



**KIEM-PROJECT VERDUURZAMING
VAN DE BRUINE ZEILVOOT
RAPPORTAGE TCO ANALYSE**



Foto: Yoeri Meulemans.

*Instituut/Dienst
Naam auteur(s)*

Functie auteur(s)

*Verantwoordelijk directeur
Datum*

Centre of Expertise HRTech
Bob Castelein, Youri Meulemans, Ron van Duin,
Maaïke Lycklama a Nijeholt
Onderzoeker CoE HRTech; Masterstudent Shipping &
Transport; Lector Stads- & Havenlogistiek; Lector
Finance & Business Innovation
Willemijn Dicke; Arjen van Klink
28 augustus 2024

VERSIEBEHEER

Versie	Bespreken/vaststellen	Wanneer	Gereed	Hoofdstuk/pagina

INHOUDSOPGAVE

Dankwoord	7
Samenvatting	8
1. Inleiding	9
2. Probleemstructurering en aanpak	11
2.1. Scope TCO	11
2.2. Vaststellen alternatieven voor vergelijking	12
2.3. TCO parameters	13
2.4. TCO analyse	18
3. Resultaten	19
3.1. Basis vergelijking	19
3.2. Gevoeligheidsanalyse – motoruren	20
3.3. Gevoeligheidsanalyse – Capaciteit batterijpakket	21
3.4. Gevoeligheidsanalyse – Aanschafprijs Stage 5 dieselmotor	23
3.5. Best case scenario – batterijen met lange levensduur en restwaarde	24
3.6. Battery-as-a-service	25
4. Discussie & conclusie	28
5. Aanbevelingen	30
Referenties	33

Dankwoord

Deze rapportage is een product uit het KIEM-project 'Verduurzaming van de Bruine Vloot', gefinancierd door regieorgaan SIA (KIEM.K23.01.121; budgetnr. 16825). Deze rapportage bouwt voort op de Masterscriptie "Brown Sailing Fleet - Sustainability Challenges" van Yoeri Meulemans. De auteurs danken de BBZ (Cockie Schilperoort, Paul van Ommen), Joost Martijn (schipper De Overwinning) en Wiebe Radstake (schipper De Vrijbouter) voor de waardevolle samenwerking en input gedurende het project. In eerdere fasen van het project hebben Ellen Boslooper en Jeroen Pruijn waardevolle bijdragen geleverd, evenals studenten Dominique Baan, Lara Bennink en Jeanine Scholtens in hun project binnen de minor Risicomanagement & Gedrag. Tot slot danken de auteurs de respondenten van de enquête en de schippers die een en ander nog verder wilden toelichten en bespreken in de telefonische interviews.



Tekst Ad Heijmans (2021).

Samenvatting

De historische zeilschepen van de 'bruine vloot' varen grotendeels duurzaam zeilend, maar hebben aan boord ook oude dieselmotoren waarvoor – wanneer deze nu kapotgaan of op termijn wanneer strengere eisen aan uitstoot en geluid het gebruik ervan gaan beperken – schippers moderne en duurzame alternatieven moeten overwegen. Dit gaat om grote investeringen in bijvoorbeeld een moderne Stage 5 dieselmotor of een batterij-elektrisch systeem met een elektromotor en batterijpakketten. Om de investeringsopgave en kostenstructuur van deze motoren inzichtelijk te maken wordt in dit rapport een Total Cost of Ownership (TCO)-analyse gemaakt van de deze twee alternatieven. Het rapport beschrijft de TCO berekening voor een schip met een veronderstelde voortstuwingsbehoefte en vaargedrag, met daarbij enkele gevoeligheidsanalyses. Bijgevoegd is een eenvoudig rekenmodel waarmee schippers of investeerders de parameters van de berekening kunnen aanpassen op hun eigen situatie.

De analyse laat zien dat op dit moment de investeringskosten van een batterij-elektrisch systeem doorgaans hoger liggen dan die van een Stage 5 dieselmotor. Hierbij is de prijs van de accupakketten de belangrijkste kostenpost. In het meest gunstige scenario, waarin de schipper toe kan met een relatief kleine (doch afdoende) actieradius, en de batterijen een lange levensduur hebben, en ook nog een zekere restwaarde in hergebruik of recycling is de investering in een batterij-elektrisch systeem vergelijkbaar met de investering in een Stage 5 diesel. Een rekenvoorbeeld van een Battery-as-a-Service model, waarbij schippers jaarlijks een accupakket kunnen leasen, laat zien dat ook hierbij de huidige kilowattuurprijs van batterijen deze optie relatief kostbaar maakt ten opzichte van een Stage 5 diesel. Echter, wanneer de prijs van energieopslag dezelfde neerwaartse trend laat zien als in de markt voor batterij-elektrische voertuigen, komt er een omslagpunt.

Onder andere hierom is elektrische voortstuwing een duurzamere lange termijn-oplossing dan een dieselmotor. Ook de modernste dieselmotoren zullen eerder of later te veel geluid en/of uitstoot produceren om nog aan (wettelijke landelijke en lokale) eisen te voldoen, terwijl een elektromotor schoon en stil draait. Ook stelt een elektromotor schippers in staat om te profiteren van de ontwikkelingen in de markt voor energieopslag, waarin we dalende prijzen en een groeiend aanbod van alternatieven (bijvoorbeeld zoutbatterijen en brandstofcellen) kunnen verwachten.

Bij beide onderzochte alternatieven worden schippers geconfronteerd met hoge investeringskosten. Deze moeten gedekt worden, bijvoorbeeld door subsidies en/of tariefverhogingen – waarbij idealiter een schoon en stil schip onderdeel kan worden van de propositie richting passagiers, en op termijn een standaard in de sector, tegen een eerlijke prijs.

1. Inleiding

De bruine zeilvloot omvat ongeveer 380 schepen die historisch van grote waarde zijn. Deze schepen zijn soms meer dan 100 jaar oud, en varen op voornamelijk het IJsselmeer en de Waddenzee. Waar deze vroeger gebruikt werden voor vrachtvervoer, hebben ze nu doorgaans een toeristische- en horecafunctie en worden ze gebruikt voor een- of meerdaagse zeiltochten voor groepen (families, bedrijven, schoolklassen etc.). Hoewel zeilschepen duurzaam varen, hebben de meeste schepen van de bruine vloot ook een dieselmotor aan boord. Deze gebruiken ze om te kunnen manoeuvreren in havens, en soms op groot vaarwater wanneer de wind wegvalt of de stroming ongunstig staat. Daarnaast hebben de schepen doorgaans een generator en CV op diesel om de 'hotelfunctie' van het schip van energie en warm water te kunnen voorzien.



Figuur 1. Historisch zeilschip (foto: Yoeri Meulemans).

De schippers, die vaak zelfstandig ondernemer zijn, staan voor een verduurzamingsopgave. De Green Deal Zeevaart, Binnenvaart en Havens is een praktische uitwerking voor de scheepvaartsector van het regeerakkoord van het kabinet Rutte III "vertrouwen in de toekomst" (Rijksoverheid, 2019; 2022). De belangrijkste doelstellingen van dit klimaatakkoord zijn:

- In 2030 de CO₂-emissies van de Nederlandse binnenvaartvloot gereduceerd te hebben met 40% tot 50% ten opzichte van 2015;

- In 2050 een nagenoeg emissievrije en klimaatneutrale binnenvaart gerealiseerd te hebben.

Voor de schippers van de bruine vloot betekent dit dat ze een alternatief moeten vinden voor de oude dieselmotoren in hun schepen. Dit zijn veelal motoren uit de jaren 60 en 70, die in de schepen relatief weinig draaiuren maken (het grootste deel van de tochten wordt zeilend afgelegd), en met regelmatig onderhoud lang in bedrijf kunnen blijven. Voor de lange termijn is vervanging echter noodzakelijk, omdat deze oude diesels niet aan de steeds strenger wordende eisen (vanuit het Rijk, lokale regels in vaargebieden, en de havens die de schepen bezoeken) rondom uitstoot en geluid voldoen. Om te kunnen voldoen aan de genoemde doelstellingen (en dus de wet), is er de noodzaak om over te schakelen op modernere en schonere motoren, waar grote investeringen voor nodig zijn. Echter, de kosten van het hermotoriseren van schepen zijn hoog – mede omdat voor nieuwe motoren de hedendaagse eisen gelden omtrent installatie, certificering, en gebruik, waar dat voor de oude diesels niet geldt – en de financieringsmogelijkheden beperkt. Het is essentieel om duidelijkheid en (financieel) inzicht te genereren omtrent de mogelijkheden voor verduurzaming, en de financiële haalbaarheid ervan, omdat alleen hiermee schippers perspectief krijgen op een duurzaam en financieel houdbaar bedrijfsmodel in de toekomst.

In het KIEM-project 'Van Bruin naar Groen: Verduurzaming van de Bruine Zeilvloot' is beoogd om o.a. een bijdrage te leveren aan inzicht in de financiële haalbaarheid van de verduurzaming van de bruine zeilvloot. Hiertoe bevat deze rapportage een vergelijkende analyse van de twee meest voor de hand liggende investeringsopties voor schippers die een alternatief zoeken voor hun huidige diesel (namelijk, een nieuwe stage 5 diesel, of een elektromotor met lithium-ijzerfosfaat batterijen), op basis van total cost of ownership (TCO), en een verkenning van financierings- en bedrijfsmodellen om de drempel voor dergelijke investeringen te verlagen.

2. Probleemstructurering en aanpak

Voor de TCO-analyse is op verschillende manieren input verzameld bij schippers in de Bruine Vloot, en de Vereniging voor Beroepschartervaart (BBZ):

- ▶ Een survey, ingevuld door 71 schippers van zeilschepen, waarvan 51 alleen op de binnenwateren vaart. De survey bevatte vragen over het schip, de motor, brandstofverbruik (voor de voortstuwing en faciliteiten aan boord), en vaargedrag (tochten en routes);
- ▶ Uitgebreide interviews met twee schippers die hun zeilschip reeds gehermotoriseerd hebben, beide met een elektromotor en batterijpakketten. In de interviews is besproken: hun proces van verduurzaming, de keuzes hierin, hun huidige (zero-emissie) systeem en het gebruik ervan, de investering die ze hiervoor gedaan hebben, de financiering hiervan, en hun perspectief op hun businessmodel en (terug)verdienvermogen;
- ▶ Kortere telefonische interviews met 8 schippers, die eerder ook de survey hadden ingevuld, met verdiepende vragen over motorgebruik, brandstofefficiëntie, variabele kosten (onderhoud, verzekering, brandstof, walstroom);
- ▶ Gesprekken en validatiesessies met bestuursleden en experts van de BBZ;
- ▶ Verschillende bronnen voor prijzen van verschillende technologieën en componenten van de kostenstructuur van de chartervaart en elektrisch varen: publicaties in de grijze (vak-) literatuur, (online) aanbod van producten en diensten, prijsopgaven en offertes, en gerichte vragen aan aanbieders van relevante producten en diensten. Daarnaast heeft de BBZ ook een “Menukaart duurzame chartervloot” laten opstellen; een overzicht van verduurzamingsmaatregelen voor schepen, met (een indicatie van) de kosten erbij, waarin ook duurzame voortstuwing is opgenomen (EnergyGo, 2024).

De secties hieronder beschrijven de stappen waarmee de TCO is opgezet, gebruikmakend van de input uit bovenstaande bronnen.

2.1. Scope TCO

Dit onderzoek richt zich op zeilschepen op de binnenwateren die deel zijn van de bruine vloot, in totaal 281 schepen (BBZ, 2023). Hierbinnen richt het onderzoek zich op de 231 schepen die zijn toegerust voor meerdaagse tochten, met verblijfsfaciliteiten aan boord.

We gaan uit van de situatie dat een schipper zijn/haar oude dieselmotor wil vervangen. Omdat bij een hermotorisering het schip en de motor aan de hedendaagse eisen moeten voldoen, moet dit een modern en duurzamer alternatief zijn (i.e. het is geen optie om de huidige dieselmotor te vervangen door een andere dieselmotor dan een Stage 5).

Uit de interviews met de reeds elektrisch varende schippers en de BBZ blijkt dat bij het hermotoriseren van oude schepen aanzienlijke bijkomende kosten komen. Ten eerste is het vervangen van de motor door een modern exemplaar niet voldoende om aan de

huidige eisen te voldoen, maar moet bijvoorbeeld ook de ventilatie (voor het accupakket), de bedrading en de bediening gemoderniseerd worden. Ten tweede kan het zijn dat het plaatsen van een nieuwe motor ook aanpassingen aan het schip vraagt, bijvoorbeeld een nieuwe fundatie voor de motor of de machinekamer vergroten omdat de katalysator anders niet past. Ten derde blijkt in de praktijk vaak dat bij een grote aanpassing zoals een nieuwe motor ook ander groot en/of achterstallig onderhoud wenselijk is. Dit zijn voor schippers lastige afwegingen; een nieuwe motor vraagt een grote investering (soms al meer dan de dagwaarde van het schip), maar bij een dergelijke langetermijninvestering is het logisch om ook te kijken wat er met de rest van het schip kan of moet gebeuren. Welke investeringen nog meer nodig of wenselijk zijn – en welke daadwerkelijk worden uitgevoerd en tegen welke kosten – zal tussen schepen en schippers sterk verschillen. Of en hoe dit soort aanpassingen worden uitgevoerd hangen sterk af van het schip, de staat ervan, en van de voorkeuren (en financieringsmogelijkheden) van de schipper zelf. Voor dit onderzoek laten we eventuele bijkomende kosten en aanpassingen buiten beschouwing, omdat deze moeilijk te voorspellen zijn en per schip en schipper sterk uiteen kunnen lopen, en beperken we ons tot de vervanging van de motor zelf en eventuele bijbehorende randapparatuur.

De tijdsspanne van de analyse is de gehele gebruiksduur van de technologie; emissies uit de productie van motoren en/of batterijen blijven buiten de scope van de analyse. Voor batterij-elektrische voortstuwing maken we onderscheid tussen de levensduur van de elektromotor, en de levensduur van de accu's. Voor dieselmotoren hanteren we 2050 als einddatum van de (economische) levensduur, omdat na 2050 schepen geheel zero-emissie moeten zijn.

2.2. Vaststellen alternatieven voor vergelijking

Een schipper die toe is aan een nieuwe motor heeft verschillende opties; voor deze TCO willen we de twee meest relevante, voor de hand liggende alternatieven vergelijken. In gesprek met schippers en de BBZ hebben we de volgende twee alternatieven gekozen:

- ▶ **Een Stage 5 dieselmotor op HVO.** Een stage 5 dieselmotor is de schoonste klasse van dieselmotor beschikbaar voor binnenschepen, deels vanwege de relatief schone en zuinige motor, en deels vanwege de nabehandeling van de uitlaatgassen die aan de motor is gekoppeld. Bij hermotorisering met een nieuwe dieselmotor moet deze motor een Stage 5 diesel zijn. Om de CO₂ uitstoot nog verder te verlagen kan deze motor op HVO draaien: Hydrotreated Vegetable Oil, diesel uit natuurlijke (rest)materialen die daardoor een veel kleinere voetafdruk heeft dan reguliere (fossiele) diesel.
- ▶ **Batterij-elektrische voortstuwing met een elektromotor en lithium-ijzerfosfaat accu's.** De elektromotor is zero-emissie en stil en accucapaciteit kan worden afgestemd op de behoeften van de schipper. Op dit moment zijn lithium-ijzerfosfaat accu's de meest aangeboden (en meest gebruikte) technologie in de markt; in de toekomst kunnen alternatieven zoals zoutaccu's hiervoor ook in beeld komen.

Andere alternatieven die door schippers in de surveyresponses en interviews genoemd worden zijn het reviseren van de oude motor en een elektromotor met goedkopere energiebronnen dan de nu courante lithiumaccu's, zoals een brandstofcel met waterstof of zoutbatterijen. Revisie is technisch een optie om de levensduur van een oude dieselmotor te verlengen, maar de motor voldoet qua (duurzaamheids)prestaties nog steeds niet aan de eisen die bijvoorbeeld de Green Award-certificering en Natura 2000 gebieden stellen aan de voortstuwing van schepen. Brandstofcellen voor waterstof worden op dit moment nog niet 'off the shelf' aangeboden voor maritieme toepassingen, en de kosten zijn nog niet goed te voorspellen. Ook zal het gebruik van waterstof op passagiersschepen aan (veiligheids)eisen gebonden worden, maar wat dit in de praktijk gaat betekenen voor de bruine vloot is nog niet duidelijk. Zoutbatterijen kunnen in de toekomst een interessante optie worden, maar zijn op dit moment nog niet verkrijgbaar, waardoor de prijs en toepassing moeilijk in te schatten zijn.

2.3. TCO parameters

Op basis van de enquête en interviews hebben we bepaald welke parameters worden meegenomen in de vergelijkende analyse, om een zo compleet mogelijk overzicht te krijgen van de kostenstructuur van de investering en het gebruik van beide opties. Voor deze analyse hebben we geprobeerd een zo realistisch mogelijke schatting van de waarden te maken, veelal op basis van de gevoerde gesprekken met schippers en de BBZ. Dit geeft een beeld van hoe de vergelijking uitpakt voor een typisch schip met bijbehorend vaargedrag dat voldoet aan de gedane aannames; voor een TCO voor specifieke schepen kunnen deze waarden worden aangepast en vervolgens dezelfde berekeningen worden uitgevoerd. Er is bij de aannames uitgegaan van de situatie van dit moment (September 2024). Hierbij moeten we opmerken dat de kosten van veel zaken en materiaal sterk fluctueren. De verwachting is dat op termijn accu's per kW goedkoper worden en de fossiele brandstofprijzen hoger (op dit moment wordt gebruik van fossiele brandstof in de binnenvaart zelfs met €162mln per jaar gesubsidieerd, wat waarschijnlijk gaat verdwijnen en mogelijk zelfs omgezet wordt in een extra belasting (Ministerie van Financiën, 2024)).

Uit gegevens over het motorgebruik kunnen we de brandstofkosten voor voortstuwing afleiden, en de technische levensduur van de motor (op basis van het aantal draaiuren per jaar, en het aantal draaiuren waarna de motor afgeschreven is – zie hieronder). Tabel 1 zet deze parameters op een rijtje, de waarden waar we in deze analyse mee rekenen en een bron en toelichting bij de keuze voor deze waarde. Voor specifieke andere casussen kunnen andere waarden worden genomen bij deze parameters, op basis van meetgegevens of afgeleid van bekende waarden (zie bijv. onderstaande berekening van het brandstofverbruik per uur).

Parameter	Waarde	Bron/toelichting
Vaardagen (dagen/jaar)	122 dagen/jaar	Gemiddelde o.b.v. informatie BBZ; schippers geven in telefonische interviews tussen de 100 en 150 dagen per jaar te varen
Motorgebruik (uren/jaar)	173 uren/jaar	173u gemiddeld uit inventarisatie BBZ; schippers geven in enquête en telefonische interviews ongeveer tussen de 150 (zeldzaam laag) en 300 (uitzonderlijk hoog)
Brandstofverbruik totaal (l/jaar)	3300l/jaar	Gemiddelde uit enquête
Brandstofverbruik voortstuwing (%)	41%	Gemiddelde uit enquête; een relatief klein deel van de brandstof wordt gebruikt voor voortstuwing, een groter deel voor de stroomvoorziening en verwarming aan boord
Brandstofverbruik overig (%)	59%	Gemiddelde uit enquête; zie toelichting hierboven
Brandstofverbruik dieselmotor (l/uur)	7,8l/uur	Komt overeen met een jaarverbruik van 1353l voor de voortstuwing (3300*0.41) bij 173 motoruren; in de telefonische interviews geven schippers doorgaans aan tussen de 5 en 15 liter per vaaruur te verstoken (afhankelijk van het schip, vaargedrag, en externe factoren).
Energieverbruik elektromotor (kW)	12kW	Schatting op basis van interviews met reeds elektrisch varende schippers; gevalideerd door expert scheepsbouw: als een schip een gemiddeld brandstofverbruik van 7.8l/u heeft, is een verbruik van 12kW aannemelijk voor hetzelfde schip bij vergelijkbaar vaargedrag. Uiteindelijk verbruik hangt af van het schip, de motor, het vaargedrag en externe factoren.

Tabel 1. Parameters motorgebruik

De variabele kosten per jaar hangen deels af van de brandstofkosten (zie Tabel 1 voor de schatting van het brandstofverbruik, en Tabel 2 voor geschatte prijzen), en bestaan voor een ander deel uit kosten voor onderhoud en verzekering, die losstaan van het motorgebruik.

Parameter	Waarde	Bron/toelichting
Prijs (rode) diesel (€/l)	€0,7/l	Gemiddelde uit telefonische interviews; schippers geven aan ongeveer 60 tot 80 cent per liter te betalen, afhankelijk van de prijs van het moment
Prijs (rode) HVO (€/l)	€0,84/l	Op basis van gemiddelde dieselprijs uit telefonische interviews en gemiddeld prijsverschil van 20% tussen diesel en HVO (Greenway, 2024); verwachting is dat dit verschil op termijn kleiner wordt
Prijs energie (€/kWh)	€0,45/kWh	Prijs van walstroom in Harlingen (waar een groot deel van de bruine vloot ligt)
Kosten onderhoud oude diesel (€/j)	€1000/j	Schatting van gemiddelde op basis van telefonische interviews; kosten variëren per jaar, schippers geven aan veel

		onderhoud zelf te doen (olie, filters), en af en toe groot onderhoud te laten doen. De eigen tijd valt onder 'verborgen kosten' in de huidige situatie (investering van schipper wat niet direct
Kosten onderhoud Stage 5 diesel (€/j)	€2000/j	Schatting; schippers die de Stage 5 optie onderzocht hebben geven aan dat ze bij moderne motoren minder zelf aan onderhoud kunnen doen, en dat een Stage 5 motor meer en complexere onderdelen (bijv. nabehandeling) en elektronica heeft waar voor onderhoud een monteur langs moet komen
Kosten onderhoud elektromotor (€/j)	€1000/j	Schatting; de schippers die al met een elektromotor varen geven aan dat de onderhoudskosten (tot nu toe) niet sterk verschillen van die van hun oude diesel
Kosten verzekering (€/j)	€2500/j	Verzekeraar EOC; de grootste verzekeraar voor schepen van de bruine vloot, EOC, geeft aan dat zij geen differentiatie in de premie toepassen voor schepen met elektromotor ten opzichte van schepen met verbrandingsmotor. De premie wordt vooral gebaseerd op de grootte van het schip, en dat afhankelijk hiervan de premie ongeveer tussen de €1800 en €2500 per jaar zal liggen

Tabel 2. Parameters variabele kosten.

In Sectie 2.2 hierboven benoemen we de twee technische opties voor verduurzaming die we vergelijken: Een Stage 5 dieselmotor en een batterij-elektrisch systeem met lithium-ijzerfosfaat accu's. Deze systemen – en met name de batterij-elektrische optie – kunnen op verschillende manieren gedimensioneerd worden. Uit de interviews blijkt dat de aanschaf van de accu's een grote kostenpost is, en dat er keuzeruimte zit in de capaciteit van het accupakket. Waar de actieradius van een schip met een dieselmotor bepaald wordt door de capaciteit van de tank, zit bij de keuze voor een accupakket een belangrijke trade-off: de schipper moet immers afwegen of een grotere actieradius de aanzienlijke investering in een grotere accucapaciteit waard is. Bij de waarden hieronder blijven we dicht bij de casuïstiek van de schepen die reeds varen met een dergelijke motor; in de uitwerking van de analyse zullen we ook (beargumenteerde) variaties in accucapaciteit onderzoeken. Voor de afschrijftermijn van de investering kijken we naar de verwachte technische levensduur van de apparatuur.

Optie	Parameter	Waarde	Bron/toelichting
Stage 5 diesel	Aanschaf dieselmotor (€)	€150.000	Schatting op basis van Menukaart (2024), telefonische interviews met schippers, en uitvraag bij enkele aanbieders; Menukaart geeft bandbreedte van €75-200k voor de totale investering (inclusief motor, evt. nabehandeling, randapparatuur, installatie etc.), schippers die Stage 5 gebruiken of overwegen noemen ook bedragen in deze bandbreedte (telefonische interviews). Aanbieders geven aan

			dat een doorsnee stage 5 dieselmotor voor een zeilschip ongeveer €30-60k kost, waarbij de nabehandeling nog ongeveer de helft kost van de motor, en ook zo'n €50k voor de randapparatuur en installatie. Deze kostenopbouw kan sterk verschillen per motor en aanbieder, wat het lastig maakt om schattingen of bandbreedtes te geven voor de delen van de investering (motor, nabehandeling, installatie, randapparatuur etc.). Aanbieders geven ook aan dat een nieuwe dieselmotor met een vermogen minder dan 130kW geen nabehandeling nodig heeft, wat scheelt in de investering. Bij een gemiddeld motorvermogen van zo'n 160pk (= 117kW; Enquête) betekent dit dat een groot deel van de schippers geen nabehandeling zou hoeven te installeren.
	Afschrijftermijn dieselmotor (jaar)	26jr	We nemen op basis van de steeds strenger wordende klimaatdoelen aan dat een dieselmotor tot 2050 nog meekan, daarna is alleen een zero-emissie motor nog mogelijk.
Elektromotor	Aanschaf elektromotor (€)	€30.000	Interviews met reeds elektrisch varende schippers, offerte nieuwe elektromotor (120pk); incl. regelaar, bediening, remweerstand
	Capaciteit accupakket (kWh)	90kWh	Interviews met schippers; de twee geïnterviewde schippers hadden accupakketten aangeschaft van 84kWh en 90kWh, en gaven aan hier (afh. van snelheid, weer, en stroming) zo'n 7-10u op te kunnen varen bij 4-5 knopen.
	Prijs accu's (€/kWh)	€810kWh	kWh-prijs op basis van recente offerte (2023; 148kWh voor €121k); de kWh prijs van batterijen voor andere toepassingen (m.n. elektrische auto's) zakt gestaag (op dit moment rond de \$140/kWh gemiddeld, en rond de \$100 voor autobatterijen) (ESource, 2022; Bloomberg, 2023), voor maritieme toepassingen ligt de kWh prijs nog wat hoger. Schippers die enkele jaren eerder zijn overgestapt op batterij-elektrisch varen geven kWh-prijzen aan van rond de €1000 of nog iets daarboven.
	Aanschaf accupakket (€)	€72.900	Capaciteit * kWh-prijs (zie bovenstaande voor aannames).
	Aanschaf batterijopstelling (€)	€20.000	Recente offerte; volledige batterijopstelling met veiligheids- en besturingseenheid, connectoren, chargers, afzuiging, excl. accu's
	Aanschaf hybride CV (€)	€10.000	Recente offerte en toelichting BBZ; schepen zijn doorgaans voorzien van een CV die diesel gebruikt, bij hermotoriseren met een elektromotor zou een hybride CV nodig zijn die ook op elektriciteit kan werken. In de offerte was de CV zelf €5500, en kwamen kosten voor nieuw installatiemateriaal en een nieuwe boiler erbij. Dit laatste is niet voor ieder schip aan de orde.

	Aanschaf randapparatuur (€)	€20.000	Op basis van recente offerte (2023); onderverdeling, omvormers, aansluiting walstroom, kabels
	Kosten installatie (€)	€25.000	Op basis van recente offerte (2023); arbeid en tekenwerk
	Afschrijftermijn elektromotor en andere apparatuur (draaiuren)	15.000u	Aanname dat dit vergelijkbaar is met de afschrijftermijn van een verbrandingsmotor (een goed onderhouden dieselmotor op een zeilboot moet 10000-15000 draaiuren mee kunnen gaan, daarna is groot onderhoud/revisie nodig (Zeilen.nl, 2021)) en dat andere apparatuur op dezelfde manier afschrijft als de motor. Dit is een conservatieve aanname, aangezien elektromotoren minder bewegende delen bevatten dan verbrandingsmotoren, en dus ook relatief langer mee zou moeten gaan.
	Afschrijftermijn batterijpakket (jaar)	10j	Op basis van accuvergelijking van verzekeraar EOC (2023); EOC geeft een levensduur aan van 10+ jaar, verschillende bronnen geven een levensduur van 500 tot wel 3000 laadcycli. Bij 122 vaardagen per jaar gaan we uit van 122 laadcycli (iedere vaardag bijladen; andere dagen van het jaar ligt het schip aan walstroom) komt 10 jaar neer op 1220 laadcycli. Een afschrijftermijn van 10 jaar lijkt een conservatieve aanname; leverancier GreenMarine (2024) specificeert een levensduur van 3000 laadcycli voor hun accu's, wat bij 122 laadcycli per jaar neerkomt op een afschrijftermijn van 24,5 jaar.
	Restwaarde accupakket (€/kWh)	100€/kWh	Er komen steeds meer mogelijkheden voor circulair gebruik van batterijen – reduce, redesign, remanufacture, repurpose, recycling (Hua et al., 2020) – waarbij batterijpakketten of onderdelen of materialen daarvan worden hergebruikt. Zodoende heeft een afgeschreven batterijpakket nog waarde. King et al. (2018) geven aan dat de waarde van batterijmaterialen (afhankelijk van het type batterij en de verwerking ervan) tussen de \$AUD 4.550 en \$AUD 17.252 per ton kan liggen (€2866-€10868). Omdat deze technologie nog in ontwikkeling is, en in de toekomst afgeschreven batterijen steeds hoogwaardiger kunnen worden gebruikt (Sommerville et al. 2021), gaan we uit van een hoge waarde binnen deze bandbreedte voor de restwaardebepaling van de accu's die de bruine vloot over 10+ jaar afschrijft. Lithiumijzerfosfaataccu's hebben ongeveer 10kg gewicht per kWh aan capaciteit.

Tabel 3. Parameters investeringskosten

Er zijn nog andere operationele kosten die we niet meenemen als parameters in de TCO, bijvoorbeeld de inhuur van bemanning, onderhoud aan de rest van het schip,

havengelden, inkoop van levensmiddelen voor gasten etc. We gaan ervan uit dat deze kosten losstaan van de investering die de schipper al dan niet doet in de motor, en niet verschillen tussen de twee technische opties die we vergelijken. Het zou kunnen dat havengelden op termijn gedifferentieerd worden voor stille, schone schepen en schepen met verbrandingsmotoren; de gevoerde gesprekken geven echter de indruk dat schepen met (bepaalde) verbrandingsmotoren eerder compleet geweerd gaan worden dan hoger geprijsd.

2.4. TCO analyse

Met deze parameters berekenen we de totale kosten van aanschaf en gebruik over de levensduur van de investering. Omdat de twee onderzochte opties verschillende afschrijftermijnen hebben (en bij de batterij-elektrische optie er ook verschil is tussen de afschrijftermijn van de batterijen en die van de motor), rekenen we dit om naar kosten op jaarbasis, bestaande uit de gebruikskosten (OPEX) en jaarlijkse afschrijving van de investering.

Deze aanpak om terug te rekenen naar kosten per jaar mist het dynamische aspect van prijsontwikkelingen. Zeker de prijs van energieopslag is sterk veranderd (verminderd) over tijd, en naar verwachting zal deze ontwikkeling zich voortzetten. Om dit mee te wegen gaan we in Sectie 3.6 verder in op de (verwachte) prijsontwikkeling van batterijcapaciteit. Daarnaast is bij dit rapport een rekenmodel (.xlsx) als bijlage toegevoegd, waarin schippers, investeerders of anderen hun eigen berekeningen kunnen maken op basis van de actuele situatie (parameters van het benodigde/gewenste systeem, en prijsniveaus van de verschillende kostenposten).

Een belangrijk aspect wat (nog) niet in deze TCO analyse zit is de financiering. Dit blijkt in de praktijk voor veel schippers een complex vraagstuk te zijn, waar – afhankelijk van de situatie – heel diverse oplossingen voor worden gevonden. Banken zijn doorgaans terughoudend om grote leningen te verstrekken aan schippers, omdat de winstmarges in de sector klein zijn, en het voor banken lastig is goed zicht te krijgen op het (lange-termijn) terugverdienvermogen en de risico's. Als een bank al krediet wil geven is dit vaak maar tot een maximum % van de investering (doorgaans 50%), waarbij het andere deel uit eigen middelen betaald moet worden, en tegen een hoge rente (8-9% op moment van schrijven). Sommige schippers hebben een hypotheek bij een bank voor de aanschaf van hun schip (tegen 5,5-6% rente op moment van schrijven); soms kan na een aantal jaren aflossen dit bedrag weer verhoogd worden voor extra investeringen. Schippers lenen vaak ook bij vrienden om grote investeringen te kunnen doen (op moment van schrijven is 5-6% rente gebruikelijk). Wat niet via onderhandse leningen, bankkrediet of hypotheek bekostigd kan worden, moet met eigen middelen. Het verschilt sterk tussen schippers hoeveel ruimte zij daarvoor hebben.

3. Resultaten

3.1. Basis vergelijking

Eerst maken we de 'basis' vergelijking op basis van bovenstaande parameters. Daarna volgt een aantal gevoeligheidsanalyses op de parameters waar grote onzekerheid zit over de waarden (een grote bandbreedte met veel variatie van realistische waarden) en de parameters die de grootste impact hebben op de uitkomst.

		Batterij-elektrisch	Diesel Stage 5
Parameters motorgebruik en prijzen	Motoruren per jaar	173	173
	Motorverbruik diesel (HVO) (l/u)		7,8
	Prijs HVO (€/l)		0,84
	Motorverbruik energie (kWh/u)	12	
	Prijs energie (€/kWh)	0,45	
	Termijn afschrijving motor (draaiuren)	15.000	
	Termijn afschrijving motor (jaar)		26
	Termijn afschrijving accu's (jaar)	10	
Parameters aanschaf (€)	Motor	30.000	150.000*
	Accupakket	72.900	
	Batterijopstelling	20.000	
	CV (hybride)	10.000	
	Randapparatuur	20.000	
	Installatie	25.000	
	Totaal aanschaf	177.900	150.000
Jaarlijks OPEX (€)	Brandstof (Energie/HVO)	934	1.133
	Onderhoud motor	1.000	2.000
	Verzekering	2.500	2.500
Jaarlijks afschrijving (€)	Afschrijving motor e.d.**	1.211	5.769
	Afschrijving batterijen	7.290	
Totaal jaarlijks (€)		12.935	11.403

Tabel 4. TCO, omgerekend naar jaarlijkse kosten.

* Totaalprijs voor de gehele investering. Zie toelichting Tabel 3.

** Dit bedrag is gebaseerd op de aanschafprijs van de motor plus inbouw en alle additionele kosten, los van de accu's, namelijk €104.000, lineair afgeschreven over de verwachte technische levensduur van de investering (86 jaar tot de motor 15000 draaiuren heeft gemaakt bij 173u per jaar).

In deze vergelijking is te zien dat de jaarlijkse afschrijving van de batterijen (door de hoge investeringskosten in combinatie met de relatief korte afschrijftermijn) de grootste kostenpost is bij de batterij-elektrische optie. Bij de Stage 5 diesel is de jaarlijkse afschrijving van de motor de grootste kostenpost (ervan uitgaande dat de motor tot 2050 gebruikt kan worden). Deze afschrijvingen zijn zo groot dat factoren als brandstof-, energie-, onderhouds- en verzekeringskosten de vergelijking marginaal zullen beïnvloeden. Onder deze aannames zijn de jaarlijkse kosten bij de batterij-elektrische optie zo'n €1500 hoger dan bij de Stage 5 diesel. Bij een batterijprijs van ongeveer €640/kWh (tegenover €810 op dit moment) of lager wordt de batterij-elektrische optie goedkoper. Bij de aanname dat de prijs van batterijcapaciteit in deze markt een vergelijkbare trend volgt met de prijs van batterijen voor elektrische auto's (zie Sectie 3.6), komt dit punt over ongeveer 4 jaar.

Een deel van de kosten die we meenemen in deze TCO zijn kosten die schippers in de huidige situatie ook maken. Bij deze aannames hebben schippers nu €947 aan brandstofkosten (bij het gebruik van $3.300 \cdot 0,41 = 1.353$ liter diesel per jaar voor voortstuwing – zie Tabel 1 – en een (rode) dieselprijs van €0,70 per liter), en €1.000 en €2.500 respectievelijk aan onderhouds- en verzekeringskosten. Indien zij hermotoriseren verandert dit plaatje, en komt onder andere de afschrijving van de investering erbij. In het geval van de batterij-elektrische optie hebben schippers €8.488 extra jaarlijkse kosten en bij de Stage 5 Diesel optie €6.956 extra, boven de kosten in de huidige situatie; aangenomen dat al het andere gelijk blijft.

In de huidige situatie, bij een jaarverbruik van 3300l (fossiele) diesel per jaar, stoot een zeilschip 11.444kg CO₂-eq aan broeikasgassen uit (bij een WTW emissie van 3,468kg CO₂-eq/liter voor fossiele diesel (CO₂ Emissiefactoren, 2024). Hetzelfde verbruik met HVO stoot 1.145kg CO₂-eq uit (WTW emissie van 0,347kg CO₂-eq/liter). Een elektromotor heeft geen broeikasgasuitstoot, mits de batterijen opgeladen worden met groene stroom.

3.2. Gevoeligheidsanalyse – motoruren

In de basisanalyse hebben we gerekend met 173 vaaruren per jaar – het gemiddelde uit een eerdere inventarisatie van de BBZ. Uit gesprekken met de BBZ, de enquête en telefonische interviews met schippers blijkt dat er sterke variatie zit in het aantal vaaruren; zowel tussen schippers en schepen als jaar op jaar. De bandbreedte van het aantal vaaruren per jaar is (bij benadering) 150–400. Voor de afschrijving op de dieselmotor maakt dit niet uit – deze is in 2050 na 26 jaar afgeschreven.

		Batterij-elektrisch		Diesel Stage 5	
Parameters motorgebruik en prijzen	Motoruren per jaar	150	400	150	400
	Motorverbruik diesel (HVO) (l/u)			7,8	7,8

	Prijs HVO (€/l)			0,84	0,84
	Motorverbruik energie (kWh/u)	12	12		
	Prijs energie (€/kWh)	0,45	0,45		
	Termijn afschrijving motor (draaiuren)	15.000	15.000		
	Termijn afschrijving motor (jaren)			26	26
	Termijn afschrijving accu's (jaar)	10	10		
Parameters aanschaf (€)	Motor	30.000	30.000	150.000*	150.000*
	Accupakket	72.900	72.900		
	Batterijopstelling	20.000	20.000		
	CV (hybride)	10.000	10.000		
	Randapparatuur	20.000	20.000		
	Installatie	25.000	25.000		
	Totaal aanschaf	177.900	177.900	150.000	150.000
Jaarlijks OPEX (€)	Brandstof (Energie/HVO)	810	2.160	983	2.621
	Onderhoud motor	1.000	1.000	2.000	2.000
	Verzekering	2.500	2.500	2.500	2.500
Jaarlijks afschrijving (€)	Afschrijving motor e.d.	1050	2.800	5.769	5.769
	Afschrijving batterijen	7.290	7.290		
Totaal jaarlijks (€)		12.650	15.750	11.252	12.890

Tabel 5. Gevoeligheidsanalyse, motoruren. Basis is de TCO uit tabel 4, variatie met motoruren per jaar (grijs gearceerd).

* Totaalprijs voor de gehele investering. Zie toelichting Tabel 3.

De resultaten laten zien dat bij een intensiever motorgebruik de stage 5 diesel nog steeds minder kost op jaarbasis. Hoger motorgebruik leidt tot aanzienlijk hogere jaarlijkse kosten bij de batterij-elektrische optie, door de hogere afschrijving op de elektromotor. De jaarlijkse kosten nemen relatief minder toe bij de Stage 5 diesel, omdat de afschrijftermijn niet beïnvloed wordt door het jaarlijkse motorgebruik (in 2050 afgeschreven).

3.3. Gevoeligheidsanalyse – Capaciteit batterijpakket

In Sectie 3.1 hebben we laten zien dat de afschrijving op het batterijpakket verreweg de grootste component is van de jaarlijkse kosten bij de batterij-elektrische optie. In de basisvariant van de TCO-analyse hebben we gerekend met een accupakket van 90kWh (a €810/kWh), in navolging van de enkele schippers die al batterij-elektrisch varen. Deze schippers gaven aan dat deze capaciteit hen in staat stelt om 7 tot 10u gestaag door te varen met een snelheid van 4-5 knopen (afhankelijk van wind, stroming). Met kennis van de dagelijkse praktijk van de charterzeilvaart lijkt dit wat over-gedimensioneerd; De

branchevereniging BBZ en schippers zelf geven in de telefonische interviews aan dat ze op een doorsnee tocht 1 tot 1,5 uur op de motor varen (eigenlijk alleen om een haven uit en in te manoeuvreren), en de rest van de tijd zeilen. Uitgaande van een energieverbruik van 12kWh per vaaruur, zou dit ook kunnen met een (veel) kleiner accupakket, van bijvoorbeeld 40kWh, wat deze motoruren ruim mogelijk maakt met een marge. De analyse hieronder laat de impact zien van een kleiner batterijpakket op het kostenplaatje (Tabel 6).

		Batterij-elektrisch	Diesel Stage 5
Parameters motorgebruik en prijzen	Motoruren per jaar	173	173
	Motorverbruik diesel (HVO) (l/u)		7,8
	Prijs HVO (€/l)		0,84
	Motorverbruik energie (kWh/u)	12	
	Prijs energie (€/kWh)	0,45	
	Termijn afschrijving motor (draaiuren)	15.000	
	Termijn afschrijving motor (jaren)		26
	Termijn afschrijving accu's (jaar)	10	
Parameters aanschaf (€)	Motor	30.000	150.000*
	Accupakket (40kWh)	32.400	
	Batterijopstelling	20.000	
	CV (hybride)	10.000	
	Randapparatuur	20.000	
	Installatie	25.000	
	Totaal aanschaf	137.400	150.000
Jaarlijks OPEX (€)	Brandstof (Energie/HVO)	934	1.133
	Onderhoud motor e.d.	1.000	2.000
	Verzekering	2.500	2.500
Jaarlijks afschrijving (€)	Afschrijving motor	1.211	5.769
	Afschrijving batterijen	3240	
Totaal jaarlijks (€)		8885	11.403

Tabel 6. Gevoeligheidsanalyse – capaciteit batterijpakket. Basis is de TCO uit Tabel 4, variatie met capaciteit accupakket (grijs gearceerd).

* Totaalprijs voor de gehele investering. Zie toelichting tabel 3.

Bij een kleiner (doch voor de doorsnee vaardagen toereikend) accupakket vraagt de batterij-elektrische optie een kleinere investering dan de Stage 5 Diesel. Voor de (zeldzame) dagen dat het elektrisch varende schip een grotere actieradius nodig heeft komen er echter nog kosten bij voor gebruik van een generator.

3.4. Gevoeligheidsanalyse – Aanschafprijs Stage 5 dieselmotor

In Sectie 2.3 benoemen we een bandbreedte van prijzen van Stage 5 Diesel motoren (totale investering) van €75K-200K. Bij bovenstaande analyses zijn we hier ruwweg in het midden gaan zitten met een totale investering van €150K, maar het is de moeite waard te kijken hoe de analyse uitvalt bij prijzen aan de extremen van deze bandbreedte. Een schip dat toekan met een beperkt motorvermogen (onder 130kW) hoeft geen nabehandeling bij deze motor te hebben, wat scheelt in de prijs, die in dat geval rond de €100k uit kan komen (zie Tabel 3). Zwaardere motoren met een hoger vermogen, en verplichte nabehandeling, vragen een investering tot €200k (Menukaart, 2024; telefonische interviews – zie Tabel 3).

		Batterij-elektrisch	Diesel Stage 5		
Parameters motorgebruik en prijzen	Motoruren per jaar	173	173	173	173
	Motorverbruik diesel (HVO) (l/u)		7,8	7,8	7,8
	Prijs HVO (€/l)		0,84	0,84	0,84
	Motorverbruik energie (kWh/u)	12			
	Prijs energie (€/kWh)	0,45			
	Termijn afschrijving motor (draaiuren)	15.000			
	Termijn afschrijving motor (jaren)			26	26
	Termijn afschrijving accu's (jaar)	10			
Parameters aanschaf (€)	Motor	30.000	100.000*	150.000*	200.000*
	Accupakket	72.900			
	Batterijopstelling	20.000			
	CV (hybride)	10.000			
	Randapparatuur	20.000			
	Installatie	25.000			
	Totaal aanschaf	177.900	100.000	150.000	200.000
Jaarlijks OPEX (€)	Brandstof (HVO)/energie	934	1133	1133	1133
	Onderhoud motor	1.000	2.000	2.000	2.000
	Verzekering	2.500	2.500	2.500	2.500
Jaarlijks afschrijving (€)	Afschrijving motor e.d.	1.211	3.846	5.769	7.692
	Afschrijving batterijen	7.290			
Totaal jaarlijks (€)		12.935	9.480	11.403	13.326

Tabel 7. Gevoeligheidsanalyse, aanschafprijs Stage 5 Diesel. Basis is de TCO uit Tabel 4, variatie met aanschafprijs dieselmotor (grijs gearceerd).

* Totaalprijs voor de gehele investering. Zie toelichting Tabel 3.

Deze analyse laat zien dat een 'dure' Stage 5 Diesel in jaarlijkse kosten duurder is dan de batterij-elektrische optie met een ruim bemeten batterijpakket. De kleinste Stage 5 diesel-optie (kleine motor zonder nabehandeling van rond de €100k) is in jaarlijkse kosten nog net iets duurder dan de batterij-elektrische optie met een kleiner batterijpakket (€9.480 versus €8.885).

3.5. Best case scenario – batterijen met lange levensduur en restwaarde

In de hierboven uitgewerkte analyses zijn we ervan uitgegaan dat het batterijpakket over een periode van 10 jaar geheel wordt afgeschreven. Er komen echter steeds meer mogelijkheden om afgeschreven batterijen te hergebruiken, materialen te recyclen of anderszins circulair in te zetten, wat zou maken dat ze nog een restwaarde hebben na de afschrijftermijn. Deze circulaire verwerking van batterijen staat nog in de kinderschoenen en is nog geen volwassen industrie, maar eerder onderzoek biedt wel houvast om te schatten wat een economisch afgeschreven batterijpakket nog aan restwaarde zou kunnen hebben. In Tabel 3 komen we uit op een restwaarde van €100/kWh (voor lithiumijzerfosfaat batterijen), en beargumenteren we deze aanname. In Tabel 8 herhalen we de basisanalyse met een 'best case scenario', waarin

- ▶ De batterijen een restwaarde van €100/kWh behouden nadat ze zijn afgeschreven;
- ▶ De batterijen tot 3000 laadcycli meegaan, leidend tot een beduidend langere afschrijftermijn (24 in plaats van 10 jaar);
- ▶ De schipper toekan met het kleinere batterijpakket van 40kWh.

		Batterij-elektrisch (aanschaf) – Best case	Diesel Stage 5
Parameters motorgebruik en prijzen	Motoruren per jaar	173	173
	Motorverbruik diesel (HVO) (l/u)		7,80
	Prijs HVO (€/l)		0,84
	Motorverbruik energie (kWh/u)	12	
	Prijs energie (€/kWh)	0,45	
	Termijn afschrijving motor (draaiuren)	15.000	
	Termijn afschrijving motor (jaren)		26
	Termijn afschrijving accu's (jaar)	24	
	Capaciteit batterijpakket (kWh)	40	
	Kilowattuurprijs accu's (€/kWh)	810,00	
	Leaseprijs accu's als % van kilowattuurprijs (%/j)		
	Restwaarde accu's (€/kWh)	100	
Parameters aanschaf (€)	Motor	30.000	150.000*
	Accupakket	32.400	
	Batterijopstelling	20.000	
	CV (hybride)	10.000	
	Randapparatuur	20.000	

	Installatie	25.000	
	Totaal aanschaf	137.400	150.000
Jaarlijks OPEX (€)	Brandstof (HVO)/energie	934	1.133
	Onderhoud motor	1.000	2.000
	Verzekering	2.500	2.500
	Lease batterijen	0	
Jaarlijks afschrijving (€)	Afschrijving motor e.d.	1.211	5.769
	Afschrijving accupakket	1.183	
Totaal jaarlijks (€)		6.829	11.403

Tabel 8. 'Best case scenario' voor de batterij-elektrische optie, met een klein batterijpakket, langere afschrijftermijn, en batterijen met restwaarde.

* Totaalprijs voor de gehele investering. Zie toelichting Tabel 3.

In dit 'best case scenario' komt de batterij-elektrische optie relatief zeer gunstig uit, ook vergeleken met de meest gunstige Stage 5 diesel optie (kleine motor zonder nabehandeling). We hebben hier de meest gunstige aannames gebruikt, maar wel met waarden die nog binnen de realistische bandbreedten liggen zoals beschreven in Sectie 2.3.

3.6. Battery-as-a-service

Een alternatief voor het zelf aanschaffen van het batterijpakket is Product-as-a-Service, waar men in diverse sectoren inmiddels ervaring mee heeft opgedaan (Boslooper, 2021; Knol-Velthuisen, 2021). In de markt voor elektrische auto's (EVs) wordt (of is in het verleden) door verschillende fabrikanten de auto los van de batterij verkocht, met de optie om de batterij te huren. Hierdoor hoeven consumenten niet bij aanschaf een groot bedrag te betalen voor de batterij, hebben ze minder zorgen over de levensduur van de batterij, en kunnen ze profiteren van de doorontwikkeling van de batterijtechnologie door regelmatig een nieuwere batterij te huren.

In deze analyse onderzoeken we of het aantrekkelijk is om jaarlijks het batterijpakket te huren in plaats van zelf aan te schaffen. In de EV-sector zijn de batterijprijzen gestaag gezakt, en op basis van deze trend wordt een verdere daling verwacht van 5,6% tot 8,1% per jaar (Comello & Reichelstein, 2019). Voor deze analyse nemen we aan dat de batterijprijzen voor maritieme toepassingen een vergelijkbare trend laten zien en gaan we uit van een jaar-op-jaar daling van 6% van de kilowattuur-prijs. In de markt voor elektrische voertuigen is de prijs voor het huren van het batterijpakket doorgaans rond de 20% van de kilowattuur-prijs (Electric Autonomy Canada, 2022; Crownhart, 2023). Wij nemen aan dat dit voor batterijen voor maritieme toepassingen op een vergelijkbare manier kan werken.

In Sectie 2.2 (en de daaropvolgende analyses) gaan we uit van een kilowattuur-prijs van €810. Bij deze huidige (jaar 0) prijs zou de leaseprijs neerkomen op €162 per kWh per jaar, en kunnen we volgend jaar een kilowattuur-prijs verwachten van €761/kWh en een bijbehorende leaseprijs van €152 per kWh per jaar, enzovoort.

In deze analyse vergelijken we de optie om de batterijen zelf aan te schaffen (zoals in de analyses hierboven) met de optie om jaarlijks een batterijpakket te huren tegen een jaarlijks zakkende prijs, gedurende afschrijftermijn van het in jaar 0 aangeschafte batterijpakket (10 jaar).

Jaar	Prijs €/kWh	Batterijpakket 90kWh		Batterijpakket 40kWh		Stage 5 Diesel
		Jaarlijkse kosten (aanschaf) (€)	Jaarlijkse kosten (lease) (€)	Jaarlijkse kosten (aanschaf) (€)	Jaarlijkse kosten (lease) (€)	Jaarlijkse kosten (€150K aanschaf) (€)
0	810,00	12.935	20.220	8.885	12.125	11.403
1	761,40	12.935	19.350	8.885	11.736	11.403
2	715,72	12.935	18.528	8.885	11.371	11.403
3	672,77	12.935	17.775	8.885	11.027	11.403
4	632,41	12.935	17.029	8.885	10.704	11.403
5	594,46	12.935	16.345	8.885	10.401	11.403
6	558,79	12.935	15.703	8.885	10.116	11.403
7	525,27	12.935	15.100	8.885	9.847	11.403
8	493,75	12.935	14.533	8.885	9.595	11.403
9	464,13	12.935	14.000	8.885	9.358	11.403
10	436,28	12.935	13.498	8.885	9.135	11.403
Cumulatief (€, 10 jaar)		142.285	182.081	97.735	115.415	125.433

Tabel 9. Analyse cumulatieve kosten batterijhuur ten opzichte van aanschaf. Basis is de TCO uit Tabel 4; uitgaande van een jaarlijkse daling van 6% van de batterijprijzen.

Deze analyse laat zien dat op dit moment huren duurder is dan aanschaffen. In vergelijking met een Stage 5 diesel zijn de kosten van zowel de aanschaf als huur van een klein batterijpakket lager. Naarmate de tijd vordert en de batterijen ook voor maritieme toepassingen goedkoper worden zal de lease-optie steeds aantrekkelijker worden, aangenomen dat hier een markt voor komt.

Voor zover bekend is er nog geen mogelijkheid om batterijen voor scheepsmotoren te leasen. Het blijft dus ook speculeren hoe aanbieders dit vorm zullen geven. Noemenswaardig is dat het vaarseizoen van de bruine vloot zo'n 7 maanden beslaat, en dat de schepen daarbuiten veelal in de haven liggen (aan walstroom); als er in het laagseizoen voor de chartervaart een andere markt is voor de batterijen, wordt het wellicht mogelijk om de batterijen per maand (in plaats van per jaar) te leasen. Als de bruine vloot

batterijen kan leasen voor de maanden dat ze daadwerkelijk varen zal dit de kosten aanzienlijk drukken.

4. Discussie & conclusie

TCO is een transparante methode om de kosten van investeringen in kaart te brengen waarbij op de grote onzekerheden gevoeligheidsanalyses zijn gemaakt om hier een reëel inzicht te krijgen op de kostenverschillen tussen een Stage 5 dieselmotor en een batterij-elektrisch systeem. Het ontwikkelde model is beschikbaar in de Appendix. De in dit rapport getoonde analyses zijn gebaseerd op aannames over het schip waar de nieuwe motor in zou moeten komen, en voor ieder schip (met eigen dimensies, vaarprofiel, voorkeuren van de schipper etc.) zal de analyse anders uitpakken. De uitkomsten zijn dan ook niet 'one size fits all', maar hangen af van aannames en keuzes in de analyse. Het TCO-model in bijgevoegde spreadsheet biedt de mogelijkheden om een analyse op maat te maken voor ieder schip en iedere schipper.

De belangrijkste constatering op basis van onze analyses is dat de hoge prijs van (lithium-ijzerfosfaat) accu's de kosten van de investering in een batterij-elektrisch systeem relatief hoog maakt ten opzichte van het alternatief, een Stage 5 dieselmotor. Bij een kleiner batterijpakket, en in het 'best case scenario' (waarin de schipper toekan met een klein batterijpakket, de batterijen een lange (maar niet onrealistische) afschrijftermijn hebben, en de afgeschreven batterijen nog een restwaarde hebben) kan het batterij-elektrische systeem concurreren met de Stage 5 diesel. Battery-as-a-service kan op lange termijn een oplossing bieden om de drempel van de hoge investeringskosten enigszins te verlagen (hoewel de investering in de motor en de rest van de installatie nog steeds op zo'n €100K uitkwam), maar met de huidige prijzen van batterijcapaciteit (en de aangenomen vertaling hiervan in de leasetarieven) maken dat dit nog steeds een relatief kostbare oplossing is. Een interessant perspectief is wel dat een flexibele lease-optie, waarbij batterijlease per maand mogelijk is, schippers in staat stelt om hun batterijuur te beperken tot de maanden dat ze daadwerkelijk varen. Aan de aanbodkant vraagt dit om te kijken naar andere afzetmarkten voor de batterijen in de maanden dat de bruine vloot niet of nauwelijks vaart.

Hoopgevend is dat de prijzen van batterijen voor EVs al tientallen jaren een gestaag dalende trend laat zien, wat zich waarschijnlijk ook bij batterijen voor andere toepassingen zal voordoen. Als deze prijs zakt wordt het batterij-elektrische systeem zowel in aanschaf als in lease aantrekkelijker. Afhankelijk van de levensduur van de batterijen komt dit omslagpunt binnen 5-10 jaar al in zicht, mits schippers toekunnen met een accupakket met een beperktere (maar voor een normale vaardag meer dan toereikende) actieradius. Dit is uitgaande van een gestage daling van de prijs van lithium-ijzerfosfaat batterijen, maar los van eventuele disruptieve ontwikkelingen in de markt voor energieopslag. Zoutbatterijen of brandstofcellen kunnen bijvoorbeeld een goedkoper alternatief worden voor lithiumbatterijen, maar zijn nu nog niet voor maritieme toepassingen beschikbaar. Daarnaast zijn er andere ontwikkelingen in de batterijtechniek en batterij-recycling die op

termijn tot aantrekkelijke(r) proposities kunnen leiden. Hiervan is echter nog onzeker wanneer en in hoeverre dit aan de orde is.

Welk alternatief een schipper ook kiest, hermotoriseren gaat een grote investering vragen. Het wordt echter wel noodzakelijk – op termijn omdat de eisen aan duurzaamheidsprestaties steeds strenger worden, en de oude dieselmotoren op den duur niet meer in havens en vaargebieden zijn toegestaan, en op dit moment al wanneer een oude dieselmotor vervangen moet worden. De basisanalyse laat zien dat deze investering zelf – los van eventuele andere noodzakelijke of gewenste aanpassingen aan het schip – ongeveer tussen de €2.500 ('best case scenario' batterij-elektrisch) en €8.889 ('worst case scenario' batterij-elektrisch) per jaar aan *extra* kosten (OPEX en afschrijving naast de operationele kosten die de schippers in de huidige situatie ook maken) gaat opleveren die terugverdiend moeten worden in de gemiddeld 122 vaardagen die de schepen per jaar hebben (wat simpel gerekend neerkomt op €21 tot €73 per dag). Dit moet gezien worden in de context van een gemiddelde huuromzet per dag van €1.124 (zeil-hotelschepen) tot €1.712 (zeil-dagtochten) (BBZ, 2023). Het gaat dus om een procentueel relatief klein bedrag op dergelijke dagomzetten, maar het vraagt wel om een prijsverhoging die mogelijk gemaakt moet worden met een schoner en stiller schip te kunnen manoeuvreren.

5. Aanbevelingen

Op basis van de bevindingen kunnen wij een aantal aanbevelingen doen:

- ▶ Deze analyse vergelijkt twee opties voor hermotoriseren met elkaar – batterij-elektrisch en Stage 5 Diesel. Op dit moment (voornamelijk door de hoge batterijprijzen) is de prijs van het batterij-elektrische systeem relatief hoog ten opzichte van de prijs van een moderne dieselmotor. Binnen enkele jaren zal hier – aangenomen dat batterijen beter beschikbaar en betaalbaarder worden – een omslagpunt in komen. Om verschillende redenen is een batterij-elektrische oplossing duurzamer. Ten eerste zal deze ook na 2050 nog aan de duurzaamheidseisen voldoen, terwijl vanaf dan ook een modernere diesel niet meer voldoet (en wellicht eerder al als gevolg van strenger klimaatbeleid in lijn met het klimaatakkoord van Parijs en strengere eisen die lokaal gesteld worden aan passagiersvaart (bijv. Amsterdam)). Ten tweede biedt een elektromotor flexibiliteit om te profiteren van ontwikkelingen in de markt voor energieopslag, omdat deze ook geschikt is voor brandstofcellen en andere typen batterijen. Een schipper die op dit moment deze afweging maakt doet er goed aan deze overwegingen mee te laten wegen; de bijgevoegde rekentool geeft inzicht in wat verschillende prijsniveaus van energieopslag betekenen voor het kostenplaatje.
- ▶ Revisie is een andere optie om – tegen een relatief kleinere investering – de levensduur van de huidige motoren te verlengen. Schippers die dit nu overwegen als alternatief voor hermotoriseren doen er goed aan om te overwegen of dit op lange termijn ook een goede keuze is. Afhankelijk van in welke havens en vaargebieden zij varen komt eerder of later het punt dat hun motor niet meer voldoet voor de tochten die zij willen maken. Schippers die overwegen te reviseren in afwachting van prijsdalingen van modernere en duurzamere systemen nemen hiermee een risico. Voor de situatie waarin beperkte financieringsmogelijkheden de belangrijkste barrière zijn om te hermotoriseren doen wij enkele aanbevelingen om deze drempel te verlagen.
- ▶ De investering in hermotoriseren brengt hogere jaarlijkse kosten met zich mee (lease en/of afschrijving), bovenop de ‘standaard’ operationele kosten die schippers al verdisconteren in hun tariefstelling. Daarom is het noodzakelijk deze tariefstelling kritisch te evalueren – zijn de tarieven zodanig dat een schipper alle nodige investeringen kan betalen? Het bijgevoegde rekenmodel biedt een handvat om deze afweging te maken. Als de huidige tarieven te weinig ruimte bieden om de nodige investeringen te doen, dan moet de tariefstelling omhoog, gerechtvaardigd door een schoner en stiller schip. Voor de eerste schippers die dit doen kan dit een ‘unique selling point’ zijn richting (specifieke groepen) klanten dat een hoger tarief rechtvaardigt, maar gaandeweg kan schoon en stil varen tegen hogere tarieven de standaard worden in de sector, en blijven schippers die nog met een oude motor op fossiele diesel varen achter. De bruine vloot drijft op de passie van de schippers voor hun schepen en hun vak, wat wellicht een barrière opwerpt om prijzen te verhogen. Anderzijds is het essentieel om op

een duurzame en financieel gezonde manier het voortbestaan van de vloot te verzekeren.

- ▶ Hermotoriseren vraagt hoe dan ook een grote investering, wat een probleem kan zijn gezien schippers doorgaans beperkte toegang hebben tot financiering en het lang niet altijd uit eigen middelen kunnen betalen (zie Sectie 2.4). Het aspect van financiering (dat in de praktijk een mix is van eigen middelen, bankkrediet en/of hypotheek, en/of onderhandse leningen, allen tegen variërende percentages) is in deze analyse nog niet meegenomen, maar vraag wel aandacht. Op brancheniveau is reeds een kredietunie (Kredietunie Traditionele Passagiersvaart, KTPV) opgericht om schippers te ondersteunen bij grote investeringen – een waardevolle stap gezien de aankomende verduurzamingsopgave waar de gehele sector voor staat. Dit initiatief, en andere mogelijkheden om de toegang van schippers tot financiering voor grote investeringen te verbeteren, verdienen ondersteuning. Banken die terughoudend zijn met kredietverstrekking kunnen wellicht tegemoet worden gekomen met hogere marges, wat sowieso al noodzakelijk lijkt om de grote investeringen terug te kunnen verdienen. Bijgevoegd rekenmodel kan helpen om de omvang van investeringen in te schatten, en de impact inzichtelijk te maken van de terugverdientijd.
- ▶ Er is nog geen markt voor het leasen van batterijen voor maritieme toepassingen, zoals die wel al groeiende is in de markt voor EV-batterijen. Hoewel het bij de huidige kilowattuurprijzen van batterijen nog een erg dure optie is, kan het op termijn wel meer flexibiliteit bieden en de barrière van de hoge initiële investering verlagen. Idealiter kan de markt de schippers ook op maat bedienen, met bijvoorbeeld acculease op maandbasis gedurende het vaarseizoen of laagdrempelig kortstondig extra capaciteit leasen voor specifieke trips. Hierin kan de sector zelf via de BBZ een trekkende rol op zich nemen door de inkoop van leasecapaciteit en -contracten te bundelen. Batterijlease kan ook coöperatief opgezet worden, maar vraagt om kapitaal (analoog aan de kredietunie die al opgezet is), en om de ontwikkeling van expertise op het gebied van de batterijsystemen om onderhoud en reparaties in eigen beheer te kunnen doen.
- ▶ De functie van de bruine vloot als 'varend erfgoed' maakt dat overheidsorganisaties (gemeente, provincie, rijk) genegen zijn hier subsidies voor beschikbaar maken. De ervaring van de reeds elektrisch varende schippers laat zien dat dit geen overzichtelijk landschap is in termen van waar wat beschikbaar is tegen welke voorwaarden. Hun aanbeveling is om hierin advies te zoeken van een subsidieadviseur. Aangezien het (los van regionale verschillen) vaak dezelfde subsidies zijn waar schippers voor in aanmerking komen, kan dit advies ook op brancheniveau worden ingewonnen en beschikbaar gemaakt aan individuele ondernemers. Daarnaast is ons advies naar deze overheidsorganisaties om subsidies transparanter en toegankelijker te maken, en hierin ook proactief op te treden richting het erfgoed dat ze willen behouden. Voor schippers, adviseurs, en subsidieverstrekkers geeft het rekenmodel in de bijlage een mogelijkheid om de financieringsbehoefte inzichtelijker te maken.

De stap naar een duurzame en financieel gezonde bruine vloot vraagt om een combinatie van deze oplossingen. Duidelijk is dat grote investeringen op niet al te lange termijn onontkoombaar worden, en dat inzicht in de kosten en financieringsbehoefte hierbij essentieel is. Deze rapportage en bijgevoegd rekenmodel bieden handvatten om dit inzichtelijk te maken, en de juiste financieringsmogelijkheden bij de behoefte te organiseren.

Referenties

BBZ. 2024. Kerncijfers Chartervaart 2023. Beschikbaar op <https://www.debbz.nl/nieuws/kerncijfers-2023-online>.

Bloomberg. 2023. Lithium-Ion battery pack prices hit record low of \$139/kWh. Beschikbaar op <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-hit-record-low-of-139-kwh/>.

Boslooper E. (2021). Externe kosten worden interne kosten; de prijs in het circulaire businessmodel. CM Web.

CO2 Emissiefactoren. 2024. Lijst emissiefactoren. Beschikbaar op <https://www.co2emissiefactoren.nl/lijst-emissiefactoren/>.

Comello, S., Reichelstein, S. The emergence of cost effective battery storage. Nat Commun 10, 2038 (2019). <https://doi-org.hr.idm.oclc.org/10.1038/s41467-019-09988-z>.

Crownhart, C. 2023. Why some companies want you to rent the battery in your EV – Battery swapping could change how we pay for the power in our vehicles. MIT Technology Review. Beschikbaar op <https://www.technologyreview.com/2023/05/18/1073291/rent-ev-battery-swap/>.

EnergyGO. 2024. Menukaart duurzame chartervaart. Beschikbaar op <https://www.debbz.nl/bestanden/menukaart-bbz-1005.pdf?cd=i>.

Electric Autonomy Canada. 2022. VinFast releases battery leasing price plans for Canadian customers. Beschikbaar op <https://www.technologyreview.com/2023/05/18/1073291/rent-ev-battery-swap/>.

EOC. 2023. Infoblad accu's. Beschikbaar op <https://www.eoc.nl/Portals/5/Downloads/Infobladen/Infoblad%20Accu%20vergelijk.pdf>.

ESource. 2022. Battery market forecast to 2030: Pricing, capacity, and supply and demand. Beschikbaar op <https://www.esource.com/report/130221hvfd/battery-market-forecast-2030-pricing-capacity-and-supply-and-demand>.

Greenway, 2024. Verwachting prijsontwikkeling HVO en diesel. Beschikbaar op <https://greenwayplatform.nl/verwachting-prijsontwikkeling-hvo-en-diesel/>, geraadpleegd 25 juli 2024.

Hua, Y., Zhou, S., Huang, Y., Liu, X., Ling, H., Zhou, X., Zhang, C., Yang, S. 2020. Sustainable value chain of retired lithium-ion batteries for electric vehicles. *Journal of Power Sources* 47, 228753. DOI: <https://doi-org.hr.idm.oclc.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228753>.

Ministerie van Financien. (2024). Miljoenennota Bijlage 25 Fossiele Subsidies. Beschikbaar op <https://www.rijksfinancien.nl/miljoenennota/2024/bijlage/1848724>.

Rijksoverheid. (2019). Green deal Zeevaart, Binnenvaart en Havens.

Rijksoverheid. (2022). Klimaatakkoord. Beschikbaar op <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/klimaatverandering/klimaatakkoord/wat-is-het-klimaatakkoord>.

Sommerville, R., Zhu, P., Rajaeifar, M.A., Heidrich, O., Goodship, V., Kendrick, E. 2021. A qualitative assessment of lithium ion battery recycling processes. *Resources, Conservation and Recycling* 165, 105219. DOI: <https://doi-org.hr.idm.oclc.org/10.1016/j.resconrec.2020.105219>.

Zeilen.nl. 2021. Nu in zeilen: 19 vragen + 8 tips over de dieselmotor. Beschikbaar op <https://www.zeilen.nl/actueel/nu-in-zeilen-19-vragen-8-tips-over-de-dieselmotor/>.