

LIGHTHOUSE REPORTS

Hållbara försörjningskedjor med eldriven sjöfart mellan Norrland och Södertälje



En förstudie utförd inom Trafikverkets branschprogram Hållbar sjöfart som drivs av Lighthouse. Publicerad februari 2023

Hållbara försörjningskedjor med eldriven sjöfart mellan Norrland och Södertälje

Författare

Sara Rogerson, Tobias Olsson, Staffan Sjöling, SSPA

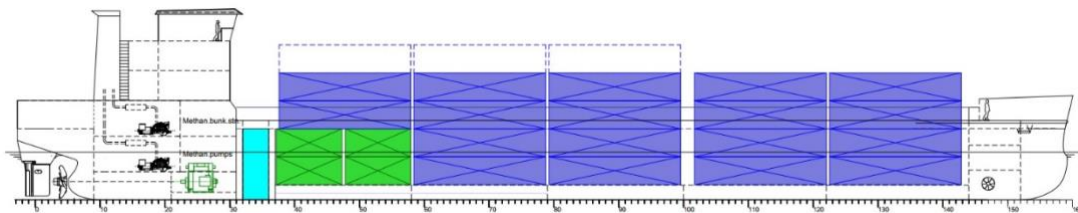
Andreas Bach, RISE

I samarbete med

Fredrik Wrede, Anders Olsson och Axel Brundin på Northvolt

Patrik Johansson på Scania

Robin Hanson på Chalmers



Denna förstudie har genomförts inom Trafikverkets branschprogram Hållbar sjöfart, som drivs av Lighthouse.

Summary

The background to this pre-study is that electrification of transports is important for the transition towards more sustainable transports. Vehicle manufacturers, e.g., Scania, are investing in this and an important component is battery cells, where large investments are also made, e.g., Northvolt's Skellefteå factory. For vehicle production components manufactured in Skellefteå need to be transported to Södertälje and a sustainable mode of transport between the two factories is sought. Considering the distance, volumes and weight, sea transport is of primary interest.

However, many challenges are associated with electrified shipping between Norrland and southern Sweden, especially challenging is the long distance and the fact that the ship needs to sail in ice conditions in the wintertime. Therefore, different alternatives need to be investigated. The project aims to produce knowledge about available alternatives and development needs. In this report we analyse needs (e.g., capacity, speed), design alternatives, and environmental performance, resulting in a vessel concept. A sustainable and, if possible, battery-powered transport solution was sought, which would be valuable for the participating companies, and in a larger perspective for the development of maritime electrification.

The presented vessel concept uses battery as primary energy source, used during the larger part of the year, showing that a fully battery electrified solution is possible despite the distance. However, the vessel needs to be operable in conditions with the highest power need, in this pre-study that is when the vessel needs to move through ice. During the winter period the batteries are complemented with energy from combustion engines powered by green methanol since the cost for operating entirely on battery power during winter and ice conditions could not be motivated. The vessel is designed to transport approximately 60 40-foot-containers. With one return trip per week the average speed is relatively low, making electrification possible despite the distance. The vessel will be in port for loading and unloading approximately twelve hours, which is sufficient time for charging of the batteries while maintaining a manageable charging power.

A project continuing the work from the pre-study starts during 2023. It will go into more details regarding ship design and technical choices, and also add business perspectives for transport operators, risk analysis and infrastructure.

Sammanfattning

Bakgrunden till förstudien är att elektrifiering av transporter är viktigt för en omställning till mer hållbara transporter. Fordonstillverkare, såsom Scania, satsar på elektrifiering och en viktig komponent är battericeller, där det också sker stora satsningar, såsom Northvolts fabrik i Skellefteå. För fordonstillverkningen behöver komponenter som tillverkas i Skellefteå transporteras till Södertälje och en hållbar transport mellan fabrikerna eftersträvas. Baserat på sträckan, volymer och vikt är sjötransport av primärt intresse.

Dock finns många utmaningar kopplade till elektrifierad sjöfart mellan Norrland och södra Sverige, särskilt utmanande är avstånd och is. Därför behöver olika alternativ undersökas. Projektet syftar till att ta fram kunskap om tillgängliga alternativ och utvecklingsbehov. I denna rapport analyserar vi behov (t.ex. kapacitet och hastighet), designval och miljöpåverkan och ett fartygskoncept tas fram. En hållbar och om möjligt batteridriven transportlösning eftersträvades, vilket skulle vara värdefullt för de deltagande företagen, men även i ett större perspektiv för utveckling av sjöfartens elektrifiering.

Rapporten beskriver ett fartygskoncept som drivs på batterier större delen av året och visar att elektrifierad sjöfart är möjlig trots den långa sträckan. För att säkerställa att fartyget har tillräcklig effekt behöver hänsyn tas till de dagar effektförbrukningen är som högst, i förstudien gäller detta de dagar om året fartyget behöver ta sig fram genom is. Under vintern, vid gång i is, kompletteras batteriframdriften med energi från förbränningsmotorer som drivs av grön metanol, eftersom kostnaderna för endast batteri-drift för gång vintertid i is inte kunde motiveras i detta läge. Fartygskonceptet är utarbetat för att kunna transportera ca 60 stycken 40-fotscontainrar. Med tur och returresa en gång per vecka kan man ha en relativt låg medelhastighet, vilket ger förutsättningar för elektrifiering trots den långa sträckan. Fartyget skulle ligga vid kaj ungefär tolv timmar för lastning och lossning vilket skulle ge tillräcklig tid för laddning av batterier samtidigt som laddningseffekten kan hållas på en hanterbar nivå.

Ett fortsättningsprojekt som startar under 2023 kommer belysa fartygsdesign från ett vidare perspektiv och ta hänsyn till affärsmässiga aspekter från transportoperatörer samt förfining av tekniska val, riskanalys och infrastruktur på land.

Innehåll

1	Inledning.....	5
1.1	Problemställning.....	5
2	Bakgrund.....	6
2.1	Elektrifiering.....	6
2.2	Exempel i vår omvärld.....	8
3	Metod.....	9
4	Elektrifierad sjötransport av fordonsbattericeller mellan Skellefteå och Södertälje .	10
4.1	Behov, krav och begränsningar.....	10
4.2	Designval.....	11
4.2.1	Alternativ för framdrift.....	11
4.2.2	Resplan och energiförbrukning.....	12
4.2.3	Energilagring.....	14
4.2.4	Vinterresor – gång i is.....	16
4.2.5	Hybriddrift med metanol.....	17
4.2.6	Metanol ombord.....	18
5	Fartygskoncept.....	19
5.1	Kraftfördelning.....	22
5.2	Årlig energiförbrukning.....	23
5.3	Fartygsstorlek kopplat till lotsplikt.....	24
6	Analys av utsläpp och kostnad.....	25
6.1	Växthusgasutsläpp.....	25
6.2	Kostnad.....	26
7	Diskussion.....	28
7.1	Jämförelser med tidigare upplägg.....	28
7.2	Längre sträcka och gång i is.....	28
7.3	Kombination batteriframdrift och metanol.....	29
7.4	Fortsatt forskning.....	29
8	Slutsatser.....	32
9	Referenser.....	33

1 Inledning

1.1 Problemställning

För tyngre fordon har Sverige två ledande tillverkare, varav Scania med sin bas i Södertälje är en av dessa. Northvolt, en svensk tillverkare av batterier, har lokaliserat tillverkning av battericeller till fordonsindustrin i Skellefteå. Med tanke på att de komponenter som skall transporteras mellan Skellefteå och Södertälje ska användas för att elektrifiera vägtransporter önskar Scania och Northvolt se över alternativen som finns tillgängliga och kan utvecklas för att kunna elektrifiera så stor del av försörjningskedjan mellan Skellefteå och Södertälje som möjligt. De volymer och vikter som föreslås gör att sjöfart ses som det primära alternativet. Bi-villkoret är att det skall vara en hållbar lösning, och gärna batteridrivna. Den sträcka som det rör sig om är i sammanhanget lång, över 900 km eller 500 nm enkel väg.

Denna rapport beskriver resultaten i en förstudie som har genomförts inom Trafikverkets branschprogram Hållbar sjöfart, som drivs av Lighthouse. Förstudien har utförts av SSPA, RISE, Northvolt, Scania och Chalmers.

Specifikt utvecklas koncept för grön elektrifierad sjötransport av fordonsbattericeller, vilket är till nytta för sjöfartsbranschen genom att belysa nya aspekter, såsom längre sträckor än vad som tidigare har elektrifierats. Projektet belyser hur elektrifiering av sjöfarten kan uppnås och vad som återstår att åstadkomma innan en lösning kan vara på plats. Projektets resultat är till nytta dels för varuägarna som initierat projektförslaget, och är intresserade av att skicka gods med en hållbar sjöfartstransport, men de är också till nytta för andra aktörer som är involverade i elektrifiering av sjöfarten, såsom rederier, hamnar och leverantörer av fartygsdesign och komponenter. Den förståelse för parametrar, val och alternativ som skapas kan användas även till utveckling av andra elektrifierade fartyg.

2 Bakgrund

2.1 Elektrifiering

Att gods ska transporteras med järnväg och sjöfart i större utsträckning har varit en tydlig ståndpunkt från regeringen under många år. Detta syns exempelvis i den av regeringen framtagna nationella godsstrategin (Regeringskansliet, 2018). Vid överflyttning av vägtransporter till sjöfart beräknas koldioxidutsläppen minska med hälften för varje överflyttad tonkilometer med dagens tekniknivå (Sjöfartsverket, 2021).

Även om elektrifiering av sjöfarten inte kommit lika långt som på vägsidan är, enligt Lighthouse rapport Elektrifiering av sjöfarten (2018), utvecklingshastigheten hög inom maritim elektrifiering. För fartyg finns lösningar av olika grad av elektrifiering: dielelektrisk, batterihybrid och helelektriskt. där ungefär en tredjedel av elektrifierade fartyg är helelektriska och två tredjedelar är hybrider (Anwar m.fl., 2020).

Framför allt finns en hög grad av elektrifiering av passagerarfartyg, för fartyg som trafikerar kortare sträckor på en specifik rutt. Exempelvis finns flera helt batteridrivna färjor i Norge. E/S Ampere sjösattes 2015 som världens första helelektriska bilfärja, och transporterar bilar och passagerare över Sognefjorden i Norge (Moore, 2015). Svenska initiativ inkluderar elektrifiering av kortväga färjetrafik. Exempelvis trafikeras Helsingborg-Helsingör (Fredelius, 2017). RISE och Chalmers (2021) visade på att ett helelektriskt RoPax-fartyg mellan Göteborg och Fredrikshamn är tekniskt och kommersiellt realistiskt. I Finland sjösattes 2017 den batteridrivna färjan "Elektra" som har dieseldrivna generatoraggregat för extra effekt när så behövs, t.ex. i de fall isläget kräver det (Knight, 2017). Elektrifiering har även skett inom offshore-industrin och specialfartyg såsom bogserbåtar har elektrifierats. Enhetslast, främst container, har däremot låg grad av elektrifiering. Dock utvecklades Yara Birkeland, ett helelektriskt containerfartyg (för 120 TEU – motsvarande 120 stycken 20-fotscontainrar) för att trafikera Herøya, Larvik och Brevik längs Norges kust: (Kongsberg, 2018). Anwar m.fl. (2020) gick igenom tidigare litteratur och noterade att Norge och Danmark är ledande nationer inom elektrifiering av fartyg, följda av Sverige och några andra nationer.

Än så länge är det främst kortare sträckor som är helt batteridrivna, eftersom batterierna blir för stora och dyra för sträckor med längre överfartstider. Hybrid snarare än helelektriska fartyg används för långa sträckor på grund av laddningsbehov (Anwar m.fl., 2020). Savard m.fl. (2020) diskuterar hur en möjlig användning av elektrifierade fartyg på "Northern Sea Route" skulle kunna innebära att fartyget byter batterier i hamnar med tusen kilometers mellanrum. Kersey, Popvich och Phadke (2022) visar att ett pris omkring USD 100 per installerad kWh batteri skulle göra det ekonomiskt fördelaktigt med ren batteridrift på vissa sträckor uppemot 1 500 km (cirka 810 nm). I takt med att batteripriset minskar och energitätheten ökar, i kombination med att laddningstiden förkortas, kommer den batterilagrade energin att utökas och längre sträckor kommer kunna elektrifieras.

Litiumjonbatterier är den vanligast förekommande typen av batterier. Lighthouse (2018) beskrev flera teknikutmaningar, såsom att uppnå tillräcklig laddningshastighet och batterieffekt samt en tillförlitlig laddningsmetod. Dessutom påpekades behovet av en fungerande laddningsinfrastruktur samt att det fanns få erfarenheter kring säkerheten vid

batterianvändning. Stefenson m.fl. (2022) lyfte fram tillgång till el i hamnar och laddningshastighet som utmanande och studerade energilagringmöjligheter i hamn.

Lighthouse rapport (2018) belyser flera parametrar som är viktiga för elektrifiering av fartyg, inklusive körprofil, fartygsspecifika parametrar och infrastruktur för laddning. RISE och Chalmers (2021) inkluderar flera relevanta system i sitt fartygskoncept: batterikapacitet, batterilagring, batterisäkerhet, laddningskapacitet, fraktkapacitet och hantering, framdrivningssystem, elektrisk distribution, samt kostnadsberäkningar. Körprofilen inbegriper att effektbehovet varierar över tid beroende på hur fartyget framförs, såsom hastigheter, accelerationer, variationer i vattenström, våghöjd, vind och istäcke. För att säkerställa att fartyget har tillräcklig effekt behöver hänsyn tas till de dagar då effektförbrukningen är som högst. Ett fartygs energiåtgång påverkas av hydrodynamiska parametrar, såsom skrovets utformning, exempelvis tröghetskrafter. Vikt, storlek och placering av batteri spelar roll för fartygets stabilitet och hydrodynamiska motstånd. Beträffande laddning av batterier är placering och laddningseffekt viktigt att beakta. Exempelvis kan energiöverföring ske med lägre effekt för fartyg som ligger länge vid kaj, medan kortare tid vid kaj kräver högre effekt.

Lighthouse rapport (2018) beskriver också att flera aktörer är involverade i elektrifiering av sjöfarten, inklusive hamnar, rederier, myndigheter, leverantörer av energilagring, fartygsdesign och komponenter. Rederierna är beställare av fartyg och ny teknik, hamnarna tillhandahåller laddningsinfrastruktur. Teknikleverantörer inom ett antal områden, såsom energilagring (t.ex. batterier), bränsleceller, system och komponenter till ombordvarande system, fartygsdesign och landanslutning har en viktig roll att spela. Även leverantörer av energibäraren (t.ex. elektricitet) är viktiga aktörer i ett elektrifierat system. Varven använder sig av ny teknik när de levererar nybyggda fartyg till rederierna. Även myndigheter och klassningssällskap har en viktig roll i utformningen av långsiktiga mål, regler och standarder.

Sjöling m.fl. (2020) beskriver ett fartygskoncept bestående av ett batteridrivet containerfartyg avsett att operera emissionsfritt i inlandssjöfart på Göta älv mellan Göteborgs hamn och Trollhättan. Fartygskonceptet utvecklades för att undersöka om det skulle vara möjligt att transportera containrar med ett helt elektrifierat fartyg givet sträckans operationella förutsättningar. Bland annat togs hänsyn till sträckan, vattenström, hastighet, fartygsstorlek och farledsbegränsningar för att anpassa batterikapaciteten. Santén m.fl. (2021) rapporterar att fartygskonceptet visar att det är möjligt att transportera ett stort antal containrar över långa sträckor med enbart el och för fem returesor varje vecka.

Dervishllari och Svemark (2020) gjorde en kostnadsanalys av ovan nämnda Göta älv-fartygskoncept och fann att det batteridrivna fartygskonceptet hade högre totalkostnad jämfört med traditionella inlandsfartyg. De påpekar att dagens batterier har kort livslängd och behöver bytas ut flera gånger under ett fartygs livslängd, vilket bredvid kostnaden för elektriciteten är en av de stora kostnaderna (Kyunghwa m.fl., 2016). Trots detta menar Dervishllari och Svemark (2020) att det finns starka incitament att elektrifiera fartyg. Dels förväntas livslängden på batterier förlängas genom teknisk utveckling, dels kan framtida lagstiftning innebära ökade kostnader för dieseldrift.

2.2 Exempel i vår omvärld

Nedan ges en bakgrund till vad som finns i vår omvärld samt framtida projekt som är intressanta för utvecklingsarbetet. Dessa ger en bild av ramarna för elektrifierade fartyg som existerar eller är planerade, till exempel med avseende på räckvidd och kapacitet.

Tycho Brahe och Aurora är två färjor som konverterats till elhybridisering som kör mellan Helsingborg – Helsingör. Tycho Brahe är en hybridisering med en installerad batterikapacitet av 6 400 kWh vilket gör att den är utrustad med världens största batteriinstallation (ForSea, 2021). Laddeffekt för att klara tidtabellen beräknas till cirka 10 MW (Bisschop m.fl., 2021).

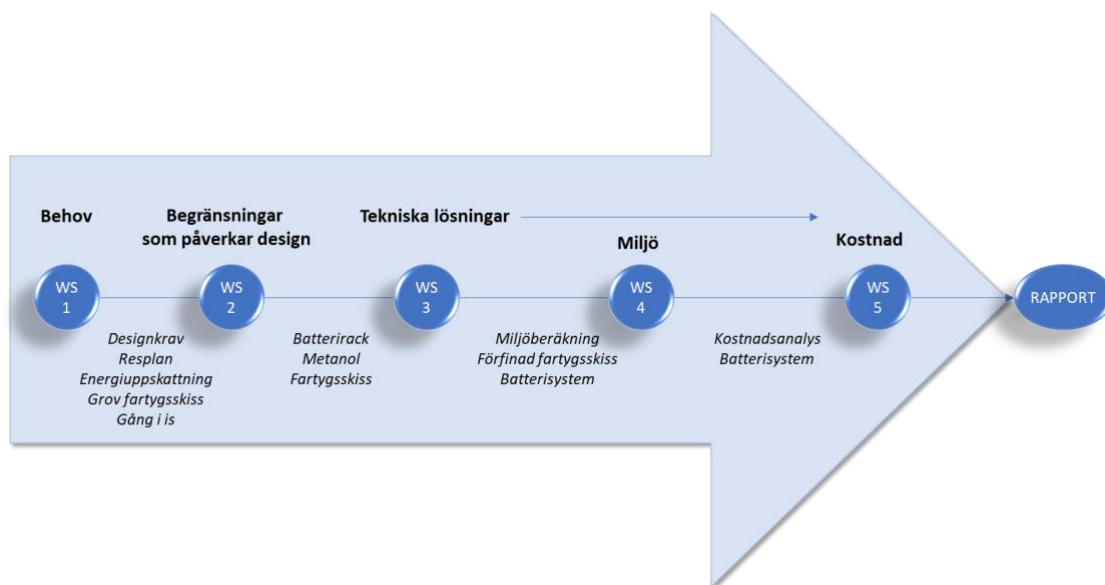
E-ferry Ellen är ett nybygge för passagerare och fordon som trafikerar Søby – Fynshav. Fartyget körde vid sjösättningen (2019) världens längsta sträcka för ett helt elektrifierat fartyg; 22 nm. Den installerade batterikapaciteten är 4 300 kWh (E-ferry, n.d.).

Stena Elektra är en helt elektrifierad RoPax-färja för trafik mellan Göteborg – Fredrikshamn med leverans tidigast 2027. Sträckan motsvarar ungefär 50 nm vilket kräver omkring 70 MWh installerad batterikapacitet. Laddningseffekten vid kaj beräknas till uppemot 30 MW (Stena Line, n.d; 2021). Om projektet förverkligas skulle det bli det största helt elektrifierade fartyget i världen med den största installerade batterikapaciteten, den längsta trafikerade sträckan med bara batterier och troligtvis den kraftigaste landanslutningen till elnätet för ett enskilt fartyg.

Ett alternativ till fasta batteriinstallationer ombord är att använda standardiserade batterier som kan laddas i land och bytas när fartyget ligger till kaj. I Nederländerna trafikerar containerfartyget Alphenaar kanalerna mellan Alphen aan den Rijn och Moerdijk sedan slutet av 2021 med utbytbara 20-fots battericontainers, en sträcka av omkring 38 nm (ZES, 2021). Ett liknande koncept med utbytbara enheter har även utvecklats av Norled tillsammans med SEAM för trafik av snabbgående passagerarfärjor. Konceptet bygger på en automatiserad process för byte av batterier med planerad demonstration tidigast i slutet av 2023 i Oslofjorden (Norled, 2021).

3 Metod

Projektet har använt en stegvis process, med möjlighet till flera iterationer. Under projektet har fem workshops anordnats där projektparterna gått igenom olika detaljer och diskuterat val och alternativ för projektets fortsatta arbete. Mellan workshoppar har arbete framskridit i enlighet med beslut under workshop. Figur 1 visar fokus under respektive workshop samt områden som arbetats med emellan dessa möten. Som visas återkommer och förfinas flera av frågeställningarna, såsom fartygsskiss och batterisystem.



Figur 1: Översikt av arbetsgången i förstudien

Framtagandet av fartygsdesignen följer en iterativ, systematisk och traditionell skeppsbyggnadsspiral. Metoden är formellt beskriven första gången av Evans (1959) och har sedan dess förfinats och utvecklats, t.ex. för att behandla en specifik fartygstyp eller för att passa en enskild organisations styrkor, men huvuddragen följer samma mönster. En iteration börjar med att ta fram behov och krav, går vidare med att ta fram en design som möter dessa och avslutas med att utvärdera designen. Efter avslutad utvärdering påbörjas en ny iteration för att förbättra designen. Antalet iterationer varierar men avslutas som regel när ytterligare en iteration blir för kostsam eller endast ger en marginell förbättring.

Utvärderingen av designen är en del av skeppsbyggnadsspiralen. Förutom att kontrollera hur designen möter de ursprungliga behoven och kraven ingår ofta både en kostnads- och miljöanalys. I den här rapporten tar miljöanalysen hänsyn till växthusgasutsläpp från produktion och användning av energi ombord, även kallat "well-to-wake". Kostnadsanalysen jämför de system ombord som antas skilja sig åt mellan koncepten men applicerar inga fler finansiella verktyg så som nuvärdesberäkning.

Det koncept som utvecklats har inte utvecklats i sin helhet. Fokus i den här studien har legat vid lastutrymme för containers, energiåtgång, tilläggsmotstånd vid isgång och maskinutrymme. Vid en fortsatt konceptutveckling måste alla delar av fartygskonceptet ses över i mer detalj.

4 Elektrifierad sjötransport av fordonsbattericeller mellan Skellefteå och Södertälje

4.1 Behov, krav och begränsningar

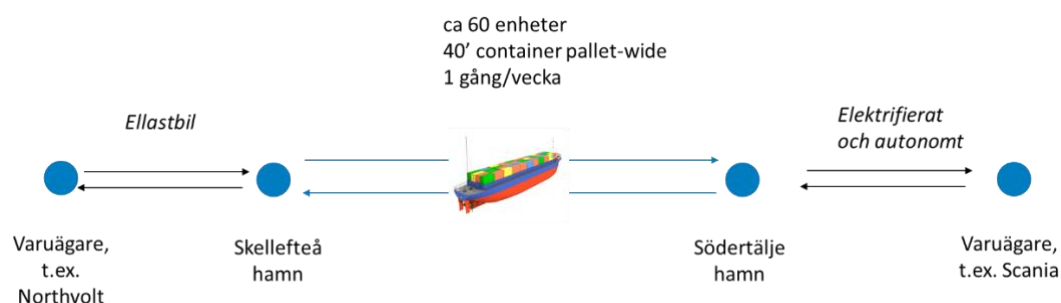
Ett flertal samtal hölls tillsammans med lastintressenterna för att skapa en bild av deras behov. Behoven grundas främst i önskemål från projektparterna för att hantera delar av deras godsflöde men godsvolymen är inte begränsad till enbart godsflödet mellan Northvolt och Scania. En viktig grundförutsättning var att det fanns godsflöde i båda riktningar. Utifrån diskussioner i projektgruppen kunde ett antal övergripande designkrav specificeras och begränsningar identifieras.

Behovsanalysen resulterade i följande:

- Transporten ska vara sjöburen
- Avgång från Skellefteå ska ske minst en gång i veckan till Södertälje
- Avgång ska ske årets alla veckor, d.v.s. även vintertid när det förekommer is
- Godset fraktas i 40-fots pallet wide-containers
- Alla containers ombord kan komma att vara lastade till sin maximala viktgräns
- Delar av godset är farligt gods
- Transportbehovet för gods lämpligt för sjöburen transport består av flera intressenter men kan antas vara konstant
- Parternas målsättning är att elektrifiera sin verksamhet i så hög grad som möjligt
- Fartygskonceptet behöver vara realiserbart i närtid

Behovet kunde därefter omsättas till övergripande designkrav och begränsningar:

- Fartyget hanterar endast containers
- Containers hanteras av hamnens kranar och stuveri
- Fartyget ska ha en samlad lastförmåga med plats för 60 enheter 40²-containers
- Fartyget bör ha en designhastighet omkring 11 knop
- Förväntad hastighet för avgång veckovis beräknas till under 8 knop
- Fartyget behöver isklass 1A för att möta isrestriktioner i Skellefteå hamn
- Fartyget bör ha en dödvikt på minst 4 000 ton för att möta Sjöfartsverkets isrestriktioner i Bottenviken
- Fartygets maskineffekt måste dimensioneras efter kraven på isklass
- Effektbehovet för framdrift skiljer sig markant mellan sommar och vintertid när det ligger is



Figur 2: Illustration av godsflöde

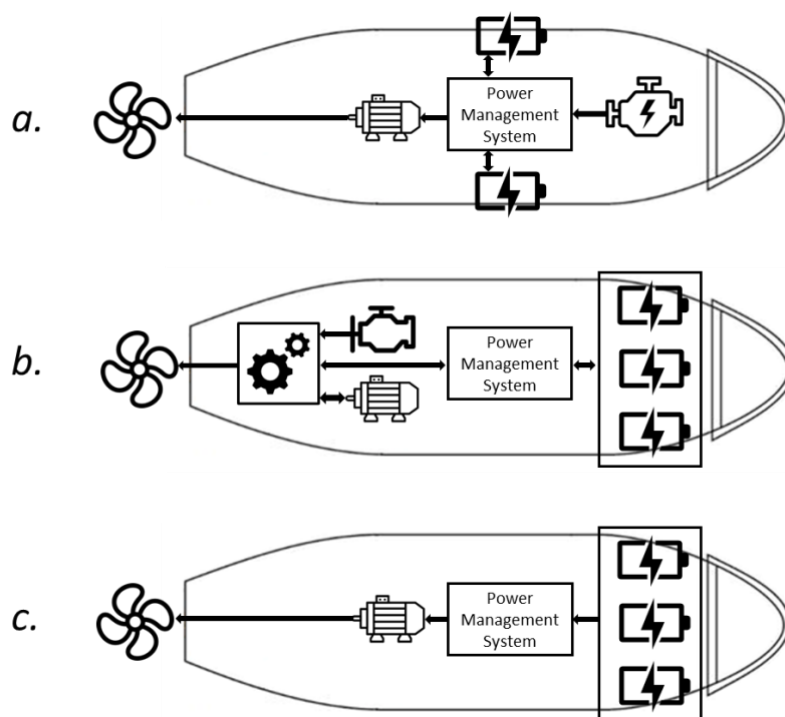
4.2 Designval

4.2.1 Alternativ för framdrift

För att integrera batterier i en drivlina finns tre olika alternativ med viss inbördes variation. Alternativen är presenterade schematiskt i Figur 3 och kan beskrivas som:

- a) seriell hybrid
- b) parallell hybrid
- c) helt elektrifierad

Både formerna av hybridinstallation använder sig av en förbränningsmotor och en generator. Skillnaden mellan hybriderna är elmotorns koppling och funktion till drivlinan. Seriehybridens (a) kraftförsörjning består av en förbränningsmotor kopplad till en generator som i serie med batterier driver elmotorn till propellern eller vid överskottsenergi från generatoren t.ex. laddar batterier. Parallellhybridens (b) elmotor kan arbeta parallellt med förbränningsmotorn och ta kraft från batterier för att ge kraft till propelleraxeln (Power Take In) eller fungera som en generator (Power Take Out) och mata ström till fartygets huvudtavla, för att t.ex. ladda batterier. Det senare kan ske genom att en växellåda används, så som presenterat här. Det helt elektrifierade arrangemanget (c) använder sig endast av batterier för att förse fartyget med kraft. Alla arrangemang kan potentiellt integrera andra metoder för att alstra energi, så som bränsleceller, för att komplettera eller ersätta förbränningsmotorer helt. Den installerade batterikapaciteten kan ökas eller minskas efter behov och begränsas i princip bara av grundläggande förutsättningar för fartyget så som tillgängligt utrymme, stabilitet och vikt.

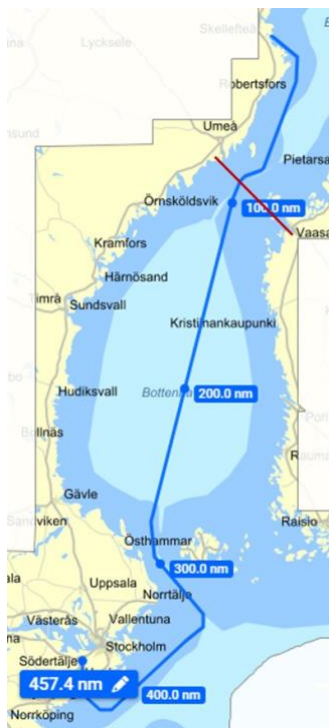


Figur 3: Tre möjliga utformningar för att integrera batterier i en drivlina. (a.) seriehybrid, (b.) parallellhybrid, (c.) helt elektrisk

Miljöprestandan hos en förbränningsmotor bestäms i hög grad av valet av bränsle. Ett miljöanpassat bränsle kan anses ha en mycket låg miljöpåverkan beroende på vilka råvaror och vilken produktionsväg som används (se Tabell 8 i 6.1). Fördelen med bränsle, i nära på alla idag förekommande former, jämfört med batterier, är att energitätheten ökar drastiskt (DNV, 2019). Det krävs helt enkelt mindre utrymme ombord för att bära med sig lika mycket energi, även när tankar och kringssystem för att omvandla den till användbar kraft ombord räknas med.

4.2.2 Resplan och energiförbrukning

Mellan Skellefteå och Södertälje är det en sträcka på strax under 460 nautiska mil sjövägen. En överblick på resplanen finns presenterad i Figur 4 där även passagen genom Nordvalen är indikerad med ett rött sträck. Hastigheten och energiförbrukningen för att sommartid möta en avgång veckovis från Skellefteå är presenterad i Tabell 1. Här har en marginal på 15% inkluderats för att ta hänsyn till väderförhållanden. Tiden för lastning och lossning är anpassad efter hamnens och kranarnas kapacitet. En motsvarande beräkning för vintertid med ett mild isförhållande är presenterad i Tabell 2. Beräkningarna av energibehov har bedömts mot framdriftseffekter och hotelleffekter för snarlika fartyg och fartområden. Storleken på den totala batteriinstallationen (brutto) har gjorts med antagandet att ett urladdningsdjup (depth of discharge) av 80% används av den installerade kapaciteten för att möta den beräknade energiförbrukning (netto), se även förklaring i 4.2.3.



Figur 4: Illustration av sträckan som fartyget designas för inklusive röd markering för passagen genom Nordvalen.

Jämfört med andra fartyg i samma storlek är den beräknade medelhastigheten på strax över 7 knop relativt låg. Det är däremot med stor sannolikhet en viktig förutsättning för att kunna elektrifiera fartyg som färdas långa sträckor. Med en högre hastighet stiger

effektbehovet vilket kräver större installerad batterikapacitet ombord, batterikapaciteten blir på så sätt en av de dominerande drivkrafterna bakom fartygets storlek eftersom installationen är skrymmande. I den totala transportekonomin är det viktigt att anpassa fartyget efter lastbehovet och därför inte göra fartyget större än vad som krävs: högre hastighet driver snabbt upp fartygets storlek utan att nämnvärt påverka kapaciteten av nyttolast, vilket kan resultera i en ineffektiv transport.

Fartyget antas ligga till kaj ungefär tolv timmar för att lasta och lossa och givet energiförbrukningen under sommartid beräknas effekten av laddaren behöva överstiga 3 MW.

Tabell 1: Energiberäkning för sommar, normalfallet när ingen is förekommer.

Sommar							
Del	Tid	Sträcka	Hast.	Aux Pow	Aux Energi	Prop Pow	Prop Energi
	(h)	(nm)	(kn)	(MW)	(MWh)	(MW)	(MWh)
Lasta i Skellefteå	6	-	-	0	0	0	0
Utsegling	2,1	15	7,1	0,2	0	0,27	0,6
Transit till Södertälje	56,2	410	7,3	0,2	11	0,29	16,3
Insegling	4,5	32	7,1	0,2	1	0,27	1,2
Lossa i Södertälje	6	-	-	0	0	0	0
Lasta i Södertälje	6	-	-	0	0	0	0
Utsegling	4,5	32	7,1	0,2	1	0,27	1,2
Transit till Skellefteå	56,2	410	7,3	0,2	11	0,29	16,3
Insegling	2,1	15	7,1	0,2	0	0,27	0,6
Lossa i Skellefteå	6	-	-	0	0	0	0,0
Summa	149,6	914,0			25,1		36,1
Dagar	6,2						
						Summa	61,3 (MWh)
						Urladdningsdjup	80 (%)
						Totalt installerad batterikapacitet	76,6 (MWh)
						Enkel väg	38,3 (MWh)

Vintertid har sträckan delats upp i fler segment och effektbehovet ökat, dels genom högre framdriftseffekt eftersom fartyget behöver passera genom is, dels genom en högre hotellast bland annat på grund av lägre utomhustemperatur. För att minska energiförbrukningen har hastigheten sänkts till fem knop när fartyget passerar genom områden med is. Sänkningen av hastighet medger fortfarande avgång från Skellefteå en gång i veckan. Oavsett behövs omkring 30% mer framdriftseffekt under dessa förhållanden och för hela resan under vintertid en total ökning med omkring 37%. Vidare konsekvenser av större utbredning av is beskrivs närmare i 4.2.4 *Vinterresor – gång i is*.

Det finns osäkerhet i beräkningarna grundat i osäkerheter kring istjocklek och den här typen av fartyg. Det är relativt modesta effektökningar under dessa lätta isförhållanden totalt sett samtidigt som det bör noteras att energiförbrukningen är nära tio gånger högre än batterikapaciteten på ForSeas färjor mellan Helsingborg och Helsingör samt av

liknande storlek som Stena Line skulle behöva för trafik mellan Göteborg och Fredrikshamn. Fartyget ska hantera trafik hela året vilket innebär att hela framdrivningssystemet måste dimensioneras med tanke på det värsta tänkbara utfallet för att undvika störningar. Det innebär därmed ett högt energibehov under en kort del av året, vilket kräver en stor mängd batterier eller annan energibärare.

Tabell 2: Energiberäkning för vinter, lätt is genom bruten ränna med öppet hav söder om Nordvalen

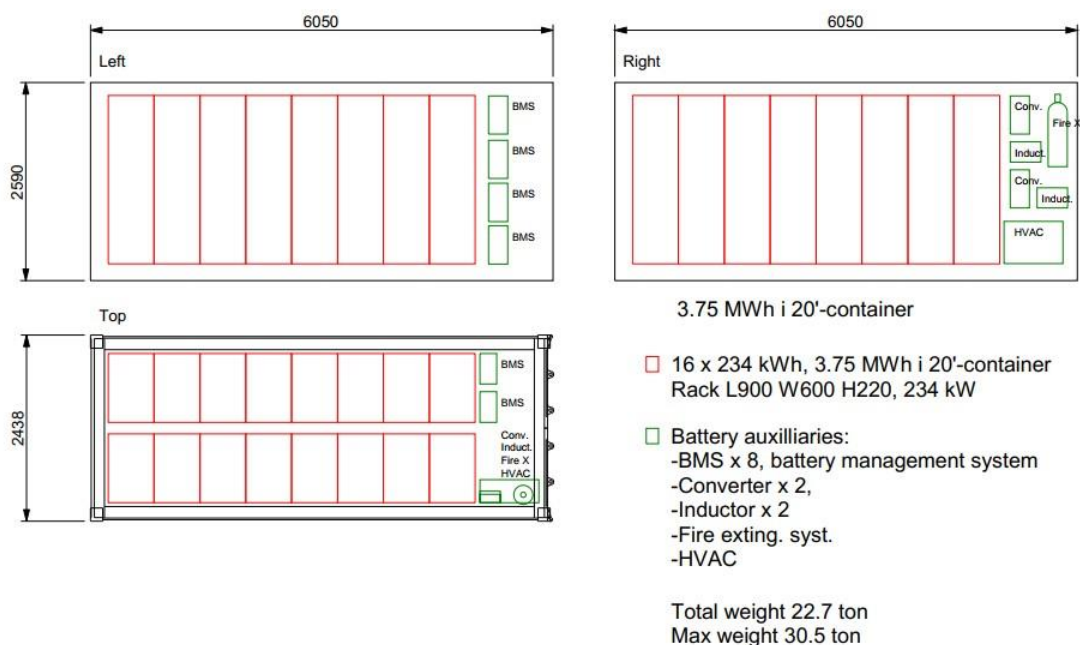
Vinter								
Del	Tid	Sträcka	Hast.	Aux Pow	Aux Energi	Prop Pow	Prop Energi	
	(h)	(nm)	(kn)	(MW)	(MWh)	(MW)	(MWh)	
Lasta i Skellefteå	6	-	-	0	0	0	0,0	
Utsegling	3,0	15	5	0,3	1	0,37	1,1	
Transit is till Nordvalen	15,1	75,3	5	0,3	5	0,37	5,6	
Transit öppet till Södertälje	45,8	334,7	7,3	0,3	14	0,29	13,3	
Insegling	4,5	32	7,1	0,3	1	0,27	1,2	
Lossa i Södertälje	6	-	-	0	0	0	0,0	
Lasta i Södertälje	6	-	-	0	0	0	0,0	
Utsegling	4,5	32	7,1	0,3	1	0,27	1,2	
Transit öppet till Nordvalen	45,8	334,7	7,3	0,3	14	0,29	13,3	
Transit is till Skellefteå	15,1	75,3	5	0,3	5	0,37	5,6	
Insegling	3,0	15	5	0,3	1	0,37	1,1	
Lossa i Skellefteå	6	-	-	0	0	0,13	0,8	
Summa	160,8	914,0			41,0		43,2	
Dagar	6,7					Summa	84,2	(MWh)
						Urladdningsdjup	80	(%)
						Totalt installerad batterikapacitet	105,3	(MWh)
						Enkel väg	52,6	(MWh)

4.2.3 Energilagring

Placeringen av batterier ombord kan i huvudsak ske på två olika sätt: inbyggda i utrymmen inuti skrovet eller i en standardiserad modul som kan lyftas av och på, till exempel en container. Projektet har inte utvärderat i detalj vilken lösning som passar bäst för just detta koncept. Ett designbeslut togs att fortsätta utvecklingen mot batterier integrerade i containers grundat i att konceptet bland annat ansågs mer framtidssäkert. Lösningen möjliggör att batterier enklare kan bytas ut vid behov eller vid uppgradering. Det ger också möjlighet till att ladda standardiserade enheter långsamt på land om utvecklingen går åt det hållet. Inte minst ansågs det också enklare att underhålla batterisystemet när delar av det kan lyftas av för service. Dock visar kostnadsanalysen i avsnitt 6.2 *Kostnad* att det för tillfället inte är en motiverad kostnad att ha extra enheter som laddas i land och byts när fartyget är i hamn. Nackdelen jämfört med integrerade batterier är bland annat att batteriutrymmen inte kan optimeras efter fartygets design med avseende på tillgänglig volym och flytkraft för att maximera lastförmågan. För ett mindre

fartyg designat för containerlast ansågs fördelarna med batterier placerade i containers uppväga nackdelarna utan vidare djuplodande analys.

Batterierna i containern bygger på Northvolts egna celler. Flera celler bygger tillsammans upp en modul. Flera moduler kombineras sedan till en sträng i ett rack. I en 20-fotscontainer ryms 16 rack med en sammanlagd energi på 3,75 MWh. Energin i ett Li-jon-batteri ska inte laddas ur helt och hållet för att maximera livslängden. Av den totalt installerade batterikapaciteten estimeras att ett urladdningsdjup på 80% användas. Det innebär att varje 20-fotscontainer rymmer 3 MWh användbar energi. Figur 5 visar en skiss på hur Northvolts batterirack med moduler skulle kunna installeras i en 20-fotscontainer.



Figur 5: 20-fots battericontainer med Northvolts batteri-rack och med tillhörande kringssystem.

Batterisystemet behöver några kringssystem för att fungera, vilket gör att det totalt får plats 16 batterirack i en 20-fotscontainer. Kringssystemet som förväntas behövas är:

- Battery management system (BMS), ett per batterirack. Dessa övervakar laddningsnivå, spänning, temperatur m.m. och är ett kritiskt säkerhetssystem
- El-omformare och brytare som styr spänningen från batterierna, hur de kopplas in/ut samt hur de laddas
- Ett brandsläckningssystem för släckning av brand i battericontainern
- Ett HVAC-system som säkerställer att batteriinstallationen opererar i en acceptabel miljö och temperatur.

En 20-fotscontainer med 16 batterirack med kringssystem beräknas väga 22,6 ton. Batterierna skulle också kunna installeras i 40-fotscontainers. Energitätheten blir emellertid större i en 20-fotscontainer eftersom den maximalt tillåtna vikten är samma för en 20-fots- och en 40-fotscontainer, 30,5 ton (Tabell 3).

Tabell 3: Energitäthet i olika storlekar av containrar

	20-fotscontainer	40-fotscontainer (dimensionerat efter utrymme)
Max batterirack	18	36
Batterirack med plats för annan utrustning	16	32
MWh per container	3,75 (80%, 3 MWh)	7,5
Totalt ton batterier per container	20 [16 rack]	40 [32 rack]
Total Containervikt	22,6 ton	44,6 ton MEN: Max-vikt 40' (DNV) 30,5 ton

Det kan noteras att 3,75 MWh i en 20-fotscontainer är mycket mer än vad som erbjuds av andra leverantörer på marknaden. Att en så pass stor energimängd kan installeras i en 20-fotscontainer beror på den höga energidensiteten som Northvolts batterier medger. Om batteri-racken dessutom installeras tätt ska den stora energimängden vara möjlig. I Tabell 4 visas en jämförelse över hur mycket energi som andra leverantörer på marknaden erbjuder.

Tabell 4: Jämförelse mellan olika leverantörers battericontainer

	Kapacitet	Container- storlek	Vikt	Energi/TEU (20-fotscontainer)
	(MWh)		(ton)	(MWh)
ABB flex 20	0,77	20'	14	0,77
ZEM	0,564	10'	i.u.	1,128
Corvus BOB-20'	1,492	20'	30	1,492
Huawei Luna 2000	2	20'HQ	≤30	1,8
ZES BV	2	20'	i.u.	2
CanadianSolar SolBank	2,8	20'HQ	29,8	2,5
Northvolt	3,75	20'	22,6	3,75

i.u. = ingen uppgift

4.2.4 Vinterresor – gång i is

Energibehovet för en resa mellan Södertälje och Skellefteå är uppskattat för gång i öppet vatten. Transporten ska ske under hela året, även då delar av ruten är isbelagd. Den extra energi som krävs för gång i is beror på isens tjocklek och hur långt istäcket sträcker sig. Dessutom beror energiåtgången på om fartyget självt måste bryta sig genom fast is, om det går i en bruten isränna eller assisteras av en isbrytare.

Energiåtgången för några exempel på isutbredning är uppskattad utifrån historiska kartor och israpporter från SMHI. Dels med lätt bruten is från Skellefteå till Nordvalen, dels med motsvarande utbredning med fast is och slutligen med isutbredning som sträcker sig långt, från Skellefteå halvvägs ned till Ålandshav.

Isfritt	38,3 MWh	– 12,8 20-fotscontainer batterier
Lätt is	52,6 MWh	– 17,5 20-fotscontainer batterier
Tjock is, fast 0,3 m, kort	56,7 MWh	– 18,9 20-fotscontainer batterier
Tjock is, fast 0,3 m, långt	67,8 MWh	– 22,6 20-fotscontainer batterier

För fallet med tjock is med lång utsträckning är energibehovet ca 80 % större än normalfallet. Stränga isvintrar kan isen vara tjockare och utbredningen mycket längre än halvvägs mellan Skellefteå och Ålandshav. Transporterna måste kunna göras även under dessa stränga vintrar.

4.2.5 Hybriddrift med metanol

Fartygskonceptet har utformats med ett hybridmaskineri, med möjlighet till rent elektrisk drift och med drift på grön metanol med hjälp av generatorer. Arrangemanget har ansetts nödvändigt för att klara transporterna under de strängaste vinterförhållandena då det behövs extra energi som är långt större än motsvarande för en isfri resa. Att ständigt bära den extra last, energi för gång i is lagrad i batterier, på varje resa har inte ansetts vara effektivt nyttjande av fartygsutrymme. Generatorerna fungerar på så sätt som räckviddsförlängare. Att ha möjligheten att kunna gå längre än sträckan mellan Södertälje och Skellefteå ökar också flexibiliteten i användandet av fartyget och förenklar när fartyget behöver gå till ett varv för underhåll eller reparation.

För hybriddrift var det viktigt med ett grönt alternativ som resulterar i låga utsläpp. De bränslen som undersöks för att minska utsläppen från sjöfarten inkluderar förnybar metanol, vätgas, ammoniak och flytande förnybar metangas (t.ex. biogas). Av dessa har metanol en hög teknisk mognadsgrad. Tillgången på ”gröna”/förnybara varianter av bränslena är begränsad idag, men för metanol sker betydande utveckling, där tillgången på grön metanol förväntas öka 2024. Efter diskussion i projektgruppen valdes att utreda möjligheterna med metanol som det bränsle som kompletterade batteriframdriften vid gång i is. En del av beslutet ligger i att metanol från rätt källa har mycket låga utsläpp av växthusgaser bland tidigare nämnda alternativ. En annan del ligger i att det finns en svensk leverantör av konverterade Scaniamotorer som kan använda metanol som bränsle. En tredje del ligger i att det planeras produktion av metanol i området omkring Örnsköldsvik. Tillgången på metanol behöver dock säkras. Sammanfattningsvis ansågs grön metanol tillräckligt intressant för vidare utredning. Men det bör noteras att jämförelse med andra bränslen inte har gjorts i detalj. Till skillnad från ammoniak och naturgas är metanol ett flytande bränsle vilket gör det enklare att lagra ombord. Det finns dock bland annat utmaningar med toxicitet vid tillräckligt hög koncentration och att bränslet har en låg flampunkt vilket båda ställer speciella krav på hantering och lagring.

Även om det finns fartyg med metanolframdrift idag, vilket gör att man känner till exempel där det byggts och används, så är det än så länge inte särskilt vanligt med metanolmotorer. De motorer som används i drift, t.ex. på Stena Germanica (Ellis m.fl. 2014) och Stena Pro Patria, är större motorer. Mindre motorer är ovanligare. Ett svenskt exempel är den lotsbåt som används i Oxelösund, som använder en bränsleblandning med 97% metanol. I forskningsprojektet Green Pilot (Ramne m.fl. 2018) provades metanolmotorer i en av Sjöfartsverkets lotsbåtar. Motorerna som provades var från Scania och WeiChai. Det svenska företaget Enmar konverterar idag Scaniamotorer både som tändstiftsantända och som kompressionsantända metanolmotorer. En kompressionständer metanolmotor från Enmar drivs med bränslet MD97, metanol med en mindre mängd tändförbättrare och smörjmedel. Bränslet blandas i den egna bunkerstationen. Det finns även fler tillverkare som utvecklar metanoldrivna motorer, både som retrofit och som nya modeller.

4.2.6 Metanol ombord

Hur ofta man behöver bunkra fartyget beror på hur man dimensionerar bränsletankarna ombord. På grund av lägre energiinnehåll har den gröna metanolen i princip dubblerad volym jämfört med konventionell diesel. Metanol har lägre energiinnehåll jämfört med fartygsdiesel, 5,6 kWh/kg jämfört med 11,9 kWh/kg för diesel. Därför behövs större bränsletankar för metanoldrift.

Metanol är ett lättantändligt bränsle, med en flampunkt på 11°C. När lättantändliga bränslen används ombord på fartyg måste det utformas enligt de särskilda reglerna i IGF-koden (Code of Safety for Ships using Gases or other Low flashpoint Fuels).

I och med att metanol är ett brandfarligt bränsle måste utrymmen ombord utformas med särskilda arrangemang. Tankar för förvaring av metanol måste förses med kofferdammar, tomutrymmen, runt om tanken. Dessa skall förhindra att eventuella läckage sprider sig till utrymmen där den lättantändliga vätskan, eller eventuella ångor från den, kan orsaka skada. Dessa kofferdammar måste också vara försedda med sensorer/detektorer som larmar vid läckage.

Pumpar som transporterar metanolen till och från bränsletanken måste stå i ett enskilt utrymme. Tätningar och lager i en bränslepump kan läcka varför pumpar ses som en särskild risk. Pumprummet måste ventileras med undertryck och utrymmet måste ha detektorer för upptäckt av läckage.

Vidare måste metanolen ledas i dubbel-väggiga rör mellan bränslepumpar och motorer. Bränsleledning mellan tank och motor måste också förses med automatiska avstängningsventiler, d.v.s. ventiler som utlöses om gasläckage upptäcks av detektorsystemet. Utrymmen med metanol (kofferdammar, pumprum och maskinrum) måste också förses med särskilda branddetektorer, eftersom metanol brinner med en osynlig och rökfri låga.

Sannolikt behöver ett inertgassystem installeras ombord. Dess huvudfunktion är att skapa en atmosfär som inte är brandfarlig. Det kan till exempel röra sig om att spola bränsleledningar eller injektion i bränsletankar för att skapa en syrefri och säker atmosfär. Intertgas, ofta kvävgas, kan antingen tillverkas ombord med en intergasgenerator eller lagras i tryckflaskor från land.

Metanol är en korrosiv vätska. För att kunna förvara metanol i ståltankar behöver dessa målas med en särskild färg. Metanol kan också förvaras i tankar av rostfritt stål, men det skulle innebära en mer komplicerad installation för en tank på 170 m³ eftersom rostfritt stål i sådant fall måste kombineras med sedvanligt fartygsstål.

Fartyget ska ha en särskild bunkerstation för bunkring av metanol. Bunkerstationen ska vara väl ventilerad, antingen genom naturlig eller mekanisk ventilation. Bunkerslangar och rör ska kunna spolade med inertgas efter avslutad bunkring. För att förhindra spill vid bunkring ska bunkeranslutningar ha sargar och bunkerslang ska vara med droppfri koppling.

Ventilationen i utrymmen där metanol kan förekomma behöver utredas för att etablera placering och omfattning av zoner där det finns risk för att ångor från metanol kan förekomma.

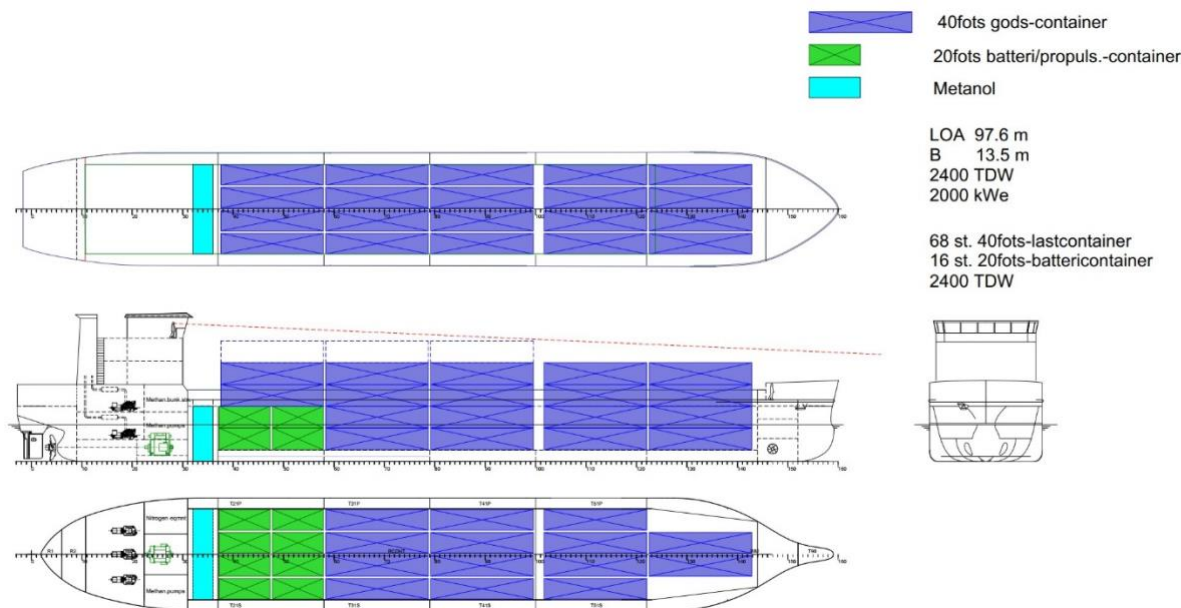
Vid eventuellt läckage överbord och ner i havet löses metanolen snabbt med vatten och neutraliseras utan långvarig påverkan på havsmiljön. Metanol är dock giftigt vid tillräckligt höga koncentrationer och inandning ska undvikas. Vid arbete med metanol ska skyddsutrustning användas så som handskar och glasögon användas. Vid hudkontakt ska det utsatta området sköljas och tvättas.

5 Fartygskoncept

Ett fartygskoncept för transporten mellan Skellefteå och Södertälje är framtaget. Konceptet är enkelt. Syftet med att ta fram en principiell utformning av fartyget var för att få en uppfattning om erforderlig fartygsstorlek för att klara transportbehovet och för att kunna göra preliminära beräkningar av effektbehov och utrymmesbehov ombord.

Konceptet har följande huvudparametrar

- 97 x 13,5 m
- 13 – 16 stycken 20-fotscontainrar för batteriframdrift
- 68 stycken 40-fotscontainrar last
- Batterielektrisk drift
- 2 000 kW elmotor för gång i is
- Metanol-elektrisk drift i is
- 170 m³ metanol, 10 resor i is



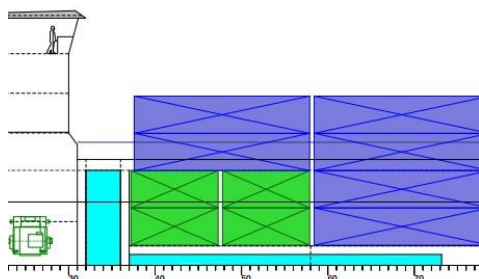
Figur 6: Fartygskoncept med lastcontainers i blått och battericontainers i grönt

Konceptet medger en kapacitet av 68 stycken 40-fotscontainrar (FEU) last och 16 stycken 20-fotscontainrar (TEU) med batterier för framdrift. Förmodligen kan ytterligare 12 FEU-containers rymmas, streckade konturer i skissen ovan (Figur 6). Men fartygsstabiliteten bör prövas närmre innan det kan säkras.

Den angivna dödvikten på 2 400 ton är liten i förhållande till fartygsstorleken vid en jämförelse med andra lastfartyg av motsvarande storlek. Dödvikten anger fartygets kapacitet att bära last och bunker för den egna driften. Det beror mest på att det antal

containers fartyget är planerat att bära är relativt litet. Skulle fartyget i stället transportera bulklast, t.ex. spannmål, skulle storleken och lastutrymmet medge en dödvikt på ca 3 800 ton, vilket är mer jämförbart med fartyg av motsvarande storlek.

En metanoltank med en volym på 170 m³ är placerad förom maskinrummet. 170 m³ metanol antas räcka till tio enkelresor i en farled med is. Tankens volym kan anpassas för ett tätare eller glesare bunkringsintervall. De tomtankar, eller kofferdammar, som är precis för- och akterom metanoltanken är en följd av regelkrav. Tankar som innehåller bränsle med låg flampunkt måste vara separerade från andra utrymmen med kofferdammar. Tankar för metanol kan också placeras i fartygets dubbelbotten. Men med krav på kofferdammar mot intilliggande utrymmen får de, vid en sådan placering, en lång utsträckning under lastutrymmet eftersom tankarnas höjd blir liten. Att ha tankar med metanol placerade under det utrymme som är planerat för containers med batterier är också tveksamt ur ett riskperspektiv. Både metanolen och batterierna är riskkällor för brand.



Figur 7: Alternativa placeringar av metanoltank, akterom lastutrymmet eller under lastutrymmet

Metanol är vattenlösligt och får placeras i tankar som ligger mot skrovsidan, något som inte är tillåtet för traditionell fartygsdiesel. Det underlättar till del placering av bränsletankar.

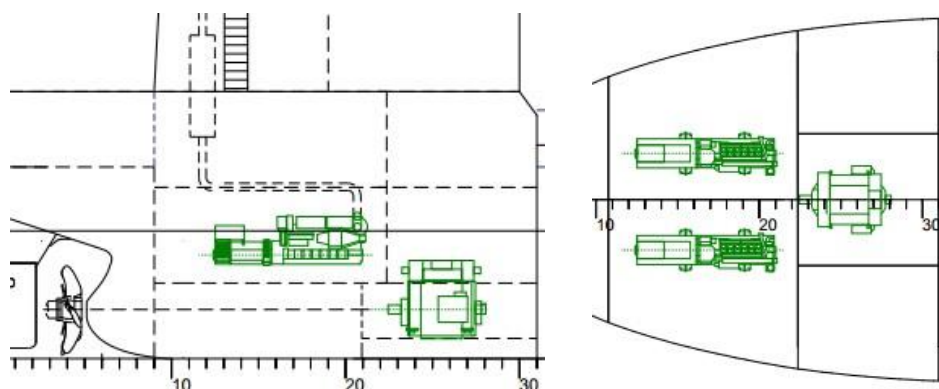
Under perioden med de svåraste isförhållandena i Östersjön sätter Sjöfartsverket en trafikbegränsning. Fartyg som anlöper Skellefteå hamn måste under vissa perioder ha isklass 1A och en dödvikt på minst 4 000 ton. Konceptfartyget har således mindre dödvikt än vad Sjöfartsverket anger.

Isklass 1A innebär att skrovet ska ha en skrovstyrka för att kunna gå i 50 cm tjock is. Minsta tillåtna maskinstyrka för isklass 1A är 1 000 kW enligt Transportstyrelsen. En beräkning enligt klassens bestämmelser för isklass, LR, ger att en maskinstyrka om 2 000 kW behövs (Transportstyrelsen 2009; Lloyd's Register 2022).

Fartyget ska drivas batterielektriskt under majoriteten av resorna. När norra Östersjön är istäckt behövs ett så pass stort tillskott av framdriftsenergi att batteridrift blir orimligt, eftersom en mycket stor del av fartygets lastförmåga skulle upptas av batterier för framdriften. Vid gång i is kompletteras därför batteriinstallationen med generatorer för att producera el, här drivna av metanol, i en seriehybridiserad drivlina.

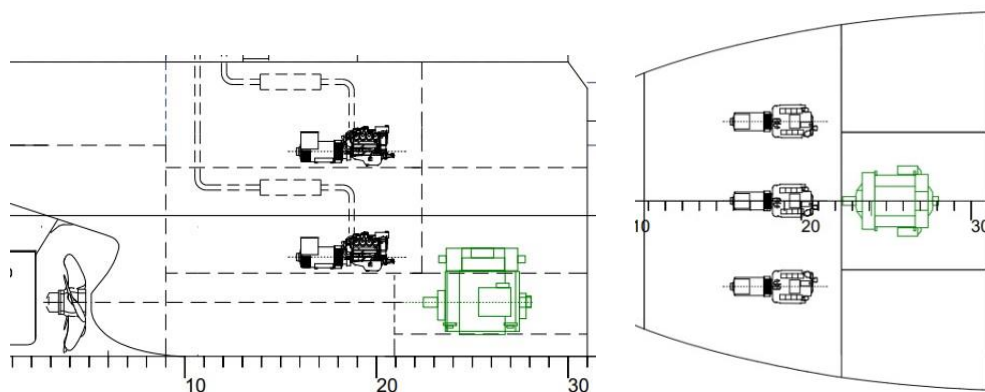
För generering av el ombord har två olika motoralternativ kopplade till generatorer utvärderats. Ett med två större generatorer och ett med sex mindre generatorer. Alternativet med två metanolgeneratorer är skissat med motorer från Wärtsilä. Deras 6L20 är en motor som idag inte kan drivas med metanol, men som genom en

ombyggnad torde kunna konverteras för metanoldrift. Ett maskinrum med två metanolgeneratorer skulle kunna se ut som illustrerat nedan.



Figur 8: Maskinrum med två metanolgeneratorer, sidovy och toppvy

Maskinalternativet med sex mindre motorer är baserat på motorer från Enmar. Motorerna är dock mindre jämfört med exemplet från Wärtsilä. Vardera generator ger en uteffekt på c:a 330 kW. Med flera motorer blir utrymmesbehovet större, men genom att använda två däck för generatorerna får de plats. En fördel med det större antalet generatorer är att generatorerna kan startas en efter en beroende på effektbehovet. Med mindre motorer kan man också bättre utnyttja att de går mest energieffektivt under hög belastning. Nackdelen är dock att fler motorer och system som tillhör motorn behöver underhållas.



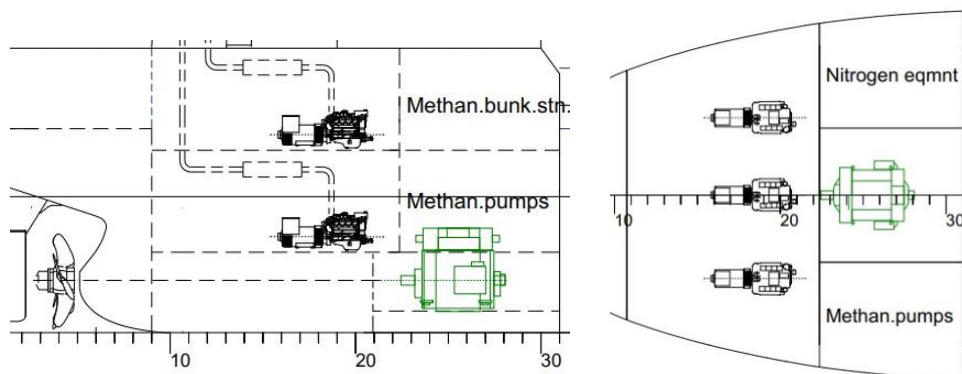
Figur 9: Maskinrum med sex metanolgeneratorer, sidovy och toppvy

Fartyget är utformat med propellerdrift och en axel. Med en stor långsamroterande propeller blir propellereffektiviteten bättre än med två mindre propellrar. Ett två-propeller-arrangemang är också möjligt men saknar motivering för det aktuella konceptet. Dessutom är en-propellerdrift bättre vid gång i is.

Propellern drivs av en stor elmotor. En elmotor skulle kunna vara PMM 1000 från The Switch/Yaskawa, en permanentmagnet-elmotor som ger 2 050 kW vid 90 r.p.m. Elmotorn ger tillräckligt med effekt för att möta krav för isklass 1A samt en hastighet av 11 knop i öppet vatten.

Elmotorn är kompakt och behöver inte samma utrymme som en motsvarande dieselmotor behöver. I arrangemanget kan utrymmen vid sidan av elmotorn användas för

det särskilda pumprum som behövs för metanoldrift, för ett inertgas-system och för placering av en bunkerstation.



Figur 10: Maskinrum med rum för pumpar, inertgas-system och bunkering

Det maskinarrangemang som beskrivits ovan ger en indikation på tillgängliga utrymmen men behöver utvecklas. Bland annat behöver plats för ventilationssystem, kylsystem, eltavlor med mera. beredas. Vid en jämförelse med ett konventionellt arrangemang med en dieselmotor ser det ut som utrymmen för dessa skall kunna rymmas.

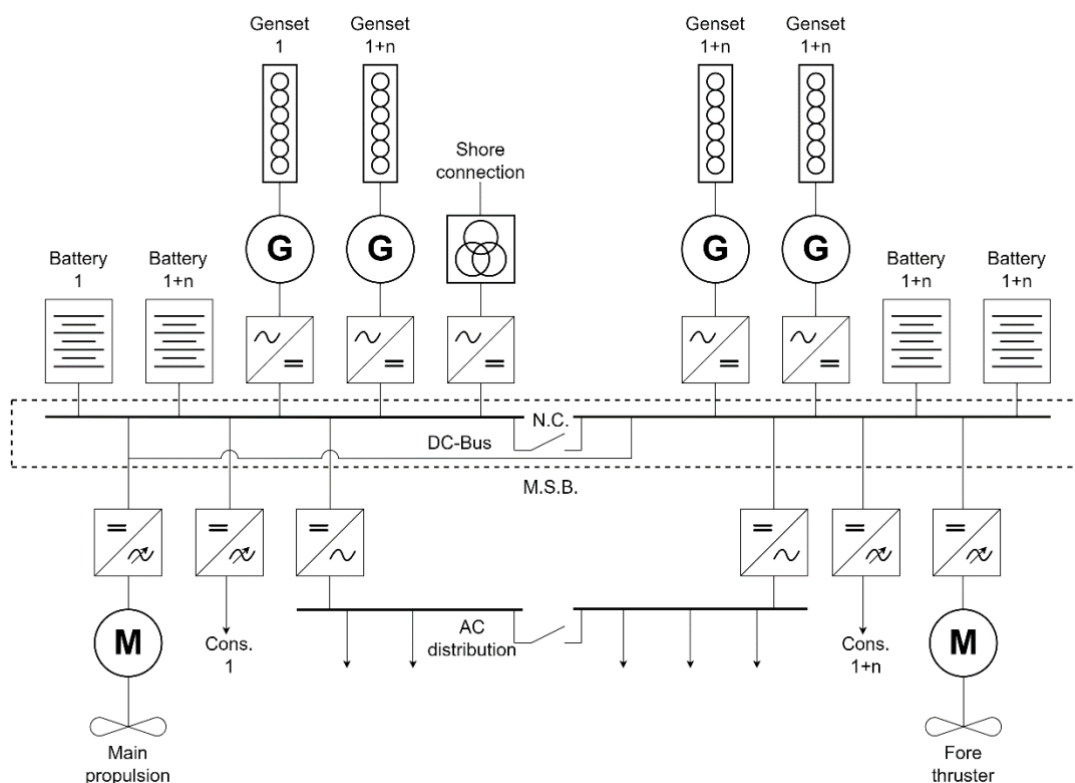
5.1 Kraftfördelning

Likström (DC) är inget nytt varken på land eller på fartyg. På mindre fartyg har likström ofta mellan 12 och 48 volt varit praxis länge. Större fartyg har de senaste decennierna däremot förlitat sig på växelström (AC) med spänning ibland upp till flera tusen volt i moderna huvudtavlor, även om det finns undantag.

Likström har dock flera fördelar jämfört med växelström. Bland annat behöver systemet inte beakta reaktiv effekt, förskjutningar mellan ström och spänning eller problem med harmoniska störningar. Det är även enkelt att integrera olika likströmskällor, så som batterier och bränsleceller, och möjliggör att generatorer kan arbeta med ett variabelt varvtal för att öka verkningsgraden. Sammantaget gör det likströmssystem till ett attraktivt alternativ till växelström när till exempel stora batteripaket installeras eller hög verkningsgrad prioriteras. Nackdelarna med likströmssystem är dock att kostnaden åtminstone initialt kan vara högre jämfört med växelström och att de övre gränserna för hur stora effekter kraftelektroniken hanterar är lägre (Kim m.fl., 2018).

Ett förslag på enlinjeschema för kraftfördelning är presenterat i Figur 11 och bygger på samtal med leverantörer och Kim m.fl. (2018). Batteriernas spänning sjunker med aktuell laddnivå och är här direkt kopplade på huvudskenan utan en likströmsomvandlare (DC/DC) vilket gör att spänningen på huvudskenan (DC-bussen) varierar med batteriernas laddnivå. Generatorerna tillåts operera med ett variabelt varvtal för att minimera förbrukningen av bränsle och kopplas till huvudskenan via en växelriktare (AC/DC) för att omvandla från växelström till likström och matcha huvudskenans spänning. De största förbrukarna, till exempel framdrivningsmaskineri och bogpropeller, är kopplade direkt till huvudskenan via en variabel växelriktare (DC/AC).

Designen har bland annat styrts av att maximera verkningsgraden för att på så sätt minska storleken på den installerade batterikapaciteten. Till exempel genom att undvika förluster från likströmsomvandlare där batterierna ansluter till huvudskenan och låta dess spänning variera, samt att undvika transformatorer. Designen är en konceptuell utveckling och behöver utvärderas mer noggrant för att säkerställa funktionen och att alla ingående komponenter är kompatibla samt att det rent ekonomiskt bär sig jämfört mot andra alternativ.



Figur 11: Förslag på enlinjeschema för kraftfördelning ombord på fartyget baserat på ett likströmsnät (DC)

5.2 Årlig energiförbrukning

En initial beräkning av den årliga energiförbrukningen är presenterad i Tabell 5. Beräkningen tar hänsyn till sommar- och vinterförhållanden över ett uppskattat medelår med avseende på isförhållanden. En uppskattad verkningsgrad för fartygskonceptets drivlina har inkluderats, vilket över ett helt år ger en signifikant skillnad i energiförbrukningen mellan en traditionell och en hybridiserad drivlina där en mycket stor andel av tiden ligger i elektrisk framdrift.

Tabell 5: Initial beräkning av årlig energiförbrukning.

Drivlina	Enhet	Värde
Traditionell	kWh/år	~11 000 000
Batterihybrid	kWh/år	~4 700 000

5.3 Fartygsstorlek kopplat till lotsplikt

Det fartygskoncept som tagits fram har en längd på 97,6 m. Fartygets längd kräver därför att lots måste användas vid angröning av både Skellefteå hamn och Södertälje hamn. Sjöfartsverkets bestämmelser för lotsplikt ses i Tabell 6.

Tabell 6: Lotsplikt i Skellefteå och Södertälje

	Längd (m)	Bredd (m)	Djupgående (m)
Skellefteå hamn ¹	>90	>16	-
Södertälje hamn ²	>70	>14	>4,5

Det är nog inte omöjligt att göra det preliminära fartygskonceptet kortare och därmed slippa lotsplikten i Skellefteå. Metanoltanken, med tillhörande kofferdammar, gör konceptet långt i förhållande till fartyg med motsvarande lastkapacitet. Däremot ses att göra fartyget kortare än 70 m för att slippa lotsplikt i Södertälje som svårt.

En första uppskattning av en trolig lotsavgift är gjord. Avgift tas per anlop och baserat på nettodräktighet och den tid lots nyttjas. Se Tabell 7. Kostnaden på ca. 16 000 SEK är per hamnanlop, både vid tilläggnig och losskastning, och måste betalas i båda hamnarna.

Tabell 7: Uppskattning av lotsavgift

- Beställningsavgift ~1 000 SEK
 - Startavgift (per Netto) ~8 000 SEK
 - Rörlig avgift (per 1/2 h) ~6 500 SEK Baserad på hur lång tid det tar.
- Summa ~16 000 SEK**

Eftersom fartyget är tänkt att trafikera enbart Skellefteå-Södertälje kan redaren söka för lotsdispens. Med lotsdispens behövs ingen lots. Lotsdispens kan ges efter särskild ansökan med tillhörande praktiskt prov. Lotsdispensen är personligt och gäller för en led. Kostnaden för en lotsdispens är ca 50 000-60 000 SEK per led, person och tillfälle.

Trots att fartyget inte slipper lotsplikten, eftersom fartyget är över 70 m och måste ha lots vid angröning till Södertälje, kan det ändå vara av intresse att eftersträva en längd under 90 m. Just 90 m längd är en gräns för lotsplikt i många hamnar. Med en längd under 90 m är fartygets andrahandsvärde högre. Att redan i detta skede försöka optimera fartyget för en viss längd har inte prioriterats. I ett eventuellt senare utvecklingskede av fartygskonceptet kan det vara med som ett mål.

¹ <https://www.sjofartsverket.se/sv/tjanster/lotsning/lotsomrade-lulea/lotsbestallning3/>

² <https://www.sjofartsverket.se/sv/tjanster/lotsning/lotsomrade-sodertalje/lotsplikt/>

6 Analys av utsläpp och kostnad

6.1 Växthusgasutsläpp

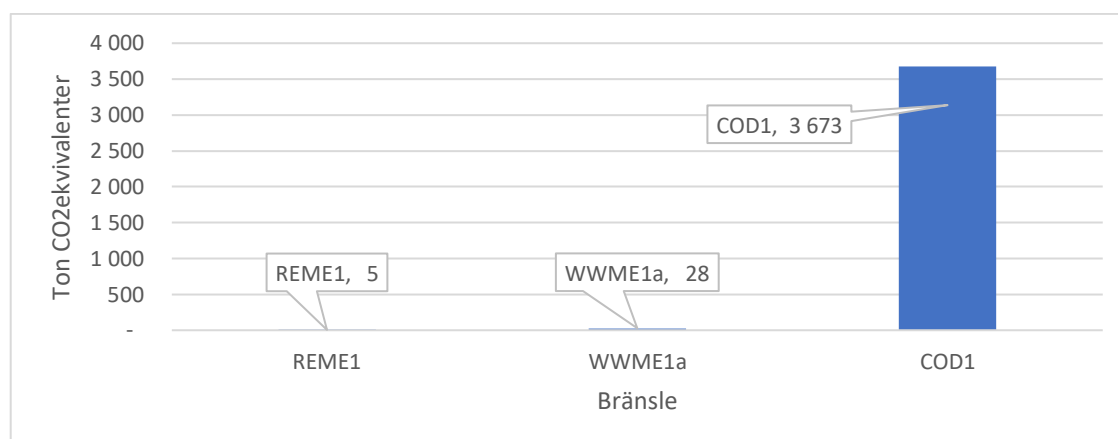
Utsläppen av växthusgaser från fartygskonceptet är länkat till dess förbrukning av energi. Summeringen presenterad i Tabell 5 visar ungefär en halvering av energibehovet för det hybridiserade konceptet. Klimatpåverkan från olika energislag och produktionsvägar är presenterade i Tabell 8 och innefattar produktion och användning av energislaget (så kallad ”well-to-wake”). Detta mäts genom utsläpp av koldioxid (CO₂), metan (CH₄) och lustgas (N₂O) till en sammanvägd indikator för klimatpåverkan över 100 års tid (GWP100) enligt IPCC:s värden. Elektricitet producerat från vindkraft beräknas här som helt förnybar och ger därför inte någon klimatpåverkan, konstruktionen av vindkraftverken räknas inte med. I förlängningen betyder det att ett bränsle som produceras genom användning av förnybar elektricitet får en mycket låg klimatpåverkan.

Tabell 8: Växthusgaspåverkan från olika energikällor och produktionsvägar enligt Prussi m.fl. (2020)

Energislag	Enhet	Värde	Produktionsväg
Diesel	gCO ₂ eq/MJ	92,1	COD1
Elektricitet, vind	gCO ₂ eq/MJ	0,0	WDEL1
Grön metanol	gCO ₂ eq/MJ	1,8 10,5	REME1 WWME1a

Produktionsvägarna för metanol som undersökts är via elektrolys och infångad CO₂ från en närliggande källa (REME1) samt metanol tillverkad genom förgasning av insamlade restprodukter från skogsavverkning (WWME1a). Båda dessa produktionsvägar använder vindkraft för att tillverka den slutgiltiga produkten men skiljer sig främst åt genom att produktionsvägen som nyttjar restprodukter från skogsavverkning behöver samla in råvaran och transportera denna till en förgasningsanläggning.

I Figur 12 presenteras ett diagram som jämför det årliga utsläppen av växthusgaser mätt som CO₂-ekvivalenter över ett 100-årsperspektiv för traditionell dieseldrift (COD1) samt hybridisering med stöd av metanol från två olika produktionsvägar (REME1 och WWME1a).



Figur 12: Årliga utsläpp av växthusgaser i ton CO₂-ekvivalenter med ett 100-årsperspektiv, både REME1 och WWME1a bygger på en hybridiserad drivlina medan COD1 bygger på traditionell dieseldrift.

6.2 Kostnad

Det hybridiserade fartygskonceptet förväntas dela en mängd likheter med ett traditionellt fartyg. För att tydliggöra skillnaden i kostnad har endast de delar som förväntas vara olika beräknats i kostnadsanalysen, till exempel underhåll och installation av batterier, elmotorer, bränsletank för metanol, förbränningsmotorer. I Tabell 9 presenteras inköpskostnad och kostnad för löpande underhåll baserat på data från Kanchiralla (2022). Skillnaden i kostnad mellan den traditionella och hybridiserade drivlinan återfinns i huvudsak i installationen av batterier, vilket både drivet upp inköpskostnaden samt den löpande årliga underhållskostnaden.

Tabell 9: Jämförande kostnader för inköp och drift för system som antas skilja sig åt

	Enhet	Kostnad
Inköp, Traditionell	SEK	~19 000 000
Inköp, Hybrid+Metanol	SEK	~88 000 000
Underhåll, Traditionell	SEK/år	~360 000
Underhåll, Hybrid+Metanol	SEK/år	~943 000 ¹

¹ Inkluderar inga batteribyten under fartygets livstid

För beräkningen av operationella kostnader som i huvudsak består av energikostnader behöver energipriser etableras. En handfull kostnadsscenarioer med MGO, den estimerade produktionskostnaden för grön metanol genom elektrolys (motsvarande REME1 i Tabell 8), två olika kostnader för elektricitet samt den aktuella svenska skatten på koldioxid har antagits och presenteras i Tabell 10. Kostnader för underhåll av utrustning är hämtad från Kanchiralla (2022).

Tabell 10: Ansatta energikostnader för att beräkna operationskostnad

	Enhet	Kostnad	Jämförelse
Diesel, MGO	SEK/ton	5 000	0,43 SEK/kWh
		8 000	0,69 SEK/kWh
		10 000	0,86 SEK/kWh
Grön metanol ¹	SEK/ton	6 570	1,19 SEK/kWh
Elektricitet	SEK/kWh	2,00	
		1,00	
CO ₂ -skatt	SEK/ton-CO ₂	1 170	

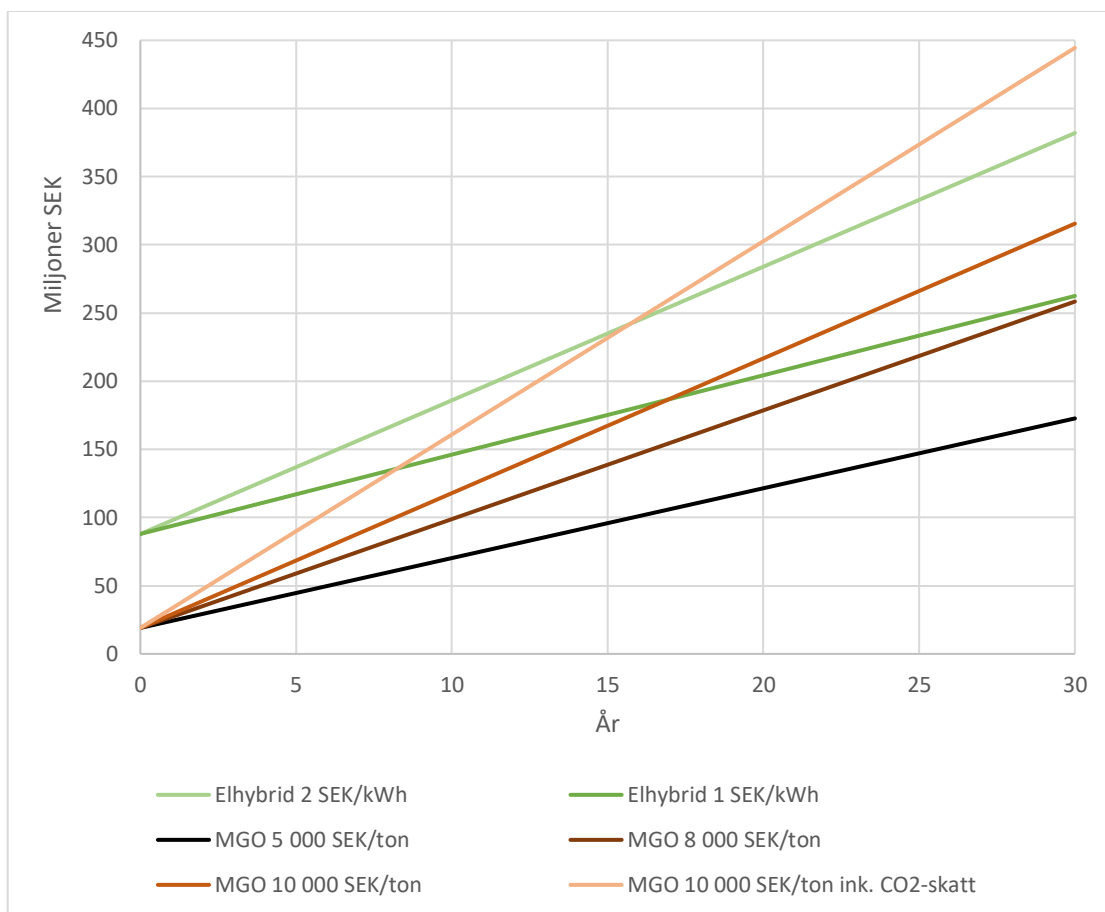
¹ Baserat på produktionskostnad för elektrometanol (Korberg, 2021)

I Figur 13 presenteras totalt sex olika kostnadsutfall: fyra olika för alternativet med en traditionell drivlina samt två för det hybridiserade konceptet med stöd av metanol. Vid en total elkostnad på 2 SEK/kWh för att ladda fartygets batterier estimeras det hybridiserade konceptet bli kostnadseffektivt efter omkring 15 år om priset på MGO behålls på en nivå motsvarande medelpriset på MGO i Rotterdam under 2022 inklusive en svensk koldioxidskatt. Vid en halverad total elkostnad för att ladda det hybridiserade fartygets batterier (1 SEK/kWh) estimeras att fartyget vid slutet av sin livslängd, uppskattad till cirka 30 år, når samma totalkostnad som ett traditionellt fartyg vid ett medelpris på MGO omkring 8 000 SEK/ton.

Kostnadsanalyser tar inte hänsyn till att batterierna sannolikt behöver bytas åtminstone en gång under fartygets livslängd, det görs heller inte en analys av marknadspriset för

grön metanol då endast produktionskostnaden estimeras, framtida utgifter diskonteras heller inte. Dessa tre faktorer påverkar sannolikt det hybridiserade konceptet negativt.

En faktor som påverkar det hybridiserade konceptet positivt är den differentierade farledsavgiften som skulle verka för att reducera fartygets årliga kostnader på grund av kraftigt minskade utsläpp. Uppskattningsvis handlar det om uppemot 2 MSEK per år i minskade kostnader. Det är dock oklart hur länge detta skulle vara aktuellt då den differentierade farledsavgiften är ett styrinstrument som kan förändras.



Figur 13: Jämförande kostnadsutfall för fartygskoncepten beroende på energikostnad

7 Diskussion

Förstudien har ökat kunskapen om tillgängliga alternativ och utvecklingsbehov för en hållbar och om möjligt batteridrivna transportlösning. Ett fartygskoncept för grön elektrifierad sjötransport mellan Skellefteå och Södertälje har utvecklats.

7.1 Jämförelser med tidigare upplägg

Jämfört med tidigare upplägg är sträckan lång och dessutom behöver vintertid gång i is hanteras. Som exempel kan nämnas att det är tio gånger längre sträcka än Göteborg-Fredrikshavn. Jämfört med tidigare studier är också godstypen container intressant, då det vid sidan av Yara Birkeland finns få exempel på elektrifierade containerfartyg.

Jämfört med det fartygskoncept som utvecklades för Göta älv (Sjöling m.fl. 2020) är detta fartygskoncept designat för en annan godsvolym, frekvens och effektbehov och framför allt transportsträcka. Fartygskonceptet på Göta älv togs fram för en rutt på 50 nm. Sträckan mellan Södertälje och Skellefteå är väsentligt längre, 460 nm. Fartyget måste också ha högre isklass, 1A, för att kunna trafikera Bottenviken hela året runt. Hastigheten var snabbare för Göta älv-fartygskonceptet, för att hinna med 5 turer per vecka, medan 7,3 knop i medelhastighet var tillräckligt för förstudiens fartygskoncept. Godskapaciteten är något mindre, med 68 stycken 40-fots-containrar för konceptet i denna förstudie jämfört med 70 för Göta älv som dessutom hade plats för ytterligare 20-fots-containrar. Göta älv-konceptet dimensionerades efter slussarnas storlek och är därför något kortare. Däremot krävs mer utrymme ombord för batterier samt hybridframdriften i förstudiens koncept. Hybriddriften med metanol ökar komplexiteten ombord eftersom fler system behöver integreras men den totala kostnaden minskar sannolikt eftersom mängden batterier är en kostnadsdrivare i denna förstudie.

7.2 Längre sträcka och gång i is

Beträffande den längre sträckan är det intressant att denna förstudie visar att det är möjligt att använda elektrisk framdrift. Detta beror till stor del på den låga hastighet som är möjlig med en tur- och retur-resa per vecka. Det är fullt möjligt med högre hastighet i normalfallet utan is men det skulle innebära antingen fler containrar med batterier för framdrift för att göra samma transportarbete eller ett kontinuerligt stöd från en eller flera generatorer. Det första ansågs vara orimligt på grund av dåligt utnyttjande av fartyget och det senare matchade inte intressenternas huvudmålsättning.

Förstudien visar att gång i is förvärrar situationen eftersom fartyget måste dimensioneras för att säkerställa att tillräckligt mycket energi finns ombord även vid de turer då förbrukningen är som högst. Dels för att inte transportflödet ska hindras men minst lika mycket för att inte äventyra fartygets sjösäkerhet, dvs slut på bränsle. Sammantaget skulle en högre hastighet i kombination med vinter och is innebära att fartyget skulle behöva bära med sig långt mycket mer batterikapacitet, en investeringskostnad och viktökning som bara behövs en mindre del av året. För fartyg som ständigt kör i is kan situationen se annorlunda ut.

7.3 Kombination batteriframdrift och metanol

Förstudien beskriver ett fartygskoncept som kombinerar batteriframdrift med metanol för de dagar när det är is. Hybridframdriften innebär också bättre störningskänslighet, då metanol skulle kunna användas även i andra situationer om man får problem med batterierna. Därmed är den max-effekt fartyget designas efter inte lika avgörande. Här behöver det dock undersökas vidare vilken nivå man ska lägga sig på. I förstudien har ambitionen varit att metanol endast ska komplettera vid gång i is.

Energiförbrukningen är en viktig faktor i utvärderingen av kostnads- och miljöprestanda. Elektricitet från en förnybar källa har lägre miljöpåverkan än fossila bränslen. Det är däremot inte nödvändigtvis billigare att använda förnybar elektricitet från elnätet jämfört med bränslen, vilket gör energieffektiviseringen till en viktig parameter. Vid en storskalig elektrifiering av fartyg förväntas verkningsgraden öka, vilket leder till ett lägre energiuttag ombord. Det finns dock tillfällen där elektrifiering har svårt att stå sig emot traditionella alternativ. Även om den årliga kostnaden för att operera och underhålla det elektrifierade fartyget skulle vara lägre än ett traditionellt fartyg riskerar ändå den högre investeringskostnaden bli ett hinder, speciellt om en hög kalkylränta används för att nuvärdesberäkna framtida utgifter, vilket kan premiera en låg investeringskostnad och en högre löpande kostnad.

Historiskt sett har bränsle som använts i internationell sjöfart varit undantaget från skatt och avgifter från koldioxidutsläpp. Utvecklingen inom EU har dock lett till att sjöfarten kommer inkluderas i handeln om koldioxidutsläpp (EU ETS) från 2024 och pekar mot att sjöfarten inte längre kommer vara undantaget från skatt på bränsle (EU ETD). I Sverige har fartyg över 400 bruttoregisterton i kommersiell fart under flera år åtnjutit ett undantag inom EU från att betala skatt på landström, alltså skatt på elektricitet som nyttjas vid kaj (inklusive ström för att ladda batterier). Sammantaget finns det alltså fog för att tro att prisgapet mellan fossila bränslen och förnybar elektricitet kommer minska i framtiden.

7.4 Fortsatt forskning

I studien har ett antal designval gjorts i samråd med Northvolt och Scania, som två stora varuägare med intresse för sina godsflöden, dessa inkluderar placering av batterier integrerade i containrar, val av metanol som alternativt bränsle vintertid, hybridlösning och frekvens. Flera av dessa beslut kan studeras mer detaljerat.

- a) *Placering av batterier* inuti containrar har diskuterats i projektgruppen, och var ett logiskt val i ett tidigt skede av projektet då även utbyte av containrar övervägdes, liksom de utbytbara batterier som beskrivs för Alphenaar-kanalerna (ZES, 2021) och planeras för Oslofjorden (Norled, 2021). I samband med att kostnadsberäkningarna senare visade på att det är för dyrt att ha extra containrar som laddas långsamt i hamnen blir det intressantare att också undersöka hur det skulle påverka fartygskonceptet om batterierna istället var integrerade i fartyget.
- b) *Val av metanol* som alternativt bränsle. I förstudien har möjligheterna med metanol undersökts. Däremot har metanol inte jämförts med andra bränslen eller möjligheter för andra bränslen undersökts. Eftersom förstudien utvecklade ett fartygskoncept som skulle vara realiserbart i närtid uteslöts ammoniak och vätgas

som bränsle. Det är i dagsläget svårt för aktörer att veta vilket bränsle man ska satsa på. Men utvecklingen för olika bränslen följs noggrant, bland annat planeras det för motorer som kan fungera för flera typer av bränslen.

- c) *Hybridlösning.* I förstudien har det inte ansetts motiverat att gå vidare med en helt elektrifierad lösning även under vintertid och gång i is. Detta är framför allt kopplat till den höga energiåtgången och den mängd batterier som behöver finnas ombord, men som inte behöver användas under den större delen av året, vilket medför högre investeringskostnader. Det är möjligt att det under andra förutsättningar och i framtiden med en annan kostnadsbild kan vara intressant att undersöka en helt elektrifierad lösning.
- d) *Frekvens.* En viktig del i att kunna köra den långa sträckan med batteriframdrift baseras på den låga hastigheten. Den hastigheten beror i sin tur på att det av de ingående projektparterna ansågs tillräckligt med en tur- och returresa per vecka.

Det finns också ett antal områden som skulle kunna undersökas i mer detalj än det funnits utrymme för i denna förstudie. Förstudien har arbetat inom uppsatta ramar och vissa frågor vore önskvärda att studera vidare och gå igenom fler iterationer för att konkretisera design. Dessa inkluderar:

- a) *Energiåtgång i is.* För gång i is skulle adderat motstånd i is kunna undersökas mer, dels för konceptet som sådant, och dels värsta scenario över året.
- b) *Restriktioner för vintersjöfart.* Skellefteå hamn har under några veckor nästan varje år restriktioner för fartygsanlöp där gränsen sätts vid isklass 1A och 4 000 dödviktston. Det är inte helt klarlagt hur fartygskonceptet hanterar en sådan restriktion då dess dödvikt understiger 4 000 ton.
- c) *Energitäthet i en 20 fots-container.* Här har stora ansträngningar gjorts för att nå ett realistiskt resultat, men 3,75 MWh som används i rapporten är högt över vad som anges av andra leverantörer, se Tabell 4. Detta är kopplat till den snabba utvecklingen inom området. Energimängd per yta är en mycket viktig komponent, som får stor betydelse för utformningen av fartyget.
- d) *Integrationen av battericontainrarna till fartyget.* I förstudien har en skiss över kraftfördelning gjorts, men kraftelektronik, övervakning och laddning skulle behöva utredas mer detaljerat.

Slutligen finns också ett antal områden som varit utanför scope för denna förstudie men som behöver belysas för att realisera en motsvarande fartygslösning. Detta inkluderar:

- a) *Laddning i hamn.* I denna förstudie har konstaterats vilken storlek på laddningseffekt som behövs samt att det behöver finnas tid för laddning medan fartyget ligger vid kaj för lastning och lossning. Det behöver vidare utredas vilken utrustning som krävs i hamnarna för att fartyget ska kunna ladda sina batterier. Det behöver också undersökas vilken effekt som behövs i hamnarna, och hur nätet behöver byggas ut för att tillräcklig effekt ska finnas tillgänglig vid rätt tidpunkt när fartyget behöver laddas. Tidigare projekt (t.ex. Kaj-el, Seacharging och Sea Li-ion) har belyst att det kan bli nödvändigt med energilager som laddar under en längre tid för att minska toppeffekten som behövs från nätet. I

projekten Kaj-el (Costa m.fl. 2022) och Hamnen som energinod (Bach m.fl. 2022) påpekas också att hamnen behöver ta ett helhetsperspektiv på effektbehov.

Kopplat till möjligt energilager i hamn kan förstudiens resultat utmanas, dvs att kostnad för att långsamt ladda extra battericontainrar i hamn som byts mot de ombord inte är motiverad. Detta beror på om man kan se andra användningsområden för battericontainern, såsom att stabilisera nätet. Om detta vore intressant behöver det utredas närmare.

- b) *Affärsupplägg*. För realisering av en motsvarande fartygslösning behöver affärsmässiga aspekter från transportoperatörens perspektiv tas hänsyn till. Det kan t.ex. handla om beslut som påverkar andrahandsvärde på fartyget. Andra exempel på relevanta frågeställningar berör fartygsstorlek, att fartyget skulle kunna trafikera flera rutter. Även frekvensen och möjligheter att attrahera flera godsflöden är viktiga att beakta ur ett affärsmässigt perspektiv.
- c) *Risikanaly*s. I förstudien har installation av batterier och metanol i fartyget undersökts var för sig, men kombinationen av batterier och metanol är ovanlig och det skulle behöva undersökas hur riskerna interagerar. Därmed är det viktigt att analysera risker och säkerhet. En del av riskanalysen bör också ta hänsyn till karaktäristik på godset som transporteras. I det studerade fallet i förstudien handlar det om last som är klassat som farligt gods, där eventuell inverkan kan undersökas närmare.

Avslutningsvis kan nämnas att de aktörer som ingår i projektet är intresserade av att utveckla ett koncept som kan komma att realiseras. Ett konsortium med ytterligare projektparter har formerats för att belysa flera nödvändiga aspekter i den fortsatta utvecklingen av en fartygslösning. Projektet ELINORR (Elektrifierad sjötransport av gods Norrland – Södertälje) har fått finansiering beviljat av Triple F, som är Trafikverkets forskning- och innovationssatsning med syfte att bidra till det svenska godstransport-systemets omställning till fossilfrihet. Projektstart är i februari 2023.

8 Slutsatser

Denna förstudie har tagit de första stegen i att utveckla ett koncept för grön elektrifierad sjötransport av fordonsbattericeller mellan Skellefteå och Södertälje.

Förstudien visar att batteridrift i normalfallet, utan is, ska vara möjlig. Analyser har gjorts av hur stor andel eldrift som är möjlig baserat på servicekrav, den långa sträckan och behov att kunna framföra fartyget genom is. Den sträcka som det rör sig om är i sammanhanget lång, (över 900 km eller 500 nm). Förstudien visar på potential för ett möjligt upplägg som möter krav på frekvens och ledtid samt med elektrisk framdrift under större delen av året.

För att klara gång i is blir elbehovet inte försvarbart för enbart batteridrift. Därmed har hybridframdrift undersökts för dessa tillfällen. Fartygskonceptet kompletterar därmed med grön metanol för att klara is. Hybridframdrift metanol/batteri ser ut att vara möjlig från ett tekniskt perspektiv. Utvärderingen av miljöprestandan visar att konceptet dramatiskt sänker utsläppen av växthusgaser medan kostnadsutvärderingen visar att konceptet kan vara ekonomiskt hållbart om kostnadsglappet mellan fossila drivmedel och el från nätet minskar i framtiden.

9 Referenser

- Anwar, S., Zia, M.Y.I., Rashid, M., Rubens, G.Z.D. och Enevoldsen, P. (2020) Towards Ferry Electrification in the Maritime Sector. *Energies*, 13(24), p.6506.
- Bach, A., Forsström, E., Haraldson, S., Holmgren, K., Lind, K., Lind, M., Piehl, H. och Raza, Z. (2022) Hamnen som energinod. Ett koncept för hamnens roll i omställningen mot ett hållbart transportsystem. RISE Rapport 2022:125
- Bisschop, R., Andersson, P., Forsberg, C. och Hynynen, J. (2021). Lion Fire II - Extinguishment and Mitigation of Fires in Lithium-ion Batteries at Sea. RISE Report 2021:111. RISE Research Institutes of Sweden, Borås. Available at: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1620646/FULLTEXT02.pdf>
- Costa, N., Williamsson, J., Ekholm, J., Santén, V., Rogerson, S. och Borgh, M. (2022) Connecting vessels to shoreside electricity in Sweden, SSPA Report RR41199360-01-00-A, SSPA, Sweden, Feb. 2022.
- Dervishllari, E. och Svemark, H. (2020) Life Cycle Cost Analysis of an Electrified Inland Waterway Vessel Concept. Master thesis, Chalmers University of Technology.
- DNV (2019) Comparison of Alternative Marine Fuels. Report no. 2019-0567 Rev. 3.
- Ellis, J., Ramne, B., Falk, T., Nilsson, M., Stefenson, P., Eframisson, A., Folic, M., Kotur, N., Tanneberger, K., Freudendahl, U., Stenhede, T. och Haraldson, L. (2014) SPIRETH – end of project report. Activities and Outcomes of the SPIRETH (Alcohol (Spirits) and Ethers as Marine Fuel) Project. Nordisk energiforskning. 2014-02-28. Available at: <http://www.dendanskemaritimefond.dk/wp-content/uploads/2016/02/Final-report-SPIRETH-Energy-Transport-20140228.pdf>
- ForSea (2021) ForSea to upgrade Tycho Brahe with the world's largest battery pack, extending the vessel lifetime and cutting emissions. 2021-06-24. <https://www.forseaf ferries.com/about-forsea/news-and-media/news/ForSea-to-upgrade-Tycho-Brahe-with-the-worlds-largest-battery-pack-extending-the-vessel-lifetime-and-cutting-emissions/>
- E-ferry (n.d.) <http://e-ferryproject.eu/> Accessed 221205.
- Evans, J. H. (1959) Basic design concepts. *Journal of the American Society for Naval Engineers*, 71(4), 671-678.
- Fredelius, A. (2017) Robot laddar batterier som ska driva färjorna. *Ny Teknik*. Available at: <https://www.nyteknik.se/fordon/robot-laddar-batterier-som-ska-drivafarjorna-6819411>
- Kanchiralla, F., Brynolf, S., Malmgren, E., Hansson, J. och Grahn, M. (2022) Life-Cycle Assessment and Costing of Fuels and Propulsion Systems in Future Fossil-Free Shipping. *Environmental Science & Technology*, 56(17): 12517-12531. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.2c03016>
- Kersey, J., Popovich, N.D. och Phadke, A.A. (2022) Rapid battery cost declines accelerate the prospects of all-electric interregional container shipping. *Nat Energy* 7, 664–674. <https://doi.org/10.1038/s41560-022-01065-y>

- Kyunghwa Kim, Kido Park, Gilltae Roh och Kangwoo Chun (2018) DC-grid system for ships: a study of benefits and technical considerations, *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, 2:1, 1-12
- Knight, S. (2017) 'Elektra': Commercial battery ferries become a reality. *Maritime Journal*. Online. Available at: <http://www.maritimejournal.com/news101/vessel-buildand-maintenance/ship-and-boatbuilding/elektra-commercial-battery-ferriesbecome-a-reality>
- Kongsberg, (2018). Autonomous ship project, key facts about YARA Birkeland. <https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0240.nsf/AllWeb/4B8113B707A50A4FC125811D00407045?OpenDocument>
- Kyunghwa K., Kido P., Jongwoo A., Gilltae, R. och Kangwoo C. (2016) A study on applicability of Battery Energy Storage System (BESS) for electric propulsion ships, *Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, June 2016. 203-207
- Lighthouse (2018) Elektrifiering av sjöfarten en nulägesbeskrivning av teknik och marknadsläge inom maritim elektrifiering och analys av behov och möjligheter för elektrifiering inom sjöfarten. Hägg, M., Pettersson, S., Rylander, R., Östling, J., Borg, M., Broman, M. Daun, V., Ellis, J., Lundbäck, O., Santén, V. och Wikander, M., Lighthouse Swedish Maritime Competence Centre, Göteborg. Available at: https://www.lighthouse.nu/sites/www.lighthouse.nu/files/elektrifiering_webb.pdf
- Lloyd's Register (2022) Rules and Regulations for the Classification of Ships, July 2022. See: <https://www.lr.org/en/rules-and-regulations-for-the-classification-of-ships/>
- Moore, K. (2015) Siemens powers first all-electric car ferry. *Workboat*. Available at: <https://www.workboat.com/blogs/passenger-vessels/siemens-powers-first-allelectric-car-ferry/>
- Norled (2021) Norled, Aarbakke og SEAM er klar for å produsere batteribytterobot for elektriske hurtigbåter. <https://www.norled.no/nyheter/batteri/> Accessed 221205.
- Prussi, M., Yugo, M., De Prada, L., Padella, M., Edwards, R., Lonza, L. (2020) JEC Well-to-Tank report v5, EUR 30269 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-76-19926-7, doi:10.2760/959137, JRC119036.
- Ramne, B., Bomanson, J., Molander, P., Ellis, J., Errestad, E. och Klintenberg, H. (2018) Green Pilot – Pilot Boat with Minimal Environmental Impact. Final report. Available at: <https://smtf.se/wp-content/uploads/2019/02/D8.3-Final-Report-ver20181128-with-appendices2.pdf>
- Regeringskansliet (2018) Effektiva, kapacitetsstarka och hållbara godstransporter – en nationell godstransportstrategi, Available at: <https://www.regeringen.se/49f291/contentassets/5e79349b796548f7977cbfd1c246a694/effektiva-kapacitetsstarka-och-hallbara-godstransporter--en-nationell-godstransportstrategi>
- RISE Research Institutes of Sweden och Chalmers University of Technology (2021) Electric Lighth – Lätta elfartyg. Lightweight and electrically propelled Ro-Pax ship. Willstrand, Ola, Ramachandra, Vasudev, Evegren, Franz, Hägg, Mikael, Ramne, Bengt, Li, Zhiyan, Thies, Fabian, Ringsberg, Jonas, Lluis, Enric Julià. Lighthouse report. June 2021. Available at: https://lighthouse.nu/images/pdf/210621_ip2_2019_slutrapport_latta_elfartyg.pdf

- Santén, V., Rogerson, S. och Williamsson, J. (2021) Innovativa logistikkoncept för ökad kust- och inlandssjöfart, SSPA rapport nr: RR41178514-02-00
- Savard, C., Nikulina, A., Mécemène, C. och Mokhova, E. (2020) The electrification of ships using the Northern Sea Route: An approach. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 6(1), p.13, Available at: <https://doi.org/10.3390/joitmc6010013>
- Sjöfartsverket (2021). Överflyttningsanalys – land till sjö. En analys av godsflödet i Sverige och dess möjligheter för överflytt från väg till sjö. Dnr 20-00942. Wahlström, J. och Jäderland, M.
- Sjöling, S., Borgh, M. och Santén, V. (2020). Battery Electric Inland Waterway Vessel. Report, SSPA.
- Stefenson, Per m.fl. (2022) Sea Li-ion Technical report, Report No.: 2019-U-TM-0097-S, Rev. 01. Bergström, R., Karlsson, J., Grahl, A., Grandell, E., Flytström, L., Bååt, M., Wiklund, M., Stefenson, P., Wimby, P., Thomée, L., Persson, A., Sabbouh, M. och Benjaminsson, A. 2022-06-30
- Stena Line (2021) Stena Line challenges the shipping industry – by going electric. 21-05-10. <https://www.stenaline.com/media/stories/stena-line-challenges-the-shipping-industry-by-going-electric/> Accessed 221205.
- Stena Line (n.d.) Stena Elektra – from vision to vessel. <https://www.stenaline.com/stena-elektra-from-vision-to-vessel/> Accessed: 221205.
- Transportstyrelsen (2009), TSFS 2009:111, Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd om finsk-svensk isklass. Available at: https://www.sjofartsverket.se/globalassets/isbrytning/pdf-regelverk/transportstyrelsens_foreskrifter_allmanna_rad_isklass.pdf
- ZES (2021) First emission-free inland shipping vessel on energy containers in service. Zero Emission Services. 21-09-06. <https://zeroemissionservices.nl/en/zero-emission-services-commences-operation/> Accessed 221205.



Lighthouse samlar industri, samhälle, akademi och institut i triple helix-samverkan för att stärka Sveriges maritima konkurrenskraft genom forskning, utveckling och innovation. Som en del i arbetet för en hållbar maritim sektor initierar och koordinerar Lighthouse relevant forskning och innovation som utgår från industrin och samhällets behov.

Lighthouse – för en konkurrenskraftig, hållbar och säker maritim sektor med god arbetsmiljö



LIGHTHOUSE PARTNERS



LIGHTHOUSE ASSOCIATE MEMBERS

