere investeringen met zich mee. Het wordt ingeschat dat een CNG-motor + brandstoftanks ruim twee keer duurder is dan een conventionele dieselmotor. De brandstofkosten liggen daarentegen ca. 30% lager. Ten opzichte van een conventionele motor nemen de kosten voor een CNG-aandrijflijn over de gehele levensduur van de motor, afhankelijk van de lijndienst, tot ca. 15% af, of tot ca. 25% toe. Vooral de lijnen met een hoog brandstofverbruik per jaar laten besparingen zien. Voor de lijnen met een laag brandstofverbruik lijken de investeringen niet rendabel.

¹⁰ Een ureum-wateroplossing is benodigd om NO_x te reduceren in de SCR-katalysator. De hoeveelheid die nodig is om voldoende NO_x te reduceren kan verschillen per motor. Gemiddeld wordt gerekend met een ureum-wateroplossing van 5% ten opzichte van het brandstofverbruik.

Voor de toepassing van een volledig elektrische aandrijflijn zijn extra investeringen benodigd. De accu's en de elektromotoren (voor dit vaarprofiel) zijn in de aanschaf tezamen ca. vier tot zes keer zo duur als een conventionele dieselmotor, afhankelijk van de accuprijs in 2022. Het wordt ingeschat dat er 20% minder onderhoud nodig is op jaarbasis en dat de elektromotor twee keer zolang meegaat als de verbrandingsmotor. De energiekosten voor een elektrische aandrijflijn liggen op ca. de helft van diesel. Ten opzichte van een conventionele motor nemen de kosten voor een elektrische aandrijflijn, in het scenario met een lage accuprijs, over de gehele levensduur van de motor, afhankelijk van de lijndienst, tot ca. 20% af, of tot ca. 25% toe. Vooral de lijnen met een hoog brandstofverbruik per jaar laten besparingen zien. Voor de lijnen met een laag brandstofverbruik lijken de investeringen niet rendabel. De vraag gestuurde dienst levert de grootste besparing (de snelle variant), al was dit schip qua technische haalbaarheid niet erg positief. In het scenario met een hoge accuprijs (huidig prijsniveau) zijn alleen de meest intensieve lijnen nog rendabel. Indien de accuprijs op de huidige niveau blijft wordt het aanbevolen om te onderzoeken of de accucapaciteit omlaag kan.

De investeringskosten voor een hybride schip liggen in dezelfde ordergrootte als een volledig elektrische aandrijflijn. Het accupakket is kleiner maar er dient ook een Stage V-motor (als generator) aangeschaft te worden, inclusief de benodigde onderhoudskosten. Doordat de gekozen hybride-configuratie in deze studie niet aan de wal wordt bijgeladen, is er ook geen brandstofbesparing voorzien. Hierdoor komt de hybride optie over de gehele levensduur van de aandrijflijn, ten opzichte van een conventionele dieselmotor, afhankelijk van de lijndienst, op kostenname tussen de 20 en 50%. Vooral de lijnen met een laag brandstofverbruik per jaar hebben relatief gezien, hoge meerkosten.

4.3.2 *Investering in walinfrastructuur en nieuw schip*

Voor een elektrische aandrijflijn is, in ieder geval voor de catamarans, een nieuw schip nodig. De kosten voor een nieuwe catamaran met een conventionele dieselaandrijving kost ordergrootte 2,5 M€, afhankelijke van gekozen configuratie. De vraag gestuurde schepen kosten ca. € 225.000.

De totale investering voor het beschikbaar maken van het elektrische vermogen voor het snelladen bij de kades wordt geraamd op ca € 451.000 voor laadstation van 250 kW en € 715.000 voor een laadstation van 1000 kW. Maar afhankelijk van de lokale situatie, zoals de nabijheid van hoogspanning, kunnen grote verschillen optreden. De kosten voor deze aansluitingen zijn samengevat in onderstaande tabel. De walinfrastructuur heeft een relatief lange afschrijvingsperiode: 20 jaar.

De kosten voor 1200 kW aansluiting (zoals voorgesteld in deze studie) ligt mogelijk hoger dan genoemde 1000 kW. Verder onderzoek is hiervoor benodigd. Daarnaast dient onderzocht te worden of de huidige steigers geschikt zijn voor dergelijke laadstations of dat er nog bijv. een extra ponton nodig is. In het laatste geval komen er nog kosten bij voor het geschikt maken van de aanmeerlocatie.

Tabel 10: Indicatie van kosten voor aanleg elektrische aansluitingen (per aansluiting).

		250 kW	1000 kW
	Vermogen [kVA]	350	1060
Kosten aansluiting laadstation [€]	Projectmanagement	20.000	20.000
	10 kV aansluiting	19.000	37.000
	AC-kabel (150 m)	17.000	17.000
	Dc-kabel, bestrating	40.000	75.000
	Bouwkundig	140.000	140.000
	Transformator	13.000	43.000
	Randapparatuur transformator	23.000	23.000
	Gelijkricht installatie	69.000	230.000
Kosten laadstation [€]	Randapparatuur	70.000	70.000
	Laadpaal + laadregeling	40.000	60.000
	Totaal [€]	451.000	715.000

5 Scenario's voor toepassing van duurzaamheidsopties op de huidige vloot en een voorbeeld ingroeimodel

5.1 Scenario's voor toepassing van duurzaamheidsopties op de huidige vloot

Hiervoor is beschreven wat de effecten op kosten en duurzaamheid zijn als elk schip dezelfde duurzaamheidsoptie toepast. In deze studie zijn ook verschillende scenario's doorgerekend waarin er verschillende verschoningsopties worden toegepast bij verschillende lijnen/diensten. Voor de scenario's is er gekozen voor drie verschillende verschoningsopties, namelijk: Stage V, Stage V + 50% HVO en volledig elektrisch. De Stage V-variant, al dan niet in combinatie met HVO, is de minst complexe verschoningsoptie. Volledig elektrisch levert een grotere milieuwinst dan de andere verschoningsopties waar een nieuw schip voor benodigd is (CNG en hybride).

De scenario's en de effecten daarvan staan weergegeven in Tabel 11. In scenario 8, 9 en 10 is lijn 20 ook elektrisch, waarbij vanwege de beperkte laadtijd een concessie gedaan moet worden aan bijv. de dienstregeling of extra schepen moeten worden ingezet.

De kosten in Tabel 11 geven de kosten voor de aandrijflijnen, nieuwe schepen en de walinfrastructuur weer.

Resultaten

Indien alleen de langzame schepen elektrisch worden gemaakt is de totale broeikasgasreductie beperkt door kleine relatieve bijdrage van de schepen aan de totale emissies van de gehele vloot. Om een significante broeikasgasemissiereductie te realiseren dient er of HVO, of een elektrische aandrijflijn te worden toegepast bij de snelle schepen. Bij de toepassing van HVO gaan de operationele kosten fors omhoog.

Lijn 23 + 24 is een lijn met een hoog brandstofverbruik die technisch haalbaar is voor een elektrische aandrijflijn. Een elektrische aandrijflijn levert op deze lijn ook een voordeel op de operationele kosten. Daarnaast komt het schip twee keer langs de Merwekade (eindpunt lijn 23 = begin lijn 24 (zelfde schip), en vice versa). Hierdoor kan er met één laadstation alsnog twee keer worden bijgeladen tijdens een trip. Op dezelfde locatie zijn ook de aanmeerlocaties voor lijn 20 en 22. Hierdoor kunnen in de toekomst kosten voor de walinfrastructuur bespaard worden indien op deze lijnen een elektrisch schip toegepast gaan worden. Elektrificatie van lijn 23 + 24 (en de rest naar Stage V) levert een reductie van ca. 11% CO₂ op de totale vloot. Dit is een hogere besparing dan het elektrificeren van de langzame schepen, bovendien zijn de kosten lager. Ten opzichte van een conventionele dieselmotor worden de meerkosten over 14 jaar ingeschat op een totaal van 5,8 M€ (inclusief de ombouw van de rest van de vloot naar Stage V).

Door lijn 18 ook te elektrificeren gaat de CO₂-reductie naar 20%. De totale kosten nemen daarentegen ook fors toe door twee extra schepen en twee extra laadstations. Ten opzichte van een conventionele dieselmotor worden de

meerkosten over 14 jaar ingeschat op een totaal van 11,8 M€. Eén van de laadpunten van lijn 18 zou echter gecombineerd kunnen worden met lijn 20. Door lijn 18 en lijn 23 + 24 te elektrificeren, ligt de laadinfrastructuur voor lijn 20 klaar voor het moment dat deze lijn technisch haalbaar wordt.

Lijn 20 zorgt voor een groot deel van het brandstofverbruik, hierdoor is er op lijn 20 de grootste reductie van emissies mogelijk. Elektrificatie van alleen lijn 20 levert een CO₂-reductie van ca. 50%, terwijl de kosten lager liggen dan bij scenario 2, 3, 4, 6 en 7. Door ook nog de helft van het vraag gestuurde vervoer elektrisch te maken gaat de CO₂-reductie naar 66% met een beperkte toeslag op de kosten. Het elektrificeren van lijn 20 en het vraag gestuurde vervoer kent echter nog wel forse technische uitdagingen, zoals beschreven in paragraaf 4.1. De optie om alles te elektrificeren levert de hoogste reductie op alle emissies maar zorgt ook voor de hoogste kosten. Bijlage D.3 geeft een overzicht van de benodigde laadpunten.

Tabel 11: Scenario's voor toepassing van duurzaamheidsopties op de huidige vloot

Scenario		Indicatie emissiereductie van de totale vloot****			Indicatie kosten-baten t.o.v. CCRII			
		NO _x	PM	CO ₂ *	Aandrijflijn: Delta CAPEX + OPEX t.o.v. CCRII over 14 jaar**	Kosten schip***	Indicatie Kosten Walinfrastructuur	Totaal t.o.v. CCRII
		[%]			[€]			
1	Alles Stage V	70%	93%	5%	3 M€	-	-	3 M€
2	Alles Stage V + 50% HVO	70%	93%	48%	11,9 M€	-	-	11,9 M€
3	- Vraag gestuurd: Stage V - Kort & langzaam: Elektrisch - Lang & snel: Stage V	72%	93%	10%	2,8 M€	7,5 M€	1,4 M€	11,7 M€
4	- Vraag gestuurd: Stage V + 50% HVO - Kort & langzaam: Elektrisch - Lang & snel: Stage V + 50% HVO	72%	93%	50%	11,4 M€	7,5 M€	1,4 M€	20,2 M€
5	- Lijn 23 + 24 elektrisch - Overig Stage V	72%	93%	11%	2,5 M€	2,5 M€	0,72 M€	5,8 M€
6	- Lijn 23 + 24 & lijn 18 elektrisch - Overig Stage V	75%	94%	20%	2,2 M€	7,5 M€	2,1 M€	11,8 M€
7	- Lijn 18, 23 + 24 elektrisch - Vraag gestuurd: 1/2 elektrisch, 1/2 Stage V - Overig Stage V	79%	95%	34%	0,77 M€	8,9 M€	2,9 M€	12,5 M€
8	- Lijn 20 elektrisch - Overig Stage V	85%	96%	51%	- 0,65 M€	10 M€	1,4 M€	10,8 M€
9	- Vraag gestuurd: 1/2 elektrisch, 1/2 Stage V - Lijn 20: Elektrisch - Overig: Stage V	89%	97%	66%	- 2 M€	11,4 M€	2,1 M€	11,4 M€
10	- Alles elektrisch	100%	100%	100%	- 4,3 M€	32,7 M€	4,5 M€	32,8 M€

* Uitgaande van groene stroom en de meest duurzame HVO.

** Exclusief ombouwkosten.

*** Houdt geen rekening met restwaarde van oude schepen.

**** 1% is equivalent met respectievelijk 710 kg NO_x, 24 kg PM, 78,3 ton CO₂ per jaar

5.2 Ingroeimodel van duurzaamheidsopties

Economisch gezien is het niet haalbaar om de gehele vloot in 2022 te vervangen. Het ingroeimodel voor vervanging is sterk afhankelijk van de gekozen duurzaamheidsopties. Als er bijv. wordt gekozen om te her-motoriseren naar Stage V kunnen er per exploitant mogelijk wel twee tot vier schepen per jaar vernieuwd worden. Indien er nieuwe schepen ontworpen moeten worden voor bijv., een elektrische aandrijflijn liggen de kosten in de aanloopfase significant hoger. In sommige gevallen is het wel efficiënter (qua kosten) om in één keer serie schepen te bestellen (bijv. zes), die dan over een langere periode uitgeleverd worden.

Zoals te zien in Tabel 12 bevat de 'voorbeeld vervanging' drie elektrische schepen; één op lijn 23 + 24 en twee op lijn 20 (of als alternatief lijn 18). Lijn 23 + 24 kan gebruik maken van het laadstation van lijn 20. Op deze manier worden de oudste schepen met een hoog brandstofverbruik omgezet naar elektrisch. Om de bedrijfszekerheid van de lange en snelle lijn te waarborgen, kan ervoor gekozen worden om een dieselmotor te plaatsen bij de elektrische aandrijving zodat eventuele laadstoringen kunnen worden opgevangen.

Parallel aan deze periode kunnen de bestaande schepen omgebouwd worden naar Stage V (diesel), al dan niet in combinatie met de toepassing van 50% HVO om ook broeikasgasemissies te reduceren. De meerkosten voor HVO zijn proportioneel aan de bijmengverhouding; echter, een lagere bijmengverhouding zal ook leiden tot een lagere broeikasgasemissie reductie.

Hetzelfde principe kan toegepast worden op de vloot van de vraag gestuurde schepen.

Tabel 12 is het overzicht van de grote schepen weergegeven, inclusief bouwjaar en brandstofverbruik per dag. Op basis van deze informatie is een vervangingsprioriteit aangegeven, inclusief een voorbeeld voor vervanging.

Zoals te zien in Tabel 12 bevat de 'voorbeeld vervanging' drie elektrische schepen; één op lijn 23 + 24 en twee op lijn 20 (of als alternatief lijn 18). Lijn 23 + 24 kan gebruik maken van het laadstation van lijn 20. Op deze manier worden de oudste schepen met een hoog brandstofverbruik omgezet naar elektrisch. Om de bedrijfszekerheid van de lange en snelle lijn te waarborgen, kan ervoor gekozen worden om een dieselmotor te plaatsen bij de elektrische aandrijving zodat eventuele laadstoringen kunnen worden opgevangen.

Parallel aan deze periode kunnen de bestaande schepen omgebouwd worden naar Stage V (diesel), al dan niet in combinatie met de toepassing van 50% HVO om ook broeikasgasemissies te reduceren. De meerkosten voor HVO zijn proportioneel aan de bijmengverhouding; echter, een lagere bijmengverhouding zal ook leiden tot een lagere broeikasgasemissie reductie.

Hetzelfde principe kan toegepast worden op de vloot van de vraag gestuurde schepen.

Tabel 12: Vervangingsprioriteit

Type	Naam	Lijn	Bouwjaar schip	Bouwjaar motor	Brandstofverbruik per dag	Vervangingsprioriteit	Voorbeeld vervanging
Kort en langzaam	Drechtsteden 1	19	1986	1986	Laag	Hoog: oudste schip met hoge emissies	In 2022 naar Stage V
	Merwedam	22	2012	2012	Medium-laag	Medium: relatief laag brandstofverbruik, motor relatief oud	Rond 2026 naar Stage V
Kort en langzaam + lang en snel	Wantij	21, 23 en 24	1999	2016	Medium	Medium: medium brandstofverbruik	Rond 2026 naar Stage V
	Alblas	21, 23 en 24	1999	1999	Medium	Hoog: oudste catamaran met oude motor, medium brandstofverbruik	In 2022 naar elektrisch voor inzet op lijn 23 + 24
	Devel	21, 23 en 24	1999	1999	Medium	Hoog: oudste catamaran met oude motor, medium brandstofverbruik	Tussen 2022 en 2024 naar Stage V
	Aqua Runner	21, 23 en 24	1999	2017	Medium	Laag: nieuwst motor van de vloot	Rond 2027 naar Stage V
Lang en snel	Aqua Cat	18	2013	2013	Medium-hoog	Medium: brandstofverbruik is relatief hoog	Rond 2025 naar Stage V
	Aqua shuttle	18	2001	2012	Medium-hoog	Medium: brandstofverbruik is relatief hoog	Rond 2025 naar Stage V
	Piet Hein	20	1999	2016	Hoog	Hoog: Hoogste brandstofverbruik	Rond 2025 naar elektrisch**
	Witte de With	20	1999	2015	Hoog		
	Vlij*	20	2004	2015	Hoog	Hoog: Hoog brandstofverbruik	Tussen 2022 en 2024 naar Stage V
	Schie*	20	2006	2016	Hoog		

* Soms ook ingezet op andere lijnen

** Indien technisch haalbaar. Als alternatief kunnen de schepen op lijn 18 worden vervangen door elektrische varianten.

5.3 Financieringsinstrumenten

Voor investering en ontwikkeling van milieuvriendelijke technieken in het POW kan mogelijk gebruik worden gemaakt van aanvullende financieringsbronnen. In deze paragraaf staan een aantal belangrijke financieringsinstrumenten genoemd, alsmede een beeld van de mogelijkheden. Daarnaast gaat het hier om een momentopname: de lijst is niet volledig en het financieringslandschap is onderhevig aan veranderingen. In onderstaande overzicht wordt onderscheid gemaakt tussen subsidies en fiscale regelingen. Per instrument is kort aangegeven welke instantie het traject organiseert, wat de omvang in bedrag of percentage is van de bijdrage, wat voor type trajecten hiervoor in aanmerking komen (bijv. investeringen of ontwikkeltrajecten). Uit de tabel komt naar voren dat subsidietrajecten vooral zijn bestemd voor het stimuleren van technieken die in een ontwikkelfase zitten en dus

voornamelijk zijn gericht op eerste pilotprojecten. Deze trajecten zijn minder geschikt voor vroege implementatie van bestaande technieken. Deze zijn dus lastig toepasbaar wanneer er veel waarde wordt gehecht aan de betrouwbaarheid van de vloot. De fiscale regelingen zijn wel geschikt voor implementatie van bestaande technieken, maar alleen geschikt voor aanvragen door bedrijven.

Tabel 13: Financieringsinstrumenten. S = subsidietraject, F = Fiscale regeling. Bron: RVO

Type	Naam regeling	Betrokken instantie	Type traject	Type bijdrage	Aanvrager
S	TKI-Toeslag	TKI Water	Research en ontwikkeling voor scheepsvaart	Afhankelijk van de regeling tussen 25% en 50% bijdrage	Publiek-private samenwerkingen
S	Subsidie-regeling duurzame scheepsbouw	RVO	Innovatiemaatregelen scheepsbouw	25% bijdrage	Scheepswerven
S	DKTI transport	RVO	Maatregelen gericht op CO ₂ -uitstoot transportsector	Vast bedrag afhankelijk van het specifieke type project (verschilt per jaar)	Bedrijfsleven en kennisinstellingen
S	CEF	Europese commissie (INEA)	Projecten op het gebied van stimuleren nieuwe technologieën en innovatie in de scheepvaart	Tot 50% bijdrage van innovaties in de scheepvaart.	Publieke en private partijen
S	Horizon 2020	Europese commissie (INEA)	Pilots en onderzoekstrajecten. Aanvraag is afhankelijk van specifieke uitvragen.	Tot 100% bijdrage ontwikkeling	Publieke en private partijen
S	INTERREG B	Europese commissie (INTERREG)	Stimuleren innovatietrajecten waarbij wordt samengewerkt tussen regio's in verschillende landen	Afhankelijk van de specifieke bijdrage.	Overheden (hoofdaanvrager) in een consortium met andere Europese regio's
S	LIFE	Europese commissie (DG REGIO)	Klimaat- en milieuprojecten	Afhankelijk van het specifieke project.	Publieke en private partijen
S	EFRO (landsdelig)	EZ	Ontwikkelprojecten voor verschillende economische thema's (waaronder koolstofarme economie)	Cofinanciering tot 50%	Publieke en private partijen
F	EIA	RVO	Fiscale aftrek van investeringen die leiden tot energiebesparing	Aftrek van 55% van de investeringswaarde van de fiscale winst	Private ondernemingen
F	MIA en VAMIL	RVO	Fiscale aftrek van investeringen in milieumaatregelen	Aftrek van 35% tot 75 % van de investeringswaarde van de fiscale winst	Private ondernemingen

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

De grote snelle schepen met een lange inzet zijn dominant in energiegebruik en emissies: lijn 20 zorgt voor bijna 50% van het totale energiegebruik en de totale emissies. Verschoning van deze lijn heeft de meeste impact.

Handelingsperspectief voor emissiereductie op de bestaande vloot

- Voor de reductie van NO_x en fijnstof is de toepassing van een Stage V-motor op de bestaande vloot de meest geschikte optie. De emissies van NO_x en fijnstof worden respectievelijk met ca. 70 en 90% gereduceerd ten opzichte van de motoren die momenteel worden toegepast (CCR2).
Als in alle schepen een Stage V-motor wordt geïnstalleerd, leidt dat tot ca. 3 miljoen euro (indicatie) extra kosten over een periode van 14 jaar ten opzichte van de toepassing van CCR2. Hiermee is het de meest economische optie waarbij de levensduur van de huidige vloot wordt volledig benut.
- Vanwege beperkte ruimte in de huidige schepen zijn de afmetingen en het gewicht van de Stage V-motoren een belangrijk aandachtspunt, de keuze voor compacte en lichte motoren heeft de voorkeur.
- Het is belangrijk om in de praktijk te monitoren of de emissies op het voorgeschreven niveau blijven. Afhankelijk van de opzet liggen de kosten voor continue monitoring (aan boord van het schip) tussen de €2.000 en €3.000 per jaar per schip.
- Voor de reductie van broeikasgasemissies bij bestaande schepen is de toepassing van de biobrandstof HVO in combinatie met fossiele diesel (50/50) de meest eenvoudige optie vanuit technisch oogpunt. Door de toepassing van 50% HVO kunnen de broeikasgasemissies tot ca. 45% gereduceerd worden. Deze optie is direct toepasbaar in de huidige en toekomstige motoren, maar resulteert wel in een toeslag van bijna 50% op de brandstofkosten. Als in alle schepen een Stage V-motor wordt geïnstalleerd en er wordt 50% HVO toegepast leidt dat tot de ingeschatte kosten van ca. 12 miljoen euro extra kosten over een periode van 14 jaar ten opzichte van de toepassing van CCR2 en fossiele diesel.
- De meerkosten voor HVO zijn proportioneel aan de bijmengverhouding; echter, een lagere bijmengverhouding zal ook leiden tot een lagere broeikasgasemissie reductie.
- De biobrandstof FAME is goedkoper dan HVO maar is alleen toepasbaar in blends tussen de 10-30%. FAME zorgt daarnaast voor meer onderhoud en heeft een negatieve invloed op de bedrijfszekerheid. Bij zowel FAME als HVO zijn de grondstof en productiemethode van grote invloed op de potentiële broeikasgasreductie.

Handelingsperspectief voor emissiereductie bij nieuwe schepen

- De grootste reductie (100%) van zowel broeikasgasemissies als luchtverontreinigende emissies kan gerealiseerd worden door een elektrische aandrijflijn die gebruik maakt van groene stroom. Voor de realisatie van een elektrische aandrijflijn is een nieuw schip nodig, alsmede investeringen in de walinfrastructuur.

- Een beperkte reductie in broeikasgasemissies kan gerealiseerd worden door de toepassing van CNG en LNG. Voor deze toepassing is hoogstwaarschijnlijk een nieuw schip nodig, alsmede een bunkerstation aan wal. De luchtvervuilende emissies van CNG en LNG worden gezien als equivalent aan de Stage V-dieselmotor; dit terwijl voor een Stage V-dieselmotor geen nieuw schip vereist is.
- Ook bij de toepassing van een hybride aandrijflijn zijn de voordelen ten aanzien van de totale emissies beperkt, terwijl wederom een nieuw schip benodigd is. Een voordeel van de hybride aandrijflijn is dat er lokaal emissievrij gevaren kan worden.

Technische haalbaarheid van elektrisch varen

- Voor de meeste lijnen wordt een elektrische aandrijflijn als haalbaar beoordeeld. De technische haalbaarheid van een elektrisch schip is voor lijn 20 wel een uitdaging. Dit komt vooral door de hoeveelheid benodigde energie in combinatie met de beperkte tijd voor laden aan wal. Om elektrisch varen ook voor de meest intensieve lijn (lijn 20) haalbaar te maken, is een aanpassing van de dienstregeling of het vaarprofiel nodig (bijv. langzamer varen). Een alternatief is het inzetten van extra schepen, vaker tussendoor bijladen of nog hogere laadvermogens toepassen.
- Een lichtgewicht en vernieuwde catamaran kan het energiegebruik met ca. 20% reduceren ten opzichte van de huidige catamarans. Dit draagt bij aan de haalbaarheid van elektrisch varen, maar is niet voldoende om lijn 20 (zonder aanpassingen aan het vaarprofiel en/of de dienstregeling of extra schepen) haalbaar te maken.
- Om de bedrijfszekerheid van lijn 20 te waarborgen, kan er eventueel ervoor gekozen worden om een dieselmotor te plaatsen bij de elektrische aandrijving zodat eventuele laadstoringen kunnen worden opgevangen. Hierbij is het wel belangrijk om te waarborgen dat de schepen zoveel mogelijk via de walvoorziening worden bijgeladen.
- Voor het vraag gestuurde vervoer is een elektrische aandrijflijn ook een uitdaging door de sterk variërende inzet en het grote aantal aanmeerlocaties (50). Deze zullen niet allemaal voorzien kunnen worden van een laadstation. Daarnaast zorgt het varen met 50 á 60 km/h voor een grote energiebehoefte.
- Bij het vraag gestuurde vervoer biedt een dieselgenerator de mogelijkheid om langer te kunnen blijven varen. Zo zijn de schepen meer flexibel qua inzet en kunnen ze ook op relatief hoge snelheden blijven varen. Het toepassen van een dieselgenerator maakt het schip wel duurder en zwaarder. Als alternatief kan er ook voor worden gekozen om langzamer te gaan varen.

Kosten & baten van elektrisch varen

- De totale kosten-baten voor een elektrische aandrijflijn (exclusief schip en walinfrastructuur) voor de snelle schepen komen gunstig uit ten opzichte van een conventionele dieselmotor. Dit is gebaseerd op de verwachte lagere accuprijs in 2022 en een laag tarief voor elektriciteit (6 cent per kWh).
- Hoe hoger het energiegebruik van het schip, hoe gunstiger de kosten-baten analyse van een elektrische aandrijflijn uitkomt ten opzichte van een conventionele aandrijflijn met dieselmotor. Dit komt doordat de besparing gerealiseerd wordt door lagere operationele kosten per draaiuur.
- Voor een elektrische aandrijflijn is, in ieder geval voor de catamarans, een nieuw schip nodig. De kosten voor een nieuwe catamaran met een

conventionele dieselaandrijving kost ordergrootte 2,5 M€, afhankelijke van gekozen configuratie. De (kleinere) vraag gestuurde schepen kosten ca. €225.000 per schip.

- De totale investering voor het beschikbaar maken van het elektrische vermogen voor het snelladen bij de kades wordt geraamd op ca. €451.000 voor laadstation van 250 kW en €715.000 voor een laadstation van 1000 kW. Afhankelijk van de lokale situatie, zoals de nabijheid van hoogspanning, kunnen grote verschillen optreden.
- Als er nieuw schip wordt aangeschaft, is het afhankelijk van de inzet of de totale kosten-baten van een elektrische aandrijflijn gunstig uitkomt ten opzichte van een conventionele dieselaandrijving. Ook de afschrijvingstermijn van een schip heeft een sterke invloed.
- Bijvoorbeeld: Lijn 20 heeft het hoogste energiegebruik. Indien het technisch lukt om op deze lijn elektrische schepen in te zetten wordt ingeschat dat er over een periode van 14 jaar ca. 2,6 M€ bespaard ten opzichte van een conventionele dieselmotor. Dit betekent dat de business case nog steeds positief is als er twee laadstations geplaatst moeten worden. Daarentegen, als ook de kosten van vier nieuwe schepen meegerekend worden (ca. 10 M€), is de business case niet meer positief (uitgaande van een afschrijving van de schepen over een concessieperiode van 14 jaar).

6.2 Aanbevelingen

Batterij-elektrisch wordt gezien als de meest kosteneffectieve en duurzame optie op lange termijn als er nieuwe schepen aangeschaft worden, omdat gebruik gemaakt wordt van goed betaalbare (duurzame) energie. Een voorwaarde voor het rendabel zijn van een elektrische aandrijflijn, is een reductie van de prijs voor afnemers van elektriciteit (bijv. naar €0,06 per kWh). In de aanloopfase brengt dit hoge kosten met zich mee zoals geheel nieuwe schepen en een kostbare laadinfrastructuur. Gezien de hoge kosten van nieuwe schepen en de benodigde walinfrastructuur, wordt er aangeraden om niet direct de hele vloot te vervangen door elektrische schepen. Waar lijnen niet geëlektrificeerd worden, wordt er aangeraden om de schepen op deze lijn om te bouwen naar Stage V. Bij de keuze welke lijnen het beste geëlektrificeerd kunnen worden, zijn drie overwegingen leidend: de technische haalbaarheid, het effect op de emissies en het effect op de kosten. Deze drie overwegingen kunnen tot tegenstrijdige conclusies leiden. Bijvoorbeeld, een elektrische aandrijving is voor de langzame korte lijnen technisch gezien makkelijker, maar heeft nauwelijks effect op de totale emissies door het relatief lage brandstofverbruik. Hierdoor levert de elektrische aandrijflijn bovendien weinig voordeel in de operationele kosten. Mogelijke scenario's die overwogen kunnen worden, waarin deze overwegingen op verschillende manieren worden meegenomen, zijn:

- Zoals eerder aangegeven, is de toepassing van Stage V-motoren op de gehele bestaande vloot een geschikte optie om de NO_x en fijnstof emissies te reduceren. De emissies van NO_x en fijnstof worden respectievelijk met ca. 70% en 90% gereduceerd ten opzichte van de motoren die momenteel worden toegepast (CCR2). De CO₂-besparing is daarentegen minimaal. Als in alle schepen een Stage V-motor wordt geïnstalleerd, leidt dat tot ca. 3 M€ (indicatie) extra kosten over een periode van 14 jaar ten opzichte van de toepassing van CCR2. Hiermee is het de meest economische optie.

- Lijn 23 + 24 is een lijn met een hoog brandstofverbruik die technisch haalbaar is voor een elektrische aandrijflijn. Een elektrische aandrijflijn levert op deze lijn ook een voordeel op de operationele kosten. Daarnaast komt het schip twee keer langs de Merwekade (eindpunt lijn 23 = begin lijn 24 (zelfde schip) en vice versa). Hierdoor kan er met één laadstation alsnog twee keer worden bijgeladen tijdens een trip. Op dezelfde locatie zijn ook de aanmeerlocaties voor lijn 20 en 22. Hierdoor kunnen in de toekomst kosten voor de walinfrastructuur bespaard worden indien ook op deze lijnen een elektrisch schip toegepast gaan worden. Elektrificatie van lijn 23 + 24 en een ombouw van de resterende vloot naar Stage V levert een reductie van ca. 11% CO₂ ten opzichte van een conventionele dieselmotor. Dit is een hogere besparing dan het elektrificeren van de langzame schepen, bovendien zijn de kosten lager. Ten opzichte van een conventionele dieselmotor worden de meerkosten over 14 jaar ingeschat op een totaal van 5,8 M€ (inclusief het ombouwen naar Stage V).
- Door vervolgens lijn 18 ook te elektrificeren gaat de CO₂-reductie naar 20%. De totale kosten nemen daarentegen ook fors toe door twee extra schepen en twee extra laadstations. Ten opzichte van een conventionele dieselmotor worden de meerkosten over 14 jaar ingeschat op een totaal van 11,8 M€. Eén van de laadpunten van lijn 18 zou echter gecombineerd kunnen worden met lijn 20. Door lijn 18 en lijn 23 + 24 te elektrificeren, ligt de laadinfrastructuur voor lijn 20 klaar voor het moment dat deze lijn technisch haalbaar wordt.
- Een ander mogelijk scenario is dat alle schepen voor lijn 20 en de helft van de vraag-gestuurde vloot worden vervangen door batterij-elektrische schepen. De overige schepen worden dan omgebouwd met Stage V-motoren. De haalbaarheid van dit scenario is echter sterk afhankelijk van de dienstregeling: met de huidige tijd aan wal en het huidige aantal schepen, is dit scenario momenteel niet haalbaar. Dit scenario is het meeste kosteneffectief voor de uitstootreductie van alle emissies. NO_x, PM en CO₂ worden over de gehele vloot met respectievelijk 89, 97 en 66% gereduceerd. De meerkosten ten opzichte van een conventionele CCR2 motor worden geschat op ca. 11,4 M€. Dit is inclusief nieuwe schepen en walinfrastructuur, maar exclusief een mogelijke uitbreiding van de vloot om de dienstregeling op lijn 20 precies te handhaven. Deze kosten liggen lager dan het scenario waarin 50% HVO wordt toegepast in alle Stage V-motoren, terwijl de emissiereductie hoger is.
- Indien alleen de vier schepen van lijn 20 geëlektrificeerd worden en de vraag gestuurde schepen niet (dus alles Stage V behalve lijn 20), dan worden de meerkosten op 10 M€ geschat met een CO₂-reductie van ca. 50%. Ook deze optie heeft een hogere reductie van emissies en lagere kosten dan de optie van 50% HVO in Stage V-motoren.

Overwegingen voor vervanging van de vloot

De economische aspecten in ogenschouw nemend, is een volledig omgebouwde/vervangen vloot per 2022 lastig te realiseren. Er wordt wel aanbevolen om vanaf 2022 twee tot vier grote schepen per jaar te verduurzamen. Met dit schema zijn in 2027 alle grotere schepen omgebouwd.

De leeftijd van de huidige schepen is een belangrijk aspect dat kan worden meegewogen in de overweging welke schepen het beste vervangen kunnen worden door elektrische schepen. De vloot bevat zes schepen met het bouwjaar 1999. Deze schepen kunnen technisch na 2022 waarschijnlijk nog een concessieperiode mee. Desalniettemin hebben deze schepen wel al 23 jaar afschrijvingstijd gehad in 2022. Om de levensduur van de schepen in de huidige vloot zo goed mogelijk te benutten wordt aanbevolen om de oudste schepen met een hoog brandstofverbruik de hoogste vervangingsprioriteit te geven. Vier schepen met het bouwjaar 1999 worden (roulerend) ingezet op lijn 21, 23 en 24, de andere twee op lijn 20. Economisch gezien is het niet aantrekkelijk om slechts de helft van schepen van een lijn elektrisch te maken omdat de laadstations dan over minder schepen afgeschreven moeten worden. Om lijn 23 + 24 volledig elektrisch te maken, is één elektrisch schip benodigd. Voor lijn 20 is er dan sprake van vier elektrische schepen; twee hiervan vervangen in dit geval een schip uit 1999.

De uiteindelijke keuze zal afhangen van de investeringsbereidheid en gewenste emissiereductie. De afweging tussen luchtverontreinigende emissies en broeikasgasemissies is hierin een belangrijk aspect. Immers, als er alleen luchtverontreinigende emissies gereduceerd dienen te worden is er niet per se een elektrische aandrijflijn benodigd. Indien er ook een significante broeikasgasreductie gerealiseerd dient te worden, wordt aanbevolen om snelle schepen (deels) te elektrificeren. Dit lijkt economisch aantrekkelijker te zijn dan de toepassing van 50% HVO in alle schepen.

Aanbevelingen voor vervolgwerk

- Gedetailleerde uitwerking van de verschillende scenario's en het ingroeimodel in samenwerking met stakeholders zoals de overheden, scheepswerven, exploitanten en energieleveranciers.
- Onderzoeken wat de praktische mogelijkheden zijn voor de laad-infrastructuur + nadere specificering van de kosten.
- Mogelijkheid tot aanpassing vaarschema's en/of vlootsamenstelling om ruimte te creëren voor het laden van de accu's voor lijn 20.
- Validatie van de TCO-berekening met stakeholders.
- Verder onderzoek naar financieringsconstructies die gebruik maken van Europese en eventueel nationale subsidies om de ingroei van nieuwe schone schepen te bevorderen.
- Voorafgaand aan de bouw van een nieuw schip:
 - Een nauwkeurige meting van de energiebehoefte van het schip;
 - Het inventariseren van de beschikbare ruimte op de kade voor de laadinfrastructuur en de kosten daarvan.

7 Ondertekening

Den Haag, 5 juli 2018

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'W.A. Vonk', written over a faint circular stamp.

W.A. Vonk
Research Manager STL

TNO

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'P. van Mensch', written over a faint circular stamp.

P. van Mensch
Auteur

A Wettelijke vereisten

<i>P</i> [kW]	<i>NO_x</i> [g/kWh]	<i>PM</i> [g/kWh]	<i>PN</i> [#/kWh]	<i>Date</i>
$19 \leq P < 75$	4.7*	0.30	-	2019
$75 \leq P < 130$	5.4*	0.14	-	
$130 \leq P < 300$	2.1	0.10	-	
$P \geq 300$	1.8	0.015	1×10^{12}	2020

B Toelichting hybride aandrijflijn

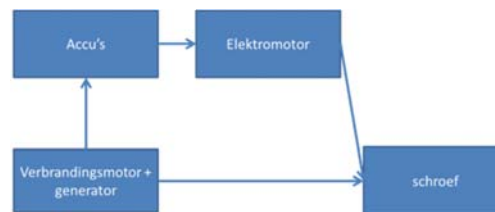
Elektrisch – hybride aandrijving met verbrandingsmotor

Onder hybride aandrijving wordt in dit verband verstaan, de combinatie van een verbrandingsmotor (diesel- of gasmotor) en een elektrische aandrijving. Een hybride aandrijving kan op een groot aantal manieren geconfigureerd worden. Een verkeerd gekozen configuratie kan leiden tot een toename van het energieverbruik en emissies, terwijl een juist gekozen hybride juist deze parameters verbeterd. Dit is vooral afhankelijk van het vaarprofiel.

Bij hybride aandrijving kan onderscheid gemaakt worden tussen de volgende vier type hybriden:

1. Parallel hybride:

het vermogen van de verbrandingsmotor wordt verlaagd en voor topvermogen wordt een elektromotor bijgeschakeld. De elektromotor wordt gevoed vanuit een elektrische energieopslag. De elektromotor werkt parallel naast de verbrandingsmotor: vanuit beide motoren wordt naast elkaar vermogen geleverd aan de schroef.

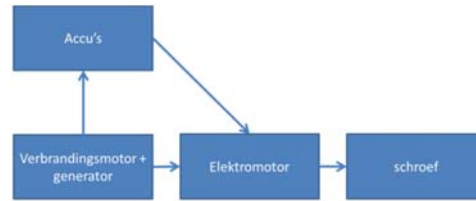


Parallel Hybride

Aangezien bij deze variant meestal alleen kortdurend hoog vermogen nodig is (tientallen seconden tot enkele minuten), kunnen energieopslag systemen overwogen worden die een relatief lage energieopslag hebben maar wel een hoog vermogen kunnen leveren. Nadeel van een parallel hybride is dat het een complexe motortechniek is, waarbij de schakeling tussen de twee motoren zeer precies moet worden geregeld.

2. Serie hybride zonder 'stekker' (niet plug-in).

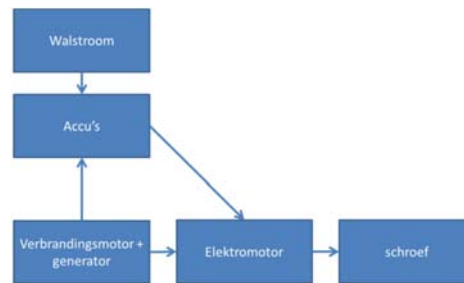
Er wordt een relatief kleine verbrandingsmotor toegepast. Deze wordt gedimensioneerd op het gemiddeld benodigd vermogen voor het opladen van de accu's. De verbrandingsmotor drijft de dynamo (of generator) aan en die laadt de accu op, welke de elektrische aandrijving van energie voorziet. Daarnaast is het mogelijk om meerdere (kleine) verbrandingsmotoren in te zetten, waarbij het systeem al naar gelang het benodigde vermogen capaciteit kan bijschakelen.

**Serie Hybride**

Voordeel van een serie hybride schakelsysteem is dat de elektromotor gemakkelijk pieken kan opvangen in het gebruik, waardoor de verbrandingsmotor constant een optimaal vermogen kan draaien.

3. Serie hybride met 'stekker' (plug-in hybride).

Hetzelfde als de serie hybride zonder 'stekker', alleen kunnen de accu's ook vanaf de wal opgeladen worden. Om dit zinvol te maken, moet de energieopslag capaciteit behoorlijk groot zijn. De keuze van het type accu wordt hiervoor geoptimaliseerd.

**Serie Hybride met Plug in**

Met deze variant is de grootste reductie in emissies mogelijk, aangezien een groot deel (bijv. 50% of 75%) van de gebruikte energie elektrisch vanaf de wal komt. In deze variant is het noodzakelijk om investeringen in elektrische laadinfrastructuur aan de wal.

C Resultaten voorselectie

De eerste stap is de selectie van duurzaamheidsopties die potentieel interessant zijn voor de personenvervoer over water. De onderstaande tabel geeft de beoordeling van de opties ten opzichte van diverse criteria weer. Een groot deel van de opties is marktrijp in 2022, van sommige opties is het nog niet bekend. Van de optie bio-methanol wordt verwacht dat deze niet volledig marktrijp is in 2022. Het is de verwachting dat alle behandelde brandstoffen wel beschikbaar zijn 2022. Het effect op emissies varieert sterk per optie. Zo is er met een CCR2 (huidige emissienorm voor scheepsmotoren) motor met conventionele brandstof beperkte NO_x, PM en CO₂ reductie te realiseren. Met een Stage V (emissienorm die vanaf 2019/2020 van kracht gaat) motor met conventionele brandstof is op CO₂ beperkte emissiereductie te behalen maar deze optie zorgt wel voor een forse emissiereductie op NO_x en PM. Hetzelfde geldt voor GTL in een Stage V motor, CNG, LNG en een niet plug-in hybride. Met de toepassing van biobrandstoffen in een dieselmotoren kan wel een forse CO₂ reductie worden behaald. Bij de elektrische opties zijn zowel de CO₂ emissies als de NO_x en PM emissies laag, uitgaande van het gebruik van groene energie. Het is daarnaast ook van belang dat de toegepaste optie geclassificeerd kan worden. Het doel van de classificatie is het aantoonbaar maken dat het schip voldoet aan de strenge internationaal erkende veiligheidseisen. Voor bio-methanol en waterstof zijn nog geen procedures voor classificatie beschikbaar. Vanwege de negatieve score op marktrijpheid en classificatie is de optie bio-methanol bij voorbaat afgevalen. De optie van CCR2 dient als referentie.

Selectie voor analyse						
Type/ hoofdoptie	Varianten	Is concept in 2022 marktrijp?	Is brandstof beschikbaar in 2022?	Minimaal 20% reductie van emissies*?	Classificatie mogelijk?	Interessant voor 2022?
Dieselmotor met conventionele brandstof	CCR 2 motor (baseline)	Ja	Ja	Nee	Ja	Nee
	Stage V motor	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Verbrandingsmotor met alternatieve brandstof	HVO (50%) in CCR2 motor	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
	FAME (30%) in CCR2 motor	n.n.b.	Ja	Alleen PM	Ja	Ja
	HVO (50%) in Stage V motor	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
	FAME (30%) in Stage V motor	n.n.b.	Ja	Ja	Ja	Ja
	GTL (100%) in Stage V motor	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
	CNG direct	n.n.b.	Ja	Ja	Ja	Ja
	LNG direct	n.n.b.	Ja	Ja	Ja	Ja
	Bio-methanol	Nee	Ja	Ja	Ja	Nee
Hybride i.c.m. schone dieselmotor	Niet plug-in	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
	Plug-in	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Volledig elektrisch	Batterij-elektrisch	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
	Waterstof (in verbrandingsmotor of brandstof)	Ja	Ja	Ja	n.n.b.	Ja

* Reductie van vervuilende- en/of broeikasgasemissies

D Kostenanalyse

D.1 Uitgangspunten voor de kosten

Brandstof	Diesel	0,45	€/l
	HVO (50%)	0,65	€/l
	FAME (30%)	0,5	€/l
	CNG	0,3	€/kg
	Stroom	0,06	€/kWh
	Urea-wateroplossing	0,014	€/l diesel
Onderhoud	Onderhoud p/j	8.000	€/jaar per motor
	SCR + DPF	0,00217	€/kWh
	Elektrisch onderhoud	0,8	toV diesel
Revisie	Revisie diesel + CNG	3,5	jaar
	Revisie diesel + CNG klein	€ 25.000	190 kW (per motor)
	Revisie diesel + CNG groot	€ 50.000	360 kW (per motor)
Aanschaf	DPF + SCR + toebehoren klein	€ 30.000	190 kW (per motor)
	DPF + SCR + toebehoren groot	€ 50.000	360 kW (per motor)
	CCR2 motor klein + keerkoppeling	€ 40.000	190 kW (per motor)
	CCR2 motor groot + keerkoppeling	€ 72.500	360 kW (per motor)
	Stage V motor klein + keerkoppeling	€ 70.000	190 kW (per motor)
	Stage V motor groot + keerkoppeling	€ 107.500	360 kW (per motor)
	CNG motor klein + keerkoppeling + tanks	€ 90.000	190 kW (per motor)
	CNG motor groot + keerkoppeling + tanks	€ 165.000	360 kW (per motor)
	Elektromotor + controller	€ 100.000	190 kW (per motor)
	Elektromotor + controller	€ 140.000	360 kW (per motor)
	Accu's klein	€ 50.000	100 kWh (per schip)
	Accu's medium	€ 125.000	250 kWh (per schip)
Accu's groot	€ 300.000	600 kWh (per schip)	
Levensduur	Levensduur diesel + CNG	7	jaar
	Levensduur elektromotor	14	jaar
	Levensduur batterijen	7	jaar

D.2 Totale kosten over 14 jaar van de verschillende opties per dienst/lijn

Dit zijn de CAPEX + OPEX van de aandrijflijn. Walinfrastructuur en nieuwe schepen zijn hierin niet meegenomen.

		Totaal	Lijn 18	Lijn 19	Lijn 20	Lijn 21	Lijn 22	Lijn 23 + 24	Vraag gestuurd
Referentie: totale kosten over 14 jaar	CCR 2 motor	€ 27.976.091	€ 3.010.824	€ 429.810	€ 11.953.485	€ 1.054.557	€ 920.895	€ 1.981.772	€ 8.624.747
Delta ten opzichte van referentie over 14 jaar	Stage V- motor	€ 2.950.098	€ 357.755	€ 69.198	€ 1.012.141	€ 156.679	€ 141.601	€ 203.274	€ 1.009.450
	50% HVO in Stage V motor	€ 11.940.230	€ 1.121.398	€ 159.808	€ 5.401.278	€ 320.983	€ 352.384	€ 814.918	€ 3.769.460
	CNG Stage V	-€ 2.405.191	€ 156.854	€ 30.807	-€ 1.871.705	€ 244.532	€ 39.039	-€ 97.074	-€ 907.643
	Niet plug-in	€ 7.340.098	€ 1.037.755	€ 194.198	€ 2.372.141	€ 496.679	€ 366.601	€ 543.274	€ 2.329.450
	Batterij- elektrisch	-€ 4.341.544	-€ 28.466	€ 111.455	-€ 2.592.368	€ 188.993	-€ 49.012	-€ 200.417	-€ 1.771.730

		Totaal	Lijn 18	Lijn 19	Lijn 20	Lijn 21	Lijn 22	Lijn 23 + 24	Vraag gestuurd
Referentie: totale kosten over 14 jaar	CCR 2 motor	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Delta ten opzichte van referentie over 14 jaar	Stage V- motor	11%	12%	16%	8%	15%	15%	10%	12%
	50% HVO in Stage V motor	43%	37%	37%	45%	30%	38%	41%	44%
	CNG Stage V	-9%	5%	7%	-16%	23%	4%	-5%	-11%
	Niet plug-in	26%	34%	45%	20%	47%	40%	27%	27%
	Batterij- elektrisch	-16%	-1%	26%	-22%	18%	-5%	-10%	-21%

D.3 Overzicht laadpunten

Laadpunt	Lijn	Type aansluiting	Aantal laadstations	Kosten
Merwekade	22, 23 + 24 (en 20)	1200 kW	1	€ 715.000
Veerplein	21	250 kW	1	€ 451.000
Heijplaat-RDM	18	1200 kW	1*	€ 715.000
Plantagelaan of Piekstraat	19	250 kW	1	€ 451.000
Erasmusbrug	20 (en 18)	1200 kW	1*	€ 715.000
Twee punten in het centrum	Vraag gestuurd	1200 kW	2	€ 1.430.000
Totaal	-	-		€ 4.477.000

* Een tweede laadpunt is nodig, maar die kan gecombineerd worden met een laadpunt van een andere lijn.