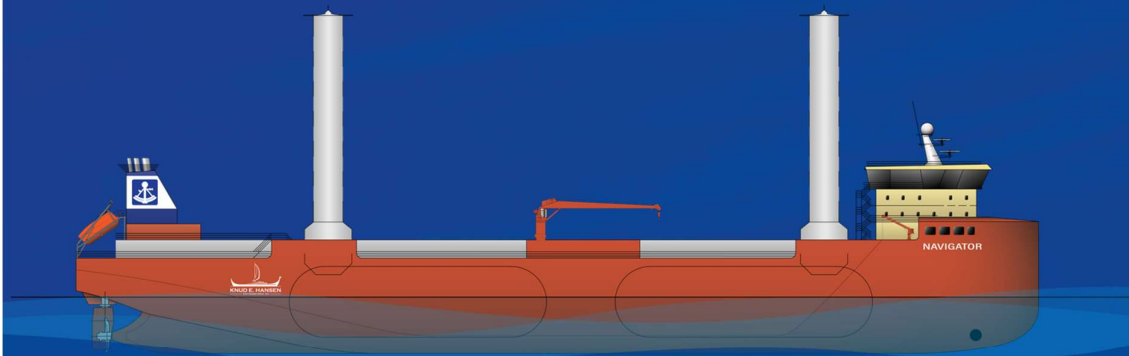


CO₂ Fangst & Lagring

Design af CO₂ carriers

Dan-Unity CO₂ – November 2025



DAN-UNITY CO₂

DEN DANSKE
MARITIME FOND



NAVIGATOR GAS

Indholdsfortegnelse

Indholdsfortegnelse	1
Forord.....	3
Baggrund & Formål.....	4
Resumé	5
Leverance:.....	5
Konklusion.....	6
CO ₂ tanke – tryk, design & materiale.....	7
Lavtryk – low pressure (LP)	8
Medium tryk – mid pressure (MP).....	9
Urenheder	9
Tank Design	11
Tank design – LP.....	14
Tank design – MP.....	18
Tank materiale.....	20
Trykopbygning	21
Skibsdesign – MP	23
Friktion – single & twin skeg.....	24
Fart & Forbrug – single skeg.....	26
Fremdrivning	28
Energi optimering.....	29
Anti-fouling maling.....	30
CO ₂ til køling af apteringen	30
Variabel Frekvens Styring (VFD)	30
Skroglinjer	30
Wind Assisted Propulsion System (WAPS).....	30
Propeller og Ror	33
Luftsmøring - skrog	34
Brændstof- og ruteoptimering/performance system	36
Andre initiativer.....	36
Rules & Regulation: IMO GFI's, FuelEU & EU ETS.....	36
Brændstof review	37
EU ETS (EUA).....	41
IMO GFI's.....	41

EEDI – foreløbig beregninger	42
Letvægtsestimat.....	43
Stabilitet – intakt og lækstabilitet	44
Linjetegning.....	46
Beskrivelse af CO ₂ carrieren	47
Pocket Plan	48
CCS kæde og model.....	49
Forkortelser	51
Appendiks A – LP skibsdesign	53
Appendiks A – 7.500 m ³ LP CO ₂ carrier.....	53
Appendiks A – 12.500 m ³ LP CO ₂ carrier.....	54
Appendiks A – 14.000 m ³ LP CO ₂ carrier.....	55
Appendiks A – 21.000 m ³ LP CO ₂ carrier.....	56
Appendiks A – 22.000 m ³ LP CO ₂ carrier.....	57
Appendiks A – 56.000 m ³ LP CO ₂ carrier.....	58
Appendiks A – 12.500 m ³ LP CO ₂ shuttle carrier for Greensand.....	59
Appendiks B – MP skibsdesign	60
Appendiks B – 24.000 m ³ LP CO ₂ carrier.....	60
Appendiks C – Approval in Principle by ABS: 12.500 m ³ LP and 22.000 m ³ LP	61
Appendiks D – 16.000 MP design: Pocket Plan	64
Appendiks E – 16.000 MP design: scope of work	65
Appendiks F – 16.000 MP design: speed & performance.....	69
Appendiks G - Engine type & layout:	71
Appendiks H – beregning af CO ₂ korrektionsfaktoren for B45 blend.....	92

Forord

Initiativet til denne rapport blev taget tilbage i 2019, hvor Ultragas, det senere Navigator Gas, ønskede at undersøge om CO₂ kunne blive håndteret og fragtet af den eksisterende flåde og dermed grundlægge kimen til et tværindustrielt samarbejde mellem Ultragas, Evergas og Lauritzen Kosan.

Et joint venture mellem Ultragas og Evergas blev dannet ved navn Dan-Unity CO₂, hvis formål var at opbygge kompetencer indenfor håndtering og transport af indfanget CO₂ som last.

Da det stod klart at eksisterende tonnage ikke tilfredsstillende kunne håndtere CO₂ som last var det derfor ganske naturligt at udvikle et nyt CO₂ carrier skibsdesign samt ikke mindst gå i dialog med CO₂ fangstkæden (CCS) herunder emitterer, transportører samt ikke mindst CO₂ lageret om hvad designet skulle kunne.

Det stod klart at CCS vil være en væsentlig del af diverse landes klimamål ikke mindst i Europa og at der i den forbindelse ville være et behov for transport fra emitter til lager både via land og til havs. Dette kunne foregå med større eller mindre mængder samt ved varierende distancer, men ville være en kontinuerlig proces således at en CO₂ carrier vil være en slags sejrende rørledning, som LNG transporten opstod for 30-35 år siden.

Denne rapport er muliggjort under Den Danske Maritime Fonds tilskudsordning, som har til formål at yde økonomisk støtte til initiativer, der medvirker til at fremme dansk skibsfart og maritim industri. Projektet blev afviklet i perioden foråret 2021 til forår 2025 i samarbejde mellem Ultragas (senere Navigator Gas) samt Evergas (senere Seapeak).

Vores arbejde har været offentligt præsenteret ved flere lejligheder:

- *CO₂ – Seaborne Transport – from an owner’s perspective*; Danish SNAME (Skibsteknisk Selskabs Fond) – Copenhagen 23. januar 2023 af C. Manniche
- *CO₂ Shipping & Terminals Conference 2023 - CO₂ carrier design*; London 27. juni 2023 af C. Manniche
- *CCS – Owner’s perspective - part II*; Danish SNAME (Skibsteknisk Selskabs Fond) – Copenhagen 4. november 2024 af C. Manniche
- *CO₂ Shipping & Terminals Conference 2024 – In panel debate*; London 18. juni 2024 ved C. Manniche

Der skal lyde en stor tak og anerkendelse af Den Danske Maritime Fonds formål og arbejde for at muliggøre dette projekt samt at støtte Det Blå Danmark.

Projektgruppen bestod af:

Mihir Navalkar – Seapeak

Ajay Arora – Seapeak

Carsten Manniche – Navigator Gas (forfatter)

Gentofte d. 18. november 2025

Rapporten må citeres med kildeangivelse.

Baggrund & Formål

Projektet omhandlede udarbejdelse af en række CO₂ tank designs, tilhørende rørsystemer og relateret cargo udstyr til ombordlagring og håndtering af en CO₂ lastmængde for flere skibsstørrelser.

Dan-Unity CO₂ ønskede at få klarlagt de tekniske udfordringer og ikke mindst få et overblik over potentielle showstopperer samt deres løsninger og kost for på tiden at udvikle en egentlig nybygningsspecifikation.

Baggrunden for projektet er at forstå og håndtere eventuelle udfordringer i CCS kæden samt sikre at kommende designs lever op til de krav en given CCS kæde byder. Desuden vil der være en behørig fokus på slutprisen per tons CO₂ lagret og skibstransportens bidrag hertil samt CO₂ footprintet for transportdelen. Der blev udviklet en 16.000 m³ CO₂ MP carrier til ruten ARA til Island.

Resumé

I projektets opstartsfasen var der en lidt snæver fokus på optimering af skibsdesignet som en "stand alone" part dels på grund af manglende forståelse for behovet up- og down stream CCS kæden. Dette resulterede blandt andet i en prioritet af transport i lavtryksområdet (LP) tæt på triple punktet (overgang fra tre-fase til to-fase), hvilket gjorde at tankene kunne laves større og dermed holde skibets nybygningspris nede.

Det blev dog klart, at det var nødvendigt at designe skibet ind i CCS kædens behov især med hensyn til energibehov til håndtering og køling, men også for at holde CAPEX nede. Desuden blev det klart, at CCS kæderne ikke var ens og at skibets design skulle skræddersyes dertil, hvilket gjorde CAPEX og til dels OPEX større, men den samlede pris for endelig lagring per tons CO₂ mindre.

Behovet for at samarbejde med de forskellige CCS kædelink især upstream, det vil sige emitterne (cementfabrikker, kraftværker med videre), blev evident især da det norske projekt Northern Light så dagens lys. Her var fokus på mindre skibe af størrelse 7.500 m³ i mellemtryksområdet (MP), hvilket hurtigt blev standarden for en CO₂ carrier især i de mindre segmenter. Derfor ændrede projektets fokus også mod MP.

Projektet endte med at udvikle en række designs af forskellige størrelser og trykområder i samarbejde med tysk-japanske TGE Marine, hvor størrelsen 16.000 m³ CO₂ MP blev genstand for en mere detaljeret designudvikling foretaget af det danske skibskonsulentfirma Knud E. Hansen, hvilket der er redegjort for i detaljer i denne rapport.

Leverance:

Designs – LP:

Sizes: 7.500 m³, 12.500 m³, 12.500 m³ shuttle, 14.000 m³, 21.000 m³, 22.000 m³ & 56.000 m³

Approval in Principle (AiP) ved ABS for 12.500 m³ og 22.000 m³ tidligt i projektfasen.

Designs – MP:

Sizes: 16.000 m³ & 24.000 m³

Detailed design – MP:

Size: 16.000 m³

Dokumenter og tegninger for alle designs:

- Cargo tank Outline Specification
- Cargo Tank drawing
- FEED study report
- General Arrangement Plan
- General Outline specification
- Cargo Handling System
- Outline Specification for cargo system
- Pipe Routing Analysis
- Pressure built-up – time calculation

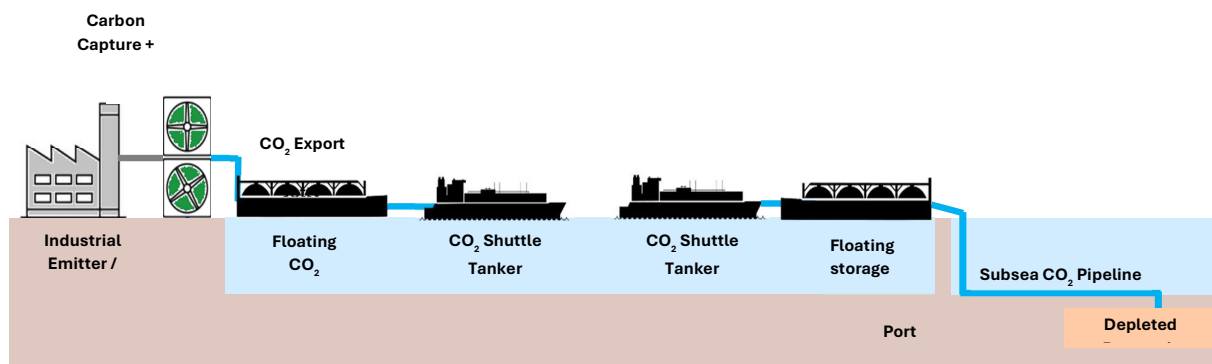
- Approval in Principle – 12.500 m³ & 22.000 m³ LP

Yderligere dokumenter og tegninger for 16.000 m³ MP:

- Lines Plan
- Lightweight Calculation
- Speed & Power
- Propulsion Report
- EEDI Calculations
- CFD Analysis
- Emission Reduction Report
- Intact Stability
- Damaged Stability

Konklusion

CCS forventes at være en hjørnesten i transitionen væk fra fossile brændstoffer og her spiller transporten med skib en vigtig rolle. Transporten med skib kan ske mellem emitter til lagring både off- og on shore eventuelt som vist i nedenstående figur.



Source: Navigator Gas

Projektet tager udgangspunkt i tidligere Navigator Gas undersøgelser af en ombygning af LPG carrier til transport af CO₂, hvilket ikke viste sig at være muligt grundet den næsten dobbelt så høje densitet sammenlignet med almindelige LPG laster.

Derfor valgte Evergas (senere Seapeak) og Ultragas (senere Navigator Gas) at undersøge mulighederne for at designe en passende størrelse CO₂ carrier til det gryende marked. Som eksempel på et marked blev der fokuseret på ARA til Island (Carbfix projektet) med et lavtryksdesign af variende størrelse, da lavtryk ville være mest optimalt for skibetsdesignet alene.

Det blev dog klart at emitterne primært fokuserede på mellemtryk drevet af Northern Light projektet, så det blev besluttet at detail designe et mellemtryks design på 16.000 m³ for Carbfix projektet.

Størrelsen af CO₂ carrieren følger et multiplum af de største CO₂ cylindriske tanke, som kan bygges for det pågældende tryk og er meget afhængigt af tilgængeligt materiale, der fortrinsvist er fremstillet til de lettere LPG laster. 16.000 m³ CO₂ beskrevet herunder er baseret på fire 4.000 m³ cylindriske tanke, da maksimumskapaciteten for mellemtrykstankene i skrivende stund er

netop 4.000 m³. For nuværende er den maksimale tankstørrelse for lavtryk 7.000 m³ og derfor er de nedenstående design blandt andet et multiplum af denne størrelse.

Man kan populært sagt sige at cargo tankene er designet i tråd med CCS kældens mængdekrav og at skibet er designet rundt om tankene dog med respekt for maksimal dybgang, fart og forbrug, manøvredygtighed med videre.

Det forventes at de maksimale tankstørrelser vil stige i takt med at dedikerede materialer samt klasseregler udvikles, dog kan varmbehandlingskravene af de færdigbyggede tanke dog være en begrænsende faktor for tankproducenten.

Der er i samarbejde med ECA Engineering lavet en CCS modelkæde, hvor emitterens behov for transportmængder kan varieres og skibsstørrelsen/tryk kan optimeres baseret på en række input såsom distance, mængde, OPEX, CAPEX, fart, CO₂ footprint med meget mere. Modellen er tilgængelig som app og kan benyttes af alle ved henvendelse til projektgruppen eller direkte til ECA Engineering.

Metanol er valgt som brændstof, da det forventes at være muligt på sigt at bunkre grønt metanol baseret på indfanget CO₂ i Island. Dette vil give en ikke ubetydelig fordel i forbindelse med EU ETS/EUAs samt FuelEU Maritime for ruten mellem Island og ARA. Metanolen er placeret i tanke midtskibs på grund af vægtbalancen, men også på grund af lækstabilitetskrav til separering af lastrummene.

Wind Assisting Propulsion System (WAPS) er blevet undersøgt i detaljen for fire Flettner rotors, men en mere dybdegående undersøgelse skal foretages især vedrørende deres indbyrdes påvirkning af hinanden. Desuden er de opnået besparelser og dermed payback hæmmet af fordelene ved forbruget af grøn metanol i forbindelse med beregning af EUAs og FuelEU Maritime, men selvfølgelig også afhængigt af prisen på metanolen. Skibet er dog vist med fire Flettner rotor.

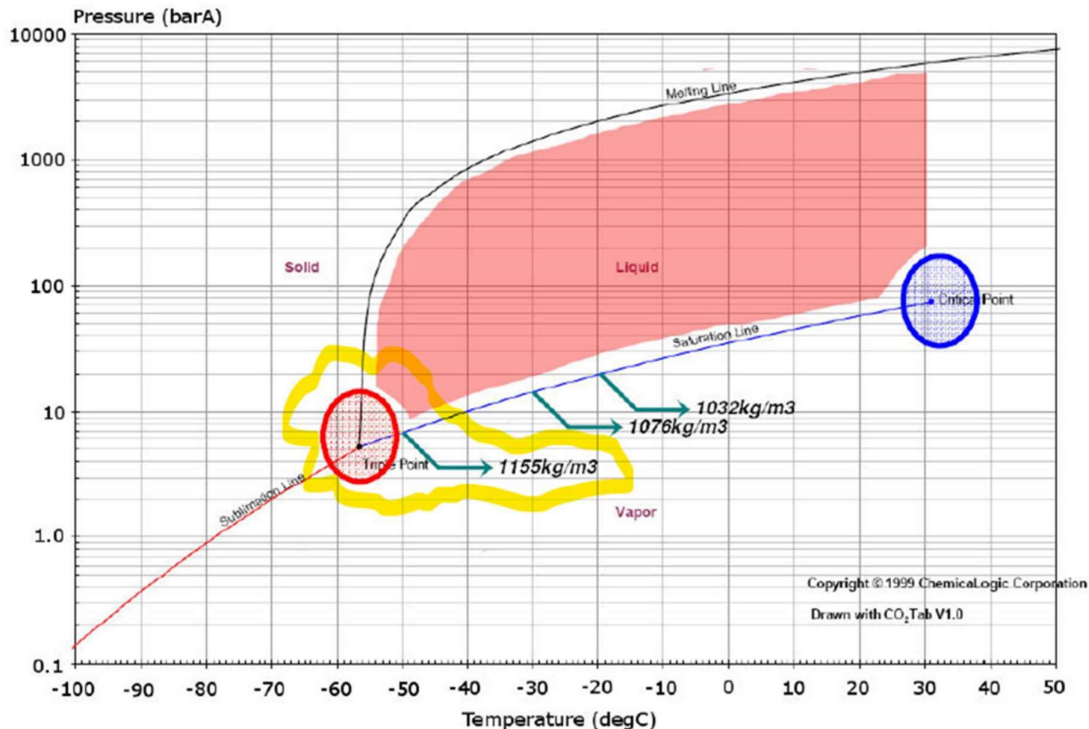
Skibets aptering er flyttet foran i skibet for at give en bedre balance og optimere trimmet. Apteringsplaceringen foran ved operation i Nordsøen og Atlanten kan diskuteres og især accelerationerne ved søgang sammenholdt besætningens velfærd skal undersøges i detaljen.

Skibets fart er relativt høj og afhængigt af den endelige turnus og anløbsfrekvens, men også af nødvendig maskinkraft for operation i farvandet mellem ARA og Island.

CO₂ tanke – tryk, design & materiale

CO₂, som last, er langt tungere end normale laster såsom ammoniak, LPG, butadiene og propan for LPG carriers både under lav- og medium tryk +/- 1100 kg/m³ (se fig. 1), hvor ammoniak er på ca. 680 kg/m³. Dette er en af årsagerne til at transport i eksisterende LPG carrier ville resultere i væsentlige ombygninger såsom installering af ekstra skodder i tankene på grund af sloshing fra delastet CO₂ samt generelle forstærkninger.

Desuden vil CO₂ falde ind under IGC som primært dækker de mere flygtige og lettere laster. Så kombinationen af tungere last og for den ved LP lavere temperatur gør, at de nuværende design og ikke mindst tankmaterialet ikke er optimalt for fragt af CO₂.



ChemiLogic Cooperation

Fig. 1 Fase diagram for ren CO₂

Lavtryk – low pressure (LP)

Transport ved lavtryk ligger lige over triple punktet (se fig. 1) og foregår ved temperaturer mellem ca -55 C° til ca -40 C°, tryk mellem ca 5.8-10 bar og med en massefylde på ca 1170-1120 kg/m³.

Fordelen ved lavtryk er, at tankene kan designes større (større diameter) og dermed færre i antal. Begrænsende faktorer er den maksimale diameter af tanken, maksimal pladetykkelse samt minimum temperatur for materialetesting (-70 C°) for test af den maksimale pladetykkelse samt tankbyggerens faciliteter ikke mindst kravet om varmeefterbehandling af tanken efter samling.

Risikoen ved lavtrykstanke er dannelsen af tøris (der dog ikke udvider sig), så en vis form for sikkerhedsmargin til triple punktet er nødvendigt også for at kunne håndtere eventuelle urenheders indflydelse på afstanden til triplepunktet. Urenheders indflydelse skal dog ikke behandles i denne rapport, men vil have en væsentlig indflydelse på CCS kæden ikke mindst under håndtering af vapor return fra lastning af tanke land- som skibsbaseret.

Desuden skal det større tryk, hvilket er noget over det normale, på tankfundamentet, sadlerne, også vurderes, men dog forventes at kunne håndteres på grund af erfaringerne med LPG tanke af variende format.

Medium tryk – mid pressure (MP)

Transport ved medium tryk har en større margin til triple punktet (se fig. 1) og foregår ved temperaturer mellem ca -33 C° til ca -21 C°, tryk mellem ca 14-19 bar og med en massefylde på ca 1070-1040 kg/m³.

Fordelen ved mediumtryk er at tankene og tilhørende systemer har større margin til triplepunktet og dermed risikoen for opbygning af tøris, men på grund af det relative højere tryk dog kun kan bygges med mindre diameter og dermed flere tanke til den samme lastmængde.

Medium tryk har længe været i fokus for projekter med transport i mindre skibe og på kortere distancer såsom for Northern Light, mens det forventes at fokus på lavtryk og dermed større skibe vil stige især for projekter i Asien, men også for projekter ud af EU f.eks til Island.

Under vores samtaler med upstream emitters har spørgsmålet ofte været, hvilket tryk vi, som redere, ønskede at modtage den indfagne CO₂ i. Det har åbnet en debat om, hvad emitteren forventede det mest optimale tryk og temperatur ville være for emitterens fangst, transport og mellemlagring indtil lastet i skibet, hvilket ikke altid har været klart for emitteren.

CO₂ tankene ombord på skibet kan efter vores mening med fordel bygges i et område fra lav- til mediumtryk, der favoriserer og optimere upstream udgiften for indfangning, transport (fortrinsvis rør) og ikke mindst lagring på kajen. Så tanktryk og temperatur behøver ikke være enten lavtryk eller medium tryk, men kan også være et niveau midt imellem.

Transport af CO₂ under højt tryk, der foregår ved temperaturer over +5 C°, tryk over 40 bar og med en massefylde på ca 900 kg/m³ eller mindre, behandles ikke i denne rapport. Det kan dog nævnes at specielt ved endelig lagring i undergrunden på land, som på vand, kan CO₂ med fordel modtages ved højt tryk, da det skal trykkes op inden nedpumpning (med temperatur øgning til følge) i undergrunden ved +200 bars tryk.

Urenheder

Det er ikke dennes rapports formål at beskrive og håndtere effekten af urenheder i CO₂, men da urenheder kan have en større indflydelse på CCS kæden, vil vi kort redegøre for vores betragtninger.

Urenheder har indflydelse på de termodynamiske, fysiske og kemiske værdier i CO₂ strømmen. Det er dog usikkert i hvor stor grad indflydelsen er, men der er ingen tvivl om at især for LP, vil type og mængde af urenheder udgøre en risiko. Da antallet af urenheder kan være relativt store, deres indflydelse på hinanden og ikke mindst placeringen af triplepunktet/fasen ukendt og med mange variable, foregår der forskning samt standardiseringsarbejde på området. Usikkerheden omkring konsekvenser af indhold af urenheder gør at nuværende CCS projekter såsom Northern Light arbejder med en CO₂ specifikation af høj renhed, hvilket er forståeligt, men som også forventelig vil have en negativ effekt på kost per lagret CO₂.

Det skal også nævnes, at der normalt er en lille rest last tilbage i tankene såkaldt *heel* efter losning, der vil indeholde en større mængde urenheder. Mængderne af urenhederne vil stige efter flere last/losning cycles, hvilket tilsidst vil skabe et forhold udover designværdierne for tanken. Derfor har vi fundet, at håndteringen af vapor return er yderst vigtig for CCS kædens funktionalitet og ikke blot for skibet.

Urenheder kan dårligt undgås i indfanget CO₂ og da der for nuværende ikke forligger en egentlig standard for niveauet af urenheder, er CO₂ tankene designet for ren CO₂.

Det har på det seneste været normen at benytte Northern Light specificationen for urenheder, men også andre projektdefineret specifikationer er i spil. Det er klart, at der er behov for en egentlig fælles standard, men også at een standard kan have uheldig indflydelse på CCS kæden alt efter kilden til den indfanget CO₂ samt den endelig transport, opbevaring og lagringsmetode.

Vores tankdesign er beregnet på ren CO₂, men vi har inkluderet følgende sammensætning af urenheder i vores betragtninger af deres effekt på tankdesignet se fig 2.

Component	Concentration, ppm (mol)
Water, H ₂ O	≤ 30
Oxygen, O ₂	≤ 10
Sulphur oxides, SO _x	≤ 10
Nitric oxide/Nitrogen dioxide, NO _x	≤ 10
Hydrogen sulphide, H ₂ S	≤ 9
Carbon monoxide, CO	≤ 100
Amine	≤ 10
Ammonia, NH ₃	≤ 10
Hydrogen, H ₂	≤ 50
Formaldehyde	≤ 20
Acetaldehyde	≤ 20
Mercury, Hg	≤ 0.03
Cadmium, Cd Thallium, Tl	≤ 0.03 (sum)

Kilde: TGE Marine

Fig. 2 Sammensætning af urenheder af indfanget CO₂

Da CO₂ normalt kommer fra forbrænding eller cementproduktion, vil en antal gasser med lavt kogepunkt såsom nitrogen, ilt, metan og argon vil være til stede i det indfanget CO₂ og som skal håndteres undervejs i CCS kæden. Effekten af disse gasser på cargo tank designet vil hovedsageligt være et højere tryk. Som eksempel kan bruges nitrogen, der vil øge trykket væsentlig ved selv relativ små mængder – se nedenstående figur 3.

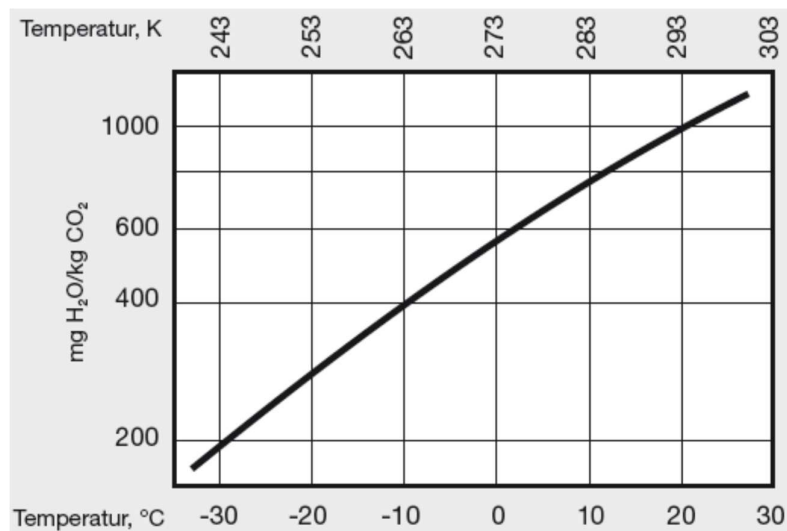
Boiling pressure at -55 °C	
% mole N ₂ in liquid	Pressure bar a
0,0	5,5
0,1	6,3
0,2	7,1
0,3	7,9
0,4	8,6
0,5	9,4
1,0	13,2
1,5	16,9
2,0	20,6

Kilde: TGE Marine

Fig. 3 Kogepunktstryk af CO₂/N₂ mix

Som det kan ses, vil en tank med MARVS på 7.5 barg kunne håndtere et N₂ indhold på op til cirka 0,2% mol i væsken før sikkerhedsventilerne vil løfte sig og dampene ventileres.

Frit vand vil ligeledes være et biprodukt fra indfangning af CO₂, der bestemt ikke ønskes i CCS kæden grundet risikoen for en hurtigt reagerende korrosion og som derfor skal fjernes, hvilket kan ske på flere måder i kæden. Det vil være nødvendigt at fjerne vand allerede inden den landbaseret transport og lagring, men der er en usikkerhed i til hvilket niveau. Opløseligheden af vand i CO₂ afhænger af temperatur og tryk samt ikke mindst indholdet af gasser såsom ilt, nitrogen og metan, der vil nedsætte opløseligheden markant. Vands indhold i ren CO₂ er ca. 80 ppm (masse) og 200 ppm (mole) ved -50 C°.



Kilde: TGE Marine

Fig. 4 Vands opløselighed i ren CO₂

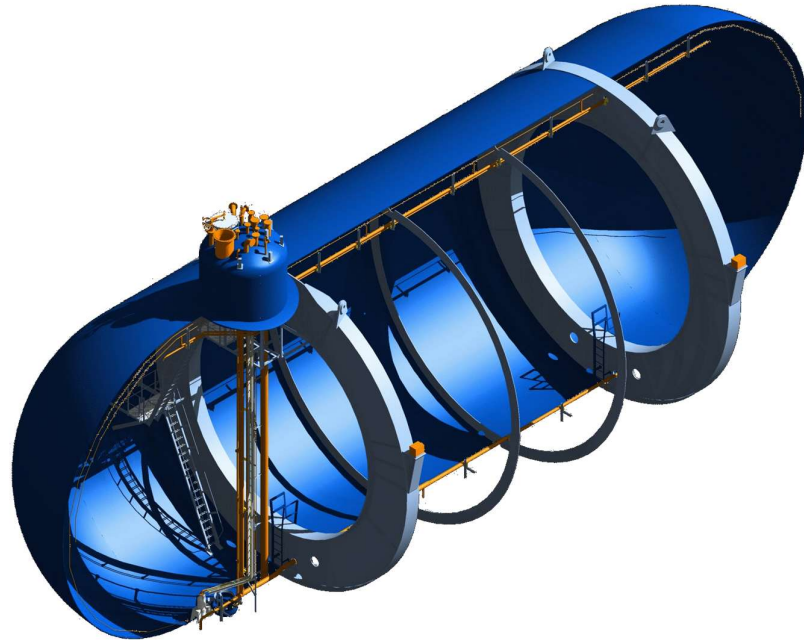
Som det dog kan ses fra den benyttede specifikation (fig.4) vil kravet til de < 30 ppm mol i den indfanget CO₂ måske kunne opfyldes alt afhængigt af indholdet af urenheder, da der er nogen margin til de 200 ppm mole ved en temperatur på -50 C°.

Tank Design

Gasser under lav- og medium tryk er normalt transporteret i så kaldte type A, B, C eller membran tanke, der hver har deres fordele.

Da CO₂ skal transporteres i flydende form ved minimum cirka 5.3 bar, er det for nuværende kun type C tanke, der er relevante.

De findes som cylinder-, bilope- eller trilope tanke se fig 5-7. Bi- og trilope tanke er primært bygget for at kunne udfylde skibets volumen for lettere laster, hvorimod CO₂ tanke har mere behov for opdrift grundet den højere densitet/vægt af CO₂ end plads i lastrummet.



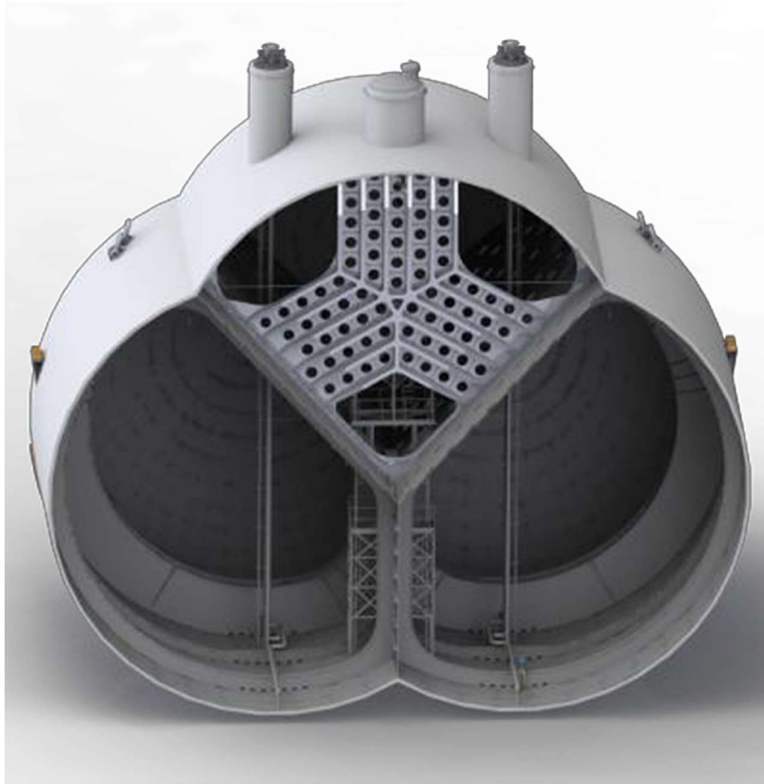
Kilde: TGE Marine

Fig 5 Cylinder cargo tank type C



Kilde: TGE Marine

Fig 6 Bilope cargo tank type C



Kilde: AC-INOX

Fig 7 Trilobe cargo tank type C

Da CO₂ er næste dobbelt så stor tung som ammoniak, er det kun den cylindriske type C tank, der er relevant for transport af CO₂. Vores beregninger viser i øvrigt, at bilope tanke vil bestå af 15% mere stål end for cylindriske tanke ikke mindst på grund af centerskoddets tunge design.

Tankene vil dog generelt være tungere på grund af den stærkere struktur, men ellers ikke være så markant anderledes end normale LPG/ammoniak type C tanke. Dog vil den relative lave temperatur samt høje tryk, både for LP & MP, have indflydelse på konstruktionen af tankene, hvilket erfaringer har vist.

Specielt varmebehandlingen af tankene efter sammensvejsning har vist sig at være en udfordring for produktionen, så det anbefales at designet og dermed størrelsen af tankene tager hensyn til, hvor tankene skal bygges og deres produktionsfaciliteter.

CO₂ cargo tankenes design er vigtig for designet af skibet, da skibet som sådan designes rundt om tankene med den nødvendige kapacitet. Så tankenes design har indirekte indflydelse på skibet skrogefremdrivnings performance samt CO₂ fodaftrykket af transportdelen.

I starten af projektet viste beregninger af maksimal lastkapacitet for LP tankene var på cirka 3.000-3.500 m³/tank, men endte på cirka 6.250 m³/tank ved brug af de normale materialer til rådighed (5% nikkel lav temperatur stål). Dette betød at vi besluttede os for at inkludere et 12.500 m³ skibsdesign i vores undersøgelse.

Det forventes at i takt med udvikling af materialer, mere rettet på transporten af CO₂ under lavere temperatur og højere tryk/densitet end LPG/ammoniak laster, vil betyde at maksimal

kapacitet af lavtrykstanke vil øges til over 10.000 m³ per tank i de kommende år. Dette vil selvfølgelig have en positiv effekt på den endelige kostpris for at lagre indfanget CO₂.

For MP tanke endte den maksimale tank kapacitet på 4.000 m³ for dette projekt, men også her forventes det at maksimumkapaciteten vil blive øget i takt med udviklingen af tankmateriale for CO₂.

Tank design – LP

Som tidligere beskrevet er det mest kosteffektive tankdesign og dermed skibsdesign for transport af indfanget CO₂ LP.

Derfor valgte vi i første omgang at fokusere på LP i størrelserne 7.500 m³, 9.500 m³ (senere øget til 12.500 m³), 22.000 m³ og 50.000 m³. Da LP tankstørrelserne øges fra de oprindelige 5.500 m³ til 6.250 m³ ville et 22.000 m³ design ændres til 25.000 m³, men undervejs blev det muligt ved detaljeret og direkte beregninger at forøge LP tankstørrelsen yderligere til 7.000 m³ per tank.

Dette gjorde, at yderligere skibsdesigns blev undersøgt for en henholdsvis 2, 3 (i række) og 8 (i par) tankversion, det vil sige i 14.000 m³, 21.000 m³ og 56.000 m³.

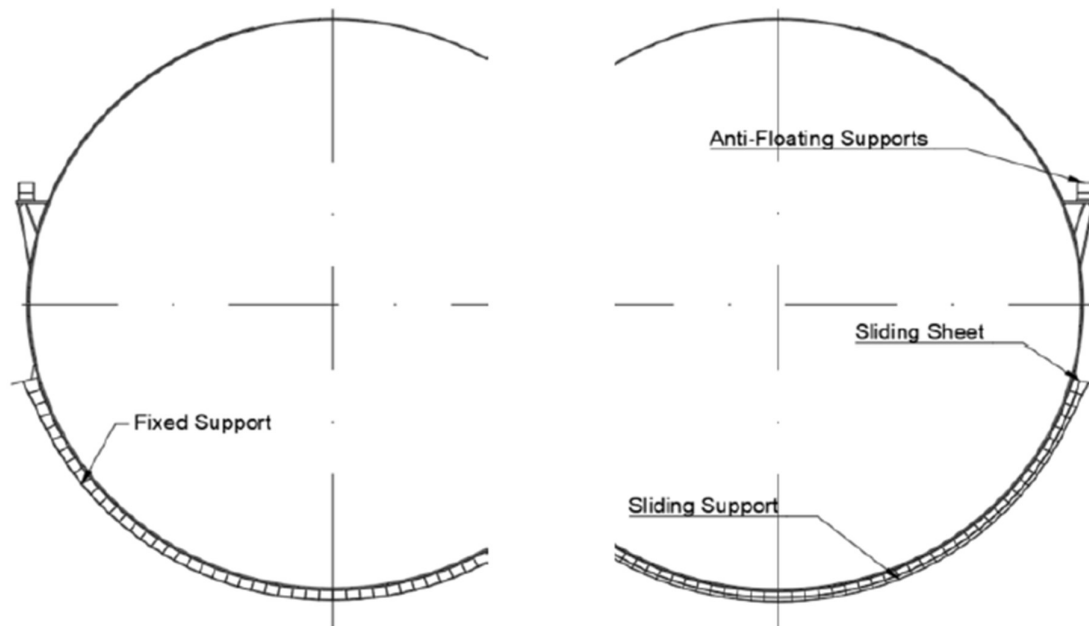
I skrivende stund ser det ud til at LP tanke med de rette materialer kan forøges til over 10.000 m³, hvilket vil have en indflydelse på valgte størrelser for dette studie.

Vi valgte dog at fokusere på ovennævnte størrelser med sigte på følgende markeder: 7.500 m³ for intra-Europe, 14.000 m³ for intra-Europa + vestlige Middelhav, 21.000 m³ for Europa til Island og endelig 56.000 m³ til international operation. Især 21.000 m³ var skræddersyet til Island og Carbfix lagringsprojektet og 7.500 m³ samt 12.500 m³ blev tillige lavet i en shuttle løsning med losning via bov til bølge beregnet for Greensand projektet.

Efter flere optimeringer af den maksimale tankstørrelse endte vi på 7.000 m³ per LP tank med følgende data:

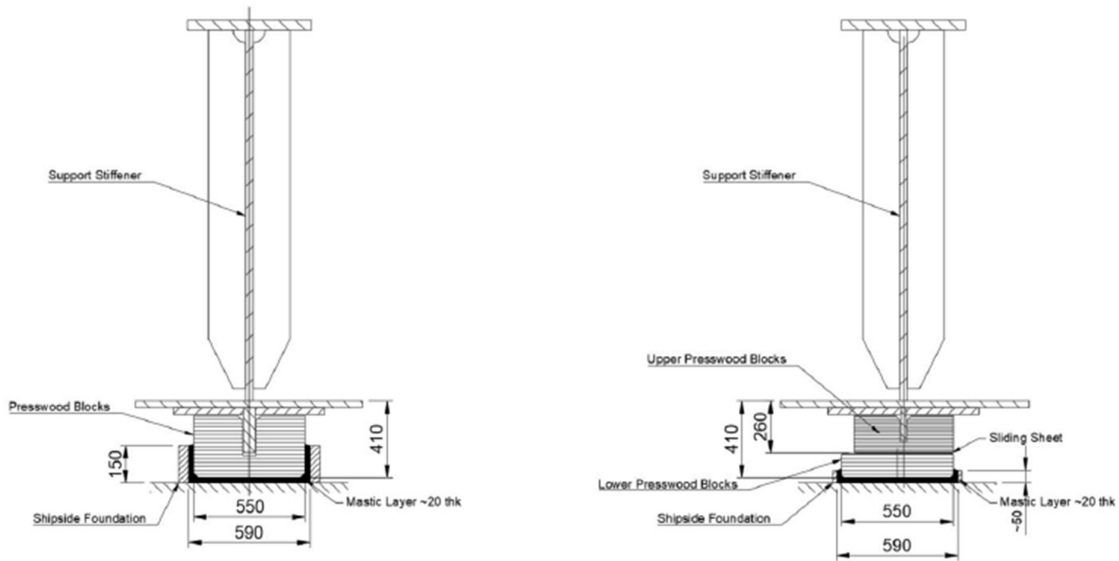
Tank type:		Cylindrical, horizontal
Type of heads:		Hemispherical (fore and aft)
Diameter:	[mm]	16000 mm
Length:	[mm]	41000 mm
Distance of supports:	[mm]	20300 mm
Capacity per tank:	[m ³]	7000 m ³ (excl. dome)
Design internal pressure	[bar(g)]	8.3
Design external pressure	[bar(g)]	0.3
Design density of CO ₂	[kg/m ³]	1172
Min. design temperature	[°C]	-55
Max. design temperature	[°C]	+45
Design life	[years]	20

Type of insulation:	PU Spray foam with mechanical protection cover
Nominal thickness:	300 mm
Overall thermal conductivity (approx.):	0.095 W/m ² K
Nominal heat ingress:	21 kW per tank at max. design temperature
Insulation surface:	2194 m ³ per tank
Thickness of cylindrical shell:	40 ... 50 mm
Thickness of hemispherical heads:	20 ... 30 mm
Approximate installation weight:	900 t per tank



Kilde: TGE Marine

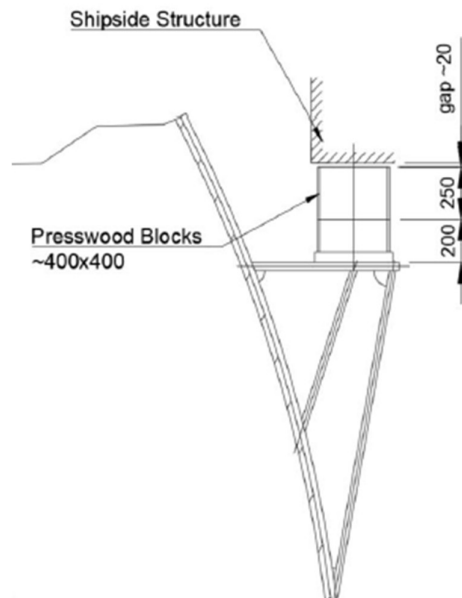
Fig 7a Typisk tværsnit af en cylindrisk C-type tank



Kilde: TGE Marine

Fig 8 Typisk sadel konstruktioner: fast sadel support til venstre og bevægelig til højre.

I sig selv en temmelig stor tank, men sadeltrykket var acceptabelt efter nærmere beregninger foretaget af TGE Marine, hvilket dog skal verificeres i et fremtidigt studie. I øvrigt skal det bemærkes, at det af simple grunde ikke er muligt at aflaste to sadler med en tredje, da det kun vil være to sadler, der bærer ad gangen. Til information benyttes en speciel presset trækomposit til vægtoverførelse, da kunstmateriale indtil videre ikke har vist sig at være egnet.



Kilde: TGE Marine

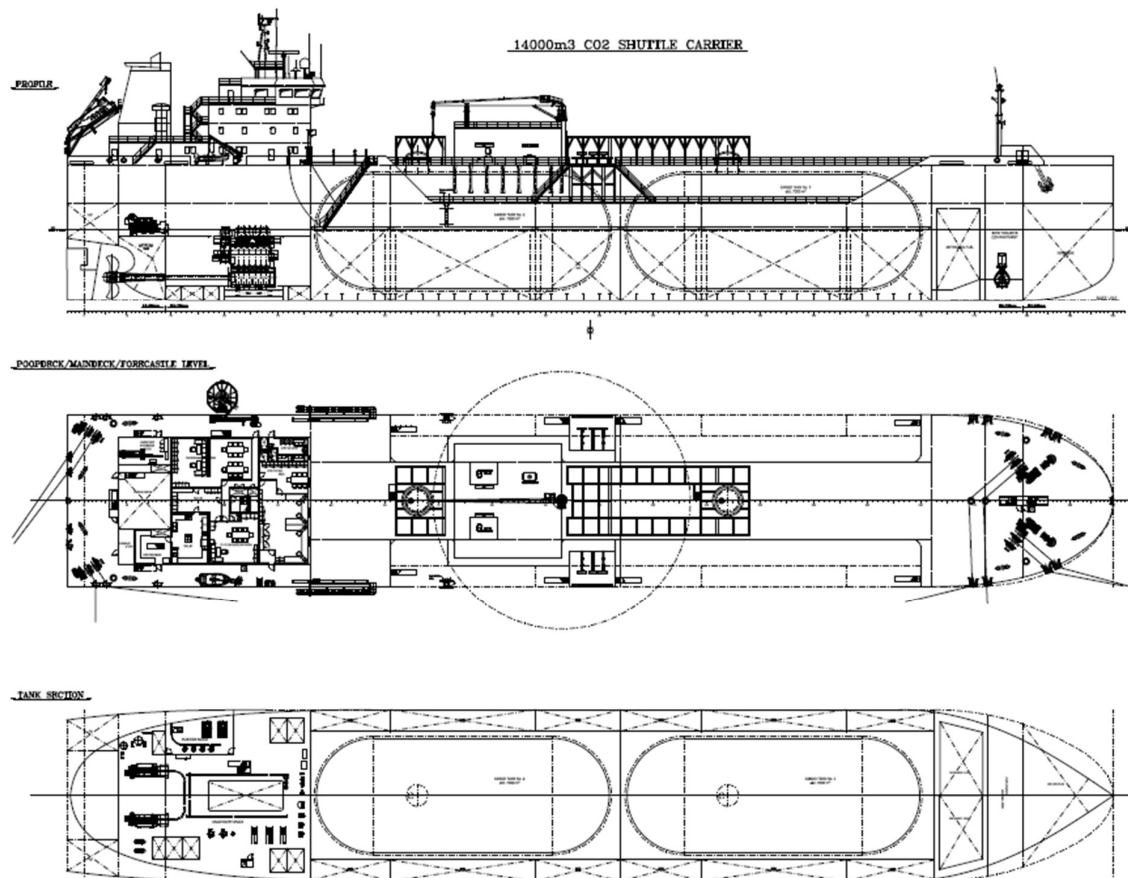
Fig 9 Typisk anti-floating stopper

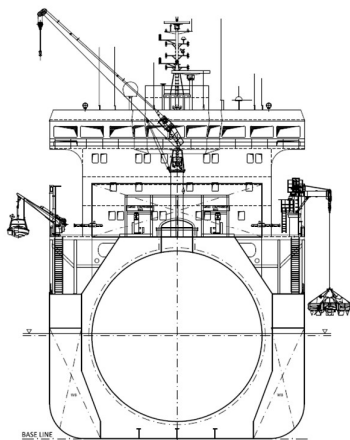
Tanken er tillige etableret med såkaldte anti-floating foranstaltninger, der hindrer tanken i en lodret bevægelse så en løst stående tank ikke skyder igennem vejrdækket, hvis lastrummet fyldes ved et uheld.

Ovennævnte tank designs er baseret på en 14.000 m³ skib med følgende mål:

Scantling length L_0	[m]	144.15
Greatest moulded breadth B	[m]	24.00
Draught T	[m]	9.90
Speed v	[kn]	13.50
Block coefficient c_B	[-]	0.752
Longitudinal distance x	[m]	25
Transversal distance y	[m]	0
Vertical distance z	[m]	-0.2

Som tidligere nævnt blev skibet designet omkring de 2 x 7.000 m³ tanke og den første runde i design spiralen frembragte følgende skib:





Principal particulars

Length over all	abt. 146.80 m
Length between perpendiculars	144.15 m
Breadth moulded	24.00 m
Depth to maindeck	13.60 m
Cargo tank capacity (100 %)	abt. 14 000 m ³
Draught (design)	abt. 9.70 m
Corresp. deadweight all told	18 200 t
Draught (scantl.)	abt. 9.90 m
Corresp. deadweight all told	18 600 t
Service speed at design draught	abt. 13.50 kn

Yderligere materiale for 7.500 m³, 12.500 m³, 21.000 m³, 22.000 m³ og 56.000 m³ kan studeres i appendiks A.

Tank design – MP

MP tanke var oprindelig ikke en del af vores undersøgelser, da fokus var på at optimere skibsdesignet fra et kostperspektiv, men da flere projekter i EU, herunder ikke mindst Northern Light, fokuserede på transport ved MP, valgte vi også at undersøge denne mulighed.

TGE Marine undersøgte mulighederne for at øge de maksimale 2.500 m³ per MP tank, hvilket viste sig muligt først til de 3.750 m³, som for Northern Light skibene og senere til maksimalt 4.000 m³. Det var ikke mindst accepten af den øget last på sadlerne, der gjorde tankene kapacitet større, da længden af tanken øgedes til over 40 m. Det er dog nødvendigt at efterprøve den øget sadelbelastning ved en detaljeret beregning med passende sikkerhedsmargin, hvilket er særdeles vigtig, da det har indflydelse på tankens kapacitet og dermed skibets størrelse.

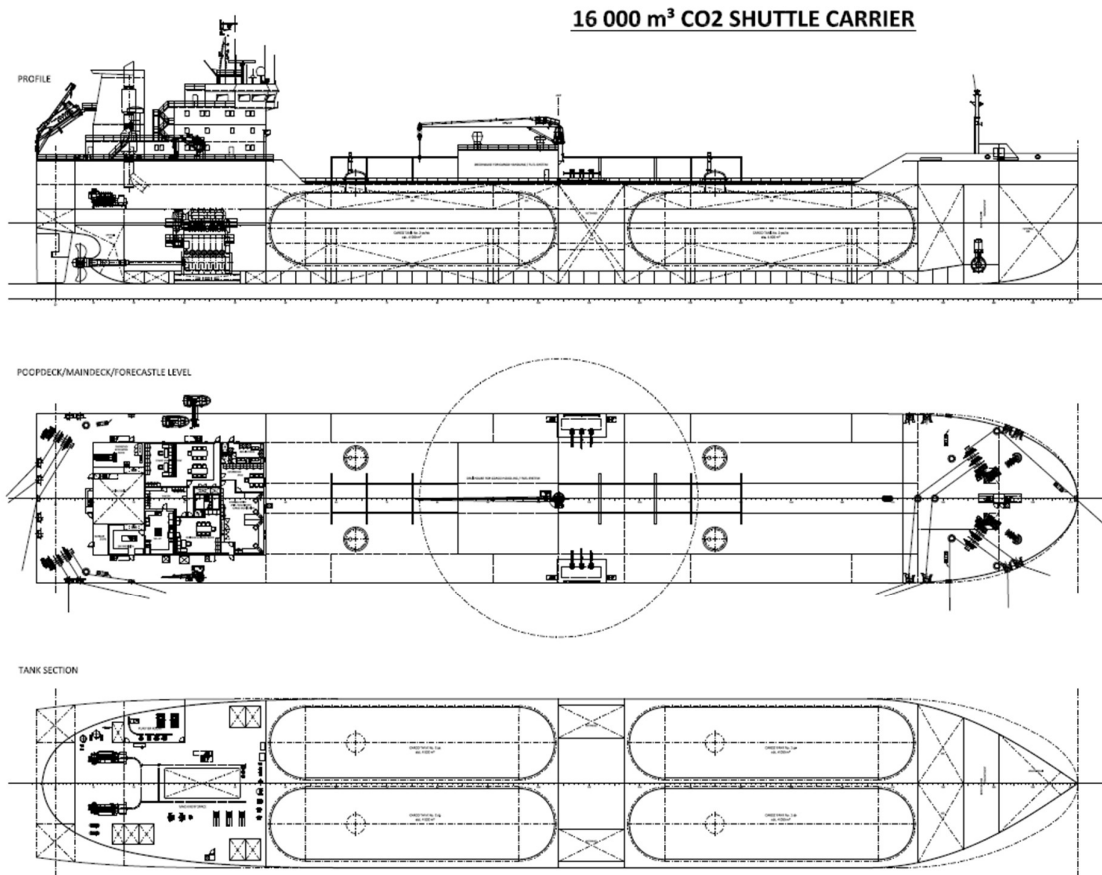
Det forventes over tid at den maksimale kapacitet per tank vil stige til over 5.000 m³ især, når mere skræddersyet materiale er i handlen. Dog afhænger det også af modstandsdygtigheden af sadlerne som nævnt.

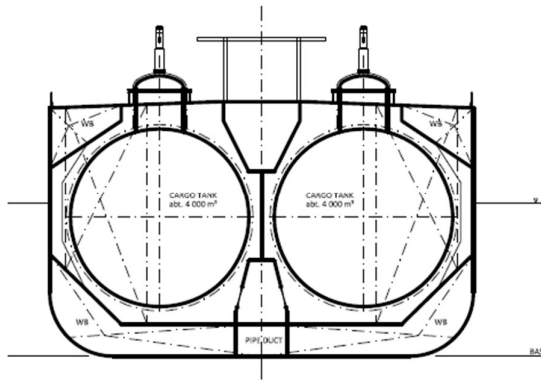
Materialet for de benyttede 4.000 m³ tanke er det tilgængelige P690QL2 og skibsstørrelserne et multiplum af 4.000 m³ cylindriske tanke, det vil sige 16.000 m³ (par) og 24.000 m³ (par).

Tank type:		Cylindrical, horizontal
Type of heads:		Hemispherical (fore and aft)
Diameter:	[mm]	11200 mm
Length:	[mm]	45000 mm
Distance of supports:	[mm]	25600 mm
Capacity per tank:	[m ³]	4000 m ³ (excl. dome)
Design internal pressure	[bar(g)]	19.0
Design external pressure	[bar(g)]	0.3
Design density of CO ₂	[kg/m ³]	1100
Min. design temperature	[°C]	-35
Max. design temperature	[°C]	+45
Design life	[years]	20

Type of insulation:	PU Spray foam with mechanical protection cover
Nominal thickness:	250 mm
Overall thermal conductivity (approx.):	0.115 W/m ² K
Nominal heat ingress:	16 kW per tank at max. design temperature
Insulation surface:	1704 m ³ per tank
Thickness of cylindrical shell:	40 ... 50 mm
Thickness of hemispherical heads:	20 ... 25 mm
Approximate installation weight:	653 t per tank

Som det kan ses fra ovenstående, er den maksimale plade tykkelse på 50 mm grundet det høje tryk, mens diameteren er reduceret i forhold til LP tankene. Vi valgte at fokusere på 16.000 m³, da det gryende CCS marked ikke mindst i UK pegede mod større skibe end Northern Light. Dog var 16.000 m³ måske i underkanten af det optimale for Island og Carbfix projektet på grund af OPEX herunder brændstofforbruget.





Principal particulars

Length over all	abt. 164.80 m
Length between perpendiculars	161.70 m
Breadth moulded	26.60 m
Depth to maindeck	15.60 m
Cargo tank capacity (100 %)	abt. 16 000 m ³
Draught (design)	abt. 9.30 m
Corresp. deadweight all told	20 500 t
Draught (scantl.)	abt. 9.60 m
Corresp. deadweight all told	21 700 t
Service speed at design draught	abt. 15.50 kn

Som det kan ses på opstalten, er lastrummene adskilt af brændstoftanke/void, hvilket er nødvendigt grundet skibet er specificeret til at kunne overleve en et-rumsskade af et lastrum og tilstødende rum. Måske et lidt hårdt krav, men da skibet er enkeltskroget i et stykke af den vertikale side og lasten næste dobbelt så tung end normale gas laster, valgte vi af sikkerhedsgrunde at stille øget krav til overlevelse. Kravet gør skibet længere og dermed dyrere dog uden at vide hvor meget dyrere.

Yderligere materiale for 24.000 m³ MP kan studeres i appendiks B.

Tank materiale

Cargo tank størrelsen er en funktion af diameteren, maksimale tryk og pladetykkelse og materialesammensætningen. Jo højere materialestyrke des tykkere pladetykkelse og større tryk, hvilket dog har en negativ indflydelse på slagsejheden under de lave design- og test temperaturer. Den lave slagsejhedstesttemperatur gør designprocessen kompliceret, da direkte beregning/godkendelse muligvis er nødvendige; en proces der tager tid.

Brugen af højstyrkestål og dermed større diameter har også en indflydelse på materialets fatigue life, hvilket man skal være opmærksom på ved detaljedesign af tanken.

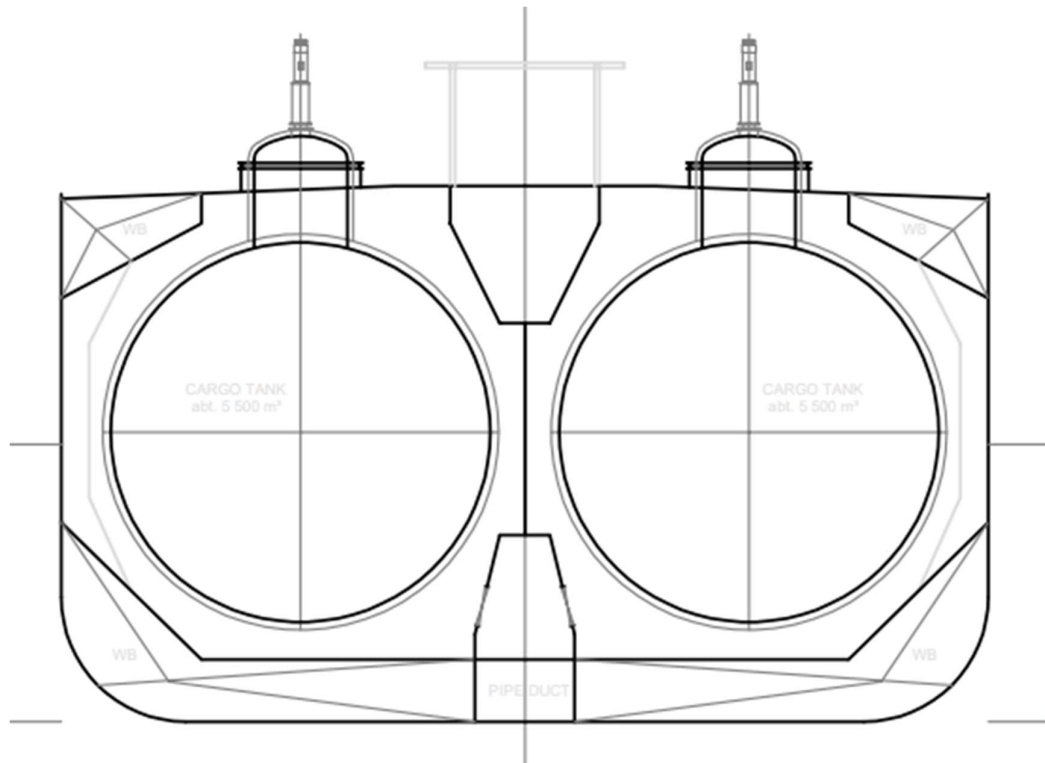
Det er muligt at bygge CO₂ tanke af materiale med en sammensætning, som ikke er nævnt i IGC, hvilket flere stålmøller er i gang med.

Blandt andet har det østrigske firma Voelstalpine de sidste par år arbejdet med udvikling af materialer designet for CO₂ MP tanke, der skal erstatte de tidligere såkaldte 5% nikkel 690 MPa (yield) materiale med en design temperatur på kun -10 C°. Produktet F550 TMCP Toughcore, godkendt af Klassen, har en design temperatur ned til -40 C° og kan leveres i tykkelser op til 60 mm. F550 (Mpa) TMCP Toughcore har et lavt indhold af nikkel <1% og muligvis billigere at fremstille end normalt 5% nikkel stål.

Voelstalpine arbejder på at udvikle et materiale mere rettet mod LP tanke kaldet F460+ TMCP Toughcore, men har dog ikke modtaget de endelige Klasse godkendelser. Dette forventes dog inden længe. Asiatiske stålmøller arbejder ligeledes på materialer bedre rettet mod CO₂ MP & LP tanke, så det forventes at konstruktionen af tankene kommer væsentlig ned i pris i fremtiden.

Som tidligere nævnt var projektets fokus i starten fokuseret på LP tanke, hvor samarbejdet med TGE Marine udviklede sig til større og større LP tanke, hvilket også gjaldt for MP tanke.

Udviklingen i størrelsen for MP tanke var fra 2.500 m³ til 4.000 m³ per tanke, hvilket også udviklede størrelsen af skibet da det var et multiplum af den maksimale tankstørrelse. Det vil sige 7.500 m³ design bestod i starten af 3 x 2.500 m³ tanke for senere at bestå af 2 x 3.750 m³ tanke. Ligeledes bestod det endelige 16.000 m³ design af 4 x 4.000 m³ tanke (par) som principielt vist i figur 10 herunder.



Kilde: Dan-Unity CO2

Fig. 10 Typisk arrangement af to cylindriske CO₂ tanke i par

Udviklingen for LP tanke startede med 3.750 m³ og endte i 7.000 m³ tanke, hvilket muligvis vil blive øget med de nye materialer, som nævnt tidligere. Dog skal der være opmærksomhed på den øget last på saddelfundamentet.

Trykopbygning

Trykopbygningen som funktion af tid blev for LP og MP undersøgt for ren CO₂ også selvom urenheder vil rykke ved beregningerne. Det blev dog skønnet at urenhederne, som nævnt tidligere, ikke havde en større indflydelse på holdetiden, men at der bør indbygges en tidsmargin for en sikkerheds skyld.

For LP tankene (-55 C°) blev det kritiske tryk for ren CO₂ sat til 4,18 barg som nedre grænse og 7,5 barg for sikkerhedsventilerne, mens for MP tankene (-35 C°) blev det kritiske tryk for ren CO₂ sat til 11 barg som nedre grænse og 19 barg for sikkerhedsventilerne. De maksimale fyldningsgrænser blev sat til følgende – se fig 11.

MARVS [barg]	max. loading limit [%]	approx. Mass
7,5	94,3	7,500m ³ : 8 kt; 12,500m ³ : 14 kt; 22,000 m ³ : 24 kt; 50,000 m ³ : 56 kt;
8,3	93,4	14,000m ³ : 15 kt; 21,000m ³ : 23 kt; 56,000 m ³ : 61,5 kt;
19	91,2	16,000 m ³ : 16000 t; 24,000 m ³ : 24 kt

Fig. 11 Maksimale tankfyldningsværdier

Der er i tankstyrkeberegningerne ikke taget hensyn til sloshing ved de lavere fyldninger, da det ikke forventes at have en indflydelse, men det skal dog vurderes nøjere ved endelig design.

bar a	°C
5,2	-56,5
6,0	-53,1
7,0	-49,4
8,0	-46,0
9,0	-42,9
12,0	-35,1
20,0	-19,5

Fig. 12 Damptryks værdier til beregning af trykopbygningen

Omgivelsernes temperatur til beregningerne var på 32 C° for søvand, maksimal lufttemperatur på 45 C° med en gennemsnitstemperatur på 25 C°.

Cargo Tank Data			12,500 m ³		14,000 m ³		16,000 m ³	
			7,500 m ³	50,000 m ³	22,000 m ³	21,000 m ³	56,000 m ³	24,000 m ³
Tank volume	V	m ³	3750	6250	5500	7000	4000	
Tank surface	A	m ²	1513	1967	2112	2194	1699	
Tank weight	m	t	555	790	745	920	585	
k value of insulation	k	W/m ² /K	0,131	0,100	0,121	0,095	0,114	
MARVS	-	bar g	7,5	7,5	7,5	8,3	19	
No. of tanks	-	-	2	2 / 8	4	2 / 3 / 8	4 / 6	

Fig. 13 Cargo tank data - oversigt

Isoleringen af tankene svingede mellem 250-300 mm PU skum afhængigt af tankstørrelse og den generelle lange holdetid var slående – se fig 14. Nedenstående figur viser holdetiden for en 3.750 m³, hvilket er den korteste tid af alle.

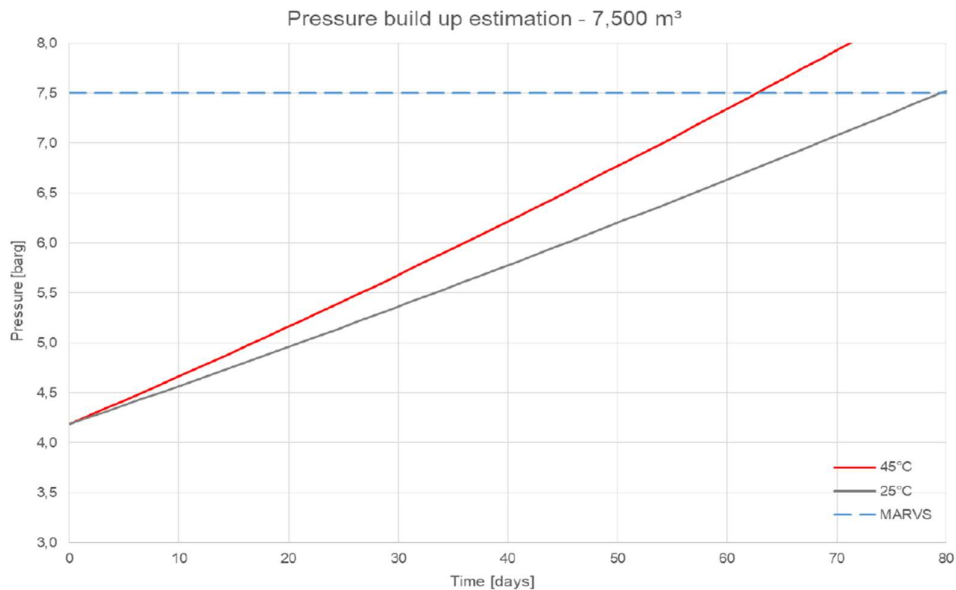


Fig. 14 Cargo tank trykophbygningen som funktion af tid for en 3.750 m³. MARVS at 7.5 barg

Den forventede lange holdetid betød, at projektgruppen besluttede ikke at installere et kølesystem grundet de relative korte EU ruter (3-7 dage) samt, at skibene ikke var designet som combi carriers til anden last end CO₂.

Skibsdesign – MP

Grundet udviklingen i MP CCS projekter omkring Europa, ikke mindst for Northern Light, var det naturligt at undersøge MP designs og valget faldt på 16.000 m³ (to par) and 24.000 m³ (tre par), hvor resultatet fra den første runde i design cirklen kan studeres herover og i appendiks B herunder.

16.000 m³ designet er med 4 x 4.000 m³ cylindriske tanke i par baseret på TGE Marine outline og valgt som størrelsen for en mere detaljeret undersøgelse i samarbejde med skibskonsulent firmaet Knud E. Hansen (KEH).

Opgaven for KEH bestod i udvikling af skrogdesign samt en optimering af skrogperformance samt tilhørende fremdrivningssystem med fuld fokus på alternative grønne fremdrivningsmidler for en rute mellem ARA og Carbfix lagringsprojektet ved Straumsvik, Island.

Grundet operationen i Nordatlanten vil forskibet designes med større styrke (stålvægt), mindre flare (slamming) og fokus for bundslamming. Desuden var der fokus på agterskibet, da twin propulsion kunne være en fordel for fart og forbrug.

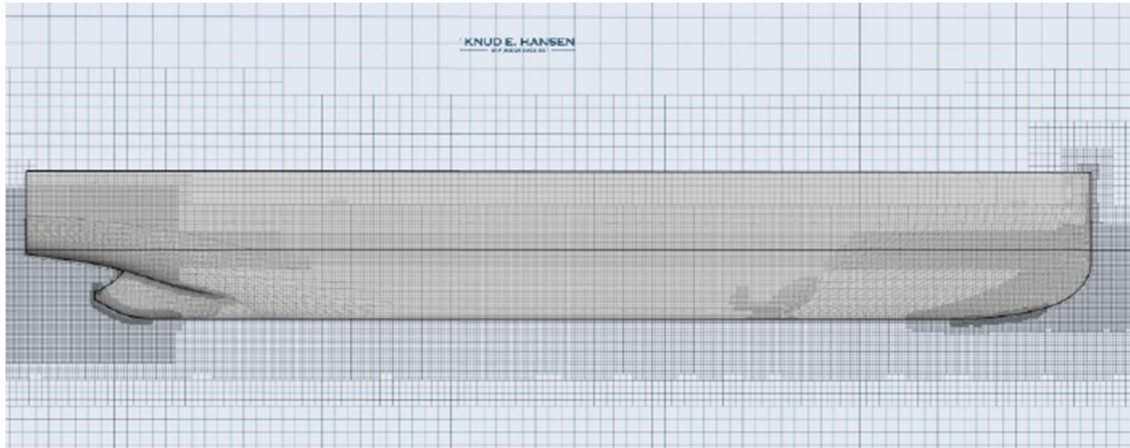
Selve design processen bestod af to faser med milepæle:

- Fase 1: to skrogformsoptimeringer af fart/forbrug for single- og twin skeg
- Milestone: valg af skrogform
- Fase 2: studie af forskellige fremdrivningsmetoder
- Milestone: valg af fremdrivningsmiddel

Selve indholdet kan studeres i appendiks E herunder.

Det blev relativt hurtigt klart, at twin skeg designet ikke havde den oprindelige forventede fordel, så single skeg blev valgt som det endelige agterskibsdesign. Tidligere i projektet blev en pod løsning fravalgt grundet operationsområdet samt den relative lange rute.

Friktion – single & twin skeg



Kilde: KEH

Til beregning af speed & power blev først en empirisk model benyttet, der senere blev afløst af en egentlig CFD model. Skroglinjerne blev udviklet i NAPA og importeret til CAESES for hydrostatiske beregninger og generel optimering - skrogmål er vist i fig. 15.

Item	Symbol	Quantity	Unit
Length between perpendiculars	LBP	161.7	[m]
Breadth	B	26.6	[m]
Draught, design	T_d	9.30	[m]
Block coefficient design	C_{b_d}	0.75	[-]

Kilde: KEH

Fig. 15 Baseline design

Speed & power optimeringen er beregnet uden appendager og ror. Ruhed for appendager blev sat til 150my.

Resultatet af de to agterskibe blev bedømt på bølgebevægelser ved en bølgehøjde på 1,5 m og 4,0m og en fart på 15,5 knob samt EEDI farter og resultatet er vist i nedenstående tabeller.

Table 3: Results rel. resistance design draught single skeg.

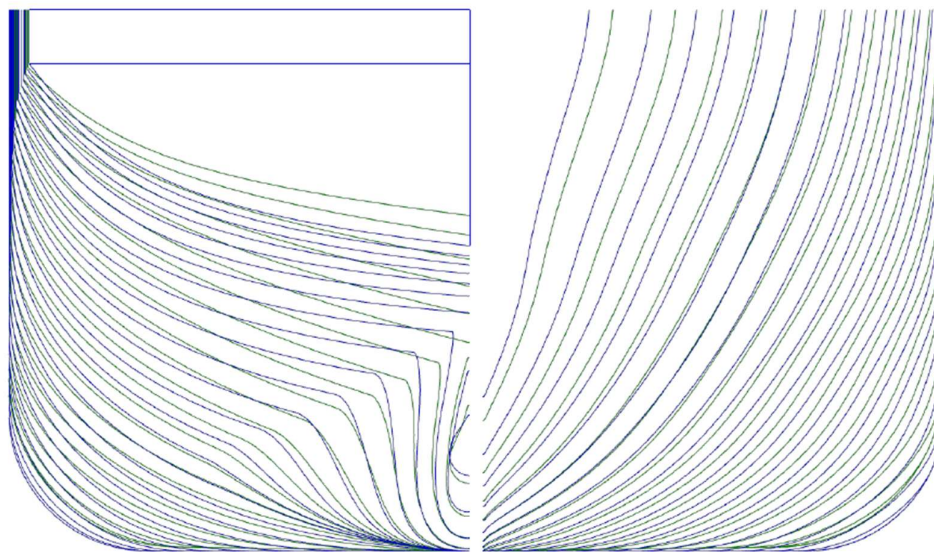
vs	Rel. Dif.
[kn]	[%]
9.5	-5.01%
11.5	-5.91%
13.5	-5.82%
15.5	-5.13%
17.5	-6.47%

Table 4: Results rel. resistance design draught best designs single vs twin skeg.

vs	Rel. Dif.
[kn]	[%]
9.5	-8.74%
11.5	-9.13%
13.5	-8.80%
15.5	-8.56%
17.5	-1.76%

Tabel 3 viser reduktion af optimeret skrogformsmodstand med single skeg i forhold til base design, hvor tabel 4 viser sammenligningen af modstandsreduktionen mellem single- og twin skeg.

Tabel 4 viser at single skeg skroget performer bedre, hvilket måske var forventeligt idet twin skeg ofte er fordelagtigt for større og hurtigere skibe. Herefter blev single skeg skroget valgt med en cirka 5-6% lavere modstand end baseline designet.



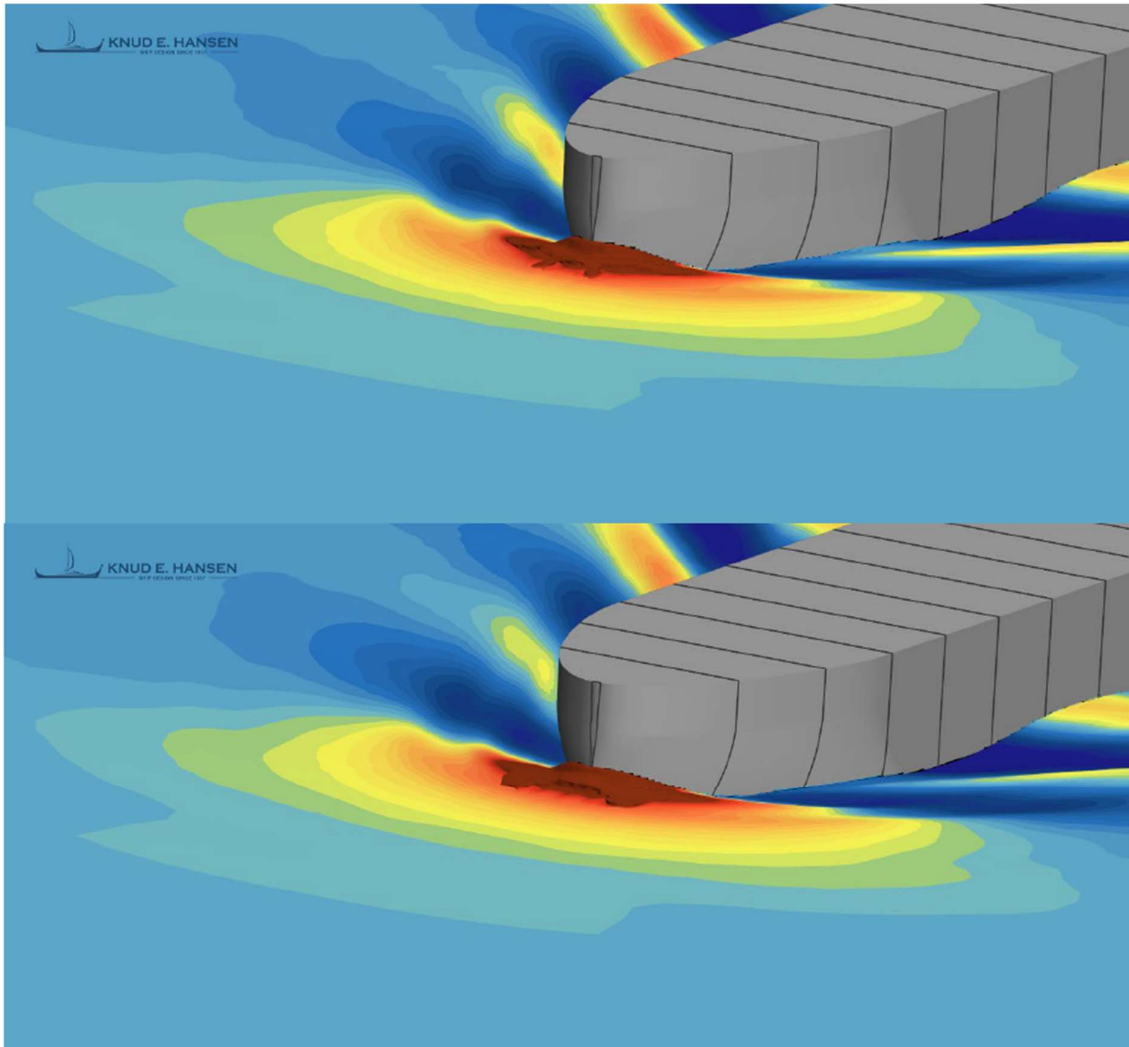
Kilde: KEH

Fig. 16 Baseline design i blå og optimeret version i grønt

Forskellen på baseline design og det optimerede design er som nedenstående tabel, hvor LCB blev flyttet en anelse fremover, hvilket kan ses på bølgesystemet.

Hull ID	B	LPP	T	DISP	LWL	WSA	LCB
	[m]	[m]	[m]	[m ³]	[m]	[m ²]	[m]
Baseline	26.6	161.7	9.30	30002.4	164.8	5911.56	81
Optimized				30000.2	162.3	5819.85	81.74

Det var dog klart at forskibet på det optimeret single skeg design kunne optimeres yderligere, hvilket blev gjort under optimering af speed & power.



Kilde: KEH

Fig. 17 Bølgesystem – baseline øverst og optimeret skrog nederst

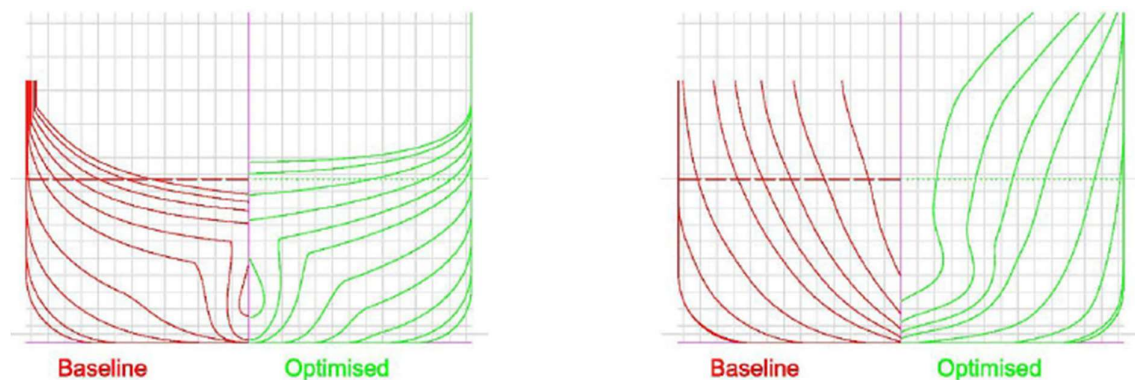
Fart & Forbrug – single skeg

Speed & power estimering blev beregnet ved Hydrocomp NavCad og for det optimeret single skeg design beskrevet foroven dog med appendager samt vindmodstand inkluderet.

Flere optimerede skrogtyper blev udviklet og nedenstående viser den relative store forbedring især for de højere farter mellem det optimeret skrog *HULL02_002* og videreudviklingen *HULL11* – se tabel herunder.

	HULL02_002	HULL11
vs	Rel. Dif.	Rel. Dif.
[kn]	[%]	[%]
9.5	-5.01%	-2.85%
11.5	-5.91%	-5.19%
13.5	-5.82%	-11.16%
15.5	-5.13%	-12.90%
17.5	-6.47%	-12.05%

Ved design farten på 15,5 knob er den yderligere forbedring på hele 12,9%. Dette viser måske også konservatismen i det oprindelige empiriske udgangspunkt. Resultatet skyldes en hævnning af agterskibslinjerne (mindre våd overflade samt bedre slip af vandet efter propelleren) samt tilføjelsen af en indbygget bulb samt et bedre samspil mellem for- og agterskib.



Kilde: KEH

Fig. 17 Baseline design i rødt og optimeret version i grønt

Dog kunne forbedringerne have været en anelse bedre, men der blev taget hensyn til minimering af dobbeltkrumme klædningsplader – HULL23.

Til speed & power beregningen blev hovedmotor MAN 5G60ME-C10.5-LGIM-EGRBP med MCR på 9771 kW v. 94 omdrejninger per minut og en akselgenerator på 700 kW valgt samt en 4-bladet fix pitch propeller udviklet i samarbejde med MAN-ES (Everllence). Mere herom senere.

Design parameter var følgende:

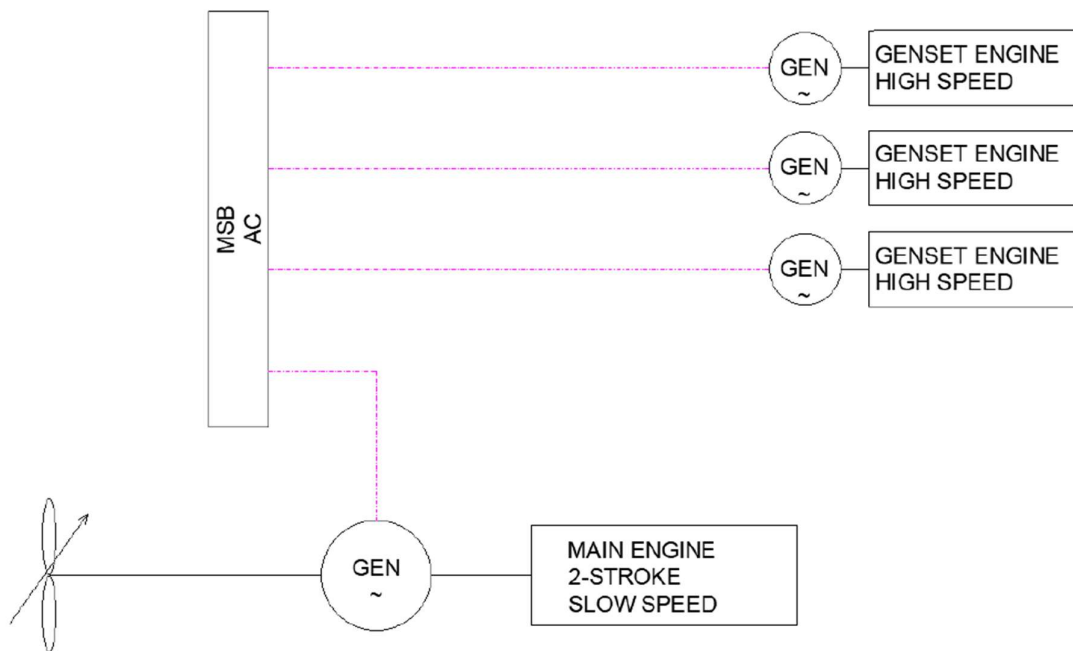
- Design speed 15.5 knots with 15% Sea Margin
- Design speed 14.5 knots with 55% Sea Margin
- The following conditions are considered for the design speed points:
- Design draught (9.7m) on even keel,
- 90% MCR on main engine,
- 700kW on PTO,
- Deep water,
- Calm weather (BF0) with no wind, waves or current,
- Salt water 1.025t/m³ at 15 deg C, and
- Clean bottom and appendages.

Speed & power kurverne og tabeller kan ses i appendiks F.

Fremdrivning

Fremdrivningssystemet blev optimeret med henblik på de 4-5 dages tur/retur mellem ARA og Island i et område, der kræver tilstrækkeligt power i reserve. Da design farten er relativ høj og dermed power installeret, har vi valgt ikke at beregne minimum power efter IMO guidelines for at kunne manøvrere i hårdt vejr, da det ikke forventes at være et problem.

Flere drev såsom diesel-elektriske samt direkte drev har været undersøgt, men valget faldt på et konventionelt og direkte drev som vist i figur 18 baseret på en langsomtgående 2-taks motor.



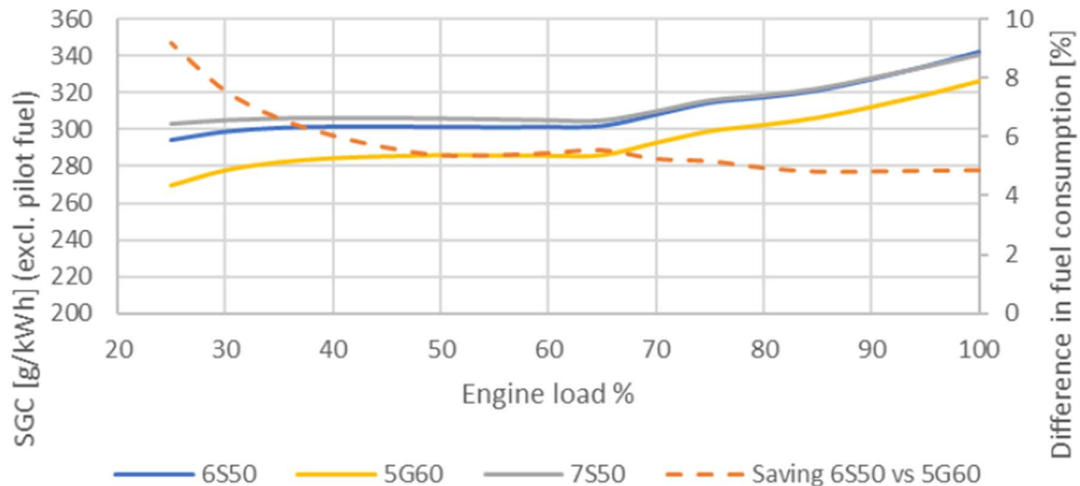
Kilde: KEH

Fig. 18 Direkte drev blev valgt med tre hjælpemotorer samt en aksel generator

Desuden er power-take-out (PTO) via en akselgenerator med et elektrisk output på cirka 700 kWe@90%MCR (cirka 800 kWm) installeret for at minimere forbruget på 4-takts hjælpemotorerne grundet deres lidt ringere brændselsøkonomi. Både hovedmotor og hjælpemotorerne skal drives af metanol.

Følgende hovedmotorer (dual fuel) samt turbo charger (t/c) blev undersøgt:

- 5G60ME-C10.5-LGIM-EGRBP, SMCR: 9.771 kW@94 rpm + MAN TCT40-ML
- 6S50ME-C9.6-LGIM-EGRBP, SMCR: 9.771 kW@108 rpm + MAN TCT40-ML
- 7S50ME-C10.5-LGIM-EGRBP, SMCR: 9.771 kW@94 rpm + MAN TCT40-ML



Kilde: KEH

Fig. 19 Sammenligning af tre størrelser hovedmotorer – metanol – fra Everllence

På basis af sammenligningen blev den noget større motor i boring valgt 5G60ME-C10.5-LGIM-EGRBP, men dog i en de-rated version for at forbedre effektiviteten samt med en cylinder færre.

Ved et valg af en 5-cylinder motor til en 4-bladet propeller skal fremdrivningssystemet samt skrogbjælken undersøges for eventuelle skadelige vibrationer/resonans, hvilket dog ikke er gjort her.

Hverken akselgenerator eller hjælpemotorer er specifikt valgt andet end deres ydelse. I en fremtidig og mere detaljeret undersøgelse skal den elektriske balance udarbejdes og her skal det vurderes om CO₂ skal kunne køles, da det vil have en større indflydelse på den elektriske balance. Det skulle dog med den nuværende cargo tanks isoleringsgrad ikke være nødvendigt at køle på lasten for 4-8 dages rejse samt lasthåndtering, men det bør undersøges.

Propelleren – fire bladet - er som udgangspunkt en CPP grundet installering af WAPS, men skal muligvis ændres til en FPP hvis WAPS ikke installeres. Designet af CPP er blevet verificeret af Everllence, Frederikshavn.

Energi optimering

Som nævnt tidligere viste forskellige kommercielle modeller at en CO₂ carrier og dermed CCS kæden påvirkes økonomisk mere fra OPEX ikke mindst fra brændstofudgifterne end for nybygningsprisen.

Derfor har vi fokuseret på at forbedre energieffektiviteten ved at studere flere forskellige effektivitetsforbedrende foranstaltninger hvoraf et uddrag kan studeres i det følgende. Dog er de fleste ikke studeret i detaljerne for dette skib, men mere baseret på erfaringer fra tidligere installationer og projekter.

- Anti-fouling maling
- CO₂ til køling af apteringen
- Variable Frequency Drive (VFD)
- Skroglinjer

- Wind Assisted Propulsion System (WAPS)
- Propeller and Rudder
- Air Lubrication
- Brændstof- og ruteoptimering/performance system

Skibet tænkes drevet på metanol og det kan diskuteres om, det er den bedste løsning, da valg af brændstof også afhænger af udkommet fra IMO MEPC GFIs i 2026, tilpasningen af FuelEU Maritime med fremtidige GFIs samt adgangen til de forskellige grønne brændstoffer. Dog er valget baseret på adgang til (grøn) metanol i Island. Se indflydelsen af GFI's, FuelEU Maritime & EU ETS i kapitel *Rules & Regulation: IMO GFI's, FuelEU & EU ETS*.

Det er klart, at valget af brændstof til fremdrivning vil have indflydelse på tilbagebetalingen for energioptimeringerne på grund af den store varians i pris per tons og i særdeleshed for pris per MJ.

I det efterfølgende vil vi kort gå igennem ovennævnte energioptimerings muligheder baseret på egne erfaringer samt input fra firmaet Njord.

Anti-fouling maling

Udviklingen indenfor silicone baseret anti-fouling over de sidste 10 år har være høj og i dag er der flere produkter på markedet. Fordelen ved silikone baseret anti fouling er mindre ruhed og bedre modstandsdygtighed for begroning under idling opnået ved et signifikant lavere indhold af biocider. Som et eksempel har Navigator Gas påført silikone baseret anti fouling i de sidste 6-7 år med rigtige gode forbedringer op til 8-10% i gennemsnit på forbruget over en dokningsperiode.

Derfor vil skroget blive påført med silikone baseret anti fouling med en forventet ekstrapris på cirka. USD 50-80k/skib.

CO₂ til køling af apteringen

Som noget nyt bør det undersøges om, flydende CO₂ kan benyttes til køling af apteringen dog med behørig respekt for ulemperne ved CO₂ under en læk i aircon systemet. Så vidt vides har CO₂ som kølemiddel i skibe ikke være testet i de senere år.

Variabel Frekvens Styring (VFD)

Der er flere forbrugere, såsom forskellige pumper, engine room fans med videre, der med fordel kan optimeres ved et såkaldt VFD – Variable Frequency Drive – der regulerer efter pumpebehovet og ikke 0 eller 100% som standard.

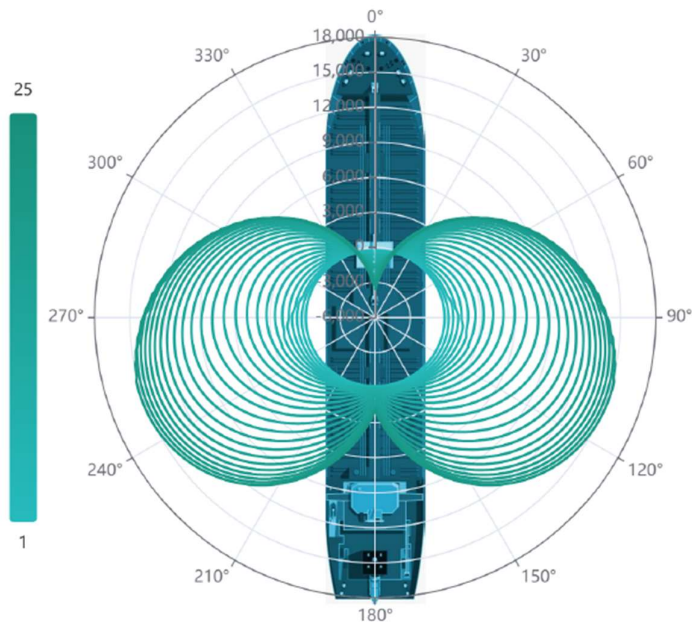
Skroglinjer

Som nævnt tidligere kan de nuværende skroglinjer optimeres yderligere dog i mindre grad. Der skal være fokus på forskibets linjer til operation i det nordlige Atlanterhav samt indflow til agterskibet. Yderligere 3-5% bedre performance vil være målet.

Wind Assisted Propulsion System (WAPS)

Da skibet er designet til at operere fra ARA til Island, blev det besluttet at undersøge muligheden for at optimere performance ved installation af WAPS grundet at den fremherskende vind forventes at være vesterlig og ind fra tværgående retninger. Beregninger viser at den optimale

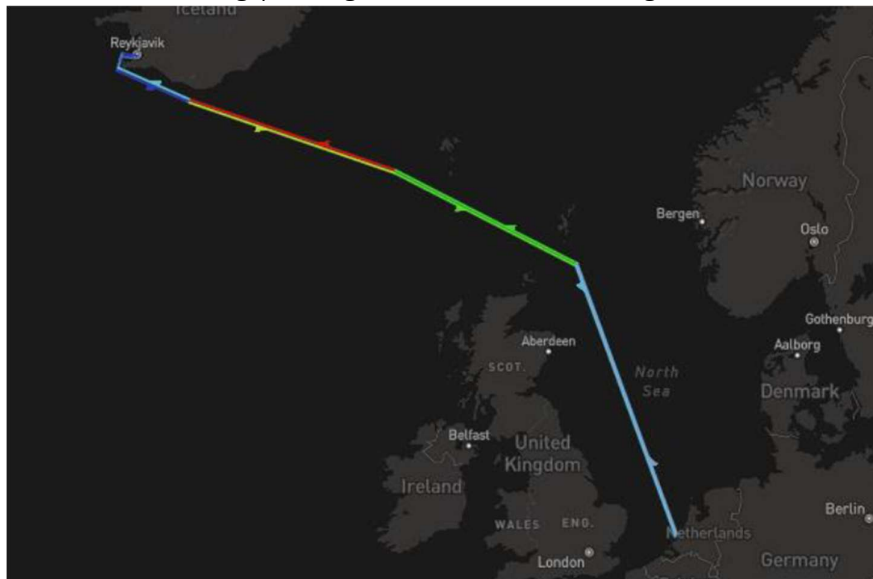
vindretning for flere WAPS teknologier er ind fra agten for tværs og væsentligt aftagende ved mod- og medvind.



Kilde: Norsepower

Fig. 20 Trust fra Flettner rotor princippet som en funktion af vindstyrke og retning

To WAPS teknologier blev undersøgt, Norsepower (Flettner Rotor) og BAR Technologies (suction wings) for følgende rute tur retur – se fig 21.



Kilde: Norsepower

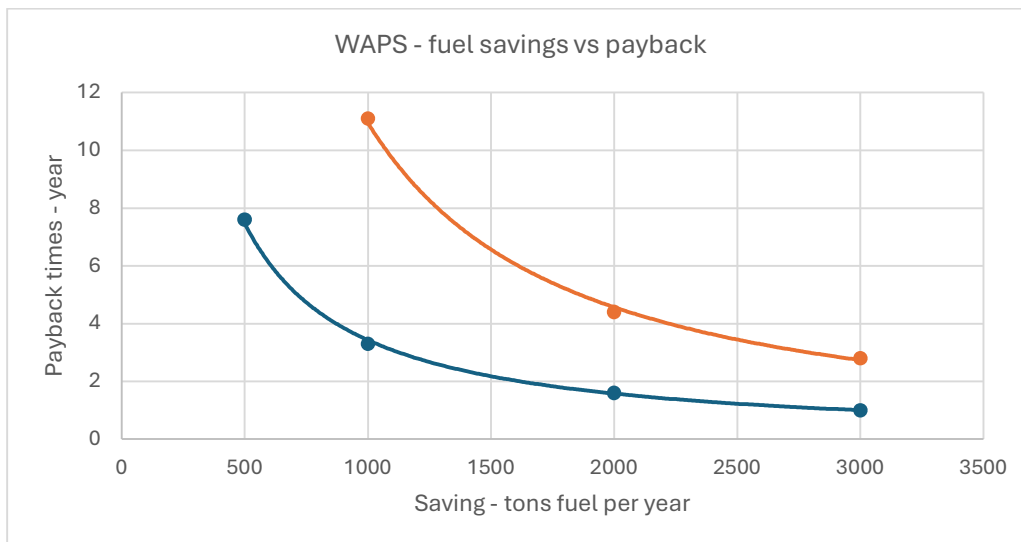
Fig. 21 Rute – Amsterdam til Straumsvik t/r

Sammenligningen af BAR og Norsepower falder ud til Norsepower (Flettner) Rotor Sails fordel og vil blive gennemgået kort i nedenstående.

Udgangspunktet for undersøgelsen af effekten fra Norsepower var følgende.:

- 4 x Flettner rotors: 35 m x 5 m (H x D)
- Skibslængde: 163,0 m
- Bredde_{moulded}: 26,6 m
- Dybgang_{design}: 9,7 m
- Dybgang_{ballast}: 6,0 m
- CAPEX_{total}: USD 4,56 mill
- OPEX_{year}: USD 0,05 mill
- Rotor effektivitet: 70%
- Til søs: 70%
- Speed_{laden}: 15,5 knots
- Speed_{ballast}: 15,5 knots
- Rejser_{året}: 20 rejser
- Est fuel forbrug_{rejse}: 56 mt/dag – metanol + pilot (MGO)
- Est fuel forbrug_{året}: 11.000 mt – metanol + pilot (MGO)
- Est fuel forbrug_{rejse}: 26,3 mt/dag – MGO
- Est fuel forbrug_{året}: 5.200 mt – MGO
- Fuel pris_{metanol}: 800 USD/mt
- Fuel pris_{MGO}: 650 USD/mt

De forventelige payback scenarier for WAPS på den pågældende rute er beregnet som følger og ved en 8% rente:



Kilde: Navigator Gas

Fig. 22 Tilbagebetalingsestimater som en funktion af brændstof besparelser i tons per år – ex emission fordele. Orange kurve: MGO & blå kurve: metanol

Som det kan ses fra fig. 22 skal besparelsen i brændstof i gennemsnit være minimum 10% for WAPS, hvilket de færreste forventer ikke engang på denne fordelagtige rute. Det betyder, at det er de lavere emissionsomkostningerne fra EU ETS (EUA's), FuelEU Maritime samt det kommende IMO GFI's, der skal bære investeringen i WAPS.

Effekten fra de forskellige emission kontrol programmer kan studeres under kapitlet *Rules & Regulation: IMO GFI's, FuelEU & EU ETS*. Desuden kan det nævnes at EEDI phase III ikke kan indfries ved MGO alene, hvilket kan studeres under *EEDI phase 1-3 resultater*.

Vi besluttede dog at fortsætte med fire Norsepower (Flettner) Rotor Sails af ovennævnte størrelse på skibet, men det skal nævnes at især den indbyrdes rotor påvirkning samt påvirkning på skibets kursstabilitet og krængning skal undersøges nøjere.

Især den indbyrdes påvirkning fra fire rotor, aptering og udstyr på dæk kan have en negativ påvirkning på op til 20% reduktion af besparelsen ifølge Navigator Gas tidligere undersøgelser. Det forventes at resultatet af ovennævnte undersøgelser kan reducere antallet af rotor til to.

Propeller og Ror

Propelleren er en CPP med indbygget styringssystem, evt leveret af danske Frugal, af pitch/rpm og optimering af blad design til en gennemsnitsfart på cirka 14 knob.

Det kan synes som en relativ høj fart for et mindre skib samt ikke mindst for en last CO₂ af ringe værdi, men da skibet indgår i en CCS kæde, er tiden for transport en væsentlig parameter.

Farten skal dog afstemmes med kravet til CCS kæden både for tid, ruteoptimering samt hvilke rater og mængder den endelig lagring kræver, men også med henblik på CO₂ aftrykket for rejsen især hvis brændstoffet er MGO.

Roret kan have en mindre indflydelse på skibets performance og der findes flere varianter, der mere eller mindre er optimeret til skib, fart, manøvreve og rute. Ror systemet valgt er et såkaldt gate ruder, der har vist sig effektivt, men som også er et relativt nyt og uprøvet design for større skibe. Derfor vil det kræve en nærmere undersøgelse samt ikke mindst en forventning om et større CAPEX grundet værfternes manglende erfaring med installationen.



Kilde: Wärtsilä

Fig. 23 Gate Rudder

Ifølge Wärtsilä har gate rudders fordele som bedre brændstofperformance, manøvrevevne og lavere støj- og vibrationsniveauer.

Luftsmøring - skrog

Air Lubrication Systems (ALS) har været testet og til nogen grad bygget især til krydstogtskibe, men også til et lille nummer handelsskibe især skibe med større blok koefficient, da et relativt stort flade areal/fladbund er nødvendigt.

CO₂ carriers bygget til Northern Light er med ALS installeret og vi ønskede at undersøge dette for vores over dobbelt så store skib.

ALS kan populært beskrives som luftsmøring, der erstatter vand med luft, hvilket i teorien giver mening, men kan være en udfordring i det praktiske. Der er flere varianter, men den mest udbredte er en installation i fladbunden af skibet, der pumper et slags luftgardin ud af skroget via åbninger i skroget (enten som åbninger i skroget eller i et bassin i fladbunden).

Luften erstatter vandet og dermed reducerer friktionen på grund af en lavere densitet af luft i forhold til vand. Der er fordele og ulemper forbundet med dette og én af udfordringerne er at holde på luftgardinet, så det ikke blæser op langs siden samt undgå at det påvirker propellerens virkningsgrad, hvis luftgardinet forsætter ind i propelleren. Derud over vil opdriften af skibet ganske givet reduceres på grund af forskellen på densiteten af vand og luft.

Njord assisterede os i undersøgelsen, da de tidligere havde lavet en undersøgelse med Alfa Laval OceanGlide luftsmøresystem (i det følgende benævnt OceanGlide) på et lidt større skib end vores.

Oceanglide blev udviklet i 2014 og skulle skabe et jævnt og dynamisk luftlag i skibets fladbund. OceanGlide består af kompressorer, der tilfører luft gennem vingeformede luftfordelingsbånd, der er fastgjort til bunden af skibet. Luftfordelingsbåndene genererer små, ensartede luftbobler, der smelter sammen for at danne et jævnt luftlag. Mængden af luft, der injiceres af et luftfordelingsbånd, justeres af et kontrolsystem for at optimere lufttilførelsens ydeevne under de givne belastnings- og sejlforhold.

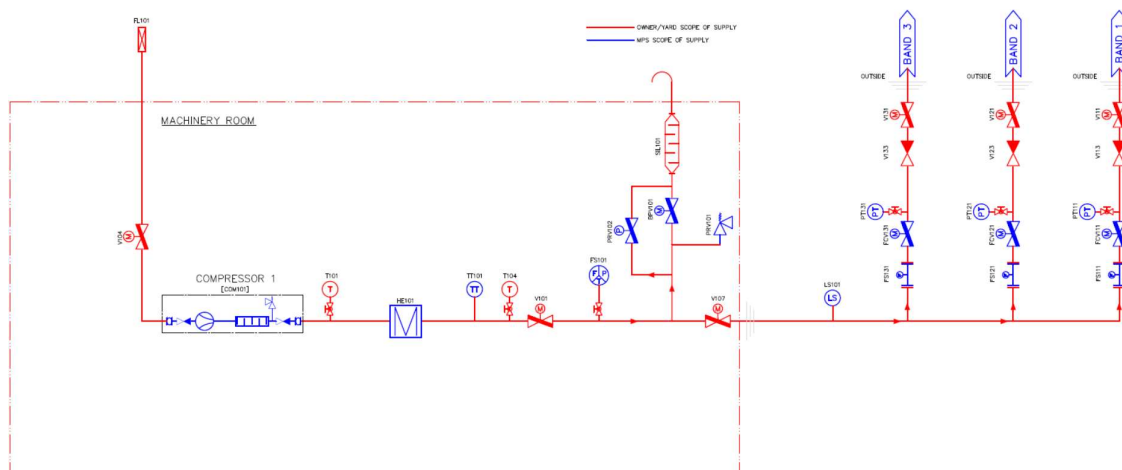
Installationen dækker fladbunden ved at opdele skroget i sektioner, så hver del af luftlaget kan kontrolleres og optimeres.

Systemkonfiguration

Placeringen af luftfordelingsbåndene bestemmes af arealet af den flade bund, samt placeringen af kompressorerne og behovet for elektriske ledninger og/eller ventilation.

Fartøjets driftsprofil er input til kompressordimensioneringen, fordi dybgang og højere hastigheder kræver mere luftmængde i systemet. De typiske dimensioner af et luftfordelingsbånd er 60 mm (H) x 600-800 mm (B) x bredden af fartøjets flade bund og er designet til at blive installeret uden omfattende skrogændringer.

Rør- og instrumenteringsdiagrammet – se fig. 24 - repræsenterer en typisk konfiguration for en installation med tre luftfordelingsbånd.



Kilde: AlfaLaval

Fig. 24 Typisk rørføring og udstyr for ALS

Luft tilføres hvert luftfordelingsbånd gennem en enkelt gennemføring fra ballasttanken, forsynet af skruekompressorer.

Kontrolsystemet styrer luftstrømmen til hvert af luftfordelingsbåndene via en kombination af tryksensorer, flowreguleringsventiler og proprietære indløb i oscillatorerne.

Beregninger af den potentielle netto besparelse ved optimale forhold var 6% reduktion af poweren på akslen, det vil sige cirka 2-3% på brændstofforbruget, hvilket i vores tilfælde ikke kunne dækkes af en payback beregning, så vi valgte ikke at forfølge det yderligere.

Da OceanGlide og andre systemer kan eftermonteres, kan det ikke udelukkes at tage det op senere især hvis operationsprofilen for skibet bliver mere gunstigt for et ALS system.

Brændstof- og ruteoptimering/performance system

Der vil blive installeret et brændstof- og ruteoptimerings/performance system ombord for at optimere sejladsen samt indsamle systemdata fra forskellige forbrugere for at minimere brændstofforbruget så meget som muligt.

Dette har vist sig at være en fordel især ved træning af besætningerne for at øge deres forståelse af vigtigheden af dette især, da skibet er en del af en CCS kæde. Desuden kan der aktivt følges med i real life data samt beslutningsunderstøtte vdr skrogrønsning med videre.

Det forventes dog ikke at en trimoptimering vil være af en nævneværdig fordel så længe skibet ligger i fast rutefart mellem ARA og Island lastet med CO₂, da skroget er optimeret for dybgangen 50/50 ballast og lastet. Dog vil trim optimering ganske givet være en fordel, hvis skibet sejler på længere ruter eller skifter last.

Det vil tillige blive nødvendigt at kunne demonstrere og rapportere skibets brændstoffsforbrug og emissioner for at kunne dokumentere skibets CO₂ footprint i CCS kæden. Dette footprint forventes at blive een af succesparametrene for en given CCS kæde da krav til begrænset footprint kunne blive stillet af en eventuel CCS projektstøtteforanstaltning.

Andre initiativer

Der er flere andre muligheder for optimering af energiforbruget såsom VFD styret pumper og blæsere, economizers på hjælpemaskineriets udstødning, LED lys, elektriske pre-heatere i stedet for en oliefyret kedel, onboard carbon capture i tilfældet af brug af HFO/MGO med videre.

De initiativer er dog ikke behandlet her, men bør være en del af en detail undersøgelse længere nede ad designspiralen.

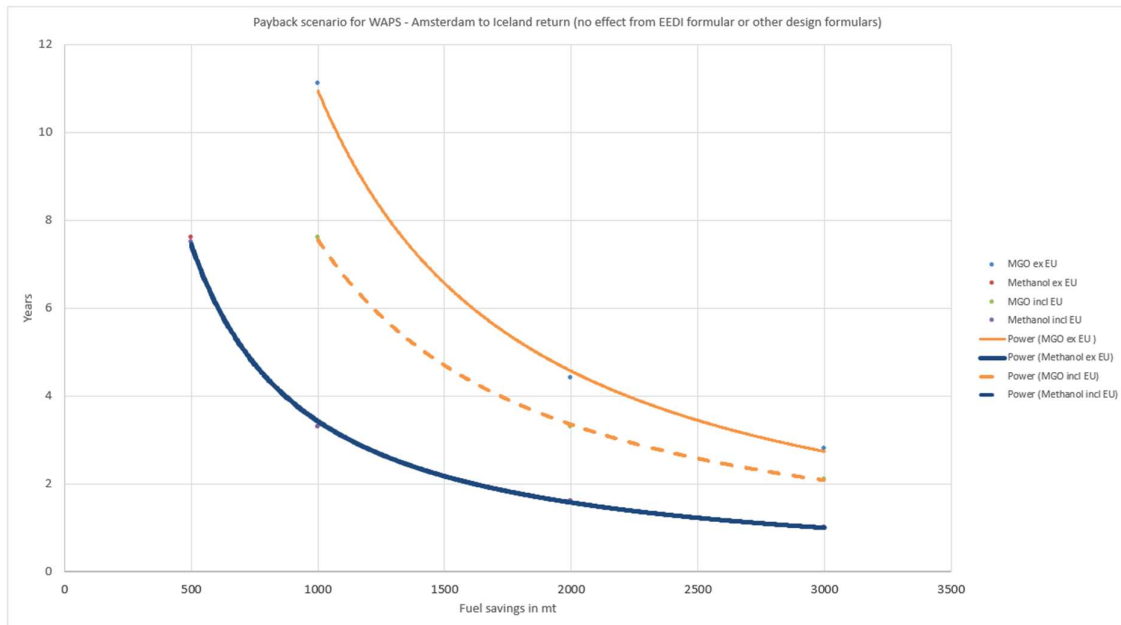
Rules & Regulation: IMO GFI's, FuelEU & EU ETS

Som det muligvis er bekendt for læseren, er der flere forskellige maritime og emissionsreducerende tiltag kørende og kommende i den nærmeste fremtid.

Uden at gå ind i tiltagene i detaljer er europæiske FuelEU Maritime et well-to-wake tiltag for at tilskønne et skifte væk fra fosilt brændstof. Desuden er EU ETS et tank-to-wake emissions trading system, hvor det kommende IMO GFI er FNs globale redskab til begrænsning af GHG emissioner. Alle tre programmer har integreret en afgift for manglende overholdelse af de maksimale emissionsgrænser, hvor installation af WAPS giver en reduktion både ved beregningen af skibets maksimale grænse for udledninger samt ved reduktionen af udledte emissioner.

Vi har i det efterfølgende simuleret den forventede fordel ved installation af fire Norsepower Rotor Sails for FuelEU og EU ETS gældende for ruten mellem ARA og Island samt emissionskravene i 2030.

Vi har ikke inkluderet IMO GFI, da den i skrivende stund ikke er endeligt vedtaget og at prisen for tier I & II ikke er fastsat.



Kilde: Navigator Gas

Fig. 25 Payback estimerer som en funktion af brændstof besparelser i tons per år – incl emission fordele. Orange kurve: MGO ex emissionsfordele, stiptet orange kurve: MGO inkl emissionsfordele & blå kurve: metanol ex emissions fordele (inkl emissionsfordele er næsten ens med ex emissionsfordele)

Som det kan ses fra ovenstående figur 25, er fordelene ved brændstofbesparelser selvfølgelig påvirket af brændstofprisen og da prisen for MGO og (blå) metanol med tilsvarende energiindhold er for nuværende cirka 1:2,5 vil tilbagebetalingstiden for WAPS installation selvfølgelig være kortere for metanol i forhold til MGO.

Fordelen ved brændstofbesparelserne med henblik på emissionsudgiften (fra EU ETS & FuelEU Maritime) er markant for MGO som brændstof i forhold til metanol, hvor fordelene ved besparelsen fra EU ETS udlignes ved reduktion af overskuddet fra FuelEU Maritime. Dette er dog rute specifikt, men for ARA til Island ser det ikke ud til, at reduktionen i emissioner vil betyde en fordel for metanol.

Det skal dog siges, at design fordelene ved at have WAPS installeret ikke er medregnet her, og at det bør beregnes inden afgørelsen om WAPS skal installeres tages.

Brændstof review

16.000 m³ MP CO₂ carrieren vil operere i et EU område med høj fokus på GHG udledninger samt forventelig vil møde krav til CO₂ footprint fra CCS kædens ansvarlige part. Som nævnt er CO₂ carrieren designet til ARA-Island retur, det vil sige intra EU ETS systemet, men ind og ud af FuelEU Maritime da Island ikke er medlem af EØS (EEA).

Desuden er kravet til skibenes energieffektivitet stigende igennem større krav til skibenes Energy Efficiency Design Index (EEDI), der siden implementeringen i 2015 er 30% strengere, hvilket vil have en negativ effekt på skibets fart og forbrug ved brug af fossilt brændstof.

Der er derfor flere gode grunde til at sammenligne forskellige brændstoftyper for nuværende og fremtidig krav, så skibet kan operere fornuftigt og konkurrencedygtigt over dets 25 års levetid.

Island er een af pionererne når det kommer til produktion af grøn metanol baseret på vandkraft og termisk energi samt indfanget CO₂ eventuelt importeret via skib. Det var derfor nærliggende at benytte denne mulighed for at bunkere grøn metanol i Island for minimum en rundrejse til ARA, men det skal dog nævnes at forsyningen af grøn metanol som brændstof ved et andet operationsområde, skal nærstudies i detaljen.

Vi valgte at fokusere på grøn metanol som brændstof, men vurderede dog også bio brændstof B100 som et muligt alternativ.

Metanol versus MGO og B100 biofuel:

Som nævnt tidligere ville der være mulighed for at bunkere grøn metanol i Island på sigt, men valgte at sammenligne brugen af grøn metanol versus MGO på ruten ARA Island.

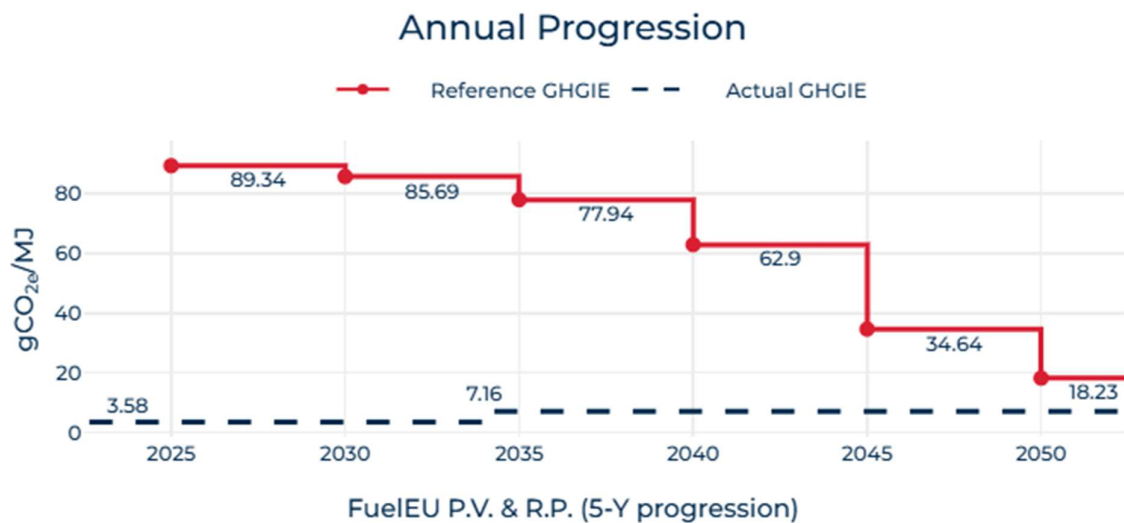
Input til beregning og sammenligning mellem grøn metanol og MGO for EU ETS og FuelEU Maritime:

- Distance ARA - Island: 1200 sømil hver vej
- Speed_{laden}: 15,5 knots
- Speed_{ballast}: 15,5 knots
- Rejser_{året}: 20 rejser
- Est fuel forbrug_{rejse}: 56 mt/dag – metanol + 5% pilot (Biofuel B100)
- Est fuel forbrug_{året}: 11.000 mt – metanol + 5% pilot (est 260 mt Biofuel B100)
- Est fuel forbrug_{rejse}: 29,9 mt/dag – Biofuel B100
- Est fuel forbrug_{året}: 5.900 mt – Biofuel B100
- Est fuel forbrug_{rejse}: 26,3 mt/dag – MGO
- Est fuel forbrug_{året}: 5.200 mt – MGO
- Fuel pris_{metanol}: 800 USD/mt
- Fuel pris_{Biofuel B100}: 750 USD/mt
- Fuel pris_{MGO}: 650 USD/mt
- Biofuel B100_{LCV}: 37 MJ/kg (RED-II)
- Biofuel B100_{GHG}: 22 gCO_{2e}/MJ
- Metanol_{GHG}: 4.4 gCO_{2e}/MJ (kilde: Metanol Institute)
- FuelEU Maritime_{penalty}: EUR 640/tCO_{2e}
- CO₂_{Correction factor - MGO}: 3.206 (TtW)
- CO₂_{Correction factor - B100}: 0 (TtW)
- CO₂_{Correction factor - Metanol}: 0 (TtW)
- Ingen WAPS installeret

Som nævnt er den ikke uvæsentlige fordel i reglerne ved installation WAPS ikke medregnet, hvilket ville være et punkt for videre undersøgelser.

Vi valgte dog ikke at medregne effekten fra WAPS grundet den åbenlyse fordel i at kunne bunkere grøn metanol i Island, men valgte dog at vise CO₂ carrieren med Flettner rotor for senere vurdering.

FuelEU Maritime har udviklet et stigende krav til maksimal udledning af GHG per MJ, mens EU ETS er konstant indtil 2030, hvor en revision af resultatet vil blive foretaget. Det skal noteres at EU ETS er såkaldt en Tank-to-Wake betragtning mens FuelEU Maritime er Well-to-Wake, hvilket betyder at eksempelvis sort LNG har en fordel fremfor HFO/MGO, så vil det ikke være tilfældet for FuelEU Maritime.



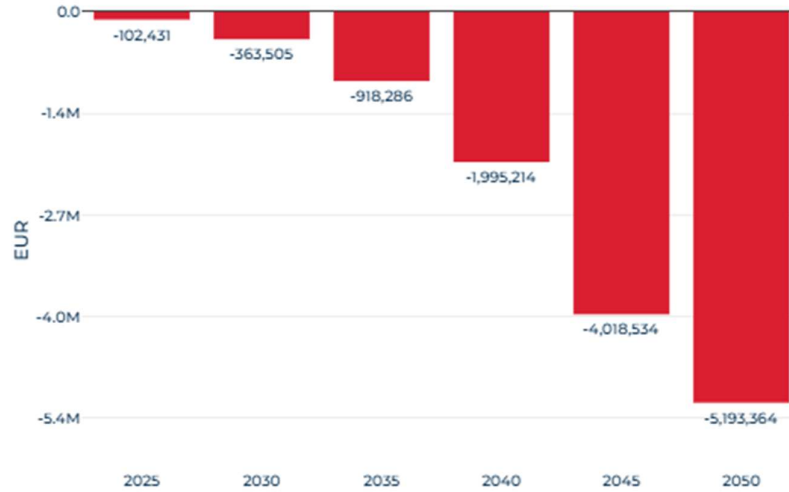
Kilde: ABS

Fig. 26 Maksimale krav til GHG per MJ udledning fra dato til 2050. Den faktisk GHG udledning per MJ for grøn metanol er angivet ved stiplede linje

FuelEU Maritime – MGO

Marine Gas Oil (MGO) er i dag et velkendt brændstof, der ikke kræver en yderligere introduktion.

I EU SECA er brændstoffer med et indhold over 0.1% svovl ikke tilladt med mindre en såkaldt scrubber, der renser røggassen for svovl, er installeret. Hvis en scrubber er installeret kan HFO med helt op til 3.5% svovl brændes, men vi har valgt at se bort fra denne løsning i dette studie.



CB and FuelEU P.V./R.P. (5-Y progression)

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
CO ₂ e [MT]	-158.8	-563.7	-1.4k	-3.1k	-6.2k	-8.1k
FuelEU [EUR]	-102.4k	-363.5k	-918.3k	-2.0M	-4.0M	-5.2M

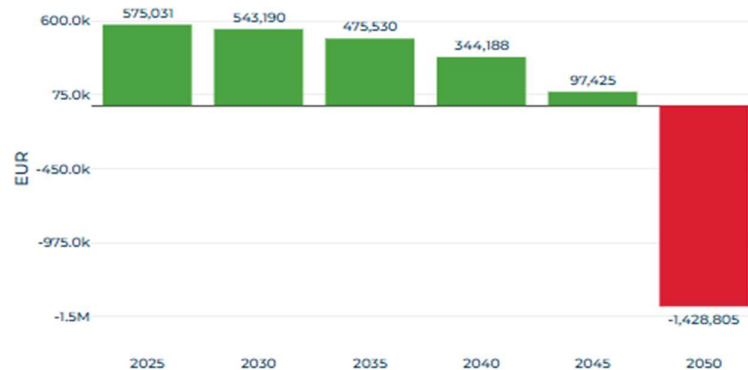
Kilde: ABS

Fig. 27 Udvikling i årlig CO₂ overskud/underskud ved MGO som brændstof

FuelEU Maritime – B100 biofuel

Variationer af biofuel er i handelen i dag og mange skibe har erfaringer med opbevaring, håndtering og forbrænding ikke mindst i EU farvande.

Det er selvfølgelig ukendt, hvordan efterspørgelse og pris udvikler sig over tid, men biofuel er en klar kandidat som et overgangsbrændsel mellem fossile og grønne brændstoffer. Da LCV er lidt lavere end MGO, er det forventede årlige forbrug i tons lidt højere til sammenligning. B100 biofuel benyttet her er en såkaldt generation II biofuel.



CB and FuelEU P.V./R.P. (5-Y progression)

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
CO ₂ e [MT]	7.2k	6.8k	5.9k	4.3k	1.2k	-573.2
FuelEU [EUR]	575.0k	543.2k	475.5k	344.2k	97.4k	-1.4M

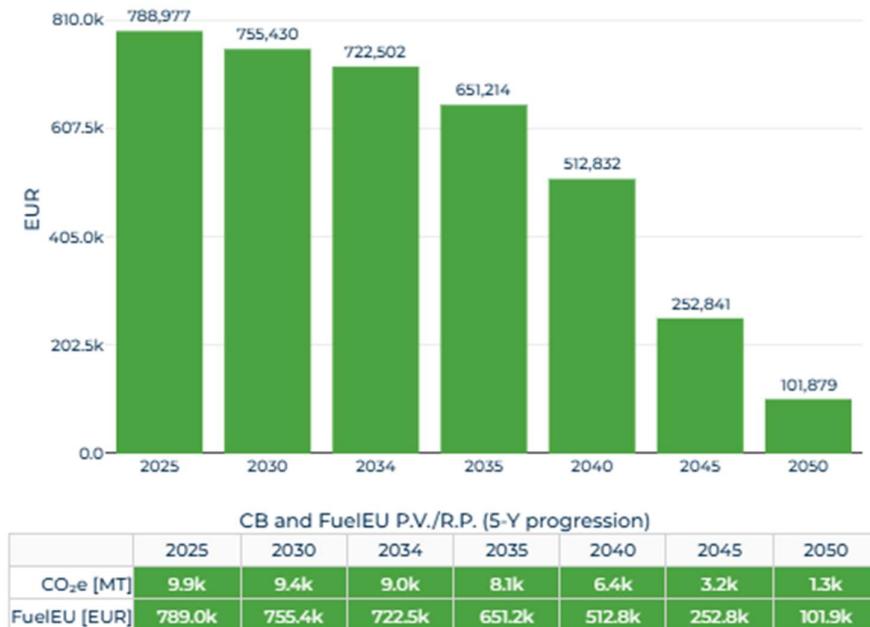
Kilde: ABS

Fig. 28 Udvikling i årlig CO₂ overskud/underskud ved B100 biofuel som brændstof

FuelEU Maritime – grøn metanol

Som tidligere nævnt er der adgang til grøn metanol på Island, hvilket vil fremtidssikre operationen af CO₂ carryeren også efter 2050 samt skabe et ikke ubetydelig overskud af CO₂ ækvivalenter, der enten kan sælges eventuel til CCS kæden, på CO₂ børsen eller pooler med andre skibe.

Metanol har et lavere LCV, så forbruget i tons er ca 2-2.5 gang større end MGO og B100 biofuel. Metanol udleder GHG, men da det er produceret på indfanget CO₂, samt fremstillingsprocessen er drevet på vandkraft eller termisk energi regnes det som grønt.



Kilde: ABS

Fig. 29 Udvikling i årlig CO₂ overskud/underskud ved grønt metanol som brændstof

EU ETS (EUA)

EU ETS værdien beregnes som *udledt CO₂ [mt] x EUR 80 x 50%* for rejser ind og ud af EU, mens intra EU rejser beregnes som *udledt CO₂ [mt] x EUR 80*. Da Island er med i EU ETS regnes der kun på intra EU rejser, mens ophold i havn ikke er medregnet.

EU ETS beregnes fra Tank-to-wake (TtW) hvor både B100 biofuel og grøn metanol er 0, hvorimod MGO har korrektionsfaktoren 3.206 omregnet til tons CO₂.

Så for MGO bliver det årlige ETS regnskab i EUA's (eller EUR som her) følgende:

$$5,200 \text{ mt MGO} \times 3.206 \times \text{EUR } 80 = \text{EUR } 1,34 \text{ mill per skib/år}$$

IMO GFI's

GFI's er ikke medregnet her som nævnt tidligere, da foreslaget i skrivende stund ikke er vedtaget samt at der forventes en hvis form for tilpasning af FuelEU Maritime i så fald IMO endelig vedtager og ratificerer GFI. Men det er klart, at når det endelige resultat foreligger både

vedrørende IMOs vedtagelse samt EUs revision af FuelEU Maritime, skal udgiften for de forskellige brændstoffer genberegnes.

EEDI – foreløbig beregninger

EEDI er selvfølgelig en vigtig parameter for et skibsdesign og derfor blev der beregnet et foreløbigt tæk af EEDI for fase 2 & 3 for forskellige brændstoffer, hvoraf nedenstående er et uddrag. Beregningerne er lavet i overensstemmelse med MEPC.254(67) og MEPC.308(73).

Vi har undersøgt MGO, metanol, biofuel og LNG (gråt) og fulgt guidelines MEPC.1/Circ.905 og MEPC.308(73). Alle brændstoffer er undersøgt med og uden WAPS.

Da CO₂ carrieren har installeret en relativt høj powered hovedmotor for at kunne opnå design farten på 15,5 knob i både ballast og lastet, ville EEDI fase 3 ikke kunne indfries med MGO.

Faktisk ville design farten falde med cirka 2 knob til under 13,5 knob, hvilket ville have en relativ stor indflydelse på både CCS kædens effektivitet samt CAPEX for at opretholde den nødvendige transport sekvens.

Men da vi ikke havde kendskab til den fulde CCS kæde såsom transport af tons indfanget CO₂ per år samt kapacitet af lageret og lagringsprocessen, valgte vi at holde fast i de 15,5 knob.

Vi inkuderede LNG (gråt) og biofuel som mulige brændstoffer blot for at forstå forskellen mellem MGO, metanol og LNG. Biofuel benyttet er et 45% blend for ikke at overskride eventuelle NOx krav, men at B100 sikkert ville være et mere passende og nutidigt alternativ til metanol. Se eventuelt appendiks H for beregningen af C_r for B45 blend.

Til beregningerne blev der brugt følgende LCV samt korrektionsfaktorer:

Fuel types	LCV (kJ/kg)	Cf
MDO/MGO	42,700	3.206
LFO	41,200	3.151
HFO	40,200	3.114
LNG	48,000	2.750
Propane	46,300	3.000
Butane	45,700	3.030
Methanol	19,900	1.375
Ethanol	26,800	1.913
MDO - 45% BIO	39.301	2.047

Kilde: KEH

Fig. 30 EEDI – LCV & CO₂ korrektionsfaktorer

Resultatet af de foreløbige EEDI beregninger kan ses i nedenstående figur 31. Det var tydeligt, hvilket ikke var uventet, at MGO ikke ville være et egnet brændstof hverken for nu eller i fremtiden i det tænkte operationsområde og fart.

Det var dog en større overraskelse at forbedringen ikke var større ved installering af WAPS.

Beregningerne viste den ikke uventede store indflydelse de forskellige brændstoffer havde på EEDI, hvilket også var intentionen fra IMO, da EEDI blev diskuteret og vedtaget.

Speed	EEDI	cf	3.206	cf	1.375	cf	2.047	cf	2.75
		MDO		Methanol		BIO		LNG	
		Without	WAPS	Without	WAPS	Without	WAPS	Without	WAPS
13.4	Phase 2	13%	35%	34%	50%	44%	57%	46%	59%
	Phase 3	1%	25%	25%	43%	36%	51%	38%	53%
13.5	Phase 2	12%	33%	33%	49%	43%	56%	45%	58%
	Phase 3	-1%	24%	23%	42%	35%	50%	37%	52%
14	Phase 2	4%	25%	27%	43%	38%	51%	41%	53%
	Phase 3	-9%	14%	17%	35%	29%	44%	32%	46%
14.5	Phase 2	-5%	15%	21%	36%	33%	45%	35%	47%
	Phase 3	-19%	3%	9%	26%	23%	37%	26%	40%
15	Phase 2	-15%	4%	13%	27%	26%	38%	29%	40%
	Phase 3	-31%	-9%	0%	17%	15%	29%	19%	32%
15.58	Phase 2	-30%	-11%	2%	16%	16%	28%	20%	31%
	Phase 3	-48%	-27%	-12%	4%	5%	18%	9%	21%

Kilde: KEH

Fig. 31 EEDI – resultaterne af de foreløbige beregninger.

Beregningerne viste desuden at designfarten kunne være vanskelig at holde selv ved brug af metanol og uden WAPS, så det er nødvendigt at få en nærmere beskrivelse af LCA fra kilden både for EEDI beregningerne, men også for FuelEU Maritime beregningerne.

Det var noget overraskende at biofuel (B45 blend) havde en noget mere positiv indflydelse på EEDI end metanol, hvilket bør verificeres ved en videreførelse af dette projekt.

LNG leverer det bedste EEDI resultat, men vi mener ikke det har den nødvendige fremtidssikring i EU området, så vi valgte at se bort fra det.

Letvægtsestimat

Letvægtsestimatet for CO₂ carrieren blev estimeret især for at få et bedre billede af stål vægten, da den forventelig ville være noget større end for normale LPG/c med last densitet på ca 0.68 tons/m³ (ex VCM laster) sammenlignet med CO₂ på cirka 1.10 tons/m³. Herud over var vægten af selve cargo tankene og påvirkingerne på sadlerne ligeledes noget større.

Letvægtsestimatet var inkluderet svejsning, skrog krumhed samt en 4% margin og endte på ca. 10.500 tons, hvilket skønnes at være cirka. 750 tons højere end tilsvarende størrelser LPG/c. Dette skal selvfølgelig nøje beregnes ved et mere detaljeret studie.

Weight groups	Notes	Group Weight t of 1000 kg	Center of gravity COG		
			LCG	TCG	VCG
			X (m)	SB (-) PS (+) Y (m)	Z (m)
Group 1000 - Cargo Handling and Access		2706	82.78	0.00	8.56
Group 2000 - Hull Structure	Included = 2% welding + 3% rolling	5545	77.37	0.00	8.97
Group 3000 - Outfit and Equipment		263	45.07	0.00	10.85
Group 4000 - Accommodation		229	116.38	0.00	26.09
Group 5000 - Hull Systems		337	51.72	0.00	7.37
Group 6000 - Machinery Components		722	19.70	0.00	8.34
Group 7000 - Machinery Systems		47	22.54	0.00	8.32
Group 8000 - Electrical Systems & Autom.		243	41.18	0.00	12.65
Total light weight		10092	72.75	0.00	9.29

Margin	Percentage	4.0%	404	0.30
Rounding				
Total light weight including margin and roundings			10495	72.75

Kilde: KEH

Fig. 32 Letvægtsberegningen – cargo tankene er inkluderet i group 1000

Stabilitet – intakt og lækstabilitet

Intakt stabilitet er beregnet efter 2008 Intact Stability Code via NAPA software og følgende konditioner er undersøgt:

LCOND	TEXT	ARR	LGV	T	TR	HEEL
				m	m	deg
LC101	FULL LOAD DEPARTURE	A	D21	9.48	-0.13	0.0
LC102	FULL LOAD ARRIVAL	A	D21	9.46	-0.23	0.0
LC201	BALLAST DEPARTURE	A	D21	5.84	-1.25	0.0
LC202	BALLAST ARRIVAL	A	D21	5.59	-1.66	0.0
LC301	MINIMAL LOAD LOW BUNKERS	A	D21	4.41	-3.03	0.0

Loads and displacement:

LCOND	Cargo	Bunker	Ballast	Deadweight	Displacement
	t	t	t	t	t
LC101	17496.72	2350.61	100.00	20577.33	31072.33
LC102	17496.72	235.00	2321.94	20503.67	30998.67
LC201	0.00	2350.61	4306.12	7286.73	17781.73
LC202	0.00	235.00	5721.21	6406.21	16901.21
LC301	535.61	535.00	806.89	2327.50	12822.50

Stability info:

LCOND	DCRI	STAT	SIDE	GM	MINGM	GM Margin
				m	m	m
LC101	267.2.2.4	OK	PS	2.282	0.150	2.132
LC102	267.2.2.4	OK	PS	2.772	0.150	2.622
LC201	267.2.2.4	OK	PS	5.480	0.150	5.330
LC202	267.2.3.1	OK	PS	6.376	0.253	6.123
LC301	267.2.2.3	OK	PS	6.024	2.340	3.684

Kilde: KEH

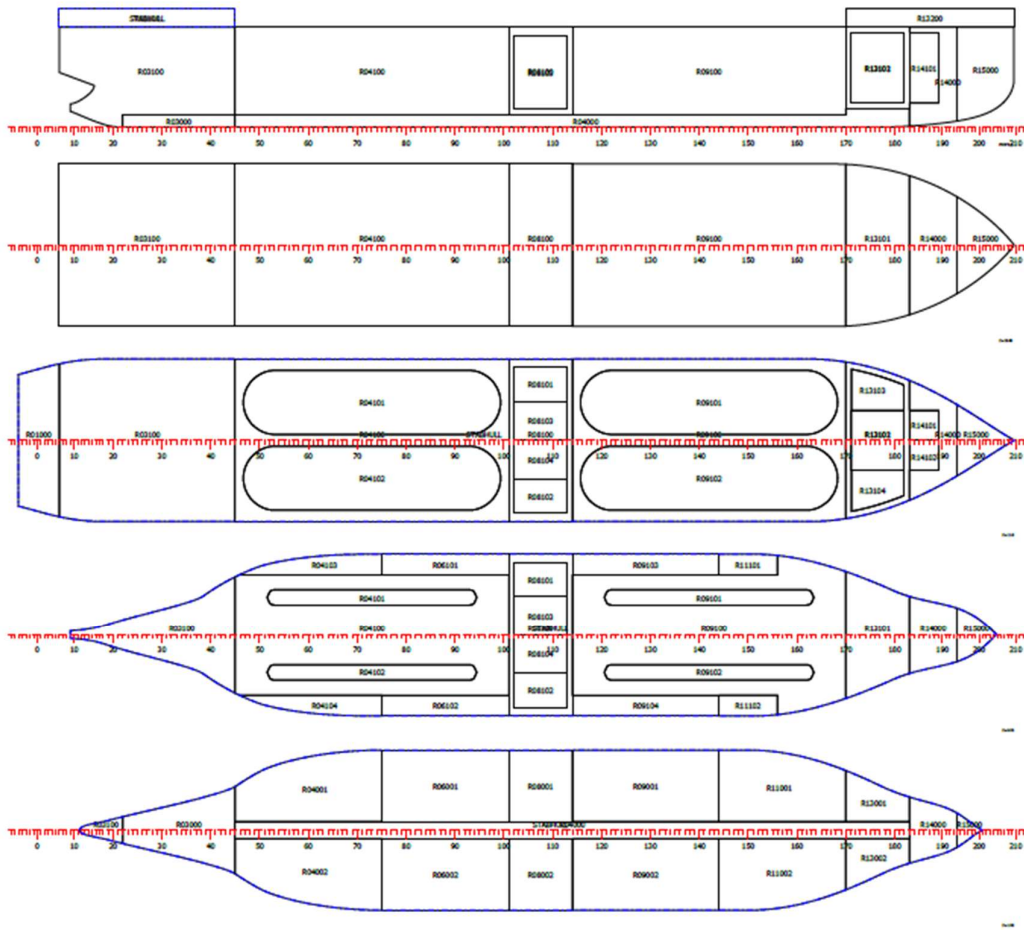
Fig. 33 Lastekonditioner og intakt stabilitets check

Det var ikke forventet at den intakte stabilitet ville forvolde problemer, hvilket ovennævnte resultatet heller ikke antyder.

Lækstabilitet blev beregnet efter 2014 IGC *International Code for the Construction and Equipment of Ships carrying Liquefied Gasses in Bulk* og som en 3G type og via NAPA software. Modellen i NAPA blev lavet for skroget op til 16,3 m over baselinjen samt første etage i apteringen. Den deterministiske metode blev benyttet for en eet-rums skade mellem hovedskodderne samt relevante bundskader.

Under beregningerne blev det klart, at det ville være fordelagtigt at dele de to lastrum med et parti metanol tanke ikke blot med hensyn til trim, men også for at indfri lækstabilitetskravene.

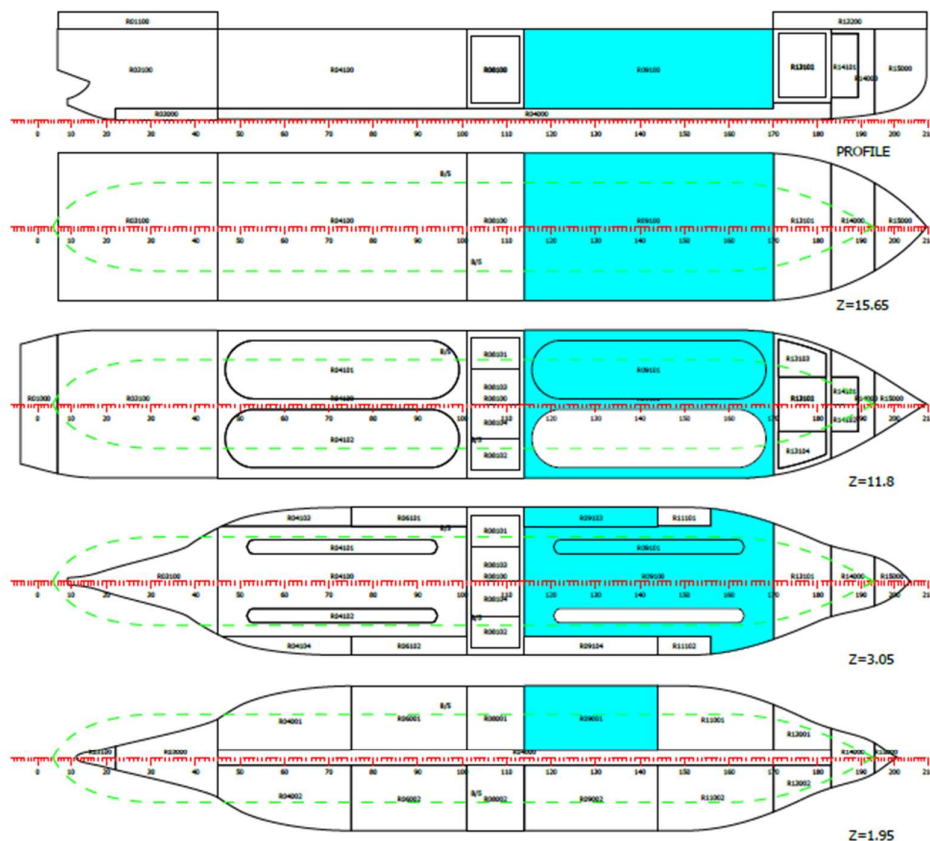
Den endelige rum opdeling kan ses i nedenstående fig 34.



Kilde: KEH

Fig. 34 Ruminddeling for lækstabilitetsberegninger

Som et eksempel på en større skade, hvor skibet overlever, er vist i fig 35. Det var klart, at en to-rumsskade involverende centertankene samt et lastrum og tilhørende bundtanke ville få designet til at fejle, men placering af centertankene har dog tilføjet designet en bedre sikkerhed.



STAGE	PHASES	COMP	DES	IPERM	VOL m ³	XCG m	YCG m	ZCG m
1	3	R09101	CO2 TANK FWD PORT INCLUDING INSULATION	0.95	4457.5	110.00	6.20	8.90
1	3	R09100	CARGO TK HOLD FWD	0.95	7313.6	110.14	0.00	10.05
1	3	R09001	DB WB TK	0.95	521.7	99.60	6.85	1.03
1	3	R09103	WB TK	0.95	237.4	99.60	11.76	3.48

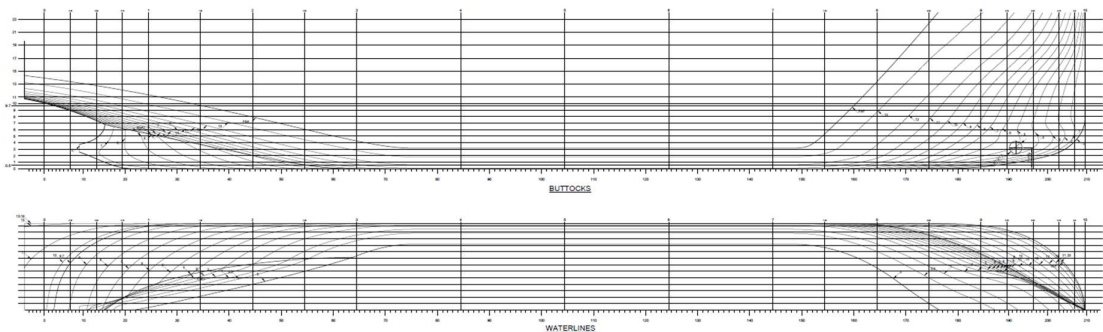
Kilde: KEH

Fig. 35 Typisk eet rumsskade med overlevelse

Linjetegning

Der blev udført de første versioner af linjerne med fokus på fremdrivningsoptimering, optimalt trim samt begrænsning af dobbeltkrumme plader.

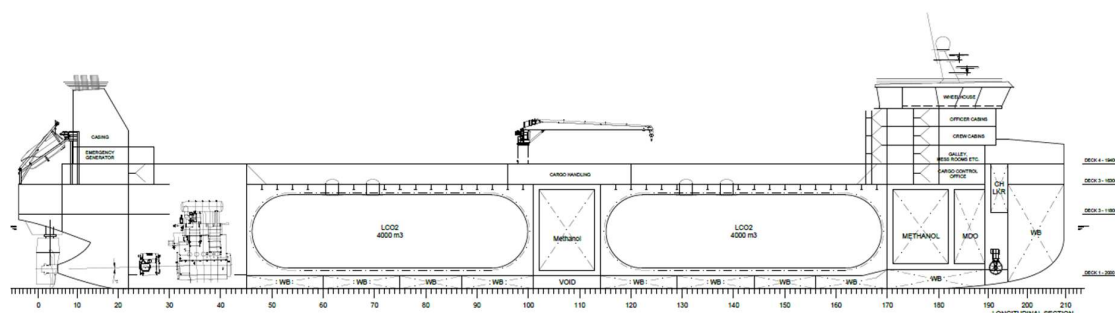
Der bør ved videreførelse af designet lægges fokus på yderligere optimering af skrogformen både med hensyn til fremdrivningsoptimering, men ikke mindst besætningsvelfærd ved apteringens placering foran i skibet. Dette kan eventuelt gøres ved at introducere større opdrift eller en såkaldt Ulstein X-bow[®] for at begrænse accelerationerne i søgang.



Kilde: KEH

Fig. 36 Linjetegning

Beskrivelse af CO₂ carrieren

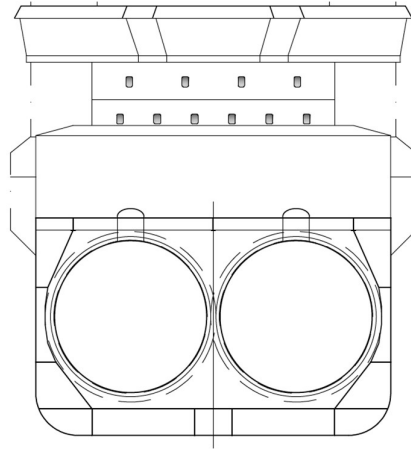


Det endelige design for dette studie er med fire separate CO₂ tanke, hver med en 100% kapacitet på 4.000 m³ installeret i to lastrum separeret af metanol brændstoftanke midtskibs.

Apteringen er placeret forrest i skibet for at sikre en mere balanceret vægtfordeling under fuldlast og ikke mindst i ballast, hvilket kan være en udfordring på grund af den højere vægt af lasten. Vi betragter skibetsdesignet næsten som et såkaldt dødvægtsskib og ikke, som normalt for LPG carrier, et volumeskib.

Da skibet vil sejle 50/50 lastet/ballast er performance i ballastkonditionen lige så vigtig som under fuld last, så målet med designet er at kunne sejle så tæt som muligt på even keel uden det store brug af ballast, hvilket betød at apteringen blev rykket frem i skibet.

Det er klart, at med et operationsområde, der inkluderer Atlanterhavet og Nordsøen, er besætningens komfort vigtig især ved de forventelige større accelerationer, der må forventes ved at flytte apteringen ud i stævnen. Der er flere nuværende skibe med apteringen foran og enkelte har observeret udfordringer med komforten i hårdt vejr, så det skal sikres, at der bliver taget hånd om dette eventuelt med et accelerationsdæmpende forskib f.eks. som Ulstein X-bow®.



Broen er lukket for komfort og de nederste vinduesrækker skal undersøges for styrke mod hårdt vejr.

En singel propeller (CPP) med propeller boss cap fin (PBCF) er installeret agter med et Gate ruder for øge manøvreduktigheden samt forbedre performance. Bov thruster er ligeledes installeret.

Brændstoftankene er placeret med fire metanol tanke midtskibs, fire under apteringen samt to MGO tanke ligeledes under apteringen.

Dag- og service tanke er placeret i maskinrummet sammen med metanolbehandlingssystemet, der er placeret i et separat brandisoleret rum.

Fire Flettner rotor sejl er placeret i par, men som nævnt tidligere skal det nøje undersøges om det giver mening især med hensyn til deres indflydelse på hinanden samt ikke mindst tilbagebetalingstiden. Vi er usikre på om, det giver mening med WAPS især ved brug af grøn metanol til fremdrivning, og i såfald om tilbagebetalingen er tilfredsstillende, og om der skal installeres to eller fire. Så det vil være nærliggende at undersøge disse scenarier i detaljen i det videre design forløb.

Lastrummene er adskilt af metanoltanke midtskibs primært grundet balancen af skibet, men også på grund af lækstabiliteten, hvor skibet har vanskeligt ved at overleve de nødvendige skader i tilfælde af en eet-rums lastrumsskade. Det skal siges at flere offentliggjorte CO₂ carrier designs vises uden denne separering af lastrummene, men det har ikke været muligt for os at indfri lækstabilitetsreglerne uden tankene midtskibs.

Pocket Plan

Til præsentation af CO₂ carrieren blev der udført en pocket plan – se appendix D - der kan benyttes overfor nybygningsmæglere eller direkte til værfter i samarbejde med Knud E. Hansen.

CCS kæde og model

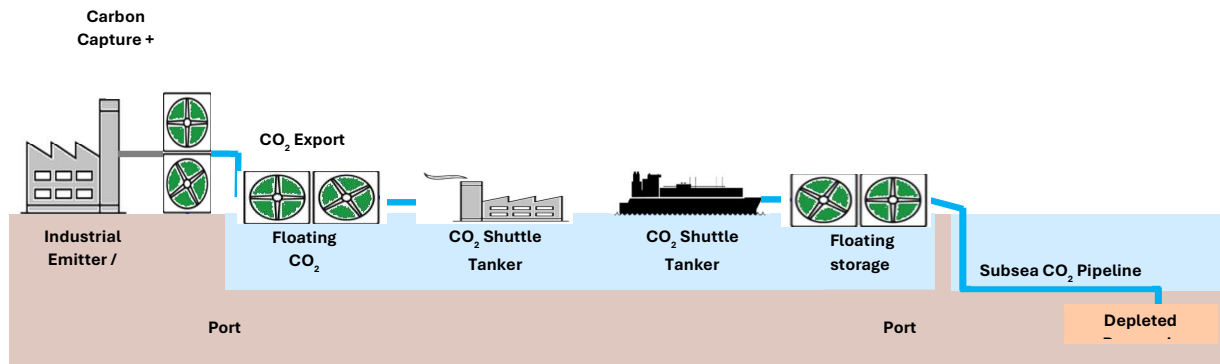


Fig. 37 Typisk CCS kæde

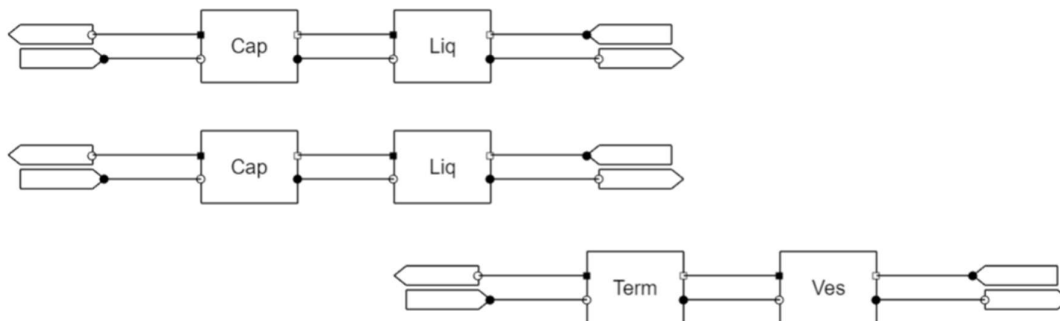
Som nævnt tidligere blev det klart at ved udvikling af et skibsdesign ville det være nødvendigt at vide mere om CCS kæden både downstream og især upstream for at optimere CCS kæden og ikke kun skibet. Vi blev ofte af emitteren spurgt om, hvad vores krav var til den leveret CO₂, hvor vi lige så ofte returnerede med et: hvad ønsker I og hvad er det mest optimale for jer?

Derfor blev en model for simulering af hele værdikæden for CCS udarbejdet med hjælp fra ECA Engineering.

Modellen er opbygget ved hjælp af såkaldt objektorienteret programmering, hvilket betyder at den let kan konfigureres til at simulere forskellige designs af værdikæder.

Et eksempel kan være flere emittere med forskellige CO₂ kvaliteter som kobles på et eller flere fordråbningsanlæg og som f.eks. deler tankanlæg bestående af mange enkelttanke som så endeligt fylder et eller flere skibe som sejler i rutefart til et eller flere deponeringssteder.

Figur 38 viser et eksempel hvor softwaren er konfigureret til at simulere to emittere med hver deres CO₂ fangstanlæg (*Cap*) og fordråbningsanlæg (*Liq*), og hvor begge emittere leverer flydende CO₂ til en terminal (*Term*) som endeligt fylder et skib (*Ves*) der sejler til et deponeringsfelt.



Kilde: ECA Engineering

Fig. 38 Eksempel på en CCS værdikæde som er konfigureret vha softwaren. Diagrammet vises ved at klikke på "ccs chain model" i softwarens grafiske brugerinterface (GUI).

Grundlæggende består CCS værdikæden af velkendte enhedsoperationer som f.eks. brændere, motorer, absorptionstårne, køletårne, kompressorer, varmevekslere, dyser, pumper og tanke, og i mange tilfælde kan de samme enhedsoperation anvendes i flere led i værdikæden.

Eksempelvis benytter en gasturbine, cementbrænder og en marinemotor samme klasse (super class) for beregning af forbrændingsprodukter og energidannelse idet alle brændstoffer kan karakteriseres ud fra en kemisk sætning og en brændværdi.

Ligeledes benytter objektet for simulering af en LCO₂ terminal den samme klasse (super class) for simulering af dets tryksatte og isolerede tanke, lige som objektet for et skib bruges til at simulere dets tryksatte og kølet tanke.

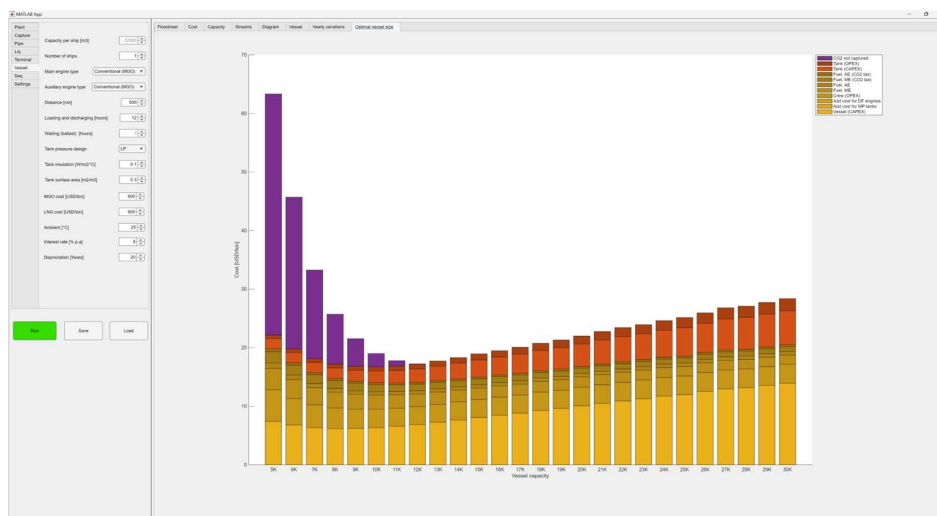
Ovennævnte objekter har alle brug for termodynamiske data for de strømme som går ud og ind af objekterne. Objekterne er derfor programmeret til at kommunikere med en såkaldt CapeOpen standard, hvorved de kan trække alle nødvendige termodynamiske data fra eksisterende funktioner til beregning af eksempelvis densiteter, enthalpier, og entropier som funktion af tryk, temperatur og sammensætning.

Dette er særligt relevant for blandinger, idet blot små urenheder som særligt N₂, O₂ eller NO_x har stor indflydelse på den energi der skal benyttes til fordråbningen af CO₂ og da splittet mellem gas og væske er kraftigt ulinært. Endvidere er det vigtigt for at overholde standarder defineret for den endelige CO₂ (eksempelvis Northern Light).

Den samlede model er anvendt til at optimere skibsstørrelsen for en case i samarbejde med en emitter.

Af figur 39 fremgår at et skib med en kapacitet på 12.000 m³ LCO₂ vil have de laveste totalomkostninger (OPEX inkl brændstof plus afskrivninger på CAPEX).

De væsentligste parametre for optimering af skibsstørrelsen kan justeres i panelet til venstre på figuren og har alle meget stor indflydelse på den optimale skibsstørrelse der findes.



Kilde: ECA Engineering

Fig. 39 Optimering af skibsstørrelse i en udleders CCS værdikæde. Y-aksen viser samlede totalomkostninger som er summen af afskrivningerne på investeringerne og

driftomkostningerne. X-aksen viser skibsstørrelserne fra 5.000 til 30.000 ton CO₂ kapacitet. I panelet til venstre kan der vælges forskellige antal skibe og ændres designtryk samt en række andre relevante parametre.

Ovenstående er vist som konkrete eksempler, men styrken i modellen er naturligvis, at en anden CCS kæde let kan konfigureres, illustreres, simuleres og optimeres vha den udviklede software.

Programmet er tilgængeligt via en app og kan skræddersyes til den pågældende CCS kæde, der ønskes undersøges. Det er muligt at få adgang til appen ved henvendelse til ECA Engineering.

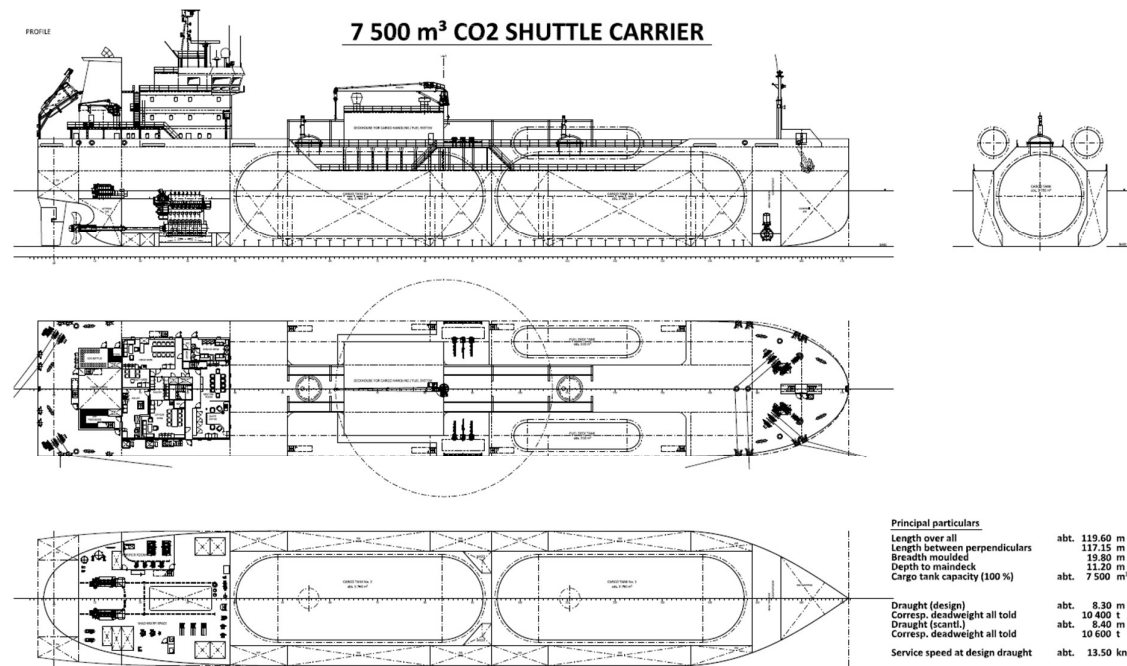
Forkortelser

AiP:	Approval in Principle
ALS:	Air Lubrication Systems
ARA:	Amsterdam-Rotterdam-Antwerpen trading area
CAPEX:	Capital Expenditures
CCS:	Carbon Capture & Storage
CPP:	Controlable Pitch Propeller
EEA (EØS):	European Economic Area
EEDI:	Energy Efficiency Design Index
ETS:	Emission Trading Scheme
EUA:	European Union Allowance
EØS (EEA):	Det Europæiske Økonomiske Samarbejdsområde
FPP:	Fixed Pitch Propeller
GFI:	Greenhouse Gas Fuel Intensity
GHG:	Green House Gas
HFO:	Heavy Fuel Oil
IGC:	International Gas Code (2016 edition)
IMO:	International Maritime Organization (UN)
Klasse:	Klassifikationselskaber såsom ABS, DNV, Lloyd's med videre
LCB:	Longitudinal Center of Bouyancy
LED:	Light Emitting Diode
LCA:	Life Cycle Analasys
LCV:	Lower Calorific Value
LP:	Low pressure

MARVS:	Maximum Allowable Relief Valve Setting
MGO:	Marine Gas Oil
MP:	Mid pressure
OPEX:	Operational Expenditures
PBCF:	Propeller Boss Cap Fin
PTO:	Power-take-out (shaft generator)
RED II:	Renewable Energy Directive II (European)
SECA:	Sulphur Emission Controlled Area
TtW:	Tank-to-Wake
VCM:	Vinyl Chloride Monomer
VFD:	Variable Frequency Drive
WAPS:	Wind Assisted Propulsion System
WtW:	Well-to-Wake

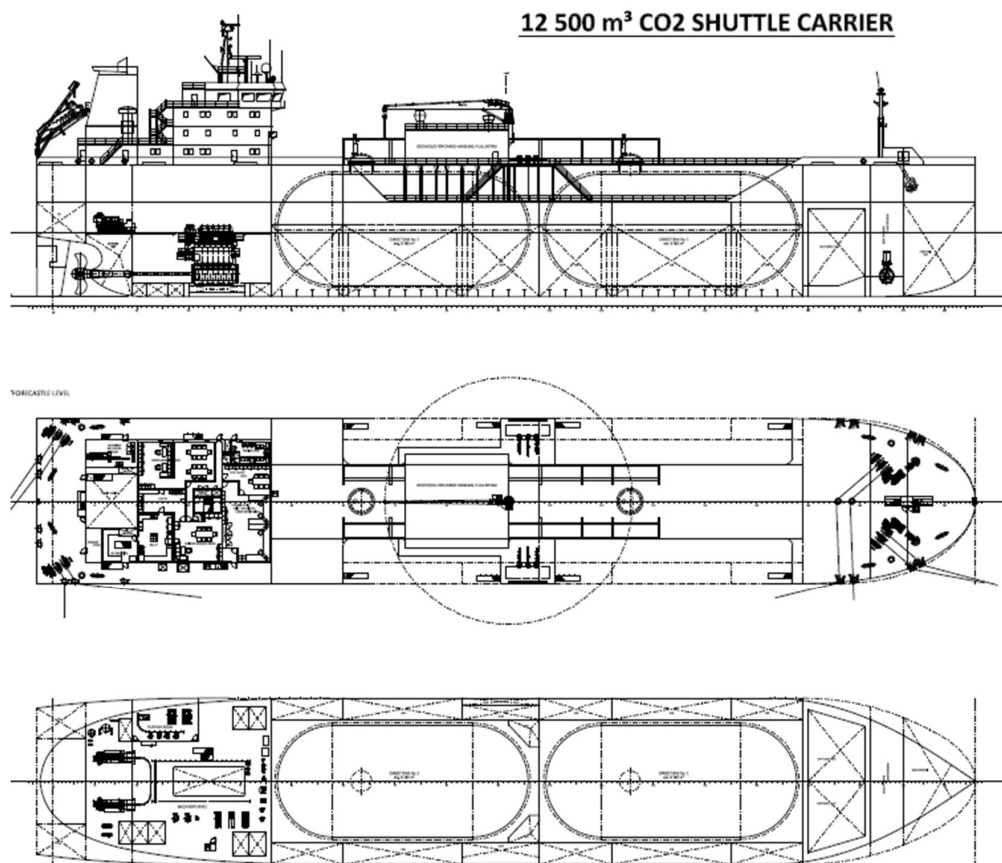
Appendiks A – LP skibsdesign

Appendiks A – 7.500 m³ LP CO₂ carrier



Kilde: TGE Marine

Appendiks A – 12.500 m³ LP CO₂ carrier



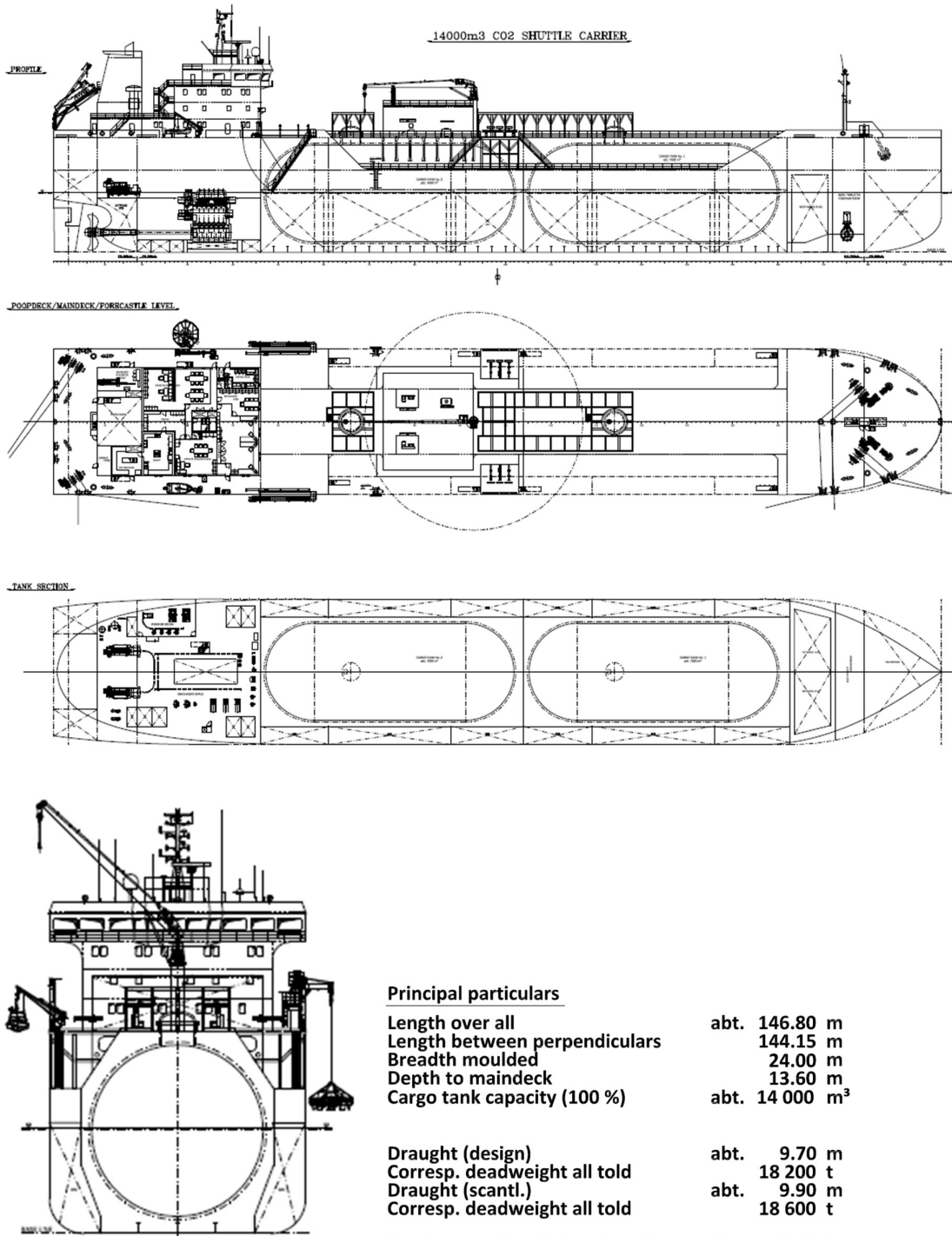
Kilde: TGE Marine



Kilde: TGE Marine

Fig 40 12.500 m³ LP CO₂ carrier

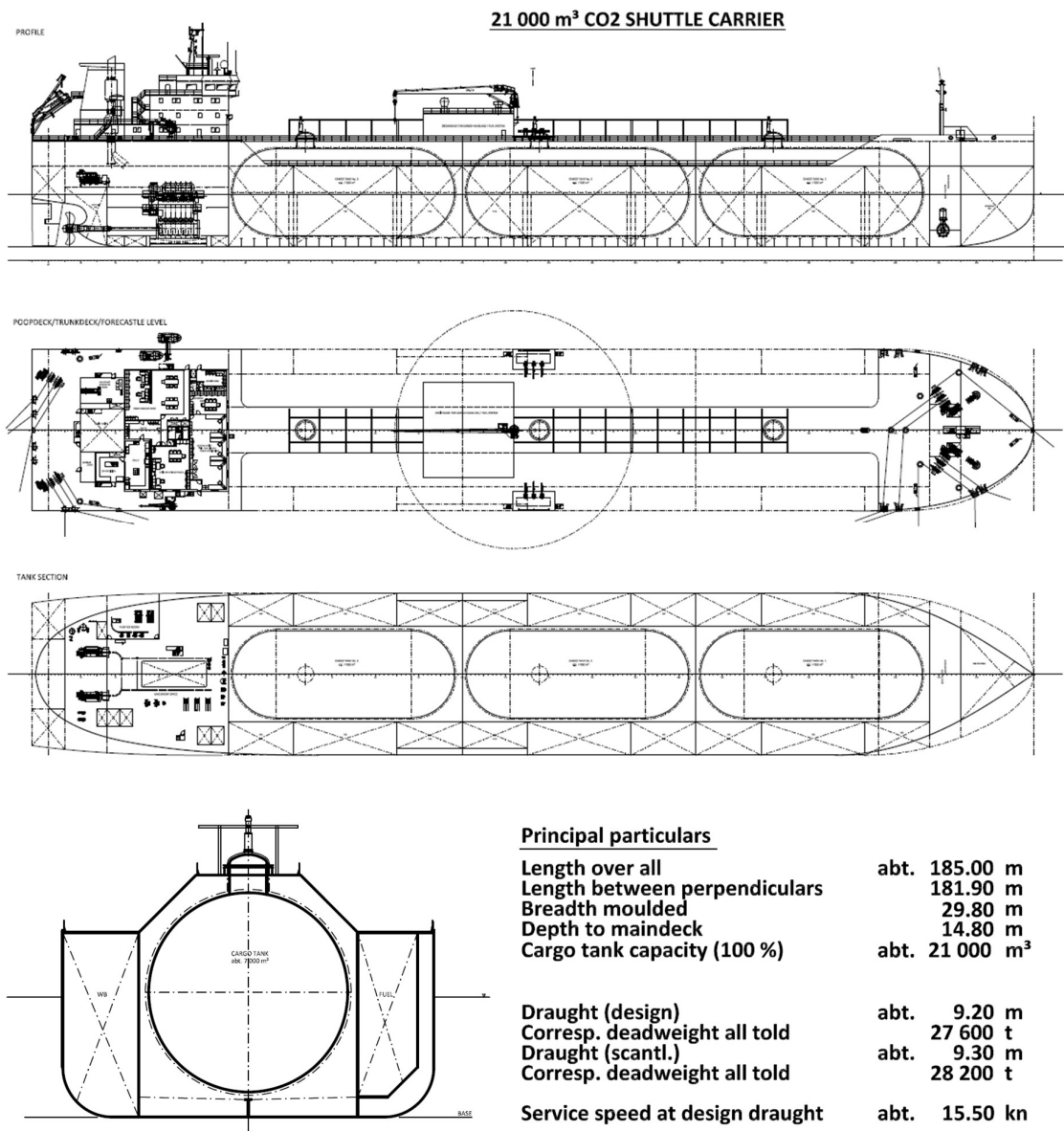
Appendiks A – 14.000 m³ LP CO₂ carrier



Kilde: TGE Marine

Fig 41 14.000 m³ LP CO₂ carrier

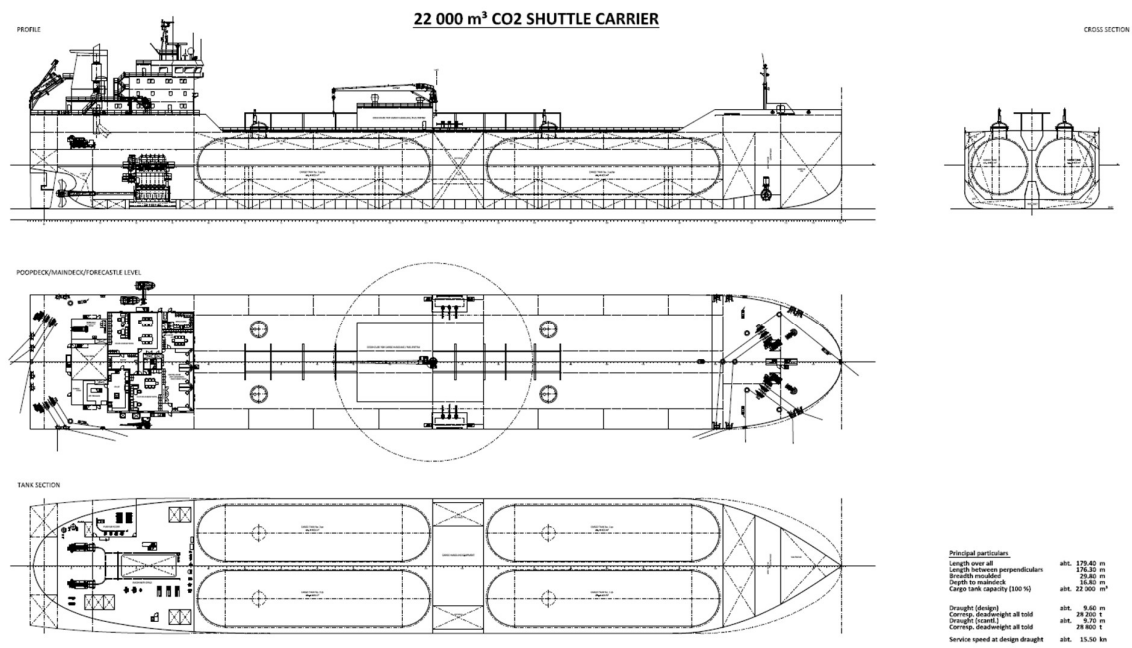
Appendiks A – 21.000 m³ LP CO₂ carrier



Kilde: TGE Marine

Fig 42 21.000 m³ LP CO₂ carrier

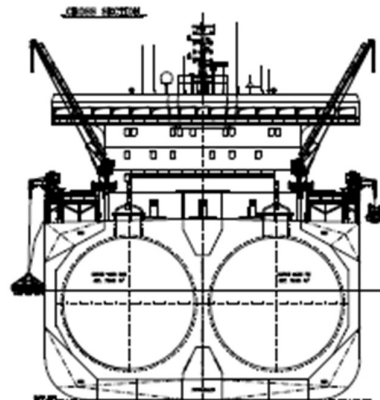
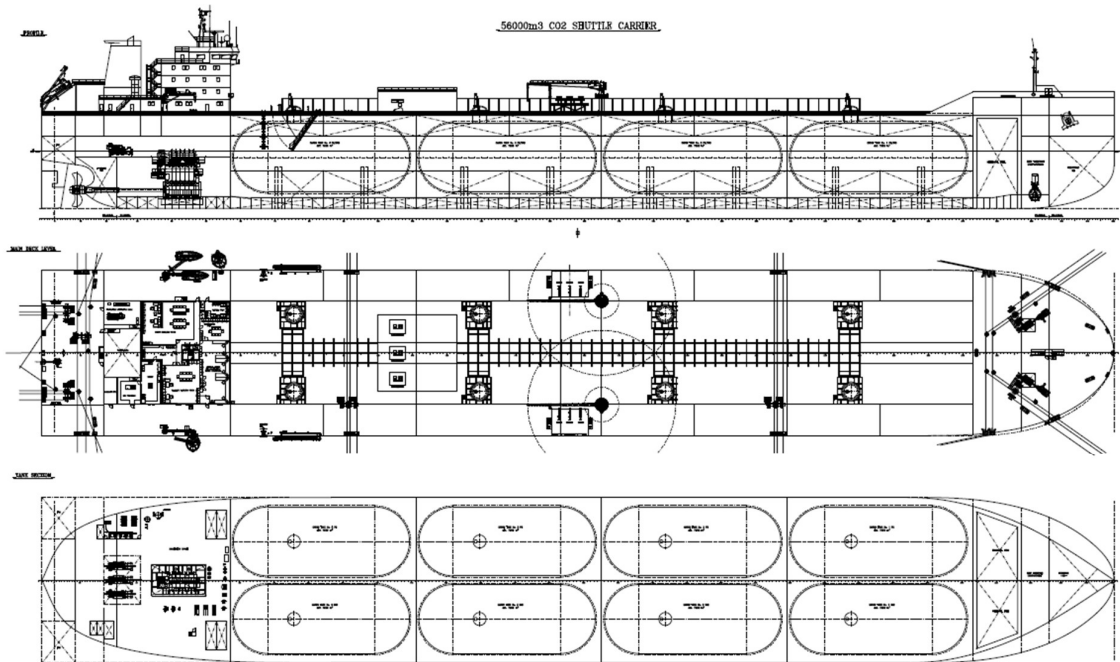
Appendiks A – 22.000 m³ LP CO₂ carrier



Kilde: TGE Marine

Fig 43 22.000 m³ LP CO₂ carrier

Appendiks A – 56.000 m³ LP CO₂ carrier



Principal particulars

Length over all	abt. 249.75 m
Length between perpendiculars	246.39 m
Breadth moulded	38.40 m
Depth to maindeck	21.60 m
Cargo tank capacity (100 %)	abt. 56 000 m ³
Draught (design)	abt. 13.10 m
Corresp. deadweight all told	69 600 t
Draught (scantl.)	abt. 13.30 m
Corresp. deadweight all told	71 000 t
Service speed at design draught	abt. 15.50 kn

Kilde: TGE Marine

Fig 44 56.000 m³ LP CO₂ carrier

Appendiks A – 12.500 m³ LP CO₂ shuttle carrier for Greensand

12 500 m³ CO₂ Carrier

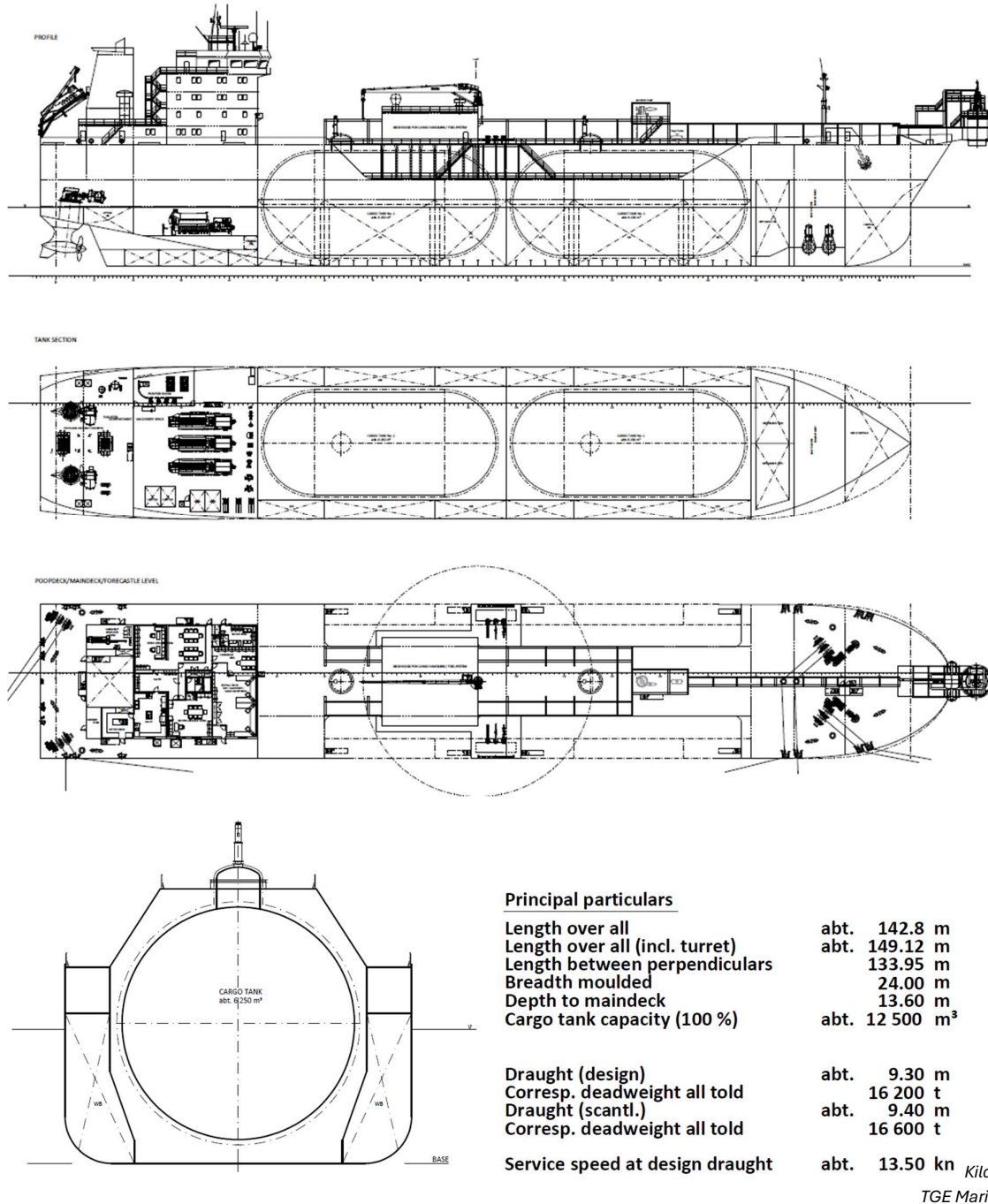
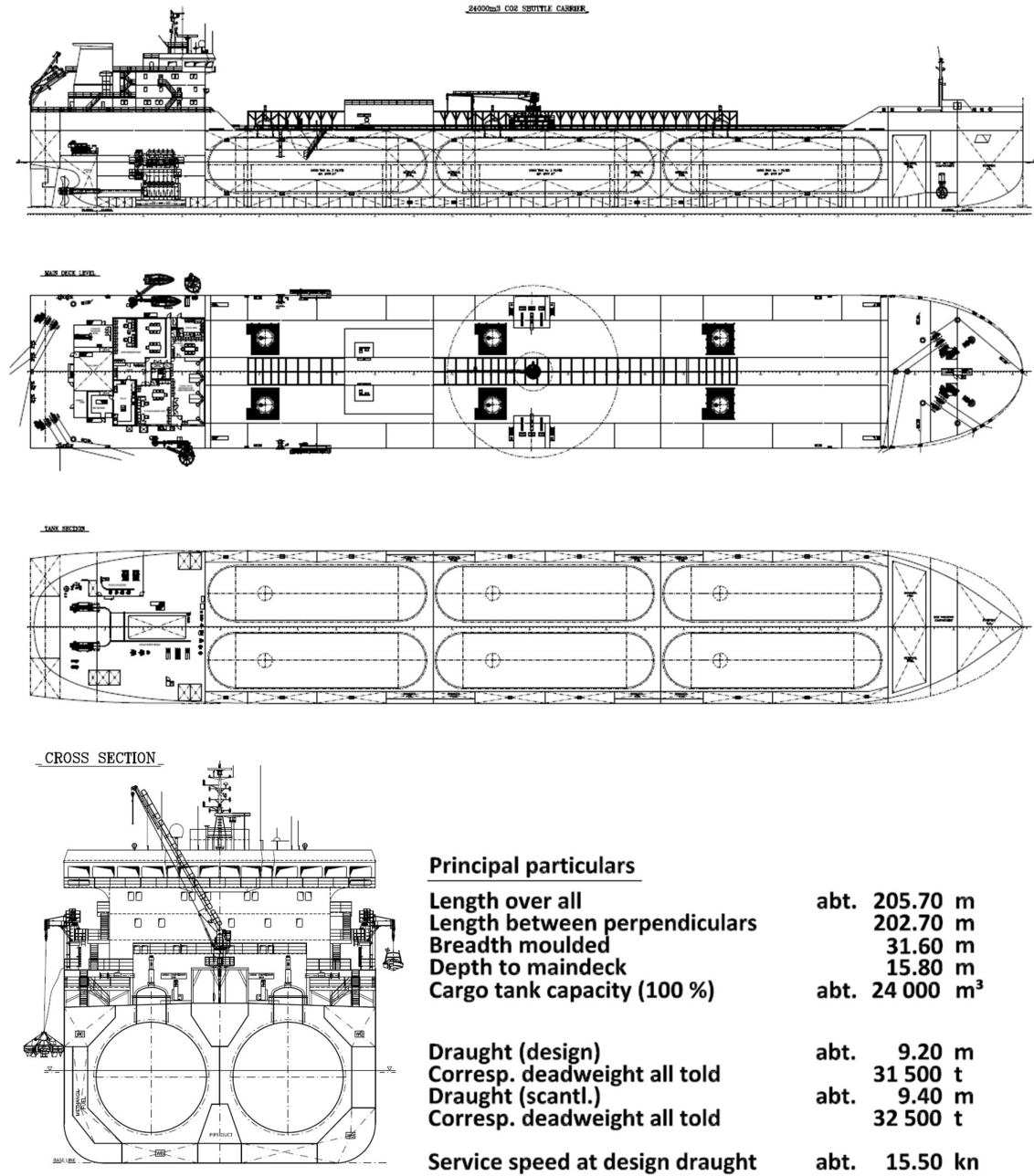


Fig 45 12.500 m³ LP CO₂ carrier with turret off-loading; for Greensand project

Appendiks B – MP skibsdesign

Appendiks B – 24.000 m³ LP CO₂ carrier



Kilde: TGE Marine

Fig 46 24.000 m³ MP CO₂ carrier – Iceland & Carbfix trade

Appendiks C – Approval in Principle by ABS: 12.500 m³ LP and 22.000 m³ LP

APPROVAL IN PRINCIPLE



as requested by:

Dan-Unity CO2

Date of Issuance: 10 November 2021

Certificate Number: T2188705

ABS has reviewed the documentation as specified in the ABS letter dated 2 November 2021 (Task No. T2183451/489), 8 November 2021 (Task No. T2183450/489/632 and T2183467) and dated 3 November 2021 (Task No. T2183493) in accordance with the ABS 2017 *Guidance Notes on Review and Approval of Novel Concepts*, and considers that the conceptual engineering as proposed is feasible for the intended application, and the facilities as presented are, in principle, in compliance with the applicable requirements of the *ABS Rules for Building and Classing Steel Vessels 2021*; *International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS 1974)*; *IMO International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk (IGC Code)*.

Facility: 12,500 cbm CO2 Carrier

Description: Approval in Principle of Cargo Tanks and Cargo Handling System

New Technology Maturity Level:

[Subsystem B – Concept Verification Stage]

To achieve final class approval of the subject design, the conditions and requirements as specified in the Approval Road Map [2 November 2021 (Task No. T2183451/489), 8 November 2021 (Task No. T2183450/489/632 and T2183467) and dated 3 November 2021 (Task No. T2183493)] must be satisfied.

Bin-Hong Wang
Director of Engineering, ABS

By:

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Ya-Lin Li", written over a horizontal line.

Ya-Lin Li
Manager – Machinery, ABS

Note: This certificate evidences compliance with one or more of the Rules, Guides, standards or other criteria of American Bureau of Shipping or a statutory, industrial or manufacturer's standards and is issued solely for the use of the Bureau, its committees, its clients or other authorized entities. Any significant changes to the aforementioned product without ABS approval will result in this certificate becoming void. This certificate is governed by the terms and conditions in the ABS Rules.

APPROVAL IN PRINCIPLE



as requested by:

Dan-Unlty CO2

Date of Issuance: 10 November 2021

Certificate Number: T2188462

ABS has reviewed the documentation as specified in the ABS letter dated 2 November 2021 (Task No. T2183456/487), 8 November 2021 (Task No. T2183454/487/638 and T2183469) and dated 4 November 2021 (Task No. T2183488) in accordance with the ABS 2017 *Guidance Notes on Review and Approval of Novel Concepts*, and considers that the conceptual engineering as proposed is feasible for the intended application, and the facilities as presented are, in principle, in compliance with the applicable requirements of the *ABS Rules for Building and Classing Steel Vessels 2021*; *International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS 1974)*; *IMO International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk (IGC Code)*.

Facility: 22,000 cbm CO2 Carrier

Description: Approval in Principle of Cargo Tanks and Cargo Handling System

New Technology Maturity Level:

[Subsystem B – Concept Verification Stage]

To achieve final class approval of the subject design, the conditions and requirements as specified in the Approval Road Map [2 November 2021 (Task No. T2183456/487), 8 November 2021 (Task No. T2183454/487/638 and T2183469) and dated 4 November 2021 (Task No. T2183488)] must be satisfied.

Bin-Hong Wang
Director of Engineering, ABS

By:

Ya-Lin Li
Manager – Machinery, ABS

Note: This certificate evidences compliance with one or more of the Rules, Guides, standards or other criteria of American Bureau of Shipping or a statutory, industrial or manufacturer's standards and is issued solely for the use of the Bureau, its committees, its clients or other authorized entities. Any significant changes to the aforementioned product without ABS approval will result in this certificate becoming void. This certificate is governed by the terms and conditions in the ABS Rules.

ENG-ATT-00307

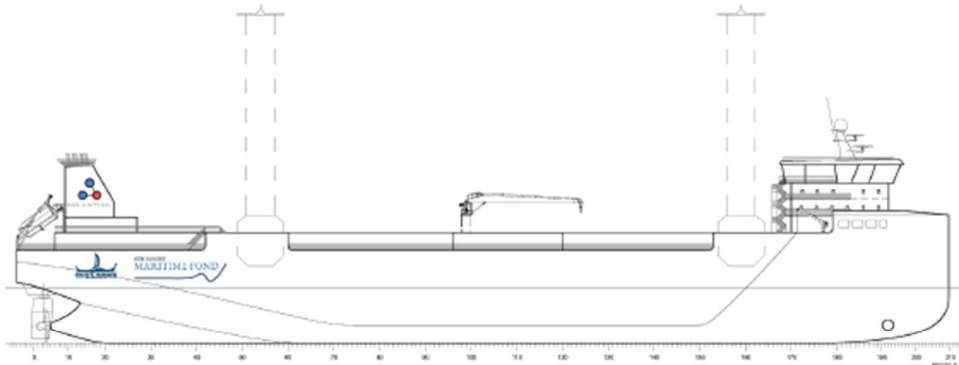
Revision 0

Page 1 of 1

Appendiks D – 16.000 MP design: Pocket Plan



DAN-UNITY LCO2 CARRIER



The LCO2 tanker is designed to transport medium pressure LCO2 between ports. The design of the ship is tailored for the operation in the North Atlantic area. The design includes four times 4,000 m3 LCO2 tanks, given a total gross volume of 16,000 m3.

The ship is prepared for future fuels such as methanol and bio-diesel, but can also be delivered for bio-LNG, ammonia etc.

The ship is highly optimized in all details to lower energy consumption and features among others the following features:

- One long stroke slow running 2-stroke main engine,
- ORC units to transform waste heat into electrical power,
- 4 Flettner rotors to provide wind assistant propulsion,
- Air lubrication to lower hull friction,
- Gate rudder.

MAIN PARTICULARS

Length o.a.	163.00 m
Length p.o	158.00 m
Breadth, moulded	26.60 m
Draught (design)	9.70 m
Depth to main	16.30 m

CAPACITY

LCO2 tanks gross volume	16,000 m ³
No. of LCO2 tanks	4 pcs
LCO2 tank design pressure	19 barg

SPEED

Service speed	15.50 kn
---------------	----------

MACHINERY & EQUIPMENT

Diesel main engines	MAN-ES 5G60ME-C10.5-LGIM
Installed power	1 x 9,771 kW
Aux. power	3 x 1,200 KW

SCOPE OF WORK

General Arrangement
Stability calculations
CFD hull optimization
Energy saving strategy

WE DESIGN SHIPS We are a leading independent consultancy providing a comprehensive range of design, engineering and project management services to shipyards and ship owners around the world. Our innovative, customized solutions cover areas ranging from concept, tender/contract & basic design, to supporting the building and conversion process of all types of maritime vessels and offshore structures, to energy optimization and services for the offshore wind industry. Since 1937, over 800 vessels have been built and over 400 conversions carried out to our designs. WWW.KNUDEHANSEN.COM

REF: 230651 - 2024.03.05

Appendiks E – 16.000 MP design: scope of work

Deliverable	Scope of Work/Remarks
Requirement For Design	<p>The requirements from client to be listed and agreed. One page with bullet points to be created.</p> <p>In general the outset will be the already provided GA from client; however this needs to be “taken over” by KEH and a proper general arrangement to be made as per KEH standards.</p> <p>As client has already performed initial development of the design the following to be informed as constrains for the optimization (not exhaustive):</p> <ul style="list-style-type: none">• Displacement and associated draughts

	<ul style="list-style-type: none"> ○ Draught from general arrangement supplied by Client or as agreed with Client at project start (below 10m but not a must) • Onboard cargo tanks and amount of contents <ul style="list-style-type: none"> ○ From material supplied by Client • Speed range <ul style="list-style-type: none"> ○ From general arrangement supplied by Client or as agreed at project start. Expected around 15.5 kn, but to be further evaluated when speed/power is available, see milestones. • Draught limitations in operation <ul style="list-style-type: none"> ○ As per table 1 • Draft limitations in operation <ul style="list-style-type: none"> ○ None considered • Possible SAL system is considered as an option for the project and with this also the necessary DP2 notation and thrusters. • Intended fuel <ul style="list-style-type: none"> ○ Methanol or ammonia considered. Ship should be able to carry both, however methanol space reservation could impact some particulars of the ship. • Route data for optimization <ul style="list-style-type: none"> ○ From Client: ARA (Antwerp-Rotterdam-Amsterdam) to Straumsvik in Iceland and return <p>Table 1: Port restrictions in Iceland Straumsvik max:</p> <p>Quay 1: Mooring draft: max 12 m Loa: 180 m Bm: 27 m</p> <p>Quay 2: Mooring draft: max 10 m Loa: 200 m Bm: 30 m</p>
--	--

A Hull development single boss hull	Summary sheet to be created. To be developed to a stage where comparing between the two hulls A and B is possible.
A.1 Single boss hull lines	2D line plan. One drawing to be delivered.
A.2 Single boss power prediction	Power prediction based on empirical approach and CFD. One summary power to be delivered.
A.3 Single boss stability	Evaluation of trim and stability.

	Does only include major tanks already located by client (cargo, fuel and ballast). One calculation to be delivered.
A.4 Propulsion concept	Outline of propulsion concept. One report to be delivered (1-3 pages).
A.5 EEDI calculation	One calculation to be delivered.
A.6 Lightweight and COG estimation	Estimation needed for hull development. One summary calculation to be delivered.
B Optimization of twin skag	Summary sheet to be created. To be developed to a stage where comparing between the two hulls A and B is possible.
B.1 Twin skag lines	2D line plan. One drawing to be delivered.
B.2 Twin skag power prediction	Power prediction based on empirical approach and CFD. One summary power to be delivered.
B.3 Twin skag stability	Evaluation of trim and stability. Does only include major tanks already located by client (cargo, fuel and ballast). One calculation to be delivered.
B.4 Propulsion concept	Outline of propulsion concept One report to be delivered (1-3 pages).
B.5 EEDI calculation	One calculation to be delivered.
B.6 Lightweight and COG estimation	One summary calculation to be delivered.
Milestone workshop	Meeting to summarize and decide upon A or B. Minor adjustments to be accommodated to be agreed.
Milestone conclusion sheet	To settle the hull to optimize, A or B
Optimization meeting	As suggested by Client, Njord to comment on possible savings that could be introduced into the design. Time for delivery of data to Njord and meeting to be planned by KEH. Considered to be via TEAMS or a meeting of max one day at KEH office in Helsingør (DK).
C Selected hull final loop	The purpose is to finalize the selected hull.

C.1 Hull lines	Final loop for minor adjustments. One updated drawing to be delivered.
C.2 Power prediction	Power prediction update based on empirical approach and CFD. One updated summary calculation to be delivered. Ballast and design condition shall be included as 50/50% of time.
C.3 Stability	Evaluation of trim and stability as well as intact and damage stability. Based on the KEH updated general arrangement.
C.4 Propulsion concept	Outline of propulsion concept One updated report to be delivered. Will include major components as outline in conceptual stage. Will not be specified in details as this is subject to detailed design. Gensets will not be specified with power rating as this is subject to detailed design. Consumption for gensets, or aux power from shaft generators, will however be indicated for client calculation of Cii and EEOI. CAPEX and OPEX not included for propulsion concept.
C.5 EEDI	One updated calculation to be delivered.
C.6 General arrangement update	KEH to make a KEH general arrangement based on Clients general arrangement but a general arrangement that suits the stability and optimized hull lines. The number and capacity of cargo tanks to be as for the provided general arrangement from client. Tanks to be included in the GA (Not minor engine room tanks). If existing GA can be delivered in (DWG/DXF) tank etc. can be transferred. If not possible KEH can see if a PDF to CAD conversion is possible.
Light weight	Updated light weight. Tolerances as for a typical design at this stage.

Appendiks F – 16.000 MP design: speed & performance

Hull version	HULL11 / HULL23	
Length betw. perpendiculars	Lpp	159.93 m
Waterline length	L	158.75 m
Breadth	B	26.60 m
Draught	T	9.70 m
Hull volume, bare hull	∇	31140 m ³
Wetted surface, bare hull	S	5929 m ²

PRELIMINARY

- Notes:**
- Propulsion efficiencies from manufacturer data
 - Single screw, Dp = 6.1m, Z=4

- Design Condition:**
- Seawater of 1.025t/m³ at 15 deg C
 - Clean bottom, appendages and propeller
 - Deep water
 - Calm (BF0), with no wind, waves or current
 - Even keel

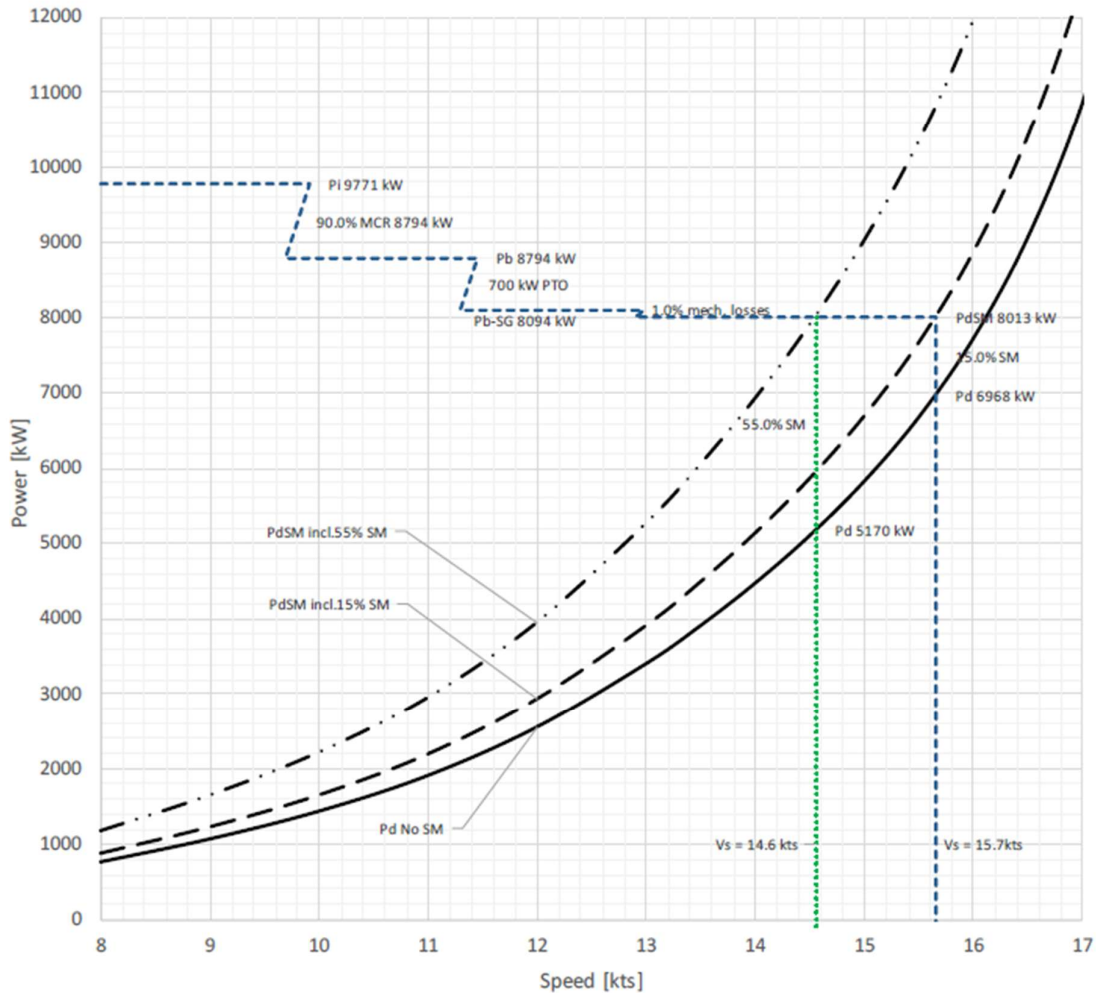
Main Engine:

5G60ME-C10.5-LGIM-EGRBP

Available delivered power including sea margin (PdSM*): 8013 kW

*Available PdSM based on below efficiencies / coefficients:

Diesel-Mechanical SG 700 kW MCR 90% Shaft eff. 0.99 Gear eff. 1.00



Pi	Installed power
MCR	Maximum allowable engine load
Pb	Available brake power
Ps	Available shaft power
SM	Sea margin to account for wind, waves and current
PdSM	Available delivered power including sea margin
Pd	Available delivered power
Vs	Attainable ship speed

Table 3. Power prediction for 15% Sea Margin

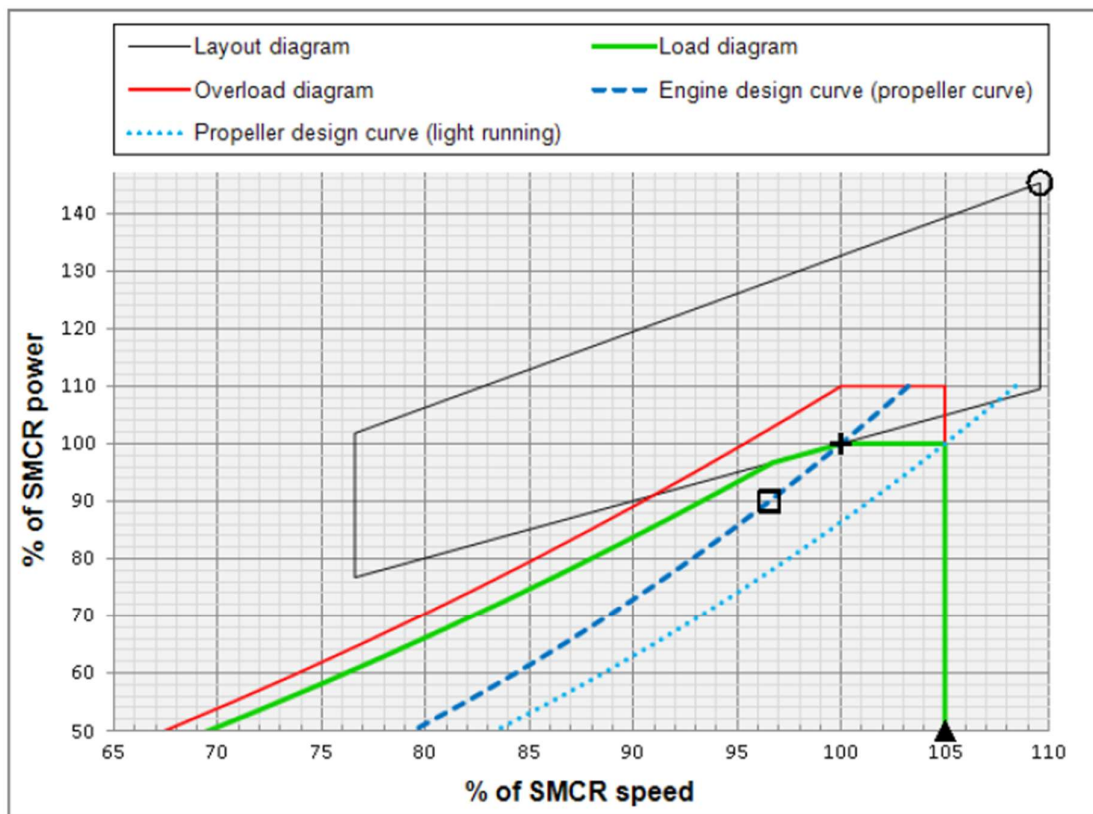
Speed [kts]	Fn [-]	Pd [kW]	Pd _{SM} [kW]	Ps (EEDI) [kW]	PbSM [kW]	Pinst [kW]
8.0	0.104	758	871	765	880	1756
9.0	0.117	1062	1221	1073	1234	2149
10.0	0.130	1430	1644	1444	1661	2623
11.0	0.143	1903	2189	1922	2211	3234
12.0	0.156	2548	2930	2573	2959	4066
13.0	0.169	3398	3907	3432	3947	5163
13.5	0.176	3903	4489	3943	4534	5815
14.0	0.182	4466	5136	4511	5188	6542
14.5	0.189	5097	5862	5149	5921	7356
15.0	0.196	5817	6690	5876	6758	8286
15.5	0.202	6667	7667	6734	7744	9382
16.0	0.209	7711	8867	7788	8957	10730
16.5	0.215	9051	10409	9143	10514	12460
17.0	0.222	10840	12466	10949	12591	14768
17.5	0.228	13288	15281	13422	15436	17929

Appendiks G - Engine type & layout:

MAN Energy Solutions



CEAS Engine Data report 5G60ME-C10.5-LGIM-EGRBP



The Light Running Margin (LRM) shown is 5%. Recommended value is 4-7%, for special cases up to 10%. The LRM should be evaluated for each ship project depending on for example: In-service increase of vessel resistance, ship manoeuvring requirements, additional engine load due to power take-out (PTO) and possible requirements related to a barred speed range (short passing time).

Point		Power kW	Speed r/min	MEP bar
+	SMCR: Specified Maximum Continuous Rating (68.8% of NMCR)	9,771	94.0	15.8
□	NCR: Normal Continuous Rating (90.00% of SMCR)	8,794	94.0	14.2
	Maximum over load (110% of SMCR)	10,748	-	-
▲	Maximum speed limit (105% of SMCR)	-	98.7	-
○	L1, NMCR: Nominal Maximum Continuous Rating	14,200	103.0	21.0

Specified Main Engine and Other Parameters

Specified parameters	
Type of propeller	Controllable pitch propeller
Cooling system	Central water cooling system
Hydraulic control oil system	Common (system oil)
Hydraulic power supply	Mechanical
Cylinder oil lubricator type	Alpha lubricator
Fuel sulphur content for engine design	Low sulphur
Sulphur in fuel (Tier II)	max 0.5% sulphur
Sulphur in fuel (Tier III)	max 0.1% sulphur
NOx emission compliance	Tier II / Tier III
Pilot oil energy fraction	Nominal 5.0%

Turbocharger specifications	
Turbocharger efficiency	High efficiency
Exhaust gas bypass	With EGB
Number of turbochargers and make/type	1 x MAN TCT40-ML
Turbocharger lubricating	Common (system oil)
Exhaust gas scrubber for high sulphur	Not installed
Exhaust back pressure (Tier II)	30 mbar
Exhaust back pressure (Tier III)	30 mbar

Fuel Consumption and Gas Figures

	Tier II		Tier III	
	SMCR g/kWh	NCR g/kWh	SMCR g/kWh	NCR g/kWh
SFOC				
ISO	165.0	160.4	167.0	164.3
Tropical	166.7	162.1	168.8	166.0
Specified	163.0	158.5	165.0	162.3

SFOC: Specific Fuel Oil Consumption (LCV: 42,700 kJ/kg)

	Tier II		Tier III	
	SMCR g/kWh (kJ/kWh)	NCR g/kWh (kJ/kWh)	SMCR g/kWh (kJ/kWh)	NCR g/kWh (kJ/kWh)
SPOC/SGC (Heat rate)				
ISO	11.07/326.0 (6,960)	12.30/312.1 (6,737)	11.07/330.3 (7,045)	12.30/320.4 (6,901)
Tropical	11.07/329.7 (7,034)	12.30/315.7 (6,808)	11.07/334.0 (7,120)	12.30/324.0 (6,974)
Specified	11.07/321.8 (6,877)	12.30/308.1 (6,656)	11.07/326.0 (6,961)	12.30/316.2 (6,818)

SPOC: Specific Pilot Oil Consumption (LCV: 42,700 kJ/kg)

SGC: Specific Gas Consumption (LCV: 19,900 kJ/kg)

	Tier II		Tier III	
	SMCR kg/s	NCR kg/s	SMCR kg/s	NCR kg/s
Exhaust gas amount				
ISO	19.1	17.7	18.1	16.5
Tropical	17.3	16.0	17.0	15.5
Specified	19.6	18.2	18.3	16.7

	Tier II		Tier III	
	SMCR °C	NCR °C	SMCR °C	NCR °C
Exhaust gas temperature				
ISO	268	242	217	205
Tropical	316	288	261	247
Specified	241	217	194	182

	Tier II		Tier III	
	SMCR kg/s	NCR kg/s	SMCR kg/s	NCR kg/s
Turbocharger air consumption				
ISO	18.1	16.9	17.5	16.0
Tropical	16.6	15.5	16.6	15.2
Specified	18.7	17.4	17.7	16.2

ISO, tropical and specified conditions are listed in the References and tolerances section.

Expected lubricating oil consumption

Fuel sulphur	Cylinder oil consumption	Lubricating oil consumption
0.1%-0.5%	minimum 0.6 g/kWh	from negligible to 0.1 g/kWh

Capacities of Pumps and Coolers

Pump	Flow capacity m ³ /h	Pump head bar
Fuel oil circulation	5.3	6.0
Fuel oil supply	2.7	4.0
Jacket cooling water	80	3.0
Lubricating oil	280	4.2
Central fresh water	300	2.5
Sea water for central cooling	360	2.0

The pump heads stated are for guidance only, and depend on the actual pressure drop across coolers, filters, etc. in the systems. The capacities do not account for any components other than the engine itself.

Flow capacities of cooler(s) on engine	Central water flow m ³ /h
Total flow capacity for scavenge air- / EGR cooler(s) ^{*)} **	200

*) This engine has 1 EGR string installed.

**) This engine can be ordered with Adaptive Cooling. It requires a custom made CEAS report and frequency drives for pumps in engine room.

Capacities of auxiliary heat exchangers		Central water flow m ³ /h	Heat dissipation kW
Central cooler	Sea water flow	360	7,340
Jacket water cooler	Jacket water flow	80	1,420
Lubricating oil cooler	Oil flow	280	920

All flows are stated as minimum required flows.

The heat capacity of the central cooler (including 5% safety margin) is calculated as the sum of the 100% SMCR heat dissipation from all coolers in the worst case of each of the engine operational modes (fuel type, emission mode and ambient condition).

The heat capacity of the jacket water cooler and lubricating oil cooler (including 10% safety margin) is based on the highest heat dissipation of each of the engine operational modes (fuel type, emission mode and tropical condition).

Pertaining cooling water flow diagram, temperatures, viscosities and pressures for pumps and coolers, see "Engine Project Guide".

Low Flashpoint Fuel Supply System

Low-Flashpoint Fuel Auxiliary Systems		
Supply pressure	bar(g)	13
System design pressure	bar(g)	16
Pulsation limit at valve train	bar	+0.5
Fuel temperature at engine inlet	°C	25-50
Particle size requirement at outlet of LFSS	µm	Max. 10
Max. fuel flow **)	kg/h	4,100
Minimum flow change rate requirement	[(kg/h)/s]	390
Fuel heat exchanger – heating capacity	kW	150
Fuel heat exchanger – cooling capacity	kW	80

**) At an LCV of 19,000 kJ/kg

Max. fuel flow should be carefully evaluated for specific project conditions.

The fuel heat exchanger heating capacity is based on maximum fuel flow from pump to be heated from -10°C to 50°C.

The fuel heat exchanger cooling capacity is based on maximum fuel flow from pump to be cooled from 65°C to 45°C.

Inert Gas System		
Medium		Nitrogen (N2)
Min. purging pressure	bar(g)	8
Leak test pressure	bar(g)	13
Engine nitrogen volume	liter	To be determined

Ventilation System*)		
<i>Ventilation Fan</i>		
Medium		Dry Air
Air intake quality		ISO 8573-1:2010 [7:4:X(50 mg/m³)]
Particle size		Class 7: max. 40 µm
Pressure dew point custom	°C	≤ +3
Oil content		Class X: max. 50 mg/m³
Ventilation air absolute pressure		Less than atmospheric
Ventilation air pressure drop**		To be determined
Engine ventilation volume	liter	To be determined
Engine friction coefficient**	m ⁻⁴	Not avail.
Fan flow volume**	Air changes per hour	30-45
<i>Dry Air System</i>		
Air intake quality		Ambient
Air supply quality		ISO 8573-1:2010 [7:4:X(50 mg/m³)]
Supply flow		Approx. 110% of fan flow

*) Refer to the separate documentation of "Low Flashpoint Fuel Ventilation System" for further information.

**) Refer to "LF ventilation system" for auxiliaries contained in the ventilation line. Total ventilation volume, fan flow and fan head must be calculated by the yard as instructed in the "Fan capacity guide".

Sealing oil system		
Medium		Low pressure hydraulic oil *)
Power consumption	kW	8.6
Oil consumption	l/24h	36.00

*) Supplied from engine.

Capacities of Auxiliary Systems

Air cooler cleaning unit	
Air cooler cleaning tank	0.30 m ³
Capacity of pump	1.0 m ³ /h

Cylinder oil system	
Storage tanks, 2 x 90 days ¹⁾	2 x 23 m ³
Service tanks, 2 x 1 day ¹⁾	2 x 0.3 m ³

¹⁾ Based on average feed rate of 0.8 g/kWh.

Fuel oil system	
Distillate marine fuel service tank, 12 h	22.6 m ³
Residual marine fuel settling tanks, 2 x 12 h	2 x 21.2 m ³
Residual marine fuel service tank, 12 h/95 °C	21 m ³
Residual marine fuel separator, 98 °C	2,250 l/h
Distillate marine fuel oil circulation cooler	25 kW
Fuel oil pre-heater	77 kW

Lubricating oil system	
Storage tanks, 2 x 90 days	2 x 3.5 m ³
Separator, 90 °C	1,930 l/h
Recommended lubricating oil bottom tank ¹⁾	17 m ³

¹⁾ Based on an oil circulation rate between 15 and 18, above calculation is based on 16.5 times per hour.

Miscellaneous	
Jacket water expansion tank ¹⁾	10 %
Recommended engine room ventilation flow ²⁾	32 m ³ /s
Motor rating, auxiliary blowers	2 x 35 kW
EGR blower max power consumption ³⁾	113 kWe

¹⁾ Jacket water expansion tank volume given in percent of the total jacket water volume.

²⁾ This air flow is given as 200% of the main engine combustion air flow. Besides the combustion air flow (100%), it includes cooling air for main engine radiation heat (50%), an estimate of combustion air for gensets/boilers and cooling air for their radiation heat (25%) and an estimate of radiated heat from other equipment (25%). Please check with ISO 8861:1998(E) for details.

³⁾ Powered by a variable frequency drive, so no margin for starting current is required. Number of EGR blowers must be informed by maker. Nominal power rating for EGR blower may differ significantly from this value.

Starting air system, 30 bar ¹⁾	
Receiver volume (6 starts)	2 x 3.0 m ³
Compressors (total)	180 m ³ /h

¹⁾ Compressor capacity is based on ISO 1217 FAD. Starting air system capacities do not include air consumption for ventilation of double wall pipe or Tier III air consumers. An assessment is to be performed to determine whether the above needs to be increased.

Starting air system, 30 bar ¹⁾	
Receiver volume (6 starts)	2 x 3.0 m ³
Compressors (total)	180 m ³ /h

¹⁾ Compressor capacity is based on ISO 1217 FAD. Starting air system capacities do not include air consumption for ventilation of double wall pipe or Tier III air consumers. An assessment is to be performed to determine whether the above needs to be increased.

Various drain tanks	
Stuffing box drain tank	0.30 m ³
Scavenge air drain tank	0.50 m ³

EGR Water Handling System 2 (WHS 2)	
<i>Pump flows</i>	
EGR treated water supply pump	2.0 m ³ /h
NaOH dosing pump	4 l/h
<i>Pump heads</i>	
EGR treated water supply pump	10 bar
NaOH dosing pump	10 bar

Engine Dimensions, Masses and Overhaul Heights

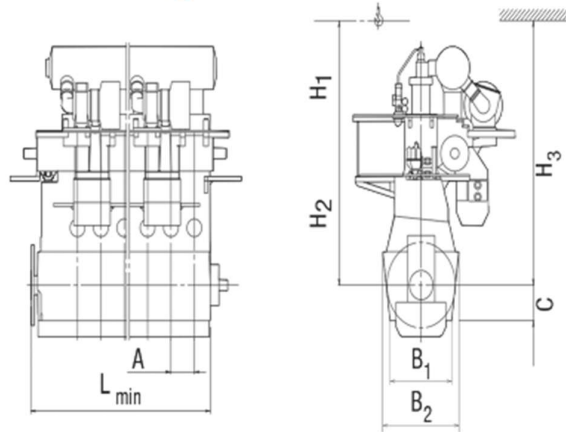
Dimensions	
A: Cylinder distance	1,080 mm
B1: Width of bedplate at foot flange	4,090 mm
B2: Width of bedplate at top flange	4,220 mm
C: Distance from foot to crankshaft	1,500 mm
L min: Minimum length of engine	7,390 mm

Overhaul heights	
H1: Normal lifting procedure	12,175 mm
H2: Reduced height lifting procedure	n.a. mm
H3: Tilted lifting with double jib crane	n.a. mm

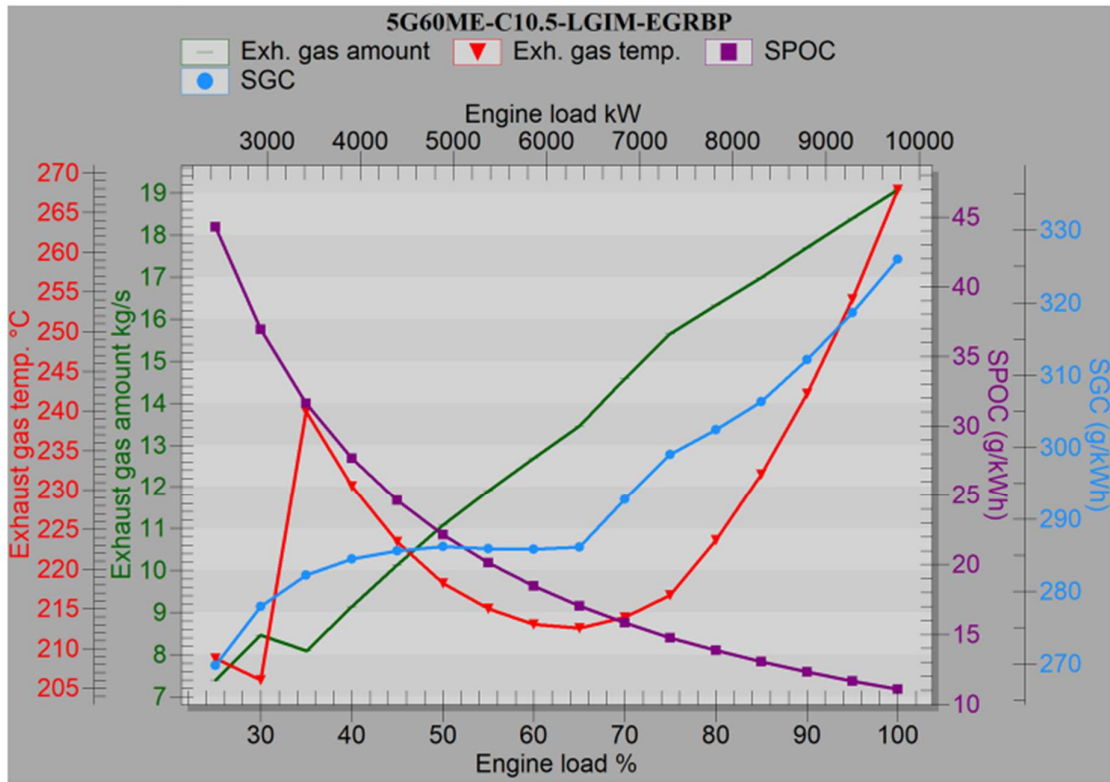
Crane capacities	
Normal lifting procedure	4.0 t
With electrical double jib crane	2 x 2.0 t

Masses	
Mass of main engine, dry	400 t
Added engine dry mass for EGRBP	14 t
Mass of water and oil in engine	4.0 t

The real engine length at crankshaft centreline level may be larger than the minimum length of the engine, as it depends on the vibration conditions of the main engine and shaft system, i.e. on whether a vibration damper and/or moment compensator needs to be installed. Only EGRBP related components, that are mounted on the engine, are included in the above added mass. Indicated values are for guidance only and are not binding.



Fuel Consumption and Exhaust Gas Data Low Flashpoint Fuel, Tier II mode



ISO ambient conditions (ambient air: 25 °C, scavenge air coolant: 25 °C)

Load % SMCR	Power kW	Speed r/min	SPOC g/kWh	SGC g/kWh	Heat rate kJ/kWh	Exh. gas kg/s	Exh. gas ¹⁾ °C	Steam ²⁾ kg/h
100	9,771	94.0	11.07	326.0	6,960	19.1	268	2,250
95	9,282	94.0	11.66	318.6	6,838	18.4	254	1,890
90	8,794	94.0	12.30	312.1	6,737	17.7	242	1,580
85	8,305	94.0	13.03	306.3	6,651	17.0	232	1,320
80	7,817	94.0	13.84	302.4	6,609	16.3	224	1,110
75	7,328	94.0	14.77	299.0	6,580	15.6	217	940
70	6,840	94.0	15.82	292.7	6,501	14.6	214	840
65	6,351	94.0	17.04	286.1	6,421	13.5	213	760
60	5,863	94.0	18.46	285.8	6,475	12.7	213	740
55	5,374	94.0	20.14	285.9	6,549	11.9	215	730
50	4,886	94.0	22.15	286.1	6,640	11.1	218	730
45	4,397	94.0	24.61	285.5	6,733	10.1	223	750
40	3,908	94.0	27.69	284.4	6,843	9.1	231	780
35	3,420	94.0	31.64	282.2	6,967	8.1	240	810
30	2,931	94.0	36.92	277.9	7,106	8.5	206	420
25	2,443	94.0	44.29	269.7	7,259	7.4	209	400

Fuel Consumption and Exhaust Gas Data Low Flashpoint Fuel, Tier II mode

Tropical ambient conditions (ambient air: 45 °C, scavenge air coolant: 36 °C)

Load % SMCR	Power kW	Speed r/min	SPOC g/kWh	SGC g/kWh	Heat rate kJ/kWh	Exh. gas kg/s	Exh. gas ^{*)} °C	Steam ^{**)} kg/h
100	9,771	94.0	11.07	329.7	7,034	17.3	316	3,000
95	9,282	94.0	11.66	322.2	6,910	16.6	301	2,660
90	8,794	94.0	12.30	315.7	6,808	16.0	288	2,360
85	8,305	94.0	13.03	309.8	6,722	15.3	277	2,080
80	7,817	94.0	13.84	305.9	6,679	14.7	268	1,860
75	7,328	94.0	14.77	302.5	6,650	14.1	261	1,660
70	6,840	94.0	15.82	296.2	6,570	13.1	258	1,510
65	6,351	94.0	17.04	289.5	6,489	12.1	256	1,390
60	5,863	94.0	18.46	289.2	6,544	11.4	256	1,320
55	5,374	94.0	20.14	289.4	6,618	10.7	258	1,280
50	4,886	94.0	22.15	289.7	6,710	10.0	261	1,250
45	4,397	94.0	24.61	289.1	6,805	9.1	266	1,220
40	3,908	94.0	27.69	288.1	6,915	8.2	273	1,200
35	3,420	94.0	31.64	285.9	7,041	8.6	240	840
30	2,931	94.0	36.92	281.6	7,181	7.6	243	790
25	2,443	94.0	44.29	273.6	7,336	6.7	243	710

Specified ambient conditions (ambient air: 10 °C, scavenge air coolant: 10 °C)

Load % SMCR	Power kW	Speed r/min	SPOC g/kWh	SGC g/kWh	Heat rate kJ/kWh	Exh. gas kg/s	Exh. gas ^{*)} °C	Steam ^{**)} kg/h
100	9,771	94.0	11.07	321.8	6,877	19.6	241	1,700
95	9,282	94.0	11.66	314.5	6,756	18.9	228	1,350
90	8,794	94.0	12.30	308.1	6,656	18.2	217	1,060
85	8,305	94.0	13.03	302.3	6,571	17.5	207	820
80	7,817	94.0	13.84	298.4	6,530	16.8	199	630
75	7,328	94.0	14.77	295.0	6,501	16.1	192	470
70	6,840	94.0	15.82	288.8	6,423	15.0	190	390
65	6,351	94.0	17.04	282.3	6,344	13.8	188	330
60	5,863	94.0	18.46	281.9	6,398	13.0	189	320
55	5,374	94.0	20.14	281.9	6,470	12.2	191	330
50	4,886	94.0	22.15	282.1	6,560	11.4	194	360
45	4,397	94.0	24.61	281.5	6,653	10.4	199	410
40	3,908	94.0	27.69	280.3	6,760	9.4	205	460
35	3,420	94.0	31.64	278.0	6,883	8.3	214	520
30	2,931	94.0	36.92	273.6	7,021	8.8	180	0
25	2,443	94.0	44.29	265.4	7,172	7.7	182	0

Comments / details

SPOC: Specific Pilot Oil Consumption (LCV: 42,700 kJ/kg)

SGC: Specific Gas Consumption (LCV: 19,900 kJ/kg)

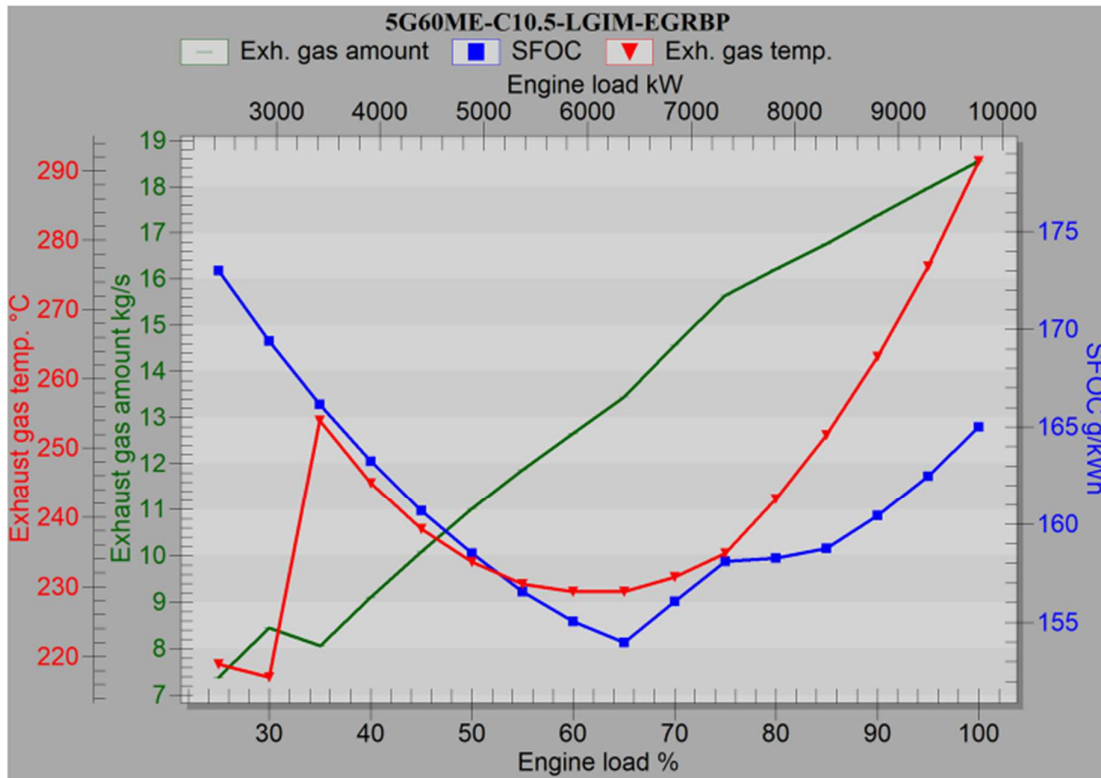
Loads below 50% are associated with larger tolerances.

*) Mixed exhaust gas temperature after turbocharger.

**) Guiding steam production capacity at 7.0 bar(a) with variable pinch point temperature, matched to 15°C at 85% load in Tier II and ISO. Contact boiler maker for actual steam production.

Heat rate is the guaranteed value. Calculating the heat rate from SPOC and SGC can, in some cases, be inaccurate, due to rounding.

Fuel Consumption and Exhaust Gas Data Fuel Oil, Tier II mode



ISO ambient conditions (ambient air: 25 °C, scavenge air coolant: 25 °C)

Load % SMCR	Power kW	Speed r/min	SFOC g/kWh	Exh. gas kg/s	Exh. gas ^{*)} °C	Steam ^{*)} kg/h
100	9,771	94.0	165.0	18.5	291	2,680
95	9,282	94.0	162.5	18.0	276	2,330
90	8,794	94.0	160.4	17.4	263	2,000
85	8,305	94.0	158.8	16.8	252	1,720
80	7,817	94.0	158.3	16.2	243	1,490
75	7,328	94.0	158.1	15.6	235	1,290
70	6,840	94.0	156.0	14.6	231	1,160
65	6,351	94.0	154.0	13.4	229	1,050
60	5,863	94.0	155.0	12.7	229	1,000
55	5,374	94.0	156.6	11.9	230	970
50	4,886	94.0	158.5	11.0	234	950
45	4,397	94.0	160.7	10.1	238	950
40	3,908	94.0	163.2	9.1	245	960
35	3,420	94.0	166.2	8.1	254	960
30	2,931	94.0	169.4	8.4	217	560
25	2,443	94.0	173.0	7.4	219	510

Fuel Consumption and Exhaust Gas Data Fuel Oil, Tier II mode

Tropical ambient conditions (ambient air: 45 °C, scavenge air coolant: 36 °C)

Load % SMCR	Power kW	Speed r/min	SFOC g/kWh	Exh. gas kg/s	Exh. gas ^{*)} °C	Steam ^{**)} kg/h
100	9,771	94.0	166.7	16.7	344	3,430
95	9,282	94.0	164.2	16.2	328	3,090
90	8,794	94.0	162.1	15.7	314	2,780
85	8,305	94.0	160.4	15.1	301	2,500
80	7,817	94.0	159.9	14.6	291	2,260
75	7,328	94.0	159.8	14.1	283	2,050
70	6,840	94.0	157.7	13.1	279	1,870
65	6,351	94.0	155.6	12.1	276	1,710
60	5,863	94.0	156.7	11.4	276	1,620
55	5,374	94.0	158.2	10.6	277	1,550
50	4,886	94.0	160.2	9.9	279	1,490
45	4,397	94.0	162.4	9.1	284	1,440
40	3,908	94.0	165.0	8.2	290	1,390
35	3,420	94.0	167.9	8.5	254	1,010
30	2,931	94.0	171.2	7.6	256	930
25	2,443	94.0	174.8	6.7	255	830

Specified ambient conditions (ambient air: 10 °C, scavenge air coolant: 10 °C)

Load % SMCR	Power kW	Speed r/min	SFOC g/kWh	Exh. gas kg/s	Exh. gas ^{*)} °C	Steam ^{**)} kg/h
100	9,771	94.0	163.0	19.1	263	2,140
95	9,282	94.0	160.5	18.5	248	1,780
90	8,794	94.0	158.5	17.9	236	1,460
85	8,305	94.0	156.9	17.2	225	1,200
80	7,817	94.0	156.4	16.7	216	980
75	7,328	94.0	156.2	16.1	209	810
70	6,840	94.0	154.2	15.0	206	700
65	6,351	94.0	152.1	13.8	204	620
60	5,863	94.0	153.2	13.0	204	590
55	5,374	94.0	154.7	12.2	205	580
50	4,886	94.0	156.6	11.3	207	580
45	4,397	94.0	158.8	10.4	212	600
40	3,908	94.0	161.3	9.4	219	640
35	3,420	94.0	164.2	8.3	227	670
30	2,931	94.0	167.4	8.8	190	210
25	2,443	94.0	170.9	7.7	191	190

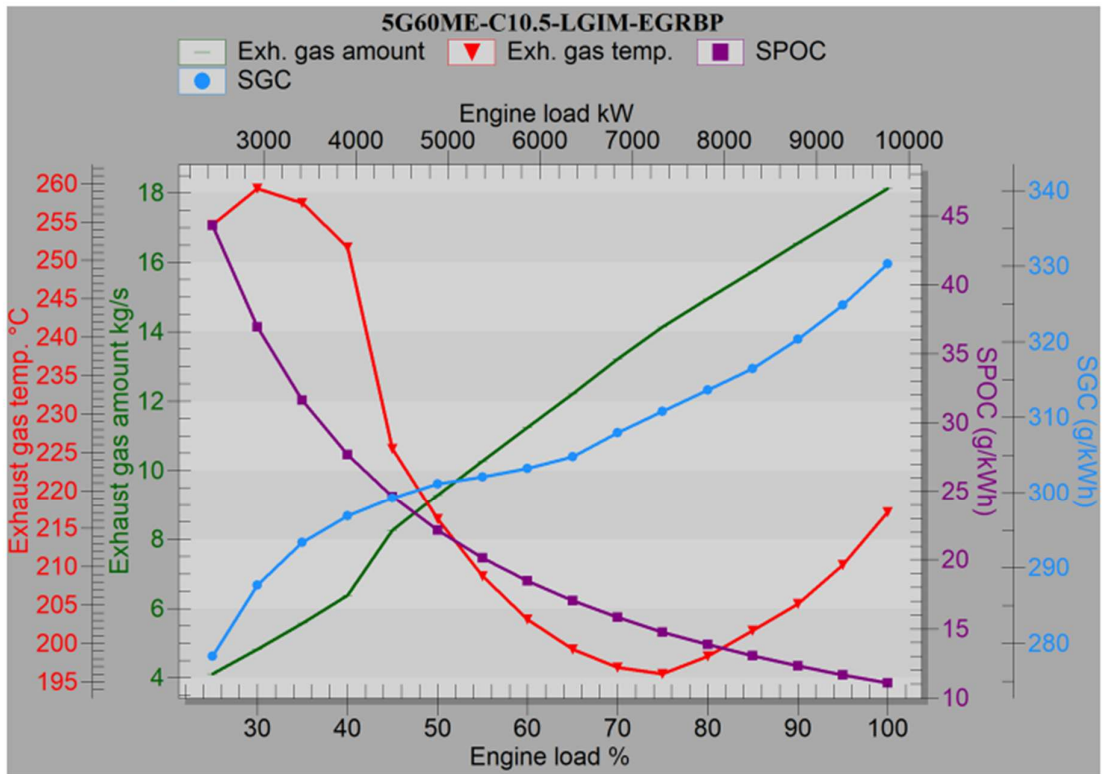
Comments / details:

SFOC: Specific Fuel Oil Consumption (LCV: 42,700 kJ/kg)
Loads below 50% are associated with larger tolerances.

*) Mixed exhaust gas temperature after turbocharger.

**) Guiding steam production capacity at 7.0 bar(a) with variable pinch point temperature, matched to 15°C at 85% load in Tier II and ISO. Contact boiler maker for actual steam production.

Fuel Consumption and Exhaust Gas Data Low Flashpoint Fuel, Tier III mode



ISO ambient conditions (ambient air: 25 °C, scavenge air coolant: 25 °C)

Load % SMCR	Power kW	Speed r/min	SPOC g/kWh	SGC g/kWh	Heat rate kJ/kWh	Exh. gas kg/s	Exh. gas ¹⁾ °C	Steam ²⁾ kg/h
100	9,771	94.0	11.07	330.3	7,045	18.1	217	1,070
95	9,282	94.0	11.66	324.9	6,963	17.3	210	890
90	8,794	94.0	12.30	320.4	6,901	16.5	205	750
85	8,305	94.0	13.03	316.5	6,854	15.7	202	650
80	7,817	94.0	13.84	313.7	6,833	14.9	198	560
75	7,328	94.0	14.77	310.8	6,815	14.1	196	490
70	6,840	94.0	15.82	308.0	6,804	13.2	197	480
65	6,351	94.0	17.04	304.8	6,793	12.2	199	480
60	5,863	94.0	18.46	303.2	6,823	11.2	203	510
55	5,374	94.0	20.14	302.1	6,872	10.3	209	550
50	4,886	94.0	22.15	301.2	6,939	9.3	216	600
45	4,397	94.0	24.61	299.3	7,007	8.3	225	650
40	3,908	94.0	27.69	296.9	7,090	6.4	252	760
35	3,420	94.0	31.64	293.4	7,189	5.6	258	720
30	2,931	94.0	36.92	287.7	7,302	4.8	259	630
25	2,443	94.0	44.29	278.3	7,430	4.1	255	500

Fuel Consumption and Exhaust Gas Data Low Flashpoint Fuel, Tier III mode

Tropical ambient conditions (ambient air: 45 °C, scavenge air coolant: 36 °C)

Load % SMCR	Power kW	Speed r/min	SPOC g/kWh	SGC g/kWh	Heat rate kJ/kWh	Exh. gas kg/s	Exh. gas ^{*)} °C	Steam ^{**)} kg/h
100	9,771	94.0	11.07	334.0	7,120	17.0	261	1,920
95	9,282	94.0	11.66	328.6	7,036	16.3	253	1,700
90	8,794	94.0	12.30	324.0	6,974	15.5	247	1,520
85	8,305	94.0	13.03	320.1	6,927	14.8	243	1,390
80	7,817	94.0	13.84	317.3	6,905	14.1	238	1,250
75	7,328	94.0	14.77	314.4	6,887	13.3	235	1,140
70	6,840	94.0	15.82	311.6	6,876	12.5	236	1,090
65	6,351	94.0	17.04	308.4	6,865	11.6	237	1,050
60	5,863	94.0	18.46	306.9	6,895	10.7	241	1,040
55	5,374	94.0	20.14	305.8	6,945	9.8	246	1,030
50	4,886	94.0	22.15	304.8	7,012	9.0	252	1,030
45	4,397	94.0	24.61	303.0	7,081	8.0	261	1,030
40	3,908	94.0	27.69	300.6	7,165	6.5	274	990
35	3,420	94.0	31.64	297.2	7,265	5.7	279	920
30	2,931	94.0	36.92	291.6	7,380	5.0	280	810
25	2,443	94.0	44.29	282.3	7,508	4.3	275	670

Specified ambient conditions (ambient air: 10 °C, scavenge air coolant: 10 °C)

Load % SMCR	Power kW	Speed r/min	SPOC g/kWh	SGC g/kWh	Heat rate kJ/kWh	Exh. gas kg/s	Exh. gas ^{*)} °C	Steam ^{**)} kg/h
100	9,771	94.0	11.07	326.0	6,961	18.3	194	560
95	9,282	94.0	11.66	320.7	6,879	17.5	187	390
90	8,794	94.0	12.30	316.2	6,818	16.7	182	260
85	8,305	94.0	13.03	312.3	6,772	15.9	179	160
80	7,817	94.0	13.84	309.5	6,751	15.1	176	0
75	7,328	94.0	14.77	306.7	6,733	14.2	174	0
70	6,840	94.0	15.82	303.9	6,723	13.3	175	0
65	6,351	94.0	17.04	300.7	6,711	12.3	177	0
60	5,863	94.0	18.46	299.1	6,741	11.3	181	110
55	5,374	94.0	20.14	298.0	6,789	10.3	187	210
50	4,886	94.0	22.15	297.0	6,856	9.3	194	300
45	4,397	94.0	24.61	295.1	6,923	8.3	204	380
40	3,908	94.0	27.69	292.6	7,005	6.3	231	550
35	3,420	94.0	31.64	289.0	7,103	5.5	236	520
30	2,931	94.0	36.92	283.3	7,215	4.8	236	450
25	2,443	94.0	44.29	273.8	7,341	4.1	230	320

Comments / details

SPOC: Specific Pilot Oil Consumption (LCV: 42,700 kJ/kg)

SGC: Specific Gas Consumption (LCV: 19,900 kJ/kg)

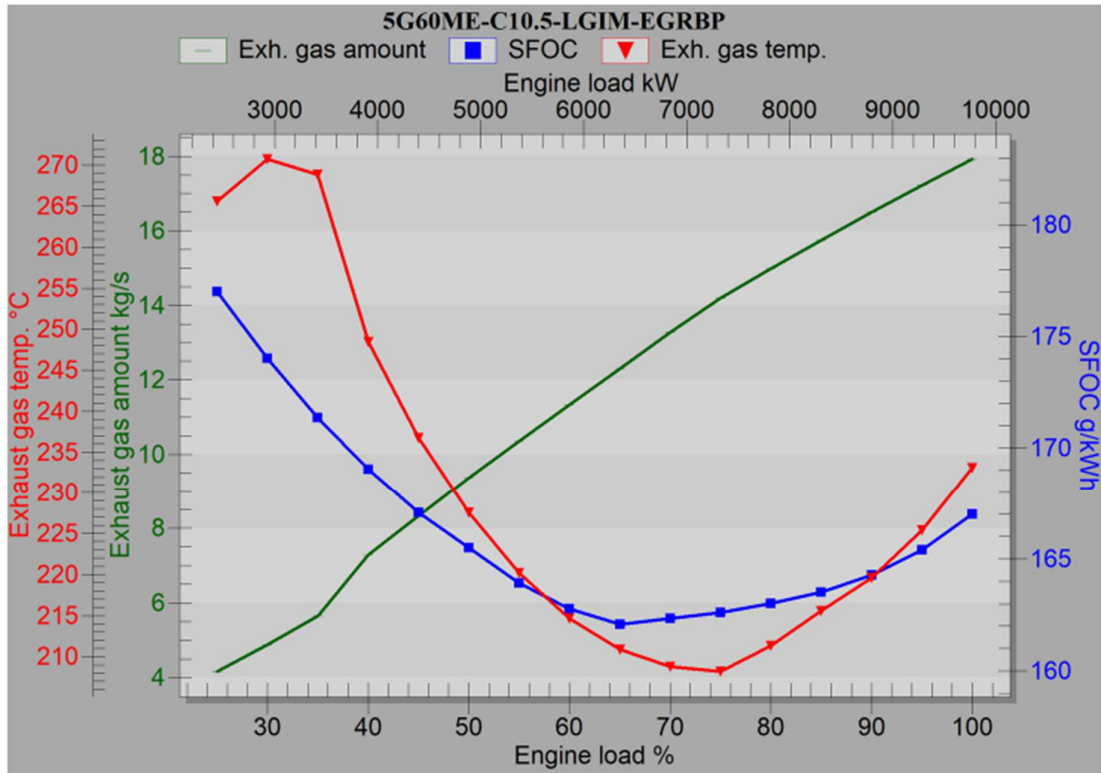
Loads below 50% are associated with larger tolerances.

*) Mixed exhaust gas temperature after turbocharger.

**) Guiding steam production capacity at 7.0 bar(a) with variable pinch point temperature, matched to 15°C at 85% load in Tier II and ISO. Contact boiler maker for actual steam production.

Heat rate is the guaranteed value. Calculating the heat rate from SPOC and SGC can, in some cases, be inaccurate, due to rounding.

Fuel Consumption and Exhaust Gas Data Fuel Oil, Tier III mode



ISO ambient conditions (ambient air: 25 °C, scavenge air coolant: 25 °C)

Load % SMCR	Power kW	Speed r/min	SFOC g/kWh	Exh. gas kg/s	Exh. gas ¹⁾ °C	Steam ²⁾ kg/h
100	9,771	94.0	167.0	17.9	233	1,400
95	9,282	94.0	165.4	17.2	225	1,200
90	8,794	94.0	164.3	16.5	220	1,040
85	8,305	94.0	163.5	15.7	216	930
80	7,817	94.0	163.0	15.0	211	810
75	7,328	94.0	162.6	14.2	208	720
70	6,840	94.0	162.3	13.3	209	690
65	6,351	94.0	162.1	12.3	211	680
60	5,863	94.0	162.8	11.3	215	690
55	5,374	94.0	163.9	10.4	220	720
50	4,886	94.0	165.5	9.4	228	760
45	4,397	94.0	167.1	8.3	237	790
40	3,908	94.0	169.0	7.3	248	820
35	3,420	94.0	171.4	5.7	269	820
30	2,931	94.0	174.0	4.9	271	730
25	2,443	94.0	177.0	4.2	266	580

Fuel Consumption and Exhaust Gas Data Fuel Oil, Tier III mode

Tropical ambient conditions (ambient air: 45 °C, scavenge air coolant: 36 °C)

Load % SMCR	Power kW	Speed r/min	SFOC g/kWh	Exh. gas kg/s	Exh. gas ^{*)} °C	Steam ^{**)} kg/h
100	9,771	94.0	168.8	16.7	281	2,290
95	9,282	94.0	167.1	16.1	272	2,060
90	8,794	94.0	166.0	15.4	265	1,870
85	8,305	94.0	165.2	14.8	260	1,710
80	7,817	94.0	164.7	14.1	255	1,550
75	7,328	94.0	164.3	13.3	251	1,410
70	6,840	94.0	164.1	12.5	251	1,340
65	6,351	94.0	163.8	11.6	252	1,280
60	5,863	94.0	164.5	10.8	255	1,250
55	5,374	94.0	165.7	9.9	260	1,230
50	4,886	94.0	167.3	9.0	267	1,220
45	4,397	94.0	168.9	8.0	275	1,200
40	3,908	94.0	170.8	7.1	286	1,180
35	3,420	94.0	173.2	5.8	293	1,040
30	2,931	94.0	175.9	5.0	294	930
25	2,443	94.0	178.9	4.3	288	760

Specified ambient conditions (ambient air: 10 °C, scavenge air coolant: 10 °C)

Load % SMCR	Power kW	Speed r/min	SFOC g/kWh	Exh. gas kg/s	Exh. gas ^{*)} °C	Steam ^{**)} kg/h
100	9,771	94.0	165.0	18.1	208	870
95	9,282	94.0	163.4	17.4	201	690
90	8,794	94.0	162.3	16.7	196	560
85	8,305	94.0	161.6	15.9	192	460
80	7,817	94.0	161.1	15.1	188	350
75	7,328	94.0	160.7	14.3	185	270
70	6,840	94.0	160.4	13.4	186	270
65	6,351	94.0	160.1	12.4	188	290
60	5,863	94.0	160.8	11.4	192	330
55	5,374	94.0	162.0	10.4	197	390
50	4,886	94.0	163.5	9.4	205	450
45	4,397	94.0	165.1	8.4	214	510
40	3,908	94.0	167.0	6.4	241	660
35	3,420	94.0	169.3	5.6	246	620
30	2,931	94.0	171.9	4.9	247	540
25	2,443	94.0	174.9	4.1	240	400

Comments / details

SFOC: Specific Fuel Oil Consumption (LCV: 42,700 kJ/kg)
Loads below 50% are associated with larger tolerances.

*) Mixed exhaust gas temperature after turbocharger.

**) Guiding steam production capacity at 7.0 bar(a) with variable pinch point temperature, matched to 15°C at 85% load in Tier II and ISO. Contact boiler maker for actual steam production.

Tables of Capacities - Tier II, Low Flashpoint Fuel

1 Engine load (% SMCR)	4 Scavenge air receiver temp. (°C)	7 Jacket water heat diss. (kW) +10/-15%
2 T/C air consumption (kg/s) +/-5%	5 Scavenge air heat diss. (kW)	8 Lubricating oil heat diss. (kW) +/-10%
3 Scavenge air pressure (bara)	6 EGR heat dissipation (kW)	9 Condensed water (non-EGR) (t/24h)

Loads below 50% are associated with larger tolerances.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ISO ambient conditions (ambient air: 25.0 °C, scavenge air coolant: 25.0 °C)									
100	18.1	3.51	37	2,700	0	1,240	800	0.0	
95	17.5	3.37	36	2,490	0	1,190	760	0.0	
90	16.9	3.23	35	2,300	0	1,140	720	0.0	
85	16.2	3.09	34	2,110	0	1,090	690	0.0	
80	15.6	2.97	34	1,950	0	1,040	650	0.0	
75	15.0	2.84	33	1,790	0	990	620	0.0	
70	14.0	2.64	32	1,540	0	940	580	0.0	
65	12.9	2.44	30	1,300	0	890	550	0.0	
60	12.2	2.31	30	1,150	0	830	520	0.0	
55	11.4	2.19	29	1,010	0	780	490	0.0	
50	10.7	2.06	29	870	0	730	460	0.0	
45	9.8	1.92	28	720	0	680	440	0.0	
40	8.8	1.78	27	580	0	630	410	0.0	
35	7.8	1.64	27	440	0	580	380	0.0	
30	8.2	1.67	35	430	0	530	360	0.0	
25	7.2	1.52	35	310	0	480	330	0.0	

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tropical ambient conditions (ambient air: 45.0 °C, scavenge air coolant: 36.0 °C)									
100	16.6	3.28	46	2,620	0	1,260	810	27.8	
95	16.1	3.15	45	2,420	0	1,200	770	26.7	
90	15.5	3.02	44	2,230	0	1,150	730	25.5	
85	14.9	2.88	44	2,050	0	1,100	690	24.2	
80	14.3	2.77	43	1,890	0	1,050	660	23.1	
75	13.7	2.65	42	1,730	0	1,000	620	21.8	
70	12.8	2.47	41	1,500	0	950	590	19.8	
65	11.8	2.28	40	1,260	0	890	560	17.5	
60	11.1	2.17	40	1,120	0	840	530	16.0	
55	10.4	2.06	39	980	0	790	500	14.5	
50	9.7	1.94	39	850	0	740	470	12.9	
45	8.9	1.82	38	710	0	690	440	11.1	
40	8.0	1.69	38	570	0	640	410	9.2	
35	8.4	1.72	46	570	0	580	390	9.7	
30	7.5	1.58	46	440	0	530	360	7.7	
25	6.6	1.46	45	320	0	480	340	5.8	

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Specified ambient conditions (ambient air: 10.0 °C, scavenge air coolant: 10.0 °C)									
100	18.7	3.53	23	2,640	0	1,230	790	1.2	
95	18.1	3.39	22	2,440	0	1,180	750	1.1	
90	17.4	3.25	21	2,250	0	1,130	720	1.1	
85	16.7	3.10	20	2,070	0	1,080	680	1.0	
80	16.1	2.98	19	1,910	0	1,030	640	0.9	
75	15.4	2.85	18	1,750	0	980	610	0.9	
70	14.4	2.65	17	1,510	0	920	580	0.7	
65	13.3	2.44	16	1,270	0	870	540	0.5	
60	12.5	2.31	15	1,120	0	820	510	0.4	
55	11.8	2.19	14	980	0	770	490	0.3	
50	11.0	2.06	14	850	0	720	460	0.2	
45	10.0	1.93	13	700	0	670	430	0.1	
40	9.1	1.79	12	560	0	620	400	0.0	
35	8.0	1.64	12	430	0	570	380	0.0	
30	8.5	1.68	20	430	0	520	350	0.0	
25	7.5	1.53	20	310	0	470	330	0.0	

Tables of Capacities - Tier III, Low Flashpoint Fuel

1 Engine load (% SMCR)	4 Scavenge air receiver temp. (°C)	7 Jacket water heat diss. (kW) +10/-15%
2 T/C air consumption (kg/s) +/-5%	5 Scavenge air heat diss. (kW)	8 Lubricating oil heat diss. (kW) +/-10%
3 Scavenge air pressure (bara)	6 EGR heat dissipation (kW)	9 Condensed water (non-EGR) (t/24h)

Loads below 50% are associated with larger tolerances.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ISO ambient conditions (ambient air: 25.0 °C, scavenge air coolant: 25.0 °C)									
100	17.5	3.51	34	2,000	2,910	1,260	810	0.0	
95	16.7	3.33	34	1,820	2,790	1,210	770	0.0	
90	16.0	3.15	34	1,650	2,670	1,150	730	0.0	
85	15.2	2.98	34	1,490	2,550	1,100	690	0.0	
80	14.5	2.80	33	1,250	2,560	1,050	660	0.0	
75	13.7	2.63	33	1,030	2,520	1,000	620	0.0	
70	12.8	2.46	33	910	2,340	950	590	0.0	
65	11.9	2.29	33	790	2,140	900	560	0.0	
60	10.9	2.13	33	670	1,960	840	530	0.0	
55	10.0	1.98	32	570	1,780	790	500	0.0	
50	9.0	1.83	32	470	1,610	740	470	0.0	
45	8.0	1.68	31	350	1,450	690	440	0.0	
40	6.2	1.49	41	250	1,490	640	410	0.0	
35	5.4	1.38	40	170	1,330	590	390	0.0	
30	4.7	1.29	39	110	1,160	530	360	0.0	
25	4.0	1.22	39	70	1,000	480	340	0.0	

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tropical ambient conditions (ambient air: 45.0 °C, scavenge air coolant: 36.0 °C)									
100	16.6	3.39	43	2,100	2,560	1,270	820	32.9	
95	15.9	3.22	43	1,920	2,450	1,220	780	31.4	
90	15.2	3.06	43	1,750	2,340	1,170	740	29.9	
85	14.5	2.89	43	1,580	2,230	1,110	700	28.2	
80	13.8	2.72	42	1,340	2,280	1,060	670	25.8	
75	13.1	2.56	42	1,120	2,270	1,010	630	23.3	
70	12.2	2.40	42	1,000	2,090	960	600	21.3	
65	11.4	2.24	42	870	1,910	910	560	19.2	
60	10.5	2.10	42	760	1,730	850	530	17.1	
55	9.6	1.96	41	650	1,570	800	500	15.0	
50	8.8	1.82	41	550	1,400	750	470	12.9	
45	7.8	1.67	41	420	1,260	700	450	10.3	
40	6.4	1.51	48	340	1,330	640	420	9.4	
35	5.6	1.40	48	250	1,180	590	390	7.1	
30	4.9	1.31	48	180	1,040	540	370	5.2	
25	4.2	1.23	47	120	900	490	340	3.6	

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Specified ambient conditions (ambient air: 10.0 °C, scavenge air coolant: 10.0 °C)									
100	17.7	3.47	19	1,900	3,050	1,240	800	2.6	
95	17.0	3.29	19	1,720	2,920	1,190	760	2.4	
90	16.2	3.11	19	1,560	2,800	1,140	720	2.2	
85	15.4	2.94	19	1,400	2,670	1,090	690	2.0	
80	14.6	2.76	19	1,170	2,670	1,040	650	1.8	
75	13.9	2.59	19	970	2,620	990	620	1.5	
70	12.9	2.42	18	850	2,430	940	580	1.3	
65	12.0	2.26	18	730	2,240	890	550	0.9	
60	11.0	2.10	18	630	2,050	830	520	0.6	
55	10.0	1.95	18	530	1,870	780	490	0.4	
50	9.1	1.81	17	430	1,690	730	460	0.1	
45	8.0	1.66	16	320	1,520	680	440	0.0	
40	6.1	1.47	26	230	1,600	630	410	0.0	
35	5.4	1.37	26	160	1,420	580	380	0.0	
30	4.6	1.28	25	100	1,250	530	360	0.0	
25	4.0	1.21	24	60	1,080	480	330	0.0	

Tables of EGR consumption - Tier III Fuel Oil

1 Engine load (% SMCR)	3 Freshwater consumption (l/h)	5 Sludge accumulation (l/h)
2 Power, EGR blower (kWe)	4 Processwater bleed off (l/h)	6 NaOH consumption (l/h)

EGR blower power consumption has a tolerance of 20%.

Based on 0.1% fuel sulphur content. Sludge accumulation based on 7% dry matter. Fresh water consumption accounts for water added to the EGR process. WTS water consumption is not included (to be informed by maker).

NaOH consumption is based on a 50% NaOH solution. Minimum tolerance is +0.5 l/MWh.

1	2	3	4	5	6
ISO ambient conditions (ambient air: 25.0 °C, scavenge air coolant: 25.0 °C)					
100	44	0	560	1.7	2.9
95	49	0	540	1.7	2.8
90	53	0	520	1.6	2.8
85	57	0	500	1.6	2.7
80	58	0	500	1.6	2.7
75	58	0	500	1.6	2.7
70	59	0	460	1.5	2.5
65	59	0	420	1.3	2.4
60	58	0	380	1.2	2.2
55	55	0	350	1.1	2.0
50	52	0	310	1.0	1.8
45	45	0	280	0.8	1.7
40	37	0	250	0.7	1.5
35	65	0	220	0.7	1.5
30	50	0	190	0.6	1.4
25	38	0	170	0.5	1.2

Tropical ambient conditions (ambient air: 45.0 °C, scavenge air coolant: 36.0 °C)					
100	30	0	520	1.4	2.5
95	32	0	500	1.4	2.4
90	35	0	490	1.4	2.4
85	37	0	470	1.3	2.3
80	39	0	480	1.4	2.4
75	39	0	480	1.4	2.4
70	40	0	440	1.3	2.2
65	39	0	410	1.2	2.0
60	38	0	380	1.0	1.9
55	36	0	350	0.9	1.7
50	33	0	310	0.8	1.5
45	29	0	290	0.7	1.4
40	24	0	260	0.6	1.2
35	38	0	260	0.6	1.3
30	29	0	240	0.5	1.2
25	22	0	210	0.4	1.0

Specified ambient conditions (ambient air: 10.0 °C, scavenge air coolant: 10.0 °C)					
100	49	0	610	1.8	3.0
95	53	0	590	1.8	3.0
90	58	0	570	1.7	2.9
85	62	0	560	1.6	2.8
80	63	0	560	1.7	2.8
75	61	0	560	1.6	2.8
70	63	0	520	1.5	2.6
65	62	0	490	1.4	2.5
60	61	0	450	1.3	2.3
55	58	0	420	1.1	2.1
50	54	0	380	1.0	1.9
45	46	0	350	0.9	1.7
40	87	0	340	0.9	1.8
35	69	0	310	0.7	1.6
30	53	0	280	0.6	1.4
25	41	0	240	0.5	1.2

Tables of EGR consumption - Tier III Low Flashpoint Fuel

1 Engine load (% SMCR)	3 Freshwater consumption (l/h)	5 Sludge accumulation (l/h)
2 Power, EGR blower (kWe)	4 Processwater bleed off (l/h)	6 NaOH consumption (l/h)

EGR blower power consumption has a tolerance of 20%.

Based on 0.1% fuel sulphur content. Sludge accumulation based on 7% dry matter. Fresh water consumption accounts for water added to the EGR process. WTS water consumption is not included (to be informed by maker).

NaOH consumption is based on a 50% NaOH solution. Minimum tolerance is +0.5 l/MWh.

1	2	3	4	5	6
ISO ambient conditions (ambient air: 25.0 °C, scavenge air coolant: 25.0 °C)					
100	49	0	1.130	1.8	1.6
95	53	0	1.080	1.7	1.6
90	57	0	1.040	1.7	1.6
85	61	0	990	1.6	1.5
80	63	0	990	1.6	1.6
75	62	0	980	1.6	1.6
70	63	0	910	1.5	1.5
65	62	0	830	1.4	1.4
60	61	0	760	1.3	1.3
55	58	0	680	1.1	1.2
50	54	0	610	1.0	1.1
45	46	0	540	0.9	1.0
40	85	0	510	0.9	1.0
35	67	0	450	0.7	0.9
30	51	0	380	0.6	0.8
25	39	0	320	0.5	0.8

Tropical ambient conditions (ambient air: 45.0 °C, scavenge air coolant: 36.0 °C)					
100	33	0	1.010	1.5	1.4
95	35	0	970	1.5	1.4
90	37	0	930	1.4	1.3
85	40	0	890	1.4	1.3
80	42	0	910	1.4	1.4
75	42	0	910	1.4	1.4
70	42	0	840	1.3	1.3
65	41	0	770	1.2	1.2
60	40	0	700	1.1	1.1
55	38	0	640	1.0	1.0
50	35	0	570	0.8	0.9
45	30	0	510	0.7	0.8
40	49	0	520	0.7	0.9
35	39	0	460	0.6	0.8
30	30	0	400	0.5	0.7
25	23	0	350	0.4	0.6

Specified ambient conditions (ambient air: 10.0 °C, scavenge air coolant: 10.0 °C)					
100	54	0	1.200	1.9	1.7
95	58	0	1.160	1.8	1.7
90	63	0	1.120	1.8	1.7
85	67	0	1.070	1.7	1.6
80	68	0	1.070	1.7	1.7
75	66	0	1.060	1.7	1.6
70	67	0	990	1.6	1.6
65	66	0	910	1.4	1.4
60	64	0	830	1.3	1.3
55	61	0	760	1.2	1.2
50	56	0	690	1.0	1.1
45	48	0	620	0.9	1.0
40	90	0	620	0.9	1.1
35	70	0	540	0.8	1.0
30	54	0	470	0.6	0.9
25	42	0	400	0.5	0.8

Typical Noise and Vibration Levels

SMCR

Octave band centre freq. in Hz	31.5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	Avg.	Avg.	Max.
	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB(lin)	dB(A)	dB(A)
A) Exhaust gas noise	121.4	116.0	108.2	103.5	101.9	97.7	86.8	76.9	68.4	122.8	103.0	-
B) Spatial noise, standard NR	97.5	96.5	97.3	96.8	97.0	98.3	98.8	93.8	85.7	106.3	103.7	108.9
C) Spatial noise, additional NR	97.5	95.6	94.9	95.1	95.1	96.4	96.7	89.1	82.0	104.6	101.4	105.7
D) Structure borne vibrations	75.6	73.6	70.7	68.9	66.6	61.0	54.7	46.5	40.0	-	-	-

NCR (90.00% of SMCR)

Octave band centre freq. in Hz	31.5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	Avg.	Avg.	Max.
	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB(lin)	dB(A)	dB(A)
A) Exhaust gas noise	120.5	115.1	107.3	102.6	101.0	96.8	85.9	76.0	67.5	121.9	102.1	-
B) Spatial noise, standard NR	97.1	96.0	96.9	96.3	96.4	97.4	97.5	92.2	84.9	105.5	102.6	107.3
C) Spatial noise, additional NR	97.0	95.2	94.5	94.6	94.5	95.5	95.4	87.6	81.2	103.9	100.3	104.1
D) Structure borne vibrations	75.2	73.1	70.3	68.4	66.2	60.5	54.3	46.1	39.5	-	-	-

A) Sound pressure levels from exhaust gas system (2×10^{-5} Pa).

The expected sound pressure level at 1 metre from the edge of the exhaust gas pipe opening at an angle of 30 degrees to the direction of the gas flow and valid for a normal exhaust gas system - but without a boiler and silencer.

B) Airborne sound pressure levels - with standard noise reduction (NR) countermeasures (2×10^{-5} Pa).

Expected mean sound pressure octave spectrum levels, i.e. the average spatial noise values at a distance of 1 metre from the engine. Prescribed measuring surface area is 376.0 m².

C) Air-borne sound pressure levels - with additional noise reduction (NR) countermeasures (2×10^{-5} Pa).

Expected mean sound pressure octave spectrum levels, i.e. the average spatial noise values at a distance of 1 metre from the engine. Prescribed measuring surface area is 376.0 m².

Additional noise reduction countermeasures, e.g.:

Extra good turbocharger air intake silencer(s)

External sound insulation of scavenge air receiver

External sound insulation of scavenge air cooler(s).

Supplementary reduction of 0.0 dB is needed.

Other additional noise reduction countermeasures are also available. The noise figures given are in accordance with the CIMAC recommendations for measurements of the overall noise for reciprocating engines. The average levels will, depending on the actual engine room configuration, be 1-5 dB higher when the engine is installed in the engine room.

D) Structure borne vibration levels (5×10^{-8} Pa).

Expected mean velocity octave spectrum levels at the engine base plate as installed on board the ship. Based on an average engine foundation of a ship, and may only be used as a rough estimate as the velocity levels will depend on the actual foundation used. If the vibration velocity levels are referred to 10⁻⁹ m/s instead of 5x10⁻⁸ m/s, the calculated dB figures will be 34.0 dB higher than above stated.

Reference Data

Ambient condition	Scavenge air coolant temp. ^{*)} °C	Ambient air temp. °C	Rel. air humidity %	Barometric pressure mbar
ISO ^{**)}	25	25	30	1,000
Tropical	36	45	60	1,000
Specified	10	10	60	1,000

*) With a central cooling system, the sea water will be 4 °C lower than these temperatures.

**) Refers to ISO 3046-1 2002(E) and ISO 15550:2016(E).

Tolerances	
Specific Fuel Oil Consumption (SFOC) tolerance at SMCR	+/- 5%
Specific Gas Consumption (SGC) tolerance at SMCR	+/- 5%
Specific Pilot Oil Consumption (SPOC) tolerance at SMCR	+/- 25%
Exhaust gas amount tolerance	+/- 5%
Exhaust gas temperature tolerance	+/- 15°C

Guarantee point	
Guarantee point (same as NCR)	90.00% of SMCR
Guarantee point SFOC tolerance	5%

Guarantee figures for low flashpoint fuel engines are given for heat rate, which has the same tolerance as SFOC guarantees.
Heat rate is calculated as follows:

$$\text{Heat rate [kJ/kWh]} = \text{SGC [g/kWh]} \times \text{LCV}_{\text{SGC}} [\text{kJ/g}] + \text{SPOC [g/kWh]} \times \text{LCV}_{\text{SPOC}} [\text{kJ/g}]$$

Values for EEDI	
Engine type	5G60ME-C10.5-LGIM-EGRBP
SMCR power	9,771 kW
SMCR RPM	94.0 r/min
Ambient condition	ISO
Reference LCV of pilot oil	42,700 kJ/kg
Reference LCV of fuel gas	19,900 kJ/kg
Low Flashpoint Fuel mode	
SGC at SMCR	326.0 g/kWh
SGC at 75% SMCR	299.0 g/kWh
SGC at 75% SMCR incl. 1.34% tolerance^{*)}	303.0 g/kWh
SPOC at SMCR	11.07 g/kWh
SPOC at 75% SMCR	14.77 g/kWh
SPOC at 75% SMCR incl. 50% tolerance^{*)}	22.15 g/kWh
Heat rate at 75% SMCR incl. 6% tolerance	6974 kJ/kWh

*) The SGC and SPOC with tolerance have been calculated so they correspond to adding a 6% tolerance to the heat rate.

CEAS ID for Design Specification Order (DSO)
e6e3a0a7-4104-4447-8977-e75ac52ec56f

This ID must be used by an MAN-ES licensee when creating a DSO.

Appendiks H – beregning af CO₂ korrektionsfaktoren for B45 blend

■ Example Calculation 1:

For an unblended biofuel certified by the above PoS sample:

- Lower Calorific Value (LCV) [MJ/g] = $809,930 \text{ [MJ]} / 21.890 \times 10^6 \text{ [g]} = 0.037 \text{ [MJ/g]}$

- GHG Intensity [gCO₂eq/MJ] = $14.9 \text{ [gCO}_2\text{eq/MJ]} (< 33 \text{ [gCO}_2\text{eq/MJ]})$

- Cf [gCO₂eq/g] = $14.9 \times 0.037 = 0.551 \text{ [gCO}_2\text{eq/g]}$

■ Example Calculation 2:

For 75MT of blended biofuel (a blend of 21.890MT of the biofuel from Example 1 and 53.110MT of VLSFO):

- Energy of biofuel [MJ] = $0.037 \text{ [MJ/gFuel]} \times 21.890 \times 10^6 \text{ [g]} = 809,930 \text{ [MJ]}$

- Energy of VLSFO [MJ] = $0.041 \text{ [MJ/gFuel]} \times 53.110 \times 10^6 \text{ [g]} = 2,177,510 \text{ [MJ]}$

(In the case that LCV and Cf of LFO are used for VLSFO.)

- Ratio of energy between biofuel and VLSFO = $809,930 / (809,930 + 2,177,510) : 2,177,510 / (809,930 + 2,177,510) = 0.271 : 0.729$

- Blend Cf [gCO₂eq/g] = $0.271 \times 0.551 + 0.729 \times 3.151 = 2.446 \text{ [gCO}_2\text{eq/g]}$

	Lower Calorific Value [MJ/g]	Fuel Weight [g]	Energy Amount [MJ]	Ratio of Energy	Cf [gCO ₂ eq/g]	Blend Cf (Weighted Average based on Energy) [gCO ₂ eq/g]
FAME	0.037	21.890×10 ⁶	809,930	0.271	0.551	0.149
VLSFO	0.041	53.110×10 ⁶	2,177,510	0.729	3.151	2.297
Total		75.000×10 ⁶	2,987,440	1.000		2.446