

Westerschelde Ferry Hybride Opties

Onderzoek naar risicomitigatie voor batterij-
elektrische veren

Project title	Provincie Zeeland Hybrid Feasibility Study
Project no.	25.023
Document no.	000-033
Deliverable name	Westerschelde Ferry Hybride Opties
Document revision	REVA
Client	Provincie Zeeland

C-Job Naval Architects
Regulusplein 1
2132 JN Hoofddorp
The Netherlands
+31 88 0243 700
info@c-job.com
www.c-job.com

© C-Job 2025
Disclaimer in this document

REVISION HISTORY

A	18/06/2025	Algemene update	NDV	TV	NDV
0	09/04/2025	Eerste versie	TV	NDV	NDV
Rev	Date	Description	Aut.	Chk.	App.

DESCRIPTION OF MODIFICATIONS

Rev	Description of modifications
0	Eerste versie
A	Verwerken van klant feedback

DISCLAIMER

This entire publication, including, but not limited to, any included drawings, sketches, calculations, procedures and/or any printed text that may contain and incorporate confidential information, shall remain the exclusive property of C-Job Group B.V. and its (in)direct subsidiaries and affiliates group of companies (hereinafter referred to as "C-Job"). Disclosure by C-Job of confidential information included in this publication does not grant recipient (or any third party) any express or implied rights to such confidential information, nor to or any of C-Job's patents, copyrights, trade secrets, trademarks, or any other intellectual property rights. The recipient may not disclose the confidential information to any third party, nor shall the recipient reproduce, store in a retrieval system, or transmit in any form of by any means, electronic, mechanical, photocopy, record or otherwise, any part of this publication without the express prior written consent of C-Job Group. In case of disclosure of any of this confidential information recipient shall be deemed to have disclosed this information and render recipient liable for any losses and damages that may be incurred, unless and until recipient can prove otherwise.

SAMENVATTING

De Provincie Zeeland heeft een initiële concept analyse voor een vloot van batterij-elektrische veerboten om de huidige vloot te vervangen en te verduurzamen. Om de vervolg stappen met deze batterij-elektrisch veerboten te nemen wil de Provincie Zeeland meer inzicht in de operationele risico's van batterij-elektrisch veerboten bestaande uit elektriciteitsnet congestie, brandgevaar en elektrisch systeem falen. Verder wil de Provincie Zeeland de batterij-elektrisch veerboten vergelijken met hybride opties eventueel op duurzame alternatieven.

Analyse van het risico op congestie van het elektriciteitsnet laat zien dat indien geen aanvullende maatregelen worden genomen, elektriciteitsnet congestie naar verwachting een risico vormt voor (de eerste jaren van) de operatie. Verder kan, op basis van reeds bestaande batterij elektrische schepen, regelgeving en speciale veiligheidssystemen, geconcludeerd worden dat batterij elektrische schepen voldoende veilig zijn, specifiek ten aanzien van brandgevaar. Daarnaast is vastgesteld, op basis van vereiste toepassing van redundantie en kennis en ervaring van bestaande diesel elektrische en volledig batterij elektrische schepen, dat batterij-elektrische veerboten voldoende betrouwbaar zijn en deze geen (extra) risico vormen voor (de continuïteit van) de operatie.

In dit rapport is geanalyseerd welke duurzame energiedragers toegepast kunnen worden in de hybride opties voor de Westerschelde ferry. Initieel blijven de opties batterijen, waterstof, ammoniak, methanol en HVO100 over. Nader kijkend naar de casus voor de Westerscheldeferry valt ammoniak af vanwege de complexiteit van de opslag en veiligheidsrisico's. Waterstof en methanol zijn onaantrekkelijk als gevolg van hogere operationele kosten dan batterijen. Daarmee blijven batterijen en HVO100 over. Batterijen zijn de basiskeuze zoals toegepast in de basisoptie. HVO100 is een geschikt duurzaam alternatief waar nu fossiele diesel wordt gebruikt zonder extra investeringskosten. Echter omdat de Provincie Zeeland alleen de uitstoot van het schip beschouwd (tank tot schroef), is dit geen zero-emissie optie.

De volgende opties voor de vloot van Westerschelde ferries zijn in dit rapport gepresenteerd:

- Basisoptie: Een vloot van batterij-elektrische schepen
- Optie A: Een vloot van batterij diesel-elektrische schepen, waarbij een dieselgenerator of batterijen de elektromotor van elektrische energie voorzien
- Optie B: Een vloot van diesel-directe schepen met Power-Take-In, waarbij een dieselmotor of een elektromotor via een tandwielkast de schroef kunnen aandrijven
- Optie C: Het grote schip in de vloot wordt uitgevoerd als diesel-direct schip zonder batterijen, de kleine schepen blijven batterij-elektrisch
- Optie D: De vloot blijft ongewijzigd ten opzichte van de basisoptie, maar wordt aangevuld met een dieselgenerator aan de wal die de vloot van elektriciteit kan voorzien in de eerste jaren van de operatie.

Deze opties zijn vergeleken op basis van uitstoot van schadelijke emissies, totale kosten van eigenaarschap, impact op de operationele risico's en overige bijzonderheden. Op basis de volledige vergelijking wordt geadviseerd om voor optie D te kiezen, als alternatief op de basis optie, indien netcongestie niet in de tussenliggende tijd wordt opgelost.

Dit is een kostenefficiënte oplossing, die goed inspeelt op het niet beschikbaar zijn van walstroom tijdens de eerste jaren van de operatie. Daarnaast is het de op één na beste optie wat betreft de uitstoot van schadelijke emissies. Verder kan er bij optie D een vloot ontworpen worden die bestaat uit zo efficiënt mogelijke batterij-elektrische veren.

INHOUDSOPGAVE

Samenvatting.....	2
1. Inleiding	5
2. Definities en aannames.....	6
2.1. Definities.....	6
2.2. Aannames.....	7
3. Basisoptie: batterij-elektrische vloot	8
3.1. Technische specificaties	8
3.2. Emissies	9
3.3. Kosten	9
4. Evaluatie van operationele risico's	12
4.1. Elektriciteitsnet congestie.....	12
4.2. Brandgevaar	13
4.3. Elektrisch systeem falen	15
5. Voorselectie van alternatieven	16
5.1. Duurzame brandstoffen	16
5.2. Voorselectie	17
6. Hybride opties	19
6.1. Hybride schepen	19
6.2. Hybride vloot	20
6.3. Hybride walstroom infrastructuur	21
6.4. Overzicht hybride alternatieven	22
7. Analyse hybride opties	23
7.1. Technisch ontwerp	23
7.2. Emissies	26
7.3. Kosten analyse	29
7.4. Impact op operationele risico's	33
7.5. Overige bijzonderheden	34
8. Toepassing van HVO-100	37
8.1. Emissies	37
8.2. Kosten analyse	37
9. Conclusies	39
9.1. Operationele risico's	39
9.2. Duurzame brandstoffen	39
9.3. Vergelijking hybride opties	39
9.4. Aanbevolen optie.....	41

9.5.	Discussie	41
10.	References.....	42

Appendix A.	Detail aandrijflijnen
Appendix B.	Detail redundantie elektrisch systeem
Appendix C.	Overzicht duurzame brandstoffen
Appendix D.	Overzicht aannames kosten

1. INLEIDING

De Provincie Zeeland heeft een initiële concept analyse voor een vloot van batterij-elektrische veerboten om de huidige vloot te vervangen en te verduurzamen. Om de vervolg stappen met deze batterij-elektrisch veerboten te nemen wil de Provincie Zeeland meer inzicht in de operationele risico's van batterij-elektrisch veerboten. Verder wil de Provincie Zeeland de batterij-elektrisch veerboten vergelijken met hybride opties eventueel op duurzame alternatieven.

Daarom zal dit onderzoek inzicht geven in weging van de operationele risico's bestaande uit elektriciteitsnet congestie, brandgevaar en elektrisch systeem falen. Nadat deze risico's gewogen zijn onderzocht wordt er gekeken naar mitigatie mogelijkheden doormiddel van toepassing van hybride opties voor de vloot. Op basis van de analyse zal er een aanbeveling worden geformuleerd omtrent hoe verder te gaan met de vervanging en verduurzaming van de vloot van Provincie Zeeland.

2. DEFINITIES EN AANNAMES

In dit hoofdstuk worden de definities en aannames zoals gebruikt in het rapport beschreven.

2.1. Definities

De definities die in het rapport gebruikt worden zijn als volgt:

Cyclus	Een volledige ronde waarin de veerboot afvaart, aankomt aan de overkant, en weer terugvaart en aankomt bij de haven van vertrek, waarna er wordt voorbereid op de volgende afvaart.
HVO-100	Hydrotreated Vegetable Oil-100, een duurzame productie vorm van diesel. Het wordt gemaakt door plantaardige oliën en restafval te behandelen met waterstof. Het cijfer 100 geeft aan dat dit niet vermengd is met fossiele diesel.
TKE	Totale kosten van eigenaarschap; de kosten die geassocieerd zijn met de investeringen en alle kosten die verbonden zijn aan het opereren van de schepen.
DoD	‘Depth of Discharge’, de ontladingsdiepte van de batterijen. Dit wordt uitgedrukt in een percentage en geeft aan hoeveel % van de totale beschikbare capaciteit van de batterijen tijdens een ontlading gebruikt wordt.
DC	‘Direct Current’; gelijkspanning. Het spanningstype zoals deze uit een batterij komt.
AC	‘Alternating Current’; wisselspanning. Het spanningstype zoals deze uit het stopcontact komt.
GWP	‘Global Warming Potential’, hoe sterk een broeikasgas bijdraagt aan de opwarming van de aarde in vergelijking met CO ₂ .
Redundant	In de context van scheepsontwerp betekent dit in feite dat een component of systeem dubbel wordt uitgevoerd zodat een enkel falen niet leidt tot falen van het hele systeem of schip.
CAPEX	‘Capital Expenses’; investeringskosten. De vaste kosten die verbonden zijn aan de aanschaf of tijdens de start.
OPEX	‘Operational Expenses’; operationele kosten. De variabele kosten die verbonden zijn aan de operatie en gemaakt worden tijdens de duur van het project.

2.2. Aannames

De belangrijkste aannames gedaan in dit onderzoek zijn als volgt:

1. Er wordt in de analyse van de hybride concepten niet afgeweken van de voorgestelde dienstregeling uit ref [1] .
2. Er wordt uitgegaan van een operatie duur van 25 jaar voor de nieuwe schepen.
3. De financiële vergelijkingen zal beperkt worden tot de totale kosten van eigenaarschap (TKE). Dit omdat er aan de inkomstenkant geen veranderingen plaatsvinden.
4. In de vergelijking van de kosten (TKE), zoals omschreven in punt 2, van de hybride concepten wordt enkel gekeken naar de kosten die veranderen ten opzichte van de basisoptie. Dit betekent dat kosten die niet veranderen, bijvoorbeeld de personeelskosten of certificaatkosten, niet meegenomen worden in de vergelijkingen. De essentie van de financiële vergelijking betreft dus enkel de absolute verschillen.
5. De analyse van schadelijke emissies zal zich beperken tot de ‘tank-to-propeller’ emissies conform de wens van Provincie Zeeland. Dit houdt in dat alleen de uitstoot die plaatsvindt vanaf het omzetten van de energiedrager in het schip tot voortstuwing in ogenschouw genomen wordt.
6. Voor de hoeveelheid emissies die motoren en generatoren uitstoten worden de Europese stage V normen aangehouden. Overige emissies die niet in de stage V benoemd worden zijn volgend de “Fourth IMO Greenhouse Gas Study” berekend.

De financiële aannames zijn uitgewerkt in: 10.Appendix D Overzicht aannames kosten

3. BASISOPTIE: BATTERIJ-ELEKTRISCHE VLOOT

In dit hoofdstuk wordt de basisoptie beschreven, om een referentiesituatie te schetsen waartegen de hybrideopties worden vergeleken. Deze basisoptie volgt uit het eerdere onderzoek naar een zero-emissie vloot voor de Westerschelde ferry door Flying Fish [1].

3.1. Technische specificaties

De basisoptie zal bestaan uit een vloot die volledig batterij-elektrisch is. Dit betekent één groot schip met een passagierscapaciteit van 250 personen en twee kleine schepen met een passagierscapaciteit van 42 personen. De aangenomen dienstregeling voor deze vloot is opgenomen in Tabel 3-1. De kleine schepen zullen meer afvaarten per uur doen en dus sneller varen dan het grote schip.

Anders dan in ref [1] wordt voor de vergelijking uitgegaan van twee kleine schepen in plaats van drie. Dit is omdat de voorgestelde dienstregeling gevaren kan worden met twee kleine schepen, het derde schip zou enkel als back-up gebruikt worden.

Tabel 3-1: Overzicht dienstregeling nieuwe vloot [1]

Seizoen	Totaal afvaarten kleine schepen per dag	Totaal afvaarten groot schip per dag
Hoogseizoen (juli-augustus)	47	10
Voor- / Naseizoen (april-juni / september-oktober)	45	8
Laagseizoen (november-maart)	42	0

Het grote schip is ontworpen als een aluminium catamaran, vanwege de relatief lage weerstand voor de kruissnelheid van 30 km/h en de stabiliteit van dit schip wat voor meer comfort voor de passagiers kan zorgen. Het kleine schip is ontworpen als een snel schip met een zo klein mogelijke weerstand bij de kruissnelheid van 50 km/h. Er zal in het ontwerp zoveel mogelijk rekening gehouden moeten worden met een minimale vermogensvraag. De technische specificaties van beide schepen zijn opgenomen in Tabel 3-2.

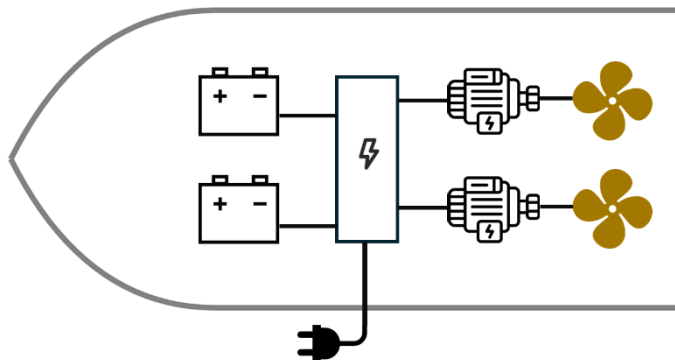
Tabel 3-2: Overzicht technische specificaties basisoptie [1]

	Klein schip	Groot schip
Aantal schepen	2	1
Aantal passagiers	42	250
Kruissnelheid (km/h)	50	30
Geïnstalleerd motorvermogen (kW)	740	1100
Maximaal uitgangsvermogen batterijen (kW)	841	1250
Geïnstalleerde batterijcapaciteit (kWh)	750	2000
Gemiddeld energieverbruik per cyclus (kWh)	191	450
Gemiddelde ontladingsdiepte per cyclus (%)	26	23
Aantal cycli per jaar	8048	1836

Met behulp van de gegevens uit ref [1], is een inschatting gemaakt van het gemiddelde energieverbruik per cyclus. Een cyclus betekent hier een volledige rondvaart, dus van Vlissingen naar Breskens en weer terug naar Vlissingen. Te zien is dat voor beide schepen er ongeveer een kwart van de geïnstalleerde batterijcapaciteit gebruikt wordt per cyclus. Doordat de kleine

schepen het hele jaar door varen en daarnaast meer cycli per dag varen, is het aantal cycli per jaar voor de kleine schepen vele malen groter.

Voor beide schepen wordt uitgegaan van een DC-grid, zoals beschreven in ref [2]. Dit heeft als voordeel dat de componenten lichter zijn, wat met name voor de kleine schepen een belangrijk voordeel is. Daarnaast is dit type grid efficiënter: voor de omzetting van energie in de batterij naar de propeller gaat er minder energie verloren. Zie Figuur 3-1 voor een overzicht van de aandrijflijn van de batterij-elektrische schepen, de dubbele componenten geven aan dat het voorstuwingssysteem en de batterijen redundant zijn toegepast in het ontwerp. In Appendix A wordt een meer gedetailleerd overzicht van deze componenten en de geschatte rendementen gegeven.



Figuur 3-1: Overzicht aandrijflijn batterij-elektrische schepen

3.2. Emissies

Het belangrijkste uitgangspunt van dit concept is dat het geen emissies geeft van de tank tot de schroef. Wanneer ook gekeken wordt naar de emissies van de energiebron (well) tot de 'tank' van het schip, dan zou de stroom die geleverd wordt voor de batterijen uit duurzame energie opgewekt kunnen worden, wat betekent dat voor de energievoorziening er geen schadelijke uitstoot bestaat.

3.3. Kosten

De financiële uitkomst van de basisoptie, een batterij-elektrische vloot, is voor een groot deel al beschreven in ref [1]. In deze paragraaf zal dit nog eens opgesomd worden en wordt een toevoeging gedaan in de operationele kosten om de vergelijking met de andere concepten completer te maken. Zoals beschreven in hoofdstuk 0, wordt enkel naar de totale kosten van eigenaarschap (TKE) gekeken, gezien de inkomsten voor de verschillende concepten gelijk zullen zijn. De onzekerheid in het technische ontwerp in deze fase bedraagt 10-20%. Dit in combinatie met prijsonzekerheid leidt tot een typische bandbreedte van +/- 50% op de CAPEX- en OPEX-indicaties.

De investeringskosten voor de vloot zijn weergegeven in Tabel 3-3. Deze kosten zijn gebaseerd op de kosten gepresenteerd in ref [1] en gecorrigeerd voor de inflatie sinds het moment van schrijven van het eerdere rapport. Er wordt hierbij uitgegaan van een laadinfrastructuur in de haven bij Vlissingen en in Breskens.

Tabel 3-3: Investeringskosten [1]

Omschrijving	Investeringskosten [M€]
Klein schip (2x)	8.5
Groot schip (1x)	9.0
Laadinfrastructuur (2x)	0.7
Totaal	18.2

Daarnaast worden de operationele kosten per jaar bekeken voor de TKE. De energiekosten en onderhoudskosten van de kleine schepen en het grote schip volgen de aannames uit ref [1]. Ook deze getallen zijn gecorrigeerd voor de inflatie. Deze kosten zijn theoretisch ingeschat, in de praktijk kan het voorkomen dat deze hoger of lager uitvallen. De operationele kosten per jaar zijn gepresenteerd in Tabel 3-4.

Tabel 3-4: Operationele kosten [1]

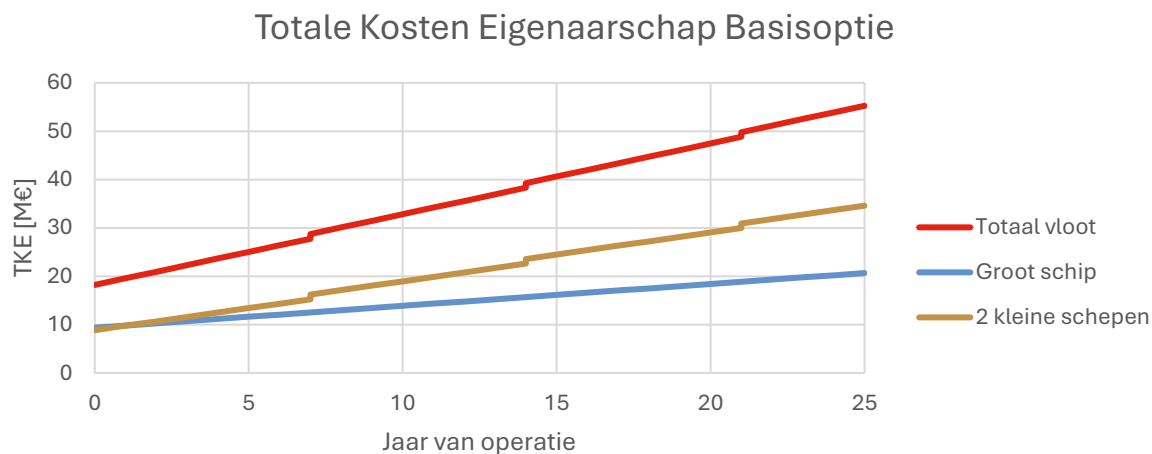
Omschrijving	Operationele kosten [M€/jaar]
Onderhoud klein schip (2x)	0.43
Onderhoud groot schip (1x)	0.32
Energiekosten	0.61
Totaal	1.37

Daarnaast dient rekening gehouden te worden met vervanging van de batterijpakketten van de schepen. Dit komt doordat de batterijen na een groot aantal keer ontladen en opladen in kwaliteit verslechteren, wat het risico op bijvoorbeeld thermal runaway groter maakt (zie paragraaf 4.2). Ook zal de capaciteit van de batterijen door het aantal keer ontladen en opladen afnemen, wat invloed heeft op het operationeel bereik van de schepen. De belangrijkste factor die invloed heeft op de levensduur van de batterijen is hoe diep de gemiddelde ontlading is. Hierbij geldt, hoe dieper de batterij ontladen wordt, hoe minder lang deze mee gaan. Deze ontladingsdiepte is dus bepalend voor de termijn van de vervanging en zo kan een groter accupakket op langere termijn voordeliger zijn dan een accupakket wat precies genoeg capaciteit heeft voor de operatie. In Tabel 3-2 is een inschatting gemaakt van de ontladingsdiepte per cyclus en per schip.

Door middel van statistische analyse van de batterijprestaties van meerdere producenten, kan een schatting gemaakt worden van het maximale aantal ontladingen van het batterijpakket van het grote en kleine schip. Dit is voor het kleine schip zo'n 55000 keer; met een gemiddeld aantal afvaarten van 7846 per jaar voor het kleine schip komt dit neer op een levensduur van zeven jaar. Dit betekent dat elk zevende jaar de batterijen voor de kleine schepen vervangen dienen te worden. De kosten hiervoor zijn €975.000. Er is aangenomen dat deze kosten de aankomende 25 jaar constant blijven, omdat de techniek voor batterijen niet in prijs zal toenemen en de productie van batterijen waarschijnlijk goedkoper wordt.

Voor het grote schip is het maximaal aantal ontladingen 64500 keer. Aangezien het grote schip veel minder afvaarten per jaar heeft dan de kleine schepen, komt dit neer op een levensduur van het batterijpakket van 36.5 jaar. Volgens deze theoretische benadering hoeft het batterijpakket van de grote schepen dus niet vervangen te worden tijdens de operatieduur. In de praktijk kan het voorkomen dat er toch een vervanging van (een deel van) het batterijpakket moet plaatsvinden. Dit is in dit onderzoek niet meegenomen.

Met inachtneming van de investeringskosten in jaar 0, de operationele kosten zoals beschreven in Tabel 3-4 en de vervanging van de batterijpakketten van de kleine schepen elke zeven jaar, kan een overzicht van de TKE over de operatieduur gemaakt worden. In Figuur 3-2 is dit weergegeven. Aan het einde van de operatieduur zijn de TKE hiermee 55.3 M€.



Figuur 3-2: Totale kosten van eigenaarschap (TKE) voor de basisoptie (batterij-elektrische vloot)

De investeringskosten van de basisoptie is af te lezen op de y-as bij jaar 0. De operationele kosten worden hier jaarlijks bij opgeteld en geven zo een toename in de TKE over de 25 jaar durende operatie.

4. EVALUATIE VAN OPERATIONELE RISICO'S

In dit hoofdstuk worden de operationele risico's voor de batterij-elektrische installatie voor de veerboten beschreven en geëvalueerd. In dit onderzoek betreffen dat elektriciteitsnet congestie, brandgevaar en elektrisch systeem falen.

4.1. Elektriciteitsnet congestie

Om de batterij-elektrische veren van energie te voorzien is er op basis van eerder onderzoek [1] de volgende laadbehoefte vastgesteld:

- 1x walstroomaansluiting 1750 kVA (met 1500 kW laadvermogen) in Vlissingen veerhaven (met 2 oplaadstekkers per steiger van elk maximaal 750 kW)
- 1x walstroomaansluiting 1750 kVA (met 1500 kW laadvermogen) in Breskens veerhaven (met 2 oplaadstekkers per steiger van elk maximaal 750 kW)
- Eventueel een 2e walstroomaansluiting 1750 kVA (1500 kW laadvermogen) in Vlissingen veerhaven

De laadfrequentie van het grote schip is 20 minuten per uur in het hoogseizoen. Er wordt dan uitgegaan van een laadvermogen van 1500 kW aan het schip. Voor één klein schip is dit 15 minuten per 40 minuten. Wat in totaal neerkomt op 30 minuten per 40 minuten voor twee kleine schepen. Hier wordt uitgegaan van een laadvermogen van 750 kW aan het schip. Dit betekent voor de aansluiting op het elektriciteitsnet dat deze vermogens in de beschreven frequentie gedurende de hele dag geleverd dienen te worden. Het grote schip zal alleen in Vlissingen opladen en de kleine schepen zullen alleen in Breskens opladen.

De bovenstaande vermogensvraag zit op de grens van wat het middenspanningsnet zou kunnen bieden qua vermogen. Als alternatief zou het hoogspanningsnet zijn. De capaciteitskaart net beheer Nederland [3] geeft, op 17 juni 2025, aan dat het middenspanningsnet voor voedingsgebied Vlissingen een wachtrij heeft van 12.1 MW bestaande uit 17 unieke verzoeken. Voor het voedingsgebied Oostburg betreft de wachtrij 10.7 MW bestaande uit 22 unieke verzoeken. De verwachting is dat de uitbreiding van het middenspanningsnet in 2035 gereed is om aan alle verzoek te voldoen.

Verder geeft de capaciteitskaart net beheer Nederland [3], op 17 juni 2025, aan dat het hoogspanningsnet voor het voedingsgebied Zeeland een wachtrij heeft van 3245 MW bestaande uit 17 unieke verzoeken. De verwachting is dat de uitbreiding van het hoogspanningsnet in 2035 gereed is om aan alle verzoek te voldoen.

Verdere dialoog tussen de Provincie Zeeland en de netbeheerder Stedin stelt dat de laadcapaciteit zoals weergegeven in Tabel 4-1 naar verwachting mogelijk zou moeten zijn.

Tabel 4-1: Laadcapaciteit Vlissingen en Breskens voor batterij-elektrische veren [4]

Operationeel jaar	Jaar	Laadcapaciteit Vlissingen	Laadcapaciteit Breskens
1	2029	0%	0%
2	2030	50%	0%
3	2031	100%	0%
4	2032	100%	0%
5	2033	100%	0%
6	2034	100%	100%
7 en verder	≥2035	100%	100%

Dit betekent dus dat zonder extra maatregelen op het schip dan wel de wal het de eerste jaren naar verwachting niet mogelijk is een deel dan wel de gehele operatie van de veren uit te voeren. Hiermee vormt, indien geen aanvullende maatregelen worden genomen, elektriciteitsnet congestie naar verwachting een risico voor (de eerste jaren van) de operatie.

4.2. Brandgevaar

Met de toepassing van batterijen in plaats van diesel met interne verbrandingsmotoren komen er andere risico's voor ten aanzien van brandgevaar. Met gebruik van batterijen betreft dit thermal runaway. Thermal runaway is een chemische kettingreactie waarbij de temperatuur ongecontroleerd stijgt en leidt tot brand of explosie. De voornaamste oorzaken van thermal runaway zijn fysieke schade aan de batterij, te hoge laad- of ontladstroom, diepe ontlading of overladen, productiefouten of internkortsluiting en hoge omgevingstemperatuur.

Om thermal runaway te voorkomen en indien het alsnog voorkomt de impact te verkleinen zijn er voor batterij toepassingen op schepen meerdere regels waaraan voldaan dient te worden. Dit betreffen zowel regels van klassenbureaus (zoals Bureau Veritas (BV)) als Europese regelgeving voor de binnenvaart (ES-TRIN).

Samengevat zijn er voorgeschreven regels die (onder andere) de functionele eisen bedienen om thermal runaway te voorkomen. Dit betreffen:

- Eigen ruimte (compartiment) voor de batterijen in het schip met vereiste omtrent de locatie en de structurele integriteit (mechanische bescherming).
- De batterij ruimte is voorzien van brandwerende isolatie die de ruimte beschermd van en tegen zijn omliggende ruimtes en omgeving.
- Onafhankelijk ventilatiesysteem voor de batterijruimte en koelsystemen voor de batterijen (temperatuur beheersing).
- Installatie bescherming tegen kortsluiting en hoge stroom beveiliging.
- Batterijmanagementsysteem dat onder andere:
 - Batterijparameters monitort. (Stroomsterkte, temperatuur, laadstatus, etc.)
 - Beveiliging en bescherming biedt. (Voorkomt overladen, diepontlading en oververhitting, detecteert kortsluiting of foutstromen, schakelt automatisch uit dan wel geeft alarmsignalen bij gevaar.)
 - Cellen van de batterij balanceert. (Even veel lading hebben en voorkomt dat een zwakkere cel het hele systeem belemmert.)
 - Ondersteuning foutopsporing en diagnose.
 - Past het laad- of ontladvermogen aan op basis van temperatuur en gezondheid.
- Standaarden en kwaliteitsinspecties voor productie van batterijen.
- Procedures en trainingen voor bemanning wat met batterijen werkt.

Daarnaast zijn er ook aanvullende regels om, indien thermal runaway dan alsnog ontstaat, de gevolgen ervan te beperken. Dit betreffen:

- Gasdetectie- en alarmsysteem (batterij lekkage).
- Branddetectie- (inclusief rook en hitte) en alarmsysteem.
- Brandblusinstallatie voor de batterijruimte (water, CO₂, of ander geschikt medium).
- Compartimentering van cellen in de batterij. Afgesloten compartimenten binnen batterijen voorkomen dat andere cellen in brand vliegen. Ze hebben ieder een aparte uitgang voor de rookgassen.

Verder zijn er ook richtlijnen die aanbevelingen omvatten te aanzien van batterij veiligheid aan boord van schepen. Dit betreft voornamelijk:

- Speciaal brandblus systeem voor lithium-ion batterij branden. Via leidingen wordt er schuim in de batterij gespoten die op het punt staat om in brand te vliegen. Dit zorgt voor directe afkoeling en eventueel vuur wordt meteen gedoofd waardoor escalatie van de brand wordt voorkomen. Het zorgt er ook voor dat de overige batterijen en de rest van het schip en batterijruimten geen schade ondervinden. Dergelijke systemen zijn in staat dusdanig snel en discreet te reageren dat passagiers dit potentieel niet zouden opmerken. De overige batterijdelen en daarmee het schip blijven dus operationeel. Omdat een groot deel van de batterijen bij dergelijk scenario niet beschadigen beperkt dit ook eventuele vervangingskosten. Dergelijke systemen zijn reeds toegepast op meerdere schepen waaronder, jachten, vrachtschepen en veerboten van verschillende afmeting.

In de praktijk zijn er ook reeds vele schepen (meer dan duizend [4]) met lithium-ion batterijen aan boord. Deze bedienen een deel dan wel de volledige energievoorziening en zijn uitgevoerd zowel met als zonder noodgenerator. Zie ook referentieschepen met batterijen [5] [6] [7] [8]. Op basis daarvan kan er worden vastgesteld dat batterij toepassingen op schepen een zeer volwassen techniek is met uitgebreide veiligheidsregels omtrent ontwerp, bouw en operatie. Verder zijn er meerdere leveranciers actief met bijbehorende bewezen staat van dienst [5] [7]. Om dit verder in perspectief te plaatsen zijn de betreffende veiligheidsregels voor schepen strenger dan bijvoorbeeld die van de auto-industrie. Hiermee worden batterij elektrische schepen voldoende veilig geacht, specifiek ook ten aanzien van brandgevaar.

Aanvullend is het zeker het overwegen waard om naast de vereiste maatregelen ook de aanbevelingen toe te passen voor een speciaal brandblus systeem voor lithium-ion batterij branden.

4.3. Elektrisch systeem falen

In elektrische systemen aan boord kunnen storingen voorkomen waardoor het schip minder goed of niet meer kan werken. Hier kunnen verschillende oorzaken aan ten grondslag liggen. Hieronder worden de meeste primaire vormen besproken:

- Software fouten waardoor het aansturingsalgoritme niet meer goed functioneert en hierdoor de operatie beperkt kan worden dan wel volledig uitvallen.
- Storingen op het gelijkstroom (DC) systeem zoals schakelruis (een vorm van elektrische storing die ontstaat door het snel aan- en uitschakelen van elektronische componenten, zoals transistors in omvormers, DC/DC-omzetters, of schakelende voedingen).
- Storingen op het wisselstroom (AC) systeem zoals harmonische vervormingen (veroorzaakt door niet-lineaire belastingen zoals omvormers).

De basis om dergelijke storingen te voorkomen dan wel haar impact te beperken bestaat uit:

- Toepassing van redundantie in het elektrische systeem. Hiermee blijft bij uitval van een component de rest van het systeem operationeel.

Voor de batterij-elektrische veren is redundantie vereist conform regels van klassenbureaus en Europese regelgeving voor de binnenvaart. Dit maakt dat het uitvallen van één component niet leidt tot verlies van voortstuwing of stroomvoorziening. Hierdoor kan het schip dus altijd terug varen naar de haven, zelfs met problemen van een component. Appendix B geeft een voorbeeld van hoe redundantie kan worden gerealiseerd in het elektrische systeem.

Aanvullend geldt ook om dergelijke storingen te voorkomen bestaat ook uit:

- Testen met simulaties en uiteindelijke factory, harbour & sea acceptance tests (FAT, HAT & SAT).
- Gedegen opstelling van elektronische apparatuur met aarding en bescherming tegen trillingen.
- Gedegen kabel routing met nodige afscherming of toepassing van filters om elektromagnetische storingen te voorkomen.

In de praktijk is de algemene ervaring om bovenstaande te waarborgen één leverancier te kiezen, met een bewezen staat van dienst, voor de volledige elektrische integratie. Hierbij is het een mogelijkheid dergelijke eisen om de keuze voor elektrische integrator vast te stellen in het contract met de werf.

Naast batterij-elektrische voortstuwing gebruikt dieselelektrische voortstuwing dezelfde basis die al meer dan 100 jaar wordt toegepast in de maritieme industrie. Hiermee is er door de jaren veel kennis en ervaring opgedaan hoe men betrouwbare elektrische systemen aan boord van schepen realiseert. Met batterij-elektrische voortstuwing wordt enkel de dieselgenerator (en betreffende aansluiting) vervangen met batterijen. De betrouwbare basis van het elektrische systeem blijft daarmee intact.

Met dit alles in acht genomen worden batterij-elektrische veerboten voldoende betrouwbaar geacht en vormen deze geen (extra) risico voor (de continuïteit van) de operatie.

5. VOORSELECTIE VAN ALTERNATIEVEN

In dit hoofdstuk wordt een voorselectie gemaakt van verschillende alternatieven voor energieopwekking voor de hybride opties.

5.1. Duurzame brandstoffen

In Appendix C wordt ingegaan op de meest haalbare duurzame brandstoffen die in het scheepsontwerp toegepast kunnen worden. Andere opties dan in de bijlage meegenomen zijn uitgesloten omdat deze:

- Een te lage technische volwassenheid hebben (zoals ijzerpoeder, natriumboorhydride, vloeibare organische waterstofdragers en microreactoren)
- Niet beter presteren in termen van volumetrische energiedichtheid en productiekosten (zoals mierenzuur)
- Een te beperkte emissie reductie realiseren dan wel een te significante impact hebben op volume, gewicht en energievraag op het schip (zoals carbon capture & storage)

De effectiviteit van de opgeslagen energie aan boord is erg belangrijk voor de toepassing van duurzame brandstoffen voor schepen. Er zijn meerdere indicatoren om deze effectiviteit uit te drukken.

Duurzame brandstoffen worden geproduceerd uit duurzame energie dan wel duurzame (CO₂ neutrale) bio-massa. Echter is duurzame bio-massa beperkt schaalbaar en zijn er naast de maritieme sector ook andere sectoren (zoals luchtvaart) die hier naar verwachting meer voor bereid zijn te betalen. Daarom is de algemene visie voor de maritieme industrie op de langere termijn (2050) dat van de duurzame brandstoffen een beperkt deel bestaat uit bio-brandstoffen en het grootste deel van synthetische productie zal komen (ook wel bekend als e-fuels). Daarom heeft de prijs voor deze brandstoffen een directe relatie met de hoeveelheid energie die nodig is om de brandstof te produceren. De hernieuwbare synthetische productiekosten [MJ/MJ] geeft aan hoeveel duurzame energie er nodig is om 1 Mega Joule van de duurzame brandstof te produceren. Deze indicator is een zeer bepalende factor in brandstofkosten en daarmee de operationele kosten.

Volume voor lading en het maximale beladingsgewicht zijn belangrijke factoren die de winstgevendheid van het schip beïnvloeden. Daarom zijn de energiedichtheid in gewicht en volume met inachtneming van de opslagtanks een belangrijke factor voor de operatie en het ontwerp van het schip. De energiedichtheid zal dus een belangrijke invloed hebben op de investeringskosten van het schip. Daarnaast worden de opslagcondities van de brandstof (temperatuur en druk) ook meegenomen. Verder wordt er ook gekeken naar de impact van vlambaarheid en giftigheid. Gezamenlijk met de opslagcondities hebben deze haar impact op de betreffende systemen en veiligheidsvoorzieningen.

In Appendix C worden een aantal duurzame brandstoffen beschouwd en worden deze gescoord op de verschillende indicatoren voor effectiviteit. Hierin wordt de haalbaarheid van de verschillende opties besproken en wordt ingegaan op de balans tussen volumetrische energiedichtheid en de hernieuwbare productiekosten, en daarmee dus een indicatie van de operationele- en investeringskosten.

5.2. Voorselectie

Op basis van de overwegingen in Appendix C blijven initieel de opties batterijen, waterstof, ammoniak, methanol en HVO100 over. Nader kijkend naar de casus voor de Westerschelde ferry valt ammoniak af vanwege de complexiteit van de opslag en veiligheidsrisico's. Hiermee wordt dit niet geschikt geacht voor passagiersschepen.

Waterstof zou, indien batterijen niet meer technisch haalbaar zijn ten aanzien van de autonomie, de eerst volgende logische keuze zijn. Echter is het bestaande concept reeds haalbaar uitgewerkt op batterijen. Dat maakt dat waterstof, met hogere operationele kosten, een minder kosteneffectieve oplossing is voor deze casus. Daarom valt waterstof dus ook af. Hierbij dient gezegd te worden dat indien de operationele eisen veranderen waterstof het eerste beste alternatief blijft om de autonomie te vergroten.

Een vergelijkbare overweging geldt voor methanol ten opzichte van waterstof. Methanol is het eerste beste alternatief na waterstof voor verdere vergroting van de autonomie maar zal dus hogere operationele kosten hebben. Gezien het bestaande concept reeds haalbaar is uitgewerkt op batterijen valt methanol dus ook af.

Op basis van deze analyse blijven dan batterijen en HVO100 over. Batterijen zijn de basiskeuze zoals toegepast in de basisoptie. HVO100 is een geschikt duurzaam alternatief waar nu fossiele diesel wordt gebruikt zonder extra investeringskosten. Dit maakt HVO100 niet alleen het (andere) duurzame alternatief voor de hybride vloot maar ook voor alle andere hybride opties. Echter gezien de analyse van schadelijke emissies zich dient te beperken tot de 'tank-to-propeller' emissies, conform de wens van Provincie Zeeland, is de reductie in broeikasgassen, die met HVO100 bereikt kan worden (well-to-propeller), niet zichtbaar. Daarmee zou HVO100 formeel ook afvallen binnen de scope van dit onderzoek. Echter gezien HVO100 wel degelijk een duurzamere oplossing is dan fossiele diesel vanuit een well-to-propeller perspectief, zonder extra investeringskosten, is er een separaat hoofdstuk opgesteld dat dit omschrijft. Zie hiervoor hoofdstuk 8.

Een samengevat overzicht van bovenstaande analyse is te vinden in Appendix C10. Appendix C

Tabel 5-1: Overzicht voorselectie van alternatieven

Duurzame energiedrager	Samenvatting voorselectie analyse
Batterijen	Kosten effectieve oplossing (voor schepen die weinig bereik vereisen).
Waterstof	Hogere operationele kosten dan batterijen. (Indien batterijen niet meer technisch haalbaar zijn ten aanzien van de autonomie, de eerst volgende logische keuze zijn.)
Ammoniak	Niet geschikt vanwege complexiteit van opslag aan boord en veiligheidsrisico's. (Vooral geschikt voor grote zeegaande vrachtschepen.)
Methanol	Hogere operationele kosten dan waterstof. (Indien waterstof niet meer technisch haalbaar zijn ten aanzien van de autonomie, de eerst volgende logische keuze zijn.)
Ethanol	Niet geschikt vanwege hogere brandstofkosten dan methanol met zeer beperkte toename van volumetrische energiedichtheid.
Methaan	Niet geschikt vanwege lagere volumetrische energiedichtheid dan methanol met vergelijkbare brandstofkosten. Verder ook hogere investeringskosten dan methanol en problemen met methaanslip.
Synthetische Diesel	Niet geschikt vanwege significant hogere brandstofkosten dan methanol in vergelijking met toename van volumetrische energiedichtheid.
HVO100	Geschikt duurzaam alternatief waar nu fossiele diesel wordt gebruikt zonder extra investeringskosten. (Beperkt schaalbaar voor de maritieme industrie.)

6. HYBRIDE OPTIES

In dit hoofdstuk wordt verder ingegaan op hybride energievoorzieningsmogelijkheden voor de Westerschelde ferry. Hybridisering kan namelijk een manier zijn om de operationele risico's die beschreven worden in hoofdstuk 4 (deels) op te lossen. Een hybride concept kan worden toegepast op de grote veerboot of op de kleinere, snellere veerboten. Voor beide schepen zal hybridisering een verschillende impact op het scheepsontwerp hebben.

Een andere manier van hybridisering is door het toepassen van een 'hybride' vloot; waarbij een deel van de vloot wel door diesel wordt aangedreven en een ander deel batterij-elektrisch is.

Wat verder erg van belang is, is het doel van de hybridisering: moet er volledig op het accupakket gevaren kunnen worden? Is er sprake van plug-in hybride en dus een walstroomvoorziening? Is er enkel accucapaciteit nodig om piekvermogens op te vangen en hiermee de hoofdennergievoorziening kleiner te kunnen dimensioneren? Al deze overwegingen hebben invloed op de prestaties van de concepten en de kosten die aan de systemen verbonden zijn.

Uit de gesprekken met de Provincie Zeeland blijkt dat de hybride oplossingen enkel worden ingezet wanneer batterij-elektrisch varen niet mogelijk is. In dit geval zal het schip voor één dag operatie moeten kunnen voorzien door middel van diesel.

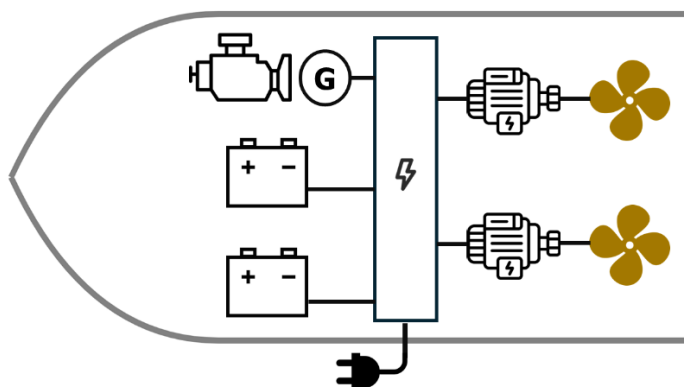
Hybridisering door een klein accupakket wat enkel gebruikt wordt om piekvermogens op te vangen is uitgesloten in de voorgestelde alternatieven, aangezien het schip volledig batterij-elektrisch dient te varen.

Voor de hybride concepten betekent dit dat er gekeken zal worden naar verschillende concepten die plug-in hybride zijn en dus walstroomaansluiting hebben, en daarnaast in staat zijn om met diesel als energiebron de operatie voor minimaal één dag over te nemen.

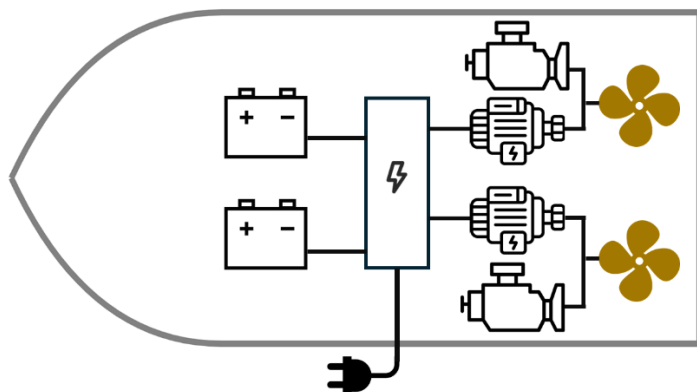
Ten slotte wordt ook bekeken hoe de walstroomvoorziening gehybridiseerd kan worden, om ervoor te zorgen dat walstroom altijd beschikbaar is.

6.1. Hybride schepen

Een manier om een betrouwbare dienstregeling altijd te kunnen garanderen, is door het toepassen van een hybride voorstuwingsconcept op de schepen. Dit zorgt ervoor dat wanneer er geen elektriciteit beschikbaar is, het schip door op brandstof te varen de veerverbinding kan voortzetten. Het implementeren van een brandstofsysteem wat de energie voor de aandrijving verzorgt kan grofweg op twee verschillende manieren. De twee manieren van toepassing op de aandrijflijn zijn schematisch weergegeven in Figuur 6-1 en Figuur 6-2.



Figuur 6-1: Overzicht aandrijflijn Batterij Diesel-Elektrisch schip



Figuur 6-2: Overzicht aandrijflijn Diesel-direct schip met Power Take In

De principes verschillen in de wijze waarop de dieselmotor de energie doorgeeft aan de schroef. In een batterij diesel-elektrische aandrijflijn, zoals weergegeven in Figuur 6-1, drijft de dieselmotor een generator aan, die het hoofdschakelbord van elektrische energie voorziet, welke vervolgens via een elektromotor wordt doorgegeven aan de schroefas.

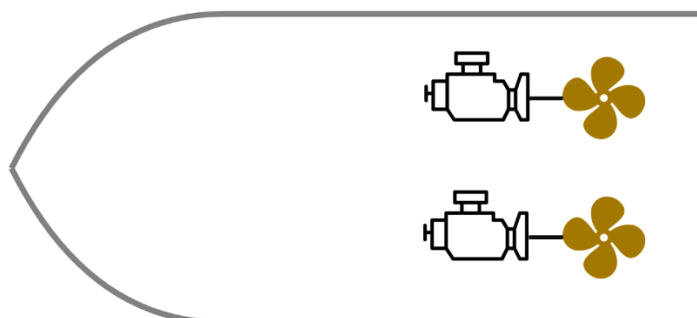
Voor een diesel directe aandrijving met Power-Take-in, weergegeven in Figuur 6-2, drijft de dieselmotor de schroefas 'direct' aan. In dit geval zit er een tandwielkast tussen die de input van twee ingaande assen combineert naar de schroefas. Door deze configuratie is het mogelijk ook via de batterijen en de elektromotor de schroefas van vermogen te voorzien. De tandwielkast kan schakelen in welke voorziening er gebruikt wordt om de schroefas aan te sturen.

De bovenstaande aandrijflijnen zijn in meer detail en met de aangenomen rendementen opgenomen in Appendix A.

6.2. Hybride vloot

Een andere manier om een continue dienstregeling te garanderen is om niet alle schepen te hybridiseren, maar om de vloot dusdanig te ontwerpen dat in het geval van het niet beschikbaar zijn van elektriciteit er nog steeds gevaren kan worden. Dit kan door één van de schepen onafhankelijk van elektriciteit, en dus aangedreven op diesel te maken.

Met één groot schip en twee kleine schepen zijn hiervoor meerdere configuraties mogelijk. Echter ligt het meeste voor de hand om het grote schip onafhankelijk te maken van elektriciteit, zodat er nog zoveel mogelijk passagiers vervoerd kunnen worden wanneer er geen walstroom beschikbaar is.



Figuur 6-3: Overzicht aandrijflijn Diesel-direct groot schip

In het geval van een hybride vloot zal dan dus het grote schip diesel-directe aandrijving hebben, zoals weergegeven in Figuur 6-3, en de twee kleine schepen zullen identiek zijn aan de basisoptie en dus batterij-elektrisch zijn.

Een belangrijke concessie die hiermee gedaan wordt is dat de voorgestelde dienstregeling niet gevaren kan worden in het geval van geen beschikbaarheid van walstroom. Het grote schip kan weliswaar de passagiers vervoeren, maar doet hier langer over dan een klein schip. In het hoog- en middenseizoen zal daarnaast het beoogde aantal passagiers per uur niet behaald kunnen worden.

6.3. Hybride walstroom infrastructuur

In deze paragraaf wordt ingegaan op mogelijkheden om de walstroom infrastructuur te hybridiseren. Er wordt naar deze opties gekeken om te garanderen dat de veren altijd opgeladen kunnen worden, en zullen dus altijd bekeken worden in combinatie met batterij-elektrische veren. Er wordt beperkt tot een drietal aanvullingen op een standaard walstroom infrastructuur:

6.3.1. Walgenerator

Een aanvulling die ervoor zorgt dat de veren altijd van stroom kunnen worden voorzien is door een diesel-generator aan de wal te hebben die voldoende vermogen kan leveren om de schepen in Vlissingen en in Breskens op te laden. Voor dit alternatief wordt uitgegaan van een tweetal generatoren, één in beide havens. Zoals beschreven in [1], wordt in Vlissingen een oplaadvermogen van 1500 kW verwacht en in Breskens een vermogen van 750 kW. In hoofdstuk 7 wordt verder ingegaan op de technische overwegingen, aannames en kosten die verbonden zijn aan het toepassen van een vaste generator aan de wal.

6.3.2. Walbatterij

Een andere oplossing die ervoor zorgt dat de veren altijd van stroom kunnen worden voorzien is door een batterij aan wal toe te passen die de veren kan voorzien van stroom. Deze batterij zal, net als in het geval van een generator, in beide havens worden toegepast, omdat de beide types veren allebei in verschillende havens laden. Door de capaciteit van de batterij dusdanig te dimensioneren, kan de batterij ervoor zorgen dat de schepen geladen kunnen worden wanneer er geen stroom van het elektriciteitsnet gebruikt kan worden, en dat de walbatterij opgeladen kan worden wanneer deze stroom wel beschikbaar is. In hoofdstuk 7 wordt verder ingegaan op de technische overwegingen, aannames en kosten die verbonden zijn aan het toepassen van een walbatterij.

6.3.3. Walbatterij + Zonnepanelen/Windturbines

Een aanvulling op de walbatterij is het toevoegen van zonnepanelen ofwel windturbines, die de walbatterij kunnen opladen met directe duurzame energie. Dit zou een goede directe toepassing kunnen zijn om de veren te laden met zonne- of windenergie wanneer de walbatterij hier de capaciteit voor heeft.

Echter is er om een aantal redenen gekozen deze opties niet mee te nemen in verdere analyse, waarbij de belangrijkste zijn:

- Niet voldoende beschikbare ruimte. Uitgaande van een oppervlakte van 500 m² aan zonnepanelen, kunnen deze slechts 1.2%¹ van de dagelijkse energiebehoefte in het

¹ Deze berekening is gebaseerd op een energieopwekking van 0.33 kWh per m² zonnepaneel per dag. In het hoogseizoen is er een totale dagelijkse energiebehoefte van 13.5 MWh. Hiermee wekken de zonnepanelen $500 \times 0.33 / 13500 \times 100\% = 1.2\%$ van de dagelijkse energiebehoefte op.

hoogseizoen leveren. Bij zowel de haven van Vlissingen als de haven van Breskens lijkt de totaal beschikbare oppervlakte voor zonnepanelen niet toereikend om een merkbaar aandeel te hebben in het voorzien van capaciteit van de walbatterij.

- Geen toereikend aandeel in de dagelijkse energievoorziening. Uitgaande van tien kleine windturbines met een continu uitgangsvermogen van elk 6 kW, zouden deze alsnog slechts 11% van de dagelijkse energiebehoefte in het hoogseizoen kunnen leveren. De rest van de energie zou dan alsnog van het elektriciteitsnet komen.
- De investeringskosten wegen niet op tegen de energiebesparing. De zonne-energie die opgewekt zou worden met de zonnepanelen scheelt energie die ingekocht moet worden van de energieleverancier. Dit zou op de lange termijn een kostenbesparing kunnen zijn. Desondanks lijkt met de beperkte hoeveelheid zonnepanelen of windturbines en de investerings- en installatiekosten die hiermee gepaard zijn dit voor het huidige gebruiksprofiel niet rendabel.

6.4. Overzicht hybride alternatieven

In Tabel 6-1 wordt een overzicht gegeven voor de gepresenteerde hybride alternatieven uit dit hoofdstuk. Met de letters wordt aangegeven over welke optie het gaat en in hoofdstuk 7 zal hiermee naar de alternatieven gerefereerd worden.

Tabel 6-1: Overzicht hybride alternatieven

Opties	Groot schip	Klein schip	Walstroom alternatief
Basisoptie	Batterij-Elektrisch	Batterij-Elektrisch	-
Optie A	Batterij Diesel-Elektrisch	Batterij Diesel-Elektrisch	-
Optie B	Diesel-Direct + PTI	Diesel-Direct + PTI	-
Optie C	Diesel Direct	Batterij-Elektrisch	-
Optie D	Batterij-Elektrisch	Batterij-Elektrisch	Walgenerator

7. ANALYSE HYBRIDE OPTIES

In dit hoofdstuk worden de voorgestelde hybride opties, zoals beschreven in hoofdstuk 6, vergeleken en getoetst op verschillende gebieden. Deze drie gebieden waar de alternatieven op vergeleken worden zijn opgesplitst in de volgende drie paragrafen.

7.1. Technisch ontwerp

Voor de analyse van het technisch ontwerp worden de hybride alternatieven per alternatief behandeld. Er zal ingegaan worden op de benodigde extra componenten, de invloed op het scheepsonwerp en de invloed op het rendement en daarmee de prestaties van de concepten.

7.1.1. Optie A: Batterij Diesel-Elektrische veren

Voor de batterij diesel-elektrische veren zoals beschreven in paragraaf 6.1, wordt een dieselgenerator toegevoegd die aangesloten is op het hoofdschakelbord. Het idee is dat deze dieselgenerator de volledige vermogensvoorziening over kan nemen wanneer de batterijen dit niet kunnen. Dit betekent dat de dieselgenerator in staat moet zijn om het maximale uitgangsvermogen van de batterijen te leveren. In hoofdstuk 3 is geschat dat dit respectievelijk 841 kW en 1250 kW is voor het kleine en grote schip. Met de aangenomen rendementen uit Appendix A, betekent dit dat er een uitgangsvermogen van de dieselgenerator nodig is van respectievelijk 836 kW en 1243 kW.

Op basis van data van producenten, kan een schatting gemaakt worden van de massa van een dergelijke dieselgenerator. De massa voor de extra systemen (koeling, uitlaatgas, schakelborden) die nodig zijn voor de dieselgenerator is eveneens ingeschat. Ook zal het hoofdschakelbord zwaarder worden door het aansluiten van de dieselgenerator. Verder is aangenomen dat de schepen voor een volledige dag in het hoogseizoen de dienstregeling moeten overnemen. Met behulp van de inschattingen uit hoofdstuk 3 en het rendement van de dieselgenerator, kan ook worden ingeschat hoeveel massa aan diesel er hiervoor nodig is. Een overzicht van deze extra massa is weergegeven in Tabel 7-1.

Tabel 7-1: Overzicht extra massa Optie A

Extra massa in ton	Groot Schip	Klein Schip
Diesel Generator	7.7	5.7
Diesel	1.0	1.0
Extra constructie	0.5	0.5
Extra systemen	0.4	0.3
Extra batterijen	0.8	0.7
Extra elektrische componenten	0.7	0.5
Totaal	11.1	8.8
Oorspronkelijke massa	150.0	45.1
Relatieve toename massa [%]	7%	19%

De extra massa heeft invloed op de weerstand van het concept, deze neemt hiermee gemiddeld genomen zo'n 5% en 13% toe voor het grote en het kleine schip respectievelijk. Hierdoor is er meer vermogen nodig en is een grotere elektromotor nodig. Door uit te gaan van de relatie tussen massa van het schip en vermogen kan een inschatting gemaakt worden van dit extra vermogen. Dit extra vermogen is ingeschat voor het grote en kleine schip en heeft hiermee ook invloed op het elektriciteitsverbruik. Om de ontladingsdiepte van de batterijen hetzelfde te houden en ervoor te zorgen dat het bereik hetzelfde blijft als in de basisoptie, is er extra capaciteit van

batterijen nodig door de toename van benodigd vermogen. De extra massa van de batterijen is ook opgenomen in Tabel 7-1.

Door het toevoegen van de generatorset is er een hogere mate van redundantie. Wel zal het ervoor zorgen dat er meer componenten zijn waarop de kans van systeemfalen kan toenemen. Zoals besproken in hoofdstuk 4 kan er door een slimme indeling van het systeem voorkomen worden dat een enkel componentfalen voor het niet werken van de voortstuwing zorgt. Verder heeft het toepassen van de dieselgenerator een grote invloed op de indeling van het schip. Er zal meer ruimte nodig zijn voor de generator en de systemen die hierbij horen, denk bijvoorbeeld aan de uitlaatgas pijpen en de dieselleidingen. Hierdoor zullen de schepen groter moeten worden dan nu aangenomen in de basisoptie. Daarnaast zorgt het toevoegen van een brandstoftank voor een verschil in belading bij verschillende brandstofniveaus, hier zal in het ontwerp meer rekening mee gehouden moeten worden om de invloed op de trimligging van het schip zoveel mogelijk te beperken.

7.1.2. Optie B: Diesel-Directe veren met Power-Take-In

Voor de diesel-directe veren zoals beschreven in hoofdstuk 6, wordt een dieselmotor toegevoegd die aangesloten is op de tandwielkast. De tandwielkast is er een van het type dat een dubbele input kan krijgen; één van de elektromotor, dus gevoed vanaf de batterijen, en één vanaf de dieselmotor. Hiermee kan de dieselmotor de volledige vermogensvoorziening over nemen wanneer de batterijen dit niet kunnen. Met de aangenomen rendementen uit Appendix A, betekent dit dat er een uitgangsvermogen van de dieselgenerator nodig is van respectievelijk 779 kW en 1158 kW.

Op basis van data van producenten, kan een schatting gemaakt worden van de massa van een dergelijke dieselmotor. De massa voor de extra systemen (koeling, uitlaatgas, schakelborden) die nodig zijn voor de dieselgenerator is eveneens ingeschat. Ook zal de tandwielkast groter en complexer worden door het aansluiten van de dieselmotor. Verder is aangenomen dat de schepen voor een volledige dag in het hoogseizoen de dienstregeling moeten overnemen. Met behulp van de inschattingen uit hoofdstuk 3 en het rendement van de dieselmotor, kan ook worden ingeschat hoeveel massa aan diesel er hiervoor nodig is. Een overzicht van deze extra massa is weergegeven in Tabel 7-2.

Tabel 7-2: Overzicht extra massa Optie B

Extra massa in ton	Groot Schip	Klein Schip
Dieselmotor	5.7	4.2
Diesel	0.9	0.9
Tandwielkast	2.3	1.6
Extra constructie	0.5	0.5
Extra batterijen	0.7	0.7
Extra systemen	0.4	0.3
Totaal	10.5	8.1
Oorspronkelijke massa	150.0	45.1
Relatieve toename massa [%]	7%	18%

De extra massa heeft invloed op de weerstand van het concept, deze neemt hiermee gemiddeld genomen zo'n 5% en 12% toe voor het grote en het kleine schip respectievelijk. Hierdoor is er meer vermogen en dus een grotere elektromotor nodig. Door uit te gaan van de relatie tussen

massa van het schip en vermogen kan een inschatting gemaakt worden van dit extra vermogen. Dit extra vermogen is ingeschat voor het grote en kleine schip en heeft hiermee ook invloed op het elektriciteitsverbruik. Om de ontladingsdiepte van de batterijen hetzelfde te houden en ervoor te zorgen dat het bereik hetzelfde blijft als in de basisoptie, is er extra capaciteit van batterijen nodig door de toename van benodigd vermogen. De extra massa van de batterijen is ook opgenomen in Tabel 7-2.

De invloed op het scheepsontwerp door het toepassen van een diesel-directe aandrijving is erg groot. De dieselmotor, elektromotor en tandwielkast moeten namelijk dusdanig geplaatst worden in het schip dat een mechanische verbinding mogelijk is. Dit zorgt voor een complexere indeling met minder vrijheid om tot een optimaal ontwerp te komen. Ook hier zorgt het toevoegen van een brandstoftanks voor een verschil in belading bij verschillende brandstofniveaus, hier zal in het ontwerp meer rekening mee gehouden moeten worden om de invloed op de trimligging van het schip zoveel mogelijk te beperken.

Daarnaast zorgt de complexere tandwielkast voor meer onderhoud, en wordt het een kritiekere schakel in de voortstuwing met meer kans op falen. Doordat de schepen met een dubbele schroef worden uitgevoerd zal het falen van de tandwielkast niet leiden tot het niet meer kunnen varen, maar kan er niet meer met dezelfde snelheden gevaren worden.

7.1.3. Optie C: Diesel-Direct groot schip

Voor dit alternatief wordt het grote schip uitgevoerd als een diesel-direct aangedreven schip in plaats van batterij-elektrisch. Hiermee komt het volledige elektrische systeem te vervallen, blijft enkel de tandwielkast staan en wordt hier een dieselmotor op aangesloten. Hiermee wordt het schip een stuk lichter, met name door het wegvallen van het zware accupakket. Een overzicht van de totale veranderingen in het gewicht van het schip is gegeven in Tabel 7-3.

Tabel 7-3: Overzicht massaverandering Optie C

Verandering componenten	Massa verandering [ton]
Dieselmotor	4.6
Diesel + tanks	1.8
Extra systemen	0.4
Batterijpakket	-15.6
Elektrisch systeem	-0.7
Elektromotoren	-2.1
Totaal	-11.7
Oorspronkelijke massa	150.0
Relatieve afname massa [%]	-8%

Deze afname van gewicht zorgt voor een vermindering in het benodigde vermogen van gemiddeld 5% en daarmee dus ook het verbruik van het schip.

De invloed op het scheepsontwerp door het toepassen van diesel-directe voortstuwing op het grote schip is dat het de voortstuwingslijn simpeler maakt. Wel moet het schip dusdanig ontworpen worden dat er een mechanische overbrenging tussen de dieselmotor en de schroef kan zijn. Dit zorgt voor minder ontwerpvrijheid en een mogelijk minder optimale indeling dan een batterij diesel-elektrische variant. Doordat een groot aantal componenten wegvalt bij deze optie

zal er in het ontwerp relatief meer ruimte ontstaan, hierdoor zou het mogelijk kunnen zijn dat de afmetingen van het grote schip afnemen ten opzichte van de basisoptie.

7.1.4. Optie D: Alternatief walstroomvoorziening

In deze paragraaf worden mogelijke alternatieven voor een walstroomvoorziening via het elektriciteitsnet besproken. Dit komt voort uit de verwachte problematiek rondom netcongestie, waardoor er gekeken moet worden naar oplossingen die ervoor zorgen dat de batterij-elektrische schepen ten alle tijden kunnen laden.

Als alternatief voor walstroom worden zowel een batterij pakket als een generator set op de kant overwogen. Als eerste wordt er naar een batterij pakket als walstroom alternatief gekeken.

In het hoogseizoen gebruikt de gehele vloot maximaal 13.5 MWh per dag. Het geïnstalleerd vermogen van de batterij met een maximale DoD van 80% zou dan 16.9 MWh zijn. Deze batterij zal zowel tijdens als na de dienstregeling continu opladen. Tijdens de dienstregeling zal de batterij langzaam ontladen aangezien de veerboten meer energie uit de batterij wegnemen dan dat de net aansluiting kan bijladen. 's Nachts wordt er geen energie uit de batterij genomen en zal deze weer langzaam naar 100% opgeladen worden. Om deze batterij van voldoende energie te voorzien is er dan een net aansluiting met een vermogen van 702 kW nodig.

De aanschaf kosten van deze batterij worden geschat op vijf miljoen euro, dit is exclusief de lokale infrastructuur die nodig is om de batterijen op te slaan en de stroom te verdelen. Dit grote bedrag is een direct resultaat van de grote benodigde capaciteit van de walbatterij, gezien deze alle schepen van stroom moet kunnen voorzien gedurende een hele dag. De elektriciteitsnet aansluiting op de huidige locatie heeft een maximaal vermogen van 150 kW. Omdat de huidige elektriciteitsnet aansluiting onvoldoende capaciteit heeft, en omdat de kosten van de batterijen zeer hoog zijn, wordt een batterij pakket als walstroom alternatief als onhaalbaar beschouwd.

De tweede optie is het plaatsen van generatoren op de kant bij Vlissingen. Er wordt hier enkel voor Vlissingen gekozen, gezien hier een dieselvoorziening reeds beschikbaar is. Deze generatoren zullen de eerste twee jaar alle elektriciteit leveren om het schip op te laden. Daarna is er een net aansluiting met voldoende capaciteit beschikbaar om de schepen op te laden.

In de dienstregeling laden er maximaal één klein schip en het grote schip tegelijk. Hiervoor is een laadvermogen van 2250 kW nodig. De generatoren op de kant zullen een gezamenlijk elektrisch vermogen van minimaal 2250 kW moeten kunnen leveren. In Vlissingen is al een brandstof opslag aanwezig voor de huidige schepen, deze brandstof opslag kan gebruikt worden voor de generatoren.

Aangezien de huidige verwachting is dat de generatoren slechts voor twee jaar nodig zijn, is er gekozen om deze te huren. De kosten voor het huren van twee 1500 kVA container aggregaten zijn ongeveer €1500 per dag exclusief de brandstofkosten [9], [10]. Na twee jaar worden de containers weer opgehaald door de verhuurder, dit heeft als gevolg dat er dan geen back-up meer beschikbaar is wanneer de stroom uitvalt.

Er kan ook onderzocht worden of het aanschaffen van walgeneratoren financieel een betere optie is. In dit onderzoek is vanwege de korte termijn waarop de generator nodig is ervoor gekozen te beperken tot het huren van walgeneratoren.

7.2. Emissies

In deze paragraaf wordt de invloed op emissies door het gebruik van hybride alternatieven besproken. De emissies waarnaar gekeken wordt zijn NO_x, PM, BC, N₂O en CO₂. Door het

toepassen van emissiefactoren kan er vanuit het diesilverbruik een schatting gemaakt worden van de vrijgekomen emissies.

Allereerst wordt een aanname gedaan over het aantal dagen dat er door de hybride concepten op diesel wordt gevaren ten gevolge van het niet beschikbaar zijn van elektriciteit in de eerste twee jaar van operatie. Voor de jaren 2-25 geldt dat aangenomen is dat voor opties A en B er in totaal drie dagen gevaren wordt op diesel, om de dieselsystemen functioneel te houden. Het aantal dagen per jaar is weergegeven in Tabel 7-4.

Tabel 7-4: Aanname dagen met downtime gedurende operatie

Jaar van operatie	Aantal dagen diesel per jaar
0 – 1	365
1 – 2	188
2 – 25	3

Met deze aanname wordt het diesilverbruik per jaar voor de concepten als weergegeven in Tabel 7-5. Hierin is rekening gehouden met een toename in verbruik door een toegenomen gewicht van de hybride schepen die extra componenten hebben.

Tabel 7-5: Verbruik diesel gedurende de operatieduur

Jaar	Optie A		Optie B		Optie C	Optie D
	Diesilverbruik kleine schepen [m³]	Diesilverbruik groot schip [m³]	Diesilverbruik kleine schepen [m³]	Diesilverbruik groot schip [m³]	Diesilverbruik groot schip [m³]	Diesilverbruik generator [m³]
0-1	984	246	796	200	174	1168
1-2	507	127	410	103	174	602
2-25	186	47	150	38	4002	0

De emissies kunnen uitgerekend worden aan de hand van hoeveel brandstof er verbruikt is door de schepen. Naast CO₂ zijn N₂O en Black Carbon (BC) ook broeikasgassen. Om een eerlijke vergelijking tussen de drie opties te maken moeten deze broeikasgassen ook meegenomen worden in de vergelijking.

Daarvoor kan de Global Warming Potential (GWP) gebruikt worden. GWP is een maat voor hoe sterk een broeikasgas bijdraagt aan de opwarming van de aarde in vergelijking met CO₂ over een periode van 100 jaar. CO₂ heeft een GWP van 1, terwijl andere gassen, zoals methaan (CH₄) en lachgas (N₂O), een veel hoger GWP kunnen hebben. Om de CO₂-equivalent (CO₂-eq) van een gas te berekenen, vermenigvuldigt je de uitgestoten hoeveelheid van dat gas (in kilogrammen of tonnen) met de GWP-waarde ervan. Bijvoorbeeld, als 1 kg N₂O wordt uitgestoten en de GWP van N₂O is 265, dan bedraagt de CO₂-eq 265 kg.

Tabel 7-6: GWP factoren broeikasgassen

	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	BC
GWP factors	1	265	28	900

Met behulp van de GWP factoren weergegeven in Tabel 7-6 zijn de CO₂-equivalent emissies voor de drie hybride alternatieven berekend. Ervan uitgaande dat de geïnstalleerde motoren aan de Europese stage V norm voldoen is de uitstoot per optie per jaar uitgerekend. Er wordt

onderscheid gemaakt tussen broeikasgassen en emissies van (lokale) luchtvervuiling zoals fijnstof (PM) en stikstof (NO_x). De resultaten zijn weergegeven in Tabel 7-7 en Tabel 7-8.

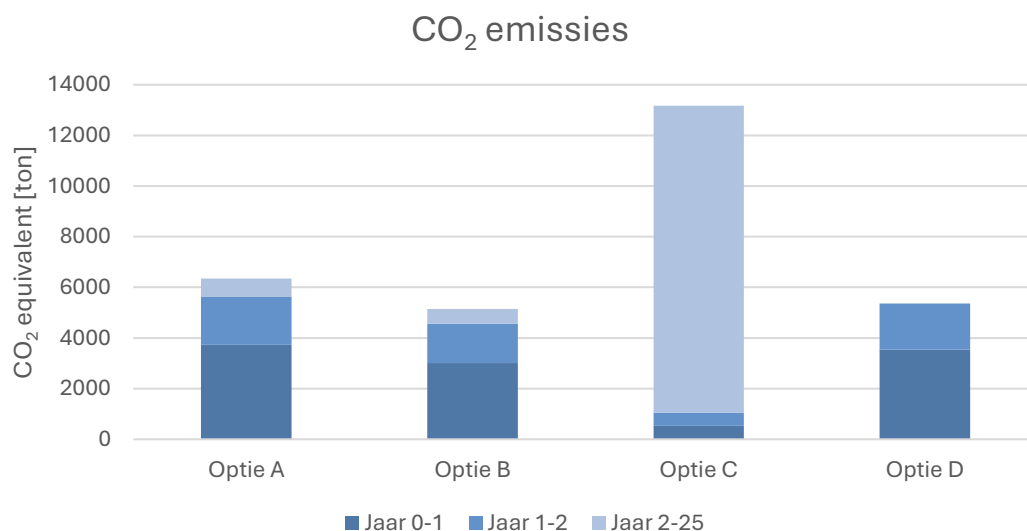
Tabel 7-7: Geschatte broeikas emissies per schip

Jaar	Emissie type	Optie A		Optie B		Optie C	Optie D
		Uitstoot kleine schepen [ton]	Uitstoot groot schip [ton]	Uitstoot kleine schepen [ton]	Uitstoot groot schip [ton]	Uitstoot groot schip [ton]	Uitstoot generator [ton]
0-25	CO ₂	4408	1103	3564	897	11435	4653
	N ₂ O	0.247	0.062	0.200	0.050	0.642	0.261
	BC	0.672	0.168	0.544	0.137	1.744	0.710
	CO ₂ -eq	5079	1270	4106	1033	13174	5361
Totaal	CO ₂ -eq	6349		5140		13174	5361

Tabel 7-8 Geschatte luchtvervuiling emissies per optie

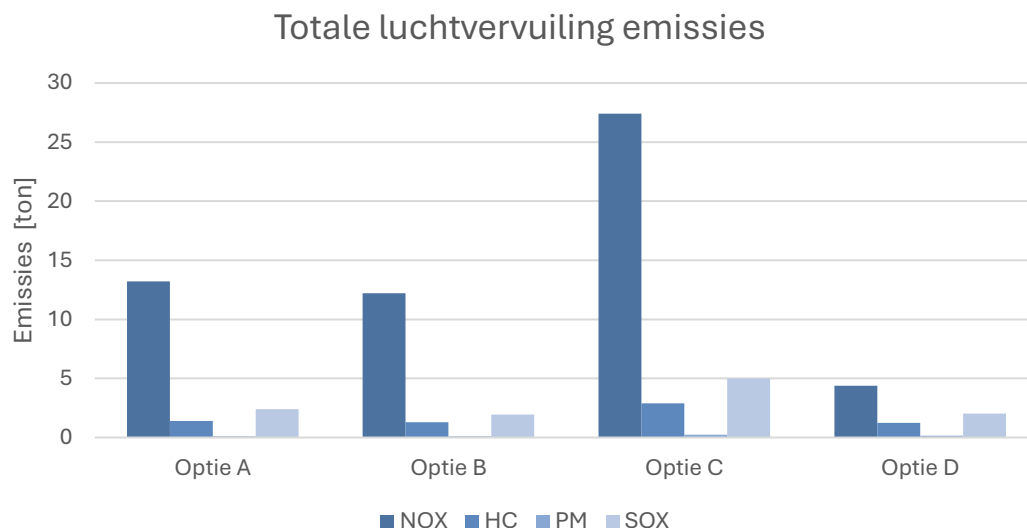
Jaar	Emissie type	Uitstoot optie A [ton]	Uitstoot optie B [ton]	Uitstoot optie C [ton]	Uitstoot optie D [ton]
0-25	NO _x	13.21	12.22	27.40	4.39
	HC	1.39	1.29	2.89	1.24
	PM	0.11	0.10	0.23	0.14
	SO _x	2.41	1.95	4.99	2.03

Figuur 7-1 geeft een vergelijking tussen de CO₂-equivalent emissies van de drie hybride alternatieven.



Figuur 7-1: Vergelijking van CO₂ emissies verschillende hybride opties

Uit Figuur 7-1 blijkt dat optie B de minste broeikasgassen uitstoot, met weinig verschil tot de tweede beste optie, optie D. Optie C is op de korte termijn (0-2 jaar) een goede oplossing, echter blijkt dat op een levensduur van 25 jaar optie C bijna twee keer zoveel broeikasgassen uitstoot als optie B en C. Daarom wordt op basis van de CO₂-equivalent emissies en de luchtvervuiling emissies optie B of optie D aanbevolen.



Figuur 7-2: Vergelijking luchtvervuiling emissies verschillende hybride opties

Uit Figuur 7-2 blijkt dat optie D de minste luchtvervuiling emissies heeft, met vooral een groot verschil in de uitstoot van NO_x-emissies. Dit onderzoek gebruikt NO_x uitstoot op basis wat er réglementair maximaal mag worden uitgestoten. De eisen voor walinstallaties zijn strenger dan voor schepen. Op basis daarvan is er dus minder NO_x uitstoot voor optie D. Het zou mogelijk kunnen zijn dat schepen met DeNO_x (SCR) installaties minder uitstoten dan het maximale limiet. Dit is afhankelijk van de installatie en valt buiten de scope van dit onderzoek.

7.3. Kosten analyse

In deze paragraaf wordt voor de voorgestelde opties de financiële impact beschouwd. Er wordt gekeken naar de totale kosten van eigenaarschap (TKE) en er wordt enkel gekeken naar het verschil in kosten ten opzichte van de basisoptie beschreven in hoofdstuk 3. De kosten zijn theoretisch ingeschat, in de praktijk kan het voorkomen dat deze hoger of lager uitvallen, dit geldt met name voor operationele kosten zoals de onderhoudskosten. Per paragraaf wordt ingegaan op één van de opties.

Deze paragraaf heeft als doel een relatieve kosten schatting tussen de varianten aan te geven, en representeert geen absolute bepaling van CAPEX of OPEX voor budgetteringsdoeleinden. De onzekerheid in het technische ontwerp in deze fase bedraagt 10-20%. Dit in combinatie met prijsonzekerheid leidt dit tot een typische bandbreedte van +/- 50% op de CAPEX- en OPEX-indicaties.

De aannames die ten grondslag liggen aan de kostenschattingen zijn opgenomen in Appendix D.

7.3.1. Optie A: Batterij Diesel-Elektrische veren

De extra kosten voor de batterij diesel-elektrische veren bestaan uit extra kosten voor het ontwerp en de bouw van de schepen ten opzichte van de batterij-elektrische variant, omdat deze door de extra systemen complexer zijn. Ook zijn er extra kosten voor de generatorset en extra kosten die nodig zijn voor het grotere benodigde vermogen van de elektromotor en batterijpakket door de toename van de massa. Er is een zwaardere elektriciteitsnet aansluiting nodig dan aangenomen in de basisoptie, in paragraaf 7.5.1 wordt hier verder op ingegaan. Daarnaast komen de jaarlijkse extra operationele kosten voort uit de onderhoudskosten van de

generatorset, de kosten voor diesel en de extra kosten voortkomend uit het extra energiegebruik, wederom door de toegenomen massa. Een overzicht van deze kosten is weergegeven in Tabel 7-9.

Tabel 7-9: Overzicht verandering in kosten Optie A

Verandering in kosten in € x 1000	Groot Schip	Klein Schip
<i>Investeringskosten complexere bouw en ontwerp schip</i>	425.0	200.0
<i>Investeringskosten generatorset</i>	586.4	423.4
<i>Investeringskosten extra vermogen elektromotoren</i>	18.2	31.5
<i>Investeringskosten extra capaciteit batterijen</i>	63.5	61.2
Totaal extra investeringskosten	1093.1	716.1
<i>Investeringskosten extra zware net aansluiting (zie 7.5.1)</i>	827.8	
<i>Operationele kosten onderhoud generatorset per jaar</i>	29.3	21.2
<i>Operationele kosten extra elektriciteit per jaar</i>	5.9	28.2
Onderstaande waarden gaan uit van één jaar operatie op diesel in plaats van elektriciteit		
<i>Operationele kosten elektriciteit per jaar</i>	-127.0	-253.9
<i>Operationele kosten brandstof per jaar</i>	184.6	369.0
Totaal extra operationele kosten per jaar	92.8	164.4

Met behulp van de kosten uit Tabel 7-9 en de ingeschatte downtime in Tabel 7-4 kan een inschatting gemaakt worden van de TKE voor deze optie. Het verloop van de TKE ten opzichte van de basisoptie over de operatieduur wordt gepresenteerd in paragraaf 7.3.5.

7.3.2. Optie B: Diesel-Directe veren met Power-Take-In

De extra kosten voor de diesel directe veren bestaan uit extra kosten voor het ontwerp en de bouw van de schepen ten opzichte van de batterij-elektrische variant, omdat deze door de extra systemen complexer zijn. Ook zijn er extra kosten voor de dieselmotor, de tandwielkast en extra kosten die nodig zijn voor het grotere benodigde vermogen van de elektromotor en batterijpakket door de toename van de massa. Er is een zwaardere elektriciteitsnet aansluiting nodig dan aangenomen in de basisoptie, in paragraaf 7.5.1 wordt hier verder op ingegaan. Daarnaast komen de jaarlijkse extra operationele kosten voort uit de onderhoudskosten van de dieselmotor, de kosten voor diesel en de extra kosten voortkomend uit het extra energiegebruik door de toegenomen massa. Een overzicht van deze kosten is weergegeven in Tabel 7-10.

Tabel 7-10: Overzicht verandering in kosten Optie B

Verandering in kosten in € x 1000	Groot Schip	Klein Schip
<i>Investeringskosten complexere bouw en ontwerp schip</i>	1275.0	600.0
<i>Investeringskosten dieselmotoren</i>	363.5	260.8
<i>Investeringskosten extra vermogen elektromotoren</i>	16.1	27.1
<i>Investeringskosten extra capaciteit batterijen</i>	60.2	56.6
<i>Investeringskosten tandwielkasten</i>	121.2	86.9
Totaal extra investeringskosten	1835.9	1031.6
<i>Investeringskosten extra zware net aansluiting (zie 7.5.1)</i>	827.8	
<i>Operationele kosten onderhoud dieselmotoren + tandwielkasten per jaar</i>	38.8	27.8
<i>Operationele kosten extra elektriciteit per jaar</i>	5.6	26.1
Onderstaande waarden gaan uit van één jaar operatie op diesel in plaats van elektriciteit		
<i>Operationele kosten elektriciteit per jaar</i>	-132.1	-262.4
<i>Operationele kosten brandstof per jaar</i>	150.1	298.3
Totaal extra operationele kosten per jaar	62.4	89.9

Met behulp van de kosten uit Tabel 7-10 en de ingeschatte downtime in Tabel 7-4 kan een inschatting gemaakt worden van de TKE voor deze optie. Het verloop van de TKE ten opzichte van de basisoptie over de operatieduur wordt gepresenteerd in paragraaf 7.3.5.

7.3.3. Optie C: Diesel-Direct groot schip

De extra kosten voor de diesel directe veren bestaan uit de investeringskosten voor de dieselmotor en de bijbehorende systemen. Daarnaast is er een flinke investeringskosten besparing ten opzichte van het grote schip uit de basisoptie, gezien het volledige batterij-elektrische systeem komt te vervallen. De operationele kosten veranderen doordat er nu op diesel gevaren wordt in plaats van elektriciteit, wat ook invloed heeft op de onderhoudskosten. Een overzicht van deze kosten is weergegeven in Tabel 7-11.

Tabel 7-11: Overzicht verandering in kosten Optie C

Verandering in kosten in € x 1000	Groot Schip
<i>Investeringskosten dieselmotoren</i>	315.8
<i>Investeringskosten batterijpakket</i>	-1300.0
<i>Investeringskosten elektrisch systeem</i>	-1281.3
<i>Investeringskosten elektrische motoren</i>	-444.4
Totaal extra investeringskosten	-271.0
<i>Operationele kosten onderhoud dieselmotoren per jaar</i>	15.8
<i>Operationele kosten brandstof per jaar</i>	130.5
<i>Operationele kosten elektriciteit per jaar</i>	-120.6
Totaal extra operationele kosten per jaar	25.6

Met behulp van de kosten uit Tabel 7-11 en de ingeschatte downtime in Tabel 7-4 kan een inschatting gemaakt worden van de TKE voor deze optie. Het verloop van de TKE ten opzichte van de basisoptie over de operatieduur wordt gepresenteerd in paragraaf 7.3.5.

7.3.4. Optie D: Walgenerator

De extra verandering in kosten bij het toepassen van walgeneratoren bestaat uit investering in een zwaardere net aansluiting in Vlissingen aangezien de schepen alleen in Vlissingen opladen, in paragraaf 7.5.1 wordt hier verder op ingegaan. Daarnaast moet er éénmalig betaald worden voor het afleveren en ophalen van de huur generatoren. De operationele kosten bestaan uit de huur van de generatoren, de brandstofkosten van de generatoren, en de kosten besparing op elektriciteit, aangezien er de eerste twee jaar geen elektriciteit van het net wordt afgenomen. Het is waarschijnlijk dat de huurkosten voor de walgeneratoren goedkoper uitvallen gezien er voor een langere periode gehuurd zal worden. Echter is de periode nu niet voorspelbaar, daarom is voor een zuivere vergelijking het dagtarief aangehouden. Een overzicht van de kosten is weergegeven in Tabel 7-12.

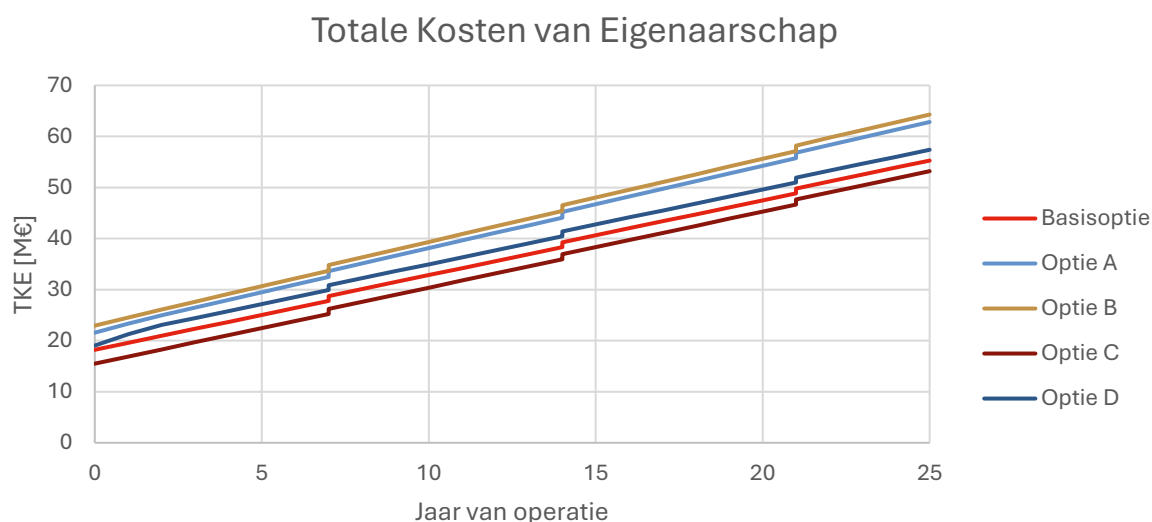
Tabel 7-12: Overzicht verandering in kosten Optie D

Verandering in kosten in € x 1000	Wal infrastructuur
<i>Investeringskosten extra zware net aansluiting (zie 7.5.1)</i>	827.8
<i>Investeringskosten aflevering walgeneratoren</i>	3.5
Totaal extra investeringskosten	831.3
<i>Operationele kosten huur walgeneratoren per jaar</i>	547.5
<i>Operationele kosten brandstof per jaar</i>	876.2
<i>Operationele kosten elektriciteit per jaar</i>	-345.3
Totaal extra operationele kosten per jaar	1078.4

Met behulp van de kosten uit Tabel 7-12 en de ingeschatte downtime in Tabel 7-4 kan een inschatting gemaakt worden van de TKE voor deze optie. Het verloop van de TKE ten opzichte van de basisoptie over de operatieduur wordt gepresenteerd in paragraaf 7.3.5.

7.3.5. Vergelijking TKE

Nu voor alle hybride alternatieven de investeringskosten en operationele kosten ingeschat zijn, kunnen de totale kosten van eigenaarschap voor elke optie vergeleken worden. In Figuur 7-3 is het resultaat hiervan weergegeven.



Figuur 7-3: Vergelijking totale kosten van eigenaarschap (TKE) voor de verschillende alternatieven

Tabel 7-13: Vergelijking totale kosten van eigenaarschap (TKE) voor de verschillende alternatieven

Kosten					
Investeringskosten [M€]	18.2	21.6	22.9	15.5	19.0
Totale operationele kosten [M€]	37.1	41.3	41.4	37.7	38.4
TKE [M€]	55.3	62.8	64.3	53.2	57.4

De investeringskosten van de verschillende opties zijn af te lezen op de y-as bij jaar 0. De operationele kosten worden hier jaarlijks bij opgeteld en geven zo een toename in de TKE over de 25 jaar durende operatie.

Figuur 7-3 laat zien dat optie C de goedkoopste optie is. De kosten besparing op batterijen en een elektrisch systeem voor het grote schip zijn hierin de grootste factor. Daarnaast zijn de extra kosten aan brandstof slechts €10.000 meer per jaar dan de kosten die hiermee bespaard worden op elektriciteit, doordat het grote schip in optie C lichter wordt en hiermee efficiënter.

De twee duurste opties zijn optie A en B. Het kosten verschil tussen A en B betreft 1.5 miljoen Euro wat 2% van de TKE die is berekend. Dit verschil wordt, op basis van de gevoeligheid van de geschatte efficiënties, brandstof prijzen, energieprijzen, en periode van 25 jaar, als insignificant beschouwd.

Optie D zit 2.1 miljoen Euro boven de basisoptie en is hiermee goedkoper dan optie A en B.

7.4. Impact op operationele risico's

In deze paragraaf wordt ingegaan op de impact die de voorgestelde opties hebben op de gestelde operationele risico's zoals beschreven in hoofdstuk 4. Dit wordt gedaan door middel van individuele kwalitatieve score op de gestelde risico's volgens Tabel 7-14.

Tabel 7-14: Omschrijving scores gebruikt in deze paragraaf

Score	Omschrijving
--	Heeft een sterk negatieve invloed op het risico
-	Heeft een negatieve invloed op het risico
+/-	Heeft geen invloed op het risico
+	Heeft een positieve invloed op het risico
++	Heeft een sterk positieve invloed op het risico

7.4.1. Weging operationele risico's

Bij de operationele risico's zoals omschreven in hoofdstuk 4, en geanalyseerd per optie in dit hoofdstuk dienen wegingsfactoren in ogenschouw genomen te worden. Voor het risico op elektriciteitsnet congestie geldt eigenlijk dat dit naar verwachting een reëel probleem is voor de eerste jaren van de operatie en niet voor de gehele levensduur. Dit geeft het een hoge waarde als weegfactor.

Voor brandgevaar en elektrisch systeem falen is, in hoofdstuk 4, vastgesteld dat beide voldoende veilig en betrouwbaar worden geacht en vanuit scheepsbouwkundig perspectief geen verdere verbetering vereisen. Dit maakt dat beide een lage weegfactor hebben.

7.4.2. Analyse

Hoe de verschillende opties invloed hebben op de operationele risico's, is kwalitatief weergegeven in Tabel 7-15.

Tabel 7-15: Kwalitatieve scores van de verschillende opties op operationele risico's

Optie	Elektriciteitsnet Congestie	Brandgevaar	Elektrisch systeem falen
Weegfactor	Hoog	Laag	Laag
A	++	+/-	+
B	++	+/-	++
C*	+	+	+
D	++	+/-	+/-

Voor optie A geldt dat het een sterk positieve invloed heeft op congestie van het stroomnet; de dienstregeling kan immers zonder onderbreking door de batterij diesel-elektrische vloot overgenomen worden. Wat betreft brandgevaar; er blijven nog steeds batterijen aan boord, dus hier is geen invloed op. Voor het risico op elektrisch systeem falen is het effect van het risico beperkt door het toevoegen van de dieselgenerator, er kan bij elektrisch systeem falen van de batterijen doorgevaren worden middels de generator. Wanneer in het uitzonderlijke scenario elektrisch systeem falen bij één van de hoofdschakelborden of één van de elektromotoren plaatsvindt zorgt dit wel voor een beperking in haalbare snelheid. Hiermee zou in dat scenario het schip niet meer volledig conform de dienstregeling kunnen opereren.

Voor optie B geldt dat het een sterk positieve invloed heeft op congestie van het stroomnet; de dienstregeling kan immers zonder onderbreking door de diesel-directe vloot overgenomen worden. Wat betreft brandgevaar; er blijven nog steeds batterijen aan boord, dus hier is geen invloed op. Voor het risico op elektrisch systeem falen is het effect van het risico sterk beperkt door het toevoegen van de dieselmotor die direct met de propeller verbonden is. Bij elke vorm van elektrisch systeem falen kan er volgens dienstregeling doorgevaren worden.

Voor optie C geldt dat het een positieve invloed heeft op congestie van het stroomnet; een aangepaste dienstregeling kan gevaren worden door het diesel-directe grote schip. Het risico op brandgevaar neemt af door het ontbreken van batterijen in het grote schip. Het risico op elektrisch systeem falen is door de diesel-directe aandrijving in het grote schip volledig gemitigeerd. Wel heeft optie C geen invloed op deze risico's voor de kleine schepen. Dit betekent dat voor de totale vloot de invloed beperkter is wat zich vertaalt in de score.

Voor optie D geldt dat er bij congestie van het stroomnet doorgevaren kan worden met gebruik van walgeneratoren zonder beperkingen op de dienstregeling. Er is geen invloed op brandgevaar en elektrisch systeem falen aan boord van de schepen, gezien de schepen ongewijzigd blijven.

Aan de hand van de resultaten in Tabel 7-15 scoort optie C positief op alle drie de risico's. Echter, uitgaande van de weegfactoren zoals benoemd in paragraaf 7.4.1 scoren optie A, B en D het beste in deze analyse van operationele risico's.

7.5. Overige bijzonderheden

In deze paragraaf worden de belangrijkste bijzonderheden voor de hybride alternatieven besproken, waar met name de bijzonderheden genoemd worden die niet kwantificeerbaar zijn, maar wel doorslaggevend kunnen zijn voor het adviseren over een van de alternatieven.

7.5.1. Stroomnetaansluiting

Volgens het oorspronkelijk beoogde missieprofiel [1] laad het grote schip alleen in Vlissingen met 1500 kW en de kleine schepen in Breskens met 750 kW zoals omschreven in sectie 4.1. Deze aanname komt voort vanuit een praktisch oogpunt, waarbij er op een overzichtelijkere manier geladen wordt voor de verschillende schepen. Echter, gezien de mogelijke problemen van netcongestie is dit onderzoek gebaseerd op alle schepen opladen in Vlissingen omdat het de verwachting is dat daar als eerste de totale benodigde laadcapaciteit beschikbaar komt. Dit maakt de betreffende aansluiting duurder; volgens ref. [2] zijn de extra kosten van een aansluiting geschikt voor dit hogere vermogen, gecorrigeerd voor inflatie, €827.750.

De extra kosten van een zwaardere aansluiting in Vlissingen wegen op tegen de extra kosten die het varen op diesel in plaats van elektriciteit met zich meebrengen. Voor optie A en optie B is berekend dat in het hoogseizoen dit per dag al ruim €1500 aan diesel kost. Over vier jaar zal dit tot veel meer dan €827.750 aan kosten leiden.

Dit is waarom er voor optie A, B en D uitgegaan is van extra investeringskosten van €827.750 voor een zwaardere stroomnetaansluiting. Voor optie C is dit niet nodig, omdat er in deze optie niet geladen wordt door het grote schip.

7.5.2. Aanpassing dienstregeling voor optie C

Er is een aanpassing van de dienstregeling nodig bij optie C omdat er in de eerste jaren van de operatie er naar verwachting problemen met netcongestie zullen zijn. Het grote schip neemt in deze optie de dienstregeling volledig over in de eerste jaren van operatie. Het grote schip alleen kan weliswaar in het laagseizoen de passagiers vervoeren, maar doet hier langer over dan een klein schip. Dit maakt de vaar frequentie binnen de dienstregeling lager wat een substantieel nadeel is. Verder zal het grote schip alleen te kort schieten in capaciteit gedurende het midden- en hoogseizoen. Ook dit heeft dus duidelijk nadelige effecten op de dienstregeling.

7.5.3. Invloed op scheepsontwerp

Voor de opties A en B is er een invloed op het scheepsontwerp. Over het algemeen geldt dat er door het toepassen van een extra manier van energievoorziening het ontwerp complexer wordt en voor hetzelfde operationele profiel het minder efficiënt is. Er zal namelijk voor een groot deel van de tijd gevaren worden met een dieselmotor of generator en diesel aan boord terwijl dit niet nodig is. Hierdoor worden de schepen zwaarder en mogelijk groter. Daarnaast zorgt dit voor complexere schepen met meer componenten, waardoor er ook meer onderhoud nodig is en het personeel mogelijk meer training nodig heeft.

Verder is de invloed op het scheepsontwerp voor optie B significant groter dan optie A, doordat een directe verbinding tussen de dieselmotor en elektromotor naar de tandwielkast moet bestaan. Dit maakt dat er weinig flexibiliteit in het ontwerp is en de mogelijkheden tot scheepstypen beperkter wordt. Dit leidt tot een minder effectief ontwerp voor deze casus. Ook zal voor optie B de elektromotor als generator moeten kunnen werken om de hotel-elektriciteitsvoorziening te kunnen leveren wanneer de batterijen dit niet kunnen. Dit maakt het geheel kostbaarder en complexer.

7.5.4. Dieselvoorziening Vlissingen

De huidige Westerschelde ferry vaart op diesel. Hiervoor is er in Vlissingen een ondergrondse opslagtank aangelegd en is er een bunker-infrastructuur die ervoor zorgt dat de schepen aan de steiger getankt kunnen worden met diesel.

In de basisoptie zal deze voorziening overbodig worden, omdat de hele vloot batterij-elektrisch is en er dus geen diesel meer wordt verbruikt. Dit levert een kostenbesparing op, omdat er geen onderhoud en keuring voor dit systeem en de opslagtank meer gedaan hoeft te worden.

Voor de hybride opties is het wel nodig om de bunker-infrastructuur en opslagtank operationeel te houden. Dit betekent dat voor optie A, B en C er voor de volledige operationele periode van 25 jaar extra kosten zijn ten opzichte van de basisoptie. Voor optie D is dit slechts de eerste twee jaar waarin elektriciteitsnet congestie verwacht wordt.

Deze extra kosten zijn niet meegenomen in dit onderzoek. De verwachting is dat het opnemen van deze kosten in de TKE niet tot andere conclusies zal leiden. Kwalitatief kan wel gesteld worden dat optie D zich hiermee positief onderscheidt van de andere opties, doordat bij deze optie maar 2 jaar onderhoud nodig is in plaats van 25 jaar.

8. TOEPASSING VAN HVO-100

In dit hoofdstuk worden de voor en nadelen van HVO100 als brandstof toegelicht. HVO100 (Hydrotreated Vegetable Oil) is een synthetische, hernieuwbare dieselbrandstof die wordt geproduceerd uit rest- en afvalstromen zoals gebruikt frituurvet en dierlijke vetten. Door middel van hydrogenering worden deze oliën omgezet in een hoogwaardige brandstof die qua eigenschappen sterk lijkt op fossiele diesel. HVO100 is vrij van zwavel en aromaten, wat resulteert in een schonere verbranding en lagere emissies. De brandstof is volledig inzetbaar in bestaande dieselmotoren zonder technische aanpassingen.

HVO100 is een geschikt duurzaam alternatief waar nu fossiele diesel wordt gebruikt zonder extra investeringskosten. Echter omdat de Provincie Zeeland alleen de uitstoot van het schip beschouwd (tank tot schroef), is dit geen zero-emissie optie.

8.1. Emissies

Bij het verbranden van HVO100 komt er net als bij fossiele diesel CO₂ vrij, echter wordt bij de productie van HVO100 CO₂ opgenomen. Als zowel de productie als de verbranding van HVO100 wordt meegenomen in de vergelijking kan HVO100 een significante reductie van netto CO₂ uitstoot bewerkstelligen. Daarom, zoals benoemd in hoofdstuk 5, zal hier het emissie reductie potentieel van HVO100 omschreven worden vanuit een bron tot schroef (well-to-propeller) perspectief.

De exacte reductie in CO₂ emissies is sterk afhankelijk van de toeleveringsketen van de HVO100, welke verschilt per leverancier. Daarnaast is er nog veel onduidelijkheid over de exacte impact van HVO100 op lokale emissies. Een overzicht van de geschatte reductie in emissies ten opzichte van fossiele diesel is weergegeven in Tabel 8-1 [11] [12] [13] [14] [15] [16].

Tabel 8-1: HVO100 relatieve reductie in WTP emissies

Emissie type	Reductie WTP broeikasgassen (%)
CO ₂	50 tot 90% (Afhankelijk van de toeleveringsketen)
N ₂ O	~ 0% (Beperkte data; waarschijnlijk verwaarloosbare verandering)
BC	0 tot 50%
CO ₂ -eq	43 tot 86%
Reductie luchtvervuiling (%)	
CO	10 tot 30%
HC	30 tot 70%
NO _x	~ 0% (Beperkte data; waarschijnlijk verwaarloosbare verandering)
PM	30 tot 50%
SO _x	~ 100% (HVO100 is zwavel-vrij)

8.2. Kosten analyse

De bunker prijzen van Nederlandse bunkerleveranciers worden niet publiek gedeeld. Over het algemeen is HVO100 duurder dan fossiele diesel. Aan de hand van initiële inventarisatie in de markt is gebleken dat HVO100 ongeveer 20% tot 30% duurder is dan fossiele diesel (B7). Op basis van contact tussen Provincie Zeeland en REINPLUS FIWADO Bunker is de prijs van HVO100 doorgaans tussen de 60 en 100 euro per 100 liter. Dit is in vergelijkbare orde als de diesel waar de schepen nu op varen (ULSD). Ter referentie, in overeenstemming met de Provincie Zeeland, wordt in dit onderzoek gerekend met 75 euro per 100 liter ULSD gebruikt (€0.75 per liter).

HVO100 is ook goed verkrijgbaar wat het een goed alternatief maakt voor fossiele diesel. Echter is de schaalbaarheid van deze brandstof voor de maritieme industrie beperkt. Daarnaast zijn er ook andere industrieën die potentieel meer bereid zijn te betalen voor HVO100 of de grondstoffen waar HVO100 van gemaakt wordt voor andere brandstoffen. Dit maakt HVO100 geschikt voor een beperkt deel van de maritieme industrie. Hier fungeert HVO100 dan als ware als transitiebrandstof die geen extra investeringskosten vereist.

9. CONCLUSIES

In dit hoofdstuk worden de conclusies per hoofdstuk gepresenteerd. Afsluitend wordt geconcludeerd hoe de hybride opties zich onderling verhouden en presteren ten opzichte van de basisoptie. Ten slotte wordt er een optie geadviseerd om toe te passen.

9.1. Operationele risico's

In dit rapport worden drie operationele risico's geanalyseerd die kunnen voorkomen bij een batterij-elektrisch schip. Als eerste risico wordt het risico op congestie van het elektriciteitsnet onderzocht, ofwel het niet beschikbaar zijn van het benodigde vermogen aan de wal om de schepen op te laden. Aan de hand van informatie van de netbeheerder kan geconcludeerd worden dat, indien geen aanvullende maatregelen worden genomen, elektriciteitsnet congestie naar verwachting een risico vormt voor (de eerste jaren van) de operatie.

Als tweede operationele risico is brandgevaar met toepassing van batterijen onderzocht. Op basis van reeds bestaande batterij elektrische schepen, regelgeving en speciale veiligheidssystemen, kan geconcludeerd worden dat batterij elektrische schepen voldoende veilig zijn, specifiek ten aanzien van brandgevaar.

Als derde operationele risico is elektrisch systeem falen onderzocht. In de analyse is de vereiste toepassing van redundantie omschreven. Verder is de kennis en ervaring van bestaande diesel elektrische schepen bekeken. Op basis daarvan kan geconcludeerd worden dat batterij-elektrische veerboten voldoende betrouwbaar zijn en deze geen (extra) risico vormen voor (de continuïteit van) de operatie.

9.2. Duurzame brandstoffen

In dit rapport is geanalyseerd welke duurzame energiedragers toegepast kunnen worden op de Westerschelde ferry. Initieel blijven de opties batterijen, waterstof, ammoniak, methanol en HVO100 over. Nader kijkend naar de casus voor de Westerscheldeferry valt ammoniak af vanwege de complexiteit van de opslag en veiligheidsrisico's. Waterstof en methanol vallen af vanwege hogere operationele kosten dan batterijen. Daarmee blijven batterijen en HVO100 over. Batterijen zijn de basiskeuze zoals toegepast in de basisoptie. HVO100 is een geschikt duurzaam alternatief voor gebruik in de hybride opties waar nu fossiele diesel wordt gebruikt zonder extra investeringskosten. Echter omdat de Provincie Zeeland alleen de uitstoot van het schip beschouwd (tank tot schroef), is dit geen zero-emissie optie.

9.3. Vergelijking hybride opties

De volgende opties voor de vloot van Westerschelde ferries zijn in dit rapport gepresenteerd:

- Basisoptie: Een vloot van batterij-elektrische schepen
- Optie A: Een vloot van batterij diesel-elektrische schepen, waarbij een dieselgenerator of batterijen de elektromotor van elektrische energie voorzien
- Optie B: Een vloot van diesel-directe schepen met Power-Take-In, waarbij een dieselmotor en een elektromotor via een tandwielkast de schroef kunnen aandrijven
- Optie C: Het grote schip in de vloot wordt uitgevoerd als diesel-direct schip zonder batterijen, de kleine schepen blijven batterij-elektrisch
- Optie D: De vloot blijft ongewijzigd ten opzichte van de basisoptie, maar wordt aangevuld met een dieselgenerator aan de wal die de vloot van elektriciteit kan voorzien in de eerste jaren van de operatie.

Een overzicht van hoe deze opties zich verhouden tot elkaar op de belangrijkste criteria uit hoofdstuk 7 is weergegeven in Tabel 9-1.

Tabel 9-1: Vergelijking van de hybride alternatieven

Optie	Basisoptie	A	B	C	D
Duurzaamheid					
CO ₂ -equivalent [ton]	0	6349	5140	13174	5361
NO _x -emissies [ton]	0	13.21	12.22	27.40	4.39
HC-emissies [ton]	0	1.39	1.29	2.89	1.24
PM-emissies [ton]	0	0.11	0.10	0.23	0.14
SO _x -emissies [ton]	0	2.41	1.95	4.99	2.03
Kosten					
Investeringskosten [M€]	18.2	21.6	22.9	15.5	19.0
Totale operationele kosten [M€]	37.1	41.3	41.4	37.7	38.4
TKE [M€]	55.3	62.8	64.3	53.2	57.4
Operationele risico's					
Invloed op risico van Elektriciteit netcongestie (Weegfactor Hoog)	--	++	++	+	++
Invloed op risico van brandgevaar aan boord (Weegfactor Laag)	+/-	+/-	+/-	+	+/-
Invloed op risico van elektrisch systeem falen (Weegfactor Laag)	-	+	++	+	+/-

Voor de basisoptie is de verwachting dat deze de eerste jaren niet kunnen opereren vanwege elektriciteitsnet congestie. Dit betekent dat er gedurende deze periode (voor delen van het jaar) geen veerverbinding mogelijk is. Om deze reden is er naar hybride alternatieven gekeken.

Optie B scoort het beste op het gebied van emissies van de hybride alternatieven met 5140 ton CO₂-equivalente uitstoot. Optie D en A zitten daar beperkt boven met respectievelijk 5361 en 6349 ton CO₂-equivalente uitstoot. Optie C scoort significant slechter met 13174 ton CO₂-equivalente uitstoot.

Optie C is de goedkoopste optie van de hybride alternatieven. De kosten besparing op batterijen en een elektrisch systeem voor het grote schip zijn hierin de grootste factor. De twee duurste opties zijn optie A en B. Het kosten verschil tussen A en B betreft 1.5 miljoen Euro, wat 2% is van de berekende TKE. Dit verschil wordt als insignificant beschouwd op basis van de gevoeligheid van de geschatte efficiënties, brandstof prijzen, energieprijzen en periode van 25 jaar. Optie D zit 2.1 miljoen Euro boven de basisoptie en is hiermee goedkoper dan optie A en B.

Voor de operationele risico's is vastgesteld dat elektriciteitsnet congestie, gezien het naar verwachting een reëel probleem is voor de eerste jaren van de operatie, een hoge weegfactor heeft. Verder is voor brandgevaar en elektrisch systeem falen bepaald dat, gezien deze voldoende veilig en betrouwbaar worden geacht, de weegfactor laag is. Uitgaande van deze weegfactoren scoren optie A, B en D het beste in deze analyse van operationele risico's. Dit

omdat optie C onvoldoende capaciteit kan leveren voor de volledige dienstregeling in de eerste jaren van de operatie.

9.4. Aanbevolen optie

Rekening houdend met al het bovenstaande, wordt geadviseerd om voor optie D te kiezen, als alternatief op de basis optie, indien netcongestie niet in de tussenliggende tijd wordt opgelost. Dit is een kostenefficiënte oplossing, die goed inspeelt op het niet beschikbaar zijn van walstroom tijdens de eerste jaren van de operatie. Daarnaast is het de op één na beste optie wat betreft de uitstoot van schadelijke emissies. Verder kan er bij optie D een vloot ontworpen worden die bestaat uit zo efficiënt mogelijke batterij-elektrische veren.

9.5. Discussie

Dit onderzoek is op een dusdanige manier opgezet dat het onafhankelijk is van de uitvoering van het kleine schip (monohull, catamaran, planeren, draagvleugel, etc). Hierbij is wel als uitgangspunt voor het vermogen de waarde van het eerdere onderzoek aangehouden [1]. Wanneer dit uitgangspunt verandert, veranderen hiermee ook de vermogens en energievraag van de kleine schepen, wat vervolgens invloed heeft op de energiekosten en emissies voor de voorgestelde hybride opties en de basisoptie. Echter heeft dit voor alle opties eenzelfde invloed en zijn er voor de opties onderling geen grote verschillen te verwachten. Dit betekent dat een verschil in ontwerp (en daarmee de vermogensvraag) van de kleine schepen geen invloed heeft op de conclusies van het onderzoek in dit rapport.

10. REFERENCES

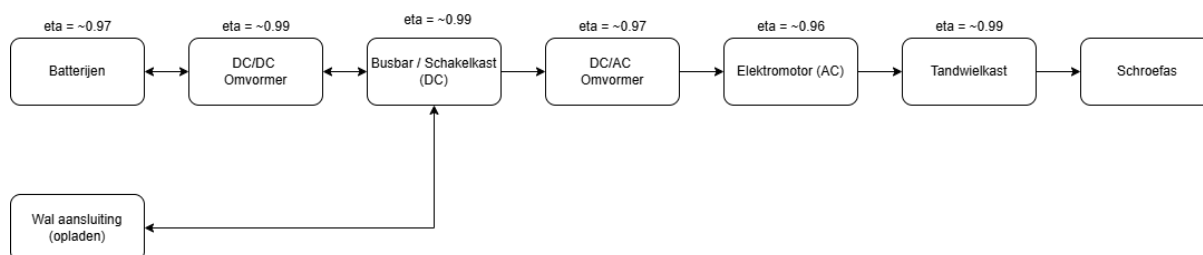
- [1] Flying Fish, „Westerschelde Ferry Emissievrij,” 2023.
- [2] Flying Fish, „WP4/5 Energievoorziening. Rapport voor aanvullend onderzoek naar de energie aan de wal en aan boord. Deelrapport voor WP4-5 van het project Westerschelde Ferry Emissievrij,” 2023.
- [3] „Capaciteitskaart Netbeheer Nederland,” [Online]. Available: <https://capaciteitskaart.netbeheernederland.nl/>.
- [4] „Maritime surpasses 1,000 battery-powered vessel milestone,” [Online]. Available: <https://www.rivieramm.com/videos/maritime-goes-through-1000-battery-powered-vessel-milestone-83968#:~:text=Maritime%20surpasses%201%2C000%20battery%2Dpowered%20vesse,l%20milestone,-26%20Feb%202025&text=DNV%20Maritime%20segment%20director%20for,energy%20eff.>
- [5] „Corvus Energy References,” [Online]. Available: <https://corvusenergy.com/segments/cruise-and-ferry.>
- [6] „Marine kan eerste elektrische werkboot in gebruik nemen,” [Online]. Available: <https://www.defensie.nl/actueel/nieuws/2023/11/22/marine-kan-eerste-elektrische-werkboot-in-gebruik-nemen.>
- [7] „EST-Floattech References,” [Online]. Available: <https://www.est-floattech.com/projects/>.
- [8] „Ellen E-ferry: the world’s glimpse of the future of ferries,” [Online]. Available: <https://www.ship-technology.com/features/ellen-e-ferry/?cf-view.>
- [9] Aggreko, *Persoonlijke communicatie*, 2025.
- [10] Bredenoord, *Persoonlijke communicatie*, 2025.
- [11] „Switching to Sustainable: Understanding HVO 100 As A Fossil-Free Fuel,” [Online]. Available: <https://powerproductsystems.com/blog/switching-to-sustainable-understanding-hvo-100-as-a-fossil-free-fuel.>
- [12] „Particulate number and NOx trade-off comparisons between HVO and mineral diesel in HD applications,” [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236117314151.>
- [13] „Neste Renewable Diesel Handbook,” [Online]. Available: https://www-old.neste.com/sites/default/files/attachments/neste_renewable_diesel_handbook.pdf.
- [14] „Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) NESTE OIL,” [Online]. Available: <https://artfuelsforum.eu/wp-content/uploads/2018/05/Acrobat-Document-1.pdf.>

-
- [15] „HVO100 Renewable Diesel Biofuel Express,” [Online]. Available: <https://biofuel-express.com/wp-content/uploads/2024/01/HVO100-Renewable-Diesel-EN.pdf> .
 - [16] „Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) as a Renewable Diesel Fuel: Trade-off between NOx, Particulate Emission, and Fuel Consumption of a Heavy Duty Engine,” [Online]. Available: [https://www.semanticscholar.org/paper/Hydrotreated-Vegetable-Oil-\(HVO\)-as-a-Renewable-and-Aatola-Larmi/b104bcc922a0e958279dc7837d65e5f30fb52352](https://www.semanticscholar.org/paper/Hydrotreated-Vegetable-Oil-(HVO)-as-a-Renewable-and-Aatola-Larmi/b104bcc922a0e958279dc7837d65e5f30fb52352).

APPENDIX A. DETAIL AANDRIJLIJNEN

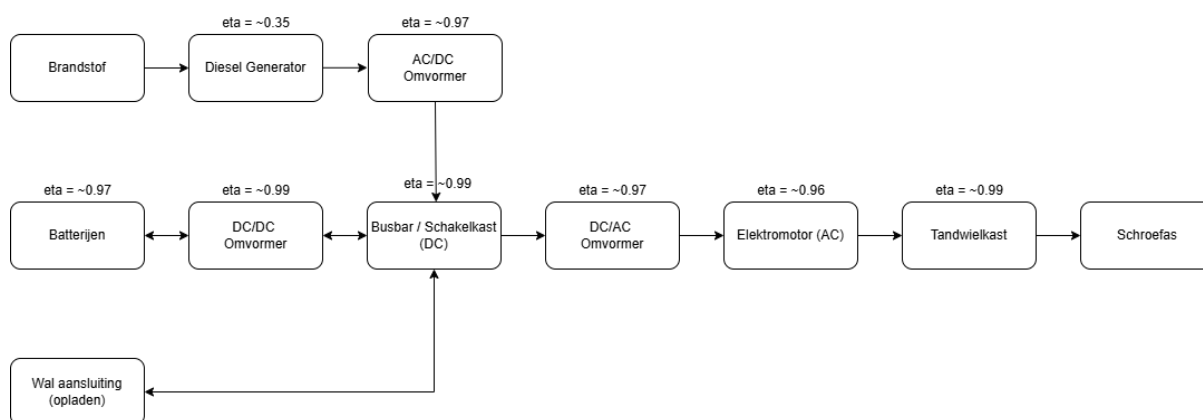
In deze bijlage worden de aandrijflijnen van de basisoptie en de verschillende alternatieven in meer detail gepresenteerd. Op basis van diagrammen met blokken die de verschillende componenten representeren, kan een onderscheid gemaakt worden tussen de verschillende voortstuwingsprincipes. Daarnaast zijn de geschatte rendementen voor de energieomzetting bijgevoegd.

In Figuur A-1 zijn de componenten van de basisoptie, een batterij-elektrisch schip weergegeven. Er is voor dit schip uitgegaan van een DC-stroomnet.



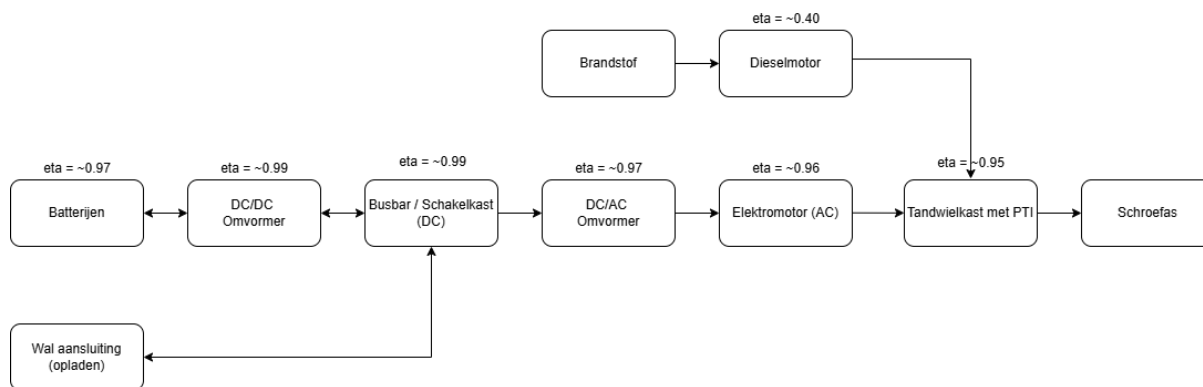
Figuur A-1: Overzicht aandrijflijn Batterij-Elektrisch schip

In Figuur A-2 is de aandrijflijn van een batterij diesel-elektrisch schip te zien. Wat opvalt is dat dit ten opzichte van het batterij-elektrisch schip enkel een toevoeging is van brandstof, een dieselgenerator en een AC/DC omvormer. De energie die dit levert wordt geleid naar het hoofdschakelbord en voorziet zo het verdere schip van stroom.



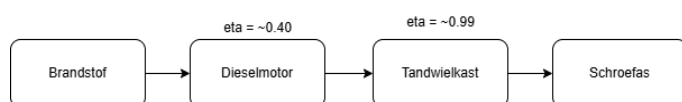
Figuur A-2: Overzicht aandrijflijn Batterij Diesel-Elektrisch schip

In Figuur A-3 is de aandrijflijn van een diesel-direct schip met power-take-in te zien. Dit lijkt in het principe vele op het batterij diesel-elektrische schip: er wordt brandstof en een dieselmotor toegevoegd. Echter wordt de energie van de brandstof niet in elektriciteit omgezet, maar direct als mechanische energie naar de propeller. De aansluiting op het batterij-elektrische systeem vindt dan ook plaats bij de tandwielkast. Belangrijk om op te merken: ten opzichte van de batterij diesel-elektrische aandrijflijn uit Figuur A-2, is de omzetting van diesel naar energie voor de propeller, efficiënter in het geval van de power-take-in variant.



Figuur A-3: Overzicht aandrijflijn Diesel-Direct schip met Power Take In

De meest efficiënte overbrenging van de energie uit diesel tot voortstuwingsenergie van alle opties is geschetst in Figuur A-4, waar een diesel-directe aandrijving getoond wordt. Dit is van toepassing op het grote schip in optie C, en maakt voor de meest simpele energieomzetting.

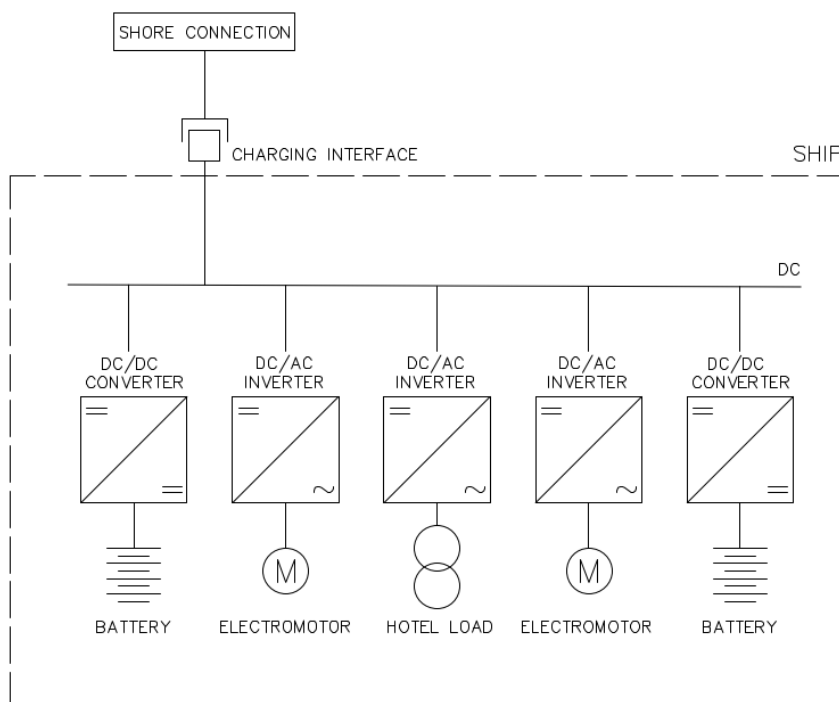


Figuur A-4: Overzicht aandrijflijn Diesel-Direct groot schip

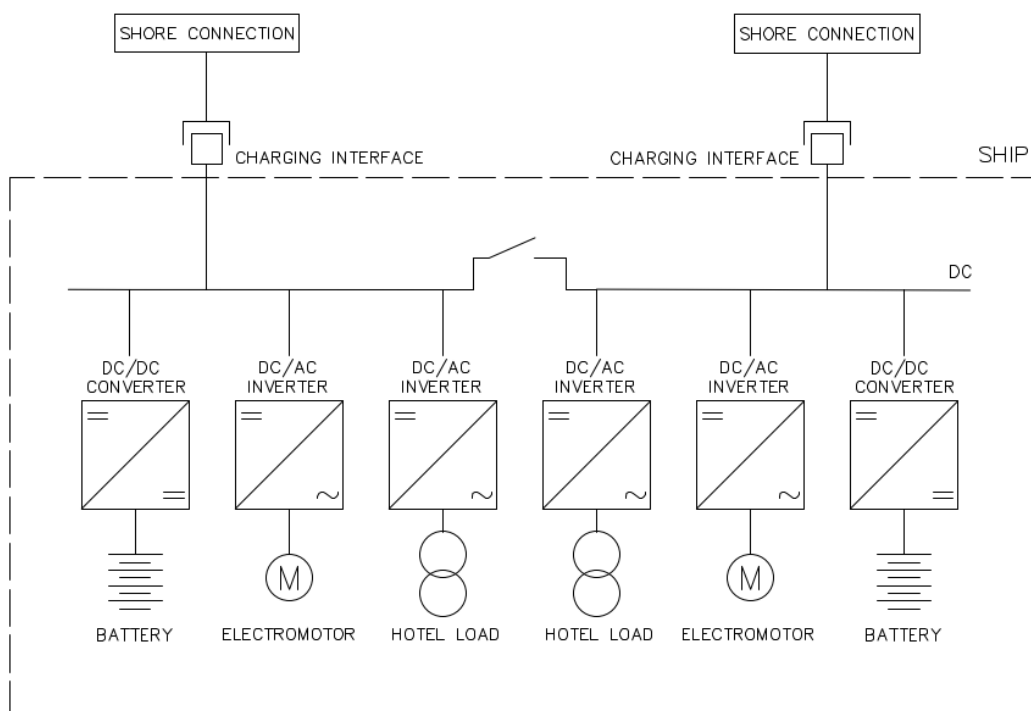
APPENDIX B. DETAIL REDUNDANTIE ELEKTRISCH SYSTEEM

In deze bijlage wordt de toepassing van redundantie in het elektrische systeem voor de batterij-elektrische veren in meer detail getoond.

Zoals in hoofdstuk 4.3 is toegelicht, wordt er redundantie toegepast op het elektrische systeem van de batterij-elektrische veren. Hiermee blijft bij uitval van een component de rest van het systeem operationeel. De volgende figuren laten zien hoe dit toegepast is.



Figuur B-1: Single-Line diagram van batterij-elektrische veren met een DC grid, zonder redundantie



Figuur B-2: Single-Line diagram van batterij-elektrische veren met een DC grid, met redundantie

Figuur B-1 en Figuur B-2 laten zien hoe redundantie toegepast kan worden op de energievoorziening voor de batterij-elektrische veren. Dit zorgt ervoor dat een enkel componentfalen of een fout in het DC-grid niet direct leid tot het uitvallen van de voortstuwing en stroomvoorziening in het schip. De schepen dienen dan ook redundant uitgevoerd te worden, zoals schematisch weergegeven in Figuur B-2.

APPENDIX C. OVERZICHT DUURZAME BRANDSTOFFEN

In deze bijlage wordt meer achtergrond over de toepassing van duurzame brandstoffen op de nieuwe Westerschelde veren gegeven.

In Tabel C-1 wordt een overzicht van de opties voor de energiedragers die worden toegepast in de maritieme industrie gegeven. De volgende paragrafen gaan dieper in op deze energiedragers en er wordt een oordeel gegeven over de toepasbaarheid op de Westerschelde veren.

Tabel C-1: Opties voor duurzame energiedragers

Duurzame energiedrager	Energie-dichtheid LHV [MJ/kg]	Volumetrische energie dichtheid brandstof [GJ/m ³]	Volumetrische energie dichtheid brandstof + tank** [GJ/m ³]	Hernieuwbare synthetische productie kosten*** [MJ/MJ]	Opslag condities
Diesel (referentie)	42.7	36.7	36.0	n.v.t.	Atmosferisch
Synthetische Diesel	42.0	35.8	33.2	>3.0	Atmosferisch
Ethanol	26.7	21.1	20.7	>3.0	Atmosferisch
Methanol	19.9	15.8	15.5	2.4	Atmosferisch
Methaan*	50.0	23.4	9.9	2.3	-162 °C
Vloeibare Ammoniak*	18.6	12.7	6.6	1.8	-34 °C
Vloeibare Waterstof*	120.0	8.5	3.4	1.8	-253 °C
Gecomprimeerde Waterstof	120.0	4.7	1.9	1.7	700 bar
Batterijen	0.54	0.72	0.72	n.v.t.	Atmosferisch

*Volume gebaseerd op cilindrische tanks (type-C), volumetrische energie dichtheid kan verbeterd worden met andere type tanks.

**Conceptuele richtlijnen: alle gepresenteerde informatie is een voorlopige vergelijking en gebaseerd op een aantal aannames. Een meer gedetailleerde toegepaste vergelijking kan afwijken van de gepresenteerde waarden.

***Gebaseerd op eerder verrichte studies door C-Job.

C.1. Batterijen

Batterijen slaan de elektrische energie direct op en slaan dus een stap over in de keten van duurzame energiebron tot energieverbruikers op het schip, ten opzichte van duurzame brandstoffen. Omdat de energie dus zonder tussenstappen direct in het schip opgeslagen kan worden zijn de operationele kosten erg laag. Daarentegen zijn zowel de volumetrische- als massa-energiedichtheid erg laag in relatie tot de duurzame brandstoffen. Dit zorgt voor een groter benodigd volume en massa voor de batterijen en zorgt daarmee voor relatief grotere investeringskosten en een beperkt bereik.

Hiermee zijn batterijen het meest geschikt voor schepen die weinig bereik vereisen en regelmatig opgeladen kunnen worden, zoals bijvoorbeeld veerboten. Batterijen zijn ook geschikt om te gebruiken in combinatie met andere vermogensopwekkingssystemen, bijvoorbeeld om piekvermogens op te vangen, ook bekend als ‘peak shaving’.

C.2. Waterstof

Waterstof is de simpelste brandstofketen (chemische energiedrager) en heeft daarom de laagste hernieuwbare synthetische productiekosten. Ook heeft waterstof de laagste volumetrische energiedichtheid, zowel in vloeibare als gecomprimeerde vorm, wat de opslag van waterstof een uitdaging maakt. Waterstof is zeer licht ontvlambaar en heeft extra veiligheidsmaatregelen nodig om veilige operatie van het schip mogelijk te maken. Voor energieopwekking zijn Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC) een volwassen technologie die energie kunnen opwekken met hoge efficiëntie, zowel in vol- als deellast, zonder hierbij schadelijke uitstoot te produceren.

Waterstof is een verlengstuk dan wel uitbreiding van wat batterijen kunnen bieden en is het meest geschikt voor schepen die kleine afstanden varen. De impact van het benodigde volume kan gereduceerd worden door frequenter te bunkeren voor schepen waar de operatie beperkt tot niet door wordt beïnvloed. Voorbeelden van dergelijke schepen zijn veerboten en vrachtschepen in de binnenvaart.

C.3. Ammoniak

Wanneer ammoniak vergeleken wordt met andere duurzame brandstoffen wordt dit gezien als een gebalanceerde oplossing. Ammoniak heeft een hogere volumetrische energiedichtheid en heeft meer praktische opslagomstandigheden met betrekking tot de druk en temperatuur ten opzichte van waterstof. Daarnaast zijn de synthetische productiekosten voor ammoniak vergelijkbaar dan wel niet gunstiger dan vloeibaar waterstof. De uitdagingen bij ammoniak zijn de zeer giftige eigenschappen en de impact die ammoniak op de omgeving heeft bij een lekkage van ammoniak. Om deze redenen zijn extra veiligheidsmaatregelen nodig.

Vanwege de relatief goede volumetrische energiedichtheid en de lage synthetische productiekosten, heeft ammoniak veel potentie voor grotere vrachtschepen die over de oceaan varen zoals tankers en bulkschepen.

C.4. Methanol

Methanol presteert een stuk beter wat betreft volumetrische energiedichtheid in vergelijking met waterstof en ammoniak. Daarentegen zijn de hernieuwbare synthetische productiekosten weer hoger dan bij waterstof en ammoniak. Methanol is een vloeistof bij kamertemperatuur en atmosferische druk, wat het geschikt maakt om opgeslagen te worden in normale brandoftanks geïntegreerd in de scheepsromp. De uitdagingen van methanol zijn de ontvlambaarheid en de giftigheid, waardoor extra maatregelen nodig zijn om de veiligheid te garanderen. Daarnaast lost methanol snel op in water en wordt niet als schadelijk gezien voor het milieu bij een eventuele lekkage.

Methanol wordt gezien als een hernieuwbare brandstof met een veel potentie voor verschillende scheepstypen. Dit zijn zowel kleine als grote schepen voor zowel vracht als passagiers waar brandstoffen zoals waterstof en ammoniak niet praktisch uitvoerbaar zijn. In die zin dus ook voor schepen waar de waarde van volume aan boord en praktisch opslag dusdanig zwaar weegt dat de hogere synthetische productiekosten rechtvaardigt.

C.5. Ethanol

Ethanol heeft hogere synthetische productiekosten dan methanol en is hierdoor duurder, met slechts een minimale toename in volumetrische energiedichtheid. Daarnaast is ethanol schadelijk voor het milieu in geval van lekkage, wat het minder praktisch maakt dit aan boord op

te slaan. Om deze redenen is het onlogisch om voor ethanol te kiezen in plaats van methanol. Daarom wordt ethanol niet geschikt geacht als duurzame brandstof.

C.6. Methaan

Methaan heeft een hogere volumetrische energiedichtheid vergeleken met methanol. Echter is bij kamertemperatuur en atmosferische druk methaan gasvormig, wat betekent dat het gekoeld moet worden tot -162°C om het vloeibaar op te kunnen slaan in een goed geïsoleerde tank. Wanneer de consequenties van deze tank worden meegenomen wordt de volumetrische energiedichtheid flink lager dan die van methanol. Verder hebben methanol en methaan ongeveer dezelfde synthetische productiekosten.

Daarnaast is methaan een sterk broeikasgas en er zijn strenge maatregelen nodig zowel aan wal als aan boord om het ontsnappen van methaan naar de atmosfeer te voorkomen. Om bovenstaande redenen wordt methaan niet geschikt geacht als duurzame brandstof.

C.7. Synthetische Diesel

Synthetische (Fischer-Tropsch) diesel kan duurzaam worden geproduceerd. Verder kan het net als fossiele diesel in conventionele tanks opgeslagen worden en in bestaande dieselmotoren worden gebruikt. Echter zijn de synthetische productiekosten van synthetische diesel groter dan 3 MJ/MJ en zullen de operationele kosten dus erg hoog zijn. Er zijn dus geen extra investeringskosten ten opzicht van conventionele schepen. Echter weegt dit voordeel onvoldoende op ten opzichten van de substantieel hogere brandstofprijs. Om deze reden wordt synthetische diesel niet geschikt geacht als duurzame brandstof.

C.8. HVO 100

HVO100 is een andere duurzame productie vorm van diesel. Het wordt gemaakt door plantaardige oliën en restafval te behandelen met waterstof. Hiermee wordt een restproduct omgezet tot een brandstof en kan dit als bijna vrij van schadelijke emissies worden beschouwd (tot wel 90% reductie ten opzichte van fossiele diesel). HVO100 is duurder dan fossiele diesel, maar minder duur dan synthetische diesel. HVO100 is ook goed verkrijgbaar wat het een goed alternatief maakt voor fossiele diesel. Echter is de schaalbaarheid van deze brandstof voor de maritieme industrie beperkt. Daarnaast zijn er ook andere industrieën die potentieel meer bereid zijn te betalen voor HVO100 of de grondstoffen waar HVO100 van gemaakt wordt voor andere brandstoffen. Dit maakt HVO100 geschikt voor een beperkt deel van de maritieme industrie. Hier fungeert het dan als ware als transitiebrandstof zonder extra investeringskosten.

APPENDIX D. OVERZICHT AANNAMES KOSTEN

In deze bijlage worden de aannames die zijn gedaan om tot de kosten te komen toegelicht. In Tabel D-1 is dit overzicht gegeven per kostenpost die meegenomen is in de berekening van de TKE.

Tabel D-1: Overzicht aannames kosten (inclusief accijns, exclusief omzetbelasting)

Kostenpost	Aanname	Bron
<i>Investeringskosten elektromotor</i>	€300 per kW vermogen	Gebaseerd op data van leveranciers
<i>Investeringskosten dieselgeneratorset</i>	€450 per kW vermogen	Gebaseerd op data van leveranciers
<i>Investeringskosten dieselmotor</i>	€300 per kW vermogen	Gebaseerd op data van leveranciers
<i>Investeringskosten tandwielkast met PTI</i>	€100 per kW vermogen	Gebaseerd op data van leveranciers
<i>Investeringskosten batterijen</i>	€650 per kWh capaciteit	Gebaseerd op data van leveranciers
<i>Extra investeringskosten t.b.v. complexer ontwerp en bouw door toevoegen dieselgenerator</i>	5% van de oorspronkelijke bouwkosten	Ontwerprichtlijn in dit stadium van onderzoek
<i>Extra investeringskosten t.b.v. complexer ontwerp en bouw door toevoegen diesel directe voortstuwing met PTI</i>	15% van de oorspronkelijke bouwkosten	Ontwerprichtlijn in dit stadium van onderzoek
<i>Operationele kosten elektriciteit</i>	€0.146 per kWh	Gebaseerd op aanname uit eerder onderzoek, ref [1]
<i>Operationele kosten diesel (ULSD)</i>	€0.75 per L	Uitgangspunt Provincie Zeeland
<i>Operationele kosten onderhoud dieselgenerator</i>	5% jaarlijks van de investeringskosten van de dieselgenerator	Ontwerprichtlijn in dit stadium van onderzoek
<i>Operationele kosten onderhoud dieselmotor en tandwielkast met PTI</i>	8% jaarlijks van de investeringskosten van de dieselmotor en tandwielkast	Ontwerprichtlijn in dit stadium van onderzoek