

Bachelor Eindproject

Verduurzaming van sleepboten

door

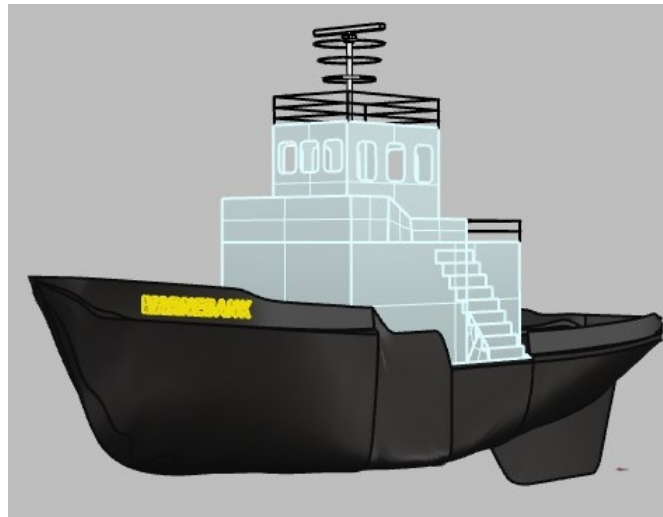
Bart van Broekhoven 5415411

Floor Hartjes 5299438

Jochem Ribberink 5389259

Mirre van 't Riet 5260353

Doris van Woensel 5406269



MT3BEP

Technische Universiteit Delft
Maritieme Techniek
22-06-2023

Verantwoordelijk docent: Dr.ir. H.J. de Koning Gans
Begeleiders: Dr.ir. J.E.J. Pruijn
Ir. J.L. Gelling

Voorwoord

Dit rapport is geschreven door derdejaarsstudenten Maritieme Techniek van de Technische Universiteit Delft. Het verslag is onderdeel van het vak MT3BEP, waarin een eigen onderzoek wordt uitgevoerd dat betrekking heeft op een maritiem onderwerp. In dit verslag zal worden beschreven of er een algemene methode kan worden ontwikkeld voor het verduurzamen van oude sleepboten.

De doelgroep van dit rapport zijn mensen met een maritieme achtergrond die kennis hebben van maritieme en natuurkundige termen. Ook voor mensen met interesse voor verduurzaming kan dit onderzoek interessant zijn.

In hoofdstuk 2 is de probleemstelling gegeven. Ook wordt uitgelegd hoe dit onderzoek is aangepakt. Hoofdstuk 3 beschrijft de verschillende alternatieve brandstoffen en aandrijvingssystemen. Hoofdstuk 4 legt uit hoe een model, dat een indicatie geeft op welke manier het schip kan worden verduurzaamd, is gemaakt. Ook wordt uitgelegd hoe dit model werkt en welke aannames hierin worden gemaakt. In hoofdstuk 5 wordt het model toegepast op de Varnebank, een oude sleepboot uit Maassluis. In dit hoofdstuk worden ook de uitgewerkte resultaten gegeven. Hoofdstuk 6 bevat vervolgens een discussie over de verkregen resultaten. Als laatst zal er een conclusie worden getrokken en zullen enkele aanbevelingen gedaan worden in hoofdstuk 7.

We willen Jeroen Pruijn, Henk de Koning Gans, Jaap Gelling, Peter de Vos en Lindert van Biert bedanken voor hun hulp en feedback in het proces. Ook willen we Jelmer Kant (technicus van de Varnebank), Ron van der Linden (eigenaar van de Varnebank) en Hans Visser (Erfgoedkwartiermakers Maassluis) bedanken voor hun hulp bij het verstrekken van informatie en het helpen met contact leggen.

Delft, 22 juni 2023.
Bart van Broekhoven
Floor Hartjes
Jochem Ribberink
Mirre van 't Riet
Doris van Woensel

Samenvatting

Oude sleepboten stoten nog erg veel schadelijke emissies uit. In 2050 zullen de regels van de IMO of andere instanties het daarom onmogelijk maken voor deze sleepboten om in bedrijf te blijven en dus moeten ze worden verduurzaamd. Het doel van het onderzoek is om historische sleepboten duurzamer te maken. Het operationeel profiel van zulke sleepboten kan echter flink veranderd zijn. Het doel van dit verslag is om een hulpmiddel te beschrijven dat kan schatten welke alternatieve brandstoffen en/of voortstuwingssystemen in een sleepboot geïnstalleerd kunnen worden en aan alle eisen voldoen.

Het onderzoek is onderverdeeld in vijf verschillende fasen. Eerst wordt het probleem geïdentificeerd. Nadat dit is gedaan, wordt er zoveel mogelijk informatie uit de literatuur verzameld. In de derde fase is alle informatie verwerkt in een algemeen rekenmodel. In de vierde fase wordt op basis van deze gegevens een configuratie gekozen die volgens het model aan alle eisen voldoet. In de laatste fase wordt deze oplossing ingetekend in een 3D-model van de sleepboot om het model te valideren.

Voor deze studie is het belangrijkste doel het verminderen van emissies van de sleepboten. De meegenomen emissies zijn NO_x , CO, CO_2 , SO_2 en PM10 die tijdens het varen worden uitgestoten. Om deze reductie te bereiken, overweegt het onderzoek in de tweede fase een aantal alternatieve brandstoffen en aandrijfsystemen. De beschouwde alternatieve brandstoffen zijn: LNG, ammoniak, groene methanol en waterstof. De aandrijvingssystemen die dit onderzoek bekijkt zijn: verbrandingsmotoren op alternatieve brandstoffen, batterijen en brandstofcellen.

Om te kunnen kijken of verschillende configuraties kunnen worden toegepast is een rekenmodel gemaakt waarin wordt nagegaan of aan de opgegeven eisen wordt voldaan. Het model geeft aan de hand van parameters als het benodigde vermogen, de beschikbare ruimte in de machinekamer en de maximale uitstoot van de schadelijke emissies een indicatie of het eventueel mogelijk is om een nieuw aandrijvingssysteem toe te passen op een schip. Verder kan worden aangegeven of er groene methanol en bio-LNG beschikbaar is, wat invloed heeft op de emissies. Ook het toerental van de motor, het aantal cilinders en of de motor twee- of viertakt is, moet worden ingevoerd, omdat deze gegevens nodig zijn om de afmetingen van de motor te bepalen.

Om de benodigde ruimte en hoeveelheid brandstof te bepalen, zijn er kengetallen van alle alternatieve brandstoffen nodig. Met algemene gegevens als de dichtheid en de energiedichtheid bepaalt het model hoeveel ruimte en gewicht er nodig is voor het opslaan van één kWh. Hierbij houdt het ook rekening met welke tanks er nodig zijn om de brandstof in op te slaan. Met deze kengetallen wordt het vereiste vermogen en de gewenste vaartijd afgeleid om te bepalen hoeveel ruimte elke brandstof inneemt. Het gewicht is ook belangrijk met het oog op de stabiliteit van het schip.

Het model test verschillende configuraties van aandrijvingssystemen. Hierbij schat het de afmetingen van de verbrandingsmotoren op een alternatieve brandstof, batterijen en brandstofcellen aan de hand van verschillende methodes, gebaseerd op data-analyse. Met de data worden ook kengetallen afgeleid die de vermogensdichtheid en het gewicht van de aandrijvingssystemen schatten. Met de afmetingen wordt bepaald of deze in de machinekamer passen.

Kengetallen met betrekking tot emissies worden bepaald met emissiefactoren. De gegevens die bruikbaar zijn als kengetallen worden omgerekend naar de hoeveelheid uitgestoten emissies in g/kWh. Deze waarde kan ook worden vergeleken met de relevante regelgeving. Zo kan worden bepaald of de brandstof voldoet aan de gespecificeerde vereisten.

Het ontwikkelde model kan worden gebruikt om te bepalen welke opties mogelijk zijn met betrekking

tot duurzaamheid voor elke sleepboot. Dit onderzoek doet dit voor de Varnebank. De Varnebank wordt echter niet meer gebruikt als sleepboot en hoeft daarom geen piekvermogen te leveren. Hierdoor is er significant minder ruimte nodig in de machinekamer. Door het model toe te passen op de Varnebank wordt het model ook gevalideerd.

Om het vermogen te bepalen dat nodig is als het schip niet sleept, is de weerstand nodig. Hiervoor is een 3D-model gebruikt dat is gemaakt op basis van het beschikbare lijnenplan van het schip. Op het 3D-model wordt de methode van Holtrop en Mennen uit 1982 toegepast. Hiermee wordt de weerstand die het schip ondervindt als het met een bepaalde snelheid vaart bepaald. Door de gevonden weerstand te vermenigvuldigen met de snelheid in knopen en rendementen te verwerken, wordt een effectief vermogen van 150 kW bepaald. Het model gebruikt een vermogen van 180 kW, omdat er aannames zijn gedaan voor de rendementen en onvoorziene omstandigheden.

De vereisten voor de case-study met betrekking tot emissies zijn gelijkgesteld aan de regelgeving voor 2050 volgens de IMO. De huidige uitstoot van de Varnebank wordt bepaald met behulp van oude data, om vervolgens de eisen voor de uitstoot te bepalen.

Op basis van de aangeleverde tekeningen en het 3D-model is de beschikbare ruimte bepaald. Het beschikbare vloeroppervlak is $20,75 \text{ m}^2$ en de beschikbare ruimte is $51,9 \text{ m}^3$. Volgens de verstrekte technische informatie heeft de Varnebank 100 m^3 aan dieseltanks.

volgens het model zijn er voor de Varnebank verschillende opties die voldoen aan de ingevoerde eisen. Motoren op LNG, ammoniak en methanol zijn allemaal een optie. Batterijen en brandstofcellen voldoen ook aan alle gestelde eisen.

Een oplossing die op dit moment kan worden geïmplementeerd is batterijen. Er is gekozen om 2 hoge packs en 11 verticale packs van Corvus Energy te gebruiken. Dit komt neer op een capaciteit van 1862 kWh. Met het 3D-model is aangetoond dat het daadwerkelijk past en stabiliteitsberekeningen laten zien dat het schip nog steeds stabiel en veilig is met de nieuwe aandrijving.

Twee elektromotoren van 110 kW en een toerental van 1000 rpm met afmetingen $1,315 \times 0,508 \times 0,852$ meter zijn onderdeel van de nieuwe configuratie. Dit betekent dat het totale motorvermogen 220 kW bedraagt.

De gekozen configuratie past in het 3D model, waarmee het model is gevalideerd. Ook is het model geverifieerd met behulp van verschillende testen. Hiermee wordt geconcludeerd dat het model een goede inschatting geeft over welke alternatieve aandrijving geschikt is voor een vergelijkbare sleepboot. De validatie is enkel uitgevoerd voor een schip dat niet meer een slepend operationeel profiel heeft. Er kan dus niet met zekerheid gezegd worden dat het model op grotere schaal voor een ander operationeel profiel ook werkt.

Lijst van figuren

2.1	Varnebank, door Jaap Klaasman	3
2.2	Voorbeeld van een projectaanpak (Li e.a., 2012)	6
2.3	Projectaanpak voor dit BEP project	7
2.4	Voorbeeld van een keuzemodel (Pohekar en Ramachandran, 2004)	8
2.5	Kengetallen van de milieubarometer over de milieubelasting van een school (Stimular, g.d.)	11
2.6	Vergelijking Varnebank met Holtrop en Mennen	12
3.1	Verschillende productieprocessen van methanol (Harmsen, 2021)	17
3.2	Energiedichtheden van de verschillende brandstoffen	19
3.3	Batterij (Wu en Bucknall, 2016)	21
3.4	Mogelijke opties voor verduurzaming	22
4.1	Het aandrijvingssysteem met een verbrandingsmotor op diesel	24
4.2	Het aandrijvingssysteem met een verbrandingsmotor op groene methanol	25
4.3	Het aandrijvingssysteem met een verbrandingsmotor op LNG	25
4.4	Het aandrijvingssysteem met een verbrandingsmotor op ammoniak	26
4.5	Het aandrijvingssysteem met brandstofcellen op waterstof	26
4.6	Het aandrijvingssysteem met lithium batterijen	27
4.7	Flowchart van het model	27
4.8	Typische spanning elektromotor (Lefevre e.a., 2018).	29
4.9	Waardes voor A_1 voor verschillende dieselmotoren (de Vos en Stapersma, 2015).	31
4.10	Waardes voor B_1 voor verschillende dieselmotoren (de Vos en Stapersma, 2015).	31
4.11	Waardes voor C_1 voor verschillende dieselmotoren (de Vos en Stapersma, 2015).	32
4.12	Trendlijnen voor het specifiek volume, vloeroppervlak en gewicht voor verbrandingsmotoren op diesel	34
4.13	Invoerveld model	45
4.14	Uitvoerveld model	47
4.15	Benodigde ruimte verschillende aandrijvingssystemen	49
4.16	Benodigde ruimte verschillende brandstoffen	50
4.17	Uitstoot vervuilende gassen van verschillende brandstoffen	51
5.1	Input parameters	53
5.2	Romp Varnebank	55
5.3	Romp Varnebank	55
5.4	Beschikbare ruimte in de machinekamer	57
5.5	NO_x regels IMO („IMO’s work to cut GHG emissions from ships”, 2019)	60
5.6	Uitvoer Varnebank	62
5.7	Keuzebeschrijving	63
5.8	Indeling machinekamer	66
5.9	Vooraanzicht machinekamer	67
5.10	3D machinekamer	67

Lijst van tabellen

2.1	Benodigde parameters alternatieve brandstoffen en aandrijvingssystemen.	9
3.1	Gegevens LNG van onder andere:(Peninsula Petroleum, 2021)	16
3.2	Gegevens ammoniak van onder andere: (van Duijn, g.d.),(PubChem, g.d.)	17
3.3	Gegevens Methanol van onder andere: (van Duijn, g.d.)	18
3.4	Gegevens Waterstof van onder andere: (van Duijn, g.d.),(PubChem, g.d.)	19
3.5	Vergelijking van de verschillende alternatieve brandstoffen.	19
4.1	Volumefactoren verbrandingsmotoren ten opzichte van dieselmotoren	33
4.2	Kengetallen voor de verschillende generatoren	35
4.3	Kengetallen voor batterijen en brandstofcellen	36
4.4	Kengetallen voor verschillende brandstoffen inclusief tanks	37
4.5	Uitstoot bij verschillende brandstoffen	38
4.6	De kengetallen van de kosten van de machines	40
4.7	De kengetallen van de kosten van de brandstoftanks of batterijen	40
4.8	Berekening verschillende vermogens voor alleen hoofdsysteem en hoofdsysteem met hulpsysteem	41
4.9	Hypothesetesten	48
4.10	Uitstoot vervuilende gassen van verschillende brandstoffen	51
5.1	Input Grashopper	55
5.2	Output Grashopper	56
5.3	Machinekamer Varnebank	58
5.4	Massa gegevens Varnebank	58
5.5	Huidige uitstoot Varnebank	59
5.6	Indicatie huidige brandstofkosten per trip	61
5.7	Vergelijking mogelijke oplossingen (McKinlay e.a., 2021)	64
5.8	Gegevens Corvus Batterijen	65
5.9	Stabiliteitsgegevens Varnebank 1975	68
5.10	Stabiliteit basis conditie	70
5.11	Afmetingen batterijen	70
5.12	Gegevens Elektromotor	70
5.13	Nieuwe berekening in batterij conditie	71
7.1	Taakverdeling	87

Nomenclatuur

Dit is de nomenclatuur, meerdere variabelen en definities die gebruikt worden in het verslag zullen hier worden benoemd.

Greek variables ..

η	Rendement	–
γ	Specifiek gewicht	kg/m^3
λ_R	Lengte / Diameter ratio	–
ν	Specifiek volume	m^3/kg
ν_t	Typische omtreksnelheid	m/s
ρ	Dichtheid	kg/m^3
τ_{EM}	Typische spanning elektromotor	V

Other variables ..

∇	Displacement	m^3
A	Oppervlakte	m^2
$A1$	Verhouding binnen en buiten afmeting elektromotor	–
$B1$	Verhouding binnen en buiten afmeting elektromotor	–
BM	Metacentrum tot Buoyancy	m
C	Capaciteit	kWh
$C1$	Verhouding binnen en buiten afmeting elektromotor	–
C_m	Zuigersnelheid	m/s
D_B	Diameter cilinders	m
D_R	Diameter rotor	m
f_E	Emissiefactor	–
GM	Metacentrum hoogte	m
$H_{core,DE}$	Hoogte diesel motor	m
H_{EM}	Hoogte elektromotor	m
hs	hulpsysteem	–
i	Aantal cilinders	–
I_{yy}	Traagheidsmoment	m^4
k	Motorconstante	–

k	kengetal	<i>variabel</i>
k	kosten	euro
KB	Kiel tot Buoyancy	m
KG	Kiel tot zwaartepunt	m
L_R	Lengte rotor	m
L_S	Slaglengte cilinders	m
$L_{core,DE}$	Lengte diesel motor	m
L_{EM}	Lengte elektromotor	m
m	massa	kg
n	Toerental	rpm
P	Vermogen	W
P_{eff}	Effectieve vermogen	kW
p_{me}	Mean effective pressure	Pa
R_{tot}	Weerstand totaal	N
s	Ratio rotor en stator	–
T	Diepgang	m
t	Tijd	s
t_s	Vaartijd	s
V	Volume	m^3
v	Snelheid	m/s
W	Energiedichtheid	J/m^3
$W_{core,DE}$	Breedte diesel motor	m
W_{EM}	Breedte elektromotor	m

Inhoudsopgave

Voorwoord	i
Samenvatting	ii
Lijst van figuren	iv
Lijst van tabellen	v
1 Inleiding	1
2 Probleemdefinitie & Aanpak	2
2.1 Algemeen Probleem.	2
2.1.1 Algemene probleembeschrijving.	2
2.1.2 Algemeen plan van eisen.	3
2.2 Case study	3
2.2.1 Probleembeschrijving van de Varnebank.	3
2.2.2 Programma van eisen Varnebank	4
2.3 De deelvragen van het onderzoek.	5
2.4 Uitdagingen.	5
2.5 Projectaanpak.	6
2.5.1 Algemene aanpak van een project	6
2.5.2 Plan van aanpak	8
2.5.3 Mogelijke problemen en oplossingen	13
3 Mogelijke alternatieve brandstoffen en aandrijvingssystemen	15
3.1 Alternatieve brandstoffen en hun eigenschappen.	15
3.1.1 LNG	15
3.1.2 Ammoniak	16
3.1.3 Methanol	17
3.1.4 Waterstof.	18
3.1.5 Overzicht van de alternatieve brandstoffen	19
3.2 Alternatieven voor verbrandingsmotor	20
3.2.1 Elektrische aandrijving.	20
3.2.2 Brandstofcellen	20
3.2.3 Batterijen	21
4 Algemene methode alternatief aandrijvingssysteem	23
4.1 Configuraties van de aandrijvingssystemen.	23
4.1.1 Aandrijvingssystemen met verbrandingsmotoren	23
4.1.2 Aandrijvingssystemen met elektromotoren	26
4.2 Werking van het model	27
4.3 Kengetallen aandrijvingssystemen	28
4.3.1 Kengetallen diesel- en elektromotoren.	28
4.3.2 Kengetallen verbrandingsmotoren alternatieve brandstof	32
4.3.3 Kengetallen generatoren, batterijen en brandstofcellen	33
4.4 Kengetallen brandstoffen	36
4.5 Kengetallen emissies	37
4.5.1 Bepalen van emissies	37
4.5.2 Emissies in het model	38

4.6	Kengetallen kosten	39
4.6.1	Kapitaalkosten	39
4.6.2	Brandstofkosten	40
4.7	Van kengetallen naar model.	41
4.7.1	De vermogens in de berekeningen	41
4.7.2	Ruimte, gewicht en kosten	42
4.7.3	Voldoet de uitvoer aan de eisen?	44
4.8	Gebruik van het model	44
4.8.1	Invoer van het model	44
4.8.2	Uitvoer van het model	46
4.9	Verificatie model	47
4.9.1	Modelgedrag verkennen	47
4.9.2	Hypothesetest	47
4.9.3	Betrouwbaarheidsintervallen	48
4.9.4	Grafische vergelijkingen van de gegevens	49
4.9.5	Conclusie van de verificatie	52
5	Case study Varnebank	53
5.1	Invoerparameters	53
5.1.1	Operationeel profiel	54
5.1.2	Beschikbare ruimte	57
5.1.3	Uitstoot	59
5.1.4	Benodigde motorgegevens.	60
5.1.5	Brandstofkosten	61
5.2	Uitvoer en keuze Varnebank	61
5.2.1	Keuze voor de Varnebank	62
5.3	Keuze uitwerken en valideren	65
5.4	Stabiliteitscontrole	68
5.4.1	Basis GM.	68
5.4.2	GM met batterijen	70
5.4.3	Opgestelde eisen behaald	71
6	Discussie	73
6.1	Validiteit	73
6.2	Vervolgonderzoeken	74
7	Conclusie & Aanbeveling	75
	Referenties	82
	Bijlagen	82

1

Inleiding

Maassluis is een havenstadje gelegen aan de Scheur, een zijtak van de delta van de Rijn en de Maas, vlakbij het havengebied van Rotterdam. Maassluis heeft te maken met leegloop en om jonge mensen en ondernemingen opnieuw aan te trekken heeft Maassluis besloten om het roer volledig om te gooien. Duurzaamheid en ontwikkeling spelen een belangrijke rol bij deze transformatie. Ook de historische vloot van zeeslepers, gelegen in Maassluis, moet geloven aan deze veranderingen. Zwarte rook en zware diesels passen namelijk niet in het plaatje van de toekomst. Daarom is het tijd om deze slepers om te bouwen naar groene schepen, waarbij het historische karakter van het schip zo goed mogelijk behouden blijft.

Dit rapport beschrijft een methode om sleepboten te verduurzamen. Dit wordt gedaan zodat de oude vloot met slepers in Maassluis, maar ook daarbuiten, in de toekomst nog mogen varen. Eerst stelt het rapport het model op en legt het de berekeningen uit, daarna past het deze methode van verduurzaming toe op een case-study. Hierbij kijkt het of en hoe de historische sleepboot de Varnebank kan worden geretrofit, zodat deze minder schadelijke emissies uitstoot. Van het ontwerp wordt uiteindelijk ook een 3D-model gepresenteerd.

Hoofdstuk 2 beschrijft het probleem, waarbij het een algemeen en een specifiek programma van eisen opstelt. Ook geeft het het plan van aanpak. Hoofdstuk 3 onderzoekt mogelijke alternatieven voor zowel de brandstof als het aandrijvingsysteem. Hoofdstuk 4 bevat het algemene model waarmee onderzocht kan worden of bepaalde configuraties kunnen worden toegepast op een bepaald schip. In hoofdstuk 5 volgt een beschrijving van het toepassen van het model op de Varnebank, inclusief een uiteindelijk ontwerp. De discussie over de resultaten is te vinden in hoofdstuk 6, waarna in hoofdstuk 7 de conclusie en enkele aanbevelingen volgen.

2

Probleemdefinitie & Aanpak

Dit hoofdstuk legt uit welk probleem er is. Ook presenteert het een algemeen programma van eisen. Vervolgens wordt het probleem geschetst dat specifiek voor de case study geldt, waarbij ook een gedetailleerd programma van eisen wordt gegeven. Aan de hand van de eisen en de uitdagingen wordt vervolgens de projectaanpak bepaald.

2.1. Algemeen Probleem

In deze paragraaf wordt eerst het probleem uitgelegd. Vervolgens wordt het het algemene programma van eisen dat volgt uit deze probleemstelling gepresenteerd.

2.1.1. Algemene probleembeschrijving

Sinds de mens is begonnen op grote schaal fossiele brandstoffen te verbranden om machines aan te drijven, is het wereldwijde klimaat aan het veranderen (Intergovernmental panel on climate change, 2021). Ook stoten deze activiteiten een grote hoeveelheid stoffen uit, zoals NO_x , CO, CO_2 en fijnstof. Deze emissies zijn schadelijk voor mens en milieu (Sydbom e.a., 2001).

Om deze redenen is het van belang om de schadelijke uitstoot van schepen te verminderen door ze te verduurzamen. Maar wanneer is een schip eigenlijk duurzaam?

Je kan betogen dat er naar de hele life-cycle moet worden gekeken van elk product in het schip. Dit is echter een te groot en breed onderwerp voor dit onderzoek. Daarom beperkt dit verslag zich tot de schadelijke uitstoot van de nationale emissies die door het rapport EMS-protocol van de Rijksoverheid zijn vastgesteld (Hulskotte e.a., 2012). Hieronder vallen NO_x , CO, CO_2 , SO_2 en PM10 (fijnstof) ten gevolge van de voortstuwing van het schip met een verbrandingsmotor. Life-cycle effecten van producten en eventuele schadelijke effecten van producten op het milieu worden hierin dus niet meegenomen. Dit verslag kijkt alleen naar wat er uit de uitlaat komt door de voortstuwing van het schip.

Nieuw te bouwen schepen kunnen speciaal worden ontworpen om geen schadelijke stoffen uit te stoten, maar dit is over het algemeen lastiger bij bestaande schepen, doordat er rekening moet worden gehouden met de bestaande constructies en de beschikbaar gestelde ruimte en het gewicht van de installaties. Zo kan het zijn dat de voortstuwder niet aangepast kan worden op een ander operationeel profiel, dat de aandrijver moet worden gekoppeld aan de bestaande schroefas of dat de machinekamer simpelweg niet groter kan worden gemaakt. Toch willen we ook deze schepen verduurzamen. In dit verslag wordt enkel gefocust op sleepboten, ongeacht of deze nog slepen of niet.

Deze sleepboten hebben voor de verduurzaming (de "retrofit") een bepaald operationeel profiel. Dit operationele profiel kan door de jaren heen behoorlijk veranderd zijn. Daarom is het belangrijk dat het nieuwe aandrijvingssysteem een vermogen en een actieradius heeft dat past bij het huidige operationeel profiel.

Dit operationele profiel kan dus wel anders zijn dan toen het schip origineel werd ontworpen.

Bijvoorbeeld omdat zijn functie in de loop van de tijd is veranderd. Daarnaast kan het voorkomen dat het operationele profiel aangepast moet worden vanwege beperkingen van het nieuwe systeem. Bijvoorbeeld omdat er simpelweg te weinig ruimte is om een aandrijving te plaatsen die hetzelfde vermogen levert. De ruimte in een al gebouwd schip kan niet tot nauwelijks worden aangepast en daarom kan deze randvoorwaarde worden gezien als een harde eis.

Daarnaast moet het schip veilig zijn. Het moet zonder onredelijke risico's zijn functie(s) kunnen uitvoeren. Een onderdeel hiervan is dat de stabiliteit van het schip voldoende moet zijn. Om dit te garanderen, moet het GM van het alternatieve ontwerp minimaal 0,15 meter zijn (IMO, 2008). Met formule 2.1.1 kan de GM berekend worden (Moore, 2010):

$$GM = KB + BM - KG$$

Er is dus nog niet veel onderzoek gedaan naar het verduurzamen door middel van retrofitten van kleine schepen, zoals sleepboten. In het dit onderzoek wordt hier een oplossing voor gezocht.

2.1.2. Algemeen plan van eisen

Deze subparagraaf benoemt het algemeen plan, dat voortkomt uit de algemene probleemstelling hierboven.

- Het nieuwe aandrijvingssysteem moet een vermogen hebben dat past bij het huidige operationele profiel.
- Het GM van het nieuwe ontwerp mag niet groter zijn dan 0,15 meter (IMO, 2008).
- Het nieuwe ontwerp moet passen in de beschikbaar gestelde ruimte.
- De reductie van de hierboven beschreven schadelijke emissies moet voldoen aan de interne of externe (wetgeving) eisen. Dit verschilt per schip.

2.2. Case study

In deze paragraaf wordt de probleemstelling van de case-study "De Varnebank", een historische zeesleper uit Maassluis, beschreven. Vervolgens wordt toegelicht wat het project vanuit de opdrachtgever inhoudt en wat de belangrijkste uitdagingen zijn die hierbij komen kijken. Ook wordt een programma van eisen specifiek voor dit schip gepresenteerd. In figuur 2.1 is het schip de Varnebank zichtbaar.



Figuur 2.1: Varnebank, door Jaap Klaasman

2.2.1. Probleembeschrijving van de Varnebank

Naar aanleiding van de verduurzamingsplannen van Maassluis is de eigenaar van de Varnebank, een historische zeesleper uit Maassluis, geïnteresseerd in verduurzaming. De Varnebank is gebouwd in

1975 door B.V. Scheepswerfen v/h H.H. Bodewes in Millingen aan de Rijn. Na jarenlang gewerkt te hebben als zeesleper, ligt de Varnebank nu in Maassluis, vanuit waar ze af en toe nog een korte pleziervaart door het Rotterdamse havengebied maakt. De Varnebank is ongeveer 34 meter lang, heeft een breedte van 9,5 meter en een diepgang van 3,8 meter. Het schip is uitgerust met twee dieselmotoren van 1500 kW en twee Voith-Schneider propellers die naast elkaar geplaatst zijn (Sleep & Duwvaart, 2022). Meer informatie over Voith-Schneider propellers is te vinden in bijlage B. Tegenwoordig sleept het schip niet meer, waardoor het benodigde vermogen sterk is afgenomen. De verduurzaming richt zich op het operationele profiel waarbij niet meer gesleept wordt.

Een extra uitdaging van de Varnebank is dat het een schip met historische waarde is, die aan de buitenkant niet moet worden aangetast. Dat houdt dus ook in dat de Voith-Schneider propellers behouden moeten blijven. Daarnaast wil de eigenaar dat de verduurzaming op korte termijn doorgevoerd wordt, namelijk binnen twee jaar. Haar operationeel profiel is wel significant aangepast, doordat het tegenwoordig niet meer sleept en alleen nog maar vrij vaart.

2.2.2. Programma van eisen Varnebank

In deze paragraaf wordt het programma van eisen voor de Varnebank opgesteld. Dit programma van eisen is gebaseerd op het algemene plan van eisen en op basis van wat toegevoegde eisen van de eigenaar. In het algemene plan van eisen wordt genoemd dat het ontwerp binnen de beschikbaar gestelde ruimte moet passen. Deze beschikbaar gestelde ruimte beperkt zich voor dit schip voornamelijk tot de machinekamer. Hierin zal de aandrijving van het schip aangepast worden. De originele Voith-Schneider propellers maken de boot uniek en daarom moet de aandrijving hierop aangesloten kunnen worden. Ook moet in de beschikbaar gestelde ruimte rekening worden gehouden met een back-up tijdens de test-fase voor het geval dat er iets mis gaat. Uiteraard moet het aandrijvingssysteem voldoen aan het operationele profiel. Voor de Varnebank is dit dat het niet-slepend zes uur moet kunnen varen met een snelheid van acht knopen. Verder moet de uitstoot van schadelijke emissies voldoen aan de regelgeving van IMO. Dit betekent dus een mindering van 75% voor stikstofoxiden, zwaveloxiden en fijnstof en minimaal 70% reductie van CO₂ („IMO's work to cut GHG emissions from ships”, 2019). Verder gaf de eigenaar aan niet onder commerciële regelgeving te willen vallen, dus zal het schip niet meer dan twaalf personen mogen vervoeren. Ook zal het schip voornamelijk varen op binnenwateren. Hieronder worden alle eisen kort samengevat.

Het programma van eisen is:

- Historische onderdelen van het schip moeten bewaard blijven. Voor de Varnebank zijn dit de Voith-Schneider propellers.
- De Varnebank moet tenminste zes uur aan één stuk kunnen varen met een snelheid van acht knopen.
- Tijdens de test-fase van een nieuw aandrijvingssysteem moet er ten alle tijden een back-up methode zijn om thuis te kunnen komen.
- De Varnebank wordt enkel ingezet voor de pleziervaart en mag maximaal twaalf gasten meenemen.
- De aanpassingen aan de Varnebank beperken zich tot de aandrijving van het schip. Hierbij moet het uiterlijk en daarmee een groot deel van de historische waarde behouden blijven.
- Het ontwerp moet minstens 75% minder stikstofoxiden, zwavel en fijnstof en minstens 70% minder CO₂ uitstoten („IMO's work to cut GHG emissions from ships”, 2019) dan tijdens het varen in de huidige situatie.
- Het ontwerp moet uitvoerbaar zijn binnen twee jaar.

Er wordt aangenomen dat alle alternatieve opties op de Voith-Schneider propellers aangesloten kunnen worden zonder problemen. In werkelijkheid is het mogelijk dat er een tandwielkast moet worden toegevoegd. Deze is zeer waarschijnlijk veel kleiner dan de motor en zal verwaarloosd worden. Ook wordt er aangenomen dat het schip zes uur aan een stuk met acht knopen vaart. In de praktijk zal dit echter zelden voorkomen, omdat er gedurende deze zes uur niet altijd op acht knopen gevaren zal worden.

2.3. De deelvragen van het onderzoek

Om tot een oplossing te komen voor het verduurzamen van de Varnebank moet eerst gekeken worden naar een algemene aanpak voor de verduurzaming van sleepboten. Hiervoor moeten alternatieve oplossingen bekeken worden voor de voortstuwing. Wanneer een methode is ontwikkeld waarmee een alternatieve oplossing kan worden gekozen, wordt deze toegepast op de Varnebank. Vervolgens wordt dit uitgewerkt in een nieuw ontwerp van de Varnebank. Als dit ontwerp voldoet aan zowel het algemene als het specifieke plan van eisen kan het project als geslaagd worden beschouwd. Het project is opgebouwd uit de volgende deelvragen:

- Wat zijn op dit moment mogelijke alternatieve brandstoffen en aandrijvingssystemen en wat zijn de eigenschappen van deze alternatieven?
- Hoe kan een algemene methode worden ontwikkeld om te testen of een alternatief aandrijvingssysteem gebruikt kan worden?
- Wat is het benodigde vermogen en de bijbehorende hoeveelheid energie voor het operationele profiel van de Varnebank?
- Welke alternatieve aandrijvingssystemen zijn technisch haalbaar voor de Varnebank en welke is het meest geschikt voor de Varnebank?
- Hoe kan de beste oplossing geïmplementeerd worden in de Varnebank?
- Geeft het rekenmodel een goede indicatie voor de gekozen oplossing in de Varnebank?

2.4. Uitdagingen

Allereerst hebben begrippen als duurzaamheid en historische waarde voor verschillende mensen een andere betekenis. Dit maakt het lastig om harde eisen op te stellen en te definiëren wanneer een oplossing geslaagd of de juiste is. Voor het begrip duurzaamheid is in de algemene probleembeschrijving benoemd wat dit voor dit project specifiek inhoudt. Om historische waarde te definiëren moet met verschillende partijen overlegd worden om zo tot een compromis te komen waar iedereen tevreden mee is. Een andere belangrijke uitdaging van dit project is om een algemeen plan van verduurzaming te maken dat toegepast kan worden op andere al bestaande sleepboten, voordat er naar een specifiek ontwerp voor onze case-study de Varnebank wordt gekeken. Hierbij is het belangrijk om te kijken of de alternatieve opties aan alle eisen voldoet. Later moet ook nog worden gekeken of dit voldoet aan eisen van de eigenaar met betrekking tot historische waarde, geld en tijd.

Een laatste uitdaging is het maken van een ontwerp voor de case-study. Aangezien het gaat om een historisch schip, is de beschikbare informatie beperkt en verouderd. Zo zijn er alleen nog tekeningen van het algemeen plan en het lijnenplan van het spantenraam gevonden. Hiermee moet een 3D-model worden gemaakt, om een inschatting van de weerstand te maken en daarmee het benodigde vermogen te bepalen. Dit moet worden gedaan, omdat een meting doen tijdens een proeftocht niet mogelijk is.

Binnen het Bachelor Eindproject zal er moeten worden omgegaan met verschillende stakeholders. Om het project succesvol te laten verlopen is het handig om onderzoek te doen naar de manier hoe er het beste om gegaan kan worden met alle stakeholders binnen het project.

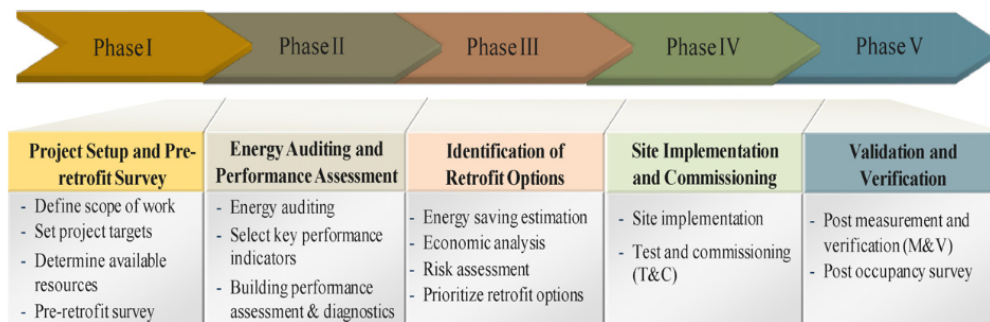
Een stakeholderstrategie-matrix kan gebruikt worden om te bepalen hoe er met verschillende stakeholders het beste omgegaan kan worden (Polonsky en Scott, 2005). Stakeholders kunnen worden onderverdeeld in vier verschillende groepen. Allereerst is er de groep met veel invloed op het project en ook veel interesse in het project. Met deze mensen moet veel overleg en communicatie plaatsvinden, zodat het project goed kan verlopen. De groep met weinig interesse, maar veel macht moeten juist zoveel mogelijk geënthousiasmeerd worden voor het project, zodat het onderzoek ook daadwerkelijk door kan gaan. De groep met veel interesse, maar weinig invloed moeten worden geïnformeerd en de laatste groep met zowel weinig invloed als weinig interesse vergt weinig extra aandacht.

2.5. Projectaanpak

In deze paragraaf wordt uitgelegd hoe een project kan worden aangepakt. Ook wordt besproken hoe het plan van aanpak om tot een ontwerp te komen dat voldoet aan het programma van eisen eruit ziet. Dit wordt weergegeven aan de hand van een stappenplan. Hiernaast wordt voor elke stap ook een inschatting gemaakt voor de benodigde tijd en worden de taken verdeeld binnen de groep. Tenslotte worden eventueel te verwachten knelpunten en maatschappelijk onwenselijke aspecten ten gevolge van dit project uitgelicht en worden hiervoor van tevoren oplossingen bedacht.

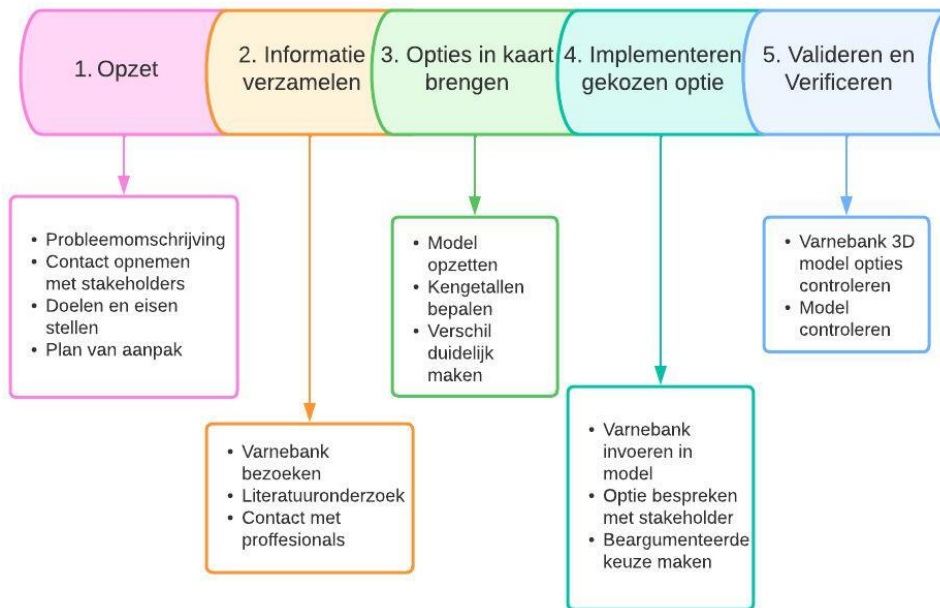
2.5.1. Algemene aanpak van een project

Om te weten te komen hoe een project als dit kan worden aangepakt kan er worden gekeken naar de uitvoering van algemene verduurzamingsprojecten. Zoals het project van de University of Wollongong over het retrofitten van gebouwen (Li e.a., 2012). Hierin wordt duidelijk een methode gevolgd om tot het gewenste resultaat te komen. Het project is opgedeeld in vijf fasen. De eerste fase is de opzet van het project. Hierbij wordt er gekeken naar wat momenteel de stand is. In dit geval is dit het vaststellen hoe een gebouw erbij staat en in dit project zal dit een schip zijn. Er wordt gepraat met de eigenaar over eisen en wat precies de omvang van het project is: wat is wel onderdeel van het project en wat niet. De tweede fase betreft het verzamelen van informatie over het energieverbruik. Met behulp van data kan er meer gezegd worden over de huidige status en mogelijke verbeteringen. In de derde fase van het project worden daadwerkelijk opties in kaart gebracht. Hierbij wordt er gekeken naar de energie, maar ook naar de economische aspecten en risico's die een optie met zich meebrengt. De vierde fase gaat over het implementeren van de gekozen oplossing. Bij dit project zal dit het implementeren van de case-study zijn. Ook worden er in deze fase testen uitgevoerd. De laatste fasen betreft de verificatie en validatie. Om zeker te weten dat de oplossing in de praktijk werkt zoals bedoeld was en om in te kunnen zien of de oplossing in de praktijk ook echt werkt. In figuur 2.2 zijn de fasen van dit project visueel weergegeven.



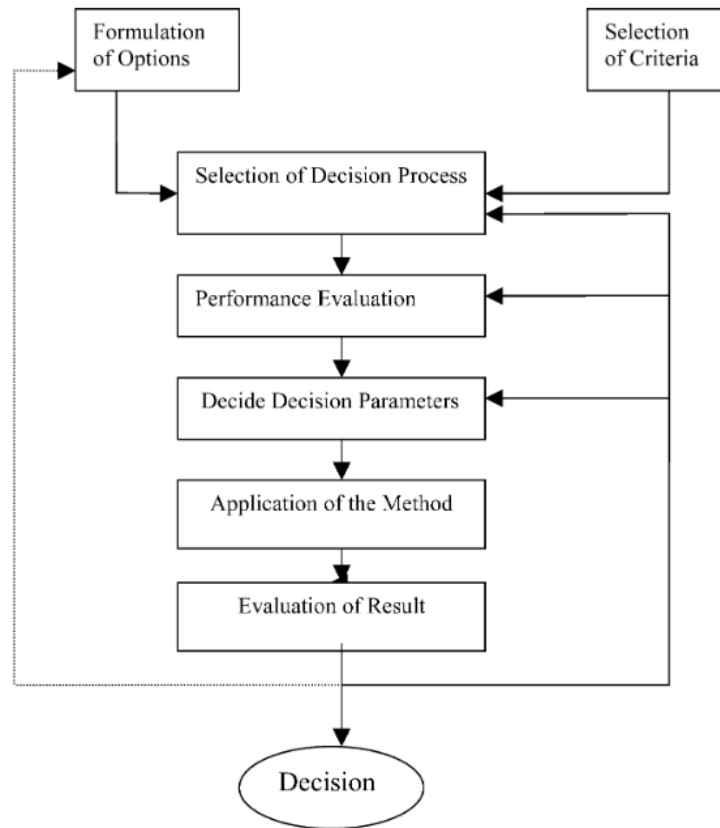
Figuur 2.2: Voorbeeld van een projectaanpak (Li e.a., 2012)

De aanpak van bovenstaand project sluit goed aan bij dit onderzoek. Zo moet er eerst informatie verzameld worden over het schip van de case-study en wat precies de eisen zijn van de eigenaar. Ook regels die bijvoorbeeld de overheid oplegt zijn een belangrijke vorm van eisen. Hierna moeten de verschillende oplossingen in kaart worden gebracht en is het handig om hier informatie over te verzamelen. Uit de verschillende opties die onderzocht zijn moet uiteindelijk een keuze gemaakt worden welke geïmplementeerd wordt in fase vier. Door de gekozen oplossing uit te werken wordt het model gevalideerd, omdat er gecheckt wordt of de gekozen oplossing ook daadwerkelijk kan worden ingebouwd. Dit wordt gedaan in fase vijf. In figuur 2.3 zijn alle fasen van dit project duidelijk weergegeven.



Figuur 2.3: Projectaanpak voor dit BEP project

Keuzes hangen af van de mensen die iets te maken hebben met het project. In projecten als dit zijn er meerdere criteria die invloed hebben op een beslissing. Dit heet Multi Criteria Decision Making (MCDM). Er zijn meerdere van dit soort modellen mogelijk (Pohekar en Ramachandran, 2004). Wat al deze modellen met elkaar gemeen hebben is het maken van een keuze door verschillende criteria te ranken op basis van voorkeur of belang. Ook wordt hierin rekening gehouden met het feit dat er meerdere mensen bepaalde keuzes maken. In figuur 2.4 is een schematische weergave te zien van hoe een keuzemodel gebruikt kan worden in projecten. De invoer voor de beslissing zijn de criteria waar een beslissing over gaat en de mogelijke oplossingen. Vervolgens kan een gekozen model hierop worden toegepast. Hierin kunnen ook gewichten worden toegevoegd, zodat het ene criterium belangrijker is dan het andere. Vervolgens kan op basis van alle criteria en de voorkeuren van de persoon die de keuze maakt bepaald worden wat de beste oplossing is.



Figuur 2.4: Voorbeeld van een keuzemodel (Pohekar en Ramachandran, 2004)

In dit project zal geen gebruik worden gemaakt van een van de methodes die genoemd zijn in het onderzoek van Pohekar en Ramachandran uit 2004. Dit omdat hierbij onderscheid wordt gemaakt in prioriteit tussen verschillende aspecten. In dit project worden alle aspecten die in de eisen staan ook daadwerkelijk beschouwd als harde eisen waar sowieso aan voldaan moet worden. Later kan nog op basis van persoonlijke voorkeur van de eigenaar gekozen worden tussen verschillende oplossingen die aan alle eisen voldoen. De invoer voor de keuze die uiteindelijk door de eigenaar gemaakt wordt bestaan wel uit de onderdelen uit bovenstaand onderzoek. De verschillende criteria zullen bestaan uit de eisen betreft emissies, ruimte en operationeel profiel. De verschillende opties waaruit gekozen kan worden zullen moeten voldoen aan deze criteria. Hier komen wel andere zaken zoals kosten kijken, waarbij de persoonlijke voorkeur van de eigenaar natuurlijk een grote rol speelt.

2.5.2. Plan van aanpak

In deze subparagraaf wordt stapsgewijs beschreven wat het plan van aanpak is om het project succesvol uit te voeren. Hierbij wordt uitgelegd waarom voor dit plan van aanpak is gekozen.

Probleembeschrijving

De eerst stap van het project is de probleemdefinitie. Dit behoort tot fase één. Hierbij is het belangrijk dat de inzending van de opdrachtgever aandachtig gelezen wordt en er contact opgenomen wordt met alle betrokkenen. Hierna is het handig om alvast in te lezen in de relevante onderwerpen en voor te bereiden op de komende gesprekken met alle betrokkenen.

Aan de hand van een gesprek met tussenpersoon Hans Visser worden de plannen voor Maassluis en daarmee de aanleiding tot dit project duidelijk. Vervolgens wordt het schip de Varnebank bezocht op uitnodiging van de opdrachtgever. Na overleg met de opdrachtgever wordt het doel van het project duidelijk en kan het programma van eisen worden opgesteld. Ten slotte wordt er nog gesproken met

initiatiefnemer Luuk Vroombout over de plannen voor de gehele historische vloot in Maassluis. Aan de hand van alle gesprekken met de stakeholders is het duidelijk wat het doel van het project is en zijn de deelvragen opgesteld. De volgende stap is het verder inlezen in alle relevante onderwerpen. Dit wordt gedaan aan de hand van een literatuurstudie. Uit de literatuurstudie blijkt wat voor verschillende onderzoeken en oplossingen al bedacht zijn voor soortgelijke problemen.

Met al deze voorkennis kan een plan van aanpak gemaakt worden voor het uitvoerende deel van het project.

Alternatieve brandstoffen en aandrijvingssystemen

Om de deelvragen te kunnen beantwoorden is het als eerste belangrijk om uit te zoeken welke alternatieve brandstoffen momenteel in de sector besproken worden als oplossing voor verduurzaming. Het verzamelen van informatie behoort tot de tweede fase van het project. Hierin zullen eerdere onderzoeken uit literatuur worden gezocht. Ook zullen gesprekken worden gevoerd met onderzoekers van de TU Delft, zoals Peter de Vos en Lindert van Biert. Verder is er een aantal lezingen vanuit de TU georganiseerd over alternatieve brandstoffen en toepassingen in de maritieme techniek. Zo vond er op 5 april 2023 een lezing vanuit IMarEST plaats: 'The fuel transition of Maersk to Methanol for 18 large container vessels' (Stråby, 2023).

Voor alle opties die onderzocht worden moeten ook minstens de parameters in tabel 2.1 worden bepaald. Zodra deze waardes bekend zijn kan er een inschatting worden gedaan of een oplossing ook daadwerkelijk toepasbaar is op een bepaald schip. Hiermee wordt vervolgens de eerste deelvraag beantwoord, die luidt: Wat zijn op dit moment mogelijke alternatieve brandstoffen en aandrijvingssystemen en wat zijn de eigenschappen van deze alternatieven?

Tabel 2.1: Benodigde parameters alternatieve brandstoffen en aandrijvingssystemen.

Categorie	Alternatieve brandstoffen	Alternatieve aandrijvingssystemen
Parameters	Energiedichtheid	Vermogensdichtheid
	Emissies	Afmetingen
	Opslagmethode en -eigenschappen	Gewicht
		Kosten
		Rendement

Algemene methode

Nadat alle informatie beschikbaar is over de alternatieve brandstoffen en aandrijvingssystemen kan een algemene methode worden bepaald om hier een keuze in te maken. Het is van belang dat de methode toepasbaar is op verschillende sleepboten zoals de Varnebank maar ook sleepers met een ander operationeel profiel en andere afmetingen. Om te kijken welke methode toepasbaar is op ons vraagstuk wordt er eerst gekeken in de literatuur naar onderzoeken die al zijn uitgevoerd.

Een Noors onderzoek uit 2021 kijkt met behulp van een simulatie naar welk voortstuwingssysteem het meest geschikt is voor een kleine ferry in Noorwegen (Balestra en Schjølberg, 2021). Het operationeel profiel hiervan is anders, maar het onderzoek vat goed samen wat de voor- en nadelen zijn van waterstof in ICE-generatoren verbranden of brandstofcellen gebruiken. Dit doet het deels op basis van wat er al in andere schepen is ingebouwd of binnenkort ingebouwd gaat worden, waarmee het functioneert als een samenvattende studie.

Het onderzoek kijkt eerst uitvoerig naar het operationeel profiel van de ferry. Daarbij is één specifieke dag gekozen, die volgens de onderzoekers model staat voor een gemiddelde winterdag. Vervolgens onderzoekt het meerdere scenario's, waarin het vermogen aan brandstofcellen en batterijen wordt gevarieerd. Er wordt gekeken welk scenario het best bij het operationeel profiel aansluit.

Tijdens dit onderzoek beschrijft het rapport ook hoe en waarom bepaalde technische keuzes gemaakt worden. Het type schakelbord en het soort elektriciteit (voltage, gelijk- of wisselstroom) hebben namelijk invloed op de vereisten aan het systeem, de elektrische verliezen en zaken als het gewicht.

Een ferry is niet hetzelfde als een sleepboot, maar in bepaalde opzichten komt het operationeel profiel

wel overeen. Zo hebben beiden grote verschillen tussen hun piekvermogen en gemiddelde vermogen, anders dan bijvoorbeeld het gemiddelde vrachtschip. Dat betekent dat peakshaving met behulp van batterijen ook erg nuttig kan zijn voor een sleepboot.

Een algemenere methode is de Milieubarometer (Stimular, 2023), een door Stichting Stimular ontwikkelde tool die sinds 1999 uitgroeide van een Excelsheet tot een internetapplicatie. De tool kan gebruikt worden door grote en kleine bedrijven in alle branches om inzicht te krijgen in hun milieuprestatie, of deze voldoet aan de eisen van de overheid en wat voor eventuele maatregelen geschikt zouden zijn om deze te verbeteren.

Het principe van de barometer is als volgt: Op basis van verzamelde data van een aantal vergelijkbare bedrijven zijn voor elke branche kengetallen bepaald die een relatie aangeven tussen de eigenschappen van een bedrijf en de bijpassende milieuprestatie. Zo zijn bijvoorbeeld aan de hand van de gegevens van drie kleine bouwbedrijven de kengetallen en de gemiddelde barometer van een bouwbedrijf bepaald. Een bouwbedrijf dat inzicht wil hebben in haar milieuprestatie kan de gemiddelde barometer gebruiken om een grove schatting te maken van de oorzaak van de grootste milieubelasting. Deze oorzaak kan dan worden aangepakt. De kengetallen kunnen ook gebruikt worden door de barometer in te vullen met gegevens van het bedrijf zelf, waarmee de tool de specifieke milieubelasting van het bedrijf inschat.

Om schepen te verduurzamen zullen er aanpassingen gedaan moeten worden aan het schip. Dit botst met het behoud van historische waarde, omdat het vaak de originele onderdelen zijn die ervoor zorgen dat het schip niet erg duurzaam is. Ook voor monumenten op het land is verduurzaming nodig en daarvoor is een plan gemaakt („Routekaart verduurzaming monumenten”, 2019).

Hierin wordt voornamelijk gesproken over het verminderen van het energieverbruik van het monument. De strategie die is opgesteld heeft verschillende elementen waar rekening mee gehouden moet worden. Ten eerste kan de verduurzaming alleen worden uitgevoerd als de eigenaren van deze monumenten bereid zijn om daadwerkelijk actie te ondernemen. Ten tweede moet voor de eigenaren duidelijk zijn op welk gebied de winst te behalen is en met welke materialen en instrumenten dit bereikt kan worden. Tenslotte moet goed kunnen worden gemeten wat de verduurzaming daadwerkelijk gaat opleveren. Hierbij is een goede samenwerking essentieel.

Voor dit onderzoek is er gekozen om een model te maken in Excel, waarbij invoerwaarden gevarieerd kunnen worden. Dit wordt gedaan zodat er veel mogelijke oplossingen kunnen worden bekeken. Daarnaast is het een gebruiksvriendelijk programma waarvoor weinig voorkennis nodig is. Bij een onderzoek in Noorwegen wordt voor een specifieke oplossing ook gevarieerd met verschillende vermogens van brandstofcellen en batterijen om zo de meest optimale oplossing voor dat operationele profiel te vinden (Balestra en Schjølberg, 2021). Voor dit onderzoek worden er in de Excel-sheet ook verschillende scenario's beschouwd. Dit wordt gedaan door te kijken welke oplossingen haalbaar zijn, wanneer wordt gekeken naar eisen en randvoorwaarden. Ook worden de kosten van de verschillende mogelijkheden hierin bepaald.

Net als in het onderzoek van de Milieubarometer (Stimular, 2023), wordt een model in Excel gemaakt. Net als in dit onderzoek zal data over de verschillende duurzame opties verzameld worden, om zo kengetallen te bepalen. Een voorbeeld van deze kengetallen staat in figuur 2.5.

2. Probleemdefinitie & Aanpak

Kengetal	Gemiddeld	Range	Eenheid
elektriciteitsverbruik per vloeroppervlak	27,5	14,7 – 41,3	kWh/m ²
energie voor verwarming per gebouwinhoud	3,06	2 – 4,76	m ³ gas/m ³ *
energie voor verwarming per leerling	66	31,5 – 119	m ³ gas/leerling*
gebouwegebonden energie per vloeroppervlak	0,535	0,31 – 0,805	GJ/m ²
gebouwegebonden energie per leerling	3,9	1,9 – 5,27	GJ/leerling
Waterverbruik per leerling	2204	1371 – 4285	liter/leerling
CO ₂ emissie per leerling	252	112 – 312	kg CO ₂ /leerling

Figuur 2.5: Kengetallen van de milieubarometer over de milieubelasting van een school (Stimular, g.d.)

De kengetallen in figuur 2.5 kunnen eenvoudig worden gebruikt om de milieubelasting van elke school te schatten. Op dezelfde manier, maar dan voor schepen, geeft deze methode eenvoudig een duidelijke schatting welke duurzame oplossing voldoet aan de eisen. Het onderzoek van de Milieubarometer gebruikt maar enkele bedrijven om de kengetallen te vormen, maar dit onderzoek gebruikt meer bronnen, zodat de kengetallen algemener toepasbaar zijn. In het model kunnen alle opties duidelijk met elkaar vergeleken worden en dus behoort het model tot de derde fase van het project.

De benadering van verduurzaming van gebouwen („Routekaart verduurzaming monumenten”, 2019) met een grote historische waarde kan ook worden gebruikt voor historische zeeslepers. Ook hier is belangrijk om te weten wat de eigenaar belangrijk vindt. De eigenaar bepaald namelijk wat er uiteindelijk wel of niet wordt gedaan. Zo kan worden vastgesteld wat de eigenaar graag wil behouden en op welke onderdelen wel verduurzaamd kan worden. Verder is ook belangrijk om te weten op welke manier en met welke middelen dit gedaan gaat worden. Ook hier is een goede samenwerking de sleutel tot succes. Hiervoor zullen we spreken met de eigenaar van het schip en deze eisen en wensen kunnen ook worden ingevuld in het Excel model.

Op deze manier kan deelvraag twee worden beantwoord: Hoe kan een algemene methode worden ontwikkeld om te testen of een alternatief aandrijvingssysteem gebruikt kan worden?. De volgende deelvragen gaan over de case studie de Varnebank. Hiervoor moeten onderstaande stappen uitgevoerd worden.

Vermogen van de Varnebank

Een belangrijk gegeven van de Varnebank is het benodigde vermogen en het operationele profiel. Dit is van groot belang om te bepalen welke verduurzamingsopties kunnen worden gebruikt in de Varnebank. Om het vermogen te bepalen, wordt er gekeken in de literatuur naar onderzoeken voor het bepalen van scheepsweerstand.

Onderzoekers van de Faculty of Ocean Engineering and Ship Technology van de Gdansk University of Technology hebben op 20 mei 2020 een onderzoek gepubliceerd naar het ombouwen van een kleine (negen meter) boot van een dieselmotor tot een diesel-elektrisch systeem, met ondersteuning van (lood)accu's en zonnepanelen (Leśniewski e.a., 2020). Dit is een significant kleiner schip, met een ander operationeel profiel dan de Varnebank. Sommige afwegingen, uitdagingen en methodes zijn echter wel toepasbaar in ons onderzoek.

De onderzoekers hebben in dit onderzoek besloten om een hybride voortstuwingssysteem van een ander team in de al bestaande boot te bouwen. Het doel was om het schip zo energie-efficiënt mogelijk te maken. Daarvoor hebben ze eerst de weerstand bij verschillende snelheden gemeten met behulp van een sleepproef op de om te bouwen boot zelf. Deze methode is gekozen, omdat het waarschijnlijk de meest realistische resultaten geeft. De onderzoekers geven echter zelf aan dat het erg ingewikkeld is om de boot recht achter de sleepboot te sturen tijdens het slepen, wat meetfouten oplevert.

2. Probleemdefinitie & Aanpak

Daarnaast merken de onderzoekers op dat een groot deel van het elektrisch vermogen verloren gaat in de motor, in de aandrijving en bij de schroef. De grootte van deze verliezen moet daarom ook zo exact mogelijk ingeschat worden om tot een vereist elektrisch vermogen te komen. Dit is echter ingewikkeld, omdat deze verliezen niet altijd goed bekend zijn. De onderzoekers hebben dit daarom deels bepaald met metingen aan de boot en de componenten.

In het bovenstaande onderzoek wordt er gebruik gemaakt van een sleepproef om de weerstand van het schip te bepalen (Leśniewski e.a., 2020). Helaas is deze luxe er niet bij de Varnebank. Daarom is besloten om de weerstand te schatten op basis van een Rhino-model. Deze wordt gekoppeld aan een berekening in Grasshopper die de weerstand schat op basis van de methode van Holtrop en Mennen uit 1982. Deze methode heeft echter wel zijn beperkingen en kan het beste worden gebruikt voor standaard schepen. Volgens Holtrop en Mennen moeten de parameters voldoen aan de volgende eigenschappen, omdat de uitkomsten hiervoor de meest nauwkeurigste schatting geven („PIAS Manual: Resist: resistance prediction with empirical methods”, g.d.).

- De schatting is valide voor kalm zeewater (1,025 ton/m³) van 15° Celsius.
- Oppervlakte van de dwarsdoorsnede van de bulb moet kleiner zijn dan 20% van de oppervlakte van de dwarsdoorsnede van het middenschip.
- Midscheeps coëfficiënt tussen 0,5 en 1,0.
- Lwl/B verhouding tussen 3,5 en 9,5.
- LCB tussen -5% en +5% van Lwl/2.
- Prismatische coëfficiënt tussen 0,40 en 0,93.
- De halve invalshoek van de waterlijnen is maximaal 70°.
- Weerstandcoëfficiënt van de boegschroef tussen 0,003 en 0,012

In onderstaande afbeelding wordt duidelijk op welke gebieden de Varnebank afwijkt van de gebruikte standaard schepen in de methode van Holtrop en Mennen.

Holtrop en Mennen	Varnebank	Afwijking	Marges
De schatting is valide voor kalm zeewater (1,025 ton/m ³) van 15° Celsius.	Binnenwater	-	Afgekeurd
Oppervlakte van de dwarsdoorsnede van de bulb moet kleiner zijn dan 20% van de oppervlakte van de dwarsdoorsnede van het middenschip.	0	-	Goedgekeurd
Midscheeps coëfficiënt tussen 0,5 en 1,0.	0,938	-	Goedgekeurd
Lwl/B verhouding tussen 3,5 en 9,5.	3,420	2,273	Afgekeurd
LCB tussen -5% en +5% van Lwl/2.	2,854	-	Goedgekeurd
Prismatische coëfficiënt tussen 0,40 en 0,93.	0,624	-	Goedgekeurd
De halve invalshoek van de waterlijnen is maximaal 70°.	44	-	Goedgekeurd
Weerstandcoëfficiënt van de boegschroef tussen 0,003 en 0,012	N.V.T	-	Afgekeurd

Figuur 2.6: Vergelijking Varnebank met Holtrop en Mennen

De verschillen tussen de Varnebank en de standaard schepen die gebruikt worden zijn in figuur 2.6 duidelijk zichtbaar. Het eerste verschil is het vaarwater, de Varnebank zal alleen in binnenwater varen

met dus een andere dichtheid. Verder is de verhouding tussen de lengte van de waterlijn en de breedte te klein. Het is een voller schip dan de schepen bij de Holtrop en Mennen methode. Als laatste heeft de Varnebank twee Voith-Schneider propellers en dus geen boegschroef, dit is ook een groot verschil tussen de schepen. Bij Holtrop en Mennen wordt een database van verschillende standaard schepen gebruikt, deze hebben meestal een lang middenschip echter heeft de Varnebank een erg kort middenschip, dit kan dus ook een verschil in de weerstand opleveren.

Voor een klein schip als de Varnebank, wat niet echt een standaard schip is, zal de berekende waarde dus nog iets meer afwijken. Toch is er gekozen in dit project om de methode van Holtrop en Mennen te gebruiken, omdat dit een van de weinige manieren is om de weerstand te bepalen met de beperkte gegevens die beschikbaar zijn van de Varnebank. Uiteraard moet er wel rekening gehouden worden met een eindresultaat, dat dus enige afwijking op de weerstand en dus op het benodigde vermogen kan hebben. Gevolgen hiervan zijn dat er een motor met teveel vermogen of juist te weinig vermogen wordt ingebouwd. Daarom is het verstandig om marges in te bouwen. Als de weerstand bekend is kan worden bepaald hoeveel vermogen de motor volgens de schatting zou moeten kunnen leveren. Samen met het operationeel profiel, zoals gedefinieerd in het programma van eisen, kan uitgerekend worden wat de benodigde hoeveelheid energie is per vaart. Hiermee is de derde deelvraag beantwoord: Wat is het benodigde vermogen en de bijbehorende hoeveelheid energie voor het operationele profiel van de Varnebank?

Toepassen van het model

Daarna wordt aan de hand van de literatuurstudie en ontwikkelde methode gekeken naar de mogelijke duurzame oplossingen voor de Varnebank. Dit behoort tot de vierde fase van het project. De mogelijke opties zullen duidelijk worden met behulp van het gemaakte model. Door gebruik te maken van het model zullen de mogelijke oplossingen allemaal voldoen aan het programma van eisen en daarmee dus ook het operationeel profiel, de ruimte en de stabiliteit.

Als duidelijk is wat voor verschillende oplossingen er bestaan, kunnen deze met elkaar vergeleken worden. Dit wordt gedaan aan de hand van een stroomdiagram (Zhang en Wu, 2015) waarbij de oplossingen worden beoordeeld op de aspecten: duurzaamheid, veiligheid, beschikbaarheidstermijn en kosten. De verschillende aspecten worden één voor één doorlopen, waarna in overleg met de opdrachtgever een definitieve keuze wordt gemaakt. Hiermee is de vierde deelvraag beantwoord: Welke alternatieve aandrijvingssystemen zijn technisch haalbaar voor de Varnebank en welke is het meest geschikt voor de Varnebank?

Inpassen oplossing in 3D

Vervolgens wordt de gekozen oplossing verder uitgewerkt en ingepast aan de hand van een 3D-model. Dit 3D-model wordt gemaakt in het tekenprogramma Rhinoceros. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de oude tekeningen van de Varnebank en de productgegevens van het nieuwe aandrijvingssysteem. Ook hierbij moet het programma van eisen weer in acht genomen worden. Op deze manier is de vijfde deelvraag beantwoord: Hoe kan de beste oplossing geïmplementeerd worden in de Varnebank? Het 3D-model wordt vervolgens gebruikt om het model te valideren en het ontwerp te presenteren. Er zal gekeken worden of de gekozen optie uit het model daadwerkelijk past in het 3D model. Dit is de vijfde en laatste fase van het project. Hiermee is de zesde deelvraag beantwoord: Geeft het rekenmodel een goede indicatie voor de gekozen oplossing in de varnebank.

Tenslotte is het belangrijk om het uitgevoerde project kritisch te beoordelen. Dit wordt gedaan aan de hand van een discussie.

Concluderend zal dit plan van aanpak zorgen voor een gestructureerd onderzoek dat leidt tot zowel een algemeen model als een uitgewerkte oplossing voor de case-study. Daarnaast sluit dit plan van aanpak ook goed aan op de middelen en de hoeveelheid tijd die beschikbaar is.

2.5.3. Mogelijke problemen en oplossingen

In deze paragraaf worden de mogelijke knelpunten en bijbehorende oplossingen genoemd die gedurende het project naar voren kunnen komen. Daarnaast kunnen er ook maatschappelijk onwenselijke aspecten optreden ten gevolge van dit project. Deze worden voorspeld en hiervoor

worden maatregelen benoemd.

Het eerste knelpunt waar in dit project tegenaan gelopen kan worden is het gebrek aan informatie. Dit komt omdat het project gaat over een historisch schip dat gebouwd is in de tijd van grote papieren 2D-tekeningen. Veel van deze tekeningen zijn bewaard gebleven, maar ook enkele missen of zijn van slechte kwaliteit. Helaas kan hier weinig aan gedaan worden, maar wel kan er missende informatie achterhaald of ingeschat worden door gesprekken te voeren met kenners van het schip of ervaringsdeskundigen.

Het tweede knelpunt is het werken met veel verschillende partijen. Hierbij is de kans groot dat niet iedereen hetzelfde doel voor ogen heeft en is er kans op miscommunicatie of teleurstelling. Dit wordt zo veel mogelijk voorkomen door de communicatie via slechts één projectlid te laten lopen, af te spreken met meerdere partijen tegelijk en regelmatige tussentijdse resultaten te delen.

Een derde knelpunt is de grootsheid van het project. Er is erg veel ruimte en enthousiasme vanuit de betrokken partijen voor allerlei onderzoeken. Hierdoor zal het lastig zijn het onderzoek binnen perken te houden, zodat het nog wel haalbaar blijft binnen de beschikbare tijd. Dit risico kan beperkt worden door van te voren duidelijk af te spreken wat het project precies wel en niet bevat en te controleren met de begeleiders of dit een redelijk haalbaar doel is.

Een maatschappelijk onwenselijk aspect dat ter sprake kan komen naar aanleiding van dit project is het verliezen van historische en culturele waarde, dan wel niet in naam van duurzaamheid. Dit is een lastige kwestie, aangezien ieder mens een ander idee heeft over wat precies historische en culturele waarde inhoudt en wat het belang hiervan is. Daarnaast staan in dit geval historische waarde en duurzaamheid recht tegenover elkaar, waardoor er geen perfecte oplossing is waarbij beide aspecten volledig behouden of gerealiseerd kunnen worden. Hierdoor zullen er dus compromissen gesloten moeten worden, waarbij beide aspecten zoveel mogelijk gerespecteerd worden.

3

Mogelijke alternatieve brandstoffen en aandrijvingsystemen

In dit hoofdstuk worden verschillende eigenschappen van alternatieve brandstoffen en aandrijvingsystemen beschreven. Met behulp van deze gegevens kunnen later kengetallen worden bepaald voor het model. Ook kunnen er goede inschattingen worden gemaakt voor de afmetingen van de tanks en voor het volume dat de brandstoffen innemen. Het is ook van belang om te kunnen inschatten hoeveel groter een ander aandrijvingsstelsel is dan het huidige dieselsysteem. In de eerste paragraaf zullen verschillende brandstoffen en hun eigenschappen worden beschreven. In paragraaf 3.2 zullen de alternatieven voor de dieselmotor worden benoemd.

3.1. Alternatieve brandstoffen en hun eigenschappen

De meeste oude schepen maken nog gebruik van een dieselmotor, die gebruik maakt van fossiele brandstoffen. Bij gebruik van deze brandstof worden veel emissies uitgestoten (Scheepers en Bos, 1992). In plaats van fossiele brandstoffen kan er ook gebruik gemaakt worden van alternatieve brandstoffen die minder of zelfs geen emissies, zoals CO₂, uitstoten. In deze paragraaf worden een aantal van dit soort alternatieve brandstoffen besproken: LNG, ammoniak, methanol en waterstof.

3.1.1. LNG

LNG staat voor Liquefied Natural Gas: vloeibaar aardgas. Gebruik van LNG reduceert de CO₂-uitstoot met maximaal 25% ten opzichte van conventionele dieselaandrijving (Kansen e.a., 2015). Voor bio-LNG geldt dat het CO₂ neutraal is. Wel zitten er ook veel nadelen aan het gebruik van LNG. Zo moet deze brandstof veel groter opgeslagen worden: het volume is ongeveer drie keer zo groot voor dezelfde energie-inhoud als HFO (Heavy Fuel Oil). Dit betekent dat voor deze verandering wel de ruimte beschikbaar moet zijn om genoeg brandstof mee te kunnen nemen. Verder zorgt het gebruik van LNG voor een grote uitstoot van methaan, wat ook een grote bijdrage heeft op de broeikas effecten. LNG kan worden gemaakt op basis van biologische stoffen of bijvoorbeeld aardgas. De manier van produceren worden echter niet meegenomen in het bepalen van de emissies. Zoals eerder genoemd wordt alleen de operationele fase hierin bekeken.

Voor een LNG motor kan bijvoorbeeld gekeken worden naar een Wärtsilä 25DF. Dit is een dual fuel motor die ook op LNG kan draaien. Afmetingen van deze motor zijn iets groter dan die van een dieselmotor met een soortgelijk vermogen. LNG wordt meestal koud opgeslagen, waarbij de dichtheid ongeveer twee keer zo laag is als die van diesel. Een nadeel hiervan is wel dat de LNG dan bij -162 °C moet worden opgeslagen om het vloeibaar op te slaan, wat veel energie kost en extra moeilijkheden wat betreft apparatuur en tanks met zich meebrengt. De energiedichtheid per kilogram is iets hoger dan bij diesel, maar LNG is dus wel een stuk lastiger op te slaan (College of the Desert, 2001). Onderstaande tabel zet de eigenschappen van LNG op een rijtje.

Tabel 3.1: Gegevens LNG van onder andere: (Peninsula Petroleum, 2021)

Brandstof	LNG	Eenheid
Dichtheid	422,8	kg/m^3
Energiedichtheid	50,02	MJ/kg
Opslagtemperatuur	-162	$^{\circ}C$
Opslagdruk	1	bar
Netto-volumegebruik	0,8	-
Gewicht tank	332	kg/m^3
Cilindrisch volume	1,7	m^3/m^3
Rechthoekig volume	2,6	m^3/m^3

3.1.2. Ammoniak

Een tweede alternatieve brandstof is ammoniak. Zodra ammoniak duurzaam gewonnen wordt, zal deze brandstof geen CO₂ uitstoten. Ammoniak kan gebruikt worden in verbrandingsmotoren, maar ook in brandstofcellen. De omschakeling van fossiele brandstoffen naar ammoniak is wel ingewikkeld, aangezien de brandstof ongeveer 1,5 tot 2,3 meer volume nodig heeft en 1,4 tot 1,6 keer zwaarder is dan HFO voor dezelfde hoeveelheid energie (Kim e.a., 2020). Het gebruik van ammoniak kan de emissies wel met ongeveer 90% reduceren.

Het gebruik van ammoniak brengt ook uitdagingen met zich mee, aangezien het een zeer giftige en corrosieve stof is („The case for two-stroke ammonia engines”, g.d.). Gelukkig zijn er wel materialen die hier tegen bestand zijn en gebruikt kunnen worden voor opslagtanks. De vereisten voor het opslaan van ammoniak zijn verder ongeveer gelijk aan die voor propaan: Ammoniak kan bewaard worden op kamertemperatuur (25 °C) onder een druk tot 9,9 bar. Ammoniak kan ook onder atmosferische druk bewaard worden, de temperatuur is dan -34 °C. De energiedichtheid van vloeibaar ammoniak is 18,6 MJ/kg (van Duijn, g.d.).

Er zijn veel onderzoeken bezig naar verbrandingsmotoren op ammoniak. Een van de organisaties die hier me bezig is, is AmmoniaDrive, waar Peter de Vos principle investigator is. Uit een gesprek met Peter de Vos is gebleken dat het momenteel nog niet mogelijk is om gebruik te maken van een verbrandingsmotor op pure ammoniak. Meer kans op succes heeft het gebruik van een mengsel van diesel en ammoniak of waterstof en ammoniak. Pure ammoniak heeft namelijk een erg hoge temperatuur nodig om te ontsteken, wat ingewikkelde technologie vereist. Wanneer gebruik gemaakt wordt van een brandstofcombinatie zal compressie-ontsteking en vonkontsteking voldoende zijn. Door een combinatie van diesel en ammoniak te gebruiken kan de koolstofdioxide-uitstoot sterk gereduceerd worden. Uit onderzoek blijkt dat pure ammoniak in combinatie met diesel de beste resultaten levert (Gill e.a., 2012). Deze combinatie presteert het beste voor een combinatie van motorstabiliteit en thermische remefficiëntie (Zincir, 2020).

Volgens Peter de Vos zijn de afmetingen van een ammoniakmotor niet zozeer anders dan die van huidige motoren die op fossiele brandstoffen draaien. Momenteel wordt er met name gekeken naar de toepassing van ammoniak op grote bulkschepen die vallen onder 'ocean going vessels' (Peter de Vos, 2023). Dit is vanwege twee redenen: Ten eerste werken bulkschepen vaak op langzaamlopende twee-takt motoren. Omdat deze relatief langzaam draaien is er meer tijd om energie toe te voegen, zodat er een grotere kans is dat voldoende ammoniak ontstoken wordt. Hiermee wordt de kans op een rendabel rendement dus vergroot, waardoor dit type motoren interessant zijn om als eerst te onderzoeken. Ten tweede varen bulkschepen voornamelijk op zee en een klein deel van de tijd in havens. Als er iets mis gaat waardoor het zeer giftige ammoniak vrijkomt in de open lucht, zullen de slachtoffers beperkt blijven omdat het schip niet of weinig in de buurt is van bewoond gebied.

Hieruit kan geconcludeerd worden dat een verbrandingsmotor op ammoniak niet de meeste geschikte oplossing is voor een sleepboot. Een sleepboot heeft namelijk een zeer krachtige motor nodig, terwijl deze over zeer weinig beschikbare ruimte beschikt. Dit betekent dat sleepboten in praktijk vrijwel altijd gebruik maken van middel- tot snellopende vier-takt motoren. Daarnaast opereert een sleepboot bijna altijd in en rondom havengebied, waar veel bedrijvigheid is. Wanneer er een ongeluk gebeurt waardoor

3. Mogelijke alternatieve brandstoffen en aandrijvingsystemen

er een lek ontstaat, zullen er vele slachtoffers vallen.

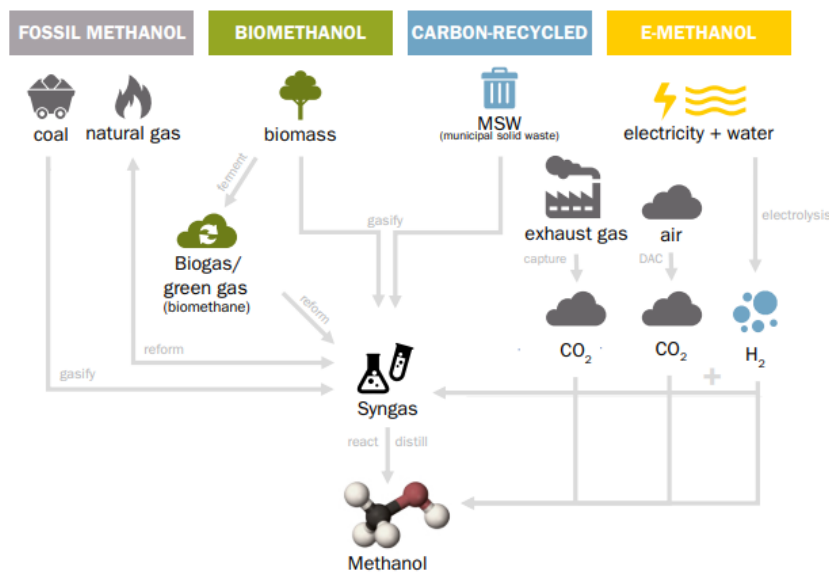
Dat een verbrandingsmotor op ammoniak nu nog geen ideale oplossing is voor een sleepboot, betekent niet dat het dit nooit zal kunnen zijn. De vele onderzoeken en ontwikkelingen die nu bezig zijn, zijn nog maar het begin en beloven veel goeds voor de toekomst. Daarom is gekozen om ammoniak alsnog mee te nemen in het onderzoek. In onderstaande tabel zijn alle gegevens van ammoniak overzichtelijk weergegeven.

Tabel 3.2: Gegevens ammoniak van onder andere: (van Duijn, g.d.), (PubChem, g.d.)

Brandstof	Ammoniak	Eenheid
Dichtheid	681,9	kg/m^3
Energiedichtheid	18,6	MJ/kg
Opslagtemperatuur	-34	$^{\circ}C$
Opslagdruk	1	bar
Netto-volumegebruik	0,85	-
Gewicht tank	250	kg/m^3
Cilindrisch volume	1,4	m^3/m^3
Rechthoekig volume	1,8	m^3/m^3

3.1.3. Methanol

Naast LNG en ammoniak is methanol een derde mogelijke alternatieve brandstof. Methanol kan op veel verschillende manieren gewonnen of gemaakt worden. De verschillende mogelijke processen worden schematisch weergegeven in figuur 4.2.



Figuur 3.1: Verschillende productieprocessen van methanol (Harmsen, 2021)

Zoals te zien in figuur 4.2 zijn er vier methodes om methanol te maken. Fossiele methanol wordt ofwel geproduceerd door aardgas om te zetten, ofwel door steenkoolvergassing. Biomethanol wordt gemaakt uit biomassa, dat eerst omgezet wordt naar biogas. Dit maakt biomethanol een hernieuwbare brandstof, zonder schadelijke emissies. Koolstof-gerecyclede methanol wordt gemaakt uit koolstof-bevattend afval dat niet gerecycled kan worden op een andere manier. Tenslotte kan methanol ook geproduceerd worden aan de hand van elektrolyse. Hierbij worden waterstof en koolstofdioxide omgezet e-methanol. De bron van de elektriciteit speelt hier een grote rol in de duurzaamheid van de

e-methanol. De benodigde koolstofdioxide kan uit de lucht gehaald worden (DAC) of er kan gebruik gemaakt worden van opgevangen industriële uitstoot (Harmsen, 2021). Met het gebruik van methanol kan dus een groot deel van de emissies verlaagd of vermeden worden. Alleen biomethanol heeft een CO₂-uitstoot van nul. Helaas is de productie van biomethanol nu een stuk lager dan die van fossiele methanol. Met de wereldwijd groeiende vraag naar biomethanol is de beschikbaarheid een opkomend probleem (Harmsen, 2021).

Hiernaast kan het gebruik van methanol ook zorgen voor een toename in efficiëntie van de motor. Methanol vereist ook een stuk minder aanpassingen dan bij het gebruik van LNG als brandstof omdat methanol vergelijkbare eigenschappen heeft als eerder gebruikte brandstoffen voor schepen, zoals diesel. Zo kan de methanol in dezelfde tanks als diesel opgeslagen worden na een kleine aanpassing op de tanks.

Een groot nadeel van het gebruik van methanol is dat de LHV (Lower Heating Value) ongeveer twee keer zo klein is als de LHV van diesel. Deze is namelijk maar 19,9 MJ/kg terwijl die van diesel 42,5 MJ/kg is. Daardoor moet er ongeveer twee keer zoveel brandstof aan boord zijn om dezelfde afstand te kunnen varen (Zincir en Deniz, 2021). Op de site van Wärtsilä is een voorbeeld van een methanol motor te vinden: Wärtsilä W6L32 („Marine solutions, products, and services - Wärtsilä”, g.d.). De afmetingen van een dieselmotor met een soortgelijk vermogen van 3400 kW wijken hier niet erg van af. Het gebruiken van een methanol motor zal dus niet nadelig zijn met betrekking tot de ingenomen ruimte ten opzichte van een dieselmotor. Een ander voordeel van de methanolmotor is dat deze ook nog steeds kan werken op fossiele brandstoffen.

Tabel 3.3: Gegevens Methanol van onder andere: (van Duijn, g.d.)

Brandstof	Methanol	Eenheid
Dichtheid	791	kg/m^3
Energiedichtheid	19,9	MJ/kg
Opslagtemperatuur	20	°C
Opslagdruk	1	bar
Netto-volumegebruik	0,95	-
Gewicht tank	5	kg/m^3
Cilindrisch volume	1	m^3/m^3
Rechthoekig volume	1	m^3/m^3

3.1.4. Waterstof

Waterstof is wat betreft emissies de schoonste van alle opties. Het enige restproduct dat ontstaat bij het omzetten van waterstof is water. Alle andere schadelijke emissies worden niet meer uitgestoten bij het gebruik van waterstof. Voor het maken van waterstof geldt echter wel dat er schadelijke emissies vrij kunnen komen. Of dit gebeurt ligt aan de grondstoffen en het productieproces.

De meeste waterstof die nu geproduceerd wordt is grijze waterstof, gemaakt uit aardgas en water. Hierbij komt naast waterstof ook koolstofdioxide vrij als restproduct. Dit is dus niet erg duurzaam en milieuvriendelijk. Om dit productieproces minder schadelijk voor het milieu te maken kan de koolstofdioxide die vrij komt opgevangen en opgeslagen worden in bijvoorbeeld lege gasvelden. Waterstof waarbij minstens 80 % van de koolstofdioxide wordt opgevangen en opgeslagen wordt blauwe waterstof genoemd. Naast grijze en blauwe waterstof bestaat er ook groene waterstof. Groene waterstof wordt gemaakt door elektrolyse aan de hand van duurzame elektriciteit. Dit maakt groene waterstof zowel duurzaam als volledig emissievrij. Groene waterstof wordt nog niet grootschalig geproduceerd, waardoor het een stuk duurder en minder beschikbaar is dan grijze waterstof, maar er zijn veel plannen voor een schaalvergroting in de komende jaren (TNO, g.d.).

Nog een voordeel is dat waterstof een zeer hoge energiedichtheid heeft. Het grote nadeel van het gebruik van waterstof als brandstof is de opslag ervan. Zo moet het worden opgeslagen bij 1 bar bij een temperatuur van -253 °C. Om het op te slaan bij een hogere temperatuur van bijvoorbeeld 15 °C is een tank nodig met een druk van wel 700 bar (van Duijn, g.d.). Deze tanks nemen veel extra ruimte in en er zijn grote installaties nodig om deze extreme condities te realiseren. De gegevens van waterstof zijn

3. Mogelijke alternatieve brandstoffen en aandrijvingssystemen

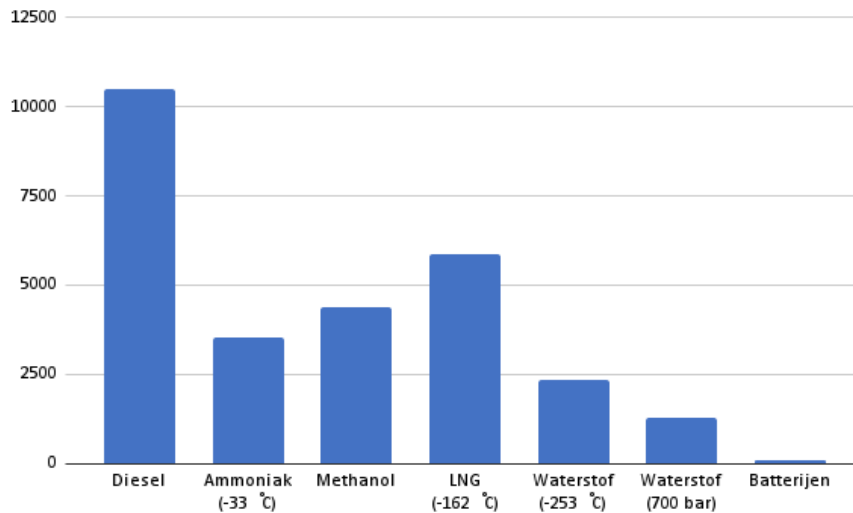
weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 3.4: Gegevens Waterstof van onder andere: (van Duijn, g.d.), (PubChem, g.d.)

Brandstof	Waterstof (koud)	Waterstof (druk)	Eenheid
Dichtheid	70,8	38,46	kg/m^3
Energiedichtheid	119,93	119,93	MJ/kg
Opslagtemperatuur	-253	15	$^{\circ}C$
Opslagdruk	1	700	bar
Netto-volumegebruik	0,8	0,99	-
Gewicht tank	415	1192,3	kg/m^3
Cilindrisch volume	1,7	2,32	m^3/m^3
Rechthoekig volume	2,6	2,96	m^3/m^3

3.1.5. Overzicht van de alternatieve brandstoffen

Om een goed overzicht te krijgen tussen de verschillende brandstoffen zijn in de onderstaande grafiek 3.2 de energiedichtheden van de verschillende brandstoffen naast elkaar gezet.



Figuur 3.2: Energiedichtheden van de verschillende brandstoffen

Tabel 3.5 laat zien hoe de verschillende brandstoffen zich tot elkaar verhouden. Hierbij is ++ het beste van alle opties en – het slechtste. Daartussen zitten -, 0 en +.

Tabel 3.5: Vergelijking van de verschillende alternatieve brandstoffen.

Brandstof	LNG	Ammoniak	Methanol	Waterstof (koud)	Waterstof (druk)
Dichtheid	0	+	++	-	-
Energiedichtheid	0	-	-	++	++
Opslagtemperatuur	-	0	++	-	+
Opslagdruk	0	0	0	0	-
Netto-volumegebruik	-	-	+	-	+
Gewicht tank	0	+	++	-	-
Cilindrisch volume	-	+	++	-	-
Rechthoekig volume	-	+	++	-	-

In het verdere verloop van dit verslag zal er enkel groene methanol en bio-LNG worden gebruikt.

De gegevens die in deze paragraaf zijn genoemd komen terug in het Excel model. Met behulp van de gegevens worden kengetallen bepaald die helpen een inschatting te maken welke alternatieve optie het beste past bij de ingevoerde eisen van het model. Hiervoor zijn ook nog gegevens nodig van de aandrijvingssystemen zelf, deze worden in de volgende paragraaf worden.

3.2. Alternatieven voor verbrandingsmotor

Om de vervuulende dieselmotoren te vervangen moet er gekeken worden welke alternatieven er zijn. Hierbij is het gebruik van elektrische aandrijvingssystemen al meermaals toegepast. Verder worden ook brandstofcellen en batterijen besproken.

3.2.1. Elektrische aandrijving

Er wordt steeds meer elektriciteit gebruikt, op alle soorten schepen. In de laatste jaren worden elektrische aandrijvingssystemen voornamelijk toegepast in de commerciële sector. Dit zijn bijvoorbeeld ferry's en cruiseschepen. Ook op militaire schepen wordt steeds meer elektriciteit gebruikt, waardoor het ook daar efficiënter zou kunnen werken om de hele aandrijving elektrisch te maken. Net als op dit militaire schip wordt er al veel gebruik gemaakt van alleen elektrische systemen aan boord (McCoy, 2002).

Een voordeel van elektrische voortstuwingssystemen is dat er niet per se een schroefas hoeft te zitten tussen de propeller(s) en de hoofdmotor(en). Dit zorgt ervoor dat het vermogen op een andere plek in het schip kan worden opgewekt, wat meer flexibiliteit geeft in de ontwerpfase. Voor een retrofit is dit minder relevant, omdat het nieuwe systeem geïntegreerd moet worden met het bestaande en dit vaak al een schroefas bevat. Er moet ook rekening worden gehouden met dat een elektrische aandrijving andere componenten bevat dan een dieselaandrijving, zoals bijvoorbeeld vermogenslektronica (Inal e.a., 2022).

Dat alternatieven voor de dieselmotor mogelijk zijn, wordt bewezen in Scandinavië, daar zijn al volledig elektrische ferry's in de vaart (Gagatsi e.a., 2016). Een RoRo passagiersferry kan met een totaal vermogen van 750 kW en een snelheid van 13 knopen varen. Deze ferry heeft ongeveer een range van dertien nautische mijlen, wat neerkomt op ongeveer 24 km. De actieradius van elektrische schepen is dus nog niet erg groot.

3.2.2. Brandstofcellen

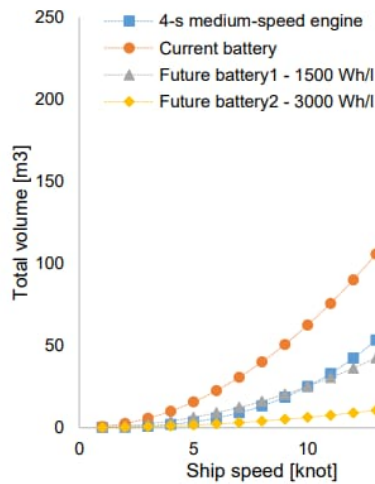
Een brandstofcel kan op meerdere brandstoffen lopen, zoals bijvoorbeeld waterstof of ammoniak. Volgens het artikel van L.van Biert, K.visser, M. Godjevac en P.V. Aravind kunnen brandstofcellen op vloeibaar waterstof energie leveren voor meer dan twaalf uur. Een nadeel van het gebruiken van waterstof is dat de tanks erg veel ruimte innemen, wat een reis van langer dan honderd uur bijna onmogelijk maakt. Als er warme waterstof wordt gebruikt is er minder plek nodig en kunnen reizen die een paar dagen duren gerealiseerd worden. De brandstofcel kan verder op natuurlijke gassen zoals methaan lopen (Van Biert e.a., 2016).

Het is lastig om met een brandstofcel het operationele profiel van een sleepboot te realiseren, vanwege het grote vereiste vermogen tijdens het slepen. Dit komt doordat de vermogensdichtheid van een brandstofcel vergeleken met verbrandingsmotoren en batterijen erg laag is (Van Biert e.a., 2016). Hierdoor zou er erg veel ruimte nodig zijn om het piekvermogen tijdens het slepen te leveren. Voorbeelden van brandstofcellen in de maritieme sector zijn de Fuel Cell Power Module for Marine Applications van Ballard („Marine Modules - Fuel Cell Power Products | Ballard Power”, g.d.) en de Marine system 200 van Powercell („Marine | PowerCell Group | Hydrogen Fuel Cell Solutions”, g.d.). Deze zullen worden gebruikt om kengetallen te bepalen voor in het model. Beiden hebben een vergelijkbaar vermogen van ongeveer 200 kW en wegen ongeveer een ton. Deze brandstofcellen zijn gekeurd voor gebruik in de maritieme sector.

3.2.3. Batterijen

Het gebruik van batterijen is ook een optie om schepen van fossiele brandstoffen af te krijgen. Deze batterijen slaan elektriciteit op, waarop het schip kan varen. Het grote nadeel van batterijen is dat ze momenteel nog ontzettend veel ruimte en gewicht innemen. Een case-study van Wu en Bucknall laat zien hoeveel extra volume nodig is om batterijen in het schip te plaatsen in plaats van dieselmotoren. Bij een schip met een motor die 1275 kW aan vermogen kan leveren en gedurende tien uur een snelheid van tien knopen vaart, is het volume dat nodig is voor het opslaan van de energie in batterijen 62,5 m³. Dit is een stuk groter dan de 25,0 m³ die nodig is voor diesel. Ook de massa hiervan stijgt van 15,3 ton naar 93,8 ton.

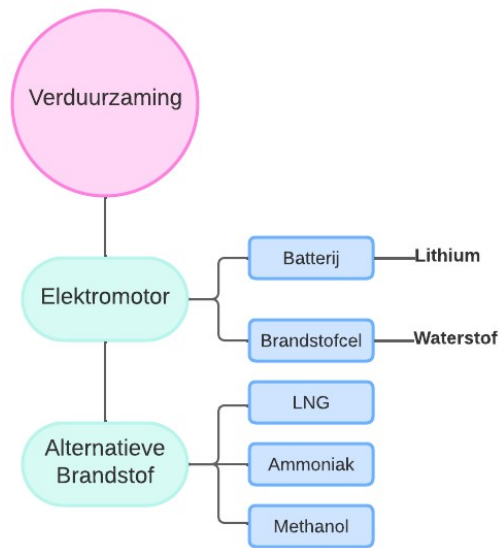
Bovenstaand voorbeeld gaat ervan uit dat de energiedichtheid van de batterijen 300 Wh/l is. In de toekomst kunnen batterijen met een dichtheid van zelfs 3000 Wh/l ervoor zorgen dat het benodigde volume voor de batterijen lager is dan het benodigde volume voor het opslaan van diesel (Wu en Bucknall, 2016). Op de lange termijn kan dit dus een enorm voordeel opleveren. In figuur 3.3 is te zien hoeveel volume batterijen in de toekomst mogelijk innemen bij een bepaalde vaarsnelheid.



Figuur 3.3: Batterij (Wu en Bucknall, 2016)

Batterijen die in de maritieme sector veel worden toegepast zijn bijvoorbeeld de GridSolv Quantum energy storage system van Wärtsilä („Marine solutions, products, and services - Wärtsilä”, g.d.) en de Orca Energy 8 Vertical packs van Corvus Energy („Corvus Orca Energy - Corvus Energy”, 2023). Als de batterij van Wärtsilä in twee tot vier uur ontladen wordt (0,25C-0,5C), heeft het een capaciteit van 1490 kWh. Die van Corvus heeft maar 992 kWh, maar heeft wel kleinere afmetingen. De capaciteit per volume eenheid ligt daarom waarschijnlijk dicht bij elkaar.

Onderstaande afbeelding geeft een overzicht van de verschillende duurzame opties die besproken zijn. Met behulp van een model dat in hoofdstuk vier zal worden besproken kunnen de verschillende opties met elkaar vergeleken worden en worden gematcht met de gegeven input waarden.



Figuur 3.4: Mogelijke opties voor verduurzaming

Nu al deze informatie bekend is kan er begonnen worden met de maken van het model, zoals genoemd in het plan van aanpak. In het volgende hoofdstuk zal beschreven worden hoe dit model is opgebouwd en welke aannames hiervoor zijn gemaakt met behulp van de gegevens uit dit hoofdstuk.

4

Algemene methode alternatief aandrijvingsysteem

In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe een model wordt opgesteld om te bepalen of het op basis van de eisen mogelijk is voor een bepaalde sleepboot om over te gaan op een alternatieve brandstof en/of een nieuw aandrijvingsysteem. In de eerste paragraaf worden de verschillende configuraties waarmee het model werkt beschreven. Aan de hand van een blokschema wordt de opbouw van het model in paragraaf twee geïllustreerd. Vervolgens worden in de verdere paragrafen de verschillende blokken verder uitgelicht met de daarbij behorende berekeningen, aannames en vereenvoudigingen.

4.1. Configuraties van de aandrijvingsystemen

Zoals hierboven staat, wordt in dit hoofdstuk een model beschreven. De verschillende aandrijvingsystemen die met elkaar worden vergeleken in het model zijn:

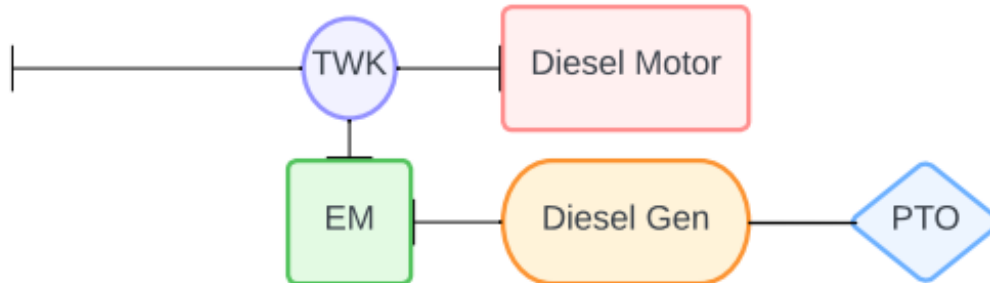
- Verbrandingsmotor op diesel
- Verbrandingsmotor op groene methanol
- Verbrandingsmotor op LNG
- Verbrandingsmotor op ammoniak
- Elektromotor met brandstofcel op waterstof
- Elektromotor met lithium batterijen

De configuraties waar voor elk systeem vanuit wordt gegaan, worden in figuur 4.1 tot en met 4.6 weergegeven. Er is voor een beperkt aantal configuraties gekozen om te voorkomen dat het model te complex wordt. De gekozen configuraties maken gebruik van onderdelen waarvan voldoende productspecificaties bekend zijn om in het model te verwerken en waarvan wordt verwacht dat ze kansen bieden voor een duurzame toekomst. De configuratie met een verbrandingsmotor op diesel is toegevoegd om zo een soort nulmeting te realiseren waarmee de resultaten van de andere duurzame oplossingen vergeleken kunnen worden.

Eerst worden de configuraties met verbrandingsmotoren in subparagraaf 4.1.1 besproken, waarna de configuraties met elektromotoren in subparagraaf 4.1.2 worden behandeld.

4.1.1. Aandrijvingsystemen met verbrandingsmotoren

In figuur 4.1 wordt schematisch weergegeven hoe de verschillende onderdelen van het aandrijvingsysteem met een verbrandingsmotor op diesel met elkaar verbonden worden.

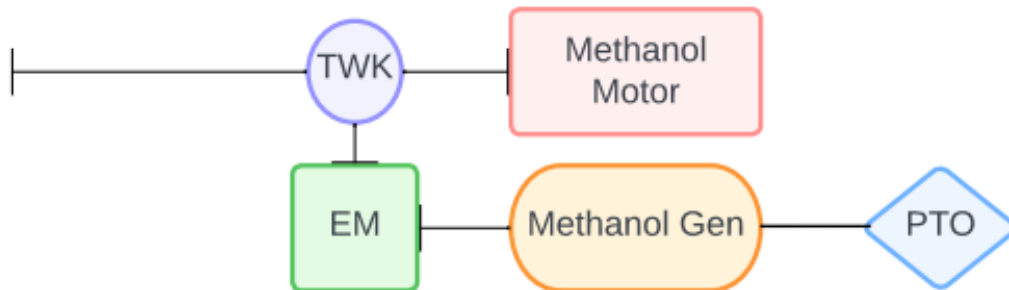


Figuur 4.1: Het aandrijvingsysteem met een verbrandingsmotor op diesel

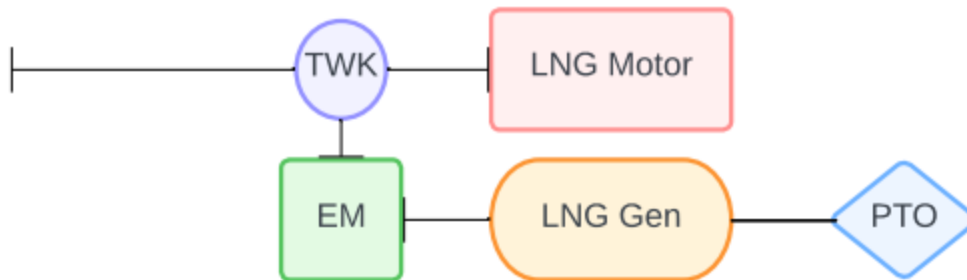
Het hoofdsysteem bestaat uit de dieselmotor en de tandwielkast die de Voith-Schneider propellers mechanisch aandrijven. De dieselmotor zal het nominale vermogen om het schip voort te sturen leveren. Vanwege het feit dat sleepboten vaak voor een korte tijd een vermogen dat flink hoger is dan het nominale vermogen moeten leveren is er naast het hoofdsysteem ook een hulpsysteem aan boord. Dit systeem bestaat uit een dieselgenerator en een elektromotor. Naast het verschil tussen het nominale en piekvermogen wordt de dieselgenerator ook gebruikt om de PTO te leveren.

Er is gekozen om gebruik te maken van een hulpsysteem omdat het erg inefficiënt is om een dieselmotor in het schip te zetten dat is gekozen op het piekvermogen. De meeste tijd zal het schip namelijk op nominaal vermogen varen, wat een stuk lager ligt dan het piekvermogen. Dit zal betekenen dat de motor het grootste deel van de tijd op een ander werkpunt gebruikt zal worden dan waarvoor het uitgekozen is, wat grote negatieve gevolgen heeft op de efficiëntie. Daarom is gekozen om de dieselmotor uit te kiezen op het nominale vermogen en het extra vermogen om het piekvermogen te kunnen halen met een dieselgenerator op te lossen. De dieselgenerator wordt ook gebruikt voor de PTO omdat deze elektrische energie levert en er dus geen dynamo meer nodig is zoals bij de dieselmotor om de elektrische energie die voor het PTO nodig is te kunnen leveren.

Voor de aandrijvingsystemen die gebruik maken van een verbrandingsmotor op groene methanol of LNG is een vergelijkbare configuratie bedacht. Deze zijn weergegeven in figuur 4.2 en 4.3.



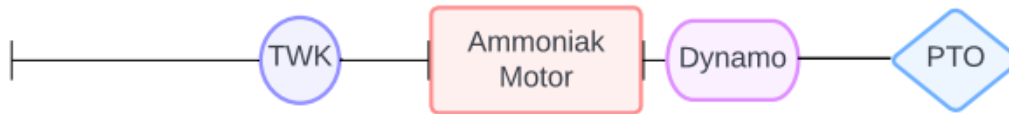
Figuur 4.2: Het aandrijvingsysteem met een verbrandingsmotor op groene methanol



Figuur 4.3: Het aandrijvingsysteem met een verbrandingsmotor op LNG

De configuratie van het aandrijvingsysteem met een verbrandingsmotor op ammoniak is iets anders dan dat van de andere systemen met verbrandingsmotoren. Dit komt omdat een verbrandingsmotor op ammoniak een erg nieuwe technologie is, welke slechts in theorie is uitgewerkt en nog niet op de markt beschikbaar is. Dit betekent ook dat er erg weinig informatie beschikbaar is binnen dit onderwerp, zoals bijvoorbeeld over een generator op ammoniak. Daarom is gekozen om deze niet in het aandrijvingsysteem mee te nemen.

Dit betekent helaas wel dat er geen onderscheid gemaakt zal worden tussen een hoofd- en hulpsysteem en de ammoniakmotor zowel het nominaal als piekvermogen en zelfs de PTO zal moeten leveren. Om de mechanische energie van de motor om te zetten in de elektrische energie die de PTO nodig heeft wordt gebruik gemaakt van een dynamo. In figuur 4.4 is de configuratie van het aandrijvingsysteem met een verbrandingsmotor op ammoniak te zien.

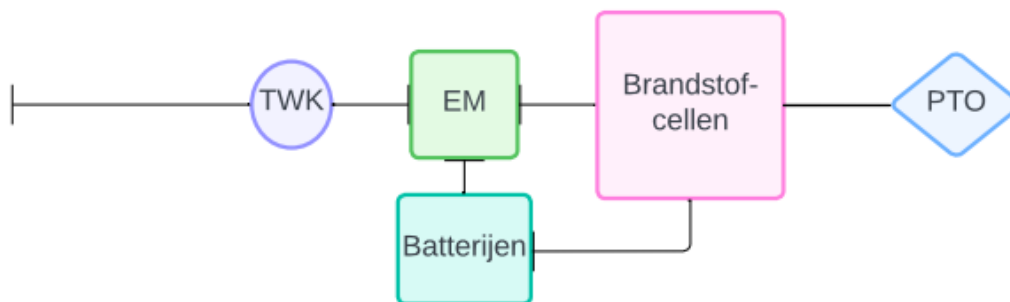


Figuur 4.4: Het aandrijvingsysteem met een verbrandingsmotor op ammoniak

4.1.2. Aandrijvingsystemen met elektromotoren

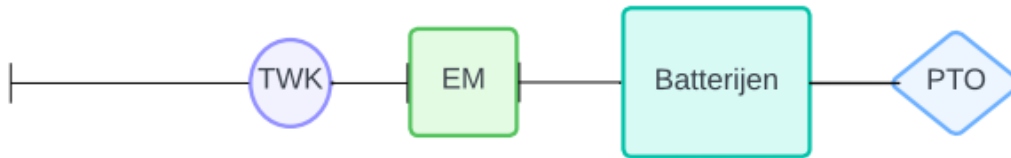
De configuratie van het aandrijvingsysteem met brandstofcellen op waterstof wordt weergegeven in figuur 4.5. Het hoofdsysteem bestaat uit de brandstofcellen, een elektromotor en een tandwielkast. Zoals te zien in het schema levert dit hoofdsysteem niet alleen het nominaal vermogen voor de voortstuwing, maar ook de PTO. Daarnaast kunnen de brandstofcellen wanneer er teveel energie opgewekt wordt voor het gebruik op dat moment met het overschot aan energie de batterijen van het hulpsysteem opladen.

Dit hulpsysteem wordt ingezet om het verschil tussen het nominaal en piekvermogen te kunnen leveren. De brandstofcellen zijn aan de batterijen verbonden omdat het voor brandstofcellen moeizaam en inefficiënt kan zijn om snel van vermogen te wisselen. Hiervoor moet namelijk een deel van de cellen aan of uit gezet worden. Het opstarten van een brandstofcel duurt even en kost energie. Het is dus makkelijker en efficiënter om de brandstofcellen op een vast vermogen te houden en een overschot aan energie op te slaan voor later in de batterijen.



Figuur 4.5: Het aandrijvingsysteem met brandstofcellen op waterstof

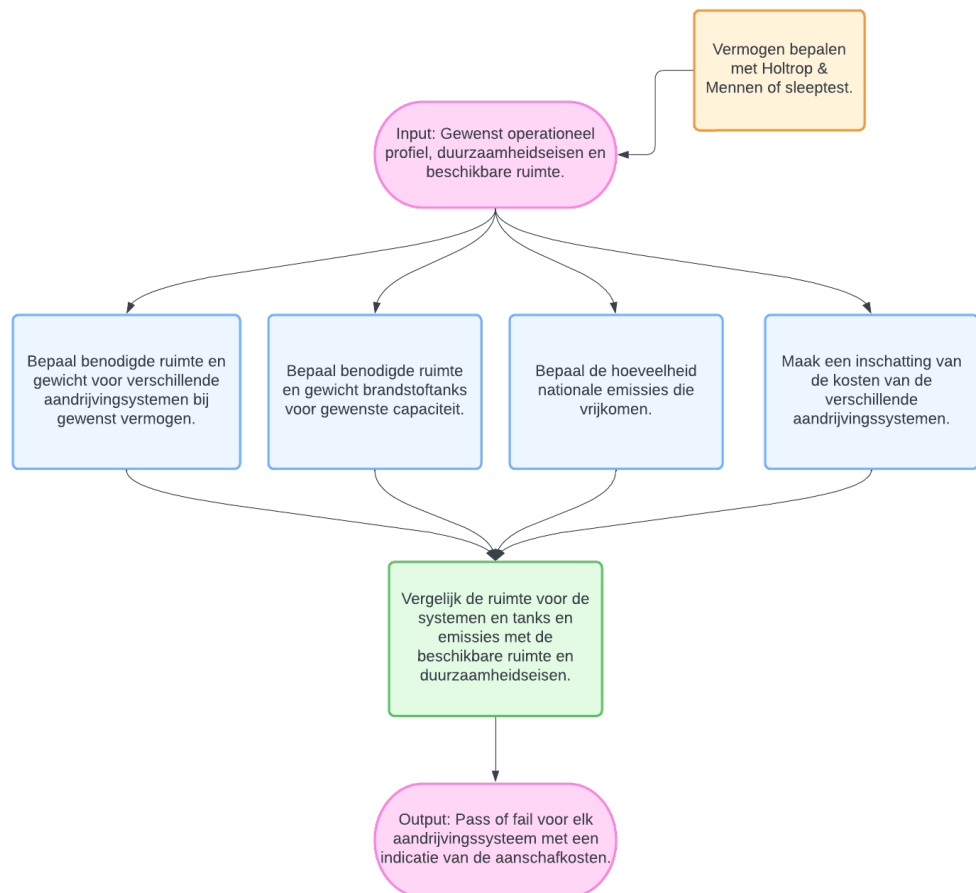
Tenslotte volgt nog de configuratie voor het aandrijvingsysteem met batterijen in figuur 4.6. In deze configuratie bestaat het hoofdsysteem uit batterijen en een elektromotor. Het hulpsysteem zijn extra batterijen die gebruikt kunnen worden wanneer er extra vermogen nodig is. De batterijen worden dus gebruikt voor de voortstuwing op nominaal en piekvermogen en voor het leveren van de PTO. Verschil in vermogen wordt bereikt door een verschil in aantal batterijen dat aangeschakeld zijn en de snelheid waarmee de opgeslagen energie uit de batterijen getrokken wordt.



Figuur 4.6: Het aandrijvingsysteem met lithium batterijen

4.2. Werking van het model

De verschillende aandrijvingsystemen worden met elkaar vergeleken in een model. Dit model wordt uitgelicht in het blokschema in figuur 4.7.



Figuur 4.7: Flowchart van het model

In figuur 4.7 is te zien dat het model begint met een invoer, te zien in het bovenste roze blokje van verschillende gegevens. Deze gegevens bestaan uit het gewenst operationeel profiel, de duurzaamheidseisen en de beschikbare ruimte. Onder operationeel profiel valt bijvoorbeeld het

benodigde vermogen en de vaartijd. Wanneer het benodigde vermogen niet bekend is omdat er een verandering in operationeel profiel is kan deze aan de hand van de scheepsweerstand bepaald worden zoals te zien in het oranje blokje.

Met de invoer worden vervolgens met behulp van kengetallen voor elk aandrijvingsstelsel de benodigde ruimte en het gewicht voor zowel het aandrijvingsstelsel als de brandstoftanks bepaald, zoals te zien in de twee blauwe blokjes aan de linkerkant. Daarnaast worden ook de nationale emissies bij elk aandrijvingsstelsel bepaald en wordt er een inschatting van de aanschafkosten gemaakt, dit is te zien in de twee blauwe blokjes aan de rechterkant.

Als alle gegevens berekend zijn, wordt gecheckt of deze binnen de gestelde eisen van de invoer passen zoals beschreven in het groene blokje. Tenslotte is de uitvoer een pass of fail voor elk stelsel gebaseerd op de eisen, weergegeven met een groen of rood vakje. Daarnaast wordt ook een indicatie van de aanschafkosten gegeven om wanneer er meerdere opties technisch haalbaar zijn, de kosten met elkaar te kunnen vergelijken. Dit is te zien in het roze blokje onderaan het blokschema.

4.3. Kengetallen aandrijvingsstelsels

In deze paragraaf wordt het eerste blauwe blokje van het schema in figuur 4.7 verder uitgelicht. De benodigde ruimte en gewicht voor de verschillende aandrijvingsstelsels worden bepaald aan de hand van kengetallen die op verschillende manieren bepaald zijn.

4.3.1. Kengetallen diesel- en elektromotoren

De paper van Peter de Vos en Douwe Stapersma uit 2015 beschrijft een methode die afmetingen van motoren inschat bij een bepaald vermogen. Met deze methode wordt eerst bepaald wat het vereiste vermogen is. Hierna worden van primaire onderdelen de afmetingen bepaald. Dit zijn bijvoorbeeld de cilinders en rotor. Als deze zijn bepaald kunnen de secundaire elementen worden geschaald. Met al deze informatie kan de totale grootte van de machine worden geschat. De methode beschreven in de paper is alleen uitgewerkt voor diesel- en elektromotoren dus voor het inschatten van de afmetingen van de andere type verbrandingsmotoren moet een andere methode gebruikt worden.

Elektromotoren

Voor het inschatten van de afmetingen van een elektromotor wordt gebruik gemaakt van de volgende formules (de Vos en Stapersma, 2015):

$$D_R = \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{\tau_{EM} \cdot v_t \cdot \lambda_R} \cdot P} \quad (4.1)$$

$$L_R = \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \frac{\lambda_R}{\tau_{EM} \cdot v_t} \cdot P} \quad (4.2)$$

In deze formules staat D_R voor de diameter van de rotor, L_R voor de lengte van de rotor en λ_R voor de lengte/diameter ratio van de rotor. Daarnaast staat τ_{EM} voor de typische spanning van een elektromotor, v_t voor de typische omtreksnelheid en P voor het vermogen.

Het vermogen is gegeven in de invoer van het model, dus deze kan eenvoudig ingevuld worden. Voor het bepalen van de waarde voor λ_R wordt gebruik gemaakt van gegevens van bestaande elektromotoren. Omdat dit model gemaakt wordt voor sleepboten is gekozen om alleen data van inductiemotoren mee te nemen, een type dat vaak voor deze toepassing ingezet wordt. Gebaseerd op de productinformatie van ABB inductiemotoren met een vermogen in de range van 1-10 MW, komt de gemiddelde waarde voor de λ_R op ongeveer 1,67 (ABB, 2021).

De volgende stap is het bepalen van de waarde voor τ_{EM} . Hiervoor is uitgegaan van een niet-uitspringende poolsynchronmachine die gebruik maakt van direct koelwater. Dit omdat een niet-uitspringende poolmachine een hoger toerental aankan en dit bij elektromotoren vaak resulteert

in kleinere afmetingen en direct koelwater altijd makkelijk beschikbaar is voor schepen („electricaleasy.com: Salient pole rotor vs. non-salient pole rotor”, g.d.).

Een minimale, gemiddelde en maximale waarde van τ_{EM} wordt gegeven in tabel 4.8. Voor het model wordt gebruik gemaakt van de minimale waarde, aangezien deze waarde de grootste afmetingen voor de elektromotor zal veroorzaken en de motor zo dus zeker niet te klein zal worden ingeschat.

		<i>Salient-pole synchronous machines or PMSMs</i>	<i>Non salient-pole synchronous machines</i>		
			<i>Indirect cooling</i>		<i>Direct water cooling</i>
			<i>Air</i>	<i>Hydrogen</i>	
σ (N.m ⁻²)	Min	21000	17000	51000	85000
	Average	33500	36000	65500	114500
	Max	48000	59500	81500	148500
A_{rms} (kA/m)		35-65	30-80	90-110	150-200
j_{rms} (A/m ²)		4-6.5×10 ⁶	3-5×10 ⁶	4-6×10 ⁶	7-10×10 ⁶
$A_{rms} \cdot j_{rms}$ (A ² /m ³)		14-42.25×10 ¹⁰	10.5-40×10 ¹⁰	36-66×10 ¹⁰	105-200×10 ¹⁰

Figuur 4.8: Typische spanning elektromotor (Lefevre e.a., 2018).

Het enige gegeven wat nu nog mist om de formules 4.1 en 4.2 op te lossen is de waarde voor v_t . Deze kan bepaald worden met de volgende formule:

$$n = \frac{v_t}{\pi \cdot D_r} \quad (4.3)$$

In formule 4.3 wordt het toerental aangegeven met n , ook de waarde voor het toerental is gegeven bij de invoer van het model. Deze formule wordt vervolgens gesubstitueerd in formules 4.1 en 4.2 waarna deze aan het model worden toegevoegd en resultaten geven bij een invoer van vermogen en toerental. Nu de afmetingen van de rotor bekend zijn, kunnen de hoofdafmetingen bepaald worden. Hiervoor worden de volgende formules gebruikt (de Vos en Stapersma, 2015):

$$L_{EM} = A_0 + A_1 \cdot L_{core,EM} = A_0 + A_1 \cdot L_S = A_0 + A_1 \cdot L_R \quad (4.4)$$

$$W_{EM} = B_0 + B_1 \cdot W_{core,EM} = B_0 + B_1 \cdot D_S = B_0 + B_1 \cdot \frac{D_R}{s} \quad (4.5)$$

$$H_{EM} = C_0 + C_1 \cdot H_{core,EM} = C_0 + C_1 \cdot D_S = C_0 + C_1 \cdot \frac{D_R}{s} \quad (4.6)$$

In formules 4.4 tot en met 4.6 wordt gebruik gemaakt van coëfficiënten om de afmetingen te schalen. De coëfficiënten A_0 , B_0 en C_0 kunnen verwaarloosd worden (de Vos en Stapersma, 2015) en de coëfficiënten A_1 , B_1 en C_1 geven de verhouding tussen de binnen- en buitenafmeting van de elektromotor aan. De waarden voor deze coëfficiënten zijn opnieuw bepaald met behulp van productinformatie van een groot aantal bestaande motoren van ABB. Uit een data analyse volgt dat de waarde voor A_1 gelijk is aan 1,3, B_1 is 1,2 en C_1 is 1,5 (ABB, 2021). Daarnaast moet ook de waarde voor s bepaald worden, wat de ratio tussen de rotor en stator aangeeft. Voor s kan een waarde van 0,5 aangenomen worden (de Vos en Stapersma, 2015). Alle waarden zijn vervolgens verwerkt in het model, zodat de hoofdafmetingen berekend kunnen worden.

Om makkelijk en snel te kunnen zien of bij een bepaalde invoer van vermogen, toerental en beschikbare ruimte aan boord te kunnen zien of een elektromotor een passende oplossing zou zijn worden twee kengetallen bepaald. Ten eerste het specifiek volume in [m^3/kWh] en ten tweede het specifiek vloeroppervlak in [m^2/kWh]. Met deze kengetallen kan het model inzicht geven of er genoeg ruimte aan boord is om met een elektromotor het gewenste vermogen te leveren.

Dieselmotoren

Een vergelijkbare methode wordt toegepast voor het inschatten van de hoofdafmetingen van een dieselmotor bij een gegeven vermogen. Hiervoor worden de volgende formules gebruikt (de Vos en Stapersma, 2015):

$$D_B = \sqrt{\frac{8}{\pi} \cdot \frac{k}{p_{me} \cdot c_m} \cdot \frac{P}{i}} \quad (4.7)$$

$$L_S \sqrt{\frac{8}{\pi} \cdot \frac{k \cdot \lambda_s^2}{p_{me} \cdot c_m} \cdot \frac{P}{i}} \quad (4.8)$$

Met formule 4.7 en 4.8 worden de diameter en slaglengte van de cilinders uitgerekend met behulp van het vermogen P gedeeld door het aantal cilinders i . Daarnaast wordt gebruik gemaakt van k , welke een waarde van één heeft voor een twee-takt motor en een waarde van twee voor een vier-takt motor. Deze gegevens worden ingevuld bij de invoer van het model. Daarbij is er ook een waarde voor de mean effective pressure, p_{me} nodig. Deze waarde ligt voor de meeste dieselmotoren ongeveer even hoog. De p_{me} wordt berekend met de volgende formule (Wärtsilä, 2020):

$$p_{me} = \frac{P \cdot c \cdot 1,2 \cdot 10^9}{D_B^2 \cdot L_S \cdot n \cdot \pi} \quad (4.9)$$

Deze formule is vervolgens ingevuld met de gegevens van de Wärtsilä 9L20 draaiend op 1200 rpm (Wärtsilä, 2020). Hieruit volgt een p_{me} van ongeveer 2,5 MPa. De waarde voor de ratio λ_s geeft de verhouding tussen de slaglengte en diameter van de cilinder. De ratio is naar verwachting ook vergelijkbaar voor verschillende dieselmotoren en daarom wordt ook voor deze ratio de waarde van de Wärtsilä 9L20 overgenomen. De waarde voor de ratio is gelijk aan 1,4. Tenslotte is alleen de zuigersnelheid c_m nog onbekend. Om deze waarde te elimineren kan de volgende formule in de formules 4.7 en 4.8 gesubstitueerd worden (de Vos en Stapersma, 2015):

$$n = \frac{c_m}{2 \cdot L_S} \quad (4.10)$$

Hiermee kunnen waarden voor D_B en L_S berekend worden bij een invoer van een vermogen, toerental en aantal cilinders. Vervolgens kunnen met behulp van schaling de hoofdafmetingen uitgerekend worden. Hiervoor zijn de volgende formules voor het bepalen van de lengte, breedte en hoogte: (de Vos en Stapersma, 2015):

$$L_{DE} = A_0 + A_1 \cdot L_{core,DE} \quad (4.11)$$

$$L_{core,DE} = i \cdot D_B \quad (4.12)$$

$$W_{DE} = B_0 + B_1 \cdot W_{core,DE} \quad (4.13)$$

$$W_{core,DE} = 2 \cdot \max\left(\frac{L_S}{2} + (1 + ct) \cdot L_S \cdot \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{D_B}{2} \cdot \cos \frac{\alpha}{2}; \frac{L_S}{2}\right) \quad (4.14)$$

$$H_{DE} = C_0 + C_1 \cdot H_{core,DE} \quad (4.15)$$

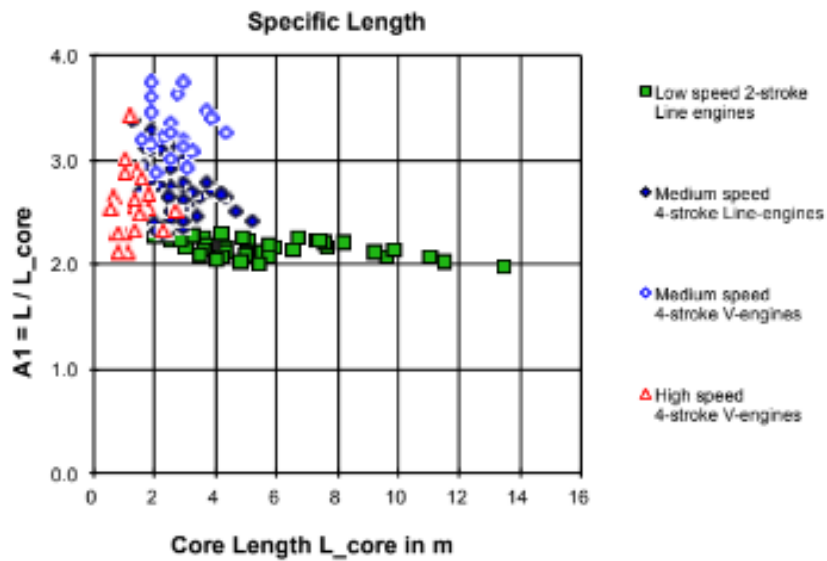
$$H_{core,DE} = \frac{L_S}{2} + \max\left(\frac{L_S}{2} + (1 + ct) \cdot L_S \cdot \cos \frac{\alpha}{2} + \frac{D_B}{2} \cdot \sin \frac{\alpha}{2}; \frac{L_S}{2}\right) \quad (4.16)$$

Hier wordt dus weer gebruik gemaakt van coëfficiënten, net zoals bij het inschatten van de hoofdafmetingen voor een elektromotor. Opnieuw kunnen de coëfficiënten A_0 , B_0 en C_0 verwaarloosd worden (de Vos en Stapersma, 2015). Voor het bepalen van $L_{core,DE}$ wordt uitgegaan van een in-line type motor, omdat deze een grotere lengte zal hebben dan een V-type, zodat beide types zullen passen. Voor het bepalen van $W_{core,DE}$ en $H_{core,DE}$ moet het maximum van twee waarden gekozen worden. Omdat nog steeds uitgegaan wordt van een in-line type motor zijn de waarden voor ct en α gelijk aan nul. $W_{core,DE}$ en $H_{core,DE}$ kunnen vervolgens vereenvoudigd worden tot:

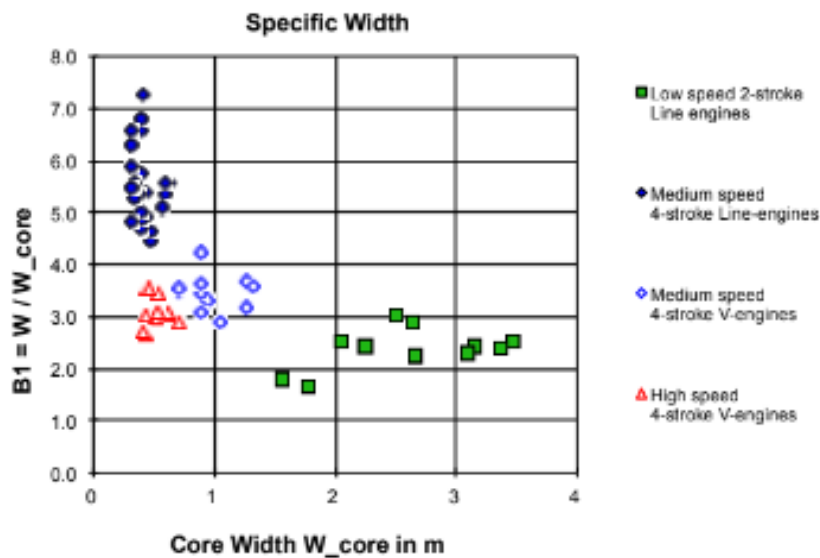
$$W_{core,DE} = 2 \cdot \max\left(\frac{D_B}{2}; \frac{L_S}{2}\right) \quad (4.17)$$

$$H_{core,DE} = \frac{L_S}{2} + \max\left(\frac{3}{2}L_S; \frac{L_S}{2}\right) \quad (4.18)$$

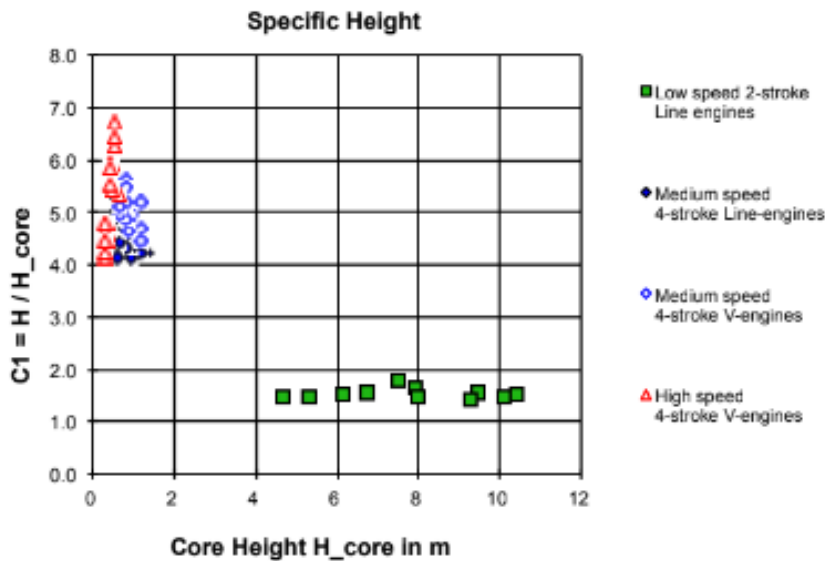
De waarde voor λ_S groter is dan 1 en daardoor is de waarde voor L_S groter dan de waarde voor D_B en is $W_{core,DE}$ gelijk aan L_S . De waarde voor $H_{core,DE}$ zal gelijk zijn aan $2L_S$. Om de uiteindelijke inschatting voor de hoofdafmetingen te maken zijn alleen de waarden voor A_1 , B_1 en C_1 nog nodig. Deze kunnen bepaald worden uit de volgende grafieken gebaseerd op een grote database (de Vos en Stapersma, 2015).



Figuur 4.9: Waardes voor A_1 voor verschillende dieselmotoren (de Vos en Stapersma, 2015).



Figuur 4.10: Waardes voor B_1 voor verschillende dieselmotoren (de Vos en Stapersma, 2015).



Figuur 4.11: Waardes voor C_1 voor verschillende dieselmotoren (de Vos en Stapersma, 2015).

Voor de waarde van A_1 is gekozen voor ongeveer 2,5 omdat naar verwachting medium en high speed machines het best passen bij de toepassing sleepboten. Met een waarde van maximaal 2,5 zijn er genoeg opties voor zowel een high speed V-type en een medium speed in-line type motor die zullen passen in de gereserveerde ruimte. Voor de waarde van B_1 is gekozen voor 6,0 zodat er nog een flink aantal medium speed in-line opties zijn, maar de waarde niet onnodig hoog geschat wordt. Tenslotte wordt voor de waarde van C_1 5,5 aangenomen om weer genoeg opties te hebben voor zowel high speed V-type en medium speed in-line type motoren, maar de waarde opnieuw niet te overschatten. Alle waardes worden aan het model toegevoegd zodat het model met een invoer van een gewenst vermogen bij een bepaald aantal cilinders en toerental de hoofdafmetingen voor een dieselmotor kan inschatten.

4.3.2. Kengetallen verbrandingsmotoren alternatieve brandstof

Zoals beschreven worden de kengetallen voor diesel- en elektromotoren bepaald aan de hand van de methode van de Vos en Stapersma uit 2015. Om het volume te bepalen van motoren die andere brandstoffen, zoals LNG en groene methanol gebruiken, is er gekeken naar een aantal al bestaande motoren die deze brandstoffen gebruiken of kunnen gebruiken.

De LNG-motoren die gebruikt zijn, zijn van de series 20DF, 25DF en 31DF van Wärtsilä („Marine dual fuel engines - Wärtsilä”, g.d.). De methanolmotoren die gebruikt zijn, zijn van de 32 methanol serie van Wärtsilä („Wärtsilä 32 Methanol Engine”, g.d.). Van deze motoren is bepaald wat het volume per kilowatt (m^3/kW), het vloeroppervlak per kilowatt (m^2/kW) en het gewicht per kilowatt (kg/kW) is. De gemiddelde verhoudingen wordt vergeleken met die van dieselmotoren, waarvoor deze ook bepaald zijn aan de hand van gegevens van bestaande motoren. Er volgt een factor uit de vergelijking tussen dieselmotoren en alternatieve verbrandingsmotoren. Zo worden de kengetallen voor de ruimte, het vloeroppervlak en het gewicht voor de verbrandingsmotoren op alternatieve brandstoffen berekend.

Voor het bepalen van het gemiddelde zijn verschillende motoren gebruikt van Wärtsilä uit de series 20, 25 en 26 („Marine diesel engines - Wärtsilä”, g.d.). Verbrandingsmotoren op ammoniak zijn nog een erg nieuwe ontwikkeling en daarom zijn er nog geen gegevens van bestaande motoren beschikbaar. Daarom wordt voor motoren op ammoniak voor de factoren voor volume, vloeroppervlak en gewicht ten opzichte van dieselmotoren een waarde van één aangenomen. Volgens Peter de Vos (Peter de Vos, 2023) is dit een redelijke aanname, omdat de fabrikanten die zulke motoren op de markt gaan brengen er waarschijnlijk naar streven om dezelfde vermogensdichtheid te behalen als de huidige motoren. Het overzicht van de factoren voor volume, vloeroppervlak en gewicht voor verbrandingsmotoren op verschillende brandstoffen is weergegeven in tabel 4.1.

Tabel 4.1: Volumefactoren verbrandingsmotoren ten opzichte van dieselmotoren

Brandstof	Diesel	Ammoniak	Methanol	LNG
Factor volume	1,000	1,000	0,971	1,076
Factor vloeroppervlak	1,000	1,000	0,737	0,981
Factor gewicht	1,000	1,000	1,228	1,247

Zoals in hoofdstuk 3 is aangegeven, is ammoniak nu nog geen oplossing, maar is besloten om ammoniak wel mee te nemen in ons model. Ook al geeft het model aan dat het gebruik van ammoniak op basis van de eigenschappen wel een oplossing is, zal deze uiteraard nog niet in praktijk kunnen worden toegepast. De reden hiervoor is dat er momenteel alleen nog maar onderzoek wordt gedaan naar grote schepen die op ammoniak zullen varen. Voor de toepassing van kleinere schepen zijn nog geen gegevens beschikbaar. Ook is het een zeer giftige stof die voor schepen die vooral op kleine wateren in de buurt van bevolking zullen varen nog niet verantwoord is.

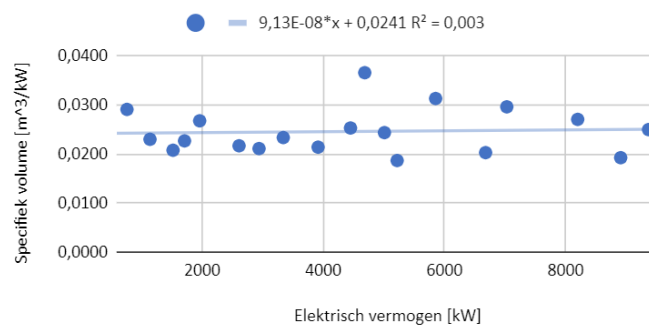
4.3.3. Kengetallen generatoren, batterijen en brandstofcellen

Voor het bepalen van de kengetallen van de generatoren, batterijen en brandstofcellen wordt er ook gebruikt gemaakt van de gegevens van voorbeelden uit de maritieme sector. Deze voorbeelden zijn al gedeeltelijk benoemd in hoofdstuk 3. Net als bij de verbrandingsmotoren op alternatieve brandstoffen wordt uit de gegevens van verschillende batterijen, brandstofcellen en generatoren de gemiddelde waarde van het volume per kilowatt bepaald. Ook wordt het specifieke vloeroppervlak (m^2/kW) en het specifieke gewicht (kg/kW) bepaald. Hiermee kan later worden uitgerekend hoeveel volume, oppervlak en gewicht er bij deze apparatuur komt kijken.

Generatoren

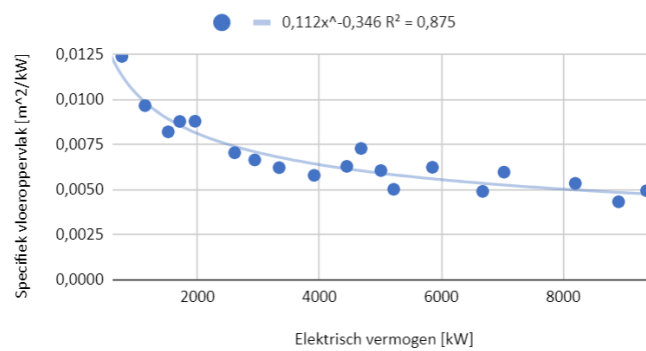
Voor het inschatten van de gegevens voor de specifieke ruimte, het vloeroppervlak en het gewicht voor de generatoren zijn gegevens van een redelijk aantal diesel, methanol en LNG generatoren opgezocht. Voor deze generatoren zijn trendlijnen opgesteld in Excel van de het specifiek volume, vloeroppervlak en gewicht tegen het vermogen. In figuren 4.12a, 4.12b en 4.12c zijn deze trendlijnen voor dieselgeneratoren weergegeven. Hierbij zijn de gegevens van de Wärtsilä diesel generator sets uit de 14, 20, 26, 31 en 32 serie gebruikt („Marine generating sets - Wärtsilä”, 2023).

Specifiek volume [m³/kW] versus Elektrisch vermogen [kW]



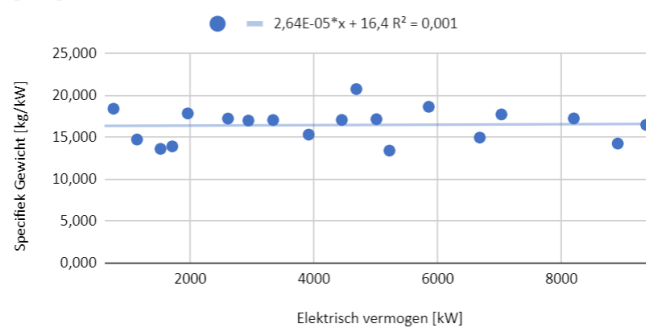
(a) Trendlijn specifiek volume

Specifiek vloeroppervlak [m²/kW] versus Elektrisch vermogen [kW]



(b) Trendlijn specifiek vloeroppervlak

Specifiek Gewicht [kg/kW] versus Elektrisch vermogen [kW]



(c) Trendlijn specifiek gewicht

Figuur 4.12: Trendlijnen voor het specifiek volume, vloeroppervlak en gewicht voor verbrandingsmotoren op diesel

Zoals te zien in figuren 4.12a, 4.12b en 4.12c kan er voor de bepaling van het specifiek volume en gewicht aangenomen worden dat een gemiddelde waarde een redelijke presentatie van de werkelijkheid geeft. Ditzelfde verband is ook gevonden voor LNG-generatoren, gebaseerd op de 20DF, 31DF en 34DF serie van Wärtsilä („Marine generating sets - Wärtsilä”, 2023). Voor het specifiek vloeroppervlakte is in figuur 4.12b een ander verband te zien. Dit verband wordt voorgesteld met behulp van een trendlijn volgens een machtreeks en een bijbehorende formule, ook de afwijking (R^2) van deze trendlijn is gegeven. Opnieuw geldt dat ditzelfde verband ook voor LNG-generatoren is

gevonden.

De kengetallen voor de methanolgenerator zijn gebaseerd op de 32 Methanol serie van Wärtsilä („Marine generating sets - Wärtsilä”, 2023) en de 175D serie van MAN („MAN 175D”, 2023). Naast vermogen heeft ook het toerental invloed op de hoofdafmetingen van generatoren. Dit is ook te zien bij het bepalen van de hoofdafmetingen van de dieselmotor beschreven in paragraaf 4.3.1.

De generatoren op diesel en LNG die gebruikt zijn, kunnen allemaal op eenzelfde toerental van 1000 rpm draaien, waardoor dit effect van het toerental geëlimineerd werd. De methanolgeneratoren die gebruikt worden hebben echter niet allemaal hetzelfde toerental. De generatorserie van Wärtsilä heeft een toerental van 750 rpm en die van MAN tussen de 1500 en 1800 rpm. Hierom is gekozen om wanneer het toerental van de generator, wat gelijk wordt gesteld aan de invoerwaarde van het toerental van de motor, onder de 1000 rpm is, de kengetallen verkregen worden uit de Wärtsilä serie en wanneer deze boven de 1000 rpm is, de kengetallen verkregen worden uit de MAN serie.

De kengetallen zijn ook voor deze gegevens in een grafiek uitgezet tegen het vermogen. Hieruit bleek dat een gemiddelde waarde voor zowel de specifieke ruimte als het specifiek vloeroppervlak en specifiek gewicht een representatieve waarde geeft. Tabel 4.2 geeft de gevonden kengetallen of de formules afhankelijk van het vermogen voor de gegevens van de generatoren weer.

Tabel 4.2: Kengetallen voor de verschillende generatoren

Type generator	Specifiek volume [m^3/kW]	Specifiek gewicht [kg/kW]	Specifiek vloeroppervlak [m^2/kW]
Diesel	0,0245	16,47	$y = 0,112x^{-0,346}$
Methanol	$0,0263 < 1000 \text{ rpm} < 0,0115$	$16,77 < 1000 \text{ rpm} < 9,17$	$0,0066 < 1000 \text{ rpm} < 0,0045$
LNG	0,0283	17,93	$y = 0,0106x^{-0,294}$

In tabel 4.2 is te zien dat de kengetallen voor een methanolgenerator iets hoger zijn dan een dieselmotor, en voor een LNG-generator nog iets hoger. Ook is opvallend, maar niet onverwacht, dat een hoger toerental aanzienlijk lagere kengetallen geeft. Wanneer er dus weinig ruimte op een schip beschikbaar is, zal het aantrekkelijk zijn om naar generatoren met een hoog toerental te kijken en gebruik te maken van een tandwielkast, wanneer deze nog niet aanwezig is. Zo kan er efficiënter met de ruimte omgegaan worden.

Batterijen en brandstofcellen

Voor het bepalen van de kengetallen voor batterijen en brandstofcellen is gezocht naar gegevens van verschillende systemen die geschikt zijn voor de maritieme sector. Voor batterijen is gekeken naar GridSolv Quantum van Wärtsilä (Storage, 2023) en naar Orca Energy van Corvus („Corvus Orca Energy - Corvus Energy”, 2023).

Als de productspecificaties naast elkaar gelegd worden blijken het specifiek volume en vloeroppervlak in dezelfde orde te zijn, maar is er voor het specifiek gewicht een verschil van factor zeven. Dit kan verklaard worden door de relatief nieuwe technologie van batterijen. Dieselmotoren worden bijvoorbeeld al erg lang gebruikt en zijn daarom ondertussen redelijk klaar met optimaliseren, omdat alles wat er te onderzoeken valt, al onderzocht is. Voor batterijen geldt dat er nog veel nieuw onderzoek gedaan kan worden en hiermee dus ook grote optimalisaties. Dit verklaart een groot verschil tussen verschillende concurrenten. Ditzelfde fenomeen is ook te zien bij brandstofcellen.

Uiteindelijk is gekozen om voor het model gebruik te maken van de gegevens van de Covus Orca Energy voor de batterijen en voor een gemiddelde van de PEM van Ballard („Marine Modules - Fuel Cell Power Products | Ballard Power”, g.d.) en het Marine System 200 van Powercell („Marine | PowerCell Group | Hydrogen Fuel Cell Solutions”, g.d.). Deze systemen kwamen op dit moment als beste naar voren wat betreft deze kengetallen. Er is gekozen om de beste kengetallen te gebruiken omdat beschikbare ruimte en gewicht op een sleepboot vaak beperkt zijn en deze systemen dus het meest geschikt zijn voor deze toepassing. De waardes van de kengetallen zijn te vinden in tabel 4.3.

Tabel 4.3: Kengetallen voor batterijen en brandstofcellen

	Specifiek volume [m^3/kW]	Specifiek gewicht [kg/kW]	Specifiek vloeroppervlak [m^2/kW]
Batterij	0,0038	4,33	0,0017
Brandstofcel	0,0088	5,39	0,0041

Wanneer tabel 4.2 en tabel 4.3 met elkaar vergeleken worden, is te zien dat de generatoren compacter zijn dan de batterijen en brandstofcellen, maar dat batterijen en brandstofcellen wel een stuk lichter zijn. Brandstofcellen zijn minder compact en ook zwaarder dan batterijen per kW, maar omdat de batterijen waarschijnlijk gekozen moeten worden op hun capaciteit en niet op hun vermogen is de verwachting dat de ruimte en het gewicht van de benodigde batterijen een stuk meer gaat zijn dan met deze kengetallen berekend zal worden. Hierdoor zal dit dichterbij komen of zelfs een stuk meer worden dan voor brandstofcellen.

Hiermee zijn de kengetallen voor de benodigde ruimte, vloeroppervlak en gewicht voor de generatoren, batterijen en brandstofcellen bepaald.

4.4. Kengetallen brandstoffen

Met de gegevens van alle alternatieve brandstoffen die in hoofdstuk 3 zijn gevonden worden andere kengetallen afgeleid. Met de gevonden gegevens worden de benodigde ruimte en hoeveelheid brandstof per kWh bepaald. In deze kengetallen wordt ook rekening gehouden met het ruimteverlies door de aanwezigheid van opslagtanks.

Om tot de kengetallen te komen moet eerst de dichtheid van de brandstof met de tank samen worden bepaald. Daarbij wordt gebruik gemaakt van de normale dichtheid bij de brandstof, maar is de dichtheid van de tank eigenlijk geen echte dichtheid. Hij wordt voor de meeste brandstoffen namelijk berekend met formule 4.19. Voor sommige brandstoffen (waterstof (koud), Ammoniak en LNG) is het echter een getal uit de literatuur (ConoShip, g.d.).

$$\rho_{tank} = \frac{m_{tank,wand}}{V_{tank,inhoud}} \quad (4.19)$$

De totale dichtheid van de brandstof inclusief tank wordt vervolgens berekend door de dichtheid van de brandstof en van de tank bij elkaar op te tellen, zoals te zien in formule 4.20.

$$\rho_{totaal} = \rho_{brandstof} + \rho_{tank} \quad (4.20)$$

Met deze dichtheid kunnen nu zowel het specifieke gewicht [kg/kWh] als het soortelijk volume [m^3/kWh] worden afgeleid. Voor het gewicht kan dit worden gedaan door de energiedichtheid van de brandstof te vermenigvuldigen met het percentage van de totale dichtheid dat daadwerkelijk brandstof is.

$$W_{m,tot} = \frac{\rho_{brandstof}}{\rho_{brandstof} + \rho_{tank}} \cdot W_{brandstof} \quad (4.21)$$

$$\gamma = \frac{1}{W_{m,tot}} \quad (4.22)$$

In bovenstaande formule staat W voor de energiedichtheid, m = massa, specifiek gewicht wordt aangegeven met het symbool γ .

Om het specifieke volume te bepalen, wordt het specifieke gewicht gebruikt. Door dit te vermenigvuldigen met de totale dichtheid kan de energiedichtheid inclusief tank [kWh/m^3] worden bepaald. Hierbij moet nog rekening worden gehouden met het feit dat niet alle brandstof uit de tank kan worden gehaald (restvolume). Er moet ook rekening worden gehouden met de extra ruimte die nodig is door de vorm van de tank. Dit is te zien in formule 4.23. In formule 4.24 is te zien hoe vervolgens het specifieke volume is bepaald.

$$W_{v,tot} = \rho_{tot} \cdot W_{m,tot} \cdot \frac{\text{Netto } v_{gebruik}}{\text{Extra ruimte}} \quad (4.23)$$

$$v = \frac{1}{W_{v \text{ tot}}} \quad (4.24)$$

Voor het specifiek volume wordt in bovenstaande formule het symbool v gebruikt. De letter v geeft het volume aan. In tabel 4.4 zijn de uiteindelijke kengetallen te zien. Ook voor batterijen is het specifiek volume en gewicht per kWh bepaald.

Tabel 4.4: Kengetallen voor verschillende brandstoffen inclusief tanks

	Specifiek volume [m^3/kWh]	Specifiek gewicht [kg/kWh]
Diesel	0,00021	0,2330
Ammoniak	0,00167	0,7345
Methanol	0,00050	0,4767
LNG	0,00114	0,2644
Waterstof (-253 °C)	0,00314	0,4692
Waterstof (700 bar)	0,00431	1,9009
Batterij	0,0114	13,000

Nu zijn voor elke brandstof kengetallen afgeleid. Hieruit kan met het vereiste vermogen en de gewenste vaartijd worden afgeleid hoeveel ruimte elke brandstof inneemt. Met de kengetallen die betrekking hebben op het gewicht kan bepaald worden of het schip nog voldoet aan alle stabiliteitseisen.

4.5. Kengetallen emissies

Naast gewicht en volume moeten ook de emissies die de verschillende brandstoffen uitstoten worden bepaald. Er moeten namelijk ook eisen worden gesteld aan het model omtrent emissies. Om emissies goed te kunnen bepalen wordt onderzocht hoe dit gedaan moet worden.

4.5.1. Bepalen van emissies

In het onderzoek van Psaraftis en Kontovas wordt de focus gelegd op de emissies van CO_2 en SO_2 . Hieruit is gebleken dat het verminderen van de snelheid van het schip altijd resulteert in een verminderde uitstoot. Als er schonere brandstoffen worden gebruikt worden er minder koolstof- en zwavelemissies uitgestoten op zee. Uit een studie blijkt echter dat wanneer de oplossing voor minder uitstoot is om minder snel te varen dat de maatschappij dan zeer waarschijnlijk meer transport via land zal gaan uitvoeren (Psaraftis en Kontovas, 2009). Dit komt doordat de verminderde transport over het water moet worden opgevangen. Helaas veroorzaakt het transport over land alleen maar meer uitstoot en is het dus minder voordelig. Het langzamer varen van schepen voor minder uitstoot zal dus niet de oplossing zijn.

Voor het berekenen van de emissie wordt door de Rijksoverheid (Hulskotte e.a., 2012) de volgende formule toegepast:

$$E = P \cdot t \cdot f_E \quad (4.25)$$

De emissie E wordt bepaald met behulp van het vermogen P , de tijd t en de emissiefactor f_E . De emissiefactor verschilt voor elke verbinding of deeltje en wordt uitgedrukt in de eenheid g/kWh. Onder techniekafhankelijke emissiefactoren vallen de stoffen NO_x , PM en CO. Onder de brandstofafhankelijke factoren vallen CO_2 en SO_2 . De leeftijd van de motor is ook een belangrijke factor in het bepalen van de emissiefactor. In tabel 9 van dit onderzoeksrapport is te zien dat een motor uit het jaar 1975 gemiddeld twee keer zoveel NO_x uitstoot als een motor uit het jaar 2008 of nieuwer. Daarnaast stoot deze ook drie keer zoveel CO uit. Door in oude sleepboten een nieuwe motor te plaatsen is dus op het gebied van emissies al heel veel te winnen.

4.5.2. Emissies in het model

Voor het afschatten van de uitstoot van de verschillende mogelijke oplossingen wordt een methode gebruikt waarbij voor iedere mogelijke brandstof en ieder aandrijvingssysteem wordt bepaald hoeveel gram emissies er per kWh wordt uitgestoten. Dit wordt gedaan zodat aan de hand van het vermogen en de vaartijd kan worden bepaald wat de hoeveelheid uitgestoten stof is, zoals in formule 4.26.

In tabel 4.5 is een overzicht gegeven van de uitstoten bij het gebruik van deze brandstoffen in verbrandingsmotoren. Zoals eerder aangegeven wordt voor waterstof gebruik gemaakt van een brandstofcel. De elektromotor is hierin niet meegenomen, omdat deze op zichzelf geen uitstoot heeft. De uitstoot van batterijen is weliswaar nul, maar is erbij gezet om beter te kunnen vergelijken. De totale uitstoot kan met behulp van de factoren in de tabel bepaald worden (Hulskotte e.a., 2012).

Tabel 4.5: Uitstoot bij verschillende brandstoffen

Uitstoot [g/kWh]	CO ₂	NO _x	SO _x	Fijnstof	CO
Diesel	507,10	1,800	0,065	0,015	3,500
Ammoniak	0	0,450	0,016	0,004	0,875
Methanol	431,03	0,300	0,026	$4 \cdot 10^{-5}$	0,800
LNG	370,37	0,444	0	0,001	0,030
Waterstof	0	0	0	0	0
Batterijen	0	0	0	0	0

De CO₂-uitstoot van de verschillende energiebronnen wordt eerst gegeven in tabel 4.5 („Combustion of Fuels - Carbon Dioxide Emission”, g.d.). Bij deze gegevens is aangenomen dat methanol zorgt voor een reductie in de uitstoot van CO₂ van 10%. Alle andere emissies van diesel en LNG in gram uitstoot per kilogram brandstof zijn in een andere bron gevonden (Neeft e.a., 1996). Door deze eenheid te delen door de energiedichtheid en het rendement kan worden bepaald hoeveel een verbrandingsmotor met deze brandstof uitstoot. De hiervoor beschreven formule ziet er dus uit als in formule 4.26, waarbij het rendement wordt weergegeven met de Griekse letter η :

$$f_E = \frac{E}{W \cdot \eta} \quad (4.26)$$

De uitstoot van diesel geldt wel voor oude dieselmotoren, omdat de bron (Neeft e.a., 1996) is gepubliceerd voor er strengere regels op de uitstoot van schadelijke emissies kwam („IMO's work to cut GHG emissions from ships”, 2019). Voor de uitstoot van nieuwere dieselmotoren worden de gegevens van („Emissies door de zeescheepvaart, 1990-2020 | Compendium voor de Leefomgeving”, g.d.) gebruikt. Hier wordt benoemd dat de uitstoot van SO₂ ten opzichte van 1990 met 93% zijn afgenomen. Verder wordt gebruik gemaakt van de regels van stage V. Dit zijn EU-regels voor alle 'niet voor de weg bestemde motoren' (Berger, 2019). De emissie-eisen aan diesel in tabel 4.5 (behalve CO₂-uitstoot), zijn gelijk aan de eisen van stage V voor binnenvaartschepen met een motor van 300 kW of meer („Emission Standards: Europe: Nonroad Engines”, 2021). Veruit de meeste sleepboten voldoen aan deze eis.

Voor methanol zijn gegevens gevonden (Tunér e.a., 2018). De uitstoot van SO_x wordt met 60% gereduceerd ten opzichte van fossiele brandstoffen als diesel („Methanol als maritieme brandstof”, g.d.). Voor LNG zijn de emissies bepaald aan de hand van getallen die de hoeveelheid uitstoot per kilogram brandstof gebruiken (Neeft e.a., 1996). Voor fijnstof geldt dat deze met 95% worden gereduceerd wanneer LNG wordt gebruikt in plaats van een dieselmotor (23g.nl, g.d.). Verder bevestigt deze bron ook de eerder bepaalde waarden van de emissiefactoren van LNG. Voor zuivere waterstof worden tijdens het gebruik geen van deze emissies uitgestoten.

Voor ammoniak zijn de getallen wat minder betrouwbaar. Dit komt doordat ammoniak nu nog niet als brandstof wordt gebruikt en er dus weinig getallen te vinden zijn over de emissies die ontstaan bij de verbranding ervan. Ammoniak stoot in ieder geval geen CO₂ uit, omdat er geen koolstofatomen in ammoniak aanwezig zijn.

Voor de andere emissies wordt ervan uitgegaan dat deze zullen voldoen aan de eisen die IMO gesteld

heeft voor 2050 („IMO's work to cut GHG emissions from ships", 2019). Dit is een reductie van 75% voor NOx, SOx en fijnstof. Deze aanname wordt gemaakt, omdat deze brandstof wordt overwogen voor de toekomst en dus wel aan deze eisen moet gaan voldoen.

De kengetallen kunnen worden vergeleken in het model met de eis van maximale uitstoot voor een bepaald schip. Als deze voldoen aan de eisen, is deze brandstof een optie om daadwerkelijk te gebruiken.

4.6. Kengetallen kosten

Voor de eigenaar of investeerder is het kostenplaatje natuurlijk ook van groot belang. Als uit het model blijkt dat meerdere opties voldoen aan de eisen, zullen de kosten waarschijnlijk een belangrijke rol spelen bij het maken van de keuze welke optie verder uitgewerkt moet worden. Daarom geeft het model een inschatting van de kosten bij elke duurzame optie, die ook aan de hand van kengetallen berekend zijn. De kosten zijn gesplitst in kapitaalkosten en brandstofkosten per trip (Verbrugge e.a., 2006).

Er zijn onderzoeken gedaan naar de economische aspecten van het vervangen van een oude dieselmotor (Prastyasari e.a., 2019). Kosten die komen kijken bij het vervangen van de motor zijn naast de aankoopkosten (Capital Expenditures, CAPEX) van de motor zelf ook de kosten die komen kijken bij het plaatsen van het schip in een droogdok, deze zijn aanzienlijk. Hierbij is tijd een grote factor.

Ook de boekhoudingskosten voor Operating Expenditures (OPEX) hebben een belangrijke bijdrage. Uiteraard komen er in de loop der tijd ook onderhoudskosten en afschrijvingen bij kijken. De levensduur van de nieuwe motor is dan ook een belangrijke parameter. Tijdens het gebruik zijn de kosten van de gekozen brandstof en de afstand die hiermee gevaren kan worden een belangrijke factor om te bepalen welk optie economisch het beste is.

Het schip is 'voordelig' als de terugbetaalperiode korter is dan operationele levensduur van het schip. Anders is het beter om de investering niet te maken.

De onderhoudskosten van verbrandingsmotoren en vervaging van batterijen of brandstofcellen zijn kosten die niet worden mee genomen in het model. uiteraard zijn dit kosten die in werkelijkheid wel invloed kunnen hebben op het maken van een keuze voor een bepaalde configuratie.

4.6.1. Kapitaalkosten

De kapitaalkosten in de uitvoer bestaan uit de aanschafprijs van de motoren, generatoren, brandstofcellen, batterijen en/of brandstoftanks. De berekening is gesplitst in kosten voor het hoofdsysteem, voor het hulpsysteem en voor de tanks.

Kosten van het hoofdsysteem en hulpsysteem

De kosten voor het hoofdsysteem en het hulpsysteem zijn gebaseerd op een kengetal in kosten per kW, die wordt vermenigvuldigd met het vermogen. Ook een extra elektromotor of extra batterijen worden hierbij met een kengetal meegenomen. De kengetallen staan in tabel 4.6.

Tabel 4.6: De kengetallen van de kosten van de machines

Aandrijvingsstelsel	Kosten [€/kW]	Bron(nen)
Diesel	288	(Baldi e.a., 2019)
Ammoniak	444	(Korberg e.a., 2021)
Methanol	318	(Korberg e.a., 2021)
LNG	564	(Baldi e.a., 2019)
(Extra) elektromotor	300	(Korberg e.a., 2021)
Brandstofcel	876	(Baldi e.a., 2019)
Batterij	500	(„Corvus Orca Energy - Corvus Energy”, 2023) & (Docent TU Delft, 2023)
Generator diesel	336	(Baldi e.a., 2019) & (Trivyza e.a., 2018)
Generator methanol	366	(Baldi e.a., 2019) & (Trivyza e.a., 2018)
Generator LNG	612	(Baldi e.a., 2019) & (Trivyza e.a., 2018)

De kosten in tabel 4.6 zijn indicatief. Ze zijn weliswaar gebaseerd op bronnen, maar verschillende bronnen geven (significant) andere getallen. Daarom is gekozen om zoveel mogelijk de getallen uit 1 bron, of uit een bron die daar weer aan refereert te gebruiken (zie tabel). Daardoor kunnen de kapitaalkosten van de verschillende aandrijvingsstelsels in ieder geval zo goed als mogelijk met elkaar worden vergeleken.

Bij de generatoren staan twee bronnen, omdat die kosten zijn gebaseerd op de kosten van de normale motoren. De tweede bron laat zien dat het verschil tussen een normale motor en generator (in 2018) ongeveer 40 €/kW bedraagt (Trivyza e.a., 2018).

Kosten van de tanks

De kosten voor de tanks beslaan alleen die kosten. Ze bevatten niet de kosten voor de energiedrager zelf. De kengetallen zijn gebaseerd op de kosten per kWh opgeslagen energie. De hoeveelheid benodigde energie wordt berekend uit de verschillende vermogens en vaartijd van de invoer (zie paragraaf 4.8). De kengetallen in het model staan in tabel 4.7.

Tabel 4.7: De kengetallen van de kosten van de brandstoftanks of batterijen

Energiedrager	Kosten [€/kWh]	Bron
Diesel	0,096	(van Biert e.a., 2022)
Ammoniak	0,576	(van Biert e.a., 2022)
Methanol	0,12	(van Biert e.a., 2022)
LNG	0,948	(van Biert e.a., 2022)
Waterstof	9,636	(van Biert e.a., 2022)
Batterij	167	(„Corvus Orca Energy - Corvus Energy”, 2023)

Op de kosten voor de batterijen na, zijn alle kosten in bovenstaande tabel gebaseerd op dezelfde bron. Daarmee zijn ze onderling goed te vergelijken.

Uit de tabel blijkt dat de opslag van diesel en methanol veruit de goedkoopste zijn. De tanks voor ammoniak en LNG zijn al duurder, maar de kosten voor waterstoftanks liggen daar nog flink boven. Batterijen zijn nog van een compleet andere schaal. Elk schip dat een significante hoeveelheid batterijen vereist, zal daarom waarschijnlijk erg duur zijn.

4.6.2. Brandstofkosten

De brandstofkosten worden niet berekend aan de hand van vaste kengetallen. Daarvoor zijn deze kosten te volatiel (denk aan de gascrisis na de inval in Oekraïne, (NU.nl, 2022)). De gebruiker van het model moet deze kosten daarom invullen bij de invoer (zie paragraaf 4.8). Vervolgens vermenigvuldigt het model deze getallen met de hoeveelheid brandstof die het schip nodig heeft per trip. Daarbij houdt het model geen marges aan.

4.7. Van kengetallen naar model

Zodra alle kengetallen uit bovenstaande paragrafen bepaald zijn, kan aan de hand van een rekenmodel en deze kengetallen het uiteindelijke model gemaakt worden. Dit rekenmodel zorgt dat voor een bepaalde invoer met behulp van kengetallen wordt berekend wat de uitvoer is.

Als eerste worden verschillende vermogens gedefinieerd waarmee het model rekt. Als tweede wordt de benodigde ruimte, vloeroppervlak en gewicht bepaald en ook de kosten. Tenslotte wordt voor elk aandrijvingssysteem gecheckt of de uitvoer aan de ingevoerde eisen voldoet. De berekeningen die hiervoor nodig zijn, zijn te vinden in de sheet 'Rekenmodel' van het model.

4.7.1. De vermogens in de berekeningen

Zoals beschreven in paragraaf 4.1 maakt het model gebruik van een splitsing tussen een hoofd- en hulpsysteem. In de invoer zijn er drie velden waarin de gebruiker een vermogen moet invullen: Het nominaal vermogen van de aandrijving, het piekvermogen van de aandrijving en de PTO. Daarnaast is er ook een veld waarin het percentage van de tijd dat er een vermogen, dat boven het nominaal vermogen ligt, nodig is.

Tenslotte is er ook een veld dat aangeeft waar de grens ligt voor het wel of niet gebruik maken van een hulpsysteem. Dit veld is niet te vinden in de invoer, maar in het rekenmodel, aangezien het niet de bedoeling is dat de gebruiker dit getal verandert. Dit veld geeft aan voor welke waarden van het percentage van het nominaal vermogen ten opzichte van het piekvermogen er wel of geen gebruik gemaakt zal worden van een hulpsysteem. Als het daadwerkelijke percentage boven deze grenswaarde ligt, is er geen scheiding tussen hoofd- en hulpsysteem. Als het daadwerkelijke percentage onder de grenswaarde ligt maakt het model wel gebruik van een hoofd- en hulpsysteem. Voor de grenswaarde is 80% aangenomen.

Het rekenmodel maakt onderscheid tussen vijf verschillende vermogens:

- Vermogen hoofdsysteem
- Vermogen hulpsysteem
- Vermogen PTO
- Gemiddeld vermogen hoofdmotor
- Gemiddeld vermogen brandstofcel of batterij

De berekeningen van de verschillende vermogens die hierboven staan, worden in tabel 4.8 inzichtelijk gemaakt. In deze tabel wordt onderscheid gemaakt tussen gebruik van alleen een hoofdsysteem en een hoofdsysteem in combinatie met een hulpsysteem.

Tabel 4.8: Berekening verschillende vermogens voor alleen hoofdsysteem en hoofdsysteem met hulpsysteem

	Geen hulpsysteem	Met hulpsysteem
$P_{hoofdsysteem}$	P_{piek}	P_{nom}
$P_{hulpsysteem}$	0	$P_{piek} - P_{nom}$
PTO	PTO	PTO
$P_{gem,hoofdmotor}$	$P_{nom} + (P_{piek} - P_{nom}) * \text{deel boven } P_{nom}$	P_{nom}
$P_{gem,brandstofcel,batterij}$	$(P_{gem,hoofdmotor} + P_{hulpsysteem} * \text{deel boven } P_{nom}) / \eta_{elektromotor} + PTO$	

De meeste vermogens in tabel 4.8 zijn afhankelijk van of er een hulpsysteem is of niet. Alleen het vermogen van de PTO en het gemiddelde vermogen van de brandstofcel of batterij ($P_{gem,brandstofcel,batterij}$) zijn dat niet. Dat geldt voor de PTO omdat het elektrische vermogen voor de boordsystemen onafhankelijk is van de configuratie van de aandrijving.

Bij $P_{gem,brandstofcel,batterij}$ geldt dat, omdat een systeem met brandstofcellen of batterijen in feite geen hulpsysteem kán hebben. In alle gevallen komt alle energie ofwel uit de brandstofcellen, ofwel uit de batterijen. Er wordt niet gewerkt met een generator.

De gemiddelde vermogens worden gebruikt om de benodigde ruimte, gewicht en kosten van de brandstof, inclusief tanks, te bepalen. Ook de grootte van de brandstofcellen en batterijen wordt ermee bepaald. De grootte van de verbrandingsmotoren wordt echter bepaald met de vermogens van het hoofdsysteem en het hulpsysteem.

4.7.2. Ruimte, gewicht en kosten

De berekeningen voor de benodigde ruimte, het vloeroppervlak, het gewicht en de kosten van de aandrijvingsystemen en ruimte en het gewicht van de brandstof inclusief tank gaan volgens dezelfde methode bij verschillende brandstoffen. Ook worden bijvoorbeeld de benodigde ruimte en vloeroppervlak op precies dezelfde manier berekend, maar met andere kengetallen. Hierbij wordt de tandwielkast verwaarloosd, omdat deze in verhouding met de rest van het aandrijvingsysteem erg klein is.

Eerst de berekeningen voor het hoofdsysteem: Voor de verbrandingsmotoren op diesel, methanol en LNG worden de ruimte, het vloeroppervlak, het gewicht en de kosten berekend met formules 4.27, 4.28 en 4.29, waarbij de bijbehorende kengetallen gebruikt worden.

$$V_{\text{motor}} = k_{\text{ruimte motor}} \cdot P_{\text{hoofdsysteem}} \quad (4.27)$$

$$A_{\text{motor}} = k_{\text{vloeroppervlak motor}} \cdot P_{\text{hoofdsysteem}} \quad (4.28)$$

$$m_{\text{motor}} = k_{\text{gewicht motor}} \cdot P_{\text{hoofdsysteem}} \quad (4.29)$$

Voor de verbrandingsmotor op ammoniak geldt dat deze waarden gelijk zijn aan het bijbehorende kengetal vermenigvuldigd met het piekvermogen opgeteld bij het PTO. Dit verschil komt door het verschil in configuratie zoals beschreven in paragraaf 4.1.

$$V_{\text{motor}} = k_{\text{ruimte motor}} \cdot (P_{\text{piek}} + \text{PTO}) \quad (4.30)$$

$$A_{\text{motor}} = k_{\text{vloeroppervlak motor}} \cdot (P_{\text{piek}} + \text{PTO}) \quad (4.31)$$

$$m_{\text{motor}} = k_{\text{gewicht motor}} \cdot (P_{\text{piek}} + \text{PTO}) \quad (4.32)$$

Voor het systeem met brandstofcellen geldt dat het hoofdsysteem bestaat uit de brandstofcellen en een elektromotor. De ruimte, het vloeroppervlak en het gewicht worden daarom berekend door het bijbehorende kengetal voor de brandstofcel te vermenigvuldigen met het gemiddeld vermogen en dit op te tellen bij het bijbehorende kengetal voor de elektromotor vermenigvuldigd met het piekvermogen.

$$V_{\text{brandstofcel}} = k_{\text{ruimte brandstofcel}} \cdot P_{\text{gem brandstofcel}} + k_{\text{ruimte elektromotor}} \cdot P_{\text{piek}} \quad (4.33)$$

$$A_{\text{brandstofcel}} = k_{\text{vloeroppervlak brandstofcel}} \cdot P_{\text{gem brandstofcel}} + k_{\text{vloeroppervlak elektromotor}} \cdot P_{\text{piek}} \quad (4.34)$$

$$m_{\text{brandstofcel}} = k_{\text{gewicht brandstofcel}} \cdot P_{\text{gem brandstofcel}} + k_{\text{gewicht elektromotor}} \cdot P_{\text{piek}} \quad (4.35)$$

Tenslotte wordt de berekening voor het systeem met batterijen bepaald. Er is hier gekozen om de batterijen te categoriseren onder brandstof in plaats van hoofdsysteem, omdat de gewenste capaciteit een grotere invloed heeft op de hoeveelheid benodigde batterijen dan het gewenste vermogen. Hierdoor wordt de berekening voor de ruimte, het vloeroppervlak en het gewicht voor het hoofdsysteem het bijbehorende kengetal voor de elektromotor vermenigvuldigd met het piekvermogen.

$$V_{\text{batterij}} = k_{\text{ruimte elektromotor}} \cdot P_{\text{piek}} \quad (4.36)$$

$$A_{\text{batterij}} = k_{\text{vloeroppervlak elektromotor}} \cdot P_{\text{piek}} \quad (4.37)$$

$$m_{\text{batterij}} = k_{\text{gewicht elektromotor}} \cdot P_{\text{piek}} \quad (4.38)$$

Vervolgens de berekeningen voor het hulpsysteem: Voor de systemen met verbrandingsmotoren op diesel, methanol en LNG geldt dat de ruimte, het vloeroppervlak, het gewicht en de kosten van het hulpsysteem berekend worden met het bijbehorende kengetal voor de desbetreffende generator,

vermenigvuldigd bij het vermogen van het hulpsysteem, gedeeld door het vermogen van de elektromotor en opgeteld bij het PTO, waarna het bijbehorende kengetal voor de elektromotor vermenigvuldigd met het vermogen van het hulpsysteem hierbij opgeteld wordt.

$$V_{\text{hulpsysteem}} = k_{\text{ruimte generator}} \cdot \left(\frac{P_{\text{hulpsysteem}}}{\eta_{\text{elektromotor}}} + \text{PTO} \right) + k_{\text{ruimte elektromotor}} \cdot P_{\text{hulpsysteem}} \quad (4.39)$$

$$A_{\text{hulpsysteem}} = k_{\text{vloeroppervlak generator}} \cdot \left(\frac{P_{\text{hulpsysteem}}}{\eta_{\text{elektromotor}}} + \text{PTO} \right) + k_{\text{vloeroppervlak elektromotor}} \cdot P_{\text{hulpsysteem}} \quad (4.40)$$

$$m_{\text{hulpsysteem}} = k_{\text{gewicht generator}} \cdot \left(\frac{P_{\text{hulpsysteem}}}{\eta_{\text{elektromotor}}} + \text{PTO} \right) + k_{\text{gewicht elektromotor}} \cdot P_{\text{hulpsysteem}} \quad (4.41)$$

Voor het systeem met een verbrandingsmotor op ammoniak wordt geen gebruik gemaakt van een scheiding tussen een hoofd- en hulpsysteem dus de waarden voor het hulpsysteem zijn in dit geval gelijk aan nul. Voor de systemen met brandstofcellen en batterijen bestaat het hulpsysteem slechts uit batterijen. Deze batterijen zullen voor het systeem met enkel batterijen onder brandstof gecategoriseerd worden, zoals eerder beschreven. Hierdoor zijn de waarden voor de ruimte en het gewicht van het hulpsysteem van batterijen gelijk aan nul. Het vloeroppervlak wordt voor de brandstoffen niet berekend, dus het vloeroppervlak van de batterijen wordt wel onder het hulpsysteem gecategoriseerd. dit wordt berekend met:

$$A_{\text{hulpsysteem}} = V_{\text{brandstof}} \cdot \frac{k_{\text{vloeroppervlak batterij}}}{k_{\text{ruimte batterij}}} \quad (4.42)$$

Voor het systeem met brandstofcellen worden de batterijen wel bij het hulpsysteem meegenomen. De waarden worden bepaald door het maximum te nemen tussen de waarden berekend volgens het benodigd vermogen en de benodigde capaciteit. Hieruit volgt de volgende formule:

$$V/A/m/k_{\text{hs}} = \text{MAX} \left(k_{\text{batterij}} \cdot \frac{P_{\text{hulp}}}{\eta_{\text{Em}}} ; \right) \quad (4.43)$$

$$k_{\text{B,brandstof}} \cdot P_{\text{hulp}} \cdot \left(\left(\frac{\text{perc. boven } P_{\text{nom}}}{100} \right) \cdot \left(1 - \frac{\text{perc. boven } P_{\text{nom}}}{100} \right) \right) \cdot \frac{t_s}{\eta_{\text{Em}}} \quad (4.44)$$

Voor kosten is het symbool k gebruikt. Het hulpsysteem wordt aangegeven met hs . Em staat voor elektromotor. De vaartijd wordt aangenomen met t_s . Een batterij kan worden aangegeven met een B . Hierbij is het eerste deel de formule om de waarden uit te rekenen met het vermogen en het tweede deel van de formule om de waarden uit te rekenen met de capaciteit. Bij de methode gebaseerd op de capaciteit wordt niet de totale vaartijd, maar de vaartijd dat het hulpsysteem nodig is gebruikt. Daarnaast wordt ook het rendement van de elektromotor meegenomen, omdat deze nog tussen de batterij en de schroef staat. Alle andere rendementen zijn meegenomen in de berekeningen van de kengetallen voor de benodigde hoeveelheid brandstof en de emissies.

Tenslotte de berekeningen voor de brandstoffen inclusief tank: Voor de ruimte en het gewicht van de brandstof en tank voor diesel, methanol en LNG wordt de volgende formule gebruikt:

$$V_{\text{brandstof}}/m_{\text{brandstof}} = k_{\text{brandstof}} \cdot (P_{\text{gem,hoofd}} + \text{PTO} + \frac{P_{\text{hulp}} \cdot \frac{\text{perc. boven } P_{\text{nom}}}{100}}{\eta_{\text{Em}}}) \cdot t_s \quad (4.45)$$

Zoals te zien in formule 4.45 wordt bij het gemiddeld vermogen van de hoofdmotoren het PTO en het vermogen van het hulpsysteem opgeteld. Het vermogen van het hulpsysteem wordt niet vermenigvuldigd met de totale vaartijd, maar met het deel van de vaartijd dat het gebruikt wordt.

Daarnaast wordt het ook gedeeld door het rendement van de elektromotor omdat deze deel is van het hulpsysteem. De rendementen van de verbrandingsmotoren, generatoren, brandstofcellen en batterijen zijn meegenomen in de kengetallen. De opsomming van vermogens wordt tenslotte vermenigvuldigd met het bijbehorende kengetal, aangegeven met $k_{\text{brandstof}}$, en de vaartijd. De ruimte en het gewicht van de gevulde brandstoftanks voor ammoniak worden berekend met:

$$V_{\text{brandstof}}/m_{\text{brandstof}} = k_{\text{brandstof}} \cdot (P_{\text{gem,hoofd}} + \text{PTO} + P_{\text{hulp}} \cdot \frac{\text{perc. boven } P_{\text{nom}}}{100}) \cdot t_s \quad (4.46)$$

In formule 4.46 wordt het rendement van de elektromotor niet meegenomen, omdat het aandrijvingssysteem op ammoniak geen gebruik maakt van een generator en elektromotor. De ruimte en het gewicht voor de waterstof en batterijen zijn te berekenen door het bijbehorende kengetal te vermenigvuldigen met het gemiddeld vermogen van brandstofcel of batterij en de vaartijd.

4.7.3. Voldoet de uitvoer aan de eisen?

Op deze manier worden alle gegevens berekend en kunnen deze vergeleken worden met de invoer. Zo worden de benodigde ruimte voor de apparatuur van zowel het hoofd- als hulpsysteem bij elkaar opgeteld en vergeleken met de beschikbare ruimte in de machinekamer. Wanneer alle uitgerekende waarden van het systeem binnen de eisen, gegeven in de invoer, passen en aan de uitstoot voldoet zal het model als uitvoer een pass geven. Dit is zichtbaar in de vorm van een groen vakje. Daarnaast zal ook een inschatting van de totale aanschafkosten en de brandstofkosten weergegeven worden.

4.8. Gebruik van het model

In het rekenmodel zijn alle bovenstaande gegevens verwerkt. Het model bestaat uit meerdere tabbladen, waarvan het invoer- en uitvoerveld voor de meeste gebruikers de meest interessante informatie geeft. De invoer- en uitvoer worden respectievelijk in subparagrafen 4.8.1 en 4.8.2 beschreven. Een handleiding voor het gebruik van het model kan worden gevonden in bijlage A.

4.8.1. Invoer van het model

Als invoer kunnen de eisen en wensen voor het nieuwe aandrijvingssysteem van een bepaalde sleepboot worden ingevuld. Figuur 4.13 toont het invoerveld. Alleen de geelgekleurde cellen mogen worden gewijzigd, de paarsgekleurde niet.

Invoer	
Naam Schip	Varnebank
Vermogen & Vaartijd	
Nominaal vermogen aandrijving	180 kW
Piekvermogen aandrijving	180 kW
PTO	20 kW
Vaartijd per trip	6 uur
Percentage vaartijd boven nominaal vermogen	0 %
Ruimte, Vloeroppervlak & Gewicht	
Beschikbare ruimte machinekamer	51,875 m ³
Beschikbaar vloeroppervlakte machinekamer	20,75 m ²
Beschikbare ruimte vloeibare brandstof	100 m ³
Beschikbare ruimte vaste brandstof (batterijen)	0 m ³
Beschikbaar gewicht aandrijvingsysteem en bra	122240 kg
Uitstoot	
Maximale uitstoot CO ₂	300 g/kWh
Maximale uitstoot NO _x	2,826 g/kWh
Maximale uitstoot SO _x	0,233 g/kWh
Maximale uitstoot fijnstof	0,466 g/kWh
Maximale uitstoot CO	1,398 g/kWh
Is groene methanol beschikbaar?	Ja ▼
Is bio-LNG beschikbaar?	Ja ▼
Gegevens hoofdmotor(en)	
Aantal motoren	2
Toerental elektromotor	1000 rpm
Toerental verbrandingsmotor	1000 rpm
Aantal cilinders	4
2 takt/ 4 takt	4 takt
Brandstofkosten	
Diesel	0,569 €/L
LNG (koud)	0,216 €/L
Methanol	0,386 €/L
Ammoniak	4,750 €/kg
Waterstof	10 €/kg
Stroom	0,38 €/kWh

Figuur 4.13: Invoerveld model

Het invoerveld is hier ingevuld met voorbeeldgegevens, maar de gebruiker van het rekenmodel moet de cellen met zijn of haar eigen eisen, wensen en mogelijkheden invullen. De invoervelden staan hieronder uitgelegd.

Belangrijk: Het rekenmodel bevat (bijna) geen marges. Het is dus zaak om zelf voor marges in het benodigde vermogen, de vaartijd en de beschikbare ruimte aan te brengen!

- Het nominaal vermogen aandrijving is het vermogen waar het schip meestal op vaart. Bijvoorbeeld het vermogen dat nodig is voor de kruissnelheid. Voor het energieverbruik neemt het schip aan dat minstens dit vermogen wordt gebruikt.
- Het piekvermogen aandrijving is het maximale vermogen dat het schip nodig heeft voor de aandrijving. Bijvoorbeeld het vermogen dat nodig is om de topsnelheid te halen, tijdens het slepen of tijdens het vissen. Het model neemt hier geen marge aan.
- De PTO is het elektrische vermogen dat nodig is voor alle elektrische apparatuur aan boord. Ook systemen als een elektrische boegschroef of ankerlier moeten hierin meegenomen worden,

behalve als de gebruiker die op een andere manier wil aandrijven. Het maximale vermogen dient ingevuld te worden, hoewel het rekenmodel dan wel aanneemt dat dit vermogen continu wordt gebruikt. Dit zorgt ervoor dat er een marge wordt genomen op de benodigde hoeveelheid brandstof, omdat in werkelijkheid niet constant dit PTO wordt gebruikt.

- De vaartijd per trip is hoe lang het schip moet kunnen varen tussen twee momenten om te bunkeren of te laden. Hier hanteert het model geen marge op, dus het is aan te raden hier een veilige marge op te zetten.
- De beschikbare ruimte machinekamer en beschikbare vloeroppervlakte machinekamer definiëren de ruimte die beschikbaar is voor de apparatuur, maar die eventueel ook gebruikt kan worden voor tanks of batterijen. Hierbij moet de gebruiker er zelf rekening mee houden dat er ook rondgelopen moet kunnen worden, wat een grote reductie in beschikbare ruimte kan opleveren.
- De beschikbare ruimte vloeibare brandstof definieert de ruimte voor brandstoftanks. Het rekenmodel gaat uit van een relatief optimale tankvorm. Als het schip van de gebruiker kleine of gek gevormde tanks bevat, kunnen deze niet meegenomen worden.
- Batterijen kunnen niet makkelijk op elke plek geplaatst worden. Daarom moeten voor de beschikbare ruimte vaste brandstof alleen relatief grote, rechthoekige en makkelijk te bereiken ruimtes meegenomen worden. Uit ervaring van de case-study blijkt dat slechts erg weinig ruimtes geschikt zijn.
- Met de maximale uitstoot definieert de gebruiker hoeveel die van verschillende emissies maximaal wil uitstoten. Dit kan gebaseerd zijn op wettelijke of IMO-eisen, op eisen van een andere instantie of wensen en belangen van de eigenaar. Met de knoppen of groene methanol en/of bio-LNG beschikbaar zijn, kan de CO_2 -uitstoot van respectievelijk methanol en LNG op nul gezet worden ('Ja') of niet ('Nee').
- Onder de gegevens hoofdmotor(en) vult de gebruiker in hoeveel hoofdmotoren er nodig zijn en wat het toerental van deze motoren moet zijn. De ingevulde vermogens van de aandrijving worden gelijk verdeeld over het aantal motoren. Omdat de gebruiker mogelijk een ander toerental bij een verbrandingsmotor wil dan bij een elektromotor, zijn hier verschillende invoervelden voor.
- Het aantal cilinders en of het een 2-takt of 4-takt motor moet zijn, is relevant voor de afmetingen en gewicht van de verbrandingsmotor(en). De invloed van het aantal cilinders is echter relatief klein.
- Op de door de gebruiker ingevulde brandstofkosten, worden de berekende brandstofkosten per trip gebaseerd. Het is daarom relevant om hier zo realistisch mogelijke prijzen in te vullen. Het model neemt wel aan dat alle opgeslagen brandstof wordt gebruikt, wat waarschijnlijk te hoge kosten oplevert. De eenheid van elke energiedrager kan niet worden aangepast.

4.8.2. Uitvoer van het model

Met behulp van de andere tabbladen wordt in het uitvoerveld de kolom Eisen behaald gekleurd. Als een duurzame optie voldoet aan alle eisen kleurt het vak van deze oplossing groen. Als de optie niet voldoet aan één of meerdere van de eisen kleurt het vak rood.

Naast de technische haalbaarheid, geeft de uitvoer een indicatie van de te verwachten kapitaalkosten (capex) en brandstofkosten per trip (opex) (Verbrugge e.a., 2006). Ook toont het model of het nodig is om brandstoftanks of batterijen in de machinekamer te plaatsen. Figuur 4.14 geeft het uitvoerveld weer.

Aandrijvingssystemen	Uitvoer		Kapitaalkosten (€1000)	Brandstofkosten per trip
	Eisen behaald?	Beschikbaar voor Varnebank in 2024		
Verbrandingsmotor Diesel	Ja	Ja	59	132
Verbrandingsmotor Ammoniak	Ja	Nee	82	3081
Verbrandingsmotor Methanol	Ja	Nee	65	216
Verbrandingsmotor LNG	Ja	Nee	116	91
Brandstofcel waterstof (koud)	Ja	Ja	250	2425
Brandstofcel waterstof (druk)	Ja	Ja	250	2425
Batterij Lithium	Ja	Ja	263	557

Figuur 4.14: Uitvoerveld model

4.9. Verificatie model

Voor de verificatie van het model wordt een specifieke methode gebruikt (Sargent, 2011). Deze methode kan uitgesplitst worden in vier verschillende onderzoeken:

- Modelgedrag verkennen
- Hypothesetest
- Betrouwbaarheidsintervallen
- Grafische vergelijkingen van de gegevens

4.9.1. Modelgedrag verkennen

Modelgedrag herkennen houdt in dat er gekeken wordt naar de uitvoerwaarden bij verschillende invoerwaarden. Hierbij wordt vooral gekeken of de grootte van de waarden realistisch zijn en binnen de verwachtingen liggen. Daarnaast wordt ook gekeken naar de verandering van de uitvoerwaarden bij een verandering van invoerwaarden. Ook deze verandering moet volgens verwachting zijn. Deze verwachtingen worden bepaald door vergelijkingen te maken met bestaande schepen en andere modellen en te spreken met experts.

Deze methode van verificatie is op het model toegepast door de invoerwaarden van een bestaand schip, onze case-study de Varnebank, in te vullen. De uitvoerwaarden worden vervolgens vergeleken met bestaande vergelijkbare schepen waarvan het aandrijvingssysteem bekend is. Daarnaast zijn de groottes van en de verbanden tussen de waarden door de projectgroep besproken en is het model aan de begeleider getoond. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het model voldoet aan de verwachtingen en is het model dus geslaagd op deze verificatiemethode.

4.9.2. Hypothesetest

Bij verificatie aan de hand van hypothesetesten wordt dieper ingegaan op het modelgedrag. Bij hypothesetesten wordt niet alleen naar de invoer en uitvoer gekeken, maar ook naar bijvoorbeeld de invloed van verschillende constanten die in het rekenmodel verwerkt zijn. Eerst worden allerlei testen bedacht, waarna bijbehorende hypothesen opgesteld worden. Vervolgens worden de testen uitgevoerd en de uitkomsten met de hypothesen vergeleken.

Omdat de hypothesen gebaseerd zijn op literatuur, realiteit of logica kan ervan uitgegaan worden dat wanneer de uitkomsten gelijk zijn aan de hypothesen het model geslaagd is voor deze verificatiemethode. Wanneer een uitkomst niet overeenkomt met de bijbehorende hypothese moet verder onderzoek gedaan worden. Of er klopt iets niet in het model, of de hypothese moet verworpen worden. Op het model zijn ook verschillende hypothesetesten uitgevoerd. De testen, hypothesen en uitkomsten zijn weergegeven in tabel 4.9.

Tabel 4.9: Hypothesetesten

Test	Hypothese	Geslaagd?
P_{nom} , P_{piek} , $PTO=0,001$ kW	Zeer weinig benodigde ruimte en gewicht voor apparatuur en brandstof, alles pass voor deze factoren	
P_{nom} , P_{piek} , $PTO=10$ kW	Weinig benodigde ruimte en gewicht voor apparatuur en brandstof, alles pass voor deze factoren	
P_{nom} , P_{piek} , $PTO=10$ kW, $\eta_{apparatuur}=0,000001$	Zeer veel benodigde ruimte en gewicht brandstof, alles fail	

Het doel van de eerste test is om te checken of het vermogen en de benodigde ruimte en gewicht van de apparatuur en de brandstof op de juiste manier van elkaar afhangen in het model. De verwachting is dat bij een invoer van een zeer laag vermogen van 0,001 kW er ook zeer weinig ruimte en gewicht nodig zal zijn om de geschikte apparatuur en voldoende brandstof mee te nemen. Deze verwachting is gebaseerd op het feit dat zowel volume als gewicht schalen met het vermogen (de Vos en Stapersma, 2015).

Als gevolg van deze lage waarden voor volume en gewicht is de verwachting dat alle verschillende aandrijvingssystemen minder ruimte en gewicht in zullen nemen dan dat er beschikbaar is op de Varnebank, waardoor het model voor deze factoren voor alle systemen een pass geeft.

De tweede test is toegevoegd om te checken of het model ook nog een pass geeft voor alle aandrijvingssystemen wanneer de vermogens van 0,001 kW verhoogd worden tot 10 kW. Als dit het geval is kunnen meer invoerwaarden een voor een aangepast worden en wanneer het model dan een fail geeft komt dit door deze aanpassing en niet door het gevraagde vermogen. Deze test is dus een soort nulmeting voor de derde test.

De derde test is belangrijk om te testen of naast het verband tussen het vermogen en de ruimte en het gewicht van de brandstof ook de andere factoren zoals de rendementen op de juiste manier verwerkt zijn. Zo worden bij deze test de rendementen van de verbrandingsmotoren, brandstofcellen, batterijen, elektromotoren en generatoren een voor een op 0,000001 gezet. Hier wordt net als bij de eerste test een lage waarde gekozen, maar niet nul. De reden hiervoor is dat het model veel berekeningen uitvoert waar gedeeld wordt door het rendement en een waarde van nul dus een error zal opleveren.

De verwachting bij deze test is dat alle aandrijvingssystemen een fail zullen krijgen vanwege een te kort aan beschikbare ruimte en gewicht wanneer de rendementen deze zeer lage waarde krijgen. Dit komt omdat een laag rendement betekent dat er weinig energie uit de brandstof gehaald wordt. Om nog steeds aan de benodigde energie te komen is er dus meer brandstof nodig. Bij een zeer laag rendement is er dus extreem veel brandstof nodig, waar geen ruimte voor is.

De enige uitzondering zijn de batterijen. Het interne rendement van de batterijen wordt niet meegenomen in de berekeningen omdat gerekend wordt met de energie die uit de batterijen komt en niet met wat erin gaat. Het rendement is hier dus al in verwerkt. Dit betekent dat het rendement niet aangepast kan worden door het getalletje in de cel aan te passen, want deze is dus niet gelinkt aan de berekeningen voor de benodigde energie. Hierdoor krijgt elk aandrijvingssysteem een fail, behalve die met alleen batterijen.

4.9.3. Betrouwbaarheidsintervallen

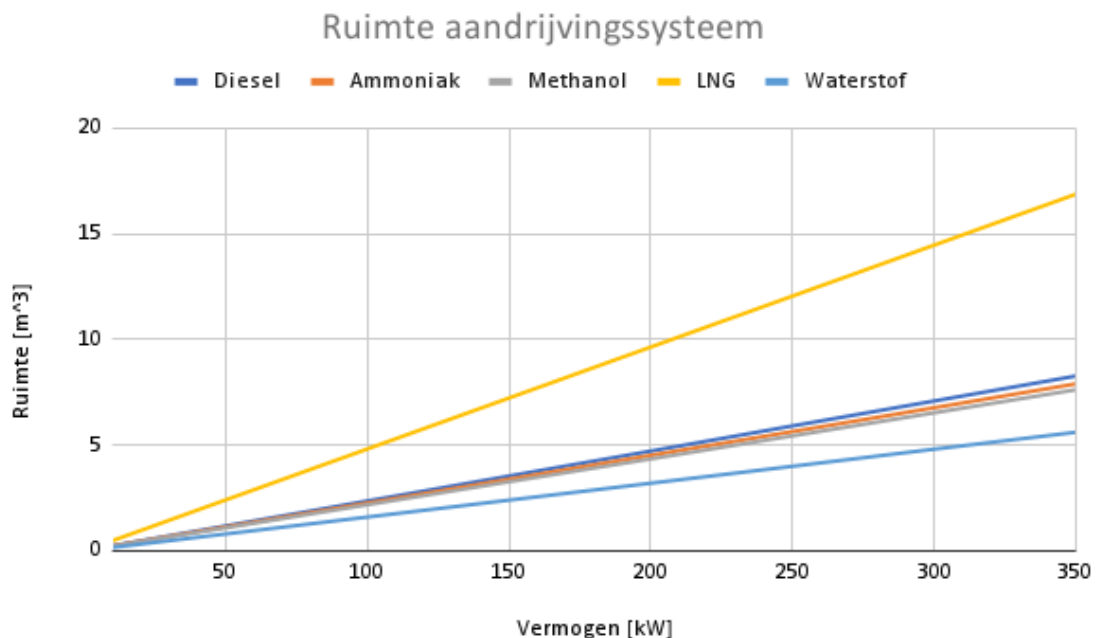
Een betrouwbaarheidsinterval is het interval waar een bepaalde waarde tussen zal liggen voor een bepaald percentage van de keren dat een experiment herhaald wordt. Dit percentage wordt het betrouwbaarheidsniveau genoemd. Wanneer het betrouwbaarheidsinterval klein is en het betrouwbaarheidsniveau groot, kan geconcludeerd worden dat het experiment betrouwbaar is. Omdat in dit rapport gebruik gemaakt wordt van een model dat werkt met berekeningen en niet met een experiment, komt er bij een bepaalde invoer altijd dezelfde uitvoer uit. Volgens deze definitie zou het model dus extreem betrouwbaar zijn. Omdat dit rapport over een model gaat en niet over een

experiment wordt deze methode achterwege gelaten, omdat deze niet geschikt is om de betrouwbaarheid van een model te bepalen.

4.9.4. Grafische vergelijkingen van de gegevens

De laatste verificatiemethode werkt door verkregen gegevens weer te geven in grafieken om zo verbanden te visualiseren, zodat deze geanalyseerd kunnen worden. Na het analyseren en vaststellen van het soort verband tussen de gegevens kan besloten worden of dit verband logisch en volgens verwachting is.

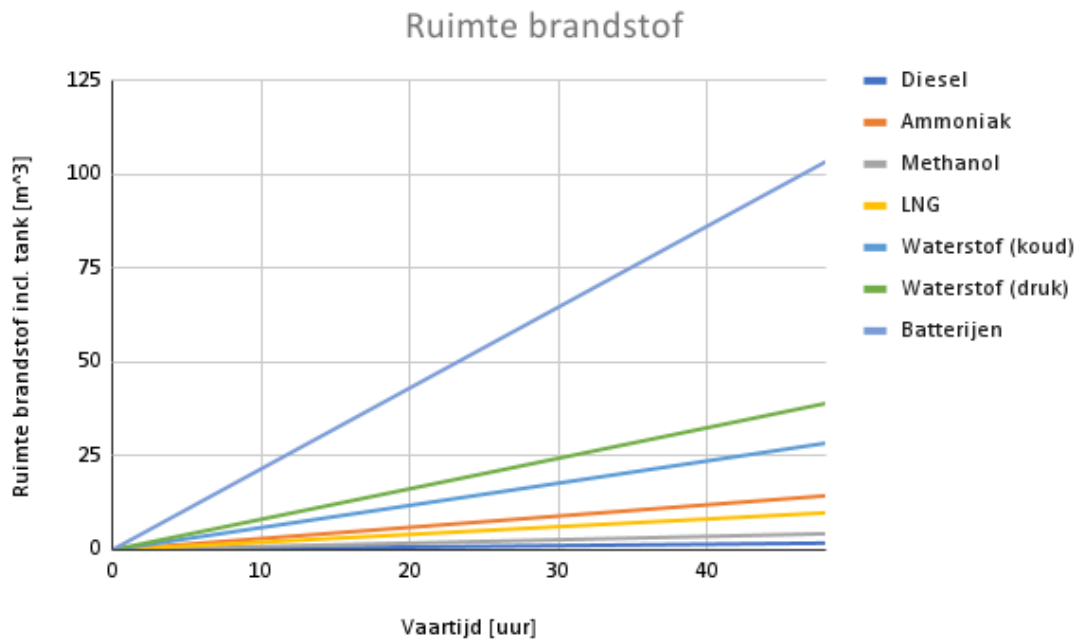
In grafiek 4.15 wordt voor de aandrijvingsystemen op diesel, ammoniak, methanol, LNG en waterstof de ruimte van de apparatuur uitgezet tegen het gevraagde vermogen. Het vermogen weergegeven in de grafiek is het nominaal vermogen. Voor het piekvermogen is 150 % van het nominaal vermogen aangenomen en voor de PTO 10 % van het nominaal vermogen. In deze grafiek is het aandrijvingsysteem op batterijen weggelaten, omdat de hoeveelheid batterijen bepaald wordt door de vaartijd en niet door het vermogen.



Figuur 4.15: Benodigde ruimte verschillende aandrijvingsystemen

Zoals te zien in grafiek 4.15 is er een lineair verband tussen de ruimte van de apparatuur en het vermogen. Dit is zoals verwacht met de gebruikte formules uit 4.3. Verder valt op dat de lijn voor LNG een stuk hoger ligt dan de anderen. Dit komt omdat de kengetallen voor de benodigde ruimte voor LNG-motoren en generatoren gebaseerd zijn op de verhouding tussen de grootte van motoren en generatoren op diesel en LNG. Hiervoor zijn een aantal bestaande motoren en generatoren gebruikt die in dezelfde bandbreedte liggen wat betreft vermogen. Omdat er weinig gegevens beschikbaar zijn van vooral LNG-motoren en generatoren zijn deze verhoudingen bepaald uit slechts enkele gegevens. Hierdoor kan het zijn dat deze gevonden gegevens geen realistische weergave geven van het daadwerkelijke gemiddelde.

Daarnaast valt op dat de brandstofcellen op waterstof blijkbaar wat minder ruimte innemen dan de verbrandingsmotoren. Zoals te zien in grafiek 4.16 neemt de brandstof echter ook een aanzienlijk deel van de ruimte in. In grafiek 4.16 is het nominaal vermogen op 150 kW genomen en opnieuw het piekvermogen op 150% en het PTO op 10% van het nominaal vermogen.



Figuur 4.16: Benodigde ruimte verschillende brandstoffen

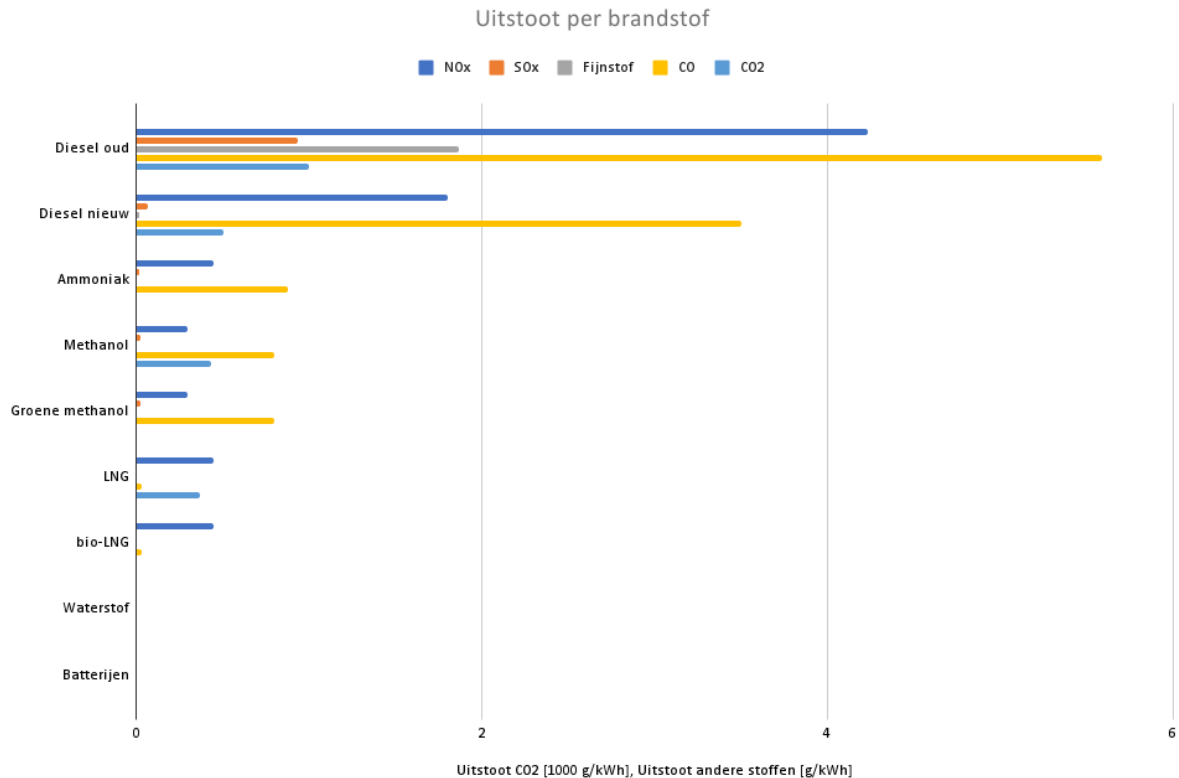
In grafiek 4.16 is een lineair verband tussen de vaartijd en de benodigde ruimte voor de brandstof te zien. Dit is logisch omdat langer varen meer energie kost en dus ook meer brandstof. Daarnaast is de ruimte van de brandstof berekend door een vast kengetal te vermenigvuldigen met het vermogen en de vaartijd, dus wanneer het vermogen constant is, is er een simpel lineair verband tussen de ruimte en de vaartijd.

Wat opvalt is dat de ruimte voor batterijen veel hoger ligt dan de andere systemen. Dit komt omdat de batterijen zelf als brandstof gerekend zijn. Daarnaast zijn batterijen ook minder compact dan de andere systemen.

Na batterijen is waterstof de minst compacte brandstof. Dit komt omdat de energiedichtheid van waterstof lager ligt dan die van diesel. Om toch genoeg energie mee te nemen wordt waterstof ofwel onder druk ofwel bij lage temperatuur opgeslagen om zo de energiedichtheid te verhogen. Een gevolg hiervan is dat een tank waarin waterstof wordt opgeslagen ook dikkere wanden moet hebben, cilindrisch moet zijn en een stuk zwaarder zal zijn dan bijvoorbeeld een dieseltank.

De energiedichtheid van de verschillende brandstoffen klopt met de volgorde waarop de lijnen in grafiek 4.16 boven elkaar liggen. Een laatste check die via deze verificatiemethode gedaan wordt is te zien in grafiek 4.17. Hier worden voor de verschillende brandstoffen de bijbehorende emissies in g/kWh en in het geval van CO_2 in $1000 g/kWh$ gegeven.

4. Algemene methode alternatief aandrijvingsysteem



Figuur 4.17: Uitstoot vervuilende gassen van verschillende brandstoffen

Figuur 4.17 geeft een overzicht van de schadelijke uitstoot van de verschillende brandstoffen. De getallen staan in tabel 4.10. Beiden zijn bedoeld om te controleren of de juiste waarden wat betreft uitstoot aan de juiste brandstoffen gekoppeld zijn.

Uit de figuur is het duidelijk dat een dieselsysteem uit de tijd van de bouw van de Varnebank duidelijk slechter presteert wat betreft emissies dan een dieselsysteem van nu. Daarnaast is te zien dat het verschil tussen methanol en groene methanol en LNG en bio-LNG de CO₂ uitstoot is. Ammoniak heeft geen koolstof in de molecuulformule en geeft daarom ook geen CO₂ uitstoot. Tenslotte hebben waterstof en batterijen geen schadelijke emissies. Dit klopt allemaal met wat er is uitgezocht in de literatuur zoals beschreven in hoofdstuk 3.

Tabel 4.10: Uitstoot vervuilende gassen van verschillende brandstoffen

Brandstof	NO _x (g/kWh)	SO _x (g/kWh)	Fijnstof (g/kWh)	CO (g/kWh)	CO ₂ (g/kWh)
Diesel oud	4,235	0,932	1,864	5,591	1000
Diesel nieuw	1,8	0,065	0,015	3,5	507
Ammoniak	0,45	0,016	0,004	0,875	0
Methanol	0,3	0,026	4E-6	0,8	431
Groene methanol	0,3	0,026	4E-6	0,8	0
LNG	0,444	0	0,001	0,03	370
bio-LNG	0,444	0	0,001	0,03	0
Waterstof	0	0	0	0	0
Batterijen	0	0	0	0	0

Aan de hand van de grafieken 4.15 tot en met 4.17 en de bijbehorende analyses kan geconcludeerd worden dat het model volgens de verificatiemethode aan de hand van grafische vergelijkingen,

geslaagd is.

4.9.5. Conclusie van de verificatie

Om een uiteindelijke conclusie te trekken over de verificatie van het model, moet niet alleen nagegaan worden of alle verificatiemethodes geslaagd zijn, maar ook of hiermee alle onderdelen van het model meegenomen zijn. Het model bestaat uit de onderdelen apparatuur, brandstof, emissies en kosten. De eerste drie onderdelen zijn uitgebreid besproken volgens de verschillende methodes. De kosten zijn niet besproken in deze paragraaf, deze zijn geverifieerd door de uitkomsten te bespreken met een vakdocent van de TU Delft. Hieruit kan geconcludeerd worden dat alle onderdelen voldoende geverifieerd zijn door verschillende methodes.

5

Case study Varnebank

In dit hoofdstuk wordt het model toegepast op de Varnebank. Verder worden keuzes beschreven en toegelicht en zullen de resultaten getoond worden. In onderstaande paragrafen zal beschreven worden welke invoerparameters van de Varnebank nodig zijn en hoe deze verkregen zijn. Verder zal de uitkomst van het model nog getoond en beschreven worden met de bijpassende aannames.

5.1. Invoerparameters

Tussen 1975 en 2023 is de technologie erg veel ontwikkeld. De Varnebank is gebouwd in 1975 en in deze tijd werd alles nog op papier uitgedacht en beschreven. Om de Varnebank op het beschreven model van hoofdstuk 4 toe te passen zijn een paar belangrijke parameters van het schip nodig.

Invoer	
Naam Schip	Varnebank
Vermogen & Vaartijd	
Nominaal vermogen aandrijving	180 kW
Piekvermogen aandrijving	180 kW
PTO	20 kW
Vaartijd per trip	6 uur
Percentage vaartijd boven nominaal vermogen	0 %
Ruimte, Vloeroppervlak & Gewicht	
Beschikbare ruimte machinekamer	51,875 m ³
Beschikbaar vloeroppervlakte machinekamer	20,75 m ²
Beschikbare ruimte vloeibare brandstof	100 m ³
Beschikbare ruimte vaste brandstof (batterijen)	0 m ³
Beschikbaar gewicht aandrijvingssysteem en bra	122240 kg
Uitstoot	
Maximale uitstoot CO2	300 g/kWh
Maximale uitstoot NOx	2,826 g/kWh
Maximale uitstoot SOx	0,233 g/kWh
Maximale uitstoot fijnstof	0,466 g/kWh
Maximale uitstoot CO	1,398 g/kWh
Is groene methanol beschikbaar?	Ja
Is bio-LNG beschikbaar?	Ja
Gegevens hoofdmotor(en)	
Aantal motoren	2
Toerental elektromotor	1000 rpm
Toerental verbrandingsmotor	1000 rpm
Aantal cilinders	9
2 takt/ 4 takt	4 takt
Brandstofkosten	
Diesel	0,569 €/L
LNG (koud)	0,216 €/L
Methanol	0,386 €/L
Ammoniak	4,750 €/kg
Waterstof	10 €/kg
Stroom	0,38 €/kWh

Figuur 5.1: Input parameters

In afbeelding 5.1 is het invoerveld van het model te zien. Voordat het model toegepast kan worden op een schip moeten deze parameters bekend zijn. Voor een kosteninschatting is er ook een invoerveld gemaakt van de huidige brandstof- en elektriciteitskosten. Deze kunnen erg fluctueren door de jaren heen, om het model zo lang mogelijk representatief te houden moeten deze waarde zelf ingevuld worden. De invoerwaardes kunnen verdeeld worden in verschillende categorieën.

- Operationeel profiel
- Beschikbare ruimte
- Uitstoot
- Benodigde motorgegevens
- Brandstofkosten

5.1.1. Operationeel profiel

Het operationeel profiel is een belangrijke categorie binnen de invoerwaarden. Het operationeel profiel bepaalt namelijk het benodigde nominale vermogen van de aandrijving, het piekvermogen, de vaartijd, het percentage boven nominaal vermogen en PTO. De uitleg van deze begrippen staat in subparagraaf 4.8.1.

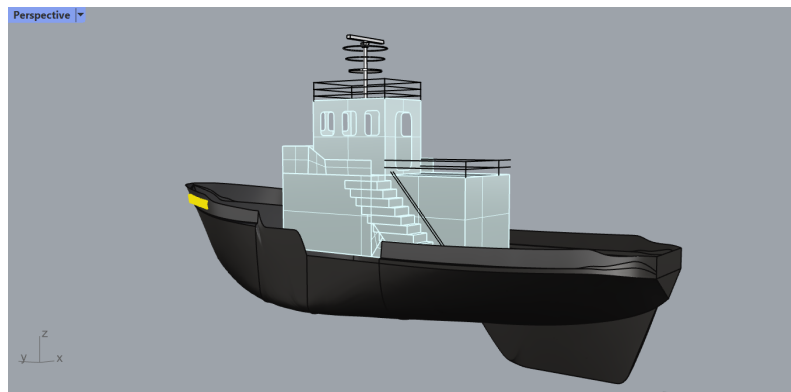
Zoals beschreven in 2.2.2 is het operationeel profiel van de Varnebank sterk veranderd. In de eisen staat dat de Varnebank tenminste zes uur achter elkaar moet kunnen varen met een snelheid van acht knopen. Door de verandering van het operationeel profiel is ook het benodigde vermogen sterk veranderd.

Nominaal vermogen aandrijving

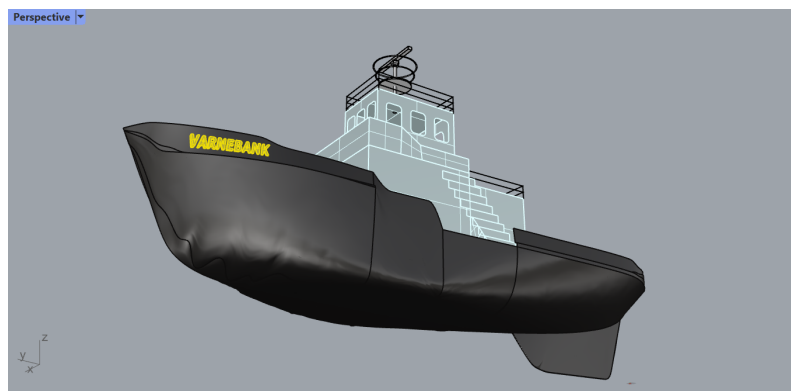
Om het benodigde vermogen van de Varnebank te bepalen is de methode van Holtrop en Mennen gebruikt, zoals beschreven in Vermogen van de Varnebank onder subparagraaf 2.5.2. Daarvoor is een Grashopper-script (Bas Goris, 2020) omgeschreven met de berekeningen van Holtrop en Mennen uit 1982, waarin de romp van de Varnebank geïmporteerd moet worden.

Er is helaas geen 3D-ontwerp van de Varnebank beschikbaar. Het spantenplan is dat wel, en is daarom met behulp van loose-loft curves door elk spant in RHINO 7 gedigitaliseerd (zie figuren 5.2 en 5.3). Het probleem hierbij is dat de tekeningen van onder andere het spantenplan alleen op papier beschikbaar is en het slecht te lezen is. Daarom zijn de tekeningen ingescand, geschaald en overgetrokken in RHINO 7. Dit proces is niet erg precies en kan menselijke fouten bevatten.

De romp in het 3D-model bevat oneffenheden, omdat de spanten van het voorschip en het achterschip in het plan niet goed op elkaar aansluiten. Zo zitten twee dezelfde spanten niet op gelijke hoogte bij de verschillende aanzichten. Deze oneffenheden hebben gelukkig geen invloed op de berekening van de weerstand met behulp van Holtrop en Mennen. Wel wijkt het nat oppervlak dat uit het 3D-model wordt gehaald iets af van de werkelijkheid. Deze is namelijk iets groter. Dit zorgt echter niet voor grote verschillen.



Figuur 5.2: Romp Varnebank



Figuur 5.3: Romp Varnebank

Het 3D model van figuren 5.2 en 5.3 is getekend op ware grootte, waardoor de gekozen oplossing uit het rekenmodel er gemakkelijk ingepast kan worden. Door alle onderdelen in te passen kan gevalideerd worden of het rekenmodel een goede indicatie geeft op het gebied van ruimte.

Het Grasshopper-script bepaalt met behulp van de 3D-romp de gegevens in tabel 5.1. Het vult deze dan automatisch in voor de methode van Holtrop en Mennen uit 1982.

Tabel 5.1: Input Grasshopper

<i>Invoer Grasshopper Varnebank</i>		
Lengte waterlijn	31,54	m
Breedte waterlijn	9,224	m
Zwaartepunt in langsrichting	16,65	m
Nat oppervlak	330,9	m^2
Diepgang	3,01	m
Waterlijnoppervlak	228,5	m^2
Grootspantoppervlak	27,28	m^2
Displacement	520,95	m^3
Invalshoek	88	°
Spiegeloppervlak	0,528	m^2
Skeg-oppervlak	47,85	m^2

Met behulp van Holtrop en Mennen worden de verschillende weerstanden bepaald, bij verschillende

vaarsnelheden. Aangezien de eigenaar van de Varnebank zes uur lang acht knopen wil kunnen varen, is vooral de weerstand bij een snelheid van acht knopen relevant.

Tabel 5.2: Output Grashopper

Output Holtrop en Mennen Varnebank							
v (knopen)	Fn	R_{tot} (N)	R_{visc} (N)	R_{app} (N)	R_w (N)	R_A (N)	P_{tot} (kW)
8	0,23398	13115.73	7503.55	1710,00	1895.41	2006.78	149.94

De totale weerstand bij acht knopen staat als R_{tot} in tabel 5.2. Deze bestaat uit de vier andere weerstanden in de tabel. Dit zijn respectievelijk de viskeuze weerstand, appendage-weerstand, golfmakende weerstand en model-schip-correlatie-weerstand (Holtrop en Mennen, 1982). Uit de totale weerstand kan met formule 5.1 en de snelheid in [m/s] het effectieve vermogen [kW] worden berekend.

$$P_{eff} = R_{tot} \cdot v \quad (5.1)$$

Bovenstaande formule houdt geen rekening met het rendement van de Voith-Schneider-propellers (VSP's) en het rendement van de lagers. Bij het totale vermogen van tabel 5.2 is hier wel rekening gehouden met een rendement van de VSP's van 40% en met een 90% rendement van de lagers. Een rendement van 40% is best laag voor een VSP, 70% is ook mogelijk (Esmailian e.a., 2014). De VSP's in de Varnebank worden echter op een veel lager vermogen gebruikt dan ze voor bedoeld zijn. Het is daarom aannemelijk dat het werkpunt minder ideaal is en dat het rendement eerder rond ongeveer 40% ligt (Esmailian e.a., 2014 en Bakhtiari en Ghassemi, 2019). Dit blijft echter een aanname.

Deze aannames zijn ook geverifieerd door Dr. Ir. De Koning Gans. Desondanks zijn dit nog steeds aannames en kan de bepaling van de weerstand afwijken. Daarom is er besloten om het benodigde vermogen in de invoer te zetten op 180 kW.

Piekvermogen aandrijving

Meestal is het piekvermogen aandrijving (uitleg in subparagraaf 4.8.1) van een sleepboot een belangrijke invoerwaarde. Maar de Varnebank sleept niet meer en heeft ook geen andere reden om een extra hoog piekvermogen te hebben. Daarom is het piekvermogen van de Varnebank gelijk aan zijn nominale vermogen en is het dus 180 kW.

PTO

De Power Take Off (PTO) van de Varnebank is nodig voor een aantal dingen: Navigatie-apparatuur, verlichting, pompen, brandblusinstallatie en de hydraulische lieren. De sleeplieren zijn niet meer in gebruik, maar de ankerlier wel.

De huidige elektrische opwekking bestaat uit 2 generatoren met elke 80 kW elektrisch vermogen. Het exacte gebruik is onbekend, maar volgens de technicus van de Varnebank, draait gedurende normale vaart slechts één generator en gebruikt het schip ongeveer 10 kW elektrisch vermogen. De ankerlier kan ook op deze enkele generator draaien. De brandblusinstallatie echter niet, daar moet de tweede generator ook (licht) voor ingeschakeld worden.

In overleg met de eigenaar van de Varnebank, is besloten één van de huidige generatoren te laten staan. Dat is deels om een zeer betrouwbare component te laten staan, in het geval dat het nieuwe elektrische systeem uitvalt. Daarnaast kunnen met behulp van die generator de eventuele pieken in het elektrisch vermogen opgevangen worden.

Er is geconstateerd dat het niet nodig is om de ankerlier en de brandblusinstallatie tegelijkertijd te gebruiken, omdat de brandblusinstallatie alleen in de haven wordt gebruikt. Daarom is het totale vermogen geschaald op wat de brandblusinstallatie nodig heeft. Het vereiste aanvullende elektrische vermogen is ongeveer 20 kW, volgens de technicus van de Varnebank. Dit is ook ruim voldoende om de dieselgenerator tijdens normale vaart uit te schakelen.

Vaartijd per trip

De volgende invoerwaarde is de vaartijd per trip. Voor de Varnebank is de vaartijd per trip 6 uur, zoals beschreven in subparagraaf 2.5.2. Dit is ongeveer de duur van een dagtocht. Na zo'n tocht kan er weer

gebunkerd of opgeladen worden.

Percentage vaartijd boven nominaal vermogen

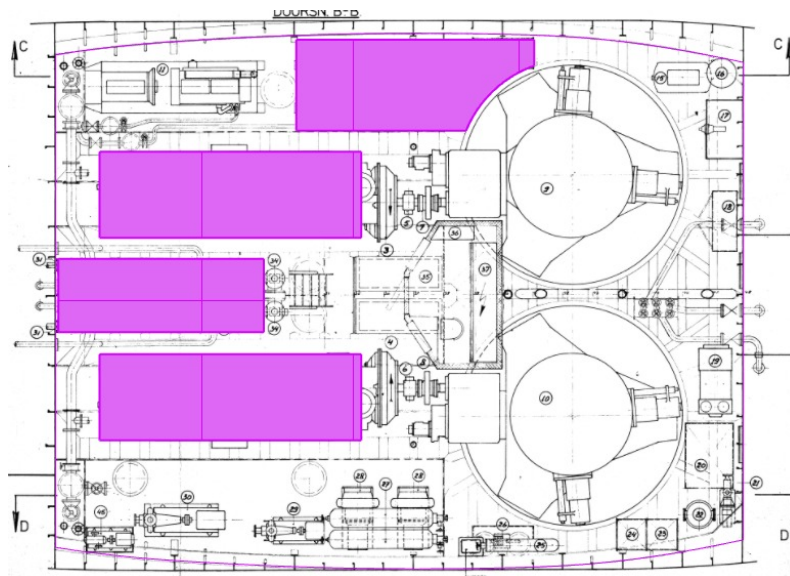
Deze invoerwaarde is alleen van toepassing als het piekvermogen hoger is dan het nominaal vermogen. Bij de Varnebank is het piekvermogen echter gelijk aan het nominaal vermogen, wat betekent dat deze waarde automatisch niet meegenomen wordt in de berekening en op 0% wordt gezet.

5.1.2. Beschikbare ruimte

De verschillende opties om te verduurzamen die bekeken worden in het model, verschillen groot in het oppervlak dat ze nodig hebben. Denk hierbij aan het volume brandstof dat meegenomen moet worden om het nominale vermogen te bereiken, dit kan sterk verschillen tussen brandstoffen. Om te kunnen onderzoeken welke brandstof in de Varnebank past moeten er dus ook gegevens van de beschikbare ruimte ingevuld worden.

Beschikbare ruimte machinekamer

De Varnebank zal een retrofit ondergaan. Er zijn verschillende beslissingen gemaakt. Het benodigde vermogen van de Varnebank is erg veranderd. De Varnebank bezit momenteel over twee dieselmotoren met ieder een vermogen van 1500 pk zoals beschreven eerder in deze paragraaf heeft de Varnebank bij het nieuwe operationeel profiel maximaal een vermogen van 180 kW nodig. Dit betekent dat de twee huidige motoren uit de machinekamer worden gehaald. Aangezien de oude motoren uit de machinekamer verwijderd worden zijn ook de huidige oliefilters en koelsystemen eruit gehaald. Deze zullen namelijk veel kleiner zijn bij kleinere motoren. Verder staan er ook twee grote generatoren in de machinekamer. Er is gekozen om een generator te behouden voor eventuele noodsituaties, de andere generator wordt eruit gehaald. Zie onderstaande afbeelding voor de beschikbare ruimte in de machinekamer.



Figuur 5.4: Beschikbare ruimte in de machinekamer

De beschikbare ruimte in de machinekamer bestaat alleen uit de ruimte die gecreëerd wordt door onderdelen uit de machinekamer te verwijderen die niet meer nodig zijn of toe zijn aan vernieuwing. Deze ruimte wordt duidelijk weergegeven in figuur 5.4. De andere onderdelen in de machinekamer worden er niet uitgehaald aangezien deze nog bruikbaar zijn. Door de roze oppervlaktes bij elkaar op te tellen wordt de beschikbare oppervlakte in de machinekamer berekend, zie tabel 5.3.

Tabel 5.3: Machinekamer Varnebank

Beschikbaarheid Machinekamer Varnebank		
Beschikbare vloeroppervlakte machinekamer	20,75	m^2
Beschikbare ruimte machinekamer	51,875	m^3

In bovenstaande tabel is ook de beschikbare ruimte van de machinekamer bepaald. Dit is bepaald door de beschikbare vloeroppervlakte te vermenigvuldigen met de hoogte van de machinekamer waarbij het volgende geldt: $h = 2,5m$.

Beschikbare ruimte vloeibare brandstof

De Varnebank kan $100 m^3$ brandstof meenemen. Dit betekent ook dat de beschikbare ruimte voor een vloeibare brandstof voor de Varnebank $100 m^3$ is. Zoals eerder beschreven zit in het model een factor verwerkt als een brandstof een grotere tank nodig heeft dan de huidige tanks. Dit zal dus automatisch meegenomen worden.

Voor de Varnebank zouden eventueel nog andere ruimtes, zoals binnenin de sleeplieren, voor tanks gebruikt kunnen worden. Dit is niet gedaan, omdat $100 m^3$ voor het nieuwe operationeel profiel van de Varnebank voldoende zou moeten zijn om verschillende brandstoffen te kunnen gebruiken.

Beschikbare ruimte vaste brandstof

In het model is er ook de mogelijkheid om gebruik te maken van batterijen. Aangezien batterijen een andere vorm van brandstof is dan vloeibare brandstof is hier ook een andere invoerwaarde van nodig. Deze invoerwaarde hoeft alleen ingevuld te worden als de beschikbare ruimte in de machinekamer niet voldoende is voor de eventuele oplossing van het model.

Voor de Varnebank is ervoor gekozen om niet naar andere ruimtes voor vaste brandstoffen zoals batterijen buiten de machinekamer te onderzoeken. Dit is gedaan met de aanname dat er voldoende ruimte in de machinekamer is. Aangezien er dus niet gekeken is waar eventueel nog batterijen op het schip zouden kunnen staan is deze invoerwaarde gezet op $0 m^3$.

Beschikbaar gewicht aandrijvingsysteem en brandstof

Om ervoor te zorgen dat het schip met het nieuwe aandrijvingsysteem nog stabiel is wordt er ook gekeken naar het beschikbare gewicht van het aandrijvingsysteem en brandstof. Zoals eerder beschreven in "Beschikbare ruimte machinekamer" worden de twee motoren en een generator uit de machinekamer gehaald. Verder zal het gewicht van de brandstof ook eruit worden gehaald, deze wordt namelijk vervangen door het gewicht van de nieuwe brandstof.

Voor de Varnebank zijn de gegevens van de motor die er in staan beschikbaar, echter niet van de generatoren. Hiervoor is dus een vergelijkbaar generator gekozen: de C7.1 ACERT van CAT (Caterpillar, g.d.). De motoren in de Varnebank zijn: Stork werkspoor diesel FDHD240 (Corporation, 2011).

Het beschikbare gewicht voor het aandrijvingsysteem en brandstof bestaat dus uit het gewicht dat uit de Varnebank gehaald wordt. Zie voor een overzicht onderstaande tabel.

Tabel 5.4: Massa gegevens Varnebank

Massa Gegevens Varnebank	
Massa (oude motor 2x)	15,70 t
Massa (oude generator)	1,84 t
Massa brandstof	89,00 t
Massa voor nieuw aandrijving en brandstof	122,24 t

In bovenstaande tabel is ook een berekening gemaakt voor de massa van de brandstof. Momenteel vaart de Varnebank op diesel. Verder gaat er $100m^3$ aan diesel mee zoals eerder beschreven, de volgende formule wordt gebruikt voor de berekening voor de massa van de brandstof.

$$m_{brandstof} = V_{brandstof} \cdot \rho_{brandstof} \quad (5.2)$$

$$m_{brandstof} = 100 \cdot 890 = 89000 \text{ kg}$$

Met behulp van bovenstaande gegevens is de beschikbare massa voor de nieuwe aandrijving en brandstof bepaald. De oplossingen uit het model moeten hieraan voldoen om goedgekeurd te worden. Op deze manier wordt er een controle van de toepasbaarheid toegepast.

5.1.3. Uitstoot

Om een functionerend model te hebben is het van belang om de huidige uitstoot van het schip te weten. Het model heeft namelijk als doel om een verduurzamende oplossing te zoeken voor een schip. Een belangrijke eis is namelijk een waarde die bepaald of de verduurzaming van het schip als voldoende kan worden beschouwd. Deze eis is beschreven in paragraaf 2.2.2 (Programma van eisen Varnebank). Hierin is beschreven dat de verduurzaming minstens 75% minder stikstofoxiden, zwavel en fijnstof moet uitstoten en onder normale omstandigheden minstens 70% minder CO_2 moet uitstoten. Een configuratie voldoet dus pas als de uitstoot met deze percentages ten opzichte van de huidige uitstoot is gereduceerd.

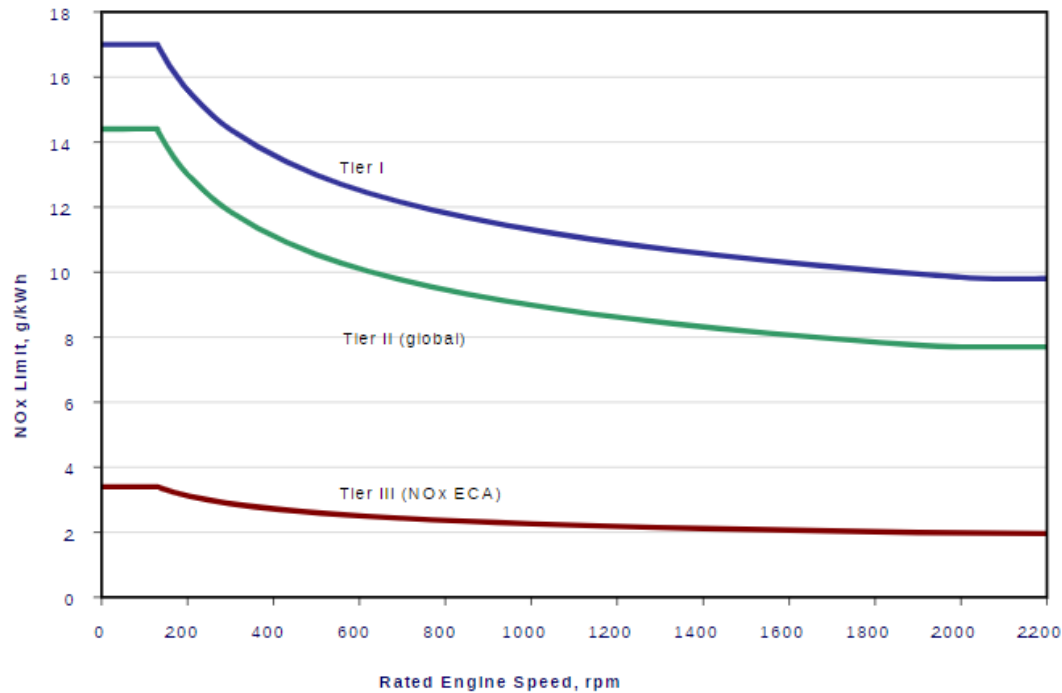
De Varnebank is zoals eerder genoemd gebouwd in 1975 in deze tijd speelde emissies geen grote rol bij het ontwerpen van een schip. Er zijn dus ook geen gegevens beschikbaar van de huidige uitstoot van de Varnebank. Om een redelijke aanname te kunnen maken van de huidige uitstoot van de Varnebank is een bron gebruikt uit 1996 waarin verschillende uitstoten van een dieselmotor worden beschreven (Neeft e.a., 1996).

Waarschijnlijk is de huidige uitstoot van de Varnebank te hoog ingeschat aangezien de motoren in 1975 waarschijnlijk nog meer uitstoten dan motoren uit 1996. Dus als hier 70% reductie van wordt genomen, voldoet deze sowieso aan de eis. Dit is dus een soort veiligheidsfactor voor de uitkomst van het model. Voor de huidige uitstoten van de Varnebank, zie tabel 5.5.

Tabel 5.5: Huidige uitstoot Varnebank

Huidige uitstoot Varnebank	
CO_2	1000 g/kWh
NO_x	4,235 g/kWh
SO_x	0,932 g/kWh
CO	5,591 g/kWh
Fijnstof	1,864 g/kWh

Verder is voor de NO_x uitstoot een andere bron gebruikt, aangezien deze uitstoot alleen door de motor veroorzaakt wordt. Hiervoor zijn de IMO-regels voor motoren gebruikt, zie figuur 5.5 („IMO’s work to cut GHG emissions from ships”, 2019).



Figuur 5.5: NO_x regels IMO („IMO's work to cut GHG emissions from ships”, 2019)

In figuur 5.5 zijn 3 verschillende lijnen beschreven, deze staan voor verschillende tieren en dit zijn de eisen voor motoren uit verschillende jaren. Tier 1 is de oudste tier deze is voor het jaar 2000. Zoals als verwacht en duidelijk zichtbaar in figuur 5.5 waren er vroeger minder strenge eisen aan de uitstoot en is de kans dus groot dat de Varnebank met een oude motor veel uitstoot.

Ook bij de uitstoot van de NO_x is er een veiligheidsfactor aangezien de uitstoot is aangenomen voor tier 1. Echter is de uitstoot van de Varnebank zeer waarschijnlijk een stuk groter. Er is geen precieze aanname gemaakt hoeveel groter de uitstoot is, aangezien hier geen goede gegevens of duidelijk bronnen voor zijn.

5.1.4. Benodigde motorgegevens

Bij de gegevens van de hoofdmotoren moet worden ingevuld wat het vereiste toerental is, het aantal motoren, het aantal cilinders en of het 2-takt of 4-takt moet zijn. De Varnebank heeft twee Voith-Schneider Propellers (VSP's), met elk zijn eigen schroefas. Er zijn daarom twee aparte motoren nodig.

De VSP's van de Varnebank zijn ontworpen om met een rotatiesnelheid van ongeveer 67 rpm te werken. Dit is een constante. De voortstuwingskracht en de richting daarvan wordt geregeld door de spoed te variëren (Voith Turbo Marine, 2005). Het is onduidelijk welk effect een ander (lager) toerental zou hebben en daarom is in overleg besloten deze gelijk te houden aan het originele toerental. Tussen de dieselmotoren en de VSP's staat een gecompliceerde tandwielkast. De overbrenging op de VSP's zelf is namelijk conisch, waardoor er bij aandrijving een axiale kracht op de tandwielkast ontstaat. De tandwielkast is daarom ontworpen om dat aan te kunnen. Om deze reden zou het erg ingewikkeld en duur zijn om hem te vervangen en heeft de eigenaar van de Varnebank aangegeven dat niet te willen.

Het toerental van de VSP's wordt niet aangepast en de overbrenging wordt ook niet veranderd, dus moet het toerental van het nieuwe aandrijvingsstelsel gelijk zijn aan dat van het huidige systeem: 1000 rpm. Dit getal moet zowel voor de elektromotor als voor de verbrandingsmotor worden ingevuld, omdat beiden van dezelfde overbrenging gebruikmaken.

Het aantal cilinders heeft een minimale invloed op de afmetingen en het gewicht van de motor. Verschillende motoren met een vergelijkbaar vermogen als de nieuwe Varnebank hebben vier cilinders (solediesel.com, g.d.), (YANMAR Marine International, 2023). Hierom is er gekozen om het aantal cilinder in de invoer of vier te zetten.

De nieuwe motoren van de Varnebank gaan draaien op 1000 rpm. Maritieme 2-takt-motoren draaien meestal op een zeer laag toerental van tussen ongeveer 60 en 200 rpm, dus de Varnebank heeft (middelsnelle) 4-takt-motoren nodig.

5.1.5. Brandstofkosten

De brandstofkosten zijn ook ingevuld als invoerwaarde. Dit is gedaan aangezien de brandstofkosten van de verschillende brandstoffen momenteel erg fluctueren en over de jaren heen nog veel zullen fluctueren. De brandstofprijzen zijn indicaties aangezien deze prijzen per verkoper kunnen verschillen.

De huidige brandstofkosten zijn bepaald aan de hand van verschillende bronnen. Zo is de stroom bepaald met de volgende bron (Energievergelijk.nl, 2023), deze bron geeft een huidige prijsindicatie van 0,38 €/kWh, dit verschilt echter bij iedere haven.

Voor diesel is een indicatie gemaakt van 0,569 €/L („World Bunker Prices”, g.d.). De prijs van groene waterstof is waarschijnlijk rond 10 €/Kg („Waterstof tanken bij Shell”, g.d.). Verder is er nog een indicatie voor de huidige methanol-kosten gemaakt. Deze kosten zijn ongeveer 0,386 €/L (Methanex, 2023). De kosten van LNG zijn bepaald voor bunkerprijzen in Rotterdam en zijn momenteel 0,216 €/L („Rotterdam Bunker prices”, 2023). De prijs van ammoniak is geschat op 4,75 €/kg (te Roller, g.d.). Ammoniakmotoren voor schepen zijn echter nog niet ontwikkeld en deze prijs zal daarom zeer waarschijnlijk snel en veel veranderen in de toekomst.

De brandstofkosten zijn naast van de brandstofprijzen ook nog afhankelijk van de benodigde hoeveelheid brandstof voor een trip van 6 uur. Zie hiervoor tabel 5.6.

Tabel 5.6: Indicatie huidige brandstofkosten per trip

Indicatie brandstofprijzen per trip

LNG	91,06	€
Diesel	132,40	€
Methanol	216,01	€
Batterij	557,29	€
Waterstof	2425,10	€
Ammoniak	3081,65	€

In tabel 5.6 is duidelijk zichtbaar welke brandstof momenteel meer zou kosten voor de Varnebank. Zo zal waterstof per trip erg duur zijn. De kans dat dit relatief gezien goedkoper gaat worden is heel groot zodra waterstof meer in de scheepvaart geïmplementeerd gaat worden. Dit geldt ook voor de andere brandstoffen die in opkomst zijn in de maritieme markt.

5.2. Uitvoer en keuze Varnebank

Nu alle invoer in bovenstaande paragrafen besproken is kan de uitvoer besproken worden. De uitvoer zal van de verschillende opties aangeven of deze aan de eisen voldoet voor de Varnebank. Verder zal hier ook een grove indicatie van de kosten bij gegeven worden. De uitvoer van de Varnebank met de boven beschreven invoer ziet er als volgt uit.

Uitvoer				
Aandrijvingsystemen	Eisen behaald?	Beschikbaar voor Varnebank in 2024	Kapitaalkosten (€1000)	Brandstofkosten per trip
Verbrandingsmotor Diesel	Neen	Neen	59	132
Verbrandingsmotor Ammoniak	Ja	Neen	82	3081
Verbrandingsmotor Methanol	Ja	Neen	65	216
Verbrandingsmotor LNG	Ja	Neen	116	91
Brandstofcel waterstof (koud)	Ja	Ja	250	2425
Brandstofcel waterstof (druk)	Ja	Ja	250	2425
Batterij Lithium	Ja	Ja	263	557

Figuur 5.6: Uitvoer Varnebank

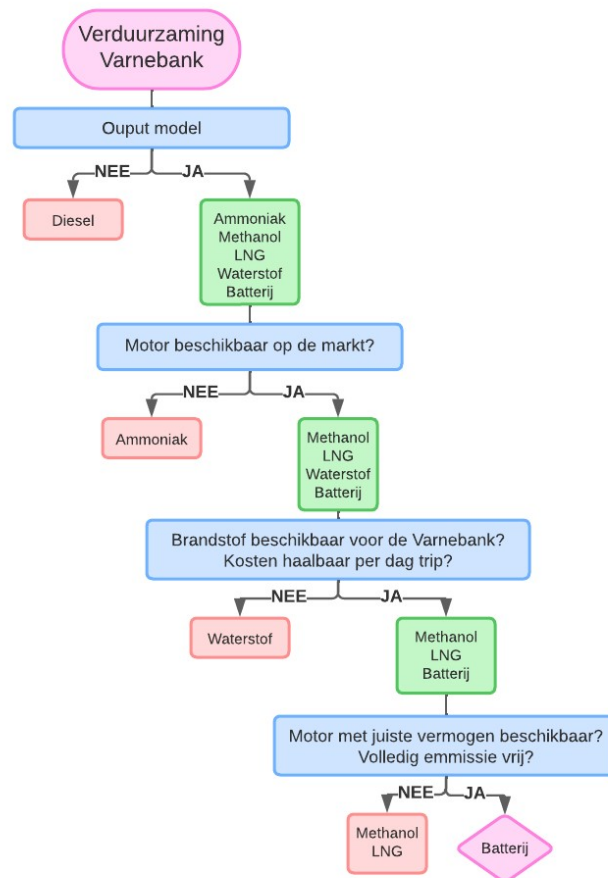
Zoals zichtbaar in figuur 5.6 is volgens het model voor de Varnebank alles een optie met uitzondering van diesel. Zoals eerder beschreven is diesel als referentiewaarde toegevoegd. Deze zal echter op geen enkele manier aan de nieuwe uitstoot voorwaarden van de Varnebank voldoen. De andere opties voldoen allemaal aan de eisen, maar er is in het model niet meegenomen of de benodigde motoren ook daadwerkelijk op de markt zijn. Dit zal meegenomen worden in de keuze voor de Varnebank.

5.2.1. Keuze voor de Varnebank

Er zijn verschillende opties mogelijk om de Varnebank te verduurzamen. Aan de hand van de eisen van de eigenaar zal er een optie gekozen worden. De eigenaar van de Varnebank wil niet te veel geld kwijt zijn aan de dagtochten die er gemaakt zouden worden. Verder moet het schip ook kunnen varen zonder gespecialiseerd personeel. Het schip zal zeer waarschijnlijk nog lang blijven bestaan en moet dus op gebied van verduurzaming nog langer mee kunnen. Ook moet de optie op de markt zijn zodat deze zo snel mogelijk geïmplementeerd kan worden.

Stroomdiagram

Om een keuze voor de Varnebank te maken wordt een stroomdiagram doorlopen. Dit stroomdiagram is gebaseerd op de eisen van de eigenaar, hier is vooral gelet op de snelle beschikbaarheid.



Figuur 5.7: Keuzebeschrijving

Het stroomdiagram wordt doorlopen en de keuzes die hierin gemaakt zijn worden hieronder besproken op volgorde.

Een ammoniak-motor bestaat momenteel nog niet, maar komt waarschijnlijk rond 2024 op de markt („Fast-tracking slow-speed engine technology for ammonia and methanol”, g.d.). Dit zal zeer waarschijnlijk wel een grote 2-takt motor zijn die veel vermogen moet kunnen leveren en dus meer geschikt is voor bijvoorbeeld containerschepen die de oceaan over gaan. Zoals beschreven in 5.1.1 is voor de Varnebank maar een klein vermogen nodig. Dit gaat om twee motoren van in totaal 180 kW. Ammoniak zal dus niet de optie zijn voor de Varnebank.

Niet alleen moet de motor beschikbaar zijn, maar ook moet de brandstof in de buurt van Maassluis gebunkerd kunnen worden. Batterijen moeten aan de hand van stroom opgeladen worden, dit zou geen enkel probleem moeten zijn in Maassluis. Methanol zou vanaf de zomer van 2023 ook gebunkerd moeten kunnen worden in de haven van Rotterdam (Schuttevaer.nl, 2023). Vervolgens is het de bedoeling dat ook ammoniak en waterstof daar gebunkerd kunnen worden.

LNG en methanol zijn momenteel wel al te bunkeren in de haven van Rotterdam („Nationaal LNG Platform”, 2020 en Van Herk, 2021). Er wordt verwacht dat ammoniak in 2024 beschikbaar is („Bunkeren in Rotterdam”, g.d.). Verder kan er kleinschalig in de haven van Rotterdam waterstof getankt worden. Dit zal echter waarschijnlijk niet voor de Varnebank beschikbaar zijn.

De kosten zullen voor de eigenaar ook een grote rol spelen. Zoals beschreven in 5.1.5 is er een indicatie

gemaakt van de brandstofkosten voor een trip van de Varnebank. In tabel 5.6 is duidelijk dat waterstof en ammoniak de duurste brandstoffen zijn per trip. Waterstof zou momenteel €2425,10 per trip kosten. Dit is erg duur en zal dus ook geen voordelige optie voor de Varnebank zijn.

Daarnaast is er een speciale behandeling vereist voor het gebruiken van waterstof als brandstof (Atilhan e.a., 2021). Waterstof moet een zeer speciale veiligheidsvoorwaarden voldoen aangezien het een verstikkend gas is. Dit maakt het erg lastig om waterstof te implementeren in de Varnebank.

Na deze stappen in het stroomdiagram te hebben doorlopen blijven Methanol, LNG en batterijen als oplossing over. Het model heeft er echter geen rekening mee gehouden of de benodigde methanol- en LNG-motoren voor het benodigde vermogen beschikbaar zijn. Op de huidige markt worden vooral motoren geproduceerd voor hoge vermogens. De LNG-motoren worden geproduceerd rond de 1100 tot 9600 kW en methanolmotoren rond de 3400 en 5200 kW. Dit zijn veel te grote vermogens voor de Varnebank. Het operationeel profiel van de Varnebank heeft deze vermogens niet nodig en gebruik van deze motoren zou leiden tot een heel laag rendement. Ook LNG en Methanol zijn dus geen opties voor de Varnebank.

Voor andere schepen die een hoger vermogen nodig hebben zijn dit eventueel wel interessante opties om te onderzoeken. Ook kan het dat over een aantal jaar deze motoren wel in het vermogen van de Varnebank beschikbaar zijn. Dan zal er wellicht een andere keuze volgen uit dit stroomdiagram.

Vergelijking van verschillende oplossingen

Voor de Varnebank wordt dus de keuze gemaakt voor batterijen. Deze zijn op veel verschillende plaatsen op te laden. In de paper van McKinlay, Turnock en Hudson uit 2021 worden verschillende opties voor een emissieloze voortstuwing vergeleken. In deze paper wordt er gekeken naar een oplossing voor grote schepen die een lange tocht moeten varen. Dit is natuurlijk heel anders voor de Varnebank en daarom zal de keuze voor de Varnebank ook verschillen van de paper. Met behulp van de paper is onderstaande tabel gemaakt, echter zijn hier wat aanpassingen in gemaakt aangezien er veel veranderd is sinds 2021.

Tabel 5.7: Vergelijking mogelijke oplossingen (McKinlay e.a., 2021)

Optie	Vergelijk van verschillende oplossingen.		
	Op de markt	Koolstof vrij	Emissieloos bij verbranding
MDO	Ja	Nee	Nee
LNG	Ja	Nee	Nee
Waterstof	Ja	Ja	Ja (bij sommige temperaturen niet)
Ammoniak	Nee	Ja	Nee
Methanol	Ja	Nee	Nee
Batterijen	Ja	Ja	Niet van toepassing

In tabel 5.7 is duidelijk zichtbaar dat maar enkele brandstoffen koolstofvrij zijn. Alleen de batterijen zijn volledig emissieloos en zullen dus met zekerheid aan de normen van het IMO in de toekomst voldoen.

Het enige probleem van batterijen is dat deze aanzienlijk minder lang meegaan dan verbrandingsmotoren. Dit zal in de eerste twintig jaar voor meer kosten zorgen. Na twintig jaar zal het verschil in kosten tussen lithium batterijen en verbrandingsmotoren minder zijn aangezien de verbrandingsmotoren dan ook onderhouden moeten worden en dit ook meer kosten op zal leveren („Batterijen bewaren - Blog”, g.d.).

Het voordeel is wel dat de batterijen dus om de zoveel jaar vernieuwd kunnen worden en mee kunnen met de verduurzaming en nieuwe techniek. Zo worden er in de toekomst misschien wel recyclebare batterijen gebouwd. Batterijen staan namelijk ook nog maar in de kinderschoenen, er is nog veel ontwikkeling voor mogelijk.

Verder betekent het dat voor de Varnebank batterijen de gekozen oplossing is. Dit geldt echter niet voor alle schepen. Batterijen worden nu namelijk nog gemaakt met schaarse brandstoffen, waardoor deze niet genoeg aanwezig zijn voor de gehele scheepvaart.

De keuze voor batterijen voor de Varnebank wordt met behulp van het 3D-model gevalideerd en uitgewerkt. Dit wordt in hoofdstuk 5.3 beschreven.

5.3. Keuze uitwerken en valideren

Zoals hierboven beschreven is er gekozen voor de configuratie van batterijen. Om te kijken of het model daadwerkelijk een goede inschatting maakt van de beschikbare ruimte zal de gekozen configuratie in worden getekend in het 3D model en hiermee zal het model gevalideerd worden.

Voor de configuratie van de batterijen is aan de hand van het gemiddelde vermogen van de Varnebank de benodigde capaciteit van het schip bepaald. Dit is beschreven in hoofdstuk 4.6. Met behulp van het benodigd vermogen en de vaartijd is de benodigde capaciteit van de batterijen bepaald zie formule 5.3.

$$C_{benodigd} = P_{batterij} \cdot t_{vaartijd} \quad (5.3)$$

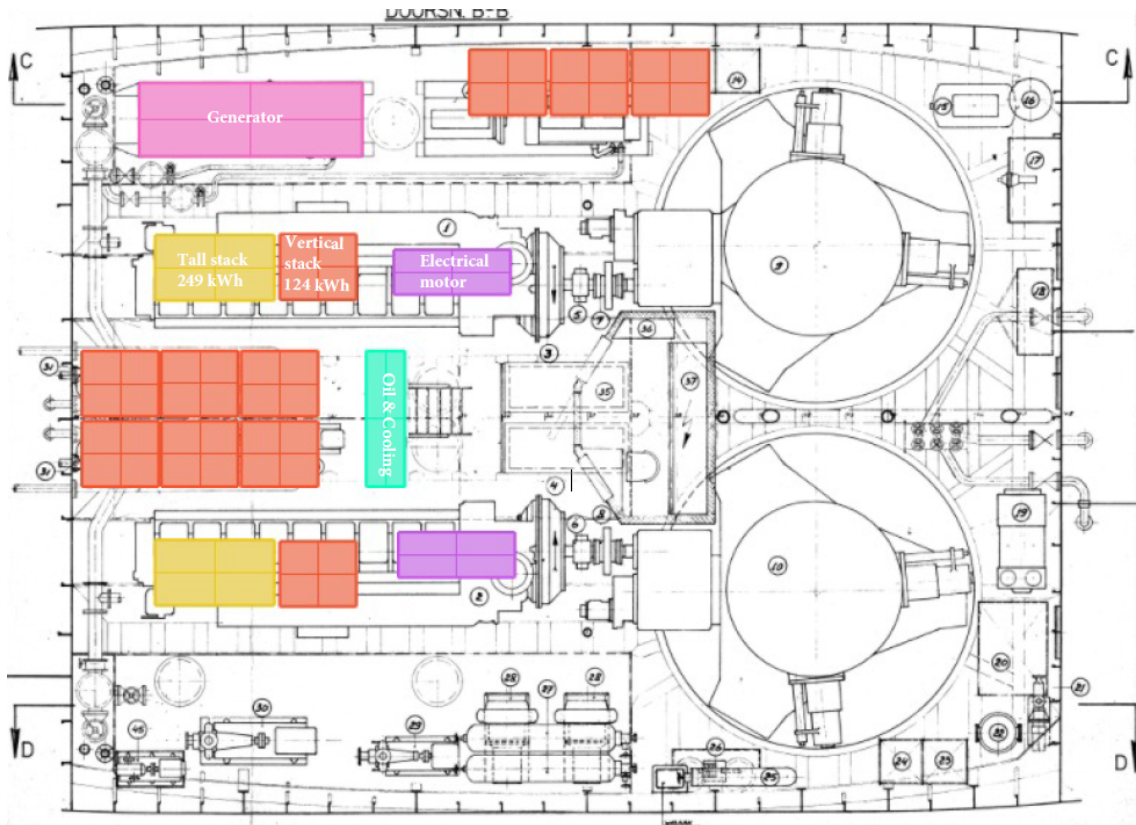
Uit bovenstaande formule is bepaald de benodigde capaciteit van de Varnebank 1257 kWh is. Voor de Varnebank is er gekeken naar Corvus Orca batterijen „Corvus Orca Energy - Corvus Energy”, 2023. Er zijn ook andere bedrijven die batterijen aanbieden. Er is contact opgenomen met de sales afdeling van Corvus Energy, waardoor er genoeg informatie beschikbaar is om een goede inschatting te kunnen maken en dus worden deze gebruikt. Er is gekozen voor elf verticale batterijen pack en twee tall batterijen packs. De specifieke gegevens hiervan zijn in onderstaande tabel zichtbaar.

Tabel 5.8: Gegevens Corvus Batterijen

Gegevens Corvus Batterij					
Grootheden	Capaciteit [kWh]	Hoogte [m]	Breedte [m]	Diepte[m]	Massa [kg]
Vertical Pack	124	2,241	0,865	0,738	1628
Tall Pack	249	3,000	1,345	0,738	3375

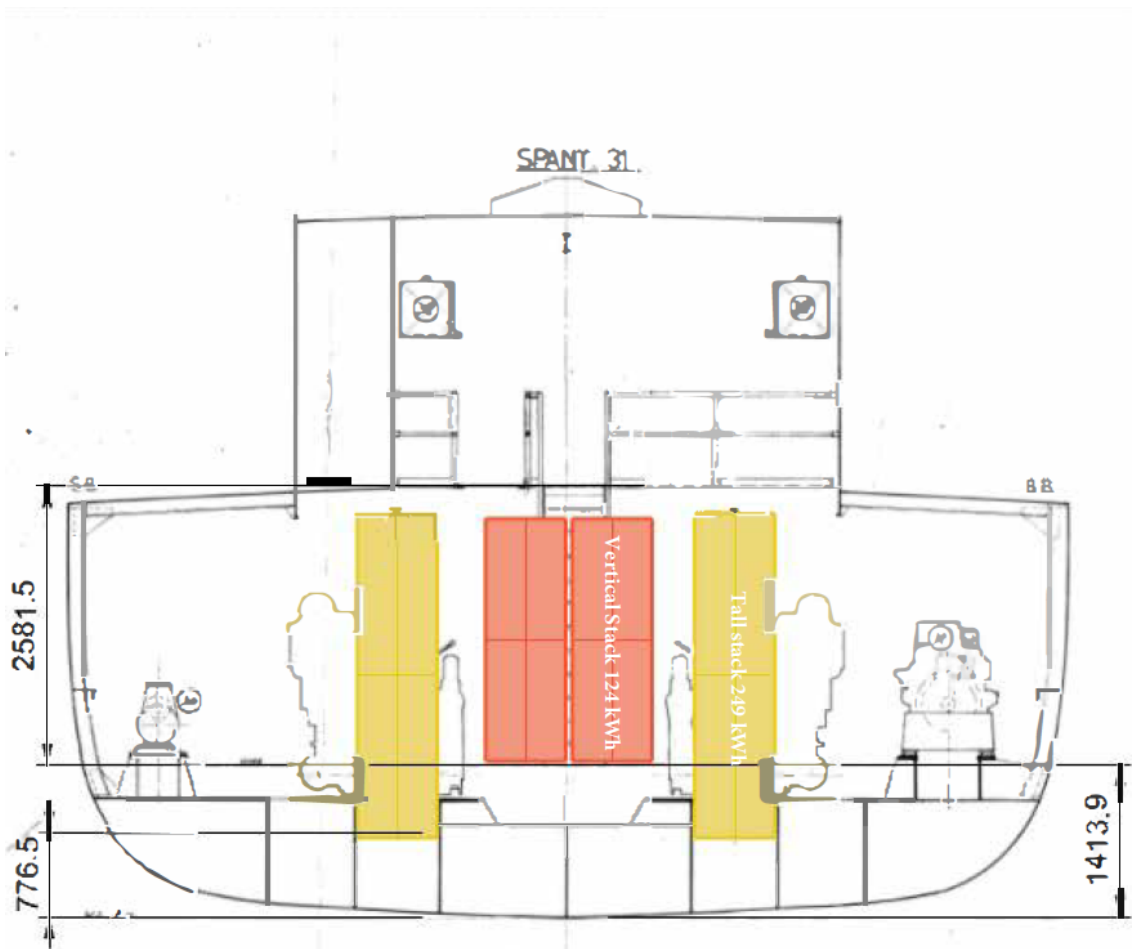
In de configuratie van elf verticale stacks en twee tall stacks is de geleverde capaciteit 1862 kWh. Dit is 48% procent meer capaciteit dan de Varnebank nodig heeft. Hierin zitten marges voor als het schip niet precies met het berekende vermogen vaart of als er iets mis gaat. Verder kunnen batterijen meestal maar voor 80% gebruikt worden om langer mee te gaan (Vetter e.a., 2005).

Het model wordt gevalideerd door te onderzoeken of de gekozen batterijen configuratie ook daadwerkelijk in de Varnebank past. Dit wordt gedaan met behulp van het 3D model in hoofdstuk 5.1.1. De nieuwe indeling van de machinekamer is zichtbaar in onderstaande figuur.



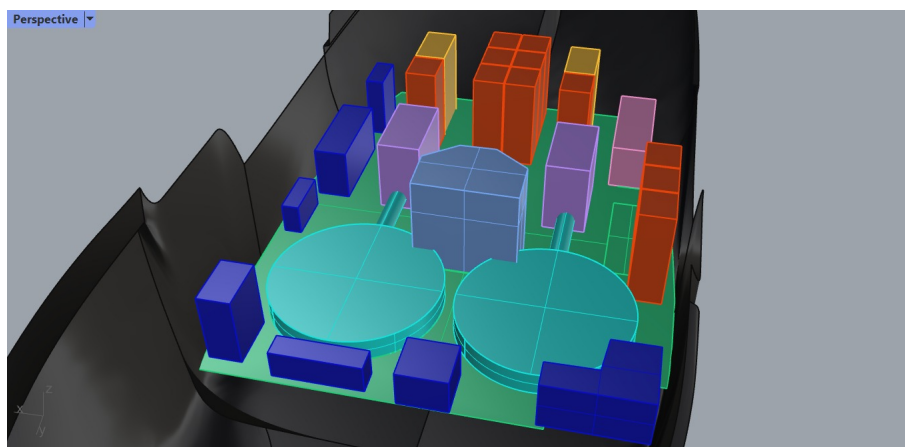
Figuur 5.8: Indeling machinekamer

In afbeelding 5.8 is de nieuwe indeling van de machinekamer bij de configuratie van batterijen zichtbaar. Hierin zijn de nieuwe onderdelen van de configuratie geplaatst op de beschikbare ruimte in de machinekamer, die beschreven is in paragraaf 5.1.3. De machinekamer en de nieuwe apparatuur zijn op schaal de nieuwe configuratie zal op deze manier in de machine kamer passen. In onderstaande afbeelding is het vooraanzicht van de machinekamer zichtbaar.



Figuur 5.9: Vooraanzicht machinekamer

In afbeelding 5.9 is het vooraanzicht van de machinekamer zichtbaar. Hierin is zichtbaar dat de tall packs in een gleuf staan deze is al aanwezig voor de huidige motor. Verder staan ook de afmetingen in de afbeelding de batterijen zouden dus ook op deze manier in de machinekamer moeten passen. Verder is de machinekamer ook in 3D uitgetekend zie afbeelding 5.10.



Figuur 5.10: 3D machinekamer

In bovenstaande afbeelding is de machinekamer met de nieuwe configuratie in het 3D model zichtbaar. Hierin zitten de Voith-Schneider propellers, de nieuwe elektromotoren, de batterijen, de oude generator en alle oude apparatuur.

Zoals bovenstaand beschreven past de configuratie van batterijen in de Varnebank. Dit is een validatie van het model. De berekende gegevens kloppen en batterijen voor de Varnebank is een technisch haalbare oplossing.

5.4. Stabiliteitscontrole

Voor de Varnebank is dus gekozen om het voortstuwingssysteem aan te drijven met behulp van batterijen. Zoals beschreven in bovenstaande paragrafen is het van groot belang dat de batterijen ook daadwerkelijk in de Varnebank passen. Verder is het ook belangrijk dat de stabiliteit met het nieuwe aandrijvingssysteem wordt gecontroleerd.

Er moet wederom gekeken worden naar de aanpassingen die gedaan worden in de Varnebank. Zoals eerder beschreven in 5.1.3. gaan de twee oude motoren eruit en een generator eruit. Dit zijn de grootste veranderingen aan de Varnebank. Deze verandering van gewicht zal een grote invloed hebben op de stabiliteit van het schip.

In dit hoofdstuk zullen stabiliteitsberekeningen van verschillende condities beschreven worden. Deze condities worden in onderstaande tabel verduidelijkt.

Verschillende conditie stabiliteit

Leeg schip	De Varnebank met oude apparatuur
Basis	De Varnebank zonder twee motoren en een generator
Batterij	De basis Varnebank met de installatie van de batterijen en elektromotor

Van de Varnebank zijn enkele stabiliteitsberekening beschikbaar gesteld. In onderstaande tabel staan de beschikbare gegevens over de Varnebank.

Tabel 5.9: Stabiliteitsgegevens Varnebank 1975

Stabiliteitsberekening 1975 Varnebank (empty ship)		
Massa	400,70	t
Verticaal zwaartepunt	4,94	m
Horizontaal zwaartepunt t.o.v. spant 0	16,98	m
Gemiddelde diepgang	4,40	m
MK	6,43	m

Met behulp van tabel 5.9 is het GM van het lege schip bepaald. Met leeg schip wordt aangenomen het volledige schip inclusief apparatuur, alleen de tanks zijn volledig leeg. Door gebruik te maken van onderstaande formule en bovenstaande gegevens is het GM van het lege schip met oude apparatuur bepaald op 1,49 m

$$GM = (KB + BM) - KG \quad (5.4)$$

Nu het GM van het lege schip met de oude apparatuur bepaald is moet er een basis GM bepaald worden, voor dit GM worden de twee motoren en een generator verwijderd. Het basis GM kan vervolgens weer omgerekend worden naar het GM met batterijen.

5.4.1. Basis GM

Om het basis GM te bepalen wordt ook formule 5.4 gebruikt echter dan met aangepaste KB, BM en KG. Als eerste wordt de nieuwe KG bepaald. Aangezien twee motoren en een generator eruit worden gehaald is de verwachting dat het KG wat groter zal worden. De zwaartepunten van de motor en generator zijn

bepaald aan de hand van een referentie-motor (Wärtsilä 6L20LF) en -generator waarvan de posities van de zwaartepunten bekend zijn. Deze positie is geschaald zodat er een juiste schatting gemaakt kan worden.

$$KG_{basis} = \frac{KG_{oud} \cdot m_{oud} - KG_{motor} \cdot m_{motor} - KG_{generator} \cdot m_{generator}}{m_{oud} - m_{motor} - m_{generator}} \quad (5.5)$$

Door gebruik te maken van formule 5.5 kan worden bepaald dat het KG van het lege schip zonder de motoren en generator 5,16 m is. Dit betekent dat de KG van de basis hoger is geworden dan de eerste KG zoals verwacht.

Vervolgens wordt de basis BM bepaald. Om het basis BM te kunnen bepalen moeten er eerst een paar tussen stappen gemaakt worden en zullen er een paar aannames beschreven worden. Door dat er minder massa in het schip zit zal de diepgang kleiner worden. Om te bepalen hoeveel de diepgang ongeveer kleiner wordt moet het displacement in de verschillende situaties met elkaar vergeleken worden. Het displacement van het lege schip wordt met onderstaande formule berekend.

$$\nabla = \rho \cdot m \quad (5.6)$$

Formule 5.6 wordt ook gebruikt om het displacement van de basis te bepalen. Het enige verschil tussen het displacement van het lege schip en die van de basis is de massa. Vervolgens wordt met behulp van het verschil in displacement de diepgang bepaald. Het verschil in displacement is $33m^3$ dit is geen groot verschil en betekent dus ook dat de diepgang niet heel veel zal veranderen. Het verschil in diepgang wordt met onderstaande formule berekend.

$$\Delta T = \frac{\nabla_{verschil}}{A_{waterlijn}} \quad (5.7)$$

Aangezien het verschil in displacement niet groot is zal de diepgang en dus ook de waterlijn niet veel veranderen. Er is dus aangenomen dat de waterlijn oppervlakte gelijk zal blijven. Als bovenstaande formule ingevoerd wordt zal dit een diepgang van 4,24 m opleveren bij het schip in basis conditie.

Met behulp van de diepgang van het schip in basis conditie is het KB in deze conditie bepaald. Het schip is minder diep komen te liggen in de basis conditie ten opzichte van de lege schip conditie, dit betekent dat het KB kleiner is geworden.

$$KB = KB_{oud} - \frac{1}{2} \Delta T \quad (5.8)$$

In formule 5.8 wordt de aanname gemaakt dat het schip een ponton is. Deze aanname is gemaakt aangezien er gezegd wordt dat de KB veranderd met de helft van het verschil in diepgang. Dit geldt alleen voor een ponton. Voor een echt schip geldt dit niet aangezien de buoyancy niet hoeft af te nemen met de helft van de diepgang. Deze aanname zorgt er echter voor dat het KB kleiner wordt. Dit is dus een soort veiligheidsfactor. Er hoeft geen zorgen gemaakt te worden dat door de aannamen de berekening van de conclusie over de stabiliteit incorrect is.

Als laatste voor de berekening van het GM in de basis conditie moet de BM in de basis conditie nog bepaald worden. Dit wordt gedaan met het traagheidsmoment en displacement. Het displacement van het huidige schip is al eerder beschreven en het traagheidsmoment wordt aan de hand van het getekende 3D model bepaald.

$$BM = \frac{I_{yy}}{\nabla} \quad (5.9)$$

Door gebruik te maken van formule 5.9 wordt het BM in basis conditie bepaald, dit is 3,07 m. Bij de formule is echter weer de aannamen gemaakt dat de het verschil in diepgang niet heel groot is en het traagheidsmoment gelijk is gebleven. In onderstaande tabel staan de belangrijke resultaten van bovenstaande formules in basis conditie van het schip.

Tabel 5.10: Stabiliteit basis conditie

Berekening basis conditie		
Displacement	367,46	m^3
Diepgang	4,24	m
KG	5,16	m
KB	3,53	m
BM	3,07	m
GM	1,44	m

Met gebruik van formule 5.4 wordt het GM in basisconditie bepaald. Vervolgens zal deze aangepast worden naar het GM in de conditie met batterijen.

5.4.2. GM met batterijen

Voor de bepaling van het GM in de conditie met batterijen worden de termen in de basis conditie aangepast, echter worden wel weer dezelfde formules gebruikt. Het subscript oud is nu aangenomen voor subscript basis. Voor de bepaling van de stabiliteit is het wel belangrijk dat het duidelijk is welke dingen in het schip geplaatst worden. Verder zijn de massa en posities van groot belang. Er worden elf Vertical Stack en twee Tall Stack batterijen geplaatst. Verder zullen er ook twee elektromotoren („Low voltage”, 2022) worden geplaatst om de Voith Schneider propellers aan te sturen zie tabel 5.12.

Tabel 5.11: Afmetingen batterijen

Tall Stack 249 kWh			Vertical Stack 124 kWh		
Hoogte	3,000	m	Hoogte	2,241	m
Breedte	1,345	m	Breedte	0,865	m
Lengte	0,738	m	Lengte	0,738	m
Massa	3,375	t	Massa	1,628	m

Tabel 5.12: Gegevens Elektromotor

Gegevens Elektromotor	
Naam	ABB M3BP 315MLB 6
Vermogen	110 kW @ 1000 rpm
Gewicht	1080 kg
Lengte	1315 mm
Breedte	508 mm
Hoogte	852 mm

De zwaartepunten van de batterijen zijn niet gegeven en voor deze is dus aangenomen dat ze op een halve breedte, lengte en hoogte liggen. Vervolgens zijn alle stappen van paragraaf 5.4.1. opnieuw doorlopen. De zwaartepunten van de elektromotoren zijn ook aangenomen op de halve breedte, hoogte en lengte. De gegevens van de elektromotoren staan in tabel 5.12 (ABB, 2022). De stappen beginnen nu vanaf de basis conditie. Als eerste zal de nieuwe KG bepaald worden met onderstaande formule.

$$KG_{batterij} = \frac{KG_{basis} \cdot m_{basis} + 11 \cdot KG_{vertical} \cdot m_{vertical} + 2 \cdot KG_{tall} \cdot m_{tall} + 2 \cdot KG_{elektromotor} \cdot m_{elektromotor}}{m_{basis} + 11 \cdot m_{vertical} + 2 \cdot m_{tall} + 2 \cdot m_{elektromotor}} \quad (5.10)$$

Vervolgens is er een nieuwe diepgang voor de Varnebank bepaald met de batterijen configuratie. Met behulp van de totale massa is er een nieuw displacement bepaald zie hiervoor formule 5.6. Nu het nieuwe displacement bekend is kan de nieuwe diepgang in de batterijen configuratie bepaald worden. Het verschil in displacement is $23,482 m^3$ aangezien de displacement verschillen niet heel groot zijn is

er van een constante waterlijn oppervlakte uit gegaan. Voor het verschil in diepgang kan ook de formule van 5.7 gebruikt worden. Het verschil in diepgang is 0,11 m.

Met de nieuwe diepgang van 4,35 m kan de nieuwe KB bepaald worden met onderstaande formule.

$$KB = KB_{basis} + \frac{1}{2} \Delta T \quad (5.11)$$

Het verschil tussen formule 5.8 en 5.11 is dat de KB bij de batterijen groter wordt aangezien het schip dieper komt te liggen. De KB van de basis werd juist lager, omdat het schip minder diep kwam te liggen. Bij de berekening van het KB is wel dezelfde aannamen gemaakt namelijk dat het schip niet veel van vorm verandert tussen de verschillende diepgangen. Nu het KB bepaald is kan de BM berekend worden. Deze wordt met dezelfde formule 5.9 van 5.4.1 bepaald. Hierin is het traagheidsmoment als gelijk beschouwd aangezien er geen groot verschil is in diepgang, dit is weer de aanname dat de vorm van het schip niet veel verandert bij de nieuwe diepgang ten opzichte van de basis diepgang. Het displacement is echter wel veranderd en dus is de BM waarde ook anders. Alle berekende waarden zijn in onderstaande tabel weergegeven.

Tabel 5.13: Nieuwe berekening in batterij conditie

Nieuwe berekening batterij conditie		
Displacement	390,942	m^3
Diepgang	4,35	m
KG	5,00	m
KB	3,59	m
BM	2,89	m
GM	1,47	m

Zoals duidelijk zichtbaar in tabel 5.13 is de stabiliteit van de Varnebank met de batterijen en elektromotoren nog steeds goed. Er zit ook geen groot verschil in het GM. Het schip zal dus ook niet veel verschil ervaren. Voor sleepboten geldt dat het GM erg hoog is voor de veiligheid in de sleepconditie (Storch, 1970). De Varnebank sleept niet meer en dus zal het een minder hoog GM nodig hebben. Het schip is dus sowieso stabiel.

Trim en helling

Niet alleen moet de Varnebank met de nieuwe configuratie stabiel liggen maar er moet ook gekeken worden naar de trim en helling. Bij de configuratie met batterijen zijn de brandstoftanks volledig leeg. De brandstoftanks zijn door het hele schip verdeeld, deze kunnen gebruikt worden als ballast voor de huidige trim en helling te behouden.

Verder is er alleen nieuwe apparatuur geplaatst op de plekken waar oud apparatuur stond hierdoor zal de trim en helling ook niet enorm veel veranderen. Er is dus aangenomen dat dit geen probleem zal zijn. Hoofdstuk 5.3 heeft aangetoond dat de configuratie met batterijen in de Varnebank past. Vervolgens wordt in hoofdstuk 5.4 duidelijk gemaakt dat de stabiliteit blijft voldoen. De configuratie van batterijen is nu volledig gevalideerd.

5.4.3. Opgestelde eisen behaald

In subparagraaf 2.2.2 zijn de eisen voor de Varnebank opgesteld waaraan voldaan moet worden. Gedurende hoofdstuk 5 zijn verschillende eisen aan de orde gekomen. Om deze nog eens duidelijk op een rijtje te zetten worden ze hieronder allemaal kort besproken.

De eerste eis van de Varnebank is om een aantal historische onderdelen van het schip te behouden. Voor de Varnebank zijn dit de Voith-Schneider propellers. In subparagraaf 5.1.2 wordt de beschikbare ruimte in de machinekamer beschreven. Hierbij is er rekening gehouden dat de Voith-Schneider propellers behouden moeten blijven. Dit is ook zichtbaar in figuur 5.4, de ronde cirkels zijn de Voith-Schneider propellers.

Verder moet de Varnebank minstens zes uur aan één stuk kunnen varen met een snelheid van acht knopen. Deze eis is duidelijk vastgesteld in de invoerwaarde van het model. Dit is besproken in paragraaf 5.1.1, verder is er met de berekening van de weerstand rekening gehouden met een snelheid van acht knopen.

De derde eis aan de Varnebank is dat tijdens de test-fase van het nieuwe aandrijvingsstelsel ten alle tijden een back-up methode aanwezig moet zijn. Dit is in het hoofdstuk nog niet uitgebreid besproken. Er is meer capaciteit aanwezig dan nodig voor de gewenste tocht van zes uur. Dit geeft wat ruimte om nog thuis te kunnen komen als de omstandigheden veranderen, zoals een langere tocht dan verwacht of extreme weersomstandigheden waardoor meer vermogen nodig is.

Buiten deze veiligheidsmarges en de twee motoren is er geen ruimte om een back-up systeem aanwezig te hebben. Wel kan er met één motor gevaren worden wanneer de ander uitvalt en kan de benodigde stroom eventueel met de overgebleven generator worden opgewerkt.

De volgende eis van het maximaal aantal gasten van de Varnebank is geldig aangezien dan de regels voor de Varnebank niet zullen veranderen.

De aanpassingen aan de Varnebank moeten zich ook enkel beperken tot de aandrijving van het schip. Hierbij moet het uiterlijk en daarmee een groot deel van de historische waarde behouden blijven. Het gehele onderzoek is alleen gericht op verduurzaming door middel van het veranderen van het aandrijvingsstelsel. Er heeft dus ook geen verandering plaats gevonden aan het uiterlijk van de Varnebank en dus is ook deze eis behaald.

De laatste twee eisen worden gecontroleerd aan de hand van het model. De eis op gebied van emissie is dat het nieuwe ontwerp minstens 75% minder stikstofoxiden, zwavel en fijnstof en minstens 70% minder CO₂ moet uitstoten dan tijdens het varen in de huidige situatie („IMO's work to cut GHG emissions from ships”, 2019). De laatste eis dat het ontwerp uitvoerbaar moet zijn in twee jaar. Met beide eisen is rekening gehouden in het model. Deze zijn ook zichtbaar in de uitvoer (figuur 4.14).

6

Discussie

Doordat dit project is uitgevoerd voor het Bachelor Eindproject was er gelimiteerde tijd en diepgang. Hierdoor moesten er verschillende aannames gemaakt worden die invloed hebben op de validiteit en was er niet altijd genoeg tijd om elk punt tot in detail te onderzoeken. In dit hoofdstuk wordt de validiteit van het gehele project besproken en worden aanbevelingen gedaan voor eventuele vervolgonderzoeken.

6.1. Validiteit

In deze paragraaf wordt de validiteit van het gehele project beschreven. In paragraaf 5.3 zijn al wat conclusies getrokken over de validiteit van het model, door een van de technisch haalbare oplossingen in te tekenen in een 3D-model, om zo te checken of het echt past. Om de validiteit te bepalen moet gekeken worden naar de verschillende aannames die tijdens dit project gemaakt zijn.

Ten eerste is het model gemaakt aan de hand van kengetallen die in veel van de gevallen bepaald zijn aan de hand van data van bestaande producten. Dit project is gedaan door studenten met beperkte toegang tot data en daarom zijn deze kengetallen gebaseerd op slechts enkele producten van enkele producenten, waarvan de productspecificaties openbaar waren. Door deze kleine hoeveelheid data is de kans dat de werkelijkheid een grote afwijking heeft van de door het model gerekende uitvoer zeer aannemelijk. Hierbij komt ook nog dat voor sommige berekeningen meerdere onzekere kengetallen gebruikt zijn, waardoor mogelijke afwijkingen alleen maar opstapelen.

Ten tweede is de uitvoer sterk afhankelijk van het nominaal vermogen dat is ingevuld in de invoer. Dit vermogen is bepaald door de weerstand te bepalen met de methode van Holtrop en Mennen. Hiervoor is er gebruik gemaakt van een 3D-model dat verkregen is uit oude handtekeningen. Hier ontstaat de eerste onzekerheid al bij het aflezen van de vaak onduidelijke en slecht zichtbare lijnen van de handgemaakte tekeningen, die zijn overgetekend in een computerprogramma. De volgende onzekerheid ontstaat als dit programma vervolgens een 3D-vorm creëert uit deze lijnen. Tenslotte moet ook nagedacht worden over de nauwkeurigheid van de methode van Holtrop en Mennen en hoe goed deze methode matcht met de Varnebank, een relatief kort en breed schip zonder middenschip.

Als derde moet genoemd worden dat het ontwikkelde model slechts een versimpeling van de waarheid is. Niet alle factoren die in werkelijkheid invloed hebben op de resultaten zijn meegenomen om zo het model zo eenvoudig mogelijk te houden.

De keuzes voor factoren wel of niet meenemen zijn afwegingen tussen hoe complex het is om de factor toe te voegen en hoe veel invloed de factor heeft. Zo zijn factoren die moeilijk te implementeren zijn en weinig invloed op de resultaten hebben weggelaten.

Er zijn ook factoren weggelaten waarvoor onderbouwd kan worden dat deze misschien wel genoeg invloed hebben om meegenomen te moeten worden. Deze zijn weggelaten vanwege gebrek aan tijd voor de bijbehorende diepgang. Voorbeelden hiervan zijn de extra ruimte en gewicht voor alle

systemen en machines die in praktijk ook nodig zijn om de motoren, generatoren, brandstofcellen of batterijen te ondersteunen en de loopruimte om alle onderdelen heen. Denk bij deze systemen en machines aan vermogenselektronica, koeling, een tandwielkast etc. Voor de loopruimte geldt dat in de handleiding van het model is beschreven dat bij de invoer rekening gehouden moet worden met de loopruimte die nog over moet blijven.

6.2. Vervolgonderzoeken

In deze paragraaf worden wat suggesties gedaan voor eventuele vervolgonderzoeken die een bijdrage zouden kunnen leveren aan dit project.

Om het model nog beter te valideren zou het helpen om de gegevens in te vullen van een andere case-study met een heel ander operationeel profiel. Hiervoor kan vervolgens gecheckt worden of het model nog steeds zinnige uitkomsten geeft. De case-study de Varnebank heeft eigenlijk een erg afwijkend operationeel profiel ten opzichte van de schepen waarvoor het model oorspronkelijk ontworpen is. Hierdoor kan deze extra case-study veel nieuwe inzichten geven. Het wordt dan ook aanbevolen om te kiezen voor een case-study die gaat over een sleepboot die nog steeds wilt blijven slepen en een vermogen van ongeveer tussen de één en tien MW nodig heeft.

Naast deze extra validatie kan het model ook een stuk betrouwbaarder gemaakt worden door nog een extra data-onderzoek te doen. Zoals eerder vermeld zijn de meeste kengetallen slechts op enkele gegevens gebaseerd. Een uitgebreid data-onderzoek zal daarom een zeer nuttige toevoeging zijn.

Tenslotte rekent het model met slechts een paar verschillende configuraties voor aandrijvingssystemen. Het model zou nog flink uitgebreid kunnen worden door meer configuraties of zelfs nog andere onderdelen te verwerken. Zo kan er nog onderzoek gedaan worden naar bijvoorbeeld een diesel-elektrisch systeem, gasturbines, brandstofcellen op ammoniak of combinaties van brandstoffen.

Verder kan er ook onderzoek naar de veiligheid van de verschillende mogelijkheden gedaan worden, deze is in dit verslag buiten beschouwing gelaten. Echter zitten bij de verschillende verduurzaming opties veel veiligheidseisen en moet dit nog nader onderzocht worden.

7

Conclusie & Aanbeveling

Het doel van dit verslag is om een hulpmiddel te beschrijven dat schat welke alternatieve brandstoffen en/of aandrijvingssystemen in een sleepboot geïnstalleerd kunnen worden en aan alle eisen voldoen. Hiervoor was de eerste deelvraag: Wat zijn op dit moment mogelijke alternatieve brandstoffen en aandrijvingssystemen en wat zijn de eigenschappen van deze alternatieven?. Met de gevonden gegevens is een model gemaakt. Het model toetst een aantal configuraties op basis van de ingevoerde gegevens van een sleepboot. Dit doet het model op basis van eisen aan vaarcondities, uitstoot en randvoorwaarden met betrekking tot ruimte in de machinekamer. Dit uitgewerkte model is het antwoord op de deelvraag: Hoe kan een algemene methode worden ontwikkeld om te testen of een alternatief aandrijvingssysteem gebruikt kan worden?

Het model is geverifieerd aan de hand van verschillende testen. Uit deze testen blijkt dat het model doet wat er verwacht wordt en er dus geen rekenfouten of typfouten zijn gemaakt.

Het model wordt gevalideerd en getest door het in te vullen voor de case-study de Varnebank. Hiervoor is eerst de derde deelvraag beantwoord: Wat is het benodigde vermogen en de bijbehorende hoeveelheid energie voor het operationele profiel van de Varnebank? Met het 3D-model en het Grasshopper-script is de weerstand geschat en het benodigde vermogen bepaald. Hiermee kan bepaald worden hoeveel vermogen en hoeveel brandstof er mee moet tijdens een dag varen.

Met alle gegevens uit het model kan de vierde deelvraag worden beantwoord: Welke alternatieve aandrijvingssystemen zijn technisch haalbaar voor de Varnebank en welke is het meest geschikt voor de Varnebank? Voor de Varnebank zijn er meerdere opties mogelijk voor een vernieuwd en duurzaam aandrijvingssysteem. Dit zijn een verbrandingsmotor op bio-LNG, groene methanol en ammoniak. Ook waterstofbrandstofcellen en batterijen kunnen worden ingebouwd. Uiteindelijk is gekozen voor batterijen op basis van een aantal criteria. Ten eerste is waterstof erg duur per trip en zijn er veel regels waaraan moet worden voldaan met betrekking tot de veiligheid en de opslag ervan, waardoor het onpraktisch is om het nu te gebruiken. Verder zijn er nog geen motoren op de markt die werken op LNG of methanol die in het juiste bereik voor het vermogen liggen. Ammoniakmotoren bestaan nog helemaal niet en zijn daarom op dit moment geen optie. Het kan wel zijn dat bovengenoemde motoren over een aantal jaar wel bestaan in het vermogen dat geschikt is voor de Varnebank, waardoor er dan een andere optie gekozen zou kunnen worden.

Batterijen zijn op dit moment op de markt en kunnen dus direct worden toegepast. Bovendien zijn accu's volledig emissievrij en zullen ze ook in de toekomst voldoen aan nieuwe strengere regelgeving. Wel moeten batterijen elke tien jaar vervangen worden. Er is in totaal 1862 kWh aan accucapaciteit in het 3D-model ingetekend. Hiermee is deelvraag 5 beantwoord: Hoe kan de beste oplossing geïmplementeerd worden in de Varnebank? Doordat de gehele configuratie past, kan worden geconcludeerd dat het model in ieder geval een goede indicatie kan geven voor het verduurzamen van het schip. De validatie is enkel uitgevoerd voor een schip dat niet meer een slepend operationeel

profiel heeft. Er kan dus niet met zekerheid gezegd worden dat het model op grotere schaal voor een ander operationeel profiel ook zal werken. Dit is gelijk het antwoord op de laatste deelvraag: Geeft het rekenmodel een goede indicatie voor de gekozen oplossing in de Varnebank?

Het is dus mogelijk om de Varnebank, en dus ook andere sleepboten, duurzaam te maken. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat er een aantal aannames zijn gedaan met betrekking tot emissies en bepalend vermogen. In een vervolgstudie zou onderzocht kunnen worden of het model gebaseerd kan worden op nauwkeuriger gegevens, die gebruikt worden voor de afleiding van kengetallen. Ook wordt een meting van de huidige emissies en weerstand van het te conserveren schip aanbevolen. Dit zodat de basisgegevens nauwkeuriger kunnen worden bepaald. In verdere studies zou ook gekeken kunnen worden naar de emissies van de productie van de brandstof om te zorgen voor nul uitstoot gedurende de cyclus, omdat deze momenteel niet worden meegenomen. Ook is het aan te raden om het model te testen op een schip dat nog wel sleept. Hiermee kan worden onderzocht of het model ook voor hogere vermogens een juiste indicatie kan geven.

Referenties

- 23g.nl. (g.d.). DCB Energy: LNG voordelen. <https://www.dcbenergy.nl/dcb-energy/producten/lng-voor-een-duurzame-toekomst/voordelen-van-lng#:~:text=De%5C%20uitstoot%5C%20van%5C%20fijnstof%5C%20door,en%5C%20aan%5C%20de%5C%20nieuwe%5C%20geluidsnormen.>
- ABB. (2021). High voltage engineered induction motors Technical catalog (Versie 9AKK103508 REV M 6.9.2021). <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK103508&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch=>
- ABB. (2022, december 22). Process performance induction motors - ABB Process performance motors (IEC Low voltage motors ABB motors manuals). Verkregen 13 juni 2023, van <https://new.abb.com/motors-generators/iec-low-voltage-motors/process-performance-motors/process-induction-motors>
- Atilhan, S., Park, S., El-Halwagi, M. M., Atilhan, M., Moore, M., & Nielsen, R. (2021). Green hydrogen as an alternative fuel for the shipping industry. *Current opinion in chemical engineering*, 31, 100668. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.100668>
- Bakhtiari, M. R., & Ghassemi, H. (2019). A 2.5D numerical study on open water hydrodynamic performance of a Voith-Schneider propeller. *Mechanics Industry*, 20(6), 617. <https://doi.org/10.1051/meca/2019049>
- Baldi, F., Brynolf & Maréchal (Red.). (2019, juni 23). The cost of innovative and sustainable future ship energy systems. https://www.researchgate.net/profile/Francesco-Baldi-4/publication/334193279_The_cost_of_innovative_and_sustainable_future_ship_energy_systems/links/5d1c52ba299bf1547c92d5fa/The-cost-of-innovative-and-sustainable-future-ship-energy-systems.pdf
- Balestra, L., & Schjøberg, I. (2021). Modelling and simulation of a zero-emission hybrid power plant for a domestic ferry. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(18), 10924–10938. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.187>
- Bas Goris, J. W. (2020). The simple hull generator for MT1458.
- Batterijen bewaren - Blog. (g.d.). <https://www.batterijenhuis.nl/blog-section/batterijen-bewaren#:~:text=Hoe%5C%20lang%5C%20een%5C%20batterij%5C%20bewaard,hoorbatterijen%5C%20ongeveer%5C%203%5C%2D4%5C%20jaar.>
- Berger. (2019, oktober 6). Wat betekenen de Stage V-emissie-eisen binnenvaart voor mij? Verkregen 22 juni 2023, van http://www.bergermaritiem.nl/stage_v_emissie_eisen_binnenvaart
- Bunkeren in Rotterdam. (g.d.). <https://www.portofrotterdam.com/nl/zeevaart/bunkeren-in-rotterdam>
- The case for two-stroke ammonia engines. (g.d.). <https://www.man-es.com/discover/two-stroke-ammonia-engine>
- Caterpillar. (g.d.). C7.1 (60 HZ) | 120-175 kW Diesel Generator | Cat | Caterpillar. https://www.cat.com/en_US/products/new/power-systems/electric-power/diesel-generator-sets/18595256.html
- College of the Desert. (2001, december). Module 1: Hydrogen Properties. Verkregen 1 mei 2023, van <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f12/fcm01r0.pdf>
- Combustion of Fuels - Carbon Dioxide Emission. (g.d.). https://www.engineeringtoolbox.com/co2-emission-fuels-d_1085.html

- ConoShip. (g.d.). Anex 4 appendix Alternative handbook ConoShip. <https://brightspace.tudelft.nl/d2l/le/content/401155/viewContent/2623554/View>
- Corporation, W. (2011). Total Service Wärtsilä Engines. 9F240.
- Corvus Orca Energy - Corvus Energy. (2023, februari 20). <https://corvusenergy.com/products/energy-storage-solutions/corvus-orca-energy/>
- Corvus Orca Energy - Corvus Energy. (2023, februari 20). <https://corvusenergy.com/products/energy-storage-solutions/corvus-orca-energy/>
- Corvus Orca Energy - Corvus Energy. (2023). <https://corvusenergy.com/products/energy-storage-solutions/corvus-orca-energy/>
- de Vos, P., & Stapersma, D. (2015). Dimension prediction models of ship system components based on first principles.
- electricaleasy.com: Salient pole rotor vs. non-salient pole rotor. (g.d.). <https://www.electricaleasy.com/2014/03/salient-pole-rotor-vs-non-salient-pole.html>
- Emissies door de zeescheepvaart, 1990-2020 | Compendium voor de Leefomgeving. (g.d.). <https://www.clo.nl/indicatoren/nl0521-emissies-naar-lucht-door-de-zeescheepvaart>
- Emission Standards: Europe: Nonroad Engines. (2021, juli). Verkregen 22 juni 2023, van <https://dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php#s1>
- Energievergelijk.nl. (2023). Actuele Stroomprijs per kWh + Grafiek (Update: 2023). <https://www.energievergelijk.nl/energieprijzen/stroomprijs>
- Esmailian, Ghassemi & Heidari. (2014). Numerical Investigation of the Performance of Voith Schneider Propulsion. *American Journal of Marine Science*, 2(3), 58–62. <https://doi.org/10.12691/marine-2-3-3>
- Fast-tracking slow-speed engine technology for ammonia and methanol. (g.d.). <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/fast-tracking-slow-speed-engine-technology-for-ammonia-and-methanol-75891#:~:text=MAN%5C%20ES%5C%20plans%5C%20to%5C%20have,for%5C%20existing%5C%20engines%5C%20by%5C%202025.>
- Gagatsi, E., Estrup, T., & Halatsis, A. (2016). Exploring the Potentials of Electrical Waterborne Transport in Europe: The E-ferry Concept. *Transportation research procedia*, 14, 1571–1580. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.122>
- Gill, S. S., Chatha, G. S., Tsolakis, A., Golunski, S. E., & York, A. (2012, april 1). Assessing the effects of partially decarbonising a diesel engine by co-fuelling with dissociated ammonia. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.12.137>
- Harmsen, J. (2021). Green Maritime Methanol. Towards a zero emission shipping industry. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:0542ccdc-00fc-4229-a39f-401688d3ee03>
- Holtrop & Mennen. (1982). AN APPROXIMATE POWER PREDICTION METHOD.
- Hulskotte, J., Bolt, E., & Broekhuizen, D. (2012, december 15). EMS-protocol Emissies door Binnenvaart: Verbrandingsmotoren. Verkregen 22 maart 2023, van <https://eracceptatie.emissieregistratie.nl/erpubliek/bumper.nl.aspx>
- IMO. (2008). ADOPTION OF THE INTERNATIONAL CODE ON INTACT STABILITY. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.267\(85\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.267(85).pdf)
- IMO's work to cut GHG emissions from ships. (2019). <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Cutting-GHG-emissions.aspx#:~:>

- text=In%5C%202020%5C%2C%5C%20the%5C%20IMO%5C%202020,by%5C%202030%5C%2C%5C%20compared%5C%20to%5C%202008.
- Inal, O. B., Charpentier, J. F., & Deniz, C. (2022). Hybrid power and propulsion systems for ships: Current status and future challenges. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 156, 111965. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111965>
- Intergovernmental panel on climate change. (2021). *Climate change 2021: The Physical Science Basis*. Verkregen 27 maart 2023, van https://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf
- Kansen, M. K., Visser, J. V., & Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2015, mei). *Naar een duurzame zee- en binnenvaart in 2050*. <https://www.kimnet.nl/publicaties/rapporten/2015/07/06/naar-een-duurzame-zee--en-binnenvaart-in-2050>
- Kim, K., Roh, G., Kim, W., & Chun, K. (2020, maart 7). A Preliminary Study on an Alternative Ship Propulsion System Fueled by Ammonia: Environmental and Economic Assessments. <https://doi.org/10.3390/jmse8030183>
- Korberg, A. D., Brynolf, S., Grahn, M., & Skov, I. R. (2021). Techno-economic assessment of advanced fuels and propulsion systems in future fossil-free ships. *Renewable and sustainable energy reviews*, 142, 110861. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110861>
- Koschorrek, P., Palm, M., & Jeansch, T. (2017). A Dynamic Allocation Strategy for Voith Schneider Propeller * *The authors want to express their gratitude to the German Federal Ministry of Economics and Technology (BMWi) which has supported this work under grants DP Motion (No. 03SX351D) and DP-II (No. 03SX428C). *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 1127–1132. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.395>
- Lefevre, Y., El Aabid, S., Llibre, J., Henaux, C., & Touhami, S. (2018). Performance assessment tool based on loadability concepts. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 59, 1–8. <https://doi.org/10.3233/JAE-171059>
- Leśniewski, W., Piątek, D., Marszałkowski, K., & Litwin, W. (2020). Small Vessel with Inboard Engine Retrofitting Concepts; Real Boat Tests, Laboratory Hybrid Drive Tests and Theoretical Studies. *Energies*, 13(10), 2586. <https://doi.org/10.3390/en13102586>
- Li, Z., Cooper, P. R., Daly, D., & Ledo, L. (2012). Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art. *Energy and Buildings*, 55, 889–902. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.018>
- Low voltage: Process performance motors, 400 V 50 Hz, 460V 60 Hz. (2022, december). <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK105944&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- MAN 175D. (2023). <https://www.man-es.com/marine/products/four-stroke-engines/man-175d>
- Marine | PowerCell Group | Hydrogen Fuel Cell Solutions. (g.d.). <https://powercellgroup.com/segments/marine/>
- Marine diesel engines - Wärtsilä. (g.d.). <https://www.wartsila.com/marine/products/engines-and-generating-sets/diesel-engines>
- Marine dual fuel engines - Wärtsilä. (g.d.). <https://www.wartsila.com/marine/products/engines-and-generating-sets/dual-fuel-engines>
- Marine generating sets - Wärtsilä. (2023). <https://www.wartsila.com/marine/products/engines-and-generating-sets/generating-sets/wartsila-gensets>
- Marine Modules - Fuel Cell Power Products | Ballard Power. (g.d.). Verkregen 9 mei 2023, van <https://www.ballard.com/fuel-cell-solutions/fuel-cell-power-products/marine-modules>
- Marine solutions, products, and services - Wärtsilä. (g.d.). <https://www.wartsila.com/marine>

- McCoy, T. J. (2002). Trends in ship electric propulsion. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1043247>
- McKinlay, C. J., Turnock, S. R., & Hudson, D. A. (2021). Route to zero emission shipping: Hydrogen, ammonia or methanol? *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(55), 28282–28297. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.066>
- Methanex. (2023). Pricing - Methanex. <https://www.methanex.com/about-methanol/pricing/>
- Methanol als maritieme brandstof. (g.d.). Verkregen 23 mei 2023, van <https://marine-service-noord.com/producten/alternatieve-brandstoffen-en-technologieen/methanol/methanol-als-maritieme-brandstof/#:~:text=Door%5C%20methanol%5C%20als%5C%20scheepsbrandstof%5C%20te,is%5C%20uw%5C%20uitstoot%5C%20CO2%5C%2Dneutraal.>
- Moore, C. S. (2010, januari 1). Intact Stability. Society of Naval Architects & Marine Engineers.
- Nationaal LNG Platform. (2020). <https://www.nationaalngplatform.nl/#:~:text=Van%5C%20over%5C%20de%5C%20hele%5C%20wereld,short-sea%5C%20en%5C%20de%5C%20binnenvaart.>
- Neeft, J. P., Makkee, M., & Moulijn, J. A. (1996). Diesel particulate emission control. *Fuel Processing Technology*, 47(1), 1–69. [https://doi.org/10.1016/0378-3820\(96\)01002-8](https://doi.org/10.1016/0378-3820(96)01002-8)
- NU.nl. (2022). Gasprijs blijft maar stijgen en staat opnieuw op recordhoogte. <https://www.nu.nl/economie/6217955/gasprijs-blijft-maar-stijgen-en-staat-opnieuw-op-recordhoogte.html>
- Peninsula Petroleum. (2021, mei 13). Sustainable Liquefied Natural Gas | LNG | Worldwide LNG Supplier. <https://www.peninsula360.com/liquefied-natural-gas/>
- PIAS Manual: Resist: resistance prediction with empirical methods. (g.d.). <http://www.sarc.nl/images/manuals/pias/htmlEN/resist.html>
- Pohekar, S., & Ramachandran, M. (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 8(4), 365–381. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2003.12.007>
- Polonsky, M. J., & Scott, D. (2005). An empirical examination of the stakeholder strategy matrix. *European journal of Marketing*, 39(9/10), 1199–1215.
- Prastyasari, F. I., Handani, D. W., Dinariyana, A. A. B., & Prakoso, M. A. (2019). Feasibility study of diesel engine replacement on passenger ships: a system dynamics approach. *WMU journal of maritime affairs*, 18(2), 281–296. <https://doi.org/10.1007/s13437-019-00169-9>
- Psaraftis, H. N., & Kontovas, C. A. (2009). SHIP EMISSIONS: LOGISTICS AND OTHER TRADEOFFS. Verkregen 21 maart 2023, van https://www.researchgate.net/profile/Harilaos-Psaraftis/publication/228501943_Ship_Emissions_Logistics_and_Other_Tradeoffs/links/0fcfd5141d1ed0d43100000/Ship-Emissions-Logistics-and-Other-Tradeoffs.pdf
- PubChem. (g.d.). Ammonia. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Ammonia#section=2D-Structure>
- Rotterdam Bunker prices. (2023). https://shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam#_LNG
- Routekaart verduurzaming monumenten. (2019). <https://www.duurzaamergoed.nl/sites/default/files/2020-06/2019%20Routekaart%20Verduurzaming%20Monumenten.pdf>
- Sargent, R. (2011). Verification and validation of simulation models. *Engineering Management Review*, IEEE, 37, 166–183. <https://doi.org/10.1109/WSC.2010.5679166>

- Scheepers, P., & Bos, R. (1992). Combustion of diesel fuel from a toxicological perspective. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 64(3), 149–161. <https://doi.org/10.1007/bf00380904>
- Schuttevaer.nl. (2023). '2023 is het methanoljaar voor de haven van Rotterdam' | Schuttevaer.nl. <https://www.schuttevaer.nl/nieuws/actueel/2023/04/24/2023-is-het-methanoljaar-voor-de-haven-van-rotterdam/#:~:text=Vanaf%20de%20zomer%20van%202023,ammoniak%20en%20waterstof%20kan%20varen.>
- Sleep & Duwvaart. (2022). Varnebank. Verkregen 21 maart 2023, van <https://varendergoed.nl/nieuwezee/varnebank-27.14401.html>
- solediesel.com. (g.d.). Solé Diesel SDZ-165 Marine Engine. <https://www.solediesel.com/en/sole-diesel-sdz-165-marine-engine-fa1081>
- Stimular. (2023). Productinformatie - Milieubarometer - Stimular. <https://www.milieubarometer.nl/productinformatie/>
- Stimular. (g.d.). Milieubarometer school. Verkregen 21 juni 2023, van <https://www.milieubarometer.nl/voorbeelden/school/>
- Storage, W. E. (2023). Wärtsilä Energy Storage - GridSolv Quantum - Next generation storage. <https://storage.wartsila.com/technology/gridsolv-quantum/>
- Storch, R. (1970). Stability of offshore tugboats. <https://tinyurl.com/Stability-of-offshore-tugboats>
- Stråby. (2023, april 5). Maersk Methanol Fueled Containerships - Design for Safe Operation and Maintenance. <https://imarest.cloud.panopto.eu/Panopto/Pages/Viewer.aspx?id=c42b9f65-5660-49e2-b553-afb301243d21>
- Sydbom, A., Blomberg, A., Parnia, S., Stenfors, N., Sandström, T., & Dahlén, S.-E. (2001). Health effects of diesel exhaust emissions. *European Respiratory Journal*, 17(4), 733–746. <https://doi.org/10.1183/09031936.01.17407330>
- te Roller, E. t. R. (g.d.). AMMONIAK BIEDT SLEUTEL TOT DUURZAME TOEKOMST. ENERGIE. https://www.voltachem.com/images/uploads/NPT_Power2Ammonia.pdf
- TNO. (g.d.). 15 dingen die je moet weten over waterstof. <https://www.tno.nl/nl/duurzaam/co2-neutrale-industrie/schone-waterstofproductie/15-dingen-die-je-moet-weten-waterstof/#hc4fe6575-64e5-4dc5-8fbd-82d3c4f24055>
- Trivyza, N. L., Rentizelas, A., & Theotokatos, G. (2018). A novel multi-objective decision support method for ship energy systems synthesis to enhance sustainability. *Energy Conversion and Management*, 168, 128–149. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.020>
- Tunér, Aakko-Saksa & Molander. (2018). Engine Technology, Research, and Development for Methanol in Internal Combustion Engines. <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2018/05/SUMMETH-3-Engine-Technology.pdf>
- Van Biert, L., Godjevac, M., Visser, K., & Aravind, P. (2016). A review of fuel cell systems for maritime applications. *Journal of Power Sources*, 327, 345–364. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.07.007>
- Van Herk, N. (2021). 'Er is absoluut niet genoeg methanol voor de scheepvaart' | NT. NT. <https://www.nt.nl/scheepvaart/2021/08/24/er-is-absoluut-niet-genoege-methanol-voor-de-scheepvaart/?gdpr=accept>
- van Biert, L., Hopman, H., Veldhuizen, B., & Visser, K. (Red.). (2022, oktober). Comparative Analysis of Alternative Fuels for Marine SOFC Systems.
- van Duijn, J. (g.d.). Modelling diesel-ammonia two-stroke engines.

- Verbrugge, Colle, Pickavet & Demeester. (2006, mei 31). Methodology and input availability parameters for calculating OpEx and CapEx costs for realistic network scenarios. https://opg.optica.org/view_article.cfm?pdfKey=a0ecdfe8-7b0d-441d-a4b923f2ca8f43f1_90146
- Vetter, J., Novák, P., Wagner, M., Veit, C., Möller, K., Besenhard, J., Winter, M. A., Wohlfahrt-Mehrens, M., Vogler, C., & Hammouche, A. (2005). Ageing mechanisms in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 147(1-2), 269–281. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.01.006>
- Voith Turbo Marine. (2005, juli). Voith Schneider Propeller Designer Manual. https://web.itu.edu.tr/takinaci/dersler/advprosys/week_10/vtmh_am_brochure_g1861_designer-manual_e.pdf
- Wärtsilä. (2020). Wärtsilä 20 PRODUCT GUIDE. https://brandhub.wartsila.com/m/63086c590a5f7cd7/original/Wartsila-20-Product-guide.pdf?utm_source=engines&utm_medium=dieselenines&utm_term=marine-power&utm_content=productguide&utm_campaign=mp-engines-and-generating-sets-gated
- Wärtsilä 32 Methanol Engine. (g.d.). <https://www.wartsila.com/marine/products/engines-and-generating-sets/wartsila-32-methanol-engine>
- Waterstof tanken bij Shell. (g.d.). <https://www.shell.nl/consumenten/shell-fuels/alternatieve-brandstoffen/waterstof.html#:~:text=De%20prijs%20van%20waterstof%20zal,je%20gemiddeld%20100%20km%20rijden.>
- World Bunker Prices. (g.d.). Verkregen 7 juni 2023, van <https://shipandbunker.com/prices#MGO>
- Wu, P., & Bucknall, R. (2016). Marine propulsion using battery power. In: (Proceedings) Shipping in Changing Climates Conference 2016. (2016).
- YANMAR Marine International. (2023, maart 23). 4JH110 - YANMAR Marine International. <https://www.yanmar.com/marine/product/engines/4jh110/>
- Zhang, C., & Wu, Y. (2015). A Flowchart for Rapid Technical Debt Management Decision Making. *Journal of Software*. <https://doi.org/10.17706/jsw.11.2.212-219>
- Zincir, B. (2020). A short review of ammonia as an alternative marine fuel for decarbonised maritime transportation. *Proceedings of the ICEESEN2020, Kayseri, Turkey*, 19–21.
- Zincir, B., & Deniz, C. (2021, januari 1). Methanol as a Fuel for Marine Diesel Engines. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0931-2_4

Bijlage A: Handleiding model

In het document dat op de volgende pagina's staat, wordt een handleiding gegeven voor het gebruik van het model. Hiermee kan iemand die het model niet kent het toch gemakkelijk gebruiken.

Retrofit Sleepboten



Welke duurzame oplossing past bij jou?



HET REKENMODEL

Geschikt voor retrofits van sleepboten, vissersschepen en meer.

Bepaalt de technische haalbaarheid van verschillende brandstoffen uit het gewenste vaarprofiel en de beschikbare ruimte. Inclusief kostenindicatie.

Gebaseerd op de nieuwste wetenschappelijke onderzoeken.

1

OPERATIONEEL PROFIEL

Nominaal vermogen voor kruissnelheid, piekvermogen voor topsnelheid, slepen of vissen. PTO voor elektrische systemen aan boord.

Het percentage geeft aan hoeveel het piekvermogen wordt gebruikt.

Kunt u allemaal zelf invullen op basis van uw eigen schip!



2

BESCHIKBARE RUIMTE

Voor een check of alles past.

Houd rekening met loopruimte en constructies! Liever minder vermeld, dan later teleurgesteld!

Motor(en) en generator(en) staan in de machinekamer. Brandstof in tanks of ook in de machinekamer.



MAXIMALE UITSTOOT

4



EXTRA INVOER

Hoeveel motoren aan boord? En met welk toerental?

Een elektromotor hoeft niet even snel te draaien als een verbrandingsmotor.

Aantal cilinders = weinig invloed

2/4-takt = veel invloed

3

Hoeveel mag er uit de schoorsteen van uw schip komen? Kijk naar de wet en uw eigen wensen.

Groene methanol en bio-LNG = geen CO₂!



Retrofit Sleepboten



Welke duurzame oplossing past bij jou?



BELANGRIJKE AANNAMES

Geen marges, dus voeg die zelf in!
Nominaal vermogen = minimaal vermogen
PTO is ook pompen, boegschroef, lieren
PTO is continu in gebruik

Kosten zijn indicatief. Handig voor
vergelijken tussen de systemen.

5

6

TECHNISCHE HAALBAARHEID

Passen de motoren en generatoren?
Past de brandstof of batterijen?
Stoot het niet teveel uit?

Alles samengevat in groen = ja en
rood = nee!



KOSTEN

7

Kapitaalkosten = kosten van de motoren,
generatoren en brandstoftanks.

Brandstofkosten per trip =
tanks/batterijen van leeg naar vol



MAAK EEN KEUZE!

9



8

Kijk welke opties technisch haalbaar zijn.
Kan je die brandstof in de buurt bunkeren?
Is de motor beschikbaar in het juiste vermogen?

En natuurlijk: Wat kost het?



LAAT HET BOUWEN BEGINNEN!

Kies een motor, generator en/of batterij.
Zoek een werf en leg uw plannen uit.
Ga aan de slag!

Geniet van uw verduurzaamde schip!

Bijlage B: Voith-Schneider propeller

Voor een schip is dynamische positionering van groot belang. Hierbij speelt het voortstuwingssysteem een grote rol. Deze moet namelijk snel en accuraat zijn voor een goede positionering. Het systeem is over ontworpen. Dit houdt in dat er meer inputgegevens zijn dan vrijheid. Hierdoor is het makkelijker om snel te kunnen reageren op een onverwachte situatie.

Een voorbeeld van een geschikt systeem is een Voith-Schneider propeller. De Voith-Schneider propeller is een verticale voortstuwer die zich onder het schip bevindt. De voortstuwer bestaat uit een roterende schijf met hieraan vastzittende uitstekende bladen. Zodra de schijf gaat roteren, gaan dus automatisch ook de bladen mee roteren in een cirkel. De spoed van de verticale bladen varieert tijdens het draaien in een oscillerende beweging, waardoor er horizontaal in de juiste richting lift en daarmee voortstuwing ontstaat. De Voith-Schneider Propeller heeft drie variabelen: longitudinale spoed, laterale spoed en rotatiesnelheid. De kracht van de voortstuwing wordt vooral beïnvloedt door de rotatiesnelheid en spoed. De spoedverandering gaat erg snel waardoor een Voith-Schneider Propeller snel voortstuwing en richting kan variëren en dus goed werkt bij manoeuvreren en precisie (Koschorrek e.a., 2017).

Een groot voordeel van een Voith-Schneider propeller is dat er geen roer nodig is om de richting van de voortstuwing te veranderen. Ook wordt de propeller zo geplaatst dat alleen de bladen uit de romp steken. Op deze manier zorgt de roterende schijf niet voor een grotere weerstand en verlaagt het ontbreken van een roer de weerstand zelfs. Verder is het belangrijk dat de propeller in de romp van het schip geïntegreerd wordt zodat de krachten en momenten van de Voith-Schneider propeller overgebracht kunnen worden op de romp.

Het is van belang om te weten hoe de Voith-Schneider propeller aangestuurd wordt. Meestal worden daar dieselmotoren voor gebruikt. De Voith-Schneider propeller heeft een variabele spoed. Hierdoor kan het volledige vermogen van de dieselmotor gebruikt worden. Door de variabele spoed kan de motor dus niet overbelast worden.

Soms wordt de Voith-Schneider propeller ook elektrisch aangestuurd, echter gebeurt dit meestal wanneer er sowieso veel elektrische energie benodigd is aan boord van het schip voor eventueel andere apparatuur. De Voith-Schneider propeller kan aangedreven worden door een driefasige asynchrone motor. Bij gebruik van deze motor is echter ook een start apparaat nodig zoals een star-delta (Voith Turbo Marine, 2005).

Bijlage C: Indicatie van taakverdeling

Wat heeft iedereen gedaan in dit project? Omdat er in dit project veel door individuen samen is gewerkt staan er meerder namen vermeld bij de taken. Ook moet er rekening gehouden worden met het feit dat het een inschatting is van de taakverdeling. In tabel 7.1 is de taakverdeling weergegeven gedurende dit project. Verder heeft bijna altijd iedereen een bijdrage geleverd echter zijn hieronder alleen de hoofdpersonen gemeld. Zo is de literatuur door het gehele hoofdstuk door iedereen een stuk geschreven en opgezocht.

Tabel 7.1: Taakverdeling

Handeling	Uitvoering
Voorwoord, samenvatting, inleiding en conclusie	Mirre en Bart
Excel model methode	Doris en Jochem
Excel model berekeningen	Doris en Jochem
Excel model informatie (hoofdstuk 3)	Mirre, Bart en Floor
Tekst hoofdstuk 2	Doris, Mirre en Bart
Tekst hoofdstuk 3	Floor, Mirre en Bart
Tekst hoofdstuk 4	Doris
Tekst hoofdstuk 5	Floor
Tekst hoofdstuk 6	Doris
Rhino Hull	Floor
Rhino machinekamer	Mirre
Grashopper script	Floor en Jochem
Gegevens Varnebank	Floor en Jochem
Stabiliteitsberekening	Floor
Paper	Mirre en Bart
Eindpresentatie	Doris, Floor en Mirre
Mail contact	Mirre

Bijlage D: Brochure Varnebank

In de bijlage is een brochure toegevoegd. Deze brochure is bij de eindpresentatie uitgedeeld. Verder is dit ontworpen voor de eigenaar.



Verduurzaming is een feit. De toekomst is emissieloze scheepsvaart.



RETROFIT VARNEBANK

Bart van Broekhoven,
Doris van Woensel
Floor Hartjes
Jochem Ribberink
Mirre van 't Riet

Dieselmotor 1975



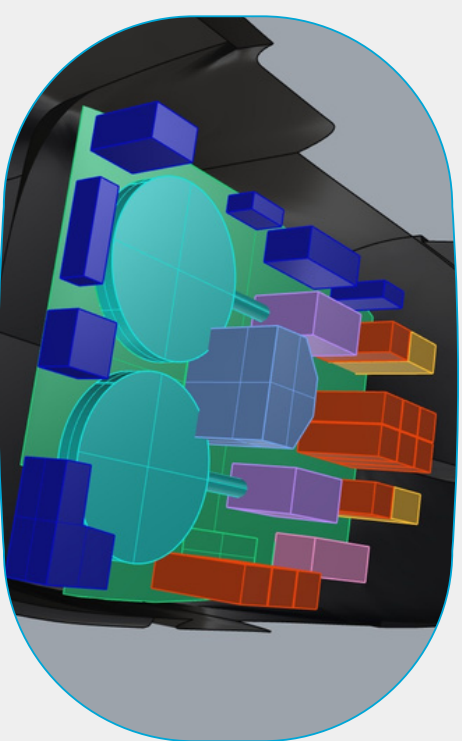
Batterijen 2024

EMISSIELOZE VARNEBANK

Uitstoot Batterij
CO2 0 g/kWh
NOx 0 g/kWh
SOx 0 g/kWh
Fijnstof 0 g/kWh
CO 0 g/kWh

Uitstoot 2023
CO2 1000 g/kWh
NOx 4,235 g/kWh
SOx 0,932 g/kWh
Fijnstof 1,864 g/kWh
CO 0,875 g/kWh

De Varnebank is een oude zeesleper gelegen in Maassluis. Ze is gebouwd in 1975 met twee Voith-Schneider propellers en wordt aangedreven door twee dieselmotoren met elk een vermogen van 1500 kW. De scheepsvaart is bezig met verduurzaming. Volgens IMO moet er voor 2050 een CO2-reductie van 70% worden toegepast op de scheepsvaart. Door de Varnebank te retrofitten kan het schip mee met de toekomst en ook in 2050 nog blijven varen.



1257 kWh
nodig

1862 kWh
Beschikbaar

Operationeel Profiel Varnebank

Dagtochten van 6 uur
Snelheid van 8 knopen
Benodigd vermogen van 180 kW

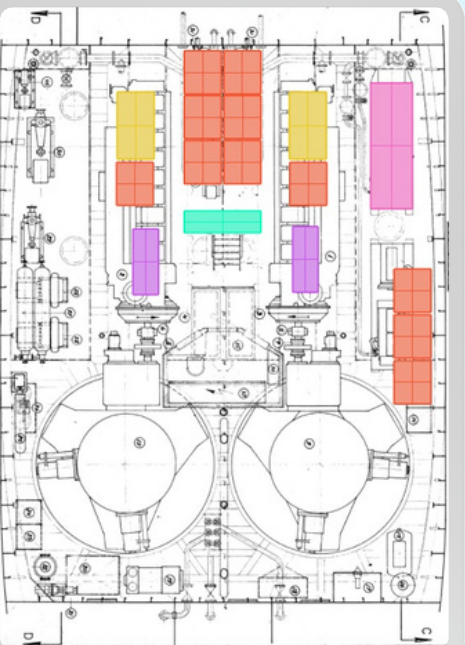


11 VERTICAL PACKS

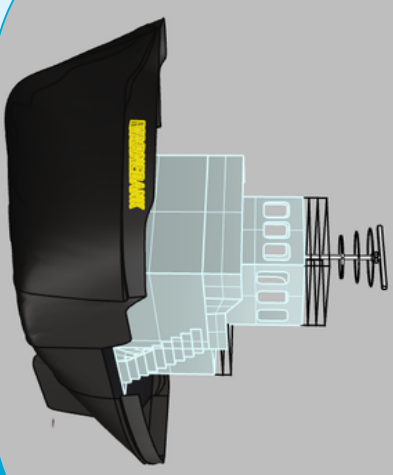
124 kWh
Hoogte 2241 mm
Breedte 865 mm
Diepte 738 mm
Gewicht 1628 kg

2 TALL PACKS

249 kWh
Hoogte 3000 mm
Breedte 1345 mm
Diepte 738 mm
Gewicht 3375 kg



“
Van buiten historische
waarde behouden,
van binnen klaar voor
de toekomst
”



OUDE GM
1,49 m

Nieuwe GM
1,47 m