



DNV Sweden AB

MARKNADSBESKRIVNING ELEKTRIFIERAD SJÖFART
Elsjöfart i Sverige

Trafikanalys

Report No.: 2022-9696, Rev. 2

Document No.: 10355544-07 April 2022

Date: 2022-12-11



Project name: Market description electrified shipping DNV Maritime
 Report title: Elsjöfart i Sverige DNV Sweden AB
 Customer: Trafikanalys
 Rosenlundsgatan 54 Sweden
 118 63 Stockholm Tel:
 Sweden
 Customer contact: N/A
 Date of issue: 2022-12-11
 Project No.: 229677
 Organisation unit: Maritime Advisory Sweden
 Report No.: 2022-9696, Rev. 2
 Document No.: 10355544-07 April 2022
 Applicable contract(s) governing the provision of this Report:

Objective:

Prepared by:

Verified by:

Approved by:

Hannes von Knorring
Principal Consultant

Nathaniel Frithiof
Senior Consultant

Mikael Johansson
Principal Consultant

Nikolai Rivedal

Johan Ileskär
Principal Engineer

Copyright © DNV 2022. All rights reserved. Unless otherwise agreed in writing: (i) This publication or parts thereof may not be copied, reproduced or transmitted in any form, or by any means, whether digitally or otherwise; (ii) The content of this publication shall be kept confidential by the customer; (iii) No third party may rely on its contents; and (iv) DNV undertakes no duty of care toward any third party. Reference to part of this publication which may lead to misinterpretation is prohibited.

DNV Distribution:

Keywords:

- OPEN. Unrestricted distribution, internal and external.
 INTERNAL use only. Internal DNV document.
 CONFIDENTIAL. Distribution within DNV according to applicable contract.*
 SECRET. Authorized access only.

*Specify distribution:

Remark: DNV Maritime Advisory acts independently and autonomously from other organisational divisions within DNV. DNV Maritime Advisory is in a different reporting line than DNV Classification / Certification units. If applicable, DNV Classification/Certification will independently verify the given statements and therefore may come to other conclusions than Maritime Advisory. This principle is founded on DNV's management system.

Rev. No.	Date	Reason for Issue	Prepared by	Verified by	Approved by
0	2022-09-30	First issue	Hannes von Knorring	Nathaniel Frithiof	Mikael Johansson
1	2022-11-07		Hannes von Knorring		

Innehållsförteckning

1	SAMMANFATTNING.....	1
2	INTRODUKTION OCH BAKGRUND.....	3
2.1	Tidigare genomfört arbete i Sverige	3
2.2	Beräkningar av marknadspotentialen för elektrifierad sjöfart	5
2.3	Utvecklingen av marknaden för elsjöfart i Norge	6
2.4	Elektrifiering av sjöfarten i Nederländerna	12
3	TEKNISKA OMSTÄNDIGHETER.....	14
3.1	Mekanisk framdrivning	14
3.2	Diesel-elektrisk drift	15
3.3	Helelektriska system	16
3.4	Hybrid mekanisk-elektrisk framdrivning	17
3.5	Hinder och drivkrafter för olika tekniska lösningar	19
3.6	Sammanfattning	29
4	MARKNADSÖVERSIKT PÅ KORT OCH LÄNGRE SIKT.....	31
4.1	Sjötransportssystemets aktörer och rådighet över elektrifiering	31
4.2	Global marknadsutveckling på kort sikt	32
4.3	Marknadsutveckling i Sverige på kort sikt	39
4.4	Marknadspotential på längre sikt	40
5	INSTITUTIONELLA OCH AFFÄRSMÄSSIGA FAKTORER.....	60
5.1	Säkerhet	61
5.2	Övriga faktorer	66
5.3	Resultat från intervjuer	69
6	DISKUSSION.....	71
7	SLUTSATSER.....	74
8	REFERENSER.....	76

1 SAMMANFATTNING

Rapporten är en marknadsbeskrivning om villkoren för elsjöfart i Sverige med syfte att bidra till Trafikanalys regeringsuppdrag inom området. Trafikanalys har fått i uppdrag att analysera och föreslå åtgärder för utvecklingen av elsjöfart. Fokus i denna rapport är på följande punkter:

- Redogöra för de tekniska omständigheterna kring elektrifierade fartyg. Här är fokus på att beskriva hur fartyg kan elektrifieras, och teknikernas möjligheter och hinder.
- Identifiera, beskriva och avgränsa marknaden idag, på kort samt på medellång sikt för eldrivna fartyg i Sverige. Här genomförs både studier av fartyg i varvens orderböcker, och en AIS-studie över fartygstrafiken inom och till och från Sverige. Arbetet innefattar beskrivningar av de segment (fartygstyper och dess användningsområden) som är möjliga att elektrifiera och hur. Hinder och drivkrafter för installation och drift, samt kostnader beskrivs.
- Institutionella, regelmässiga, affärsmässiga och andra faktorer som påverkar marknaden beskrivs och diskuteras. Detta innefattar beskrivning av aktörer. Eftersom nyligen publicerade rapporter i Sverige redan diskuterat miljö- och klimatkrav, samt landström, har rapporten fokus på institutioner för säkerhetsfrågor och hur detta påverkar affärsmässiga risker.
- En internationell utblick, mot utvecklingen i Norge och Nederländerna redovisas

Med elsjöfart menas i rapporten ett flertal saker: att system ombord görs effektivare genom introduktion av batterier eller bränsleceller; att låta batterier eller bränsleceller stå för delar av eller all framdrivningskraft; samt, att låta fartyg ansluta till elnätet i hamnar för att kunna stänga av dieselgeneratorer och/eller kunna ladda batterier. Fokus är på batterier och till viss del bränsleceller. Därutöver kan elsjöfart sägas innefatta att förbränningsmotorer, turbiner eller bränsleceller kan drivas på bränslen tillverkade av el via elektrolys, så kallade elektrobränslen. Rapporten är dock avgränsad sådan att det området lämnas utanför. Inom det här området kommer dock elektrifiering av sjöfarten på längre sikt påverka elektrifieringen i samhället, eftersom den mängd el som krävs för sådan produktion är mycket stor.

Resultat av marknadsutblicken är att helt elektrifierad sjöfart på kort sikt verkar vara genomförbar för delar av den mindre passagerartrafiken. Flera exempel på helt elektrifierade lastfartyg ges också, men dessa har kommit till för att ersätta exempelvis kustnära lastbilstrafik och inte som alternativ till existerande lastfartyg. Beräkningar visar att lastfartyg som de opereras idag generellt har för stor energianvändning för att kunna helt elektrifieras. Däremot kan stor nytta uppnås av vidare implementering av hybriddrift, eftersom det bidrar till ökande energieffektivitet. Behovet av land- och laddström i svenska hamnar uppskattas också. Här dominerar behovet av landström för större färje- och kryssningsfartyg.

Rapporten har också haft institutioner kring säkerhet i fokus: de processer, regler och lagar på internationell och nationell nivå som ny teknik behöver följa. Att introducera ny teknik är kostsamt i tid och resurser, eftersom inblandade behöver visa upp att en ny teknik är lika säker som den existerande. Detta gäller i internationell såväl som nationell sjöfart. Projekt som är först ut med ny teknik kommer ofrånkomligen att drabbas av högre kostnader. Inte bara för att tekniken i sig är dyrare utan för att processen att designa och godkänna är mer komplex. Det är vidare inbyggt i processen att det inte är säkert att en tänkt design blir godkänd. Detta kan skapa osäkerheter och hämma utveckling.



En rad förslag ges på hur osäkerheterna kan undanröjas på kort sikt. Dessa berör huvudsakligen behoven av samordning av olika satsningar mellan aktörer, och tillförande av resurser. De problem och osäkerheter som beskrivits är generella vid introduktion av ny teknik, och riskerar att annars kvarstå vid kommande teknikskiften, som exempelvis användandet av vätgas eller ammoniak.

2 INTRODUKTION OCH BAKGRUND

Det första elfartyget var sannolikt en 24-fotsbåt i St. Petersburg som 1839 kunde ta 14 passagerare med en hastighet av 3 knop. En första boom för elektrifierade fartyg kunde sen ses från 1890 till 1920, varefter förbränningsmotorer dominerade (DNV GL, 2015). En elektrifiering av sjöfarten är idag en av flera pusselbitar för att lösa sjöfartens klimatomställning. I detta bakgrundsavsnitt går först tidigare genomfört arbete i Sverige genom. Därefter diskuteras olika sätt att uppskatta marknadspotentialen för elektrifierad sjöfart. Slutligen diskuteras utvecklingen av marknaden för elsjöfart i Norge och Nederländerna.

2.1 Tidigare genomfört arbete i Sverige

Ett antal projekt relevanta för detta uppdrag har utförts i Sverige under senare år. Några av dessa ger, lästa idag, bilden av att utvecklingen går snabbt. I en rapport till Energimyndigheten beskriver exempelvis Holtz och Obel (2020) hur Sverige har få färjelinjer som är lämpliga att elektrifiera med dagens teknik, och hur Färjerederiet framför allt satsar på biobränslen. Sedan dess har bland annat Stena Line lanserat sitt Stena Elektra-koncept, Donsötank och Tärntank med flera har beställt produkttankers med batterier, elfärjor har introducerats i kollektivtrafiken i Göteborg och Stockholm, och Färjerederiet har påbörjat en elektrifiering. Nya svenska företag som Candela Speedboat AB har grundats för elektrifierad kollektivtrafik till sjöss såväl som för fritidsbruk. Omständigheterna och drivkrafterna för dessa olika fartygslösningar skiljer sig, vilket beskrivs närmare i avsnitt 3. Gemensamt är att elektrifiering på olika sätt bidrar till en effektivisering av fartygets energisystem utöver att den minskar utsläpp till luft.

Santén et al. (2018) beskriver elektrifieringen av sjöfarten med grund i de olika möjliga tekniska lösningarna som finns, efterföljt av en översikt och diskussion av olika aktörer och deras incitament. Man beskriver även miljöpåverkan ur ett LCA-perspektiv. Slutligen sammanfattas utmaningar och förslag ges på vidare arbete. Bland annat föreslås projekt om hur affärsmodeller mellan aktörer bör utformas; om de ekonomiska förutsättningarna för elektrifiering; om att utveckla simuleringsverktyg och -miljöer; och om att praktiskt samla erfarenheter från pågående fartyg och anläggningar.

Jivén et al. (2020) berör möjligheterna att få till en fossilfri vattenburen kollektivtrafik. Resultaten ur studien är att elektrifiering via batterier av den nuvarande kollektivtrafiken är möjlig med bibehållen kostnadsnivå. En fallstudie görs av elhybridfärjan Elvy, som transporterar passagerare över Göta Älv, som visar att valet av fossila alternativ för framdrift inte "markant" påverkar de totala kostnaderna över tid. Faktum är att det var den helt elektriska varianten av färjan med snabbbladdning som skulle ha lägst årskostnader. Om man dessutom lade till skadekostnader för emissioner till luft blir det alternativet ännu mer attraktivt. En organisatorisk förklaring ges till varför färjor inte elektrifierats i lika hög grad som övrig kollektivtrafik: det är olika parter i kommunen som är ansvariga och budgeterar för färjor respektive kajer och infrastruktur. En fallstudie görs även av en färja i Köpenhamn. Rapporten avslutas med ett stort antal råd och frågor för fortsatt arbete. allt rekommenderas en nationell plan för omställning av färjetrafiken.

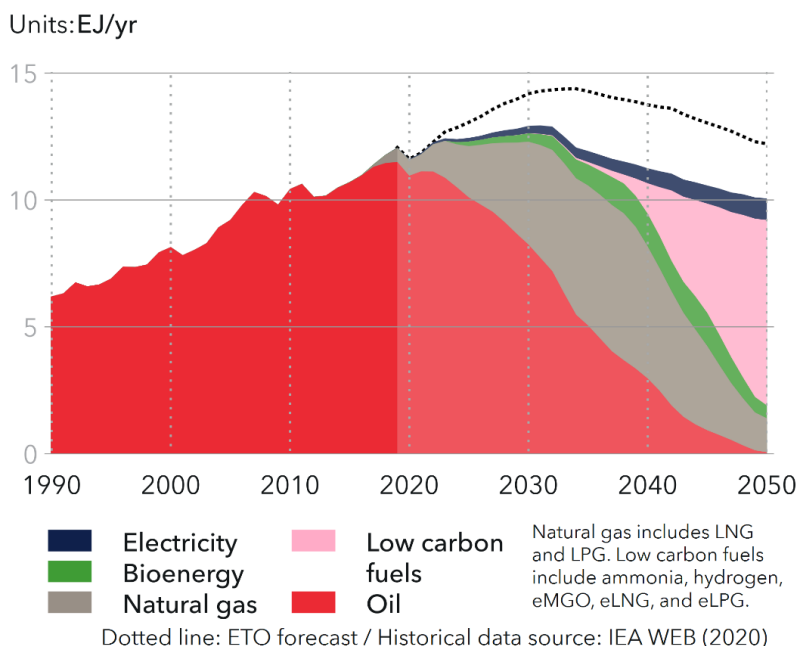
Costa et al. (2022) beskriver utförligt de regelverk och standarder som påverkar landström, vilka gap som finns och vilka risker som återstår. Syftet med projektet var att bidra med beslutsstöd till hamnar och rederier om hur landström bör implementeras och användas. Vidare har drivkrafter identifierats via intervjuer, exempelvis kommersiella drivkrafter för landström och hur hamnar kan ta betalt och ge incentiv. Typfall där landström bör installeras har också identifierats, nämligen där det finns mycket människor i närheten och effektbehovet är stort. Man förväntar sig att trycket på hamnar och rederier kommer att öka tack vare EUs Fit for 55-paket. Samtidigt ser man möjliga

hinder i att kunskapen i hamnar kan vara låg, och att man samtidigt behöver söka offentligt stöd. Costa et al. (2022) lyfter fram behovet av att utreda elbehovet för utökad landström i Sverige, exempelvis vilket effektbehov lagkraven kommer att skapa. Därutöver bör framtida efterfrågan på nollutsläppsfartyg räknas med. Författarna lämnar slutligen strukturerade rekommendationer för både hamnar och rederier om landström. Samarbete mellan parter förordas, för att förstå behov och efterfrågan och för att bidra till ökad standardisering.

IVL (2022) behandlar styrmedel nationellt och internationellt, och scenarier för sjöfartens klimatomställning. De lyfter fram hur elektrifiering är en delösning inom vissa segment. Via intervjuer med hamnar framkommer att man ser stora utmaningar att förse större fartyg med landel, exempelvis kryssningsfartyg (8-16 MW effektbehov). De intervjuade hamnarna ser också laddning av elektrifierade större fartyg som en utmaning: exemplet Stena Line tas, där en installerad effekt upp till 70 MW kan krävas, att jämföra med de upp till 2 MW som krävs för landström. Hamnarna hade inte själva någon prognos över hur potentialen ser ut för antal fartyg som kan installera batterier. I sin diskussion om styrmedel lyfter de fram betydelsen av miljöhänsyn i offentlig upphandling. Som beskrivs i avsnitt 2.3 nedan har sådana krav spelat avgörande roll för utvecklingen i Norge. Man föreslår även reformer vad gäller krav på land- och laddström. IVL (2022) menar att sådana reformer kan vara betydelsefulla för de fartyg som inte täcks av kommande krav i Fit for 55. Man lyfter även fram behovet av nationell planering av anslutningar i hamnar för att möta kommande behov.

Sjöstrand och Lindgren (2022) utvidgar diskussionen om elektrifiering av sjöfarten till att även omfatta elektrobränslen. Området faller utanför ramen för detta projekt men i korthet handlar det om att tillverka flytande eller gasformade bränslen för användning i konventionella förbränningsmotorer eller turbiner, eller bränsleceller. Tillverkningen utgår typiskt från elektrolys som ger vätgas, vilken i sin tur kan omvandlas till andra bränslen. Utvidgningen är viktig om sjöfartens elektrifiering och dess konsekvenser för elsystemet ska förstås i sin fulla omfattning, då enbart batterier inte antas täcka en stor del av sjöfartens energibehov. I Figur 1 nedan uppskattas energibehovet i sjöfarten fram till 2050 i ett scenario där utsläppen minskas från ca 900 miljoner ton CO₂e till 100 miljoner ton CO₂e. El (i batterier) ökar men är en liten del av totalen.

World maritime energy demand by carrier



Figur 1 – Energianvändning i sjöfarten i ett 1.5-gradsscenario (DNV, 2021)

Vad gäller elektrobränslen fokuserar VTI (2022) dock endast på vätgas i bränsleceller, vilket är en mindre del av den totala potentialen. Vätgas går att använda i förbränningsmotorer och i gasturbiner. Bränsleceller kan i sin tur använda olika bränslen, även diesel och LNG. Man exkluderar också fartyg som installerar batterier, men inte primärt till framdrift från sin definition av eldrivet fartyg. Batterier, som beskrivs i avsnitt 3.5.1, kan ge betydande utsläppsminskningar genom att förbättra den totala effektiviteten i systemet. I denna rapport används inte samma avgränsningar (elektrifiering av framdriften antas inte ha ett egenvärde). I stället är fokus brett på elektrifieringens roll i klimatomställningen av sjöfarten. Slutligen beskriver VTI (2022) beskriver på svensk och internationell nivå en rad institutionella processer och faktorer som kan ha betydelse för sjöfartens elektrifiering, med ett rikt antal exempel från många olika länder.

Sammanfattningsvis är de regelverk som finns på europeisk och internationell nivå för sjöfartens klimatomställning redan väl beskrivna i kontexten effekten på elektrifiering av svensk sjöfart, varför detta ges litet utrymme i den här rapporten. Likaså är villkoren för landström täckta. De institutionella faktorer som rör säkerhet och ansvar för fartyg, och hur detta påverkar utvecklingen är inte lika väl beskriven och får därför ett större fokus (se avsnitt 5.1).

2.2 Beräkningar av marknadspotentialen för elektrifierad sjöfart

De faktiska möjligheterna att elektrifiera sjöfarten får alltmer uppmärksamhet. Mao et al (2021) analyserar potentialen att introducera batteriteknik i kinesiska kustgående färjor. Via AIS identifieras 129 passagerarfärjor och 80 RoPax-färjor som opererar huvudsakligen i Pearl River Delta-regionen. Fler än 90% av färjorna hade så korta sträckor att operera att de skulle kunna täcka energibehovet med batterier. I praktiken, menar författarna, finns dock begränsningar baserat på fartygsstorlek och möjligheten att (hinna) ladda i hamn. Kersey et al. (2022) menar att potentialen för helektrifiering av fartyg via batterier har blivit underskattad. Detta framför allt då man ska ha överskattat kostnader för batteripriser, energidensitet och möjlig plats ombord. Genom att anta att batteripriset och energidensiteten för maritimt bruk närmar sig det för elbilar, och att

batterier direkt kan ersätta last ombord (genom att installeras i containrar) uppskattas 40% av all containertrafik kunna elektrifieras. I avsnitt 3.5.1 beskrivs dock hur en sådan utveckling inte är rimlig med dagens teknik: energidensiteten är lägre och kostnaderna högre för de maritima systemen på grund av nödvändigheten att ha högre säkerhetskrav. Kersey et al. (2022) nämner inte detta. Dessa krav kommer att beskrivas mer utförligare nedan.

I den här rapporten används i huvudsak två källor för bedömningen av marknadspotentialen: databaser över levererade och beställda fartyg (IHS), och satellitdata från fartyg i operation (AIS). För att göra bedömning av marknaden på kort och medellång sikt för fritidsbåtar har en mindre intervjustudie genomförts med teknikleverantörer och varv.

AIS-data ger information om varje fartygs fart och position över tid. AIS-data används idag som underlag över hela världen i olika analyser, av forskargrupper, företag, myndigheter osv. I Sverige används AIS-data som underlag för beräkning av emissioner från inrikes sjöfart. DNV har i mer än 10 år använt AIS-data för att analysera nationell och internationell fartygstrafik, växthusgasutsläpp och förbättringspotential. En särskild modell har tagits fram, i DNV kallad MASTER-modellen, som estimerar energianvändning för varje fartyg till havs och i hamn.¹

2.3 Utvecklingen av marknaden för elsjöfart i Norge

Utöver de mer tekniska artiklarna och rapporterna som beskrivits ovan, berör andra även hur utvecklingen av olika marknader tagit fart. I detta avsnitt görs en djupdykning till hur marknaderna för elsjöfart i Norge respektive Nederländerna utvecklats.

Ett flertal artiklar och rapporter har med samhällsvetenskapliga metoder berört utvecklingen av marknader för ny teknik som minskar växthusgasutsläpp i den norska sjöfarten, framför allt via batterier eller bränsleceller (Bach et al., 2020; Bergek et al., 2021; Sæther och Moe, 2021; Sjøtun, 2018; Steen et al., 2019). Tarkowski (2021) berör utöver färjetrafik i Norge, även den i Nederländerna, Danmark och Sverige via en serie fallstudier av olika fartyg. Gjerset och Schjøletset (2020) beskriver status för ladd- och landström i Norge.

Alla är överens om att nya krav i den offentliga upphandlingen av färjor i Norge spelade en avgörande roll för tillväxten av marknaden för elfartyg. Detta har varit viktigt eftersom merparten av de norska färjelinjerna upphandlas på kommunal nivå, resterande av myndigheten Statens Vegvesen. För att tillse att ladd- och landström byggs ut i tillräcklig takt för dessa nya fartyg, har myndigheten ENOVA delat ut stöd till sådana anläggningar. I ett tidigt skede finansierade även NOx-fonden landströmsanslutningar ombord.

För att möjliggöra de nya kraven i offentlig upphandling av färjor, nämns i litteraturen åtminstone två viktiga fartygsprojekt: Samarbetet FellowShip som implementerade batterier och bränsleceller ombord på offshore supply-fartyget Viking Lady, och RoPax-färjan Ampere (Figur 2 nedan).

Sjøtun (2020) fokuserar sin artikel på färjan Ampere, som sjösattes 2015, och på den roll den spelat som utvecklingsprojekt. Färjan började som en genomförbarhetsstudie på varvet Fjellstrand under 2010, och började realiseras när Statens Vegvesen upphandlade utvecklingen av ett elfartyg. Upphandlingen genomfördes enligt vad som i Sverige kallas konkurrenspräglad dialog (Norge följer EUs direktiv för offentlig upphandling). Målet med den här upphandlingen var att stimulera ny teknik med låga eller inga utsläpp. Tidigare hade man haft kravställningar kring pris i sina upphandlingar (Furset, 2013). Man hade tidigare ställt krav på utsläpp, men inget fokus fanns

¹ . Exempel på analyser ges i DNVs Maritime Forecast studies (DNV GL, 2018a, 2019a, 2020a), flertal Arktiska studier för Protection of Arctic Marine Environment, en arbetsgrupp under Arktiska rådet (PAME, se Mjelde et al., 2014; DNV, 2011; DNV GL, 2019b), en utsläppsstudie för Sydostasiatiska nationers förbund, ASEAN (DNV GL, 2018b), Alternative fuel study for Canadian waters (DNV GL, 2020b), flertal klimatstudier för norsk nationell flotta (e.g. DNV GL, 2018c, 2018c, 2019c), samt i ett pilotprojekt om effekten av differentierade hamnavgifter (Mjelde et al., 2019).

på just innovation. En konkurrenspräglad dialog används typiskt när innovativa lösningar krävs; när den upphandlande parten inte enkelt kan utarbeta de tekniska specifikationerna, eller när förhandlingar krävs för att kunna lösa den ekonomiska utformningen.²

Sjøtun lyfter fram intervjupersoner som menar att det var Ampere såsom lyckat projekt som banade väg för att ändra upphandlingskraven så att dessa ledde till ytterligare batteridrivna färjor: "ingen hade vågat att gå vidare så här kraftigt och snabbt utan [Ampere]" (s. 23, här översatt från artikelns engelska). Enligt de intervjukällor som citeras i artikeln, var det teknikutvecklingen på Viking Lady som i sin tur banade väg för Ampere.



Figur 2 – Färjan Ampere

Projektet sågs när det kom som banbrytande, genom att möjliggöra stora minskningar i energianvändning (uppskattad minskning vid projektering var 50%) och i stort sett eliminera utsläpp till luft (Sjøtun, 2019, s. 21). I tillägg beskrev DNV då att man får upp till 10 gånger bättre miljöeffekt av att placera dyra batterier ombord på fartyg istället för i bilar (Tekniskt Ukeblad, 2013). Därutöver skulle driften bli mycket billigare. En samtidig rapport som utnyttjat resultaten ur Ampere-projektet beskrev att det är ekonomiskt rimligt att byta ut sju av tio färjor i Norge till batteri- eller hybridfärjor (Bellona och Siemens, 2015). 84 av 180 färjor bedömdes helt kunna konverteras till helelektrisk drift, vilket i sin tur skulle innebära ytterligare investeringskostnader om 3,5 miljarder NOK. Samtidigt skulle årliga operationella utgifter minskas med 700 miljoner NOK; alltså en återbetalningstid om i snitt 5 år.

Det lyckade Ampere-projektet hade inverkan på kravställande i upphandlingar av andra färjor. 2014 beslutade stortinget att alla statliga färjeupphandlingar ska ställa krav på noll- eller lågutsläppsteknologi (Sjøtun, 2019). Året efter beslutades i stortinget om en proposition ("stortingsvedtak") att alla nya upphandlingar av färjor via fylkeskommunerna, kommuner, och även snabbfärjor skulle kräva teknik för lägre utsläpp om möjligt (Stortinget, 2015). Det fanns stora möjligheter att driva en förändring eftersom färjeflottan var ålderstigen: 2017 hade Norges 203 färjor en medelålder på 26 år (Sæther och Moe, 2021). Målet blev att elektrifiera eller tillhandahålla låg/nollutsläppslösningar till alla färjor innan 2025. Målet flyttades 2020 fram till 2023. Strategin gav resultat: 2021 hade 34 färjeöverfarter helt eller delvis elektrifierats och 57 färjor hade planerats att elektrifieras.

² Se <https://www.upphandlingsmyndigheten.se/inkopsprocessen/forbered-upphandling/valja-upphandlingsforfarande/konkurrenspraglad-dialog/>

Sæther och Moe (2021) ger flera förklaringar till utvecklingen: dels den norska kulturen, och hur aktörerna samverkar med varandra. Till skillnad från många andra tekniska skiften, fanns inga egentliga intressenter som var emot utvecklingen: inga aktörer påverkades negativt av utvecklingen, eller var i risk att slås ut. En förklaring till det är oljeprisets ras 2014. De norska varven var då väldigt beroende av ordrar på nya offshore-fartyg (se även Jacobsen och Helseth, 2021). När dessa ordrar under 2014 mer eller mindre helt slutade komma, var det väldigt lämpligt att i stället börja bygga nya elektriska färjor. Författarna lyfter också fram statens roll i att aktivt skapa marknader. Att det offentliga pekade ut dessa nya marknader ledde till satsningar från privata aktörer: bland annat nämns beslut att bygga batterifabriker för maritimt bruk i Norge. Av vikt var också tillgången till förnyelsebar el till låg kostnad.

Den norska statliga myndigheten ENOVA ges en central roll i Sæther och Moes (2021) analys. ENOVA arbetar framförallt med investeringsstöd till både företag och privatpersoner för projekt som leder till minskningar av växthusgasutsläpp.³ Ett stödprogram som haft en särskild roll är PILOT-E. Som exempel har man inom ramen för detta i skrivande stund beviljat investeringsstöd till etablering av fem anläggningar för produktion av förnyelsebar vätgas, och för vätgas- och ammoniakdrivna fartyg. Man har även stöttat ett stort antal landströmsprojekt. Utöver ENOVA lyfter författarna också fram NOx-fonden samt myndigheten Innovasjon Norge. Den senare stöttar norska innovationsprojekt.⁴ Bland annat har man stöttat etableringen av batterifabriker i Norge. Genom programmet Grønn plattform stöttas forsknings- och innovationsprojekt, däribland för etablering av batteriproduktion.⁵ Vid sidan av dessa bör även Klimasats nämnas, ett stöd till klimatprojekt i kommuner.⁶ Här har bland annat elektrifierade färjor och landström finansierats.

DNV har utvärderat bland annat fylkeskommunernas merkostnader för denna elektrifiering (DNV GL, 2019). Efter att ha gått genom dokumentation från 12 upphandlingar om 45 färjor, varav 40 skulle bli batterifärjor, kunde man konstatera att fylkeskommunerna arbetat på olika sätt. Vissa hade arbetat med krav på redovisning av koncept både med batterier och konventionell drift, där det därmed var rättfram att beräkna merkostnaderna. Merkostnaderna vid de övriga anbuden beräknades via teoretiska kostnadsmodeller. Resultatet blev att de estimerade nettokostnaderna varierade kraftigt mellan anbuden: från 4 till 188 miljoner NOK, ej inräknat statligt stöd från exempelvis NOx-fonden. Kostnadseffektiviteten varierade mellan 702 och 5 630 NOK per ton koldioxid, och i viktat snitt 1250 NOK per ton.⁷

Färjorna byggdes för nationell trafik, och därmed är det norska Sjøfartsdirektoratet som är ansvariga för regler och tillsyn. 2016 publicerades den första vägledningen för batterisystem ombord (Sjøfartsdirektoratet, 2016), som ett alternativ till att använda en alternative design-process enligt IMOs riktlinjer (se avsnitt 5.1.3) eller regler från klassningssällskap (se avsnitt 5.1.2.1). Projekt kan också välja att följa klassregler jämte vägledningen. Vägledningen innehåller bland annat krav på att de batterisystem som ska användas ska vara certifierade eller godkända av ett klassningssällskap och på vilka typer av tester batterisystem ska klara. Steen et al. (2019) beskriver hur dessa regler var viktiga för aktörer, eftersom avsaknaden av sådana orsakar osäkerheter, och citerar en teknikleverantör: "Det har varit väldigt positivt. DNV GL har varit väldigt

³ <https://www.enova.no/>

⁴ <https://www.innovasjon norge.no/no/>

⁵ <https://www.innovasjon norge.no/no/om/nyheter/2022/160-millioner-kroner-til-barekraftig-batteriproduksjon-og-nye-komposittmaterialer-basert-pa-norsk-skog/>

⁶ <https://www.miljodirektoratet.no/klimasats>

⁷ Som referens är en kommunicerad riktlinje för stöd från Klimatklivet runt 0,75 kg koldioxid per krona, vilket motsvarar en kostnad om minst 1 333 SEK per ton koldioxid. Detta innebär att många av projekten hade fått stöd även i Sverige (kostnaderna för batteriteknik har dock sjunkit ungefär 50% sedan dess, se avsnitt 3.5.1).

aktiva. En nära dialog har skett med Sjøfartsdirektoratet med tidigt samrøre med foretagen i projekten” (Steen et al., 2019, s 25, här översatt till svenska).

Utöver elektrifiering via batterier finns även en inriktning mot vätgasdrivna färjor. Bach et al. (2020) lägger ett innovationssystemperspektiv på utvecklingen för batteri- respektive vätgasteknik (bränsleceller) ombord på norska fartyg. De lyfter särskilt fram rollen hos det offentliga i att driva på via kravställning i upphandling. De noterar att innovationssystemet kring batteriteknik är mer moget än det för vätgas, och att ett viktigt startskott för den batteritekniska utvecklingen var just ett statligt kontrakt för en bil- och passagerarfärja (Ampere). På samma sätt, menar författarna, kan det vara en bra idé att i ett första skede tillåta användning av redan tillgänglig fossil vätgas ombord på fartyg inom ramen för offentliga upphandlingar, samtidigt som man stödjer uppbyggnaden av produktionen av fossilfri vätgas. Detta då det fortfarande kvarstår utmaningar kring standardisering och regler för dessa fartyg, som behöver lösas oavsett typ av vätgas. Statens vegvesen lyfte fram vikten av tätt samarbete mellan sig och Sjøfartsdirektoratet för utveckling av regelverk.⁸

2016 ber stortinget norska regeringen att utvärdera användning av utvecklingskontrakt (konkurrenspräglad dialog) även för vätgasdrivna färjor.⁹ Uppstart skulle ske 2021. Man poängterade behovet av att samtidigt utveckla regelverk för passagerarfartyg med vätgasdrift, och såg ett behov av tätt samarbete mellan Statens Vegvesen och Sjøfartsdirektoratet.¹⁰ Målet med ett utvecklingskontrakt för vätgasfärjor var inte bara att det skulle leda till sänkta utsläpp, utan även att utveckla tekniken och leverantörsindustrin för att arbeta med vätgas (såsom Bach et al. 2020 också rekommenderade). Rederiet Norled, samma rederi som stod för Ampere, vann till slut upphandlingen.

Utvecklingen har fortsatt med fler vätgasdrivna färjor. Statens vegvesen signerade i januari 2022 ett kontrakt med Rederiet Torghatten Nord om drift av vätgasdrivna färjor mellan Bodö och Lofoten från 2025. Kraven i upphandlingen var att det skulle vara två färjor som går hela året, med plats för minst 120 bilar, 399 passagerare och 12 vagnståg. Sträckan mellan Bodö och första hamnen på Lofoten, Möskenäs, är ungefär 90 km. Sträckan är Norges längsta och mest väderutsatta färjesträcka, och batteridrift bedöms inte vara tillräckligt. Statens vegvesen väljer just vätgas framför andra möjliga ”gröna” bränslen, eftersom marknaden för vätgas är mer mogen än andra gröna alternativ och man inte vill ”pröva något helt nytt” på färjelinjer som är så samhällsviktiga som den ut till Lofoten.¹¹

Kontraktet var värt 4,9 miljarder NOK för en drift av fartyget i 15 år. Idag trafikeras sträckan av fartyg som går på LNG, och de nya förväntas minska utsläppen med 26 500 ton CO₂ per år. Utöver att kunna drivas på vätgas (som ska ha framställts med låga utsläpp av växthusgaser) ska fartygen av säkerhetsskäl även kunna drivas på andra bränslen. Statens vegvesen har ställt kravet att 85% av energianvändningen ska vara vätgas på årsbasis.

Utöver de upphandlade färjorna har Bergek et al. (2021) beskrivit och analyserat introduktionen och användandet av batteri-teknik ombord på fartyg inom hela den kustnära färjesektorn, kustfisket och offshore supply-sektorn i Norge. Den kustnära färjesektorn innefattar både små färjor, snabbfärjor och större kryssningsfartyg, sammanlagt ungefär 500 fartyg med en snittålder på ungefär 30 år (där livstiden typiskt är 30-40 år). I offshore supply sektorn levereras transporttjänster till offshore-sektorn, vilket kan innefatta allt från transport av gods eller arbetare ombord på oljeplattformar till servicetekniker till vindkraftverksparkar. I Figur 3 nedan ses fartyget

⁸ <https://www.vegvesen.no/globalassets/faq/trafikk/ferje/hydrogenelektrisk-ferje-pr.juli2017.pdf>

⁹ <https://www.stortinget.no/no/Saker-og-publikasjoner/Vedtak/Vedtak/Sak/?p=65327>

¹⁰ <https://www.vegvesen.no/globalassets/faq/trafikk/ferje/hydrogenelektrisk-ferje-pr.juli2017.pdf>

¹¹ <https://www.vegvesen.no/globalassets/faq/trafikk/ferje/brosjyre-hydrogenferje-bodo-rost-varoy-moskenes-mai22.pdf>

Viking Lady, utrustad med batterier och bränsleceller, på väg ut till en oljeplattform. Fartyg inom dessa segment kan alla byggas eller utrustas på norska varv, vilket gjorde elektrifiering till en ny viktig nationell marknad. Det statligt ägda energiföretaget Equinor började 2017 att ställa krav på sina leverantörer att chartrade fartyg ska använda landström och även ha installerat batterier för hybriddrift. Investeringsstöd från Enova (se nedan) möjliggjorde dessa krav. Eftersom Equinor är den största chartraren av dessa fartyg i Norge, fick kraven stor effekt.



Figur 3 – Viking Lady, på väg ut till plattform

Vad gäller färjesektorn fokuserar Bergek et al. (2021) på RoPax-färjor, som tar både passagerare och bilar. De flesta av dessa är mekaniskt drivna, vilket gör att det svårare att helt elektrifiera dessa med batterier via ombyggnation jämfört med diesel-elektrisk drift (skillnaderna mellan dessa olika energisystem, och dess möjligheter att elektrifieras beskrivs närmare i avsnitt 3). Samtidigt behöver de färjor som inte går så snabbt inte ha med sig mycket energi och dessutom stannar de ofta, vilket underlättar för batteriteknik.

Utöver dessa segment förväntas även kraven på utsläppsfria kryssningsfartyg i Norge påverka marknaden för elsjöfart. Stortinget bad 2018 regeringen att implementera krav för minskade utsläpp i fjordarna, och för att fasa in låg- och nollutsläppslösningar i sjöfarten fram till 2030. Man ville även se krav på nollutsläpp från både kryssningsfartyg och färjor i de så kallade världsarvsfjordarna (Nærøyfjordarna, Aurlandsfjorden, Geirangerfjorden, Synnlyvsfjorden och Tafjorden). DNV utredde 2020 i en rapport till Sjöfartsdirektoratet möjligheterna att ställa krav på nollutsläpp i Världsarvsfjordarna (DNV GL, 2020). Man undersökte kryssningsfartyg, mindre turistfartyg samt även de offentliga färjor som opererar i dessa fjordar, som beräknades ha sammanlagda koldioxidutsläpp om ungefär 21 000 ton CO₂ per år. Tidigare hade man redan regelverk som påverkade utsläpp av NO_x, SO_x och partiklar, men inget som skulle påverka växthusgasutsläpp i någon större utsträckning. Rapporten utvärderar två alternativ: minst 95% reduktion av koldioxidutsläpp, och nollutsläpp för alla utsläpp till luft. I huvudsak används samma AIS-baserade metod för utvärderingen som i denna rapport. Sjöfartsdirektoratet utreder nu möjligheterna att ställa nollutsläppskrav.¹²

Sæther och Moe (2021) summerar fyra framgångsfaktorer som bidragit till den norska elektrifieringen. För det första nämns att det mindre färjeklustret hör samman med det större

¹²<https://www.sdir.no/aktuelt/nyheter/nollutslipp-i-verdensarvsfiordene-fra-2026/>

maritima klustret i Norge. Nästan alla intervjuade aktörer i studien lyfte att den långtgående dialogen mellan aktörer varit viktig, där både statliga och privata aktörer samarbetat och lärt sig av varandra. För det andra hade de statliga satsningarna, inte bara investeringsstöd utan även för kunskapsutbyte och dialog en viktig roll. För det tredje drog hela den norska statsapparaten i en riktning – allt från investeringsstöd som nämnts, men även liknande upphandlingskrav från både Statens Vegvesen och fylkeskommunerna – vilket underlättade för färjeaktörer att lägga anbud. Slutligen, för det fjärde, kunde alla aktörer samlas kring den nya inriktningen (ingen bedrev lobbying emot). Vad gäller hur dessa norska erfarenheterna kan överföras till andra länder. Dels lyfter de fram vikten av att ha ett väl fungerande innovationssystem – vilket här bland annat innefattar att aktörer sprider kunskap och samverkar – och en stat som aktivt bidrar till strukturella förändringar. Dels menar de att det är viktigt att identifiera vilka specifika nationella framgångsfaktorer som kan gynnas – i fallet Norge var det att stödja existerande och nya leverantörer (fartygsvarv och batterisystemleverantörer).

Samtidigt noterar Sæther och Moe (2021) att elektrifieringen inte är färdig, och nämner några möjliga svårigheter. De ökade kostnaderna har inneburit att biljettpris fått höjas¹³, och att Enova börjat skala tillbaka sitt stöd eftersom elektrifieringen nu tagit fart.

Enovas satsningar på landströmsanslutningar bedöms i flertal rapporter varit avgörande för utvecklingen i Norge. Gjerset och Schjølset (2020) beskriver hur ENOVA sedan 2016 finansierat 93 anläggningar med 660 miljoner NOK. Vid rapportens färdigställande var 54 av dessa färdiga, och 28 under konstruktion. Norska Kystverkets karta över anslutningar visar 92 anläggningar för landström och 55 anläggningar för laddström för färjor.¹⁴

En utvärdering av Enovas satsning visar att den haft stor betydelse: endast 4 av 48 hamnar med landström har skaffat den utan stödet från ENOVA (DNV GL, 2019). Samtidigt sågs då en liten effekt på fartygssidan – få hade ännu skaffat landströmsanslutningar. Myndigheten har själv begärt in data om elanvändning i anslutningarna, och den uppgick till ca 20 GWh 2017 och 29 GWh 2018. Gjerset och Schjølset (2020) uppskattar den till 54 GWh för 2020, där de största användarna är Kristiansand, Bergen och Oslo. Det är framför allt hamnar med offshore supply-fartyg som har stor elanvändning. Anledningen är att de har relativt hög energianvändning och långa liggetider till kaj. Som nämnts ovan blev installationen av landström i detta segment hög eftersom Equinor som transportköpare ställde krav på anslutning. Som referens kan nämnas den uppskattning som IVL gjort för Sverige, via ansökningar av återbetalning av skatt: 2017 var det ca 22 GWh, 2018 25 GWh och 2020 ca 34 GWh (IVL, 2022, s. 44).

Utvärderingen diskuterar även den installerade kapaciteten i förhållande till ökade behov i framtiden, mest för laddström (DNV GL 2019). Sådana anslutningar är inget som nödvändigtvis behöver skilja sig på landsidan för att hantera fartyg som behöver ladda batterier. Framför allt inte fartyg som har mindre batterier ombord för hybrid-drift, som kanske ändå ligger en längre tid vid kaj. Utvärderingen rekommenderar att man planerar för viss överkapacitet, då risken finns att man kostnadsoptimerar och bygger för små anläggningar. Gjerset och Schjølset (2020) lyfter särskilt fram plug-in hybrida fartyg som en betydande sektor framåt för minskning av utsläpp.

Det ska poängteras att eftersom det var typiskt rederiet som beställde landströmsanläggningarna för sina färjor (men inte betalade för dem), för att underlätta att lösningar kom på plats med rätt kapacitet och utformning. Detta har också gjort att det idag finns väldigt många speciallösningar.

¹³ <https://www.aftenposten.no/okonomi/iwPLePL/fergerederiene-sitter-igjen-med-milliardgevinst-trafikanter-maa-betale-flere-tusen-kroner-mer-for-billettene>

¹⁴ <https://lavutslipp.kystverket.no/>

När upphandlingarna görs om nästa gång, kan detta komma att bli en barriär och eventuellt komma med extra kostnader.

Hamnar har också själva ställt krav på landströmanslutningar, bland annat på kryssningsbranschen med målet att alla kryssningsfartyg ska ansluta 2025 (Gjerset och Schjøset (2020). Bergen är en av få hamnar i som installerat anläggningar för kryssningsfartyg.¹⁵

2.4 Elektrifiering av sjöfarten i Nederländerna

Elektrifieringen i Nederländerna är inte lika väl beskriven i forskning och i rapporter som den i Norge. I en rapport om grön sjöfart i Kina gör NRDC (2020) flera nedslag i, bland andra Nederländernas, policyutveckling. Ett annat bidrag är Oostdams (2021) examensarbete, som gör en textanalys av Nederländernas gröna giv för sjöfarten. Utfallet har dock inte ännu blivit analyserats.

Innan den Gröna given lanserades, spelade Rotterdam en viktig roll. I Rotterdam har arbetet med elektrifiering av sjöfarten fokuserats mycket på inlandssjöfarten. Men hamnen har även satt upp ambitioner för den övriga sjöfarten som är mer stringenta än den internationella lagstiftningen, och ger nedsättningar på hamnavgiften baserat på miljöprestanda enligt Environmental Ship Index (ESI), ett miljöindex (NRDC, 2020). Rotterdams hamn satte upp ett förbud mot inlandssjöfarten att använda hjälpmaskiner inne i Rotterdam redan 2010. Den nederländska staten har parallellt stöttat installation av landströmsanslutningar. 2020 konstaterades 371 anslutningar för inlandspråmar och två för passagerar-/flodskryssningsfartyg. Kopplat till detta skapades och ett system med en mobiltelefonapp¹⁶ som sedan dess expanderat till fler hamnar och som därutöver innehåller tjänster för att betala för dricksvatten och avfallshantering.¹⁷ I media finns också beskrivningar av satsningen som problematisk.¹⁸ 2018 fick alla inlandsfartyg som certifierats som noll-utsläpp ett 100% avdrag av hamnavgifter i Rotterdams hamn (NRDC, 2020). Rotterdams hamn ligger även bakom en fond för finansiering av innovativa projekt.¹⁹

Nederländernas "Green Deal on Maritime and Inland Shipping and Ports" som lanserades 2019 innehåller en rad ambitioner och mål som relaterar till elektrifiering.²⁰ Den gröna given är ett statligt, icke-bindande initiativ som skrevs under av 42 olika parter: hamnar, myndigheter, rederier, transportköpare, banker, forskningsinstitut, transportköpare med flera. Vid 2030 är ambitionen att växthusgasutsläppen²¹ från inlandsflottan ska ha minskat med 40-50% jämfört med 2015; minst 150 inlandsfartyg ska ha installerat en drivlina för nollutsläpp; och, åtminstone ett oceangående fartyg med nollutsläpp ska ha sjösatts. 2050 ska ("virtually") hela inlandsflottan ha nollutsläpp och vara klimatneutral; sjöfarten ska i övrigt ha minskat totala växthusgasutsläpp med 70% jämfört med 2050.

Denna gröna giv har också ett antal specificerade handlingar som ska utföras av de olika parterna. I avtalet är handlingarna uppdelade för inlandssjöfarten, sen vanliga sjöfarten, och sist gemensamt, i tre separata artiklar, av olika aktörer. Myndigheterna, branschorganisationerna, forskningsstiftelsen EICB, hamnarna, transportköparna, Nederländernas väggas- och

¹⁵ <https://www.bergen.kommune.no/politikere-utvalg/api/fil/bk360/4919966/3-Miljoark-Bergen-Havn-AS-Plug-Bergen-AS-og-EPI-AS>

¹⁶ <https://connect4shore.nl/en/>

¹⁷ <https://www.flows.be/transport/park-line-aqua-levert-walstroom-binnenvaart-antwerpen-north-sea-port>

¹⁸ <https://www.schuttevaer.nl/nieuws/actueel/2022/02/02/schuttevaer-lezers-havendienst-rotterdam-is-klantonvriendelijk/> eller <https://www.nt.nl/havens/2022/04/21/taaije-storing-walstroomkasten-rotterdamse-haven/>

¹⁹ <https://www.portofrotterdam.com/en/port-future/energy-transition/incentive-scheme-climate-friendly-shipping>

²⁰ <https://www.greendeals.nl/sites/default/files/2019-11/GD230%20Green%20Deal%20on%20Maritime%20and%20Inland%20shipping%20and%20Ports.pdf>

²¹ "Carbon emissions"

bränslecellssällskap (NWBA), till forskningsinstitutet VITO tar på så sätt alla på sig olika åtgärder inom varje artikel. Utöver dessa specifika åtgärder finns en rad åtgärder som ska utföras gemensamt. Den gröna given ska utvärderas under 2022. Inga oberoende forskningsstudier verkar ha genomförts.

Utsläppsmålen i den gröna given kan nås med både elektrifiering via batterier och med biobränslen. Det är få av kraven som är specifika för elektrifiering. Några exempel är att hamnar förbinder sig att underlätta utbyggnaden av landström för inlandssjöfarten, och batteristationer (för utbyte) vid behov. Redan idag finns ett pågående projekt om att utveckla battericontainrar för utbyte vid ett antal dockningsstationer, för användning ett stort antal, 45 stycken, elektrifierade fartyg.²² Myndigheter förbinder sig att arbeta för att ta bort energiskatter på landström. Ett statligt ägt rederi tillhörande Departementet för infrastruktur och vatten åtar sig att beställa fartyg som ska vara utrustade med elmotorer.²³ Försvarsmakten åtar sig att köpa "100% hållbar" landström till alla sina fartyg i hamnen Den Helder.

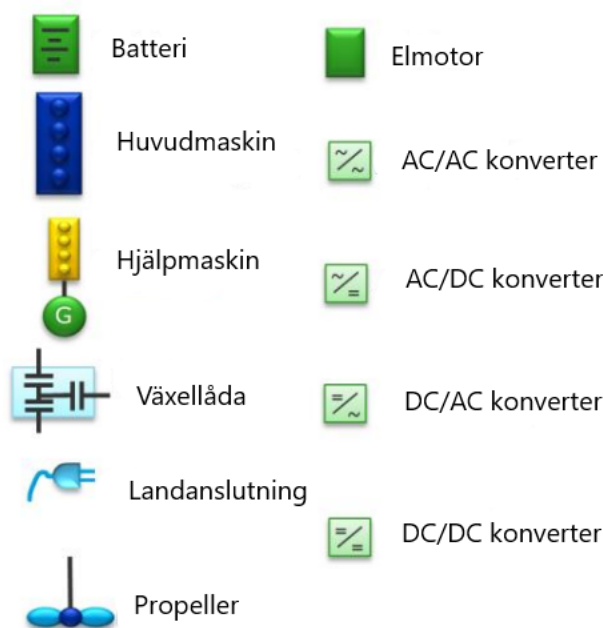
²² <https://safety4sea.com/netherlands-to-speed-up-sustainable-inland-shipping/> och <https://www.wartsila.com/ind/media/news/07-09-2021-wartsila-swappable-battery-containers-enabling-inland-waterway-vessels-to-operate-with-zero-emissions-2971607>

²³ Till synes nu genomfört <https://scheepswerfbijlsma.nl/en/projecten/three-multi-purpose-vessels-for-rijkswaterstaat/>

3 TEKNISKA OMSTÄNDIGHETER

Begreppet elektrifiering av sjöfarten omfattar en rad olika system och processer, varför en definition kräver viss utveckling. Redan idag är delar av sjöfarten "elektrifierad" i den bemärkelse att framdriften av fartyget kan ske via en elektrisk drivlina. Elen är dock fortfarande genererad av förbränningsmotorer. Dessa typer av elektrifierade framdrivningssystem finns därför att de har andra fördelar.

I figurerna nedan förekommer ett antal symboler, med följande förklaring:



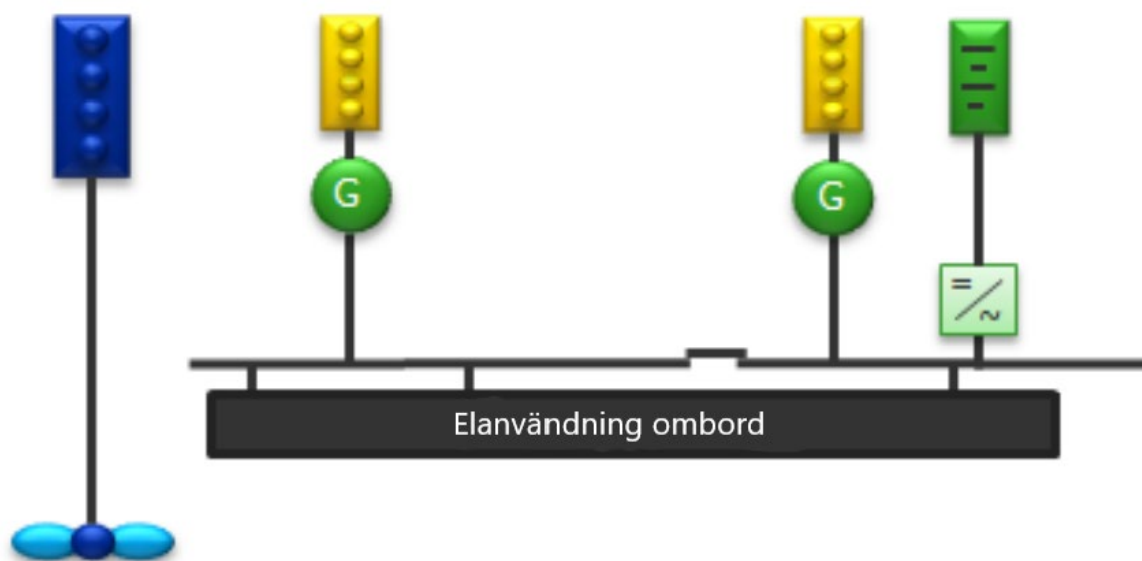
Figur 4 – Förklaring till symboler i nästkommande figurer

I huvudsak finns två sorters system för framdrivning av fartyg, vilka beskrivs nedan. Båda typer av system kan integreras med batterier och eller bränsleceller med syftet att förbättra systemets effektivitet och för framdrivning.

3.1 Mekanisk framdrivning

Fartyg som drivs av propeller kopplad mekaniskt, ibland via växellåda, till en eller flera större förbränningsmotorer, så kallade huvudmaskiner (eng. "main engine").

Den här typen av system är vanlig för fartyg som går längre tid på konstant effekt. Fartygets behov av el ombesörjs typiskt av en uppsättning mindre förbränningsmotorer, eller hjälpmaskiner (eng. "auxiliary engines"), eller genom att en generator monterats på propelleraxeln, så kallad axelgenerator (eng. "shaft generator").



Figur 5 – Exempel på mekanisk systemarkitektur

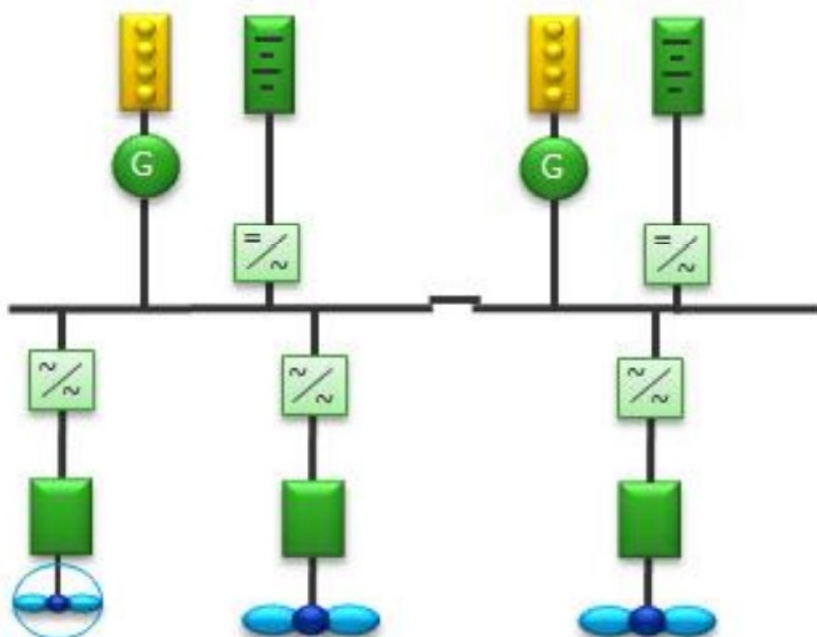
Axelgeneratoren kan även användas för långsam framdrivning via el från hjälpmaskinerna. Detta är användbart exempelvis om huvudmotorn skulle drabbas av haveri, varför upplägget kallas "take me home". Genom att ha batterier eller bränsleceller i elsystemet kan framdrivning via axelgeneratoren också vara möjlig för manövrering in och ut ur hamnar.

3.2 Diesel-elektrisk drift

Här innefattas fartyg som drivs av en eller flera propellrar kopplade till elmotor(er), som i sin tur får ström via en uppsättning av förbränningsmotorer.

Med den här typen av system kan fartygets effektbehov varieras genom att motorer stängs av eller sätts på, samtidigt som varje motor enskild får gå vid optimal driftpunkt. Systemet utvecklades runt förra sekelskiftet för att erbjuda bättre manövreringsmöjligheter i hamnar. Med en elmotor var det möjligt att driva propelleraxeln i båda riktningar. Redan 1905 uppfanns dock en dieselmotor som kunde reverseras, varför den vidare utvecklingen avstannade (Moreno och Pigazo, 2007). Den här typen av system är idag vanlig för fartyg som ofta behöver operera med olika effektbehov – som isbrytare som vid brytning behöver tillgång till mycket större effekt än vid operation i öppet vatten. Systemet används också för fartyg som vill använda eldrivna bogpropellrar eller roderpropellrar för framdrivning och manövrering, såsom kryssningsfartyg.²⁴

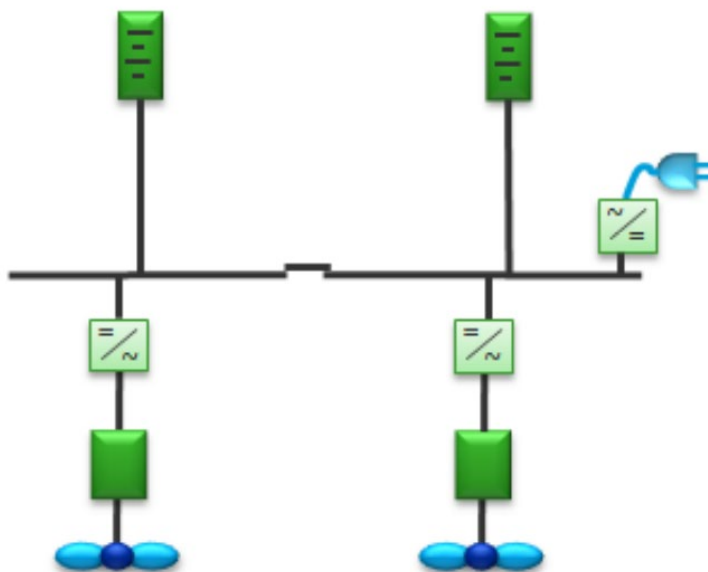
²⁴ En bogpropeller är en propeller placerade fix i skrovet, och en roderpropeller är monterade under fartyget sådan att den kan rotera 360 grader.



Figur 6 – Exempel på diesel-elektriskt system

3.3 Helelektriska system

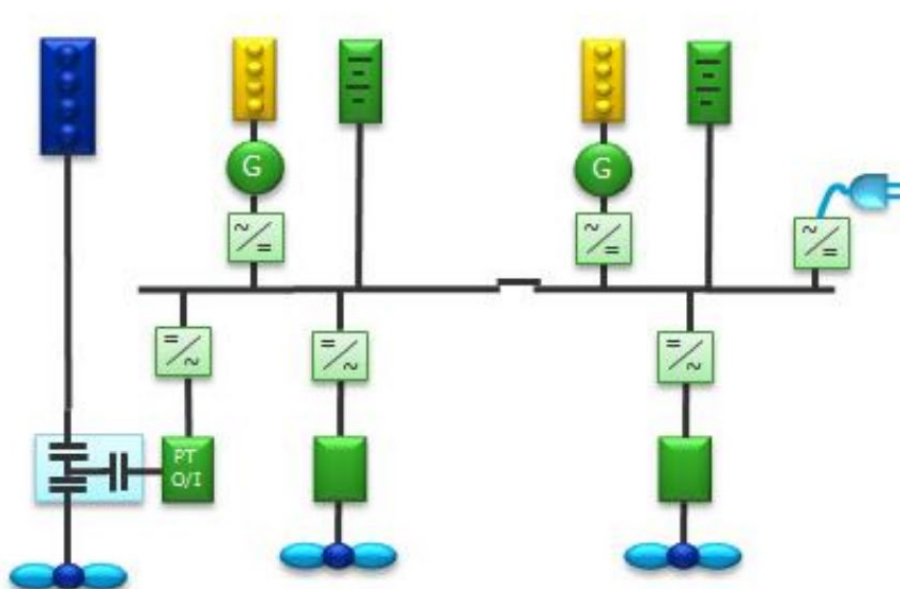
I Figur 7 nedan illustreras ett hel-elektriskt system, som kan sägas vara en vidareutveckling av det diesel-elektriska systemet där alla dieselgeneratorer är utbytt mot batterier, som behöver laddas via en landanslutning.



Figur 7 – Helelektrisk drift, med anslutning till land

3.4 Hybrid mekanisk-elektrisk framdrivning

Redan idag sker en "ökad elektrifiering" inom både den diesel-elektriska och den mekaniska systemarkitekturen. I huvudsak sker detta genom att hjälpmaskinernas roll ersätts av batterier, eller att en, flera, eller alla maskiner i ett diesel-elektriskt system ersätts av batterier. I exempel nedan kan både elsystemet och huvudmaskin kopplas till propellern via en växellåda.

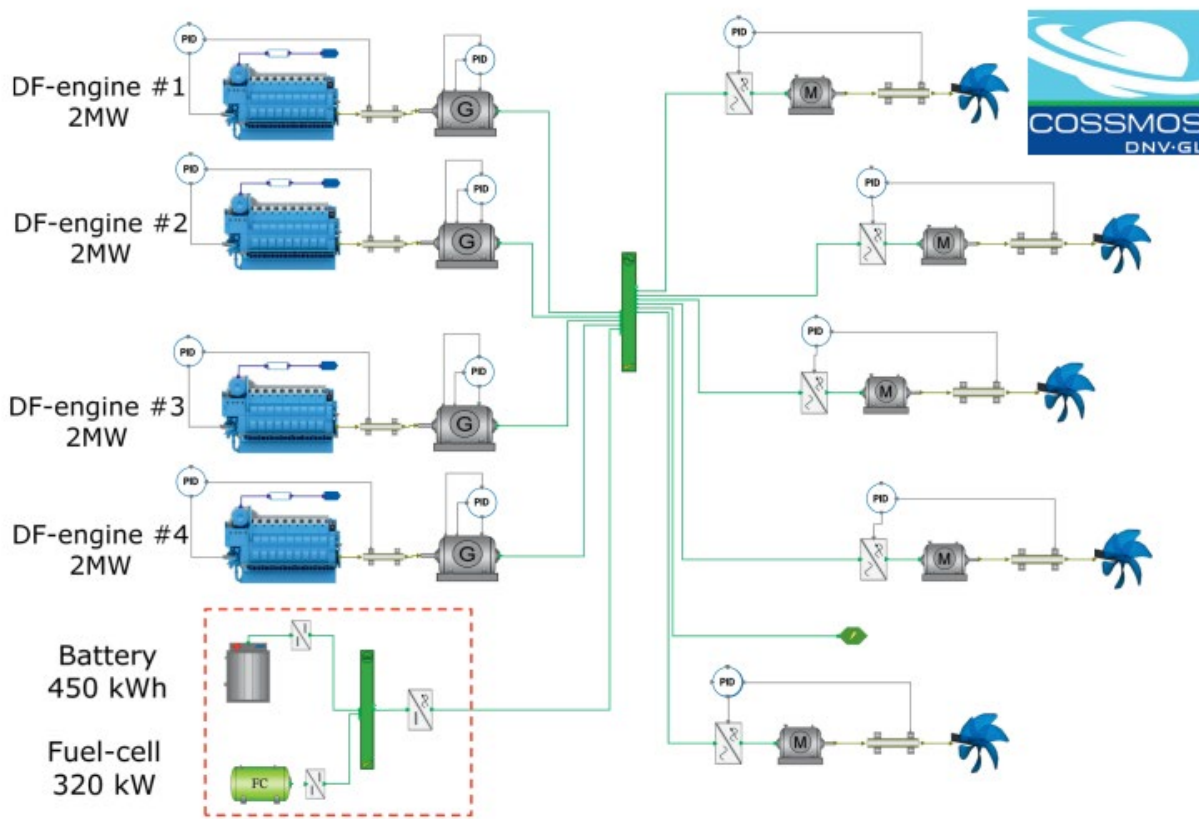


Figur 8 – Fartyg med hybrid mekanisk-elektrisk drift

Även om batterier är det vanligaste sättet på fartyg idag att direkt tillföra el, är det även möjligt att introducera bränsleceller i en liknande roll. Detta var fallet i forskningsprojektet FellowSHIP, på offshore supply-fartyget Viking Lady som beskrivs nedan. I ett pågående fartygsprojekt, With Orca, innehåller energisystemet ombord förbränningsmotor som drivs av komprimerad vätgas, vid sidan av batterier, bränsleceller och rotorsegel.²⁵ Fartyget går att driva framåt med direkt el via en elmotor påkopplad med växellåda, vid sidan av huvudmaskineriet. Annars planeras flera helelektriska fartyg med batterier och bränsleceller i kombination. Batteriers och bränslecellers roller i system ombord skiljer sig åt av tekniska skäl, vilket kommer att beskrivas närmare i nästa avsnitt. Generellt sett behöver en bränslecell operera på konstant last, medan ett batteri fungerar bra även med variabelt lastuttag. På så sätt kompletterar teknikerna varandra väl.

I flera exempel har tekniken utvecklats i samverkan. Det första handelsfartyget som utrustades med batteri-hybrid system var Viking Lady, ett offshore supply-fartyg. Detta skedde i forskningsprojektet FellowSHIP, som var ett samarbete mellan Eidesvik, Wärstilä och DNV, och pågick från 2003 till 2018. Först testades bränslecellsteknik, och därefter batterier. En överblick över systemet visas i Figur 9 nedan, som alltså är ett dieselelektriskt system kompletterat med bränslecell och batteri.

²⁵ <https://ulvan-rederi.no/egil-ulvan-rederi-skal-realisere-verdens-forste-hydrogendrevne-lasteskip/>



Figur 9 – Modellering av energisystemet ombord på Viking Lady i DNV-verktyget COSSMOS

Batteriet är förhållandevis litet jämfört med dieselmotorerna. Om batteriet skulle sköta den propulsion som alla dieselmotorer kan generera på 85% effekt (typisk effektiv driftspunkt), skulle det inte ens räcka 10 minuter. Ändå ledde batterisystemet till stora bränslebesparingar: 15% på årsbasis. Vid tester av fartyget när det ligger i dynamisk positionering (DP) kunde särskilt stora förbättringar ses: uppemot 30% (DNV GL, 2015). I avsnitt 3.5.1 nedan beskrivs närmare hur batterier leder till effektiviseringar.

Även om det är utanför omfattningen av denna rapport, kan definitionen av elektrifiering av sjöfarten också innefatta produktion av bränslen via el, som i sin tur kan användas i förbränningsmotorer, i turbiner, eller i bränsleceller (VTI, 2022). Utvecklingen av marknaderna för elektrobränslen kommer i mycket hög grad påverka samhällsplaneringen av elproduktion och transmission i land. Rederiet Destination Gotland planerar för en passagerarfärja mellan Gotland och fastlandet som ska drivas med vätgas i gasturbiner, där vätgasen behöver produceras i nära anslutning till där den ska bunkras, d v s på Gotland. Företaget Liquid Wind redan planer på två fabriker för tillverkning av grön metanol. En elektrolysanläggning tillverkar först vätgas via el, som sedan slås samman med biogen CO₂ för att skapa metanol. Den första fabrik som planeras i Sverige av Liquid Wind beräknas spara 100 000 ton CO₂, och kräva upp till 470 GWh el per år.²⁶ Företaget planerar för ytterligare 9 fabriker fram till 2030. Detta kan jämföras med elanvändningen för landström i Sverige, som uppskattades nyligen vara strax över 30 GWh per år (IVL, 2022).

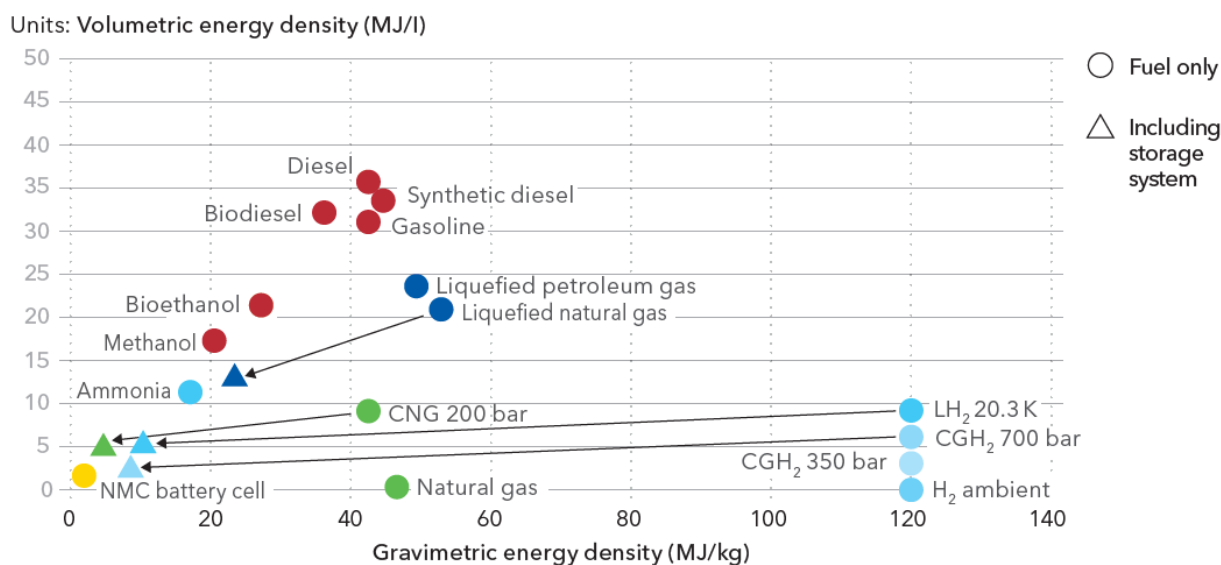
²⁶ <https://www.liquidwind.se/flagships>

3.5 Hinder och drivkrafter för olika tekniska lösningar

I detta avsnitt beskrivs generella hinder och drivkrafter för de primära tekniska lösningarna för sjöfartens elektrifiering: batterier, ladd- och landström, bränsleceller. I avsnitt 5.1 beskrivs de institutioner som möjliggör introduktion av dessa tekniska lösningar.

Ett antal övergripande faktorer påverkar vilka framdrivningssystem och bränsle som är mest rationella för en viss typ av fartyg. Vid sidan av kostnad, utsläpp och risk spelar energidensiteten en avgörande roll.

Comparison of gravimetric and volumetric storage density for fuels



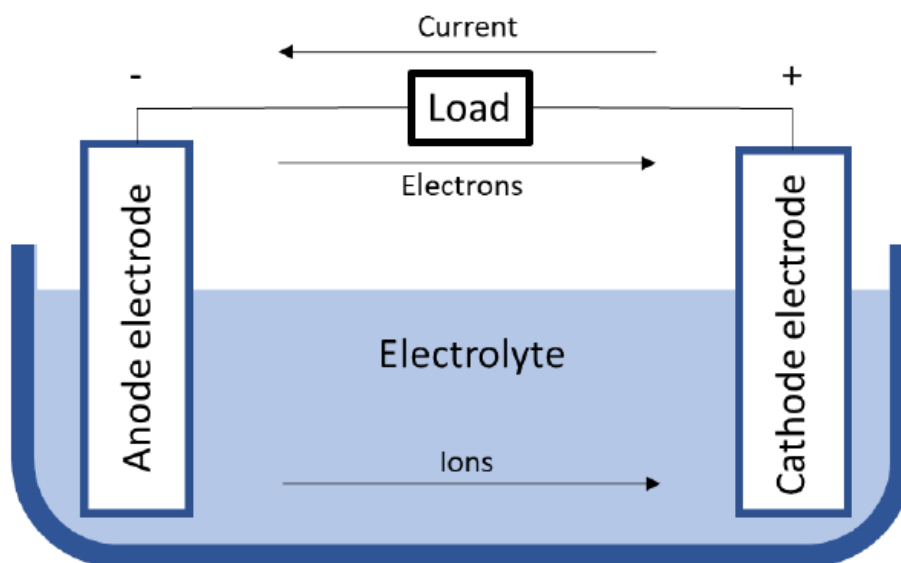
Source: Inspired by Shell (2017) and MariGreen (2018)

Figur 10 – Densitet i vikt och volym för olika typer av energibärare i marint bruk.

I Figur 10 ses hur konventionella bränslen som diesel och bensin har mycket högre densitet än många av de nya alternativ som diskuteras. Den gula cirkeln för batteriteknik längst ned till vänster illustrerar därför att batteri för helelektrisk framdrivning av fartyg bara är möjlig för fartyg som inte behöver ha med sig så mycket energi – exempelvis att resorna är korta, farten är låg och/eller att det är möjligt att ladda ofta.

3.5.1 Batterier

Batteriteknik handlar i korthet om två poler, kallade elektroder, som är åtskilda av något ämne, kallat elektrolyt som medger flöde av positivt laddade joner mellan elektroderna, från anoden till katoden, när dessa är elektriskt sammankopplade. Den vanligaste typ av batterier idag för liknande ändamål, litium-jon, kan konstrueras på olika sätt men har gemensamt att det är just litium-joner som transporteras genom en elektrolyt. En schematisk skiss kan ses i Figur 11 nedan.



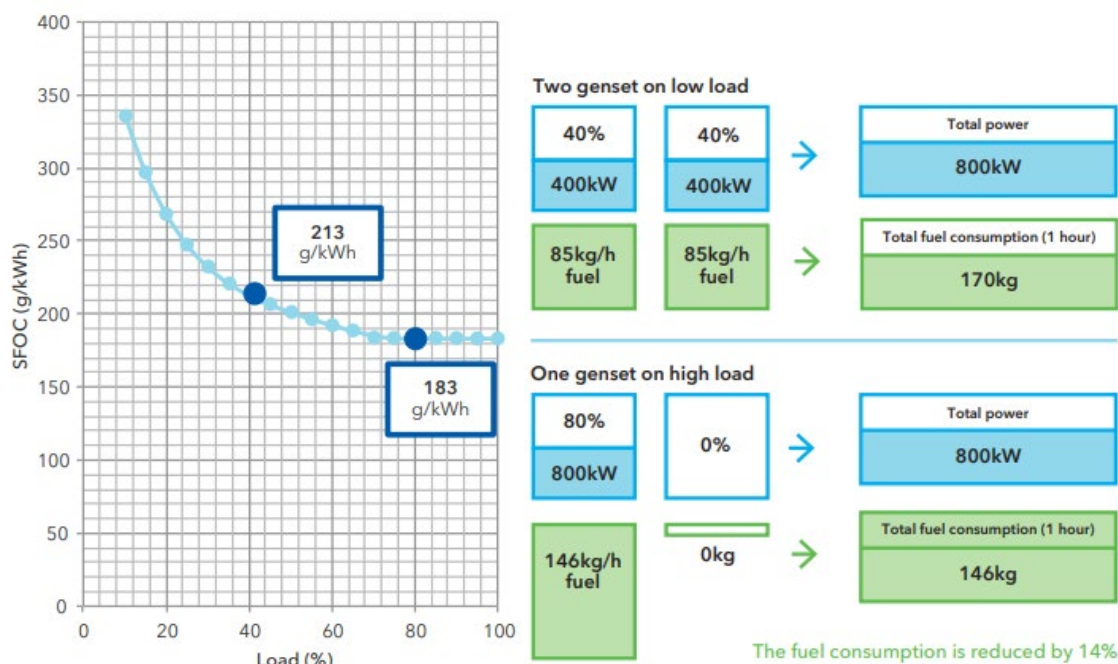
Figur 11 – Batterikomponenter

Batterier är betydelsefulla i sjöfartens elektrifiering och klimatomställning på en rad sätt. De möjliggör direkt användning av el för framdrivning eller för andra systembehov ombord. Ett huvudsakligt alternativ till batterier, om syftet är att kraftigt minska växthusgasutsläpp, är att istället omvandla el till något elektrobränsle innan det kan användas, men det medför stora systemförluster. Varje omvandlingssteg innebär förluster, varför direkt el till batterier är det mest effektiva. I Figur 12 nedan ses olika roller som batterier kan ha i ett fartygssystem (omarbetat från DNV GL, 2019).

Spinning reserve	Optimering av last	Ta emot energy	Peak shaving	Framdrivning
<ul style="list-style-type: none"> • Back-up för hjälpmaskiner med omedelbart tillgänglig energi • Uninterruptable Power Supply (UPS) • Färre hjälpmaskiner behövs igång 	<ul style="list-style-type: none"> • Optimala operationspunkten för hjälpmaskinerna • Minska behovet av underhåll 	<ul style="list-style-type: none"> • Ta emot energi från kranar etc. • Ta emot energi från solceller 	<ul style="list-style-type: none"> • Agera som buffert vid lastvariationer • Motorer möter bara jämn last 	<ul style="list-style-type: none"> • Batteriet kan driva fram fartyget om propelleraxeln är ansluten till en elmotor/axelgenerator (direkt eller växellåda)

Figur 12 – Batteriers olika möjliga roller i fartygs energisystem

Om man ska se till de handelsfartyg idag som installerar batterier, är det typiskt med vinster som inte är direkt relaterade till fartygets framdrivning. Batteritekniken innebär helt enkelt nya möjligheter att designa energisystem ombord, utöver att ersätta användning av fossilt bränsle. Några av dessa exemplifieras nedan: som räkneexempel och illustration för "spinning reserve" kan följande antas (se Figur 13): ett fartyg har två hjälpmaskiner igång, vardera producerar 400 kW på 40% last. Båda hjälpmaskiner måste vara igång av säkerhetsskäl, för att fartyget ska kunna ha tillgång till energi även vid ett avbrott av någon av maskinerna. När belastningen på motorerna sjunker blir maskinerna mindre effektiva, vilket illustreras till vänster i figuren. Om fartyget istället har ett batteri anslutet, som momentant kan ge el vid ett avbrott, kan en maskin stängas av. I detta fall minskas på så sätt energianvändningen för el ombord med 14%.



Figur 13 – Effekten av spinning reserve / batteri som redundant kapacitet (ur DNV GL, 2015)

Den här typen av batterisystem är betydelsefulla i flera nya svenska fartyg, bland andra från Donsötank²⁷, Erik Thun²⁸, Furetank²⁹, A2B@C³⁰ och Terntank³¹.

I ett diesel-elektriskt system kan batterier på ett liknande sätt bidra till energieffektivisering. I tuffare väder, exempelvis, kan en kapten vilja ha flera dieselmotorer igång av säkerhetsskäl (på grund av risk för black out) än vad som egentligen behövs för själva framdrivningen. Med ett batteri som redundant kapacitet kan på så sätt en motor stängas av.

Ett annat exempel är att ta emot energi, för fartyg som är utrustade med kranar, t ex general cargo-fartyg (se Figur 14 nedan). När fartyget lastar och lossar blir effektuttaget väldigt varierande, vilket leder till ökad bränsleförbrukning på hjälpmaskinerna. Med ett batteri installerat, som både kan ta tillfälliga toppar och som dessutom kan ta emot energi genom att bromsa med generatorerna, blir hela systemet mycket mer effektivt.

²⁷ <https://www.sjofartstidningen.se/batteripack-till-donsotank-nybyggen/>

²⁸ <https://www.sjofartstidningen.se/thun-bestaller-ny-typ-av-tankfartyg/>

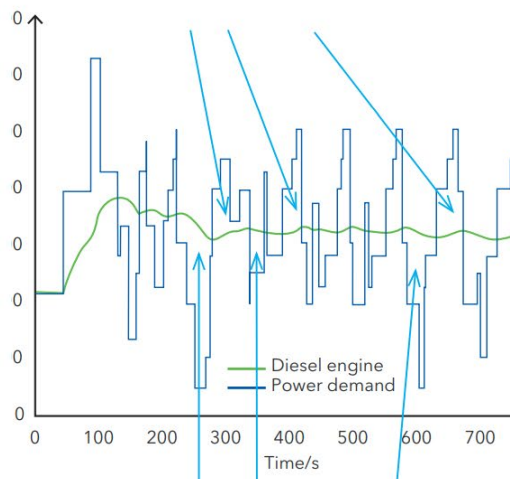
²⁹ <https://www.sjofartstidningen.se/miljoeffektivt-tankfartyg-visades-upp-i-london/>

³⁰ <https://www.sjofartstidningen.se/atobc-bestaller-ytterligare-fartyg/>

³¹ <https://www.sjofartstidningen.se/terntank-nybyggen-far-stod-for-klimatinvesteringar/>



Batteriet **laddar ur** när effektbehovet är större än vad hjälpmaskinerna kan leverera



Batteriet **laddar** när effektbehovet är mindre än vad hjälpmaskinerna kan leverera

Figur 14 – Batterisystem ger optimal last och bromsning med energiåtervinning (ur DNV GL, 2015).

Simuleringar av den här typen av system visar att bränsleanvändningen i operation av kranarna kan minskas med upp till 30%, med mindre än 1 års återbetalningstid (2015 års låga bränslepriser och höga batteripriser).³² Med dagens prisutveckling (högre bränslepriser och lägre batteripriser) får därför den här typen av system ännu kortare återbetalningstid.

I en passagerarfärja, fritidsbåt eller mindre arbetsbåt, som inte har några större övriga energikrävande system ombord, är dock batteriernas huvudsakliga syfte att bidra till framdrivningskraften. Beroende på fartygstyp och hur det opereras får alltså batterisystem olika effekt. En summering görs i Tabell 1 nedan.

³² <https://grieg.no/news/press-release-efficient-cranes-provide-cleaner-air/>

Tabell 1 – Batteriers betydelse i olika fartygssegment

Fartygstyp	Bränslebesparing	Huvudsaklig roll för batteri	Faktorer som bidrar till nyttan
Färjor	Upp till 100%	Framdrivning men även alla övriga	Låga elkostnader, lång tid i hamn, korta distanser
Oceangående fartyg (oavsett segment)	0-14%	Komplement till axelgenerator	Varierar, kräver detaljanalys
Fartyg i kortsjöfart (oavsett segment)	Varierar	Helelektrisk eller hybrid, spinning reserve	Låga elkostnader, lång tid i hamn, korta distanser, mycket tid i farleder etc. där hjälpmaskiner behöver köras för redundans
Bulkfartyg/general cargo med kranar	0-30% (stora besparingar möjliga i lasthantering)	Hybridisering med energiåtervinning från kranar	Integrering med elgenerering
Offshore (t ex wind farm support)	5-20%	Spinning reserve vid dynamisk positionering	Lågt kraft/energibehov för backup
Bogserbåtar	5-15% (100% om helt elektrisk)	Helt elektrisk eller olika typer av hybrider	Varierar, krävs detaljanalys av operation
Snabbgående färjor	Upp till 100%	Helt elektrisk eller hybrid	Varierar, krävs detaljanalys av operation. Kombination med foil-teknik minskar energibehovet kraftigt, och underlättar eldrift.

Utmaningarna kring att inkludera batterier i fartygs energisystem handlar om att uppnå hög energidensitet och tillgänglig effekt samtidigt som säkerheten bibehålls och systemen inte tar för stor plats eller vikt ombord. Dessa utmaningar blir särskilt stora när det handlar om att bygga om existerande fartyg.

En rad olika batteritekniker finns och är under utveckling. Idag är litium-jon batterier den främsta batteritekniken, som särskilt drivits fram av marknaderna för bilar och för konsumentelektronik.

Samtidigt är den maritima användningen av batterier mycket liten, under 1%, jämfört med dessa (DNV GL, 2020c, s. 2), och dess behov kan därför inte sägas ha styrt denna teknikutveckling. Mycket utvecklingsarbete inom sjöfarten har handlar om att anpassa den existerande batteritekniken till maritimt bruk. Men ny teknik förväntas komma som kan bidra till ytterligare användning av batterier på fartyg. I en studie för European Maritime Safety Agency (EMSA) listas fyra områden där utveckling förväntas ske (DNV GL, 2020c). För det första förväntas generell teknikutveckling för att främja solid-state elektrolytbatterier. För det andra, förväntas metall-luftbatterier bli viktigare, eftersom de möjliggör upp till 30 gånger högre energidensitet än nuvarande litium-jon batterier. För det tredje förväntas batteriövervakningssystemen (eng. "battery management system", eller BMS) utvecklas för att kunna exempelvis förutsäga fel. Slutligen förväntas livscykelkostnaderna för batterier att sjunka.

Vad gäller hinder för användandet av batterier ombord är det huvudsakligen relaterat till säkerhetsaspekter, men även infrastrukturfrågor som möjligheterna att ladda, och självklart kostnader. För litium-jon teknik, som är det alternativ som är kommersiellt tillgängligt, består säkerhetsaspekterna av att hantera risker relaterade till elektrolyten, som är instabil och brandfarlig, och metallelektrodena, som kan brinna och därigenom släppa ut syrgas (DNV GL 2020c). Därmed finns två huvudsakliga feltillstånd:

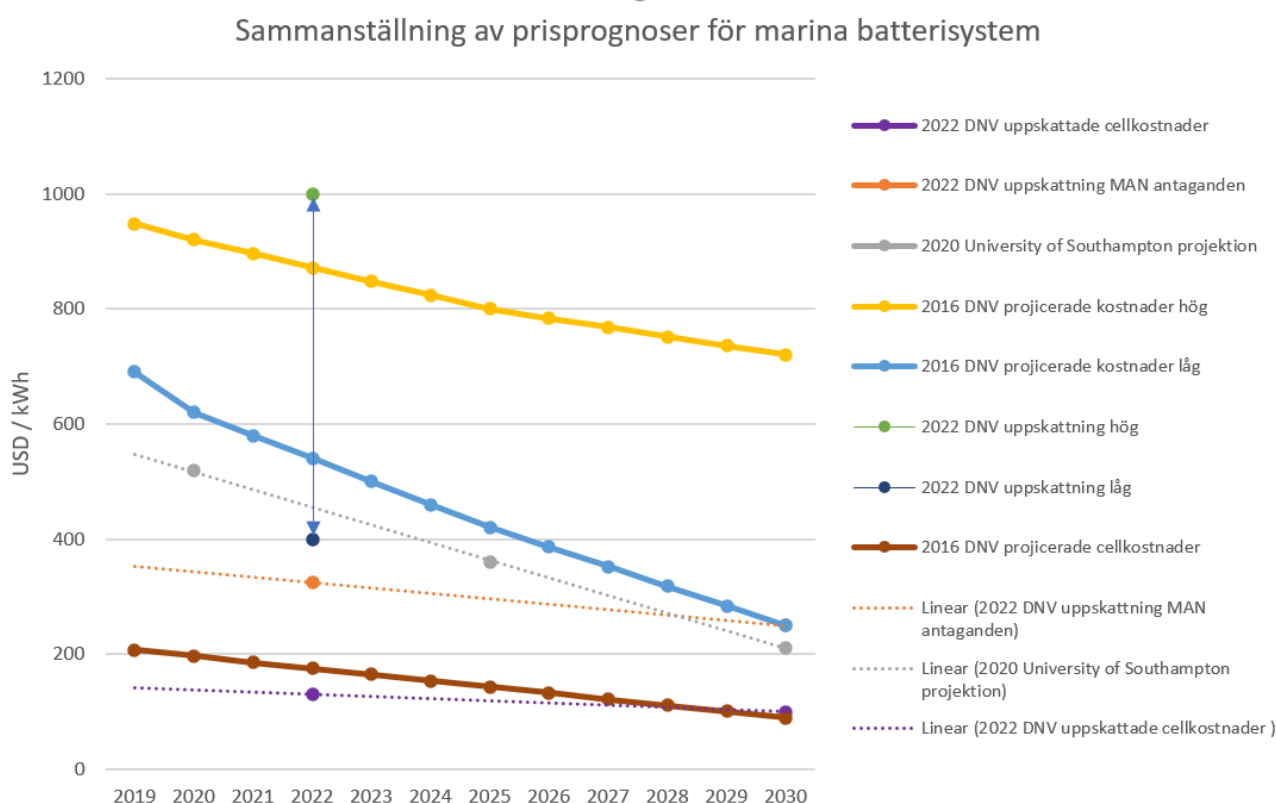
- Termisk rusning (eng. "thermal runaway"), där något sätter igång en temperaturhöjning i en cell så att elektrolyten där börjar brinna. Om temperaturen blir tillräckligt hög kan även metallelektroden börja brinna. Metallbränder är farliga i sig, men då elektroderna också kan innehålla syre innebär det att branden blir mycket svår eller omöjlig att släcka. Ett sådant händelseförlopp är farligt eftersom det kan leda till exponentiell spridning av brand mellan celler i ett batteripaket. Batteripaket eller moduler, som består av tusentals celler, behöver konstrueras med skyddssystem och barriärer sådana att en propagering av den här typen inte kan äga rum.
- En spridning av gaser från elektrolyten (en så kallad "off gas event"), som kan ske vid någon form av olycka. Dessa gaser är dels brandfarliga och utgör en explosionsrisk och dels kan de innehålla ämnen som är giftiga. Därmed behöver batterisystem ombord vara designade med hänsyn taget till risker för antändning och till möjligheter att ventileras gaser från både batterimodulen i sig och från det batterirum (eller motsvarande för exempelvis en fritidsbåt) där det är placerat.

För att förebygga olyckor finns olika institutioner, vilket diskuteras närmare i avsnitt 5.1. Dessa är under konstant utveckling, då erfarenheter exempelvis från olyckor leder till nya revisioner.

Vidare pågår hela tiden en utveckling för att minska kostnader och öka energidensiteten. Här har bilindustrins ansträngningar att bygga upp produktionskapacitet spelat stor roll. Kostnaderna för batterier för maritimt bruk sjunker dock inte på samma sätt som för bilar. Detta är då kostnaden för de omkringliggande systemen är så mycket större för marina applikationer. I en rapport från MAN beskrivs att bara 40% av de totala kostnaderna är för själva battericellerna. Exemplet som nämns är då att även om cellpriserna minskar med 75% minskar de totala systemkostnaderna med 30% (MAN, 2019). Utöver de ökade säkerhetskraven listade ovan kan till den totala kostnadsbilden läggas inköpskostnader, installationskostnader vid varv, feleffektsanalyser (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA), modifikationer av elcentralen ombord, och testning (DNV, 2020c).

Offentlig statistik kring priser på maritima batterisystem saknas. Enligt DNVs erfarenhet baserat på utförda projekt för olika kunder, ligger priserna idag runt 400-1000 USD / kWh, beroende på teknik. Som referens var system för elbilar prissatta runt 130 USD / kWh under 2021. En

dramatisk minskning har där skett på 10 år: 2011 var priset ca 950 USD / kWh.³³ I år förväntas dock istället priserna öka något.³⁴ De ökade säkerhetskraven på batterier ombord leder till dessa prisskillnader. Därutöver sker installationerna typiskt anpassade till varje fartyg (jämfört likadana installationer i bilars långa tillverkningsserier), och marknadsvolymerna är låga. En minskning har dock skett över tid även för marina batterisystem: i Figur 15 nedan ses att projektioner gjorda av DNV 2016 väl stämmer överens med dagens uppskattade priser. Här visas också en sammanställning gjord av University of Southampton (Craig, 2020) och uppskattningar gjorda enligt MANs antaganden ovan om kostnadsfördelningen mellan system- och cellkostnader (40% cellkostnader) och antaganden om 130 USD / kWh 2022 och 100 USD / kWh 2030. För 2030 leder MANs antaganden, University of Southamptons prognos samt DNVs låga scenario från 2016 till en prisbild runt 211-250 USD/kWh.



Figur 15 – Sammanställning av prisprognoser för marina batterisystem. DNV uppskattade cellkostnader 2022 baserade på utförda projekt; University of Southampton projektion efter Craig (2020); DNV projicerade kostnader 2016; DNV uppskattning på antaganden i MAN (2019) och uppskattade cellkostnader 2022.

De operationella kostnaderna för batterisystem beror av elpriserna. Typisk effektiviteten för ett helelektriskt system är att 76-85% av energin från land kan nyttiggöras efter förluster i systemet (DNV, 2020c).

Ett "andra liv" för fartygsbatterier efter de förväntade 10 åren till sjöss förväntas förbättra livscykelavtrycket och -kostnaderna. Det förväntas finnas i andra applikationer med lägre prestandakrav där dessa kan användas. Även här är det givetvis svårt att uppskatta vad dessa kommer att vara värda. I en studie av hur en cirkulär ekonomi kan påverka de totala kostnaderna

³³ <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-11-30/battery-price-declines-slow-down-in-latest-pricing-survey>

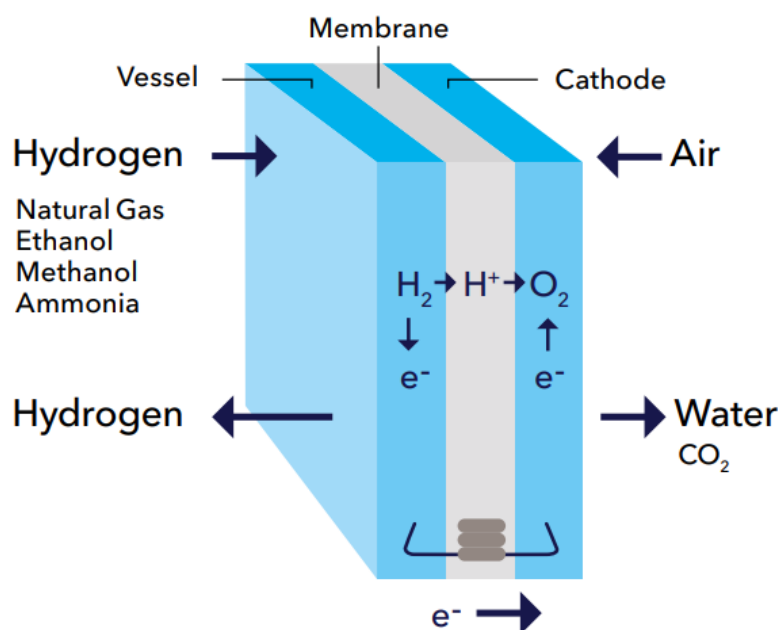
³⁴ <https://www.bloomberg.com/professional/blog/race-to-net-zero-pressures-of-the-battery-boom-in-five-charts/>

för marina batterier uppskattar Lehmusto och Santasalo-Aarnio (2022) att priset på återanvändna batterier då kan vara halva nypriset. Författarna gör beräkningar på en helelektrisk passagerarfärja, som med 30 års teknisk livslängd behöver byta batteripaket två gånger, och kommer fram till att livscykelkostnaderna kan minska med 20% om de använda batterierna kan säljas vidare. Författarna konstaterar också att mer forskning behövs för att kunna bedöma prestandan och den återstående livslängden för dessa batterier.

3.5.2 Bränsleceller

I korthet genererar en bränslecell el genom omvandling av kemisk energi från ett bränsle som exempelvis vätgas.

Om man jämför att använda direkt el till att ladda batterier för ett fartyg, med att använda el för att producera ett bränsle som sedan går att använda i en bränslecell, är batterier det långt mer effektiva systemet. Förluster finns i kedjan från bränsleproduktion till användning. Bränsleceller används istället när längre räckvidd behövs – när batterier skulle bli för tunga eller för skrymmande – eller när laddning inte är möjlig.



Figur 16 – Schematisk skiss av bränslecell, ur DNV GL (2017)

Det finns en rad olika bränslecellstekniker, med olika fördelar och nackdelar. I en rapport för EMSA om bränsleceller i sjöfarten utvärderas sju olika lösningar (DNV GL, 2017): alkaliska bränsleceller (AFC), protonutväxlingsmembran³⁵ (PEMFC), hög-temperatur PEMFC (HT-PEMFC), bränsleceller för direkt metanol (DMFC), bränsleceller för fosforsyra (PAFC), bränsleceller för smält karbonat (MCFC) och slutligen solid oxide (SOFC) (DNV GL, 2017). I rapporten lyfts tre av

³⁵ Tekniken kallas även polymerelektrolytmembran.

dessa fram som särskilt lämpliga, PEMFC, HT-PEMFC och SOFC. I kommersiellt bruk är det idag vanligast med PEM-bränsleceller³⁶, och fokus i den här rapporten ligger därför på denna teknik.

Det som gör bränsleceller attraktiva för marint bruk är att de förväntas medföra högre systemeffektivitet än vanliga förbränningsmotorer. Bränsleceller paras typiskt i system tillsammans med batterier, då de senare kan ta peak-laster samtidigt som bränslecellerna levererar en jämn bas-last. Mycket utveckling pågår för att möjliggöra bränsleceller ombord, inte bara teknisk, utan även av effektiva regelverk. Ett stort antal forsknings- och utvecklingsprojekt har genomförts där bränsleceller med tankar installerats ombord (se DNV GL, 2017, för 12 exempel). Tekniken används numera i kommersiell drift. Som redan beskrivits i avsnitt 2.3 ska färjan MF Hydra gå på vätgas i Norge, såväl som en ny färja mellan Lofoten och Bodö. I San Francisco ska färjan Sea Change gå med 75 passagerare.³⁷ I Sverige planerar Green City Ferries för en passagerarfärja med bränsleceller.³⁸

Bränsleceller är även attraktiva för att de går att drivas med vätgas, eftersom den i sin tur har potential att minska växthusgasutsläpp. Idag produceras dock vätgas främst ur fossila råvaror, och för användning exempelvis i raffinaderier, ammoniak för gödselproduktion eller i kemiindustrin. DNV projicerar att vätgas använd som energibärare kommer att öka kraftigt kommande decennier, och då framförallt producerad genom elektrolys av vatten (s.k. "grön" vätgas), eller fortsatt av fossila råvaror men med infångning av koldioxid (s.k. "blå" vätgas) (DNV, 2022a).³⁹ Dessa varianter blir viktiga bidrag till att minska utsläpp också i industrin: i Sverige finns exempelvis stort behov av användning av grön vätgas i stålindustrin. Grön vätgas blir också en viktig råvara i produktion av grön ammoniak eller metanol. Liksom vätgas används dessa på samma sätt främst idag i för industriella syften eller i jordbruket, men förväntas bli viktiga som energibärare.

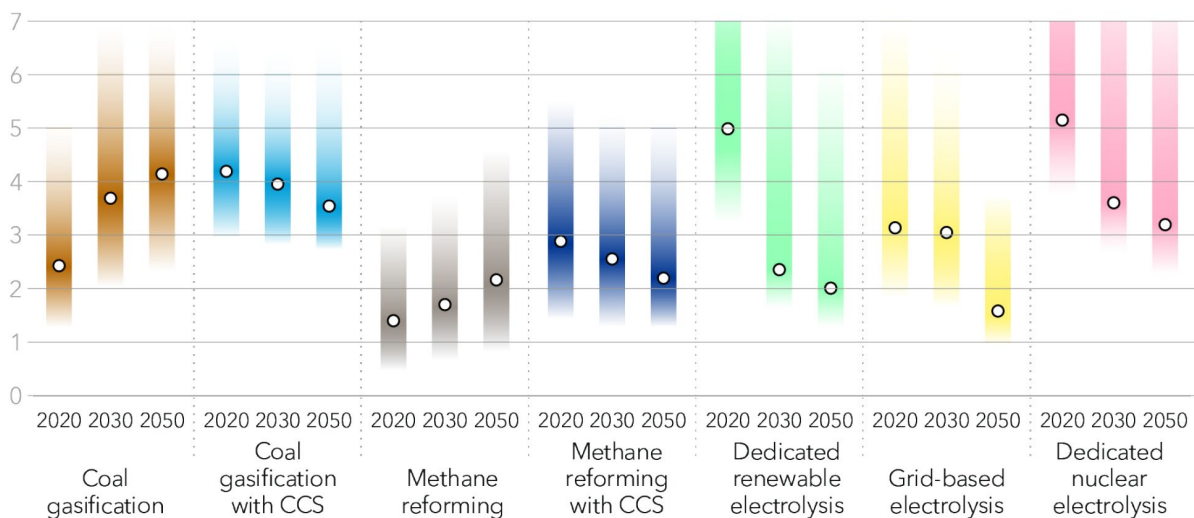
Kostnaderna för vätgas förväntas minska över tid, allt eftersom produktionen kan byggas ut. I Figur 17 nedan visas projicerade kostnader för olika produktionsvägar (DNV, 2022a). Även om den "gröna" vätgasen är mycket dyrare än den som idag kommer från kol eller metan, förväntas kostnaderna sjunka drastiskt bara detta decennium. Här finns avvägningar att göra: i den nämnda vätgasdrivna färjan som planeras mellan Bodö och Lofoten tillåter avtalet att vätgasen till en början är fossil. Att färjan kommer på plats innan bränsleproduktionen kan ses som ett sätt att skapa efterfrågan på grön vätgas, samtidigt som projektet i sig innebär att många tekniska utmaningar kring bunkring, hantering ombord med mera, löses.

³⁶ Se exempelvis <https://new.abb.com/marine/systems-and-solutions/electric-solutions/fuel-cell> eller <https://powercell.se/sv/hur-fungerar-braensleceller>

³⁷ <https://www.reuters.com/world/us/hydrogen-powered-ferry-prepares-launch-san-francisco-bay-2022-04-21/>

³⁸ <https://echandia.se/news/article/echandia-secures-order-for-the-worlds-first-emission-free-high-speed-catamaran/>

³⁹ Utöver "grön" och "blå" kan en palett av färger används för att beskriva olika sorter vätgas. I DNV (2022, s. 49) används 11 olika färger.



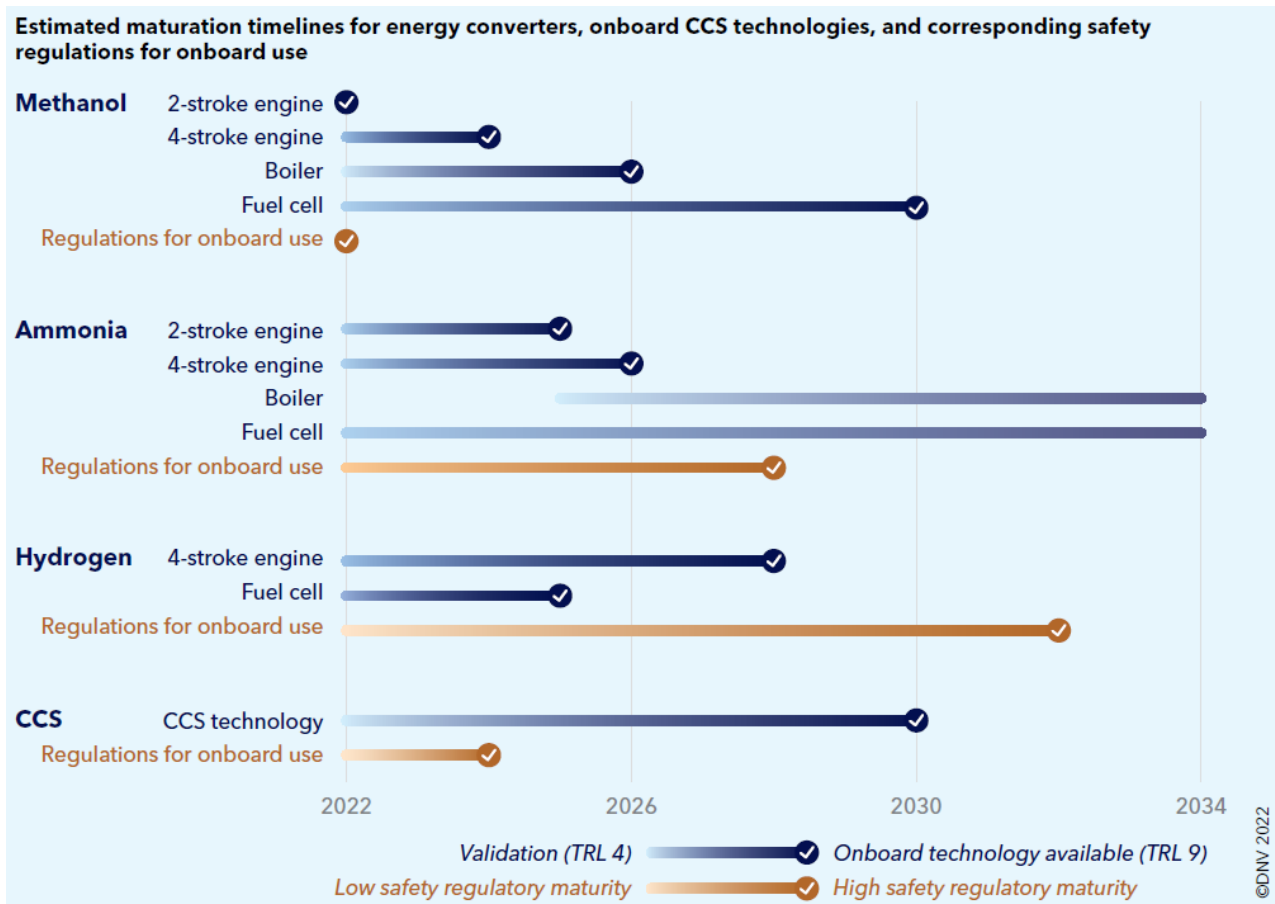
Figur 17 – Projicerade kostnader, USD/kgH₂ för vätgas uppdelat i produktionsvägar (DNV, 2022a)

Bränslecellers relativt höga kostnader och korta livslängder innebär hinder för vidare spridning.

Viktiga tekniska hinder för elektrifiering via bränsleceller beror främst på de nya bränslen som behöver hanteras i hamnar, bunkras, lagras och användas ombord. Vad gäller själva fartygen, saknas det idag preskriptiva internationella regelverk för hur de ska konstrueras. Istället behöver rederiet visa att lösningen är lika säker som konventionell teknik (mer om detta i diskussion om institutioner för säkerhet i avsnitt 5.1). Batterier har som kontrast klassregler, vilket beskrevs ovan. Med tid och samlade erfarenheter från att genomföra projekt kan preskriptiva regler skapas. Vad gäller vätgas, leder DNV projektet MarHySafe, som syftar till att minska kostnaderna för klassgodkännande av system utan att kompromissa med säkerhetsaspekterna. En första handbok för detta presenterades under 2021 av projektets 22 partners, inklusive norska Sjöfartsdirektoratet.⁴⁰

När den här typen av hinder för bränsleceller kan vara undanröjda beror på vilken typ av bränsle som de ska använda. I Figur 18 nedan visas uppskattningar av när olika bränslen förväntas kunna användas i bränsleceller (ha nått TRL 9), och när regelverk förväntas vara tillräckligt mogna. I figuren visas utöver vätgas som bränsle, även metanol och ammoniak. Det finns ett överlapp mellan teknikerna här: vätgas kan även användas i 4-taktsmotorer, och bränsleceller kan även drivas med metanol eller ammoniak. Alla dessa bränslen kan framställas både med grund i fossila bränslen och via direkt el.

⁴⁰ <https://www.dnv.com/news/industry-first-dnv-and-industry-consortium-publish-handbook-for-hydrogen-fuelled-vessels--203575>



Figur 18 – Uppskattad utveckling av mognadsgrad för olika energiomvandlare och motsvarande regelverk (DNV 2022b)

3.5.3 Landström och laddström

Hinder och drivkrafter för landström i Sverige är väl beskrivna i rapporten från projektet Kaj-EI (Costa et al., 2022 SSPA), och berörs därför inte här. Alla fartyg kan i princip stänga av sina hjälpmaskiner i hamn om de istället får tillgång till elanslutning. Till skillnad från den elektrifiering som tidigare beskrivits, som där klimateffekten varit i fokus, är landström framförallt en åtgärd för att förbättra den lokala miljön. Detta genom att minska buller från fartyg som kör hjälpmaskiner, och genom att minska utsläpp av partiklar och kväveoxider, som annars leder till hälsoeffekter. Landströmsanslutningar skiljer sig inte nödvändigtvis från laddströmsanslutningar. Exempelvis fartyg som utrustas med mindre batterier (1 MWh) för hybrid-drift kan mycket väl hinna ladda batterier under sin tid i hamn. När det gäller fartyg som behöver hög effekt under kort tid, krävs dock särskilda lösningar.

3.6 Sammanfattning

I huvudsak innebär elektrifiering i sjöfarten ett flertal saker: att system ombord görs effektivare genom introduktion av batterier eller bränsleceller; att låta batterier eller bränsleceller stå för delar eller all framdrivningskraften; att låta fartyg ansluta till elnätet i hamnar för att kunna stänga av dieselgeneratorer och/eller kunna ladda batterier; samt att driva förbränningsmotorer, turbiner eller



bränsleceller på bränslen tillverkade av el via elektrolys. I nästa avsnitt beskrivs och uppskattas marknaderna för dessa olika lösningar på kort och medellång sikt.

4 MARKNADSÖVERSIKT PÅ KORT OCH LÄNGRE SIKT

Marknaden för elsjöfart på *kort sikt* bedöms här genom en analys av internationella fartygsregister, via Clarkson World Fleet Register.⁴¹ Här finns data om alla fartyg som är i operation och som beställts, inklusive vad de är utrustade med för framdrivningssystem, huvudsakligt bränsle, och om de har möjlighet för landströmmuppkoppling. Registerna uppdateras om fartyg exempelvis installerar batterier eller landström. På så sätt ges en bild av hur tillgång och efterfrågan på elsjöfart ser ut momentant. Begränsningen är att den bara hanterar fartyg med så kallade IMO-nummer.⁴² Att vara registrerad med ett IMO-nummer är ett internationellt krav för alla passagerarfartyg med en bruttodräktighet (eng. gross tonnage)⁴³ över 100 gross tons, och alla fraktfartyg över gross ton. Det är möjligt och frivilligt att anmäla fiskefartyg över 100 gross tons. Motsvarande register över mindre fartyg och båtar saknas.

För att bedöma den möjliga marknaden för elektrifierade fartyg på *längre sikt* genomförs i projektet en analys av AIS-data, som redovisas i delavsnitt 4.4. Grunden är att DNV över tid har utvecklat en resebaserad AIS-metod för att kunna bestämma vilka typer av energibärare (el, diesel etc.) och framdrivningstekniker som är lämpliga för olika fartygssegment och operationsprofiler. AIS-data är i rå form bara signaler från fartyg om position och tid, tillsammans med identifierare av fartyget som gör det möjligt att uppskatta fartygets prestanda genom korshänvisning till databaser över vilka maskiner som är installerade ombord etcetera. Den utvecklade metoden gör det möjligt att automatiskt summera dessa signaler i form av resor mellan automatiskt identifierade hamnar. Därmed kan energibehovet som ett fartyg typiskt behöver över tid beräknas, vilket kan utnyttjas för beräkningar av vilka energibärare som är relevanta för varje fartyg.

Olika energibärare har olika densitet, vilket gör att varje fartyg har en teoretisk maxkapacitet vad gäller fart och räckvidd. Fartyget har ett begränsat utrymme för att ta med energi för framdrivning för att kunna bibehålla sin lastkapacitet. Energibärarens densitet i förhållande till hur snabbt och hur långt ett fartyg går ger på så sätt gränser för vad som är lämpligt. I Sverige finns ett tydligt exempel där Stena Line förväntar sig att batteridrift är mest lämpligt för en passagerarfärja mellan Fredrikshamn och Göteborg, i kontrast till Destination Gotland som förväntar sig att vätgasdrift är mest lämpligt för en passagerarfärja mellan Visby och fastlandet. Det är den här typen av avvägningar, tillsammans med tillgången på bränsle eller laddningsmöjlighet, som leder till diversitet vad gäller val av energibärare och drivlina.

Avsnittet avslutas i 4.4.1 med en närmare beskrivning av elektrifiering inom passagerartrafiken och lasttrafiken.

4.1 Sjötransportssystemets aktörer och rådighet över elektrifiering

Som beskrivits i tidigare avsnitt omfattar sjöfartens elektrifiering en rad olika tekniska lösningar, och därmed också en rad olika aktörer, stora som små, offentliga och privata, som verkar på olika marknader. En översikt kan ses i tabell nedan.

⁴¹ <https://www.clarksons.net/WFR/>

⁴² <https://www.imo.org/en/OurWork/MSAS/Pages/IMO-identification-number-scheme.aspx>

⁴³ Bruttodräktighet (eng. Gross Tonnage, GT) är ett mått på ett fartygs totala inneslutna volym.

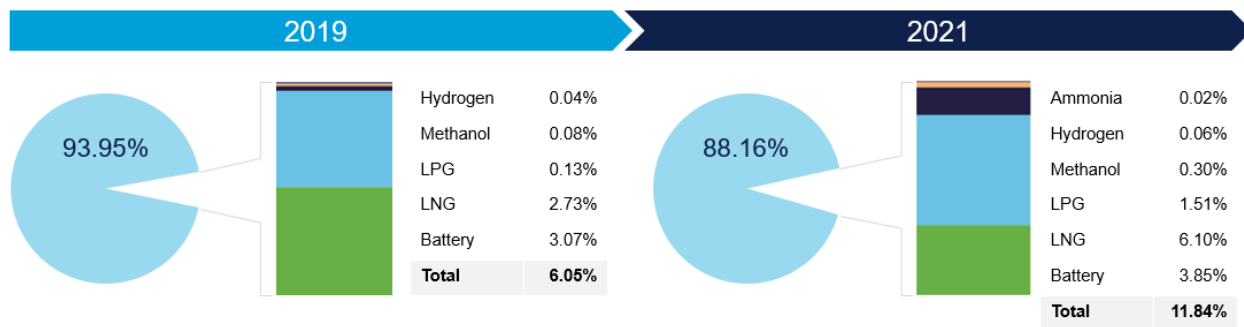
Tabell 2 – Aktörer och marknader inom elektrifierad sjöfart

Tjänst	Huvudsakliga aktörer
Utföra sjötransporter.	Rederier, transportköpare, logistikbolag, banker och finansieringsinstitut etc.
Designa och konstruera fartyg	Fartygsvarv, mäklare, rederier
Komponenter och system (ex. batterier)	Batteritillverkare, systemleverantörer
Tillhandahålla landström	Elnätsföretag, hamnar, rederier
Utveckla regler för elektrifierade fartyg, godkännande och utövande av tillsyn	Myndigheter, internationella organ, klassningssällskap

Det finns på så sätt inte en avgränsad marknad för efterfrågan och tillgång på elsjöfart. Som beskrevs i avsnitt 2.3 om marknaden för elsjöfart i Norge, spelade inte bara individuella lyckade projekt stor roll, utan även aktörernas sammansättning, deras kultur och drivkrafter. De norska varven, som annars var fullt upptagna med att bygga fartyg till offshore-sektorn, saknade ordrar och välkomnade nya. Staten tog en stor roll i att minska kostnaderna för olika initiativ. På efterfrågans-sidan fanns företag som var köpare av sjötransporter (Statoil/Equinor), hamnar, kommuner samt myndigheter (Statens Vegvesen), som alla ställde generella miljökrav eller direkt krav på elektrifiering, vilket drev på utvecklingen ytterligare. Ansvariga myndigheter för tillsyn tillsåg att vägledningar för fartyg med ny teknik skapades, i nära samverkan med klassningssällskap (se även avsnitt 5.1).

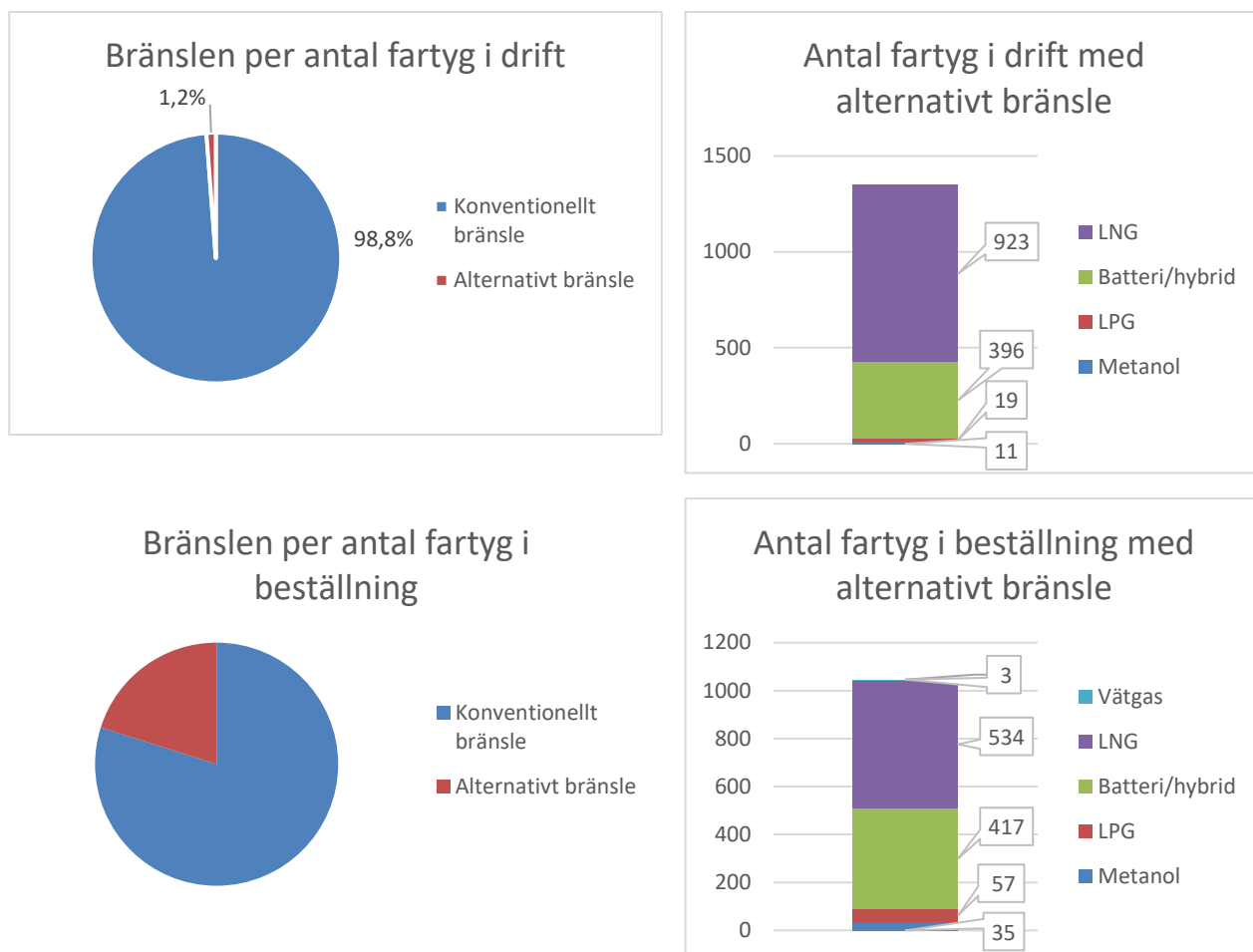
4.2 Global marknadsutveckling på kort sikt

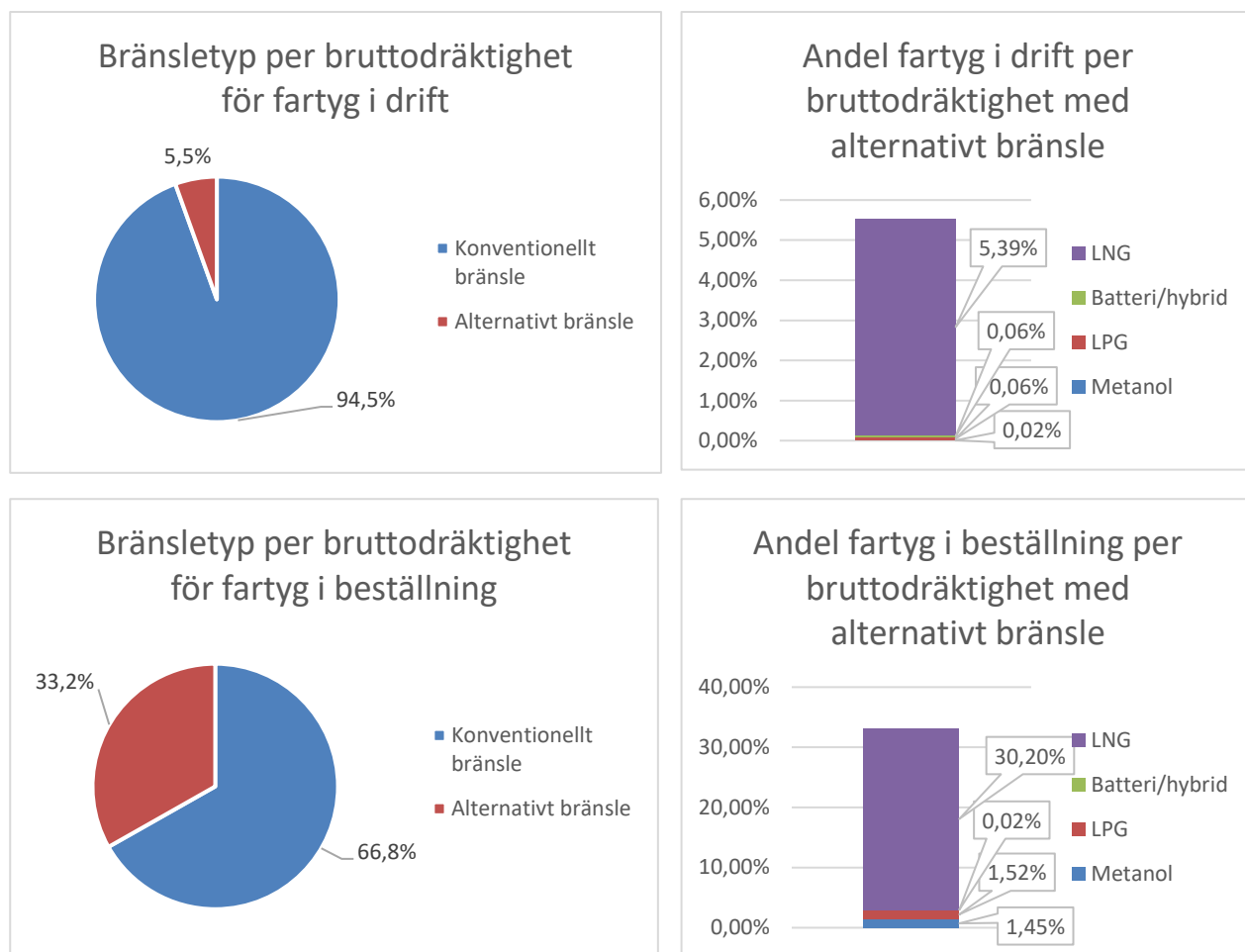
Via analyser av globala fartygsregister kan en uppskattning av marknaden för elektrifierade fartyg på kort sikt göras. Här finns både alla existerande fartyg, där register uppdateras vid förändringar, och fartyg som är beställda på varv. All datainsamlingen i rapporten är gjord i Juni 2022. I Figur 19 nedan visas andelen fartyg i orderboken med någon form av alternativt bränsle under 2019 och 2021 (ur DNV, 2020a). Fartyg som kan använda alternativa bränslen är typiskt flexibla för att kunna använda flera typer av bränslen, typiskt LNG och konventionell dieselolja. Alla typer av alternativ plockar marknadsandelar från konventionell design: från 2019 till 2021 en nära på fördubbling av andelen. Det vill säga andelen av de nybyggda fartyg som kunde använda ett alternativt bränsle är större.



Figur 19 – Marknadsutveckling för alternativa drivlinor, andel av orderboken mätt i antal fartyg. (DNV, 2020a)

2022 rådde situationen som ses i Figur 20 (data ur DNV, 2022a). Här har andelen alternativa bränslen och drivlinor ökat ytterligare. Antalet fartyg med batteri- eller hybrid som ligger beställda från varv är lika stort som den totala flottan i operation.





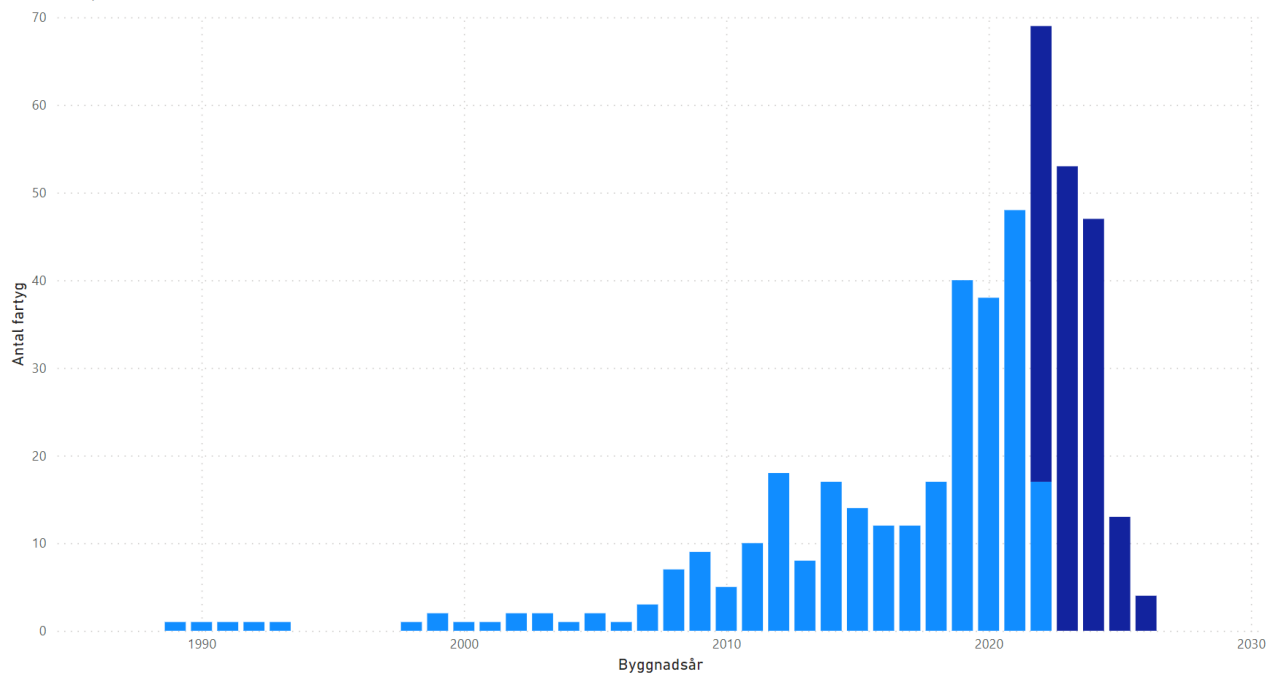
Figur 20 – Alternativa bränslen och drivlinor, i antal fartyg och i bruttodräktighet (eng. gross tonnage) (DNV, 2022a)

I Figur 21 nedan visas antalet fartyg med någon form av elektrifiering via batterier, sorterade på byggnadsår och uppdelade i om de är i operation (här "in service" – i drift, "repairs" – ligger stilla för reparation eller "idle" – ligger upplagd), eller under byggnation på varv ("on order"). Figuren beskriver tillväxten av elektrifierade fartyg. Tillväxten är kraftig: 2010 tillkom (byggdes) 5 elektrifierade fartyg; 2015 14 fartyg; 2020 38 fartyg. Det finns inga enskilda förklaringar till varför större hopp sker vissa år: det beställs fartyg från många olika länder och rederier. Att staplarna för "on order" minskar i framtiden ska läsas som att det hela tiden inkommer nya ordrar och fortsatt tillväxt förväntas.

För 2022 var summan av de förväntade orderarna och de redan levererade fartyg i juni 69 fartyg; en ökning i antalet levererade fartyg på 44% jämfört med hela 2021 (48 fartyg).

Elektrifierade fartyg i operation och i orderbok

Status ● I operation ● I orderbok

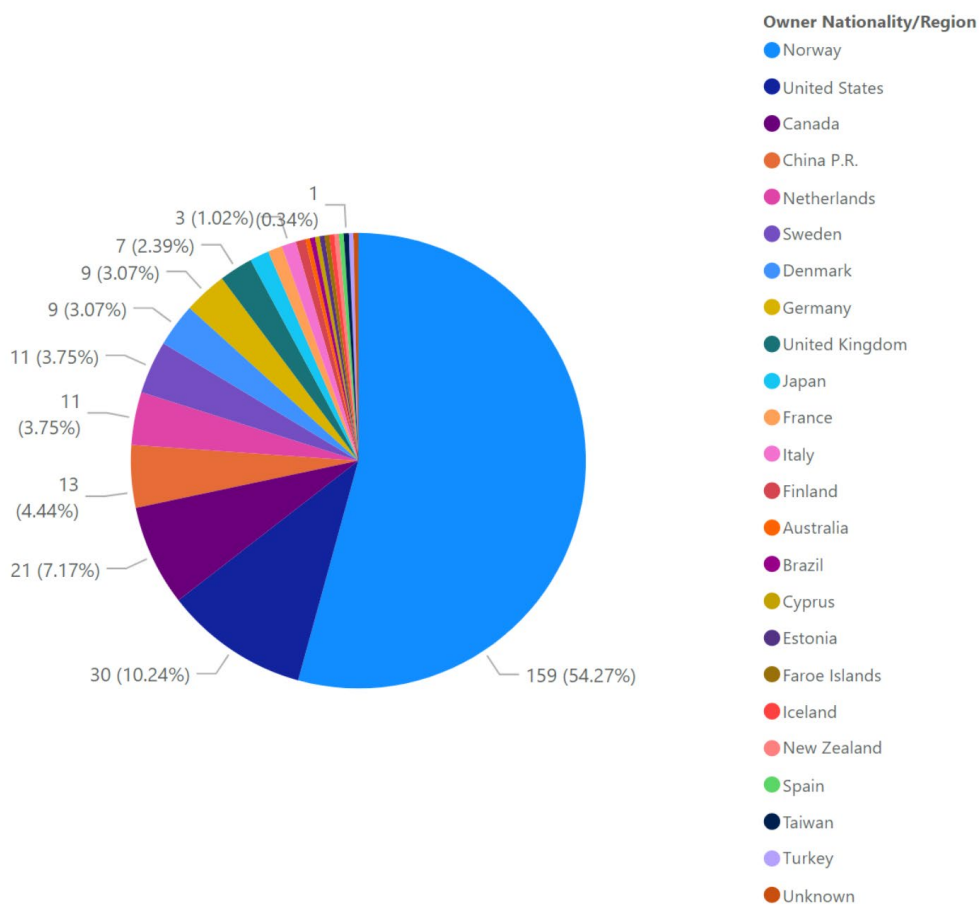


Figur 21 – Antal elektrifierade fartyg i service eller i orderbok (ur Clarkson WFR). Data från juni 2022.

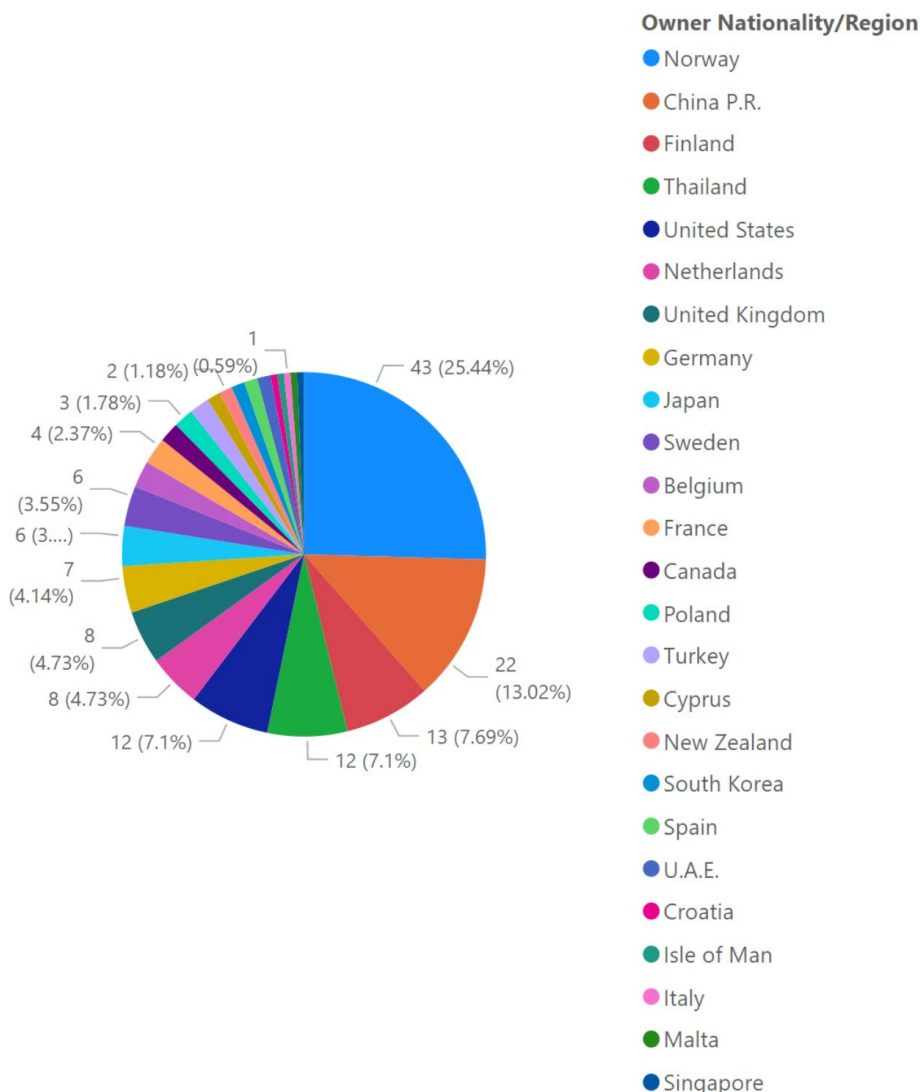
Norge dominerar vad gäller ägarskap av elektrifierade fartyg, både fartyg som redan är i trafik och beställda, vilket illustreras i Figur 21 och Figur 22. I den senare kan dock ses hur länder som USA och Kina också utökar sina flottor. Fortsatt stor tillväxt i flottans storlek kan ses i de flesta länder. Exempelvis Norge med 43 fartyg i orderbok jämfört med 202 fartyg i operation (dvs +20% fartyg), Kina (+62%), Finland⁴⁴ (87%), Thailand (+100%).⁴⁵

⁴⁴ Alla utom en av de finska är de hybrid-bulkfartyg som beställts av A2B@C, som är dotterbolag till finska ESL Shipping OY, varför de hamnar under Finland.

⁴⁵ Antalet elektrifierade fartyg skiljer sig mot Figur 20 på grund av olika tillfällen för hämtningar av data i fartygsregistren.



Figur 22 – Antal elektrifiserede fartøjer i operation opdelt på egnethed (ur Clarkson WFR). Data fra juni 2022.

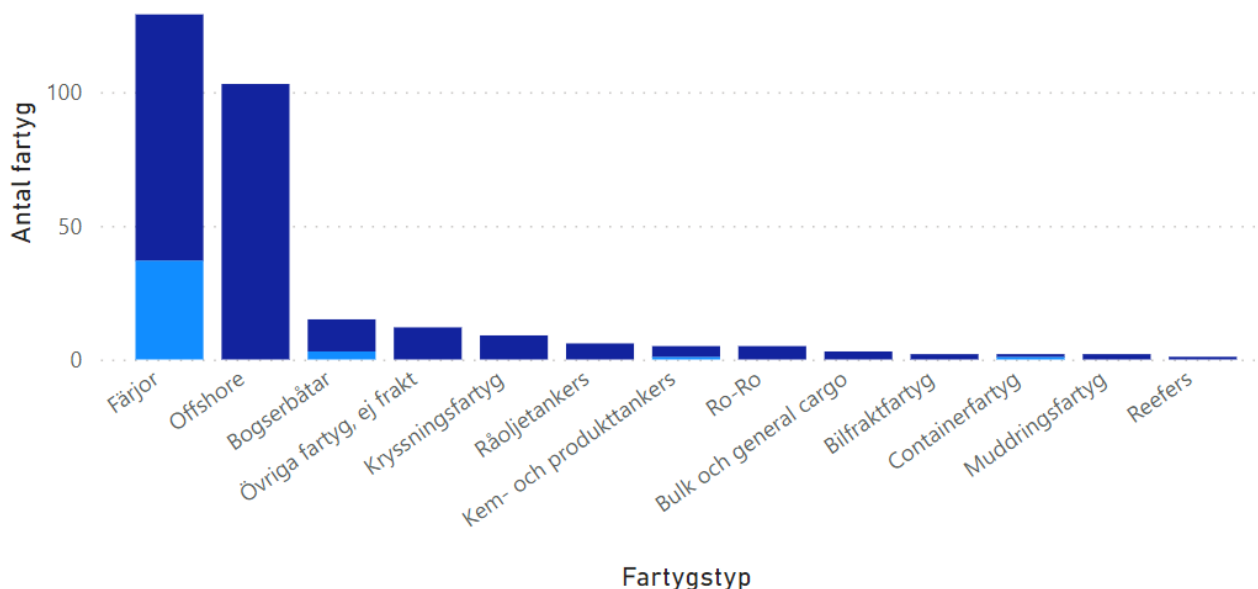


Figur 23 – Antal elektrifierade fartyg i orderböcker, uppdelade per ägarland (ur Clarkson WFR). Data från juni 2022.

I Figur 24 nedan ses samma fartyg i operation som ovan, men uppdelade på fartygstyper. Här kan ses att de dominerande elektrifierade marknadssegmenten av fartyg i operation är färjor och offshore. Förklaringen gavs ovan i beskrivningen av marknadsutvecklingen i Norge: en kombination av att köpare (kommuner, stat och företag) ställde krav i offentliga upphandlingar respektive i förhandlingar om eldrift; tillsammans med statliga investeringsprogram och villiga aktörer. Dessa typer av fartyg har traditionellt ofta diesel-elektriska system. Elektrifiering sker då som beskrivits ovan genom att byta ut en eller flera dieselmaskiner mot batterier. Sådana hybridfartyg benämns i figuren som "batteries and diesel". En mindre del av dessa benämns som "batteries propulsion" vilket innebär att de är helt elektrifierade. Några fartyg är både listade i orderboken som "diesel-electric" samtidigt som det är registrerat att de ska vara utrustade med batterier för propulsion, och bör därför betraktas som "batteries and diesel".

Elektrifierade fartyg i operation

Typ av elektrifiering ● Batteri för framdrivning ● Batterihybrider



Figur 24 – Elektrifierade fartyg i operation, uppdelade i fartygstyp och även typ av elektrifiering (ur Clarkson WFR). Data från juni 2022.

På kort sikt förväntas tillgången på elektrifierade fartyg fortsatt öka inom färjor och offshore, vilket visas i Figur 25 nedan.⁴⁶ I orderböckerna finns nämligen tillväxt framförallt i dessa segment. Men där återfinns även nya marknader, framförallt general cargo, PCC ("pure car carrier")⁴⁷, bogserbåtar ("tugs") och produkttankers. För general cargo kan särskilt nämnas att merparten består av en order på en serie fartyg från det svensk-finska rederiet A2B@C.⁴⁸ I huvudsak är dessa hybridfartyg, men allt fler av färjorna är helt elektrifierade. Även merparten av elektrifierade bogserbåtar är helelektriska.

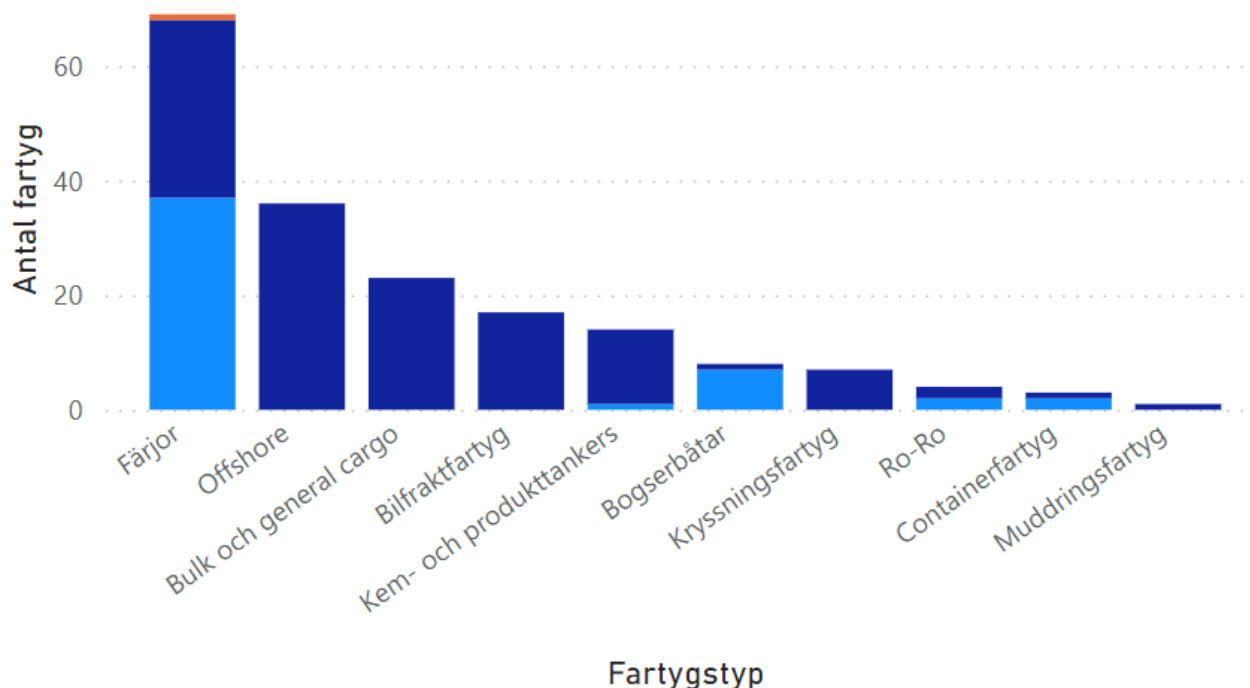
⁴⁶ Äve här skiljer sig antalet elektrifierade fartyg mot Figur 20 på grund av olika tillfällen för hämtningar av data i fartygsregistren.

⁴⁷ PCC tillhör kategorin RoRo-fartyg, men hanterar bara bilar. En PCTC hanterar även lastbilar ("Pure Car and Truck Carrier").

⁴⁸ [Next generation hybrid coasters. Coming in 2023 | AtoB@C Shipping \(atobc.se\)](https://www.atobc.se)

Elektrifierade fartyg i orderbok

Typ av elektrifiering ● Batteri för framdrivning ● Batterihybrider ● Bränsleceller och batteri



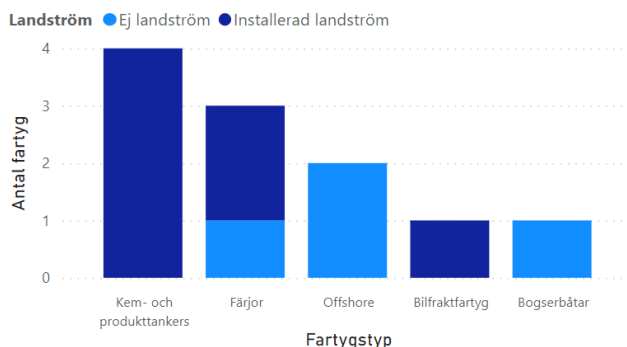
Figur 25 – Elektrifierade fartyg i orderbok, uppdelade i fartygstyp och typ av elektrifiering (ur Clarkson WFR). Data från juni 2022.

4.3 Marknadsutveckling i Sverige på kort sikt

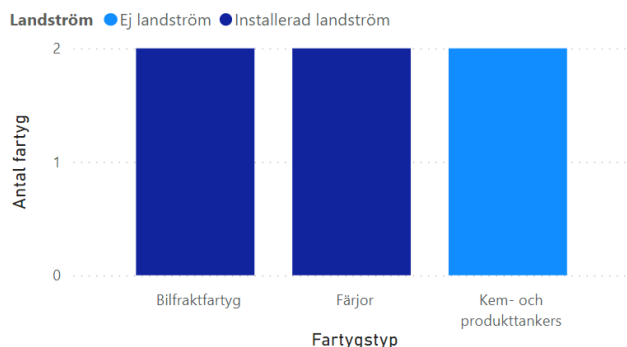
I fartygsregister kan även ses vilka företag som äger fartygen, och i vilket land dessa företag är registrerade. Vad gäller fartyg ägda av svenska företag⁴⁹, finns 11 elektrifierade fartyg registrerade, med ytterligare 6 fartyg i orderbok. Dessa är alla av kategorin "batteries & diesel" och inte "batteries propulsion". Både fartyg som är nybyggda och konverterade till elektrisk drift kan nämligen fortfarande ha dieselmaskineri, för redundans. I Figur 26 nedan ses detta i kombination med vilka som är utrustade med landström (HVSC Status: Fitted, i mörkblått).

⁴⁹ Detta underskattar antalet fartyg. Rederier baserade i Sverige kan ha sina fartyg ägda i bolag i andra länder.

Elektrifierade fartyg i operation, svenskt ägande



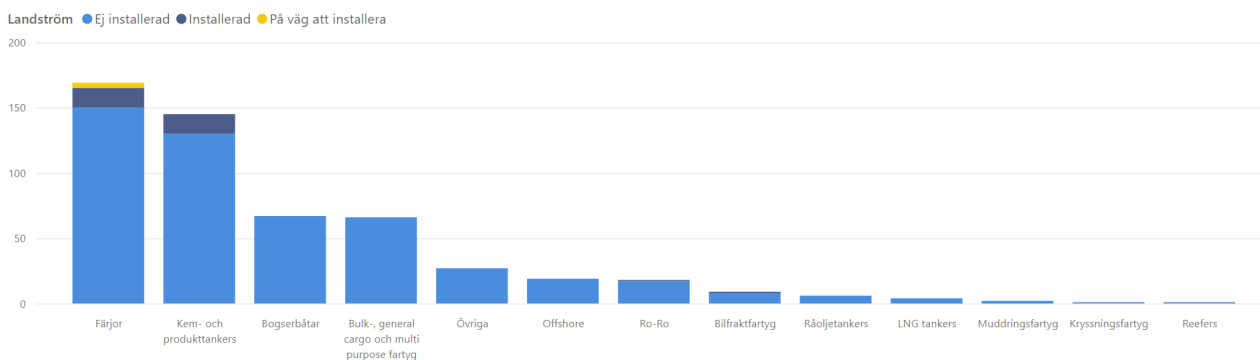
Elektrifierade fartyg i orderbok, svenskt ägande



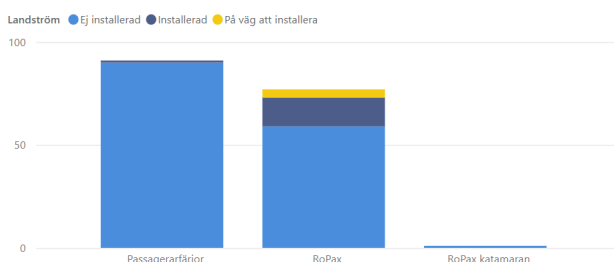
Figur 26 – Elektrifierade fartyg med svenska ägare (ur Clarkson WFR) och status för landström (mörkblått indikerar installerad landström). Data från juni 2022.

I registren kan alltså ses om fartyg är utrustade med landström. För svenskägda fartyg har landströmsanslutningar huvudsakligen registrerats för "ferries" och "chemical tankers". I Figur 27 nedan ses alla fartyg registrerade som ägda i Sverige och vilka som är utrustade med landström.

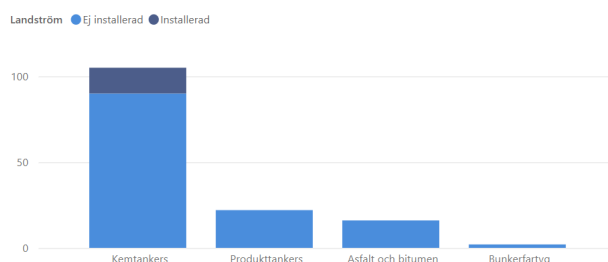
Landströmsinstallationer i svenskägda fartyg



Landström i svenskägda färjor



Landström i svenskägda kem- och produkttankers

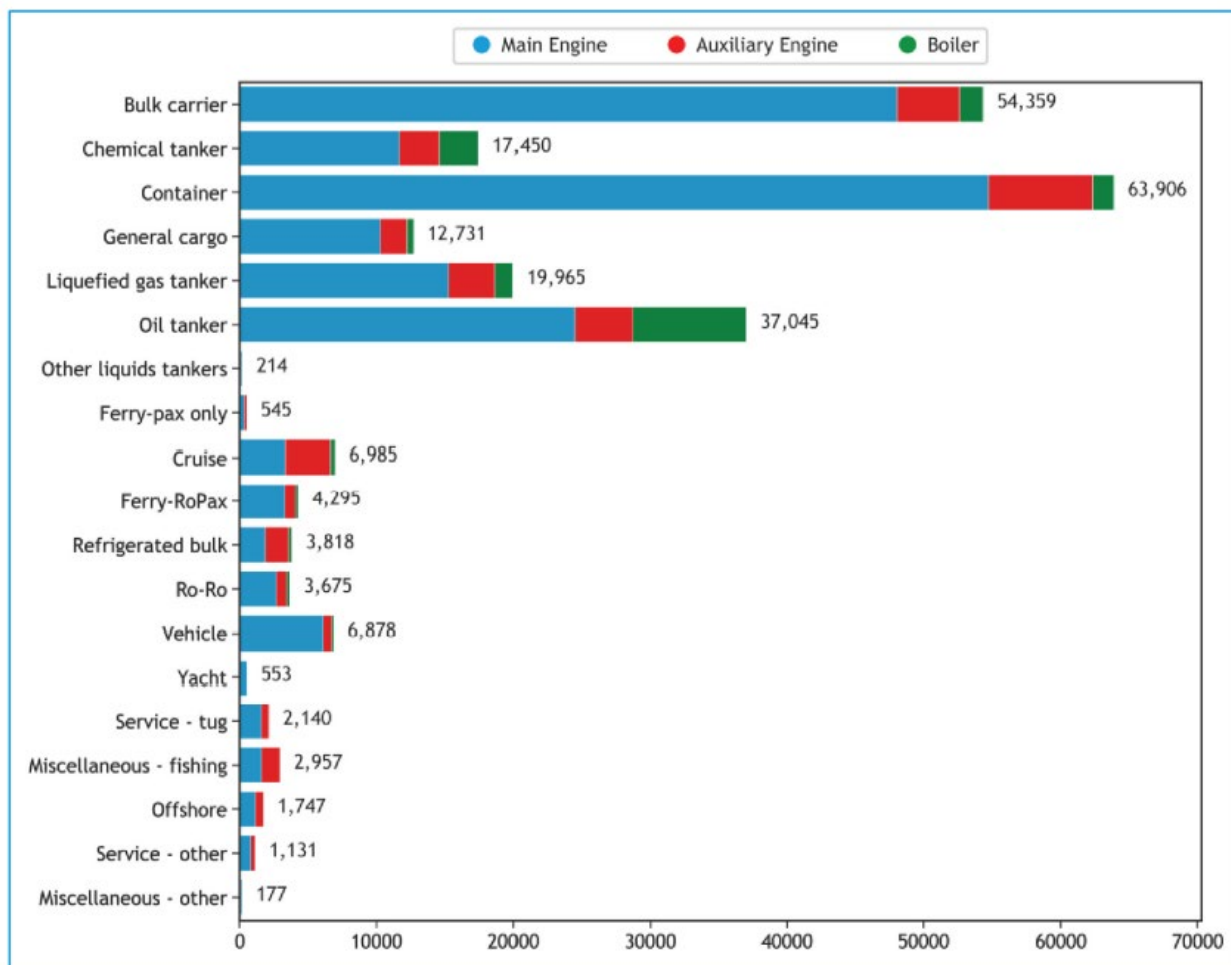


Figur 27 – Landströmsanslutningar i svenskägda fartyg (ovan). Detaljerade fartygstyper inom kategorierna "ferries" och "chemical tankers" (nedan) (ur Clarkson WFR). Data från juni 2022.

4.4 Marknadspotential på längre sikt

För att bestämma marknaden på längre sikt har en AIS-analys av fartygstrafik till och från Sverige genomförts. Syftet har varit att identifiera vilka fartygssegment som har störst potential till elektrifiering. I samband med analysen beräknas även koldioxidutsläpp från den här sjöfarten. Idag redovisas växthusgasutsläpp från sjöfarten bara för inrikes trafik baserat på AIS-analys, medan utsläpp från internationell trafik redovisas baserat på försäljning av bunker.

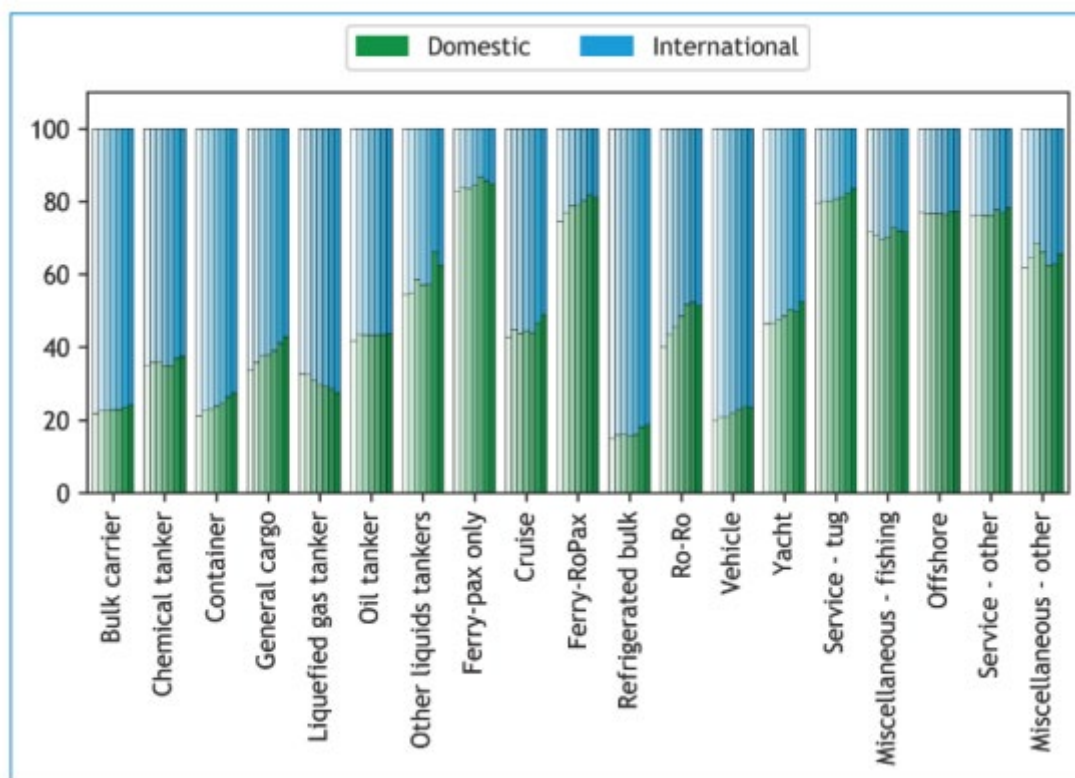
Internationellt sett har segmenten container, torrbulk och oljetankers störst energianvändning och därmed utsläpp. Data ur den fjärde IMO GHG studien⁵⁰ visar detta i Figur 28 nedan.



Figur 28 – Energianvändning i tusen ton heavy fuel oil (HFO)-ekvivalenter per segment från IMO 4th GHG study (Faber et al. 2020, s. 8), uppdelad i huvudmaskin ("main engine"), hjälpmaskin ("auxiliary engine") samt oljepanna ("boiler", för uppvärmning).

Dessa fartygssegment består mestadels av fartyg i internationell trafik (längre avstånd), där elektrifiering framförallt kommer att handla om elektrobränslen snarare än batterier. Batterier har dock en viktig plats i fartygs energisystem genom att bidra till förbättrad energieffektivitet. En uppdelning av fartyg i storlekskategorier och tid i nationell respektive internationell trafik kan ses i Figur 29 nedan:

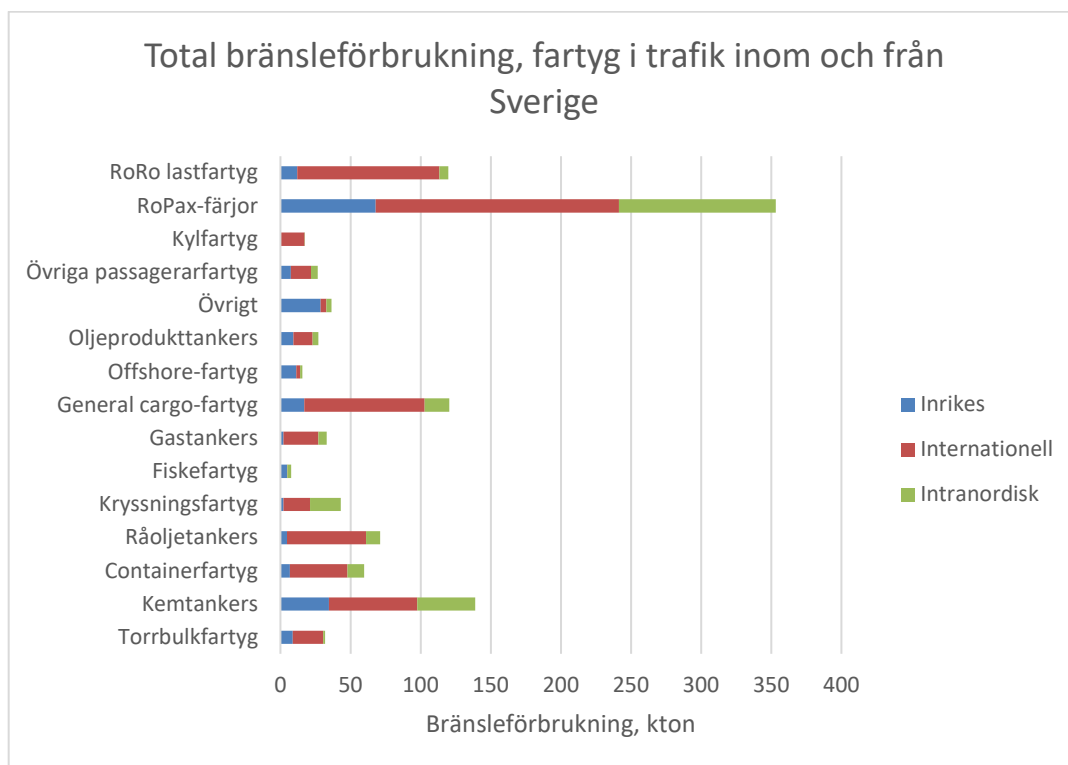
⁵⁰ IMO 4th GHG study (Faber et al. 2020).



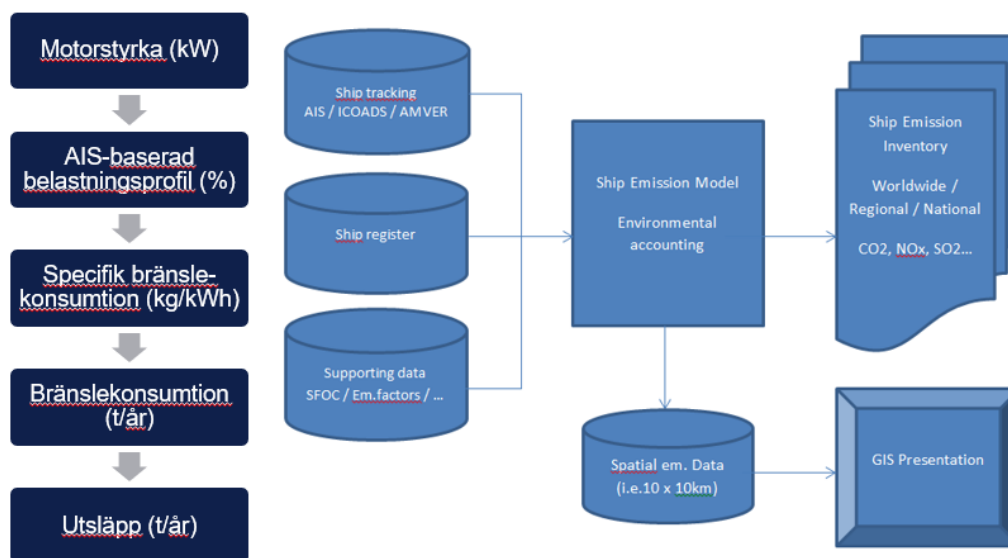
Figur 29 – Andel tid som olika fartygstyper är i internationell respektive nationell trafik (ur IMO 4th GHG study Faber et al., 2020, s. 102)

AIS-analysen som gjorts i detta projekt visar en helt annan fördelning av fartyg för svensk trafik. All data som används är från 2019, för att undvika effekterna av COVID. AIS-data från alla fartyg som anlöper en svensk hamn under året sorteras in i rutter, och kategoriseras efter om ruten är mellan svenska hamnar (inrikes), mellan en svensk och en nordisk hamn (intranordisk) eller mellan en svensk och en hamn utanför Norden (internationell). En begränsning blir därmed att för fartyg som går i trafik på flera hamnar blir endast seglingen till den första hamnen registrerad som rutt. Resultaten visas i Figur 30.

Varje fartyg identifieras med sitt IMO-nummer varefter teknisk data kan inhämtas från internationella register. På basis av den tekniska datan och annan kunskap kan en prestandamodell för varje fartyg skapas, som beskriver exempelvis energianvändning för ett visst fartyg vid en viss fart. På så sätt kan sådant som bränsleförbrukning för varje enskild rutt beräknas, eller energibehovet i hamn. Det övergripande flödet beskrivs i nedan Figur 32.



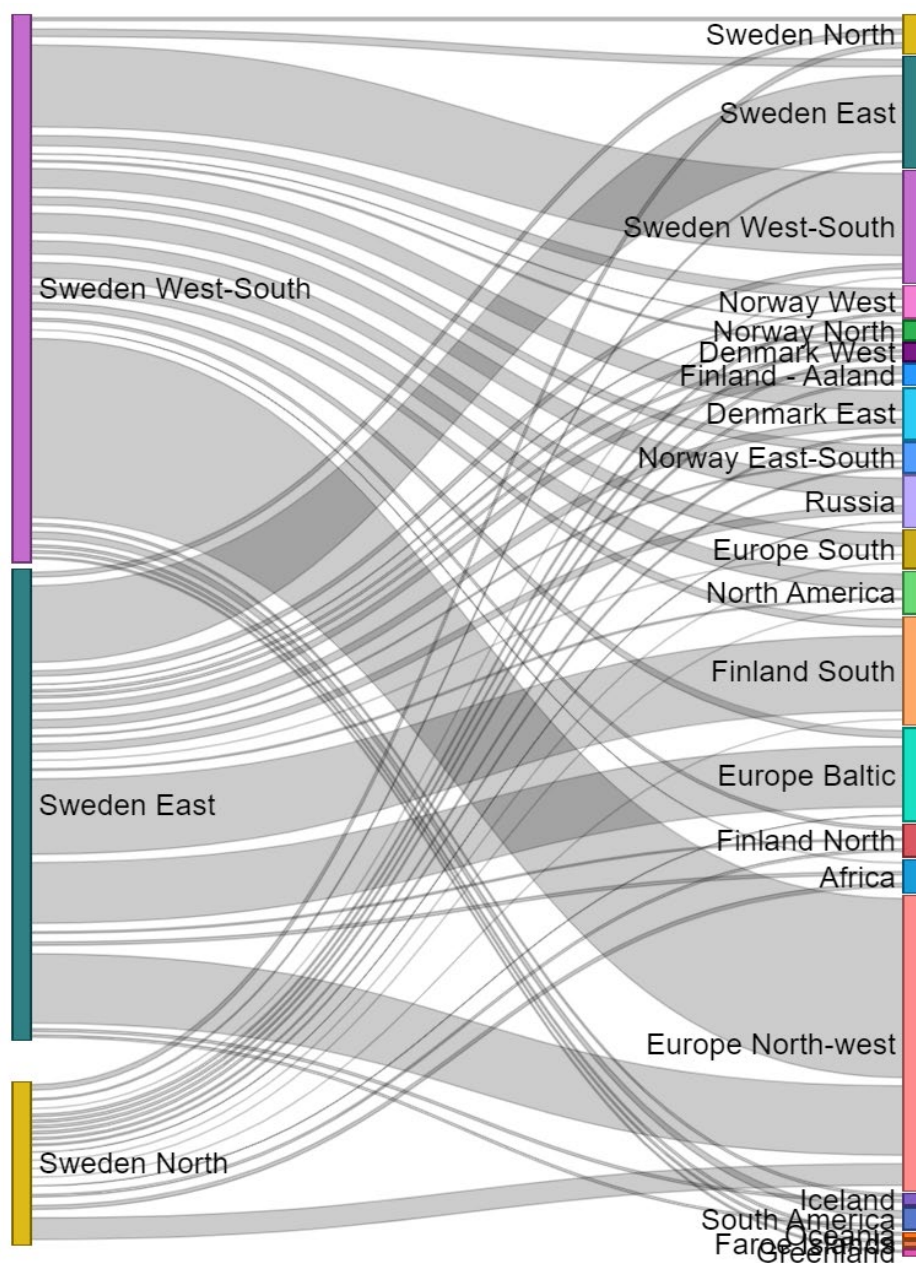
Figur 30 – Total beräknad bränsleförbrukning (tusen ton) för fartyg i trafik inom, till eller från Sverige



Figur 31 – Övergripande flödesscheman för DNVs MASTER-modell för beräkning av bränslekonsumtion och emissioner via AIS-data

Det är främst inom de två grupperna inrikes och intranordisk trafik där vi kan förvänta oss kunna identifiera marknader för helelektriska fartyg, eller där hybriddrift får stor inverkan eftersom resorna inte är så långa varför de kan ladda ofta. Färjetrafiken (RoRo och RoPax) som största sammanlagda segment i Sverige går typiskt i linjetrafik vilket underlättar när det handlar om att bygga upp ny infrastruktur.

Figur 32 visar fördelningen av energianvändning för trafik från svenska hamnar, fördelat i områden Sweden West-South (från norska gränsen till och med Ystad), Sweden East (öster om Ystad till och med Gävle) samt Sweden North (norr om Gävle). Här kan ses att den överväldigande energianvändningen är för fartygstrafik inom Sverige eller mellan Sverige och närliggande områden (norra och nord-västra Europa, Norden samt Baltikum).



Figur 32 – Fördelning av energianvändning på trafik från Sverige, beräkningar på 2019 års AIS-data.

I Figur 33 till Figur 36 ser vi i stället samma energianvändning i ett histogram efter seglad sträcka respektive energimängd. Fartygen är grupperade som följer:

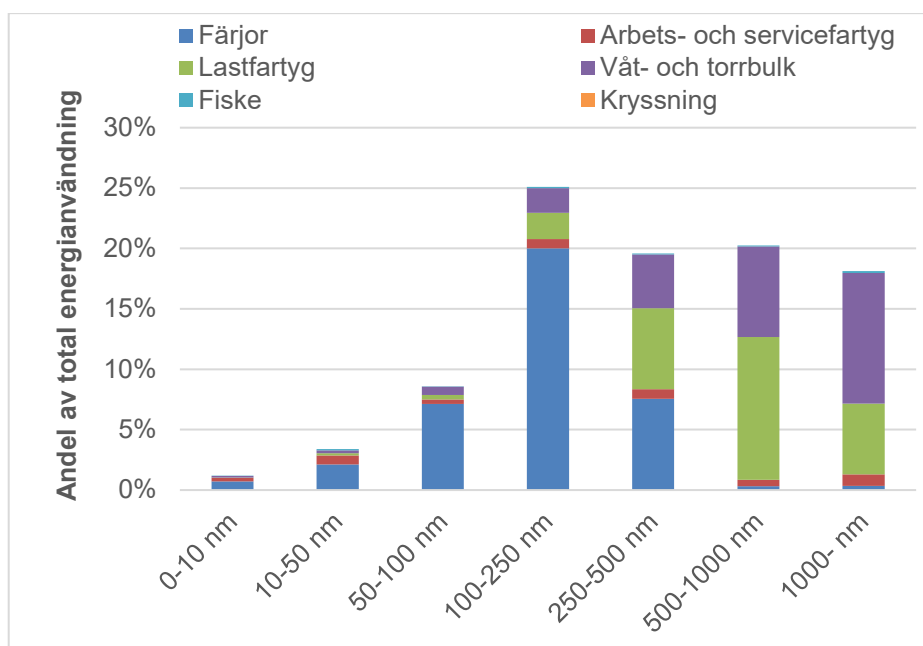
- Färjor: Ro-Pax färjor, passagerarfärjor, höghastighetsfärjor

- Lastfartyg: Ro-ro lastfartyg, kylfartyg, containerfartyg, general cargo-fartyg
- Våt- och torrbulk: Produkttankers, gastankers, kemtankers, torrbulkfartyg
- Fiske: Fiskefartyg
- Kryssning: Kryssningsfartyg
- Arbets- och servicefartyg: Offshore supply-fartyg, arbetsbåtar, forskningsfartyg, aquakultur.

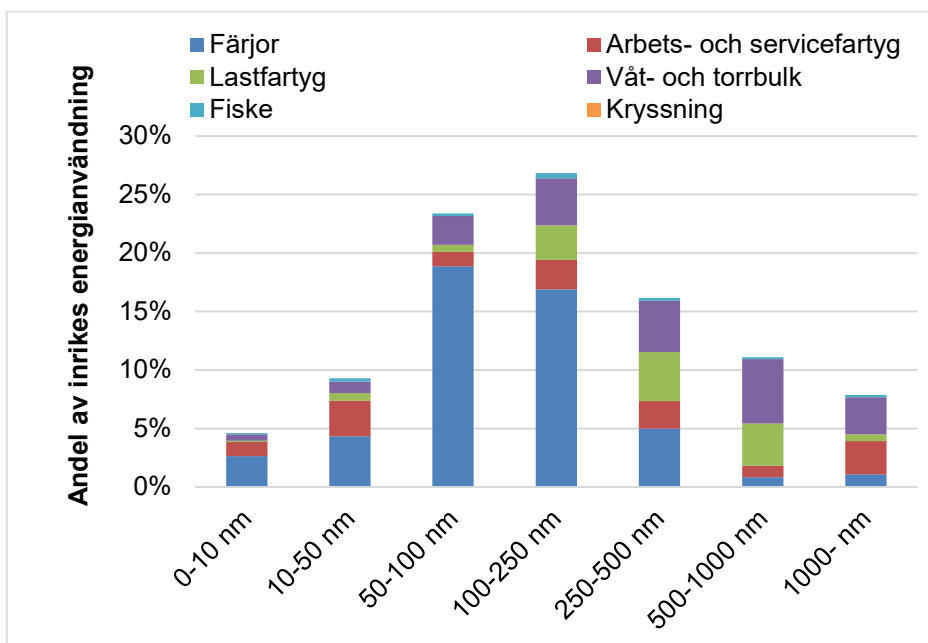
Energianvändningen per enkel resa gäller energin levererade från motorer ombord till framdriften och inte energiinnehåll i bränslet. Detta är för att mer rättframt kunna jämföra med batteriers möjligheter till att driva fartyget, där man kan räkna med ungefär 80% effektivitet (så att om ett fartyg behöver 100 MWh energi för en viss rutt, krävs $100 / 0.8 = 125$ MWh laddad el). Det blir tydligt i **Error! Reference source not found.** att det rör sig om stora energimängder. Exempelvis är ett av de största batterierna idag på ett kryssningsfartyg runt 10 MWh. De flesta resorna kräver större energimängder än så: hälften av den totala energianvändningen för inrikes resor är för resor som kräver mellan 100 och 500 MWh.

Detta sätt att beräkna potentialen för elektrifiering innebär alltid en underskattning för den verkliga potentialen, eftersom möjligheter till effektivisering inte tagits i beaktande. Analysen visar att ett visst transportbehov idag uppfylls av fartyg som kräver ett visst energibehov, men berör inte om det är möjligt att uppfylla transportbehovet på ett mer effektivt sätt. Exempelvis genom att gå långsammare, använda segelteknik, ta mer last på ett större fartyg. Analysen berör heller inte möjligheterna att flytta över gods från land till sjö, vilket varit fallet för flera helelektrifierade containerfartyg i Norge (se avsnitt 4.4.1.2 nedan).

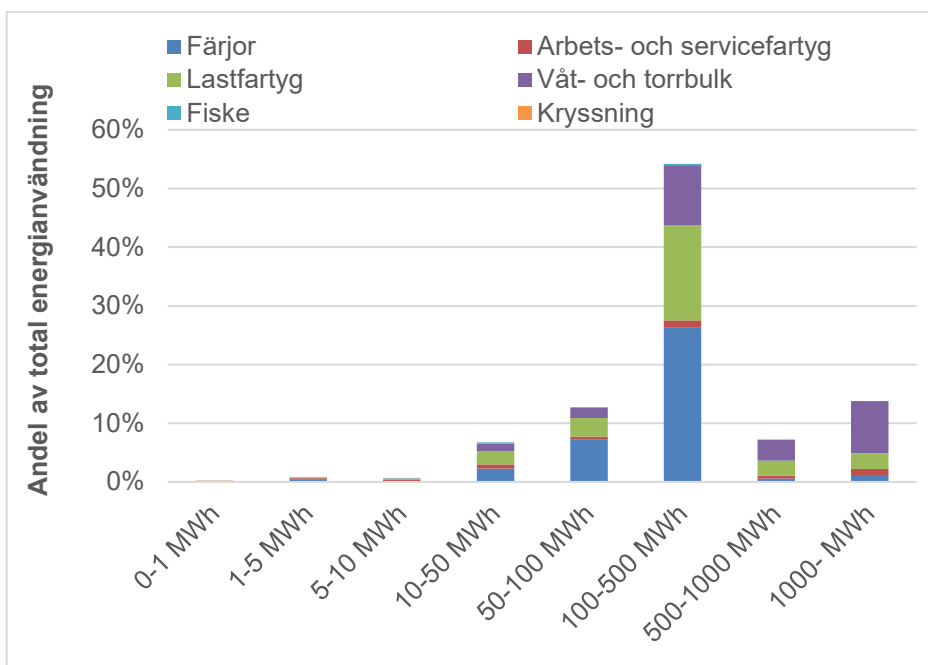
Det ska också sägas att AIS-analysen har på grund av tidsupplösningen inbyggda osäkerheter vad gäller att fånga upp kortare turer, särskilt för exempelvis små passagerarfartyg där enskilda korta anlöp vid kajer kan missas. Därför kan andelen korta turer med mindre energibehov vara underskattad (mer om detta i avsnitt 4.4.1.1). Emellertid är de långa turerna med större fartyg dominerande för den totala energianvändningen för flottan, varför fördelningen i figurerna är representativa för den faktiska situationen.



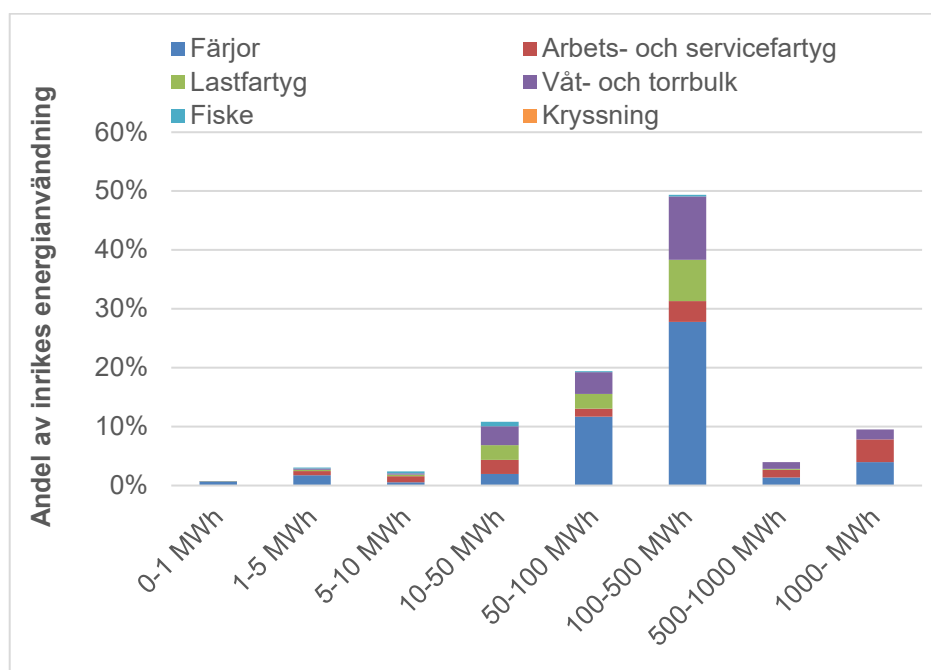
Figur 33 – Andel av total energianvändning fördelad mellan seglingsdistanser och fartygskategorier för alla seglingar från Sverige, baserat på 2019 års data.



Figur 34 – Andel av total energianvändning fördelad mellan seglingsdistanser och fartygskategorier för inrikes trafik, baserat på 2019 års data



Figur 35 – Andel av total energianvändning fördelad mellan energibehov och fartygskategorier för alla seglingar från Sverige, baserat på 2019 års trafik.



Figur 36 – Andel av total energianvändning fördelad mellan energibehov och fartygskategorier för inrikes trafik, baserat på 2019 års trafik.

4.4.1 Värdering av teknisk potential för elektrifiering i olika segment

I det här delavsnittet beskrivs elektrifiering inom ett antal olika segment av särskild relevans för Sverige (se avsnitt 4.3). Det gäller segment där svenskt ägande av fartyg är stort, och segment som går mycket på svenska hamnar. För båda dessa kategorier kan rådigheten vara större för svenska initiativ, exempelvis via investeringsstöd, hamn- och/eller farledsavgifter.

4.4.1.1 Färjor (RoPax och andra passagerarfartyg)

Passagerarfärjor är, som beskrivits tidigare, ett viktigt maritimt segment i elektrifieringen av sjöfarten. Energinvändningen per fartygstyp redovisades i Figur 32 ovan. För färjor summerar det till 388 000 ton bränsle (motsvarande ungefär 1.24 miljoner ton CO₂, antaget MGO som bränsle med 3.206 ton koldioxid per ton bränsle) för 2019. Färjor byggs ofta med diesel-elektrisk drift, varför fartyg byggts eller konverterats till hybriddrift med ett eller flera installerade batteripaket. Batteridrift blir vanligare, och även bränsleceller börjar nu introduceras för sträckor där batteridrift inte räcker till. Det faktum att färjor går på linjetrafik till särskilda kajplatser gör dem särskilt lämpliga eftersom det går att planera infrastrukturen i land efter varje fartyg. En viktig drivkraft bakom elektrifiering i detta segment är att färjetrafik särskilt på kortare rutter är upphandlad eller bedrivs med statligt stöd, vilket gör det möjligt för det allmänna att styra utvecklingen. I Sverige gäller det exempel väg färjetrafiken och mycket av kollektiv- eller skärgårdstrafiken, men även större fartyg såsom Gotlandstrafiken.

Utmaningar för färjors elektrifiering särskilt för batterier finns då rutterna blir längre, går ut till platser där möjligheterna till att bygga ut laddning saknas (exempelvis långt ut i skärgårdar), och när tid i hamn är kort. Men belastningen på elnätet skulle kunna bli för stor även på platser med kraftiga elnät, när det handlar om större RoPax-fartyg.

Det finns ingen generell regel för vilka fartyg eller rutter som är tekniskt möjliga att helt elektrifiera. Distans, fart och motorstyrka (effekt) bestämmer energibehovet för en segling. Därutöver kan den

fysiska omgivningen påverka, exempelvis om fartyget går i områden med starka strömmar eller i is. Belastningen på batteriet (bland annat hur många gånger det laddas under sin livstid, effekten det laddas med, hur mycket energi som det laddas med varje gång) påverkar också hur stort batteri som behövs. Många färjor som lägger till tiotals gånger varje dag kan bara använda en liten del av installerad batterikapacitet, för att bevara batteriets livslängd. Därför har batterifärjor i Norge enligt DNVs erfarenhet typiskt 5-10 gånger större batteri än energibehovet varje gång det laddas.

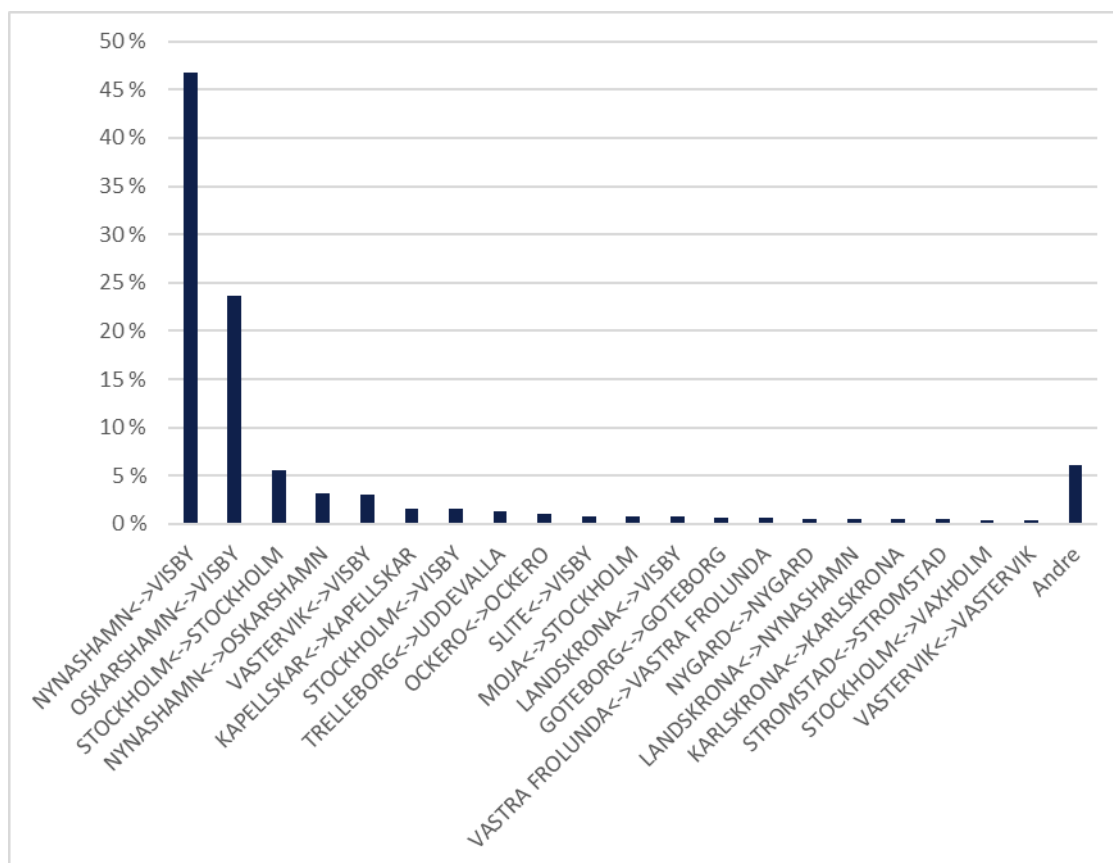
Exempel: en medelstor färja har ett energibehov på 300 kWh för en halvtimmes överfart, men kan ha en installerad batterieffekt om hela 2 000 kWh.

För fartyg med andra typer av belastningar, som exempelvis hybridfärjor, kan en större del av installerad batterikapacitet utnyttjas. I hybridkonfigurationer fyller dock även batteriet andra funktioner, såsom redundant kapacitet av säkerhetsskäl, varför man därför inte vill använda hela batteriets kapacitet.

I tillägg till batteristorlek, är laddeffekt och behov av laddinfrastruktur med och bestämmer vad som kan elektrifieras. Ofta kommer laddeffektbehovet vara en större barriär än att kunna installera batteri av tillräcklig storlek ombord. Laddtid vid kaj (som bestämmer den laddeffekt som behövs) är därför också ett viktigt villkor. I Norge är den längsta överfarten som elektrifierats på ungefär en timme, men detta är inte en fix gräns. En annan överfart om 40 minuter (över 20 km och i hög hastighet) gick inte alls att elektrifiera eftersom laddbehovet blev på tiotals MW (högsta effekt för existerande laddsystem för dessa har en effekt runt 10 MW). Linjen mellan Bodø-Moskenes över Vestfjorden i norra Norge har en 95 km överfart om 3 timmar. Upphandlingen av den trafiken ställde därför krav på vätgasdrift, som beskrivits ovan. Ibland förekommer i analyser att man fastställer en viss sträcka som kan elektrifieras, exempelvis 100 km (VTI, 2021) eller 100 nm (UMAS, 2022), men detaljerad analys av det faktiska energibehovet och möjligheterna till laddning krävs.

Oavsett ovan kommer också ekonomiska utvärderingar för en enskild rutten vara avgörande för om den värderas som möjlig att elektrifiera. Här kan investeringar i nätuppgradering och laddinfrastruktur vara mer dominerande än batterisystemets investeringskostnad.

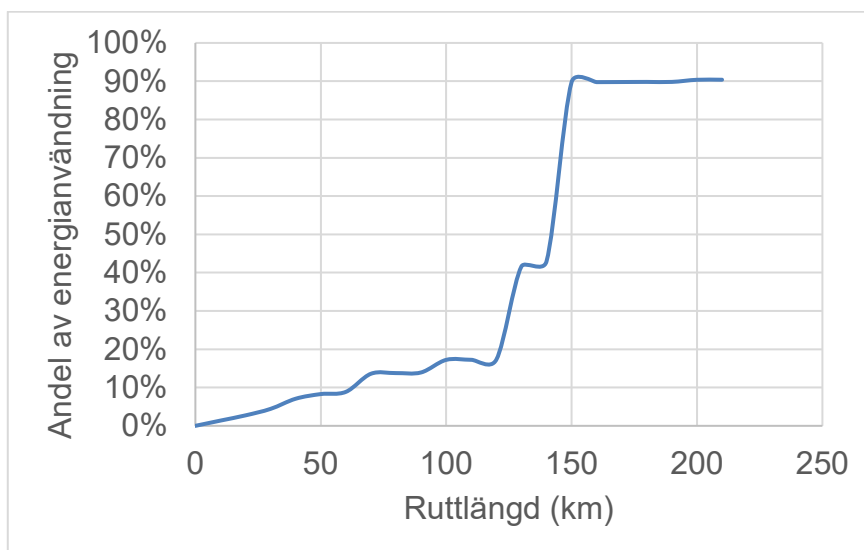
I figurerna som följer beskrivs energianvändningen hos RoPax-färjor och annan passagerartrafik i inrikes trafik. Estimerad energianvändning för Ro-pax och annan passagerartrafik i inrikes trafik under 2019 är runt 68 000 ton bränsle, där RoPax-färjorna står för ungefär 85% av energianvändningen. Runt 85% av totalen blir fördelat på de 10 rutterna med högst energianvändning. Figur 37 visar topp 20 rutter ordnade efter total årlig energianvändning. Här innebär rutter med namn som Stockholm-Stockholm att det är skärgårdstrafik som identifierats, där inte alla anlöp vid mindre kajer som blivit identifierats.



Figur 37 – Topp 20 rutter för Ro-Pax/passagerarfartyg i inrikes trafik 2019, ordnade efter total årlig bränsleförbrukning.

Bedömning av potentialen för elektrifiering genom distans eller energianvändning per rutt

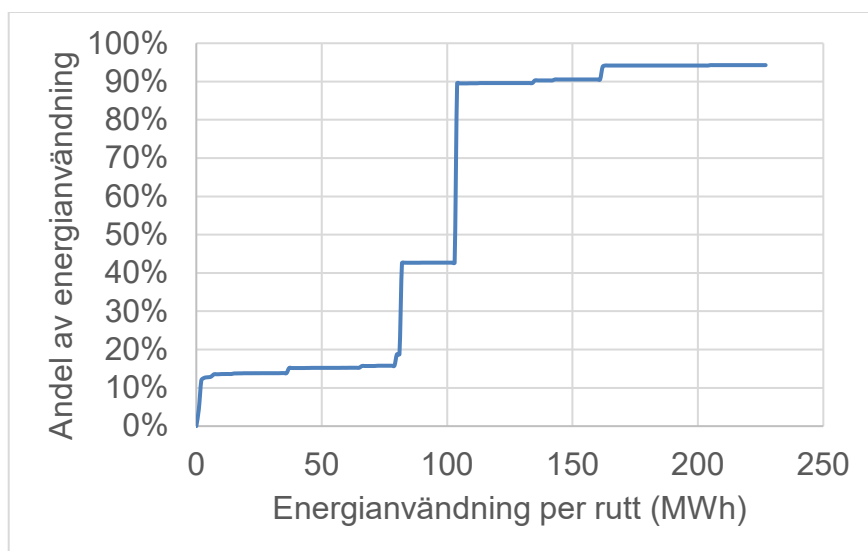
Figur 40 visar hur stor del av total årlig energianvändning inrikes för Ro-Pax och passagerarfartyg olika distanser står för. Om 100 km betraktas som ett kriterium för elektrifiering, kan runt 17% av energianvändningen helt elektrifieras, eftersom figuren visar att 17% av totala energianvändningen gäller fartyg i rutter under 100 km.



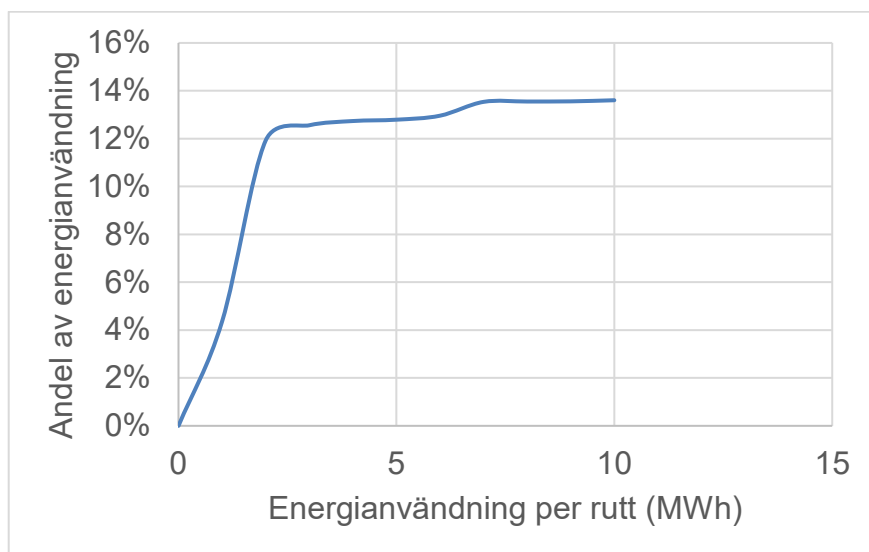
Figur 38 – Ackumulerad andel av förbrukning för rutter över given distans, år 2019

Men att bara använda 100 km är en förenkling. Utan att gå in i detaljstudier av varje rutt – vilket egentligen som beskrivits typiskt är nödvändigt, men ligger utanför ramarna för rapporten – kan ytterligare mätetal provas.

En närmare titt på energibehovet per rutt ges i Figur 40. Den stora andelen av energianvändning gäller rutter med energibehov från 70 MWh till strax över 100 MWh (vänster figur). De mindre energikrävande rutterna visas i Figur 40. Här är det 12% av turerna som har mindre än 2 MWh, medan det efter detta är ett "språng" till de mer energikrävande rutterna. Om 2 MWh används som ett kriterium (jämför ovan behov av att ha 5-10 ggr så stort batteri), innebär det 12% av energianvändningen är från turer som helt kan elektrifieras.



Figur 39 – Ackumulerat energibehov per rutt, antagligen överestimerat för mindre fartyg och/eller fartyg med kortare turer, år 2019



Figur 40 – Ackumulerat energibehov per rutt mindre än 10 MWh. antagligen överestimerat för mindre fartyg och/eller fartyg med kortare turer, år 2019

Bedömning av potentialen för elektrifiering via energianvändning över tid

Emellertid är AIS-baserade ruttanalyser något osäker för passagerarfartyg, både på grund av tidsupplösning (det fångar inte alltid upp korta anlöp vid kajer) och även att inte alla mindre kajer har blivit geografiskt definierade. Därför är trolig seglingslängd per tur och därmed även också energibehoven överskattade, särskilt för mindre fartyg som antagligen seglar rutter som inte korrekt kan identifieras. Skärgårdstrafik går typiskt rundturer på många kajer med mycket korta liggetider. I ett praktiskt projekt om att identifiera möjligheter för elektrifiering för ett visst skärgårdsområde eller rutt, krävs särskilda analyser. För att inte underskatta potentialen är det i sådana projekt viktigt att analysera existerande ruttplaner. Med en justerad plan, exempelvis med längre liggtider vid vissa kajer, kan rutterna anpassas efter laddbehovet och möjliggöra kostnadseffektiv elektrifiering.

Nedan görs därför också en alternativ analys med andra parametrar som inte innefattar individuella rutter (eftersom rutterna kunde bli felidentifierade för passagerarfartyg med korta rutter). Här analyseras då alla passagerarfartyg som är minst 75% av året i svensk ekonomisk zon (för att fånga in inrikes trafik men ändå tillåta att ett fartyg exempelvis gör en tur till ett varv i ett annat land ett år). Nästan alla fartyg är över 90% av tiden i svensk ekonomisk zon. De visas i Tabell 3 nedan:

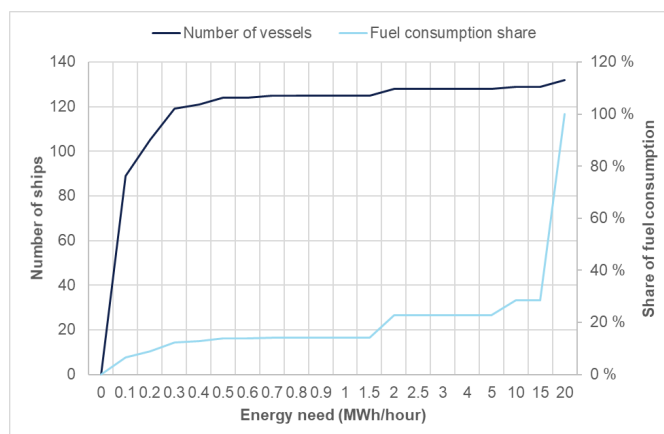
Tabell 3 – Passagerarfärjor i inrikestrafik, antal och storlek

Fartygsstorlek	Genomsnittlig längd (m)	Antal
50-100 GT	23	2
100-250 GT	29	66
250-500 GT	39	46

500-750 GT	34	6
750-1000 GT	66	7
1000-5000 GT	80	3
5000-10000 GT	125	3
10000-25000 GT	127	1
25000-50000 GT	197	3
Totalt		137

Vidare beräknas genomsnittlig energianvändning per timme, här från klockan 6-18 varje dag i juli, för att representera normal dagsdrift i högsäsongen för passagerarfartyg.

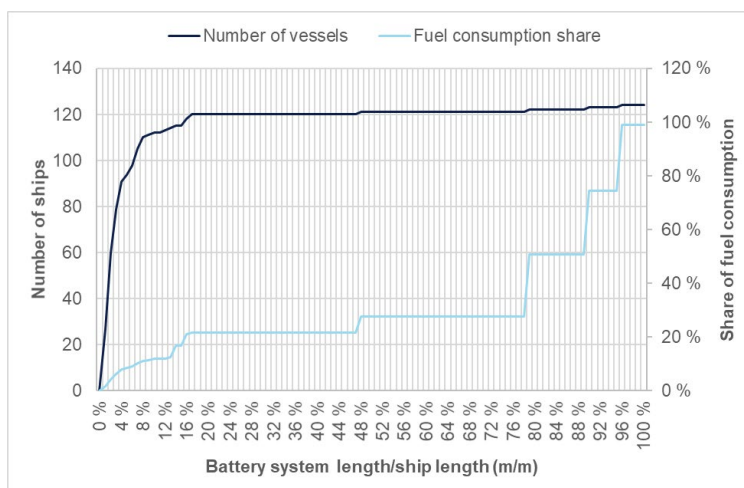
I nedan Figur 41 ses att om man kan tillgodose 0.3 MWh per timmar, så kan 120 fartyg elektrifieras. Detta är i huvudsak alla mindre passagerarfartyg. På axeln till höger i figuren ses att detta motsvarar under 20% av den totala energianvändningen för det här segmentet.



Figur 41 – Energianvändning per timme, sett till antalet fartyg (vänster axel) och andel av energianvändningen (höger axel)

För att kontrollera om denna batterikapacitet är rimlig i förhållande till fartygens storlek, antas att batterierna dimensioneras för en timmes drift, och med tre gånger större batteri än energibehovet per timme. I Figur 42 visas batterisystemets storlek i förhållande till fartygets längd.⁵¹ Det förefaller ej orimligt att alla 120 mindre fartyg kan utrustas med batterier.

⁵¹ <https://corvusenergy.com/products/energy-storage-solutions/corvus-orca-energy/>



Figur 42 – Batterisystemets storlek i förhållande till fartygets längd, sett till antalet fartyg (vänster axel) och andel av energianvändningen (höger axel). Källa/årtal

Sammanlagd bedömning

Baserat på ovan analys och de semi-kvantitativa värderingarna ovan antyder därför att potentialen motsvarar mellan 12% och 20% av energianvändningen av färjorna.

Elektrifiering av passagerarfärjor kan därför ses som en lågt hängande frukt, men sker inte av sig själv. För att realiseras krävs, som beskrivits ovan i avsnittet om Norge, hantering av investeringar både ombord och på land, detaljutvärderingar av rutter och områden för att dimensionera utrustning och batterier, en bra ansvarsfördelning för risker, bra anbudsprocesser och kontrakt med mera. Därutöver krävs en välfungerande process för godkännande av fartygen, vilket kommer beskrivas i avsnitt 5.1.

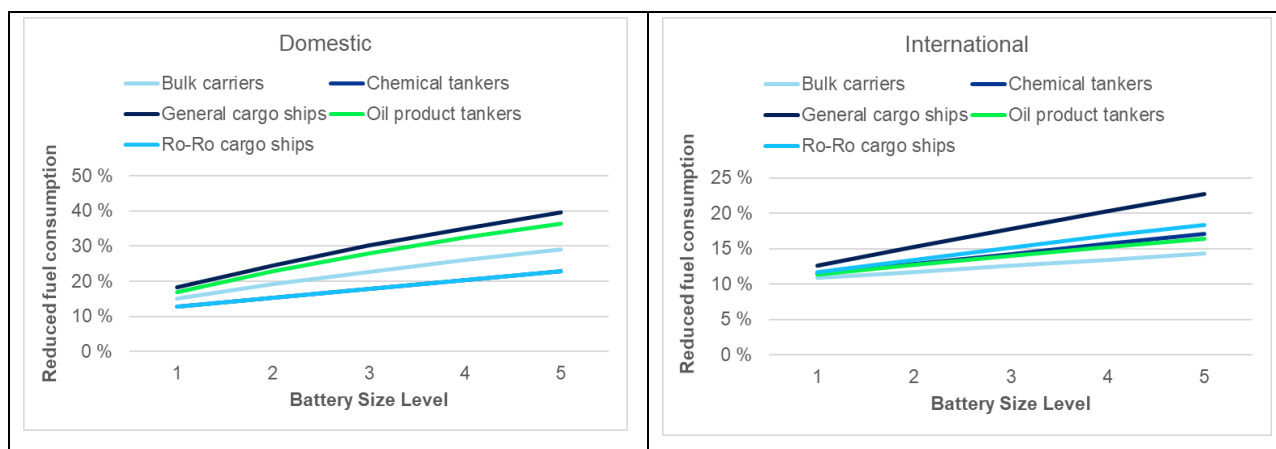
4.4.1.2 Fraktfartyg

Det är tydligt i ovan framställning i Figur 33 till Figur 36 av energibehovet att det för dagens trafikmönster endast är möjligt att helt elektrifiera fraktfartygen på ett fåtal rutter. Här betraktas därför ett hybridiseringsscenario, med mindre batterier installerade för att uppnå en energieffektiviserande effekt (här antas 10%). Det antas vidare att batterierna är kopplade till antingen ett dieselelektriskt maskineri eller att ström kan matas ut via en elmotor på propelleraxeln, exempelvis via växellåda. Scenarier av att öka batteristorleken 1 till 5 gånger utvärderas också. Grundscenariot är enligt tabell nedan:

Tabell 4 – Användbar batterikapacitet i ett hybridfartyg av olika storlekar

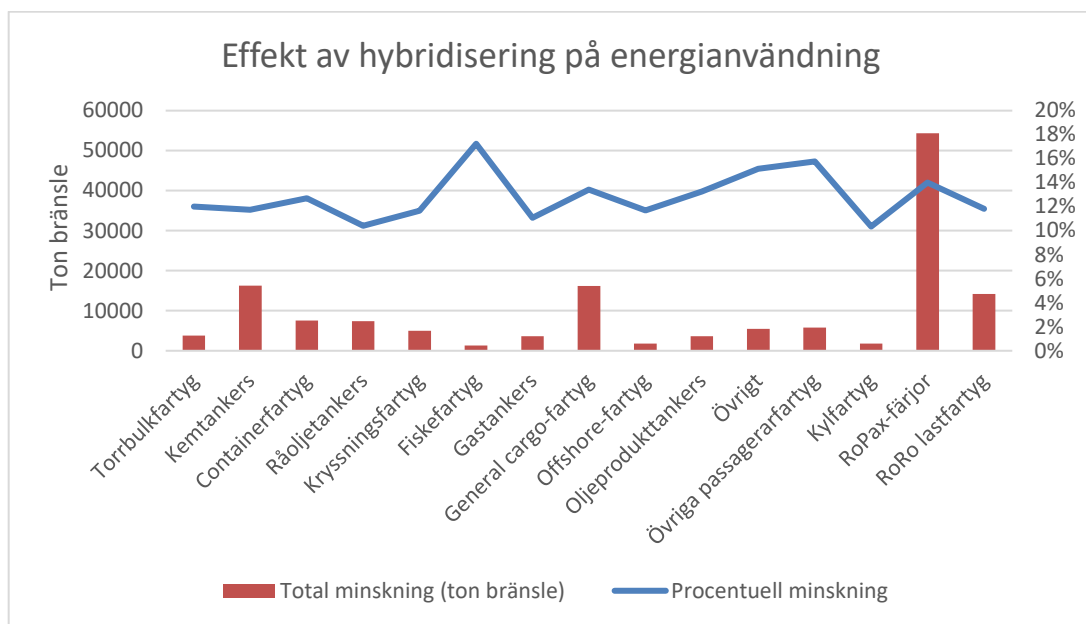
Fartygsstorlek (GT/brutto)	Batterikapacitet (MWh)
0-1000 GT	1
1000-5000 GT	2
5000-10000 GT	3
10000-25000 GT	5
25000-50000 GT	5
50000-100000 GT	5
100000- GT	5

Den beräknade resulterande minskningen i bränsleförbrukning kan ses i figur 38 nedan. Fartygen antas alltså förbruka den antagna tillgängliga batterikapaciteten för varje resa med bibehållen energieffektiviserande effekt. Resultatet blir en minskad bränsleförbrukning för inrikes trafik redan vid installation av mindre batterier. Effekten blir störst för general cargo fartyg, där nära 40% av bränsleförbrukningen kan minskas vid den största antagna storleken.



Figur 43 – Reduktionseffekt av olika batteristorlekar för olika fartygstyper i internationell (höger) och inrikes (vänster) trafik.

Den totala effekten av det scenario som listas i Tabell 3 visas i Figur 44 nedan. I ton bränsle summera scenariot till ungefär 148 000 ton, eller 13% av den totala energianvändningen, vilket med antagandet att det är MGO motsvarar ungefär 475 000 ton koldioxid.



Figur 44 – Effekt av hybridisering på total energianvändning, 2019

En detaljerad kostnadskalkyl har inte gjorts här. Men generellt kan sägas att kostnadseffektiviteten för ett rederi sjunker med ökad batteristorlek. Det är den stora vinsten av hybridisering på energieffektivitet som är viktig, och som man kan tillgodoräkna sig även vid liten batteriinstallation.

Det ska dock påpekas att i denna grupp av fartyg finns potential för helt elektrifierad drift via batterier under vissa villkor.

- I Norge finns företaget ASKO:s två batteri-elektriska färjor som trafikerar mellan Horten och Moss, en sträcka om 5 nautiska mil på en timme. Målet är att de ska kunna operera autonomt utan besättning ombord.⁵²
- Yara Birkeland är ett eldrivet containerfartyg om 120 TEU för kortsjöfart i Oslofjorden, byggt precis som ASKO:s färjor för att kunna segla autonomt.⁵³

Ovan existerade inte som sjörutter innan, utan var lastbilstrafik. I båda fall finns statligt investeringsstöd bakom.

- Företagen HeidelbergCement och Felleskjøpet Agri samarbetade om sjötransporter av torrbulkgods mellan två hamnar, vilket resulterade i ett fartygsprojekt som nu håller på att realiseras. Även detta har fått statligt investeringsstöd.⁵⁴

Dessa fartyg ovan har varit särskilt designade för ett visst transportarbete för en specifik transportköpare med kontrakt över lång tid. Just torrbulksfartyg hanterar annars laster från många transportköpare över tid, på kortare kontrakt, och går typiskt ej i linjetrafik utan trafikerar på olika hamnar efter behov.

⁵² <https://www.offshore-energy.biz/asko-maritime-names-two-fully-electric-autonomous-sea-drones/>

⁵³ <https://www.ship-technology.com/news/yara-christens-electric-autonomous-boxship/>

⁵⁴ <https://presse.enova.no/presreleases/the-worlds-first-hydrogen-powered-cargo-ship-receives-nok-104-million-in-support-from-enova-3173745>

4.4.2 Scenario för land- och laddström

Här används AIS-data till att analysera fartygens tid i hamnar. Genom att lägga samman effektbehovet för de fartyg som ligger i samma hamn samtidigt kan det totala effektbehovet uppskattas. I den här analysen inkluderas alla typer av fartyg, bortsett från de mindre passagerarfartygen med anledning av de skäl som redan diskuterats.

Effektbehovet för olika fartyg varierar kraftigt mellan olika fartygstyper och -storlekar. För kryssningsfartyg och passagerarfartyg kan effektbehovet variera mellan 0,1 MW för de minsta storlekarna till upp emot 10 MW för de allra största. För andra fartygstyper varierar det mellan 0,1 MW till typiskt 2-3 MW för de största, med stora variationer mellan typer.

Resultatet är ett samlat elbehov på runt 700 GWh per år för landström till samtliga fartygsanlöp i samtliga hamnar. Som beskrivits ovan estimerade IVL att den nuvarande försäljningen av landström uppgick till strax över 30 GWh.

I Tabell 5 nedan rankas hamnarna efter behovet av landström. Effektbehovet för landström domineras helt av stora kryssnings- och passagerarfartyg. När flera av dessa är samtidigt i hamn uppnås höga effekttoppar.

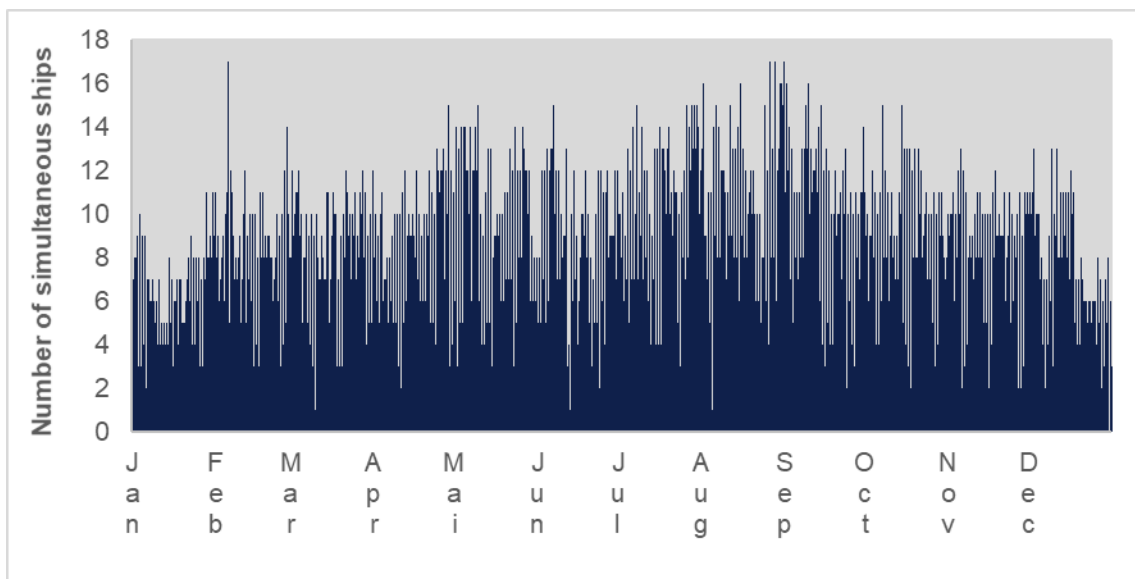
Till höger i tabellen ses också det beräknade behovet av laddström, efter det grundscenario som uppskattades ovan i avsnitt 4.4.1.2, och med antagandet att batterierna laddas fullt med nödvändig effekt vid varje hamnanlöp för att täcka så mycket som möjligt av energibehovet till turen. Samlat energibehov för detta är 175 GWh.

Generellt sett är det beräknade behovet av laddström lägre än det för landström, med undantag av några hamnar. Anledningen till den lägre effekten är att fartygen ofta ligger länge i hamn (ju längre tid desto lägre laddeffekt för att ladda klart). Därmed kräver typiskt en ganska låg laddeffekt för att kunna ladda ett batteri även för de största antagna batterierna om 5 MWh. Effektbehovet till landström är däremot konstant oavsett tiden i hamn, och kan vara 2-3 MW för generella fartygstyper och upp emot 10MW för de största passagerarfartygen.

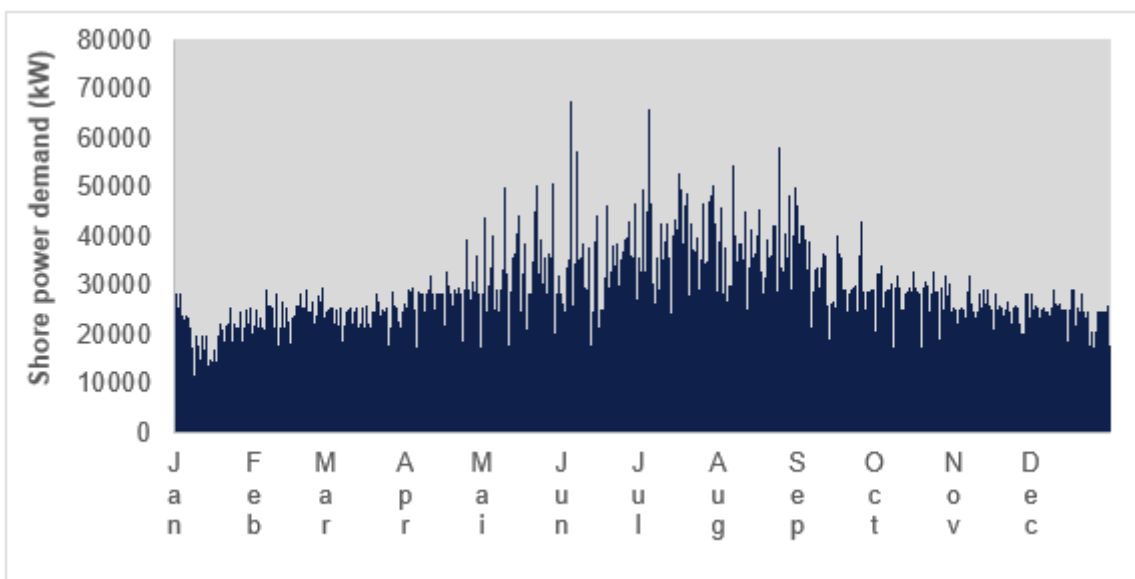
Tabell 5 – Effektbehov för land- och laddström, rangordnade efter genomsnittligt landströmsbehov (andra kolumnen från vänster). Beräknat från AIS-data för hela 2019.

Hamn	Landström (MW)					Laddström (MW)				
	Genomsnitt	Genomsnitt dag	Genomsnitt natt	Genomsnitt sommar	Max	Genomsnitt	Genomsnitt dag	Genomsnitt natt	Genomsnitt sommar	Max
STOCKHOLM	14,5	18,9	1,4	17,2	67,4	4,2	5,2	1,1	4,6	16,7
GÖTEBORG	12,4	13,8	8,3	13,4	55,4	3,0	3,4	1,8	3,5	13,4
TRELLEBORG	9,1	10,0	6,5	9,7	30,2	3,2	3,4	2,6	3,8	16,5
NYNÄSHAMN	5,9	7,4	1,3	7,4	32,1	2,3	2,9	0,5	2,5	10,9
MALMÖ	4,0	5,2	0,5	4,3	13,2	1,3	1,7	0,3	1,4	7,8
KAPELLSKÄR	3,3	4,2	0,5	3,5	8,9	1,9	2,5	0,2	2,1	10,2
YSTAD	2,9	3,2	2,1	4,1	15,9	0,7	0,8	0,3	1,2	13,5
KARLSHAMN	2,6	3,4	0,3	2,8	10,1	0,6	0,7	0,2	0,6	4,8
VISBY	2,5	2,5	2,7	3,7	27,8	0,9	1,0	0,6	1,7	11,1
KARLSKRONA	2,1	2,8	0,2	2,0	7,4	1,3	1,6	0,2	1,2	7,1
HELSINGBOR G	1,5	1,5	1,4	1,5	8,7	0,8	0,9	0,7	1,0	9,3
OSKARSHAMN	1,1	1,4	0,2	1,4	7,2	0,9	1,1	0,1	1,1	6,5
HOLMSUND	0,8	0,9	0,5	0,6	6,4	0,5	0,6	0,2	0,6	5,8
BROFJORDEN	0,7	0,8	0,6	0,9	5,3	0,3	0,3	0,2	0,4	7,0
LANDSKRONA	0,6	0,7	0,1	0,4	6,4	0,1	0,1	0,0	0,1	3,7
STRÖMSTAD	0,6	0,7	0,0	0,6	5,4	1,2	1,6	0,0	1,3	9,9
LULEA	0,5	0,6	0,3	0,7	8,6	0,1	0,1	0,1	0,1	1,6
NORRKÖPING	0,5	0,6	0,3	0,5	2,9	0,3	0,3	0,2	0,2	2,6
SVANESUND	0,4	0,5	0,3	0,4	3,5	0,2	0,2	0,1	0,2	3,4
OXELÖSUND	0,4	0,4	0,2	0,5	5,8	0,2	0,2	0,2	0,2	2,4

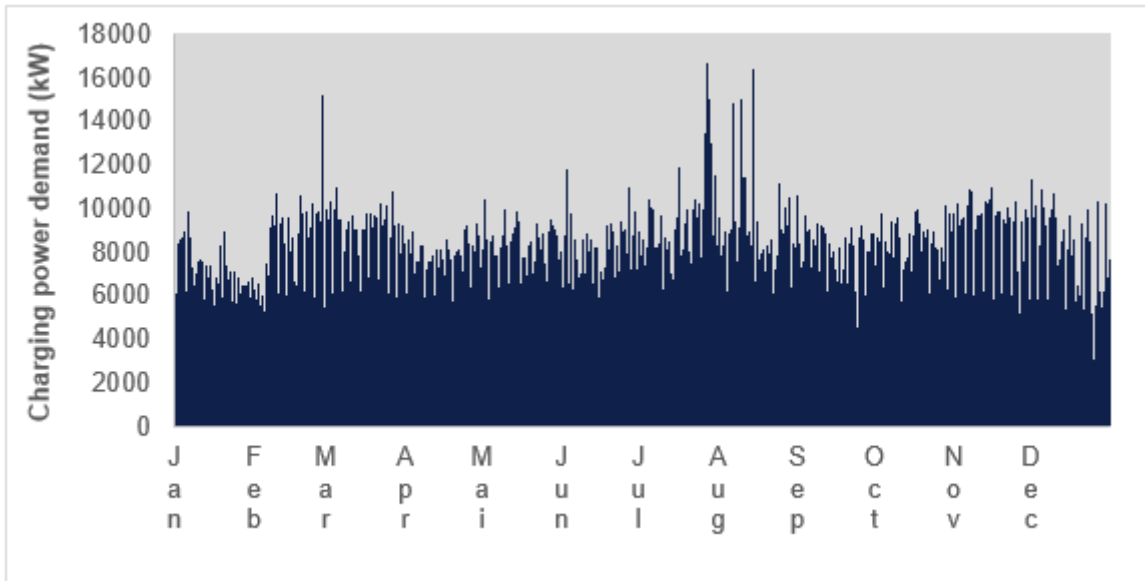
Som exempel visar vi för hamnarna i Stockholm antal fartyg som ligger där samtidigt i Figur 45, effektbehov av landström i Figur 46 och för laddström i Figur 47.



Figur 45 Antal fartyg i Stockholms hamnar under tre-timmars intervall under 2019. Små passagerarfartyg är exkluderade.



Figur 46 Totalt effektbehov för landström i scenario att alla vid kaj är anslutna, Stockholm (2019)



Figur 47 Totalt effektbehov för landström i hybridiseringsscenario för Stockholm (2019)

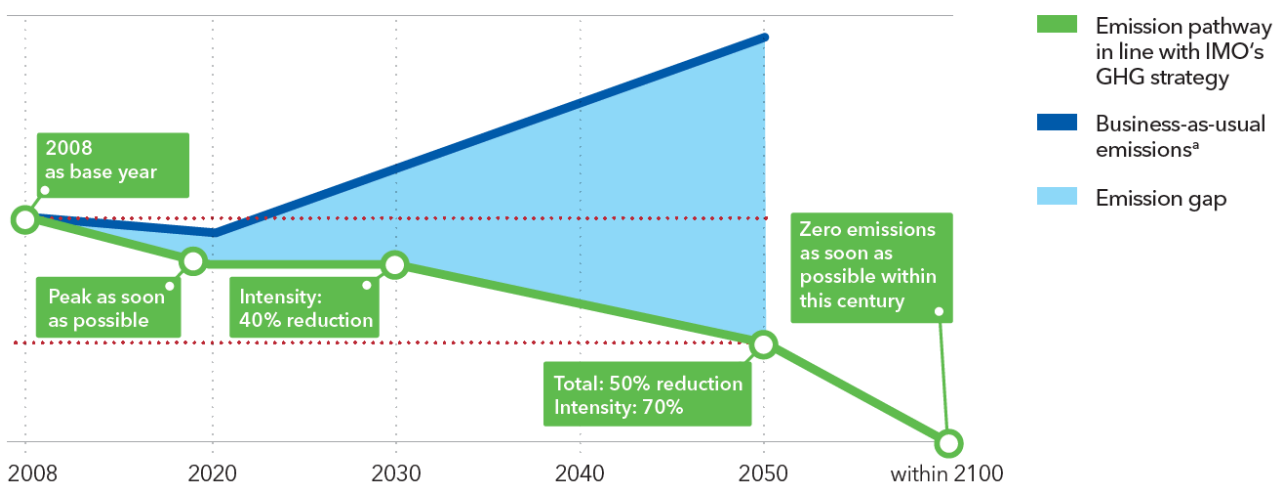
5 INSTITUTIONELLA OCH AFFÄRSMÄSSIGA FAKTORER

Det finns två grupper av institutioner – här i rapporten åsyftas sådant som lagar, regler och standarder men inte normer – som påverkar elektrifiering av sjöfarten.

Den första berör den internationella sjöfartens klimatomställning, och beskrivs endast kortfattat här. Detta då området är väl beskrivet i nyligen publicerade rapporter i Sverige. IMOs regelverk kring klimat, i MARPOL Annex VI, påverkar dock framförallt elektrifieringen av sjöfarten i den mån elektrifiering leder till mätbart minskade koldioxidutsläpp. Det är alltså de regelverk som styr mot mätbara ändringar i utsläpp fartygsoperation som berör elektrifiering, och då indirekt genom att skapa drivkrafter för operationella förbättringar.

2011 beslutades om de första regelverken som tillägg till MARPOL Annex VI: Energy Efficiency Design Index (EEDI) och Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP). SEEMP, en typ av förenklat energiledningssystem för fartyg, krävde dock då inte att faktisk minskning i utsläpp skulle genomföras (Johnson et al., 2013). I EEDI, som är en typ av värdering av energieffektiviteten av ett fartyg i en designkondition (och inte i faktiskt drift), kan man inte tillgodoräkna sig effekten av att installera batterier (DNV GL, 2020c, s. 119-121).

Units: GHG emissions



Total: Refers to the absolute amount of GHG emissions from international shipping.

Intensity: Carbon dioxide (CO₂) emitted per tonne-mile.

^aNote that the the business-as-usual emissions are illustrative, and not consistent with the emissions baseline used in our modelling (Chapter 6).

Figur 48 - IMOs initial GHG strategy, ur DNV (20XX)

Nyligen beslutades att implementera Existing Vessel Design Index (EEXI) and Carbon Intensity Indicator (CII).⁵⁵ EEXI är en form av utvidgning av EEDI till att gälla även de fartyg som var byggda innan EEDI började gälla (2013). CII är system för att årligen betygsätta fartyg på operationell miljöprestanda efter måttet Annual Efficiency Ratio (AER) som har enheten gram koldioxid per lastkapacitet och nautisk mil. Systemet bygger på den emissionsdata som fartyg redan rapporterar årligen till IMO. CII kan driva på hybriddrift med batterier i och med att den kräver mätbara förbättringar i fartygs operationella effektivitet. Liksom EEDI kan man inte tillgodoräkna sig effekterna av installationer av batterier när det kommer till EEXI.

Detsamma gäller införandet av EUs Fit-For-55-paket, där ökade kostnader för bränsle kan förkorta batteriers återbetalningstid. Kraven på landström kan också underlätta.

⁵⁵ Se gärna <https://www.dnv.com/maritime/webinars-and-videos/on-demand-webinars/MEPC-78-in-focus.html>

Den andra gruppen handlar om de institutioner som syftar till att själva användningen av teknikerna ska vara säker, som klassregelverk för installation av batterier ombord på fartyg, eller standarder för landström. Dessa kan vara både internationella, regionala (EU) eller nationella. Det är de senare som är viktigast för det segment som tidigare i rapporten identifierats som lättast att elektrifiera, nämligen den nationella passagerartrafiken. Med undantag av landströmstandarder, som är väl beskrivna i Costa et al. (2022), är dessa säkerhetsrelaterade institutioner inte lika väl beskrivna i tidigare litteratur och berörs därför i detalj i delavsnitt 5.1. Övriga faktorer berörs i delavsnitt 5.2: offentlig upphandling har spelat stor roll för att driva på elektrifiering av sjöfarten, framförallt i Norge. Därutöver spelar aktörer som banker och transportköpare en allt större roll i att driva på sjöfartens klimatomställning, vilket indirekt påverkar sjöfartens elektrifiering. Drivkrafter finns även för att minska sjöfartens lokala utsläpp i hamnar, vilket påverkat installationer av landströmsanslutningar på fartyg och i hamnar. Då detta berörs av Costa et al. (2022) lämnas det utanför rapporten.

5.1 Säkerhet

Fartyg berörs av en rad regel- och lagkrav på olika nivåer med målet att upprätthålla säker fartygsdrift. Storleken och typen på fartyget, samt om det opererar i nationell eller internationell trafik, påverkar vilka lagar och regler som är tillämpliga. Nedan beskrivs internationella institutioner övergripande: länders olika roller som flaggstat och kuststat, samt hur klassningssällskap arbetar både med egna regler (klass-verksamhet) och med att kontrollera att fartyg i internationell trafik uppfyller beslutade lagar och regelverk på uppdrag av länder (s.k. statutory verksamhet).

Generellt kan sägas att regelverk relaterade till säkerhet, särskilt vad gäller nyare teknik, bör ses som arbete under utveckling. Avvägningar bör göras för de som utvecklar och uttolkar regelverk: om man å ena sidan tillåter för stort risktagande, kan en snabbare implementering ske, samtidigt som reaktioner vid en eventuell olycka helt kan stoppa en ny teknik. Om man å andra sidan kräver alldeles för robusta system, driver det upp kostnader vilket också kan bromsa utveckling. Vad gäller sjöfarten har viktiga förändringar i regelverk för säkerhet utvecklats i samband med olyckor. Gedigna haveriutredningar efteråt blir underlag för diskussioner om förändringar. Så också för batterier. Flera olyckor^{56,57} har skett för batteriinstallationer, trots klassregler och typgodkännande, som sedan får revideras.

Nedan kommer två huvudbegrepp att användas för regler, nämligen föreskrivande eller preskriptiva, och funktionsbaserade:

- Funktionsbaserade krav innebär att kraven beskriver vilka funktioner ett visst system ska uppnå, men inte hur.
- Föreskrivande (preskriptiva) krav innebär mer direkt styrning av parametrar, t ex vilka material som får användas i en konstruktion.

Sjöfarten står inför stora utmaningar med att hantera säkerheten för nya energibärare ombord. Utöver batterier och vätgas som nämnts här, som kommer med risker för bränder och explosioner, är andra alternativ som metanol och ammoniak toxiska. Teknikutvecklingen behöver ske integrerat med regelutveckling och standardisering, byggt på pilotprojekt. Detta innebär en extra risk för de aktörer som vill gå före. Man måste visa upp att nya lösningar är lika säkra som de nuvarande,

⁵⁶ Ytteroyningen: <https://www.dsb.no/contentassets/bce03c99dac5435db25edeca70bb5c08/evalueringsrapport-brann-i-mf-ytteroyningen.pdf>

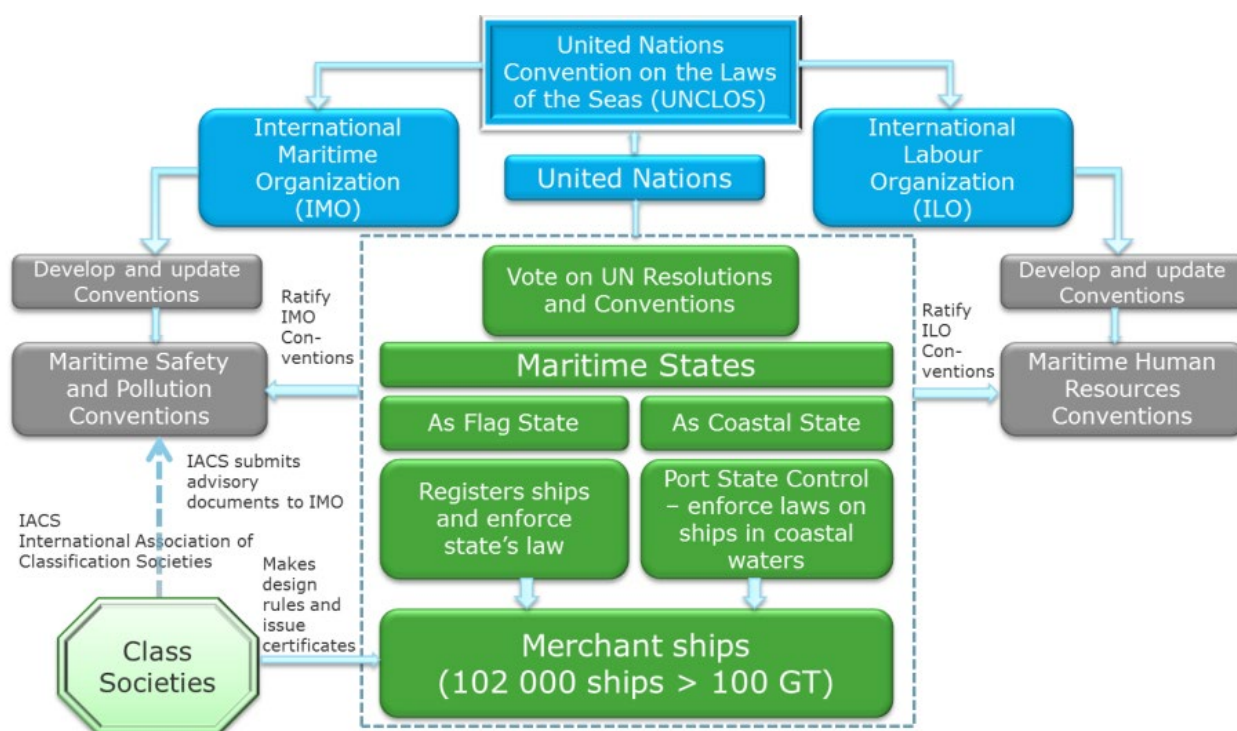
⁵⁷ Brim Explorer: <https://www.dsb.no/contentassets/bce03c99dac5435db25edeca70bb5c08/rapport---evaluering-av-hendelse-pa-ms-brim-version-1.0---20.05.20211-.pdf.pdf>

vilket kan innebära helt nya arbetssätt för varv och designers. Detta är en ofrånkomligt så att detta skapar osäkerheter och kräver mer tid och resurser. Det är inte säkert att en design blir godkänd.

5.1.1 Internationella aktörer och institutioner

Frågor kring miljö och säkerhet för den internationella sjöfarten behandlas i International Maritime Organization (IMO), ett av FN's fackorgan (eng. "UN Specialized Agencies"). I IMO arbetas med att utveckla och uppdatera konventioner, där icke-statliga organisationer, såsom klassningssällskapen genom IACS, har en rådgivande funktion. Endast medlemsländer beslutar, ofta i konsensus, och har sedan den dubbla rollen att både kunna vara flaggstat och hamnstat.

I figuren nedan illustreras hur aktörer hänger samman, och även klassningssällskapens roll, som berörs utförligare i avsnitt 5.1.2 nedan.



Figur 49 – Översikt över aktörer och deras respektive roller i internationell sjöfart. Källa?Årtal?

Utöver MARPOL Annex VI som alltså berör klimatpåverkan från sjöfarten, finns fem huvudsakliga internationella regler som är viktiga för elektrifiering:

- **International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS).** Här definieras minimumkrav för hur fartyg ska byggas, utrustas och opereras, vilket verifieras av flaggstat. I Kapitel II-1 berörs exempelvis krav för att generera el ombord.
- **International Maritime Dangerous Goods (IMDG) Code**
- **International Gaseous Fuels (IGF) Code**

- **Guidelines for the approval of alternatives and equivalents as provided for in various IMO instruments**, MSC.1 Circ. 1455. Denna vägledning introducerar den så kallade "alternative design"-processen, som används för ny teknik som ännu saknar preskriptiva regler. Denna berörs särskilt i avsnitt 5.1.3 nedan.
- **Interim guidelines for the safety of ships using fuel cell power installations**, MSC.1/Circ 1647. Bränsleceller fick i somras dessa så kallade Interim Guidelines som ger både funktionsbaserade och preskriptiva krav för installationer.

Det saknas internationella regler specifika för batterier.

5.1.2 Klassningssällskapens roll i den internationella sjöfarten

Klassningssällskapens roll i elektrifieringen handlar om utveckling av klassregler. Dessa har också påverkan på den nationella sjöfarten, då exempelvis nationella sjöfartsmyndigheter samarbetat med klassningssällskap med utveckling av nationella regler på basis av klassregler.

Klassningssällskapens roll bland de internationella aktörerna har en historisk förankring. Den internationella sjöfarten hade tidigt behov av tredje-parts verifiering av fartyg.⁵⁸ Det första klassningssällskapet, Lloyds Register, grundades i London redan 1760. Målet var att erbjuda oberoende tekniska utvärderingar av fartyg för användning när redare tecknade försäkringar på fartyg. I ett tidigt system klassades fartygsskrov efter hur bra det var byggt och hur väl det var underhållet enligt skalan A, E, I, O och U. Under 1800-talet grundades en rad andra klassningssällskap med samma syfte. DNV grundades exempelvis 1864. Numera ges i stort sett inga betyg; ett fartyg uppfyller antingen klassens regler eller ej, och utgör på så sätt en minsta standard som ett fartyg behöver upprätthålla (se gärna Strandenes, 2020). Men målet är detsamma: att sätta oberoende standarder för fartygs säkerhet och kvalitet, och sedan genomföra inspektioner för att till se att fartyg uppfyller dessa.

Klassregler underhålls och utvecklas i takt med den tekniska utvecklingen. Ett rederi betalar ett klassningssällskap för att göra sådant som att granska fartygsritningar inför byggnation, utfärda certifikat om, och att kontrollera fartyget genom dess livslängd. Klasscertifikat är en förutsättning för att fartyg ska kunna försäkras, anlöpa hamnar osv. Utöver att kontrollera fartyg mot dess egna regler, arbetar klassningssällskap också ofta på uppdrag av stater för inspektion och kontroll av uppfyllnad av internationella konventioner och lagar. Det kallas då att klassningssällskap är "erkända organisationer" (eng. "Recognized Organisations", RO).⁵⁹ I Sverige är exempelvis American Bureau of Shipping (ABS), Bureau Veritas (BV), DNV, Lloyd's Register (LR) samt RINA erkända organisationer. De viktigaste klassningssällskapen är internationellt organiserade i International Association of Classification Societies (IACS). Däri tillses bland annat att gemensamma standarder upprätthålls, för att exempelvis förebygga att konkurrens sker genom sänkning av standarder.

En nyckelroll för klassningssällskapen i elektrifieringen och klimatomställningen av sjöfarten är att utveckla nya regler för hur fartyg ska byggas och opereras med olika typer av alternativa drivlinor och bränslen.

⁵⁸ Se exempelvis <https://iacs.org.uk/media/8871/classification-what-why-how.pdf>

⁵⁹ Se IMO Assembly Resolutions A.73(18) och A789(19)

5.1.2.1 Klassningsregler för batterier

DNV var det första klassningssällskapet som tog fram regler⁶⁰ för batterier ombord på fartyg. Numera har de flesta stora klassningssällskap, exempelvis ABS⁶¹ och BV⁶², sådana regler gällande för de vanligaste typerna av litium-jon batterier.

Teknikutveckling av batterier sker hela tiden och drivs främst av bilindustrin. Sjöfarten kräver säkra lösningar eftersom ett fel i ett framdrivningssystem får stora konsekvenser för fartygets framdrift och för säker hantering. Brandsäkerhet är också mer komplicerat på ett fartyg eftersom evakuering till sjöss är betydligt mer komplicerat jämfört med exempelvis en bil. I många fall är den säkraste platsen vid eventuell nöd att stanna kvar ombord på fartyget tills branden är under kontroll. Eftersom det ständigt utvecklas nya batteri-kemier och batterikonfigurationer är klassregler för batterilagringssystem i ständig utveckling och innehåller en blandning av funktionsbaserade och föreskrivande krav:

Det krävs ett typgodkännande från klassningssällskapet av den aktuella batteritypen för att en leverantör av en batterityp skall kunna leverera till ett klassat fartyg. Ett typgodkännande innebär här att ett certifikat utföras som garanterar att en produkt, i det här fallet ett batteri, möter en mängd specificerade krav. Här krävs att den aktuella batteritypen genomgår flertalet tester mot en erkänd IEC standard som både på cellnivå, strängnivå och modulnivå säkerställer att batteriets vanligaste felmoder sker på ett kontrollerat sätt, att det är detekterbart och att propagering till omliggande batterimoduler ej förekommer vid en termisk event i en cell. Detektering av abnormaliteter i batteriet skall omedelbart utlösa ett larm och fränkoppling av defekta moduler skall kunna göras. I tillägg krävs att batterierna placeras i ett avsett, brandsäkert, separat utrymme i fartyget med egen ventilation, separat gasevakuering vid brand, gas/brand detektion och släcksystem godkänt för den aktuella batteritypen. Varken brand i batterirummet eller i omkringliggande utrymmen i fartyget skall kunna spridas till varandra.

Det krävs vidare att det utförs en projektspecifik säkerhetsanalys av batteriinstallationen ombord. Med projektspecifik menas för varje enskilt fartyg, även i en serie. Denna skall innehålla detaljer som tar i beaktande batteritypen, säkerhetssystemen och aktuell placering i fartyget samt säkerställa att detta inte påverkar säkerheten för passagerare, manskap och fartyg.

5.1.3 Alternative design by IMO - MSC.1/Circ.1455

Ny teknologi och nya koncept på fartyg som inte kan godkännas mot existerande föreskrivande regelverk bedöms enligt IMO's "Guidelines for the approval of alternatives and equivalents as provided for in various IMO instruments", MSC.1/Circ.1455. Detta är en riskbaserad process som möjliggör godkännande av ny teknologi och används därför i tidiga faser av implementering av ny teknik. Det är dock ett omfattande riskhanteringsarbete som krävs av projekten varje gång och kostnaden bärs av den som vill introducera teknologin. Vidareutveckling av regelverk drivs ofta av klassningssällskapen och i vissa fall samverkar IMO med klassningssällskapen för att utveckla internationella standarder.

För ett säkert användande av elektrifierade drivlinor ombord ska vara möjlig finns en rad regelverk, framtagna av olika aktörer nationellt och internationellt. IMO har under många år utvecklat den så kallade IGF-koden ("International Code for Safety of Ships using Gases or other Low-flashpoint fuels"), en säkerhetsstandard för alternativa bränslen. Än så länge täcker denna

⁶⁰ <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/RU-SHIP/2019-10/DNVGL-RU-SHIP-Pt6Ch2.pdf>

⁶¹ https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/293-guide-direct-current-power-distribution-systems-2018/DC_Power_Guide_e-July18.pdf

⁶² <https://marine-offshore.bureauveritas.com/new-bureau-veritas-rules-support-hybrid-power-and-energy-storage-systems>

bara LNG, men tillfälliga guidelines ("interim guidelines") har tagits fram för metanol och etanol. För andra typer av bränslen, som ammoniak eller vätgas (för exempelvis bränsleceller), gäller att flaggstat behöver godkänna enligt en alternativ design-process. Denna är tids- och resurskrävande eftersom processen därmed inte är lika förutsägbar för de olika inblandade aktörerna, och därmed bidrar det till affärsmässiga risker som blir barriärer för alternativa bränslen och drivlinor. En liknande process gäller för fartygsprojekt som bara ska gå i nationell trafik

5.1.4 Regler och standarder för mindre fartyg

För mindre fartyg, typiskt under 24m, så blir det svårare att tillfredsställa samma krav till fysiska barriärer på grund av platsbrist och att fartygen ofta är kompaktare och behöver vara byggda i lättare material än stålfartyg. Man behöver oavsett detta fokusera på att minimera risken och konsekvenserna vid ett eventuellt fel i batterisystemet. DNV har med grund i klassreglerna för batterier i konventionella fartyg utvecklat den standard som gäller för arbetsbåtar DNV-ST-0342 Craft att också omfatta batterier dock med lättnader i förhållande till de föreskrivande krav som gäller för större fartyg men med en riskbaserad process för det specifika projektet. Dock är kraven på batterierna desamma som för konventionella fartyg och samma typgodkännande från klassningssällskapet krävs.

5.1.5 Nationella krav

Till skillnad från fartyg som går i internationell trafik behöver fartyg som bara trafikerar i svenska vatten inte uppfylla klassregler. Transportstyrelsen utformar reglerna för den nationella sjöfarten.⁶³ Systemet bygger på egenkontroll och på att fartygsägaren bedriver ett systematiskt sjösäkerhetsarbete. En självdeklaration rapporteras in årligen. För vissa fartygstyper gör Transportstyrelsen periodvis inspektioner av skrov och botten. I övrigt genomförs en riskbaserad tillsyn, med exempelvis stickprovskontroller på fartyg.

Transportstyrelsens regler är funktionsbaserade. Sådana kräver som beskrivits ovan inte att ett fartyg ska vara designat på ett visst sätt, utan att ett antal funktioner ska vara uppfyllda. Transportstyrelsen har inte särskilda föreskrifter för batteri- eller hybriddrivna fartyg; dessa behöver följa samma föreskrifter. Man har däremot publicerat riktlinjer för batteri- och hybriddrivna fartyg (Transportstyrelsen, 2018). Där framgår att ett rederi som vill ha en batteriinstallation antingen kan välja att låta ett klassningssällskap certifiera fartyget efter sina regler, eller att Transportstyrelsen utför certifieringen. Grundkraven i riktlinjerna är att installationen ska följa ett sammanhållet regelverk:

På fartyg som använder batterier som energikälla för framdrivningsändamål eller fartyg där batterier används som extra kraft för att helt eller delvis försörja fartygets övriga energibehov helt eller delvis, ska konstruktion, tillverkning och underhåll av batteriinstallationer och kringutrustning följa ett sammanhållet regelverk som täcker alla aspekter av en säker installation. (Transportstyrelsen, 2018, s. 8)

Om något sådant regelverk saknas, ska istället en riskanalys genomföras för att visa att man uppfyller funktionskrav. Transportstyrelsen rekommenderar standarden IEC 31010 om Risk Management.

Som ett alternativ kan en designverifikation mot klassregler utföras av ett klassningssällskaps rådgivningsenhet, och som kan utfärda ett yttrande om konformitet mot klassregler.

⁶³ <https://www.transportstyrelsen.se/sv/sjofart/Fartyg/nationell-sjofart/regler-for-nationell-sjofart/>

Transportstyrelsen bedömer då om dessa regler kan verifiera överensstämmelse med funktionskraven i de nationella reglerna. I sådana fall krävs ingen särskild riskhanteringsprocess.⁶⁴

För konverteringar av fartyg som inte var byggda till klassregler är det svårt eller omöjligt för ett klassningssällskap att sköta certifieringen, varför det i praktiken sällan kommer att gå att följa den vägen.

Att använda typgodkända, eller "marinklassade" batterier och komponenter underlättar också godkännandeprocessen, eftersom det visar upp att batteriet uppfyller grundläggande säkerhetskrav för marint bruk. Det finns många möjliga teststandarder relevanta för litiumjonbatterier, där en av de särskilda aspekterna för batterier som ska klara typgodkännande är att de ska tåla propageringstester. I Norge är typgodkännande ett krav.

Ett ytterligare möjligt alternativ är att ha delvis preskriptiva regler även på nationell nivå. Såsom redan beskrivits har sådana införts i Norge. På så sätt minskas komplexiteten och osäkerheten för nya projekt. Samtidigt kräver sådant utvecklingsarbete mer resurser på myndighetssidan och kontinuerlig uppdatering i takt med att nya erfarenheter skapas.

5.1.6 Sammanfattning

Sammantaget spelar regler och godkännandeprocesser en mycket viktig roll för introduktion av ny teknik i sjöfarten. Krav på bibehållen säkerhet är genomgående i alla olika institutioner. I frånvaron av preskriptiva regler – innan man vet vad i detalj som bör krävas för ny teknik – krävs typiskt att projektet där den nya tekniken ska prövas kan visa upp att den är lika säker som konventionell teknik. För de projekt som är först ut blir kostnaderna ofrånkomligen större än för de som kommer senare. Däremot kan kostnaderna delas mellan parter på olika sätt. Utvecklandet av nya regler och processer sker typiskt i samverkan mellan de som skapar regler (såsom klassningssällskap, internationella organisationer eller nationella myndigheter) och de som driver projekten (såsom varv, rederier och teknikleverantörer) på basis av nya projekt. För den första gruppen är det en avvägning mellan att tillåta "för mycket" och låta en snabb implementering ske med ökad risk för allvarliga olyckor, eller att kräva för robusta system som blir dyra och komplicerade.

5.2 Övriga faktorer

Nedan diskuteras offentlig upphandling, statliga stöd, samt olika typer av grön finansiering.

5.2.1 Offentlig upphandling

En effektiv offentlig upphandling var en framgångsfaktor i skapandet av marknaden för elsjöfart i Norge. Kravställande och vikten av klimathänsyn i upphandlingar har nämnts i tidigare rapporter (IVL, 2022). VTI (2022) beskriver flera exempel från Norge, som liksom Sverige behöver följa EUs regler inom området. I det här avsnittet utvecklas några särskilda aspekter av detta, nämligen vilka olika alternativa förfaranden som med fördel kan användas för upphandling av tekniska innovationer, och vad som avgör hur långa avtal man får teckna.

I Norge hade, som redan beskrivits, förfarandet konkurrenspräglad dialog använts för upphandlingen av den första elfärjan Ampere, som genom att bli ett lyckat projekt utgjorde startskottet för resten av utvecklingen. Tidigare hade man tilldelat i upphandlingar efter pris. En annan möjlighet är att använda sig av förhandlat förfarande (med föregående annonsering). Båda

⁶⁴ Personlig mailkommunikation med Mattias Hörnquist vid Transportstyrelsen, 2022-09-21

dessa förfaranden nämns inom ramen för begreppet innovationsupphandling, där syftet generellt är att främja innovation.⁶⁵ Båda förfaranden kräver att ett eller flera av följande villkor är uppfyllda (LOU 10 kap. 1§)

- den upphandlande myndighetens behov inte kan tillgodoses utan anpassning av lättillgängliga lösningar
- upphandlingen inbegriper formgivning eller innovativa lösningar
- kontraktet inte kan tilldelas utan föregående förhandlingar på grund av särskilda omständigheter som avser arten, komplexiteten eller den rättsliga och ekonomiska utformningen av det som ska anskaffas eller på grund av riskerna i anslutning till dessa omständigheter
- den upphandlande myndigheten inte med tillräcklig precision kan utarbeta tekniska specifikationer med hänvisning till en standard, europeisk teknisk bedömning, gemensam teknisk specifikation eller teknisk referens.

Upphandlingsmyndigheten nämner ett antal förutsättningar där förfarandet är bra att använda, däribland:

- upphandlingar där dialog kan föras med leverantörer för att gemensamt ta fram lösningar på beställarens behov
- komplexa projekt med utvecklingsbehov, eller när beställaren inte vet vilken lösning som krävs för att nå ett uppsatt mål
- specialanpassningar av leveranser i form av lättillgängliga lösningar eller leveranser som kräver formgivning, innovation eller annan teknisk komplexitet
- projekt som är komplexa ur ett juridiskt, tekniskt eller kommersiellt perspektiv.⁶⁶

Det ska alltså inte vara möjligt att lämna en tillräckligt exakt kravspecifikation som vid en vanlig upphandling. Däremot gäller generellt att tilldelningskriterierna och utvärderingsmodellen inte ändras under tiden.⁶⁷ Samtidigt kan båda förfarandena vara mer resurskrävande.

Upphandlingsmyndigheten har identifierat att det finns risker, framförallt med konkurrenspräglad dialog, att det också kan vara mer krävande för leverantören och att det är viktigt att upprätthålla intresset hos dem.⁶⁸

I konkurrenspräglad dialog ansöker leverantörer om att få vara med i en dialog och bedöms efter parametrar angivna i inbjudan. På liknande sätt får leverantörer under ett förhandlat förfarande ansöka om att lämna anbud.

I den konkurrenspräglade dialogen kan sedan beställaren be leverantörer erbjuda en eller flera lösningar, för att diskutera med beställaren. Beställaren kan göra detta i flera steg och successivt välja bort lösningar (och därmed leverantörer om alla deras lösningar valts bort), med målet att tillgodose sina behov. Beställaren kan även ge ersättning för arbete under den här dialogen. Tillräckligt många lösningar ska finnas kvar vid avslutad dialog för en effektiv konkurrens, "under förutsättning att det finns tillräckligt många lösningar" (6 kap. 3§).

⁶⁵ <https://www.upphandlingsmyndigheten.se/frageportalen/2069710/skillnad-mellan-kpd-och-innovationsupphandling/>

⁶⁶ <https://www.upphandlingsmyndigheten.se/inkopsprocessen/forbered-upphandling/valja-upphandlingsforfarande/konkurrenspraglad-dialog/>

⁶⁷ <https://www.upphandlingsmyndigheten.se/frageportalen/2569752/olika-losningar-i-konkurrenspraglad-dialog-hur-utv/>

⁶⁸ https://www.upphandlingsmyndigheten.se/inkopsprocessen/forbered-upphandling/valja-upphandlingsforfarande/konkurrenspraglad-dialog/#att_tanka_pa

Vid förhandlat förfarande får beställaren förhandla med leverantörer om förbättringar i anbud, vilket inte är möjligt på samma sätt under den konkurrenspräglade dialogen. Däremot kan beställaren be en leverantör klarlägga eller optimera sitt anbud.⁶⁹

Vad gäller kontraktslängder innebär kraven i LOU att ramavtal får löpa i maximalt fyra år (7 kap. 2§). Kontraktslängder kan sträcka sig över längre tid om särskilda skäl föreligger, vilket exempelvis kan vara om leverantören behöver göra investeringar med längre avskrivningstider än fyra år.⁷⁰

5.2.2 Statliga stöd till genomförbarhetsstudier och investeringsstöd

Statlig medfinansiering till bland annat landström spelade stor roll för utvecklingen i Norge. I Sverige har finansiering via först Trafikverket och sedan Klimatklivet varit viktiga. Stena Lines projekt med att utveckla och demonstrera batteridrift på Stena Jutlandica finansierades av Trafikverkets forskningsportfölj. I projektet genomfördes även HAZID-studie av klassningssällskapet Lloyd's Register för att verifiera att lösningen var säker. Trafikverket har även finansierat ett pågående projekt hos Candela Speedboat AB, om elektriskt drivna bärplansbåtar i kollektivtrafik. I Trafikverkets forsknings- och innovationsplan prioriteras för sjöfartsprojekt exempelvis "demonstration och kunskap inom nya drivlinor, drivmedel och operativa förändringar som leder mot fossilfrihet och bidrar till minskad miljöpåverkan från sjöfarten och dess stödverksamhet som lots, farledsunderhåll och kustbevakning." (Trafikverket, 2022, s. 38).

Klimatklivet har sedan spelat en avgörande roll för installation av batterier ombord, och för landström. Klimatklivet är ett statligt stöd för lokala och regionala investeringar i fossilfri teknik och grön omställning. Det är bara fysiska investeringar med varaktiga utsläppsminskningar som kan få stöd, och stöd delas ut i omgångar varje år till de projekt som har störst minskning per investerad krona. Klimatklivet får enligt sin förordning⁷¹ (2015:517) dela ut stöd enligt vissa av undantagen i EUs allmänna gruppundantagsförordning⁷² (nr 651/2014), vilka exempelvis medger stöd till energieffektivisering (1 kap art. 38) och hamninfrastruktur (56b). Vad gäller elektrifierad passagerartrafik har man beviljat bland annat stöd till Green City Ferries, både för batteridrivna och för vätgasdrivna färja.⁷³

5.2.3 Grön finansiering och hållbarhetslänkade lån

Det finns ett växande intresse hos investerare att på olika sätt koppla prissättningen på lån till uppfyllande av miljö- och hållbarhetskrav som fartyg.⁷⁴ Med grön finansiering menas här ett lån på en tillgång, såsom ett fartyg, som ges utifrån satta hållbarhetskriterier. EUs taxonomi kan exempelvis användas, som innehåller ett generellt krav på att fartyg ska ha noll utsläpp av koldioxid, med ett antal undantag. Den användes nyligen av Exportkreditnämnden för att bevilja den nya statliga gröna kreditgarantin till Furetank's nya fartyg.⁷⁵

Ett hållbarhetslänkat lån kan men behöver inte vara kopplade till en särskild tillgång, och innebär att en låntagare får bättre villkor om låntagaren binder sig till att visa upp förbättringar på satta

⁶⁹ <https://www.upphandlingsmyndigheten.se/frageportalen/1840939/forhandlat-forfarande-med-foregaende-annonsering-i/>

⁷⁰ För flera exempel, se <https://www.upphandlingsmyndigheten.se/frageportalen/1970561/avtalslangd-qhip/>

⁷¹ https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/forordning-2015517-om-stod-till-lokala_sfs-2015-517

⁷² <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02014R0651-20210801>

⁷³ Identifierade i Länsstyrelsens databas över beviljade projekt.

⁷⁴ <https://www.dnv.com/maritime/hub/decarbonize-shipping/key-drivers/investors-and-finance/green-finance.html>

⁷⁵ <https://www.mynewsdesk.com/furetank/pressreleases/furetank-foerst-med-stattig-groen-kreditgaranti-till-sjoefarten-ett-viktigt-steg-i-branschens-omstaellning-3173166>

indikatorer över tid. Röntan kan sedan kopplas till om låntagaren möter målen eller ej. Mål för sjöfarten kan exempelvis vara kopplade till förbättring av CII över tid.

Dessa lån driver på så sätt inte direkt mot elektrifiering, men kan vara en del av en helhet där ett rederi premieras för satsningar på klimatprestanda.

5.3 Resultat från intervjuer

Inom ramen för projektet har ett mindre antal intervjuer genomförts med Skärgårdsredarna, Börjesson Chartering, Transportstyrelsen, Region Stockholm, Västtrafik, Färjerederiet, Sjöräddningssällskapet samt en teknikleverantör. Intervjuerna fokuserade på hinder för vidare elektrifiering, och kom att kretsa kring fyra grupper av hinder: upphandling, tillgång till laddning, tillgång till investeringsstöd, samt regelverk.

Vad gäller upphandling, lyfte upphandlade parter upp vikten av en bra upphandlingsprocess, och betydelsen av egna studier och marknadsdialoger innan en upphandling startar. Västtrafik utreder möjligheterna inför varje ny upphandling, med målet att ha en fossilfri fartygsflotta 2030. Elektrifiering prioriteras. Man genomför samråd med potentiella anbudsgivare. Man arbetar med långa avtalsperioder, upp till 15 år. Västtrafik äger ett mindre antal fartyg i trafik i Göta Älv (Älveli och Älfrida). Resten av fartygen i kollektivtrafiken på vatten ägs av det företag som driver den upphandlade trafiken.⁷⁶ Även om man därmed upphandlar den mesta trafiken, är man känslig för förseningar när avtal blivit tilldelade. Det är därför viktigt för Västtrafik att konverterings- och nybyggnadsprocesserna till elektrifierad drift löper så smidigt som möjligt, även om man inte själv driver projekten. Region Stockholm har nyligen upphandlat en utredning av sina fartyg som ska ge svar på bland annat hur och om fartyg eventuellt ska elektrifieras. Här är elektrifiering ett av flera sätt att minska klimatpåverkan. Man har använt även HVO, och diskussioner finns kring att använda flytande biogas, eftersom efterfrågan från bussarna på biogas inte är lika stor på grund av elektrifiering.

Färjerederiet beskriver gällande hinder de osäkerheter som den nya tekniken inneburit. Man har försökt arbeta för att hålla ner kostnader och undvikit att ta in konsulter. Detta har samtidigt inneburit att arbetet tagit längre tid. Ny kompetens har dock krävts kring exempelvis starkström, för att hantera laddningsanslutningarna. Man har aldrig tidigare driftat högspänningsanläggningar. Där har man dock nu kunnat samarbeta med andra delar av Trafikverket som har den kompetensen, och som hjälpt till med specifikationer. Satsningar på nya arbetssätt har också krävts för att hantera utredningar och projekteringsavtal kring elnätet. Tidigare har man kunnat ansvara för underhåll och service själva, men ser nu ett behov av att också teckna serviceavtal. Lösningarna måste vara nyckelfärdiga, till skillnad från tidigare när man kunnat köpa upp mer komponent för komponent. Existerande färjelägen är inte alltid enkla för konvertering till eldrift, på grund av svårigheter att placera landanslutningarna. Färjerederiet ser också ett generellt behov av mer utbildning kring hur man tar sig fram i sådana här projekt och ökade resurser för att genomföra upphandlingar. Vad gäller Tellus, är batteriinstallationen verifierad mot ett klassregelverk, DNVs Battery (Safety). Man ser att det är en trygghet att kunna använda den typen av regler, eftersom det är svårt annars ha detaljkunskap i den här typen av komplexa frågor (som krävs för funktionsbaserade krav). Slutligen ser man ett intresse från aktörer för samarbete – men att det har varit svårt att få tid till det.

Teknikleverantören poängterade att även om ambitionerna hos många aktörer är höga, är det svårt att räkna hem projekten ekonomiskt. Särskilt gäller det då kontrakten kan vara för korta, runt

⁷⁶ Styrsobolaget hyr Älveli och Älfrida av Västtrafik, och sköter bemanning, drift och underhåll, se <https://www.styrsobolaget.se/om-oss/fartyg/alveli-och-alfrida>

5 år, och kravbildens framåt är oklar. Hybridisering kan vara ett billigare alternativ som möjliggör minskade utsläpp, om än inte 100%. Det är samtidigt oklart om kraven som ställs i upphandlingar kommer att vara tillräckligt styrande för att en hybridisering ska ge en konkurrensfördel, eller kanske rent av är en felsatsning för den upphandlande parten i framtiden kommer vilja se 100% elektrifiering. Då vågar man inte heller ta det "halva steget" som hybridisering innebär. Vad gäller rekommendationer lyfter teknikleverantören fram behovet av en ökad dialog mellan myndigheter, upphandlare och utförare. Rederierna måste känna sig trygga med vilka krav som kommer att ställas framåt. Leverantören har identifierat en risk i att beställare går ut med upphandlingar utan tillräckligt underlag, vilket exempelvis kan leda till att upphandlingar får dras tillbaka när prisbildningen är mycket högre än förväntat. Vad gäller regler menar leverantören att klassen har tydliga krav för nyinstallationer, men att situationen med nationella tillsynsmyndigheter är mer oklar då det endast finns riktlinjer [och inte preskriptiva regler]. Om man engagerar klassen vid ett ombyggnadsprojekt finns oftast inga problem men detta förordrar projektet avsevärt.

Transportstyrelsen beskriver hur Sverige var ett av de första länderna att få till riktlinjer på plats för batterier ombord. Det ingår i myndighetens uppdrag att uppdatera riktlinjer och ta fram regelverk, och man har inte fått särskilda medel för att hantera just denna teknikutveckling. Man lyfter fram hur funktionsbaserade regler var önskade av branschen, och att syftet är att man själv ska få välja exempelvis vilket regelverk man vill kunna bygga efter. Det innebär alltså en större flexibilitet. Samtidigt ställer det krav på inblandade att driva arbete med riskanalyser, i händelse att man inte väljer att använda ett klassningssällskaps regler. De funktionsbaserade reglerna säger inte exakt vad som krävs. Det är upp till de som driver projektet att ta fram dokumentation som visar att konstruktionen uppfyller funktionskraven. Transportstyrelsen beskriver hur kunskapen kring risker i batteriinstallationer utvecklas. Installationer som man i ett tidigt skede godkänt, skulle idag inte bli godkända. Detta gäller exempelvis användandet av begagnade elbilsbatterier ombord, som man idag bedömer saknar möjligheter till kvalitetskontroll. Framöver ser man dels behov av att utveckla regler dels i IMO, dels i EU (det särskilda direktivet för passagerarfartyg). Vidare ser man behov av att uppdatera den egna vägledningen för att exempelvis som i Norge införa delvis preskriptiva regler.

Sjöräddningssällskapet (SSRS) driver ett utvecklingsprojekt om ett elektrifierat räddningsfartyg som ska gå på bärplan. SSRS hade föredragit att arbeta mot mer preskriptiva krav, och upplever att riskanalysen är ett stort arbete som är svårt att göra själva. SSRS lyfter fram att kraven hos klassningssällskapen utvecklats för större fartyg, och att vissa preskriptiva krav där är svåra eller omöjliga att uppnå för mindre öppna båtar, som t ex batterirum med särskilda behov av ventilation.

Skärgårdsredarna, som är branschorganisationen för rederier med yrkesfartyg i nationell trafik, lyfter fram de osäkerheter som tillämpningen av reglerna för fartyg i nationell trafik inneburit för deras medlemmar, exempelvis att bedömningar av samma installationer skiftat över tid.

Skärgårdsredarna betonar möjligheterna med klimatomställningen för deras medlemmars fartyg, som dessutom typiskt trafikerar i städer och nära bebyggelse. Även om användning av HVO minskar utsläpp inte bara av växthusgaser utan även av partiklar jämfört med diesel, så kvarstår utsläpp. Full elektrifiering innebär därmed också bättre luftkvalitet.

6 DISKUSSION

I rapporten har visats att den tekniska potentialen för elektrifiering av sjöfarten i Sverige på kort sikt främst handlar om hel-elektrifiering med batterier av mindre passagerarfärjor och hybridisering av lastfartyg. 12-20% av energianvändningen av hela färjetrafiken, inkluderat RoPax-färjor bedömdes kunna elektrifieras med batterier. Detta kan i praktiken handla både om konverteringar av befintligt tonnage och av nya fartyg. Vad gäller passagerarfärjor är säkerheterna i metoden som tillämpats i denna rapport är större för mindre fartyg som går korta sträckor på många hamnar. Flera olika jämförelsetal diskuterades. Samtidigt gjordes kvalitativa jämförelser med utvecklingen i Norge som stärker argumentet. Detaljerade studier behöver göras på lokal nivå, där även aspekter som möjligheter till att ladda behöver inkluderas.

Den övergripande analysen av möjligheterna att helt elektrifiera lastfartygen visade att energibehovet typiskt är för stort för att det ska kunna täckas av batterier av de storlekar som används idag. Redovisade exempel, från bland andra Norge och Nederländerna, visade dock att även lastfartyg går att helt elektrifiera. I fallet Norge handlade dessa inte om att ersätta befintliga sjötransporter, utan om nya linjer som ersatte lastbilstrafik som annars gick i områden med mycket bebyggelse. Dessa fartyg har också blivit konstruerade med syftet att opereras autonomt, utan besättning ombord, vilket sänker driftskostnaderna. För svensk del ska här nämnas att det pågår mycket diskussion här även kring urban sjöfart.

Den tekniska potentialen för hybridisering med batterier av lastfartyg är däremot god, där man för inrikes sjöfart kan se att uppemot 40% av energianvändningen för vissa segment kan tillhandahållas av större batterisystem. Stora effekter nås samtidigt även av mindre batteriinstallationer, eftersom hybriddriften i sig innebär en energieffektivisering, här antaget 10%. I grundscenariet kan 13% av energianvändningen minskas, om batterierna antas även kunna driva fram fartyget.

Slutligen har konstaterats att den teoretiska potentialen för landström är mycket större än i dag, baserat på beräkningar av energibehovet som fartyg har i hamnar. En fullt utbyggd landströmsanvändning i Sverige om 700 GWh är många gånger större än dagens runt 30 GWh. Däremot inte sagt att efterfrågan eller de faktiska möjligheterna att kunna ansluta finns. Generellt gäller att effekten på människors hälsa är den större nyttan med landströmsanslutningar, före exempelvis minskning av klimatpåverkan. Behovet av laddström uppskattades också. Tidigare rapporter har lyft fram vikten av att ta höjd även för den typen av behov. Även vid en helt batterihybridiserad handelssjöfart skulle landströmsanvändningen i de flesta hamnar vara mycket större än den för laddström. Detta är dock endast beräknat på dagens batteristorlekar och inte inräknat det potentiella behovet hos helelektrifierade större fartyg, som i Sverige än så länge bara finns i planeringsstadiet.

På längre sikt kan batteriteknikens utveckling, exempelvis för batterier med mycket högre energidensitet och/eller lägre produktionskostnad, möjliggöra fler fartyg att helt elektrifieras. Det pågår också en utveckling mot att använda trycksatt vätgas i bränsleceller ombord, för fartyg som behöver mer energi än batterier kan tillhandahålla. Flera färjor i Norge minskar sina utsläpp på det sättet. Energibehovet för dessa hör samman med samhällets elektrifiering eftersom grön vätgas produceras av el i elektrolysanläggningar. Även detta bränsle har en övre gräns varefter densiteten blir för dålig. För fartyg som inte kan bära med sig tillräckligt med vätgas för sin överfart, och som letar fossilfria alternativ blir bränslen som ammoniak och metanol attraktiva. Dessa produceras idag, precis som vätgasen, typiskt med fossila ämnen i grunden. I skrivande stund arbetar aktörer i Sverige med att etablera produktionsanläggningar av grön metanol för maritimt bruk.

Med teknisk potential menas här vad som är tekniskt möjligt. Men med marknadspotential, som är huvudfrågan i rapporten, innefattas även institutionella och ekonomiska faktorer. Här har konstaterats att även om potentialen för helt elektrifierad färjetrafik är inom räckhåll för många fartyg, kan de praktiska utmaningarna faktiskt vara större för aktörer här än i handelssjöfarten. Detta är dels för att det i Sverige ofta rör sig om konverteringar av befintliga fartyg. Även om kapitalkostnaderna blir lägre jämfört med att bygga ett helt nytt fartyg, kan svårigheter uppkomma i att anpassa ett befintligt fartyg efter helt nya säkerhetsregler och filosofier. Det kan också oavsett konvertering eller nybyggnation uppstå problematik kring landströmsanslutningar.

Som beskrivits är det huvudsakligen på flaggstatsnivå och hos klassningssällskapen som regelverk för batterier ombord har utvecklats. Eftersom de mindre passagerarfärjorna är nationell trafik är dessa inte byggda enligt klassningssällskapens regler, varför klassningssällskapen svårtligen vill gå in och klassa konverteringar. I Norge har man för att underlätta för dessa typer av projekt utvecklat nationella vägledningar, i samarbete mellan klass och ansvarig tillsynsmyndighet. Intervjuerna visade på en generell önskan att stärka den svenska processen, exempelvis med att i högre grad komma med preskriptiva vägledningar. Det är viktigt att poängtera att särskilt preskriptiva vägledningar konstant behöver uppdateras efter nya erfarenheter, exempelvis vid olyckor. I Norge har batteribränder skett, i fallet Ytterøyningen, trots att batterisystemet var typgodkänt vilket visar allvaret i den inburna brand- och explosionsrisken som finns i dagens litium-jon batterier. Uppdateringar i regelverken har därför skett löpande allt eftersom lärdomar från användning av maritim batteriteknik kommer in. Den här problematiken kommer fortsätta vara aktuell även efter batteritekniken blir mer känd och etablerad. Om man ska se till utvecklingen i andra länder, och i pågående svenska projekt, är vätgasdrivna fartyg i nationell trafik nära förestående. Även om processen för godkännande av dessa är densamma, är de tekniska problemen annorlunda och kommer liksom batteriteknikens implementering att kräva utbrett samarbete och stora projektinvesteringar i rigoröst kvalificerings- och riskarbete.

Det som ändå talar för marknadspotentialen för helelektrifiering av de mindre passagerarfärjorna är att det till stora delar är upphandlad trafik. Här framgår genomgående i beskrivningen av utvecklingen i Norge, av beskrivning av olika förfaranden för offentlig upphandling och av intervjuerna att det finns möjligheter till att stärka processerna. Möjligheterna till och betydelsen av ökad samverkan och erfarenhetsutbyte mellan aktörer förefaller också stor. Genom att låta projekt som är delvis offentligt finansierade ta risker och osäkerheter som ny teknik alltid medför, underlättar det för andra aktörer.

Även om man i Norge hade specifika krav från statlig nivå på att färjeupphandlingar skulle ställa miljökrav, finns i Sverige mål på utsläppsminskningar i inrikes trafik. Dessa mål tolkas och införlivas sedan på olika sätt på lokal nivå till krav på sjöfarten.

Offentliga stöd har varit viktiga för den norska utvecklingen. I Sverige finns inte motsvarande riktade satsningar på exempelvis landström, men svenska Klimatklivet arbetar efter samma europeiska statsstödsregler som de norska stöden. I avsnittet om Norge beskrevs hur den genomsnittliga merkostnad per koldioxidbesparing som elektrifieringen medfört i de norska fylkeskommunerna väl kunde jämföras med kraven i svenska Klimatklivet. Sedan de norska projekten genomfördes har genomsnittliga kostnader för batterisystem sjunkit med 50%, varför aktörer i högre grad bör se över denna stödmöjlighet i Sverige.

Handelssjöfarten har en mer säker regelmässig situation. De styrmedel som påverkar elektrifiering gör det huvudsakligen indirekt, genom att ställa krav på förbättrad operationell effektivitet. Valmöjligheterna är därför fler vad gäller hur de ska uppnå dessa mål, där hybriddrift kommer att

vara en viktig delösning, särskilt vid möjlighet att söka investeringsstöd. Efterfrågan på delvis elektrifierade lastfartyg ligger kanske främst hos hamnarna, som på så sätt kan uppnå minskade utsläpp i och direkt utanför hamnen. I övrigt finns inte mycket mervärde för en transportköpare med just elektrifiering, framför andra klimatåtgärder.

Även om potentialen för att helt elektrifiera handelssjöfarten via batterier inte är stor som den opererar idag, kommer klimatkrav ändå att betyda att sjöfarten behöver inkluderas i svenska elektrifieringsstrategier och -planer. Detta eftersom elektrobränslen, jämte flytande biogas, förväntas vara en nyckel i klimatomställningen. Det är viktigt att poängtera att den utvecklingen också kan ske på kort sikt, exempelvis i Gotlandstrafiken, och, som noterats ovan, i fabriker för grön metanol. Denna teknikutveckling kräver samtidigt parallell regelutveckling för att hantera säkerhetsfrågor.

Det är viktigt att poängtera att den typen av helelektrifierade lastfartyg som nämnts i rapporten har inte uppkommit till följd av särskilda styrmedel, utan genom att lastägare i samverkan med leverantörer identifierat potentialer för nya fartygslinjer som har ett mervärde jämfört med existerande transporter i land. I Norge främjades framtagandet av den här typen av lösningar genom bland annat pilotprojekt i Grønt Skipsfartsprogram^{77,78}, ett partnerskapsprogram mellan privata och offentliga aktörer som finansieras av staten och organiseras av DNV. Den typen av stöd och program saknas i Sverige idag. Vissa aktörer i Sverige har kunnat söka och få medel för forskning, utveckling och demonstration inom elektrifiering av sjöfart. Detta kan också vara en väg framåt, men kräver att enskilda aktörer tar de initiativen.

Vad gäller marknadspotentialen för landström motsvarar nuvarande elförsäljning endast ett par procent av den tekniska som här identifierats. Det är också så att endast ett fåtal av svenskägda fartyg är utrustade för landström. Både installationerna på land och på fartyg är kostsamma, och sker idag i mycket stor utsträckning med statligt stöd. Samma mekanismer har rått i Norge, där staten delfinansierat nästa alla landanslutningar i hamnar. Detta för att råda bot på hönan-och-ägget-situationen: att om ingen installerar anslutningar i hamnar kommer inga fartyg att göra nödvändiga investeringar och vice versa. De beräkningar och metoder som redovisats här skulle kunna utgöra underlag för mer detaljerat arbete om i vilka hamnar och för vilka fartyg som landströmsinstallationer skulle få störst samhällsnytta. Här finns också en lärdom att ta med sig: I Norge har det byggts väldigt många specialanpassade lösningar till passagerartrafiken, vilket kommer göra nästa upphandlingsperiod mer komplicerad och eventuellt kostsam för att anpassa fartyg eller landströmsanslutningar till nya situationer.

En stor utbyggnad kan komma att påverka lokala elnät. Som påpekats i tidigare rapporter (SSPA, 2022; IVL, 2022) skulle en strategi för utbyggnad av land- och laddström i Sverige vara av betydelse. En sådan skulle kunna bygga på krav i Fit for 55, analyser av vid vilka hamnar landström kan få störst effekt, vilka system som krävs efter vilka fartyg som anlöper där, kostnader, påverkan på utsläpp etc. Sådana utvärderingar har exempelvis gjorts för Norge, och går att göra med den typen av metoder som använts här.

⁷⁷ <https://grontskipsfartsprogram.no/pilotprosjekt/autonomt-batteridrevet-containerskip/>

⁷⁸ <https://grontskipsfartsprogram.no/pilotprosjekt/fleksibelt-transportsystem-med-autonome-skip/>

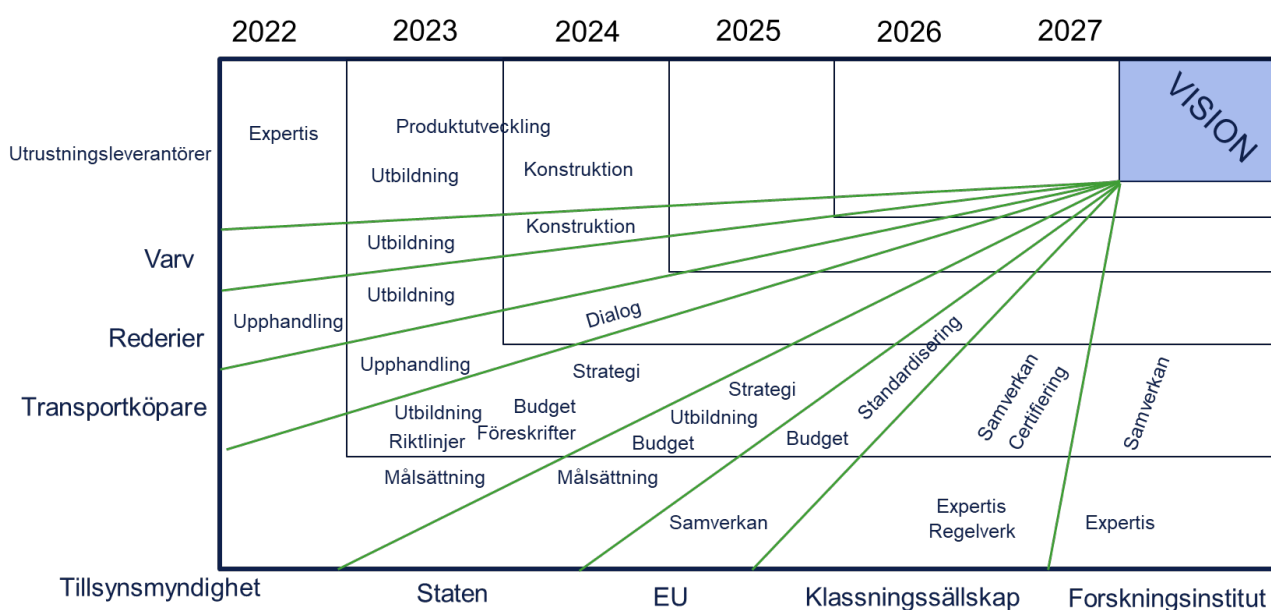
7 SLUTSATSER

Rapporten har identifierat bland annat att det på kort sikt finns stora möjligheter att helt elektrifiera den mindre passagerartrafiken via batterier; att det finns stor potential att minska utsläpp från större fartyg och lastfartyg med hybridisering; att helt elektrifierade lastfartyg också är möjliga, men för att utträtta annat transportarbete, exempelvis ersätta lastbilstransporter nära vatten i tätbebyggda områden; att potentialen för att bygga ut ladd- och landström är mycket stor.

Rapporten har också haft institutioner kring säkerhet i fokus. Att introducera ny teknik är kostsamt i tid och resurser, eftersom inblandade behöver visa upp att en ny teknik är lika säker som den existerande. Detta gäller oavsett om fartyg byggs för nationell eller internationell trafik: i Sverige finns funktionsbaserade krav och internationellt råder "alternative design"-processen given av IMO. Projekt som är först ut kommer ofrånkomligen att drabbas av högre kostnader än de som använder konventionell teknik. Inte bara för att tekniken i sig är dyrare utan för att processen är mer komplex. De ökade kostnaderna måste bäras av någon part, och det framgår av intervjuerna att det behöver diskuteras hur kostnaderna ska fördelas mellan statlig och privat sektor. Det gäller nationellt såväl som internationellt att det kan finnas en ovana hos aktörer att arbeta på det här sättet. Det är vidare inbyggt i processen att det inte är säkert att en tänkt design blir godkänd. Detta kan skapa osäkerheter och hämma utveckling.

För att mildra de ökade kostnaderna och minska riskerna i Sverige, särskilt angeläget vad gäller elektrifiering av fartyg i nationell trafik med batterier, är en ökad samverkan mellan aktörer en möjlig väg framåt. Flertal exempel på, och betydelsen av, hur detta har gått till i Nederländerna och Norge har givits i rapporten. Det kan handla om att skapa former för att dela erfarenheter mellan aktörer i olika projekt, utbildningar om hur genomför riskanalyser, och samarbeten mellan myndigheter och klassningssällskap för att utveckla nationella vägledning, med mera.

I nedan utkast till transformationskarta (eng. t-map) skisseras möjliga vägar framåt, baserad på tidigare diskussion i tidigare avsnitt. En sådan karta, och fram för allt vilken vision som ska nås, behöver självklart i praktiken skapas med alla aktörer samlade och inte i en enskild rapport.



Figur 50 - Transformationskarta för strategisk planering av elektrifiering av svensk nationell sjöfart

I figuren uppmärksammas att olika aktörer har olika roller och att behovet av koordinering och tillsättande av resurser är viktig. I den nederländska gröna given fanns som jämförelse ett stort antal åtgärder och handlingar planerade, fördelade efter roller. De processer, samarbetsformer och aktioner som påbörjas i syfte att påskynda elektrifieringen kommer att vara en nyckel för att klara av övriga teknikskiften, exempelvis till vätgas. Dessa teknikskiften har som beskrivits redan påbörjats av aktörer och kommer sannolikt att stöta på liknande utmaningar, eftersom dessa är generellt kopplade till introduktion av ny teknik.

8 REFERENSER

Bach, H., Bergek, A., Bjørgum, Ø., Hansen, T., Kenzhegaliyeva, A., & Steen, M. (2020). Implementing maritime battery-electric and hydrogen solutions: A technological innovation systems analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 87, 102492.

Bergek, A., Bjørgum, Ø., Hansen, T., Hanson, J., & Steen, M. (2021). Sustainability transitions in coastal shipping: The role of regime segmentation. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 12, 100497.

DNV (2011). Heavy fuel in the Arctic (Phase 1), rep. No.: 2011-0053. <https://pame.is/document-library/pame-reports-new/pame-ministerial-deliverables/2011-7th-ministerial-meeting-nuuk-greenland/304-hfo-phase-i-report/file>

DNV GL (2015). The future is hybrid. Tillgänglig vid: <https://www.dnv.com/maritime/publications/future-is-hybrid-download.html>

DNV GL (2017). ReCharge. Tillgänglig vid: https://www.nek.no/wp-content/uploads/2019/03/DNV-GL-2017-0101_ReCharge.pdf

DNV GL (2017b). Study on the use of fuel cells in shipping. Rapport för European Maritime Safety Agency.

DNV GL (2018a). Maritime Forecast to 2050 – Energy Transition Outlook 2018, DNV GL. Tillgänglig vid: <https://eto.dnv.com/2018/maritime>

DNV GL (2018b). Air emissions from shipping in the ASEAN region Report No.: 2018-0260, Rev. 1, for the Norwegian Maritime Authority

DNV GL (2018c). Analysis of available GHG emission reduction measures for the Norwegian domestic shipping segments, Report 2018-0181 for the Norwegian Ministry of Climate and Environment

DNV GL (2018d). Analyse av tiltak for reduksjon av klimagassutslipp fra innenriks skipstrafikk. For Miljødirektoratet. Rapport no. 2018-0181

DNV GL (2019a). Maritime Forecast to 2050 – Energy Transition Outlook 2019, DNV GL. Tillgänglig vid: <https://eto.dnv.com/2019>

DNV GL (2019b). Alternative fuels in the Arctic, Report No.: 2019-0226, Rev. 0. <https://www.pame.is/document-library/pame-reports-new/pame-ministerial-deliverables/2019-11th-arctic-council-ministerial-meeting-rovaniemi-finland/428-report-on-the-environmental-economic-technical-and-practical-aspects-of-the-use-by-ships-in-the-arctic-of-alternative-fuels/file>

DNV GL (2019c). Reduksjon av klimagassutslipp fra innenriks skipstrafikk, DNV GL rep.no. 2019-0939

DNV GL (2019d). FYLKESKOMMUNALE FERJEANBUD - MERKOSTNADER FOR LAV- OG NULLUTSLIPPSLØSNINGER. Memo till Klima- og miljødepartementet, 11DH4KPO-4/ NIRI.

DNV GL (2019e). Nullutslipp i 2026 for skip i verdensarvfjordene. Rapport för Sjøfartsdirektoratet, nr 11G34K4S-3

DNV GL (2019f). Evaluering av Enovas satsing på landstrøm. Teknisk rapport.

DNV GL (2020a). Maritime Forecast to 2050 – Energy Transition Outlook 2020. Technical report, DNV GL. Tillgänglig vid: <https://eto.dnv.com/2020>

DNV GL (2020b). Alternative fuels for Canada. A high-level roadmap towards low/zero emission shipping. Report No.: 2020-0822, Rev. 0 for WWF Canada

DNV (2020c). Study on electrical storage for ships. Rapport för European Maritime Safety Agency.

DNV (2021). Pathways to net zero. Teknisk rapport. Tillgänglig vid:

<https://www.dnv.com/news/new-report-pathway-to-net-zero-emissions-210507>

DNV (2022a). Hydrogen forecast to 2020. Teknisk rapport.

DNV (2022b). Maritime forecast 2022. Teknisk rapport.

Furset, L. B. S. (2013). Læring, nettverk og sentrale drivkrefter i berekraftige grønne innovasjoner i maritim sektor (Master's thesis).

Gjerset och Schjølset (2020). Elektrifisering av skipsfarten: Status for landstrøm i stamnetthavnene. Teknisk rapport.

Holtz och Obel (2020). PM TILL ENERGIMYNDIGHETEN: VAR HAMNAR DEN NYA ELANVÄNDNINGEN? – EN STUDIE AV ELANVÄNDNINGENS UTVECKLING PER LÄN TILL ÅR 2030.

IVL (2022). Styrmedel och scenarier för sjöfartens omställning. Teknisk rapport, nr C 665.

Jakobsen, E., & Helseth, A. (2021). Strategier for grønn maritim eksport. Oslo: Menon Economics.

Jivén et al. (2020). Fossilfri kollektivtrafik på vatten. Teknisk rapport.

Kersey, Jessica, Natalie D. Popovich, and Amol A. Phadke. "Rapid battery cost declines accelerate the prospects of all-electric interregional container shipping." *Nature Energy* 7.7 (2022): 664-674.

Lehmusto, M., & Santasalo-Aarnio, A. (2022). Mathematical framework for total cost of ownership analysis of marine electrical energy storage inspired by circular economy. *Journal of Power Sources*, 528, 231164.

MAN (2019). Batteries on board ocean-going vessels. Teknisk rapport. Tillgänglig vid: https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/batteries-on-board-ocean-going-vessels.pdf?sfvrsn=deaa76b8_14

Mao et al (2021). Repowering Chinese coastal ferries with battery-electric technology: Operational profiles of Chinese coastal ferries, their energy demand, and the implied battery system assessment. ICCT Working paper 2021-21.

Mjelde, A., Martinsen, K., Endresen, Ø. (2014). Marine Pollution bulletin, Volume 87 Issue 1-2 15 October 2014. Environmental accounting for Arctic shipping – A framework building on ship tracking data from satellites.

Mjelde et. al. (2019). Differentiating on port fees to accelerate the green maritime transition. *Marine Pollution Bulletin* Volume 149, December 2019, 110561.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0025326X19307052>

NRDC (2020). SETTING THE COURSE FOR GREEN SHIPPING IN CHINA — A Review of International Strategies to Further Low/Zero-Emission Shipping. Teknisk rapport, National Resource Defence Council.

Oostdam, S. (2021). A new age in seafaring? Analysing the Dutch approach to incentivise a zero carbon fleet. Master Thesis Series in Environmental Studies and Sustainability Science.

Santén et al. (2018). Elektrifiering av sjöfarten. Lighthouse report 2018.

Sæther, S. R., & Moe, E. (2021). A green maritime shift: Lessons from the electrification of ferries in Norway. Energy Research & Social Science, 81, 102282.

Sjøtun, S. G. (2019). A ferry making waves: A demonstration project 'doing' institutional work in a greening maritime industry. Norsk Geografisk Tidsskrift-Norwegian Journal of Geography, 73(1), 16-28.

SSPA (2022). Kaj-el Final report.

Steen, M., Bach, H., Bjørgum, Ø., Hansen, T., & Kenzhegaliyeva, A. (2019). Greening the fleet: A technological innovation system (TIS) analysis of hydrogen, battery electric, liquefied biogas, and biodiesel in the maritime sector.

Stortinget (2015). Representantforslag om bruk av nullutslippsteknologi i fergetransporten og bruk av ny teknologi i nærskipfarten. Tillgänglig vid <https://www.stortinget.no/nn/Saker-og-publikasjoner/Saker/Sak/?p=62907>

Strandenes, S. P. (2000). Quality incentives pay-off? Tillgänglig vid https://openaccess.nhh.no/nhh-xmlui/bitstream/handle/11250/164873/R73_00.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Tarkowski, M. (2021). Towards a more sustainable transport future—the cases of ferry shipping electrification in Denmark, Netherland, Norway and Sweden. In Innovations and Traditions for Sustainable Development (pp. 177-191). Springer, Cham.

Teknisk Ukeblad (2013). Batteri på skip sparer miljøet for 10 ganger så mye CO2 som batteri i biler. Tillgänglig vid: <https://www.tu.no/artikler/batteri-pa-skip-sparer-miljoet-for-10-ganger-sa-mye-co2-som-batteri-i-biler/233329>

Trafikverket (2022). Trafikverkets forsknings- och innovationsplan för åren 2022-2027. Tillgänglig vid <http://trafikverket.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1629752&dswid=863>

Transportstyrelsen (2018). Transportstyrelsens riktlinjer för batteri- och hybriddrivna fartyg. Tillgänglig vid <https://www.transportstyrelsen.se/globalassets/global/publikationer-och-rapporter/sjofart/transportstyrelsens-riktlinjer-batteri-och-hybriddrivna-fartyg-2021-02-25.pdf>

UMAS (2022). The Maritime Fleet of the USA – the current status and potential for the future. UMAS, London. Tillgänglig vid https://www.u-mas.co.uk/wp-content/uploads/2022/04/oc_jaf_final_report_20220119.pdf

VTI (2021). Sjöfartens användning av alternativa bränslen: trender och förutsättningar. Tillgänglig vid <http://vti.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1575743&dswid=-7152>

VTI (2022). Regeringsuppdrag om elektrifieringen av transporter: Elektrifieringen av sjöfarten – förutsättningar, nuläge och styrmedel. VTI rapport. Tillgänglig vid: <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1637476&dswid=-7788>





About DNV

DNV is the independent expert in risk management and assurance, operating in more than 100 countries. Through its broad experience and deep expertise DNV advances safety and sustainable performance, sets industry benchmarks, and inspires and invents solutions.

Whether assessing a new ship design, optimizing the performance of a wind farm, analyzing sensor data from a gas pipeline or certifying a food company's supply chain, DNV enables its customers and their stakeholders to make critical decisions with confidence.

Driven by its purpose, to safeguard life, property, and the environment, DNV helps tackle the challenges and global transformations facing its customers and the world today and is a trusted voice for many of the world's most successful and forward-thinking companies.