



CHALMERS



Dimensionering och utvärdering av energiförsörjningssystem för eldriven färja på sträckan Göteborg-Fredrikshamn

En jämförelse av batterier, bränsleceller och solceller utifrån aspekterna energiförbrukning, kostnad och miljöpåverkan

EENX16-VT25-20

Kandidatarbete inom Elkraftteknik

Agnes Cho

Elias Dotevall

Nelly Eskilsson

Melker Kling

Linnea Magnusson

Sofie Styff

INSTITUTIONEN FÖR ELEKTROTEKNIK

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2025

www.chalmers.se

KANDIDATARBETE 2025

Dimensionering och utvärdering av energiförsörjningssystem för eldriven färja på sträckan Göteborg-Fredrikshamn

En jämförelse av batterier, bränsleceller och solceller utifrån aspekterna
energiförbrukning, kostnad och miljöpåverkan

Agnes Cho, Elias Dotevall, Nelly Eskilsson, Melker Kling,
Linnea Magnusson, Sofie Styff



CHALMERS

INSTITUTIONEN FÖR ELEKTROTEKNIK

Avdelningen för Elkraftteknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2025

Dimensionering och utvärdering av energiförsörjningssystem för eldriven färja på sträckan
Göteborg-Fredrikshamn

En jämförelse av batterier, bränsleceller och solceller utifrån aspekterna energiförbrukning,
kostnad och miljöpåverkan

Agnes Cho, Elias Dotevall, Nelly Eskilsson, Melker Kling, Linnea Magnusson, Sofie Styff

© Agnes Cho, 2025.

© Elias Dotevall, 2025.

© Nelly Eskilsson, 2025.

© Melker Kling, 2025.

© Linnea Magnusson, 2025.

© Sofie Styff, 2025.

Handledare: Emma Grunditz, Chalmers tekniska högskola

Examinator: Jimmy Ehnberg, Chalmers tekniska högskola

Kandidatarbete 2025

Institutionen för Elektroteknik

Avdelningen för Elkraftteknik

Chalmers tekniska högskola

SE-412 96 Göteborg

Telefon +46 31 772 1000

Omslag: Bilden visar RoPax-färjan Stena Jutlandica, uppladdad av: Ann-Charlotte Ytterberg [1] .

Göteborg, Sverige 2025

Abstract

The electrification of the maritime sector plays a critical role in reducing emissions from transportation. This study evaluates the suitability of the energy systems, batteries and fuel cells for powering an electric ferry operating on the route Gothenburg - Frederikshavn. The evaluation is based on the key factors energy consumption, cost, and environmental impact. Additionally, the study examines the extent to which solar panels can contribute to the vessel's energy supply. The study is based on the RoPax ferry Stena Jutlandica and is conducted through literature studies, expert interviews, and technical calculations based on real operational data. The study is limited to these three energy systems and does not include simulations or comparison with fossil-based systems.

Two types of batteries, fuel cells and solar panels are compared and the result shows that LFP-batteries offers lower energy consumption, cost and environmental impact while Solid Oxide Fuel Cells with ammonia as fuel source have the advantage of energy capacity. Solar panels can provide a limited share compared to the other energy systems. Therefore they are not suitable as the primary propulsion source but can serve as a complementary system, contributing to the hotel load.

In summary, the study shows that LFP-batteries, due to their energy consumption and cost is the most advantageous energy system for an electric ferry on the route Gothenburg–Frederikshavn. Furthermore, solar panels can contribute with energy to partially cover the hotel load. To reduce charging power, an energy system containing both batteries and fuel cells could be an interesting alternative for further investigation.

This report is written in Swedish.

Keywords: Batteries, Dimensioning, Electric ferry, Energy supply system, Fuel cells, Propulsion system, RoPax-ferry, Solar panels

Sammandrag

Elektrifieringen av den marina sektorn är ett viktigt steg för att minska utsläppen från transportsektorn. Denna studie utvärderar vilket av energiförsörjningssystemen batterier och bränsleceller som är bäst lämpat för en eldriven färja på rutten Göteborg-Fredrikshamn, utifrån energiförbrukning, miljöpåverkan och kostnad. Det görs också en undersökning angående i vilken utsträckning solceller kan bidra med energi. Studien utgår från RoPax-färjan Stena Jutlandica och bygger på litteraturstudier, expertintervjuer och tekniska beräkningar baserat på verklig driftdata. Studien är avgränsad till att jämföra batterier och bränsleceller och omfattar inte simuleringar eller jämförelse med fossilbase-
rade system.

Två typer av batterier, bränsleceller och solceller jämförs och resultatet visar att LFP-batterier erbjuder lägre energiförbrukning, kostnad och miljöpåverkan medan fastoxidbränsleceller med ammoniak som bränsle är fördelaktigt vad gäller energikapacitet. Solceller kan endast bidra med en liten mängd energi i förhållande till de andra energiförsörjningssystemen. Därför lämpar det sig inte som huvudsaklig framdriftskälla, utan endast som ett bidrag till hotellasten.

Sammanfattningsvis visar studien att LFP-batterier med sin energiförbrukning och kostnad är det mest fördelaktiga energiförsörjningssystemet för en eldriven färja på sträckan Göteborg-Fredrikshamn. Dessutom kan solceller bidra med energi för att delvis täcka hotellasten. För att hålla nere på laddningseffekten kan ett energiförsörjningssystem bestående av en kombination av batterier och bränsleceller vara ett intressant alternativ för vidare undersökning.

Nyckelord: Batterier, Bränsleceller, Dimensionering, Elektrisk drivlina, Eldriven färja, Energiförsörjningssystem, RoPax-färja, Solceller

Förord

Kandidatarbetet har genomförts på Chalmers tekniska högskola på institutionen för Elektroteknik och avdelningen för Elkraftteknik. Projektet har pågått under vårterminen 2025 vilket har motsvarat 15 högskolepoäng och är en del av vår civilingenjörsutbildning inom Maskinteknik. Examinatorn för arbetet har varit Jimmy Ehnberg som är forskare på institutionen för Elektroteknik och handledare var Emma Grunditz som även hon är forskare på institutionen för elektroteknik.

Vi vill rikta ett stort tack till Emma som har bidragit med stöd, kunskap och konstruktiv feedback under processens gång. Hennes engagemang och expertis inom ämnet har varit avgörande för arbetet.

Vi vill även tacka Hans Tistrand och Naomi Andersson På Stena Teknik samt Per Mottram Hogström, universitetslektor vid Marin teknik, som ställde upp på intervjuer och bidrog med kunskap som har varit betydande för arbetsprocessen.

Akronymer

Nedan följer en lista av akronymer som har använts i arbetet, listade i alfabetisk ordning.

CdTe	Kadmiumtellurid
CIGS	Koppar-indium-gallium-selen
CO ₂ e	Koldioxidekvivalenter
DMI	Danmarks Meteorologiska Institut
DoD	Urladdningsdjup, Depth of discharge
GWP	Global uppvärmningspotential, Global warming potential
LCA	Livscykelanalys
LFP	Litiumjärnfosfat
LHV	Lägsta värmevärde, Lower Heating Value
LTO	Litiumtitanoxid
MGO	Marin gasolja, Marine Gas Oil
Nm	Sjömil, Nautical mile
NMC	Litium-nickel-mangan-koboltoxid
PEMFC	Protonutbytesmembran, Proton- exchange membrane fuel cell
PV	Fotovoltaiska
SMHI	Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut
SOC	Laddningsintervall, State of charge
SOFC	Fastoxidbränslecell, Solid oxide fuel cell

Innehåll

Akronymer	vii
1 Introduktion	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte och frågeställning	3
1.3 Omfattning	3
1.4 Avgränsningar	5
2 Teori	6
2.1 Modellering av framdrift för fartyg	6
2.2 Drivlina för fartyg	8
2.2.1 Konventionell drivlina	8
2.2.2 Elektrisk drivlina	9
2.3 Energiförsörjningssystem	9
2.3.1 Batterisystem	9
2.3.2 Bränslecellssystem	11
2.3.3 Solcellssystem	14
2.4 Miljöpåverkan	16
2.4.1 Livscykelanalys	16
2.4.2 Global uppvärmningspotential	16
2.4.3 Batterisystem	17
2.4.4 Bränslecellssystem	18
2.4.5 Solcellssystem	19
3 Metod och genomförande	21

3.1	Dimensionering av elektrisk drivlina	21
3.1.1	Studerad färja	22
3.1.2	Driftprofil	22
3.1.3	Effektbehov vid framdrift	24
3.1.4	Energibehov	27
3.2	Dimensionering av energiförsörjningssystem	28
3.2.1	Uppskattning av total energiförbrukning	29
3.2.2	Hotellast	33
3.2.3	Överdimensionering	33
3.3	Kostnadsuppskattning	34
3.3.1	Elpris	34
3.3.2	Batterisystem	35
3.3.3	Bränslecellssystem	37
3.3.4	Solcellssystem	40
3.4	Solcellssystemets genererade energi och dess täckningsgrad av hotellast	43
3.5	Uppskattning av miljöpåverkan	44
3.5.1	Batterisystem	44
3.5.2	Bränslecellssystem	46
3.5.3	Solcellssystem	49
3.6	Viktuppskattning av studerade drivlinor	50
3.7	Samhälleliga och etiska aspekter	52
4	Resultat	53
4.1	Effekt-och energidimensionering	53
4.1.1	Energiförsörjningssystemets energibehov	53
4.1.2	Solcellssystem	54
4.2	Livstidskostnad	56
4.2.1	Batterisystem	56
4.2.2	Bränslecellssystem	56
4.2.3	Jämförelse av batteri- och bränslecellssystem	57
4.2.4	Solcellssystem	58

Innehåll

4.3	Miljöpåverkan under färjans livstid	59
4.3.1	Batterisystem	59
4.3.2	Bränslecellssystem	61
4.3.3	Jämförelse av miljöpåverkan för batteri- och bränslecellssystem . . .	62
4.3.4	Solcellssystem	62
4.4	Påverkas lastkapacitet?	63
4.5	Kvalitativ resultatsammanställning	63
4.6	Rekommendation av energiförsörjningssystem	65
5	Diskussion	66
5.1	Batteri som energiförsörjningssystem	66
5.2	Bränsleceller som energiförsörjningssystem	67
5.3	Solceller som energiförsörjningssystem	68
5.4	Bibehålls färjans lastkapacitet?	69
5.5	Metodval	70
5.6	Resultatdiskussion	71
5.7	Samhälleliga och etiska aspekter	72
5.8	Förslag för framtida arbete	72
6	Slutsats	74
	Referenser	74

1

Introduktion

Transportsektorn står inför stora utmaningar i övergången till fossilfria drivmedel i takt med ökade krav på minskade koldioxidutsläpp. Sjöfarten utgör en betydande del av dessa utsläpp, vilket gör att elektrifierade fartyg har blivit ett alltmer relevant alternativ, särskilt för korta och medellånga sträckor. Detta kapitel ger en bakgrund till elektrifieringen av sjöfarten med fokus på de faktorer som påverkar dimensioneringen av ett energiförsörjningssystemet. Pågående projekt inom området lyfts fram som referensramar och sedan presenteras det specifika fall som ligger till grund för studien, en eldriven färja för sträckan mellan Göteborg och Fredrikshamn.

1.1 Bakgrund

Idag står transportsektorn för cirka 23 procent av de globala koldioxidutsläppen [2], vilket gör att branschen spelar en central roll i den globala klimatomställningen. För att minska utsläppen har EU och flera länder, däribland Sverige, antagit lagstiftning och deklarerationer som ämnar leda till en klimatneutral sjöfart [3]. Som en del av detta skrev Sverige tillsammans med 27 andra länder under Clydebank-deklarationen hösten 2021 [4], vilken avser att införa gröna zoner för sjöfarten där målet är att endast klimatneutrala fartyg får trafikera zonerna från år 2030. Det här innebär att nya fartyg behöver byggas, vilket medför höga kostnader. I [4] beskrivs ett projekt i Göteborgs hamn där det framgår att kostnaden för förnybara drivmedel kan vara två till fem gånger högre jämfört med fossila bränslen.

Ett alternativ till fossildrivna framdrivningssystem är idag elektrifierade system. I takt

med att elektrifieringen av sjöfarten accelererar blir dimensionering av energiförsörjningssystem en avgörande faktor i övergången till driftsäkra och eldrivna fartyg. I dagsläget är 1006 batteridrivna fartyg i drift, varav endast 18% av dessa är helt elektriska [5]. Den längsta elektrifierade sträckan trafikeras av den eldrivna färjan Ellen, som har en räckvidd på cirka 40 km [6].

Ett aktuellt exempel på elektrifiering inom sjöfarten är färjan Aurora, i drift mellan Helsingborg och Helsingör, som sedan 2018 är batteridrivna [7]. Aurora är dimensionerad för att klara en 40 minuters färd på sträckan som motsvarar cirka 2,6 sjömil [8]. Ett annat initiativ är Stena Elektra, en batteridrivna RoPax-färja (Roll-on/Roll-off Passenger) av Stena Line för upp till 1500 passagerare, som ska trafikera sträckan Göteborg–Fredrikshamn från år 2030 [9].

Utöver batteridrift undersöks även bränsleceller som ett alternativ för elektrifiering av sjöfarten. I dagsläget finns fyra fartyg med bränslecellsinstallationer i reguljär drift [10]. Ett aktuellt exempel är PowerCell Groups pågående projekt “World’s largest marine fuel cell installation” där två nya passagerarfärjor, ägda av Torghatten Nord, ska förses med bränsleceller för marint bruk [11]. För varje fartyg planeras bränslecellerna kunna generera 6,4 MW [12]. Dessa färjorna kommer att drivas av vätgas framställd med förnybar el, så kallad grön vätgas och förväntas reducera koldioxidutsläppen avsevärt jämfört med nuvarande fossildrivna färjorna som trafikerar denna sträcka. De är avsedda att trafikera sträckan mellan Bodø och Lofoten i Norge, vilket i dagsläget är en överfart som tar cirka tre timmar och 15 minuter och är cirka 50 sjömil [13].

Solceller har länge varit vanliga på fritidsbåtar för att minska behovet av batterier, men på större fartyg har denna teknik ännu inte fått samma genomslag. En fallstudie har gjorts för solcellsinstallation på ett kryssningsfartyg för en sträcka på 117 sjömil mellan Stockholm-Mariehamn [14], [15]. En begränsning med solceller är det yttre beroendet av tillräcklig strålning. Studien belyser att detta väderberoende gör det otillräckligt att enbart förlita sig på solenergi för att driva ett fartyg.

Elektrifiering av sjöfarten medför ett behov av att dimensionera energiförsörjningssystem utifrån ett fartygs driftförutsättningar [16]. För att fastställa energibehovet behöver flera faktorer beaktas, däribland fartygets motstånd i vatten, vilken påverkas av bland annat skrovets utformning, displacement och propeller. Vidare finns det faktorer från omgivande förhållanden såsom vind, vågor och strömmar. Även ruttens längd och genomsnittliga hastighet påverkar systemkraven. Lastförhållanden, som mängd passagerare och gods, har också betydelse då de påverkar det totala energibehovet. Dessa parametrar utgör en grund för att uppskatta dimensionen på energilagret och det drivsystem som krävs för att möta ett fartygs operativa profil.

1.2 Syfte och frågeställning

Projektet syftar till att dimensionera olika energiförsörjningssystem för drift av en eldriven färja på en ännu ej elektrifierad sträcka, med särskilt fokus på batterier och bränsleceller. I analysen av energiförsörjningssystem inkluderas två olika systemlösningar av batterier, bränsleceller och solceller för att belysa variationer i prestanda och lämplighet. Studien syftar till att utvärdera energiförsörjningssystemen utifrån energiförbrukning, kostnad och miljöpåverkan. Vidare ställs frågan om och i vilken utsträckning solceller ombord kan reducera kostnad och miljöpåverkan. Den huvudsakliga frågeställningen för projektet blir därför: Med dagens teknik, vilket slags energiförsörjningssystem är mest fördelaktigt utifrån aspekterna energiförbrukning, kostnad och miljöpåverkan, för en eldriven färja på sträckan Göteborg-Fredrikshamn?

1.3 Omfattning

Den planerade färdsträckan för studien är mellan Göteborg och Fredrikshamn. Sträckan motsvarar i dag, 159 km eller 86 nm som med Stena Lines befintliga färjor har en körtid på cirka tre och en halv timme [17], [18]. Valet av sträcka motiveras av att den är längre än tidigare elektrifierade färjerutter men också av företagets lokala närvaro samt ett särskilt intresse för projektet Stena Elektra.

Projektet utgår från färjan Stena Jutlandica eftersom det är en av Stena Lines RoPax-färjor som trafikerar sträckan Göteborg-Fredrikshamn [19]. Eftersom projektet utgår från den existerande färjan planeras inte någon nybyggnation. Målet är att i så stor utsträckning som möjligt behålla färjans nuvarande lastkapacitet och hastighet vid en övergång till eldrift.

För att kunna besvara den huvudsakliga frågeställningen identifieras flera delproblem. Det innefattar en analys av hur yttre faktorer påverkar energiförbrukningen. Vidare utförs en teknisk genomgång av energiförlusterna i energiförsörjningssystemen baserat på verkningsgrader. Projektet undersöker även om och hur en elektrisk drivlina påverkar färjans vikt och därmed lastkapacitet under förutsättning att hastigheten bibehålls.

Utöver de tekniska aspekterna ingår också en jämförelse av miljöpåverkan i form av global uppvärmningspotential (Global warming potential, GWP) för respektive energiförsörjningssystem. Ekonomisk hållbarhet analyseras genom att undersöka investerings- och driftkostnader. Slutligen undersöks möjligheten att använda solceller ombord, både utifrån tekniska och praktiska begränsningar, samt i vilken utsträckning det kan bidra med energi.

Elektrifiering av färjan innebär inte enbart tekniska utmaningar, utan även samhällliga och etiska överväganden. Faktorer som miljöpåverkan vid materialhantering och social tillgänglighet bör också beaktas i utvecklingen mot en mer hållbar sjöfart.

Projektet genomförs som en kombination av tekniska, miljömässiga och ekonomiska analyser, med syfte att ta fram ett beslutsunderlag för hur en färja kan elektrifieras på ett hållbart och energieffektivt sätt.

Elektrifiering av fartyg är relevant för flera aktörer, däribland rederier, energibolag, politiker och resenärer. För rederier innebär elektrifiering en möjlighet att minska bränslekostnader och utsläpp, medan politiker och resenärer kan se elektriska färjor som en viktig del

i arbetet mot klimatmålen. Elektrifieringen kan också bidra med förbättrad luftkvalitet i hamnområden.

1.4 Avgränsningar

För att göra omfattningen av arbetet rimlig appliceras ett antal avgränsningar. En avgränsning är att endast energiförsörjningssystemen batterier, bränsleceller och solceller undersöks. Därmed görs ingen jämförelse med färjor som drivs på fossila bränslen.

Arbetet avgränsas också till en litteraturstudie, intervjuer och beräkningar. Det utförs inte några simuleringar, som i till exempel beräkningsströmningsdynamik (Computational Fluid Dynamics, CFD) och Finit element analys (Finite Element Analysis, FEA) [20]. En prototyp konstrueras inte heller. Simuleringar och prototyper är viktiga medel för ett fullskaligt projekt, men eftersom detta är en övergripande studie bedöms simuleringar och prototyper dock inte nödvändiga för detta arbete.

Detaljnivån i modelleringen anpassas efter relevanta aspekter att ta hänsyn till för att besvara arbetets frågeställning. Väderförhållanden analyseras inte ingående, men en så kallad sea margin inkluderas för att ta höjd för dessa.

Laddningsinfrastruktur i hamnar analyseras inte i denna studie, utan antas vara befintlig där det krävs. Den nödvändiga laddeffekten kan förväntas vara mycket hög för att hålla de nuvarande tidtabellerna för Stena Jutlandica.

Utrustningen för tankning av flytande bränsle samt tillhörande system behandlas inte i denna rapport. Även tekniska hjälpsystem kopplade till bränslecellsdrift, såsom pumpar, kompressorer och kylsystem, faller utanför studiens omfattning. Drift av bogpropeller för finmanövrering tas inte heller i beaktande.

2

Teori

I detta kapitel redogörs de teoretiska resonemang som ligger till grund för studien. Här presenteras teori om framdrift av fartyg, drivlinor, energiförsörjningssystem och dess miljöpåverkan.

2.1 Modellering av framdrift för fartyg

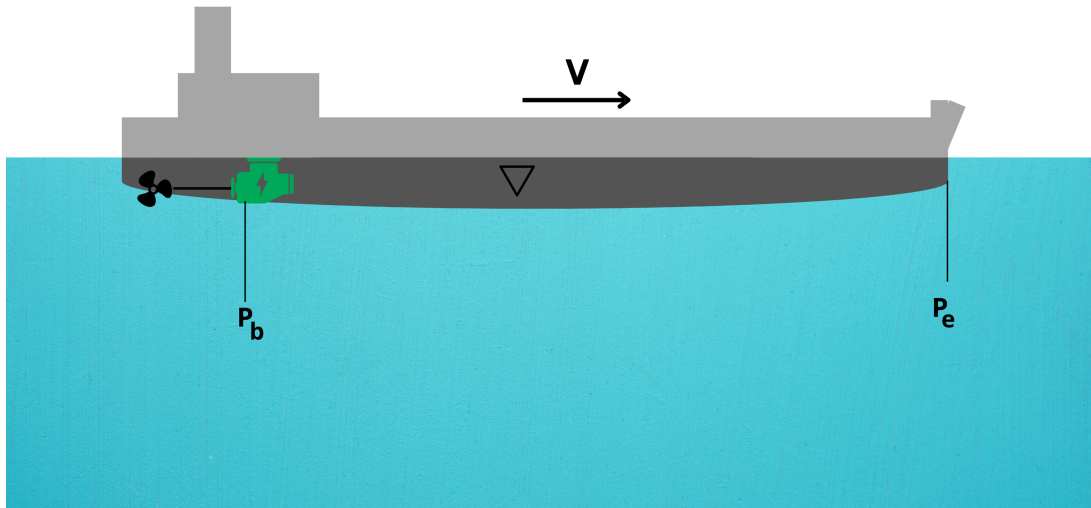
Vid beräkning av ett fartygs effektbehov och motstånd används ofta numeriska metoder med detaljerad skrovmodell och beräkningar av flödesdynamik. Metoderna syftar till att ge en praktisk uppskattning av fartygs framdrivningskraft och energibehov, utan behov av komplexa simuleringar eller fullskaliga mätningar [[21], kap 1]. För att förenkla uppskattningen av ett fartygs effektbehov kan Admiralitetsformeln användas, som genom en dimensionslös konstant C relaterar displacement, hastighet och installerad effekt [[21], kap 13], [22]. Formeln bygger på ett antagande om att fartyg med liknande skrov har en jämförbar hydrodynamisk prestanda och lämpar sig särskilt i tidiga skeden av fartygsdesign när detaljerad data saknas för att kunna genomföra jämförbara analyser. C kan användas enligt

$$P = \frac{\nabla^{2/3} \cdot v^3}{C} \quad (2.1)$$

där P motsvarar effekten i kW, ∇ motsvarar displacementet som beskriver vikten av det vatten som fartyget tränger undan i ton, och v hastigheten för färjan i knop.

I Figur 2.1 visas en sidovy av ett fartyg med markerade huvudparametrar. P_b avser den mekaniska effekten från motorn medan P_e motsvarar den effekt som krävs för att driva

fartyget framåt i en viss hastighet i stilla vatten. ∇ motsvarar displacementet och färjans rörelsehastighet representeras av v .



Figur 2.1: Fartyg sidovy

Under drift varierar P_e med fartygets hastighet och väderförhållandena.

Energi beräknas generellt som tidsintegralen av effekt enligt

$$E = \int P(t)dt \quad (2.2)$$

och fungerar som underlag för att dimensionera energiförsörjningssystem.

För att ta hänsyn till olika faktorer som kan påverka effektbehovet av ett fartyg adderas två olika säkerhetsmarginaler, sea- och engine margin [23]. Sea margin adderas för att ta hänsyn till motstånd som orsakas av exempelvis vind och sjögång som normalt ligger inom intervallet 10-25% [24]. Engine margin, vilken vanligtvis ligger inom intervallet 10-15%, adderas för att minska motorns bränsleförbrukning samt ha reservkraft för ökad hastighet [25].

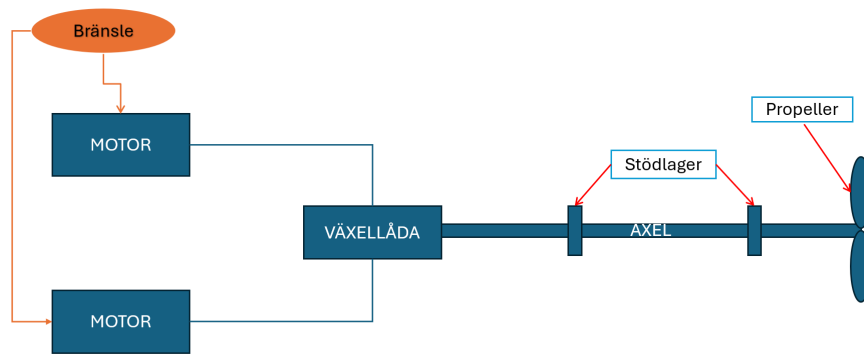
Det krävs även en effekt för att försörja de system som inte tillhör drivlinan med el [26]. Denna effekt kallas hotellast och behöver adderas till fartygets effektbehov. Systemen som utnyttjar denna kan exempelvis vara belysning och uppvärmning eller nedkylning av hytter. Hur stor effekt hotellasten motsvarar beror på fartygets utformning.

2.2 Drivlina för fartyg

En drivlina består av de komponenter som behövs för att driva ett transportmedel framåt. För fartyg innefattar detta vanligtvis motor, växellåda, propeller och propelleraxel. Konfigurationen påverkas av fartygets storlek, användningsområde och prestandakrav. I detta avsnitt beskrivs de ingående komponenterna i en konventionell- respektive elektrisk drivlina för ett fartyg.

2.2.1 Konventionell drivlina

En konventionell drivlina baseras vanligtvis på dieselmotorer vari bränslet förbränns och en del av värmeenergin omvandlas till mekanisk energi som sedan överförs till en roterande axel som ansluts till växellådan [16]. Vidare beskrivs växellådans syfte, som är att växla upp eller ner rotationshastigheten på propelleraxeln i förhållande till motorns varvtal, det vill säga hur snabbt propellern roterar jämfört med motorn. En vanlig typ av propeller är en med ställbara propellerblad [27]. Det innebär att man kan byta riktning på propellerns genererade kraft utan att behöva byta propelleraxelns rotationsriktning. Ett exempel på konfiguration visas i Figur 2.2, där två motorer driver en propeller via en samkörningsväxel. Andra konfigurationer förekommer också.



Figur 2.2: Exempel på konfiguration av konventionell drivlina

2.2.2 Elektrisk drivlina

En elektrisk drivlina består av energilagring, omriktare, elmotor, växellåda och propelleraxel som leder till en propeller. I dagsläget finns det ett flertal olika elmotorer som kan användas inom en elektrisk drivlina, däribland synkrona och asynkrona motorer. Vidare finns en frekvensomriktare som kan styra frekvensen och amplituden på spänningen till en växelspänningsmotor [28]. Växellåda, propelleraxel och propeller kan fungera på liknande sätt som för en konventionell drivlina.

2.3 Energiförsörjningssystem

Energiförsörjningssystem är det system som genererar, lagrar och distribuerar energi. Traditionellt sett är det vanligaste systemet i fartyg baserat på fossila bränslen. Som konsekvens av de miljökrav som ställs på sjöfarten är dock alternativa energiförsörjningssystem för fartyg under utveckling, såsom batterier och bränsleceller men även solceller, vilka beskrivs mer ingående nedan.

2.3.1 Batterisystem

Batterier består av flera celler som tillsammans lagrar och levererar energi. Varje cell innehåller en negativ elektrod, en positiv elektrod och en elektrolyt som möjliggör jontransport mellan elektroderna [29]. När batteriet sedan laddas rör sig jonerna i ett batteri

från positiv elektrod till negativ elektrod och vid användning av batteriet, det vill säga urladdning, sker det motsatta. Samtidigt pågår ett elektronflöde genom en yttre krets vilket kan driva en elektrisk last. För att uppnå önskad spänning och kapacitet kan flera battericeller serie- eller parallellkopplas. En sammansättning av sådana celler utgör en batterimodul. Genom att kombinera moduler i serie- och parallellt, bildas ett batteripack som i sin tur bildar ett batterisystem. Detta möjliggör både högre spänning och större energilagringsskapacitet, vilket är särskilt fördelaktigt i applikationer som eldrivna färjor.

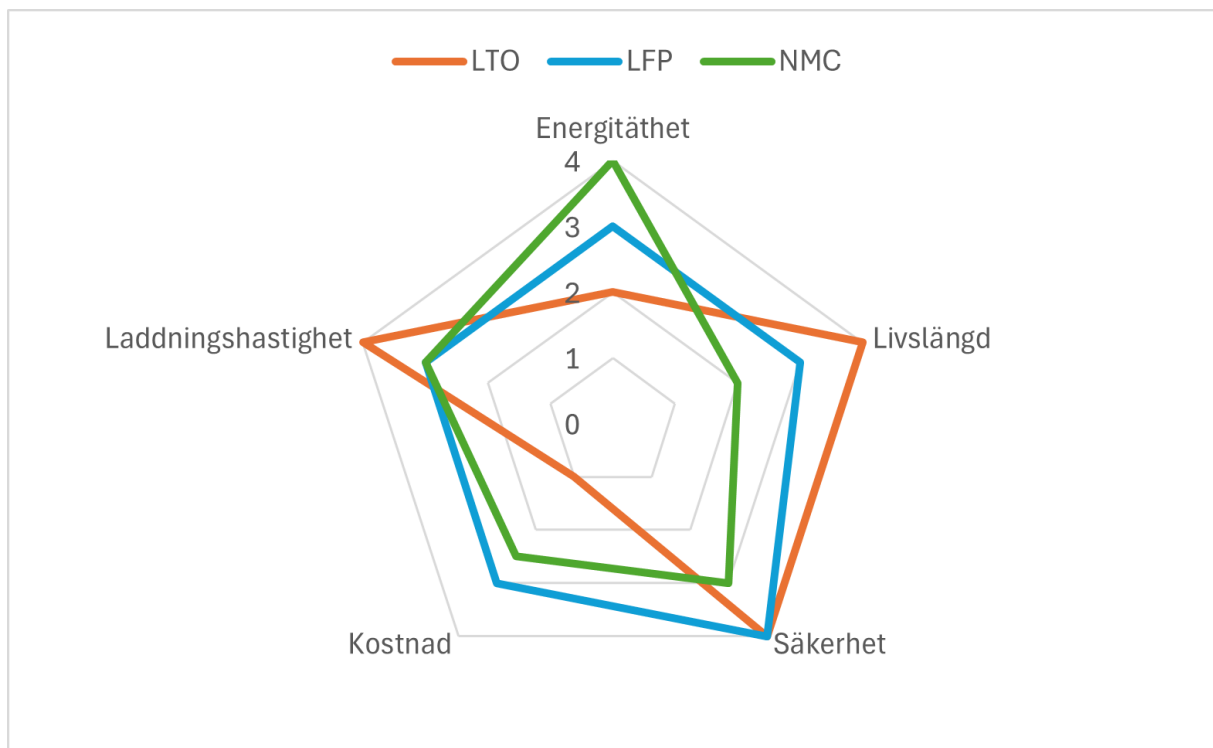
Batterisystem ombord på en eldrivna färjor kräver även omfattande säkerhetsåtgärder, inklusive robust kapsling, kylning och övervakningssystem [30]. Dessa krav leder till ökad systemvikt och därmed en lägre energitäthet jämfört med batteripaket i elbilar.

Ett batteris livslängd brukar räknas i cykler och cykellivslängden avser hur många gånger batteriet kan laddas och urladdas innan den anses ha nått slutet på sin livstid, vilket brukar sägas ligga vid 80% av den initiala batterikapaciteten [31]. Batteriets livslängd påverkas också av urladdningsdjupet (Depth of Discharge, DoD), det vill säga hur mycket av batteriets kapacitet som används vid varje cykel. Urladdningsdjupet motsvarar ofta cirka 40% av kapaciteten [31]. Ett optimal laddningsintervall (State of charge, SOC) för batterisystem motsvarar cirka 40-80% av kapaciteten [32]. Temperatur är också en kritisk faktor, där låga temperaturer ökar den interna resistansen, vilket leder till en minskad effektkapacitet [33]. Höga temperaturer kan påskynda nedbrytningen och förkorta livslängden på ett batteri.

Inom sjöfarten används enligt [34] idag främst tre typer av litiumjonbatterier, vilka är litiumjärnfosfat (LFP), litiumtitanat (LTO) och nickel-mangan-kobolt (NMC). Batterityperna namnges vanligen utefter materialet på den positiva elektroden, vilket är fallet för NMC och LFP [35]. Dessa har ofta grafit som material för den negativa elektroden. Om det däremot används LTO på den negativa elektroden utgår namngivningen från detta. Därav kan ett LTO-batteri ha NMC respektive LFP på den positiva elektroden. Dessa batterikemier skiljer sig något åt i uppbyggnad vilket ger dem olika egenskaper.

Prestandaegenskaperna för dessa batterier är jämförbara. Energitätheten är ett mått på hur mycket energi batteriet kan lagra i förhållande till vikt eller volym [36]. Bland dessa batterityper har NMC-batteri högst energitäthet och LTO-batteri lägst [37]. Livslängden är däremot längre för LTO-batterier medan både LFP- och NMC-batterier har kortare livslängd. LTO-batterier är särskilt lämpligt i miljöer där snabbbladning, hög säkerhet och lång hållbarhet prioriteras över kompakt energilagring. Vidare framgår i [37] att LTO-batterier är det dyraste alternativet medan LFP-batterier är det billigaste.

En jämförelse av egenskaperna för NMC, LFP och LTO baserat på data från [37] och [38] sammanfattas i Figur 2.3. Diagrammets skala sträcker sig från lägsta värde (1) i centrum till högsta värde (4) vid ytterkanten. Ett större område indikerar att batteritypen presterar bättre i det specifika kriteriet.



Figur 2.3: Jämförelse av egenskaper hos NMC-, LFP- och LTO-batterier

2.3.2 Bränslecellssystem

Bränsleceller har under de senaste åren blivit allt vanligare i olika typer av applikationer för bränsletillförsel inom transportsektorn. En bränslecell omvandlar lagrad kemisk ener-

gi från ett bränsle till elektrisk energi via en elektrokemisk reaktion [39]. Den definieras som en elektrokemisk cell med en anod där bränsle oxideras och en katod där oxidanten reduceras.

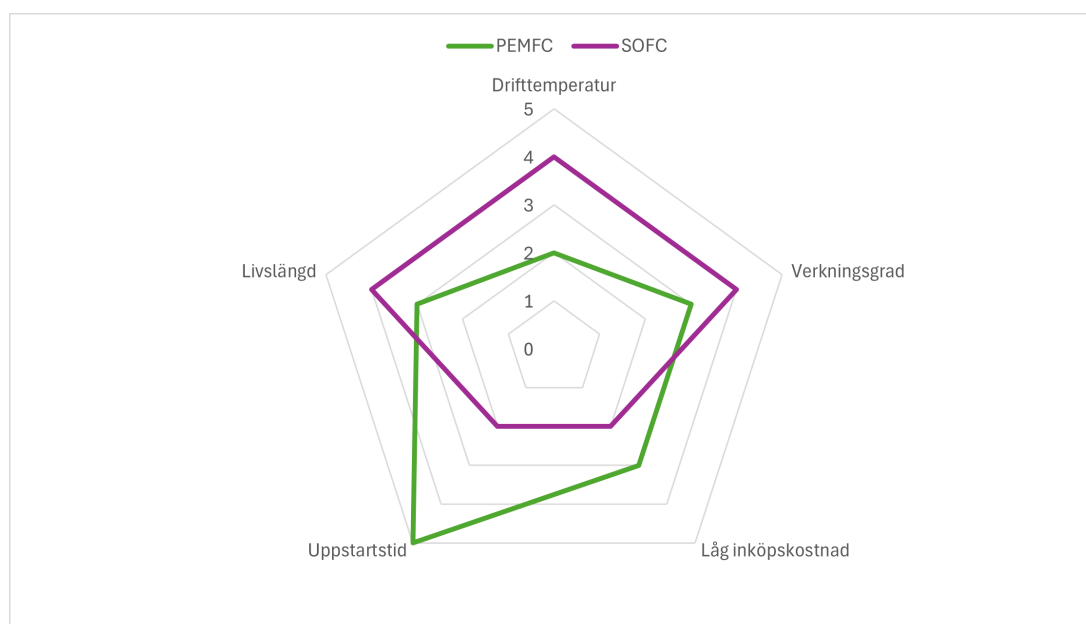
För att kunna generera ökad effekt och spänning används en sammansättning av flertalet bränsleceller, en så kallad stack [40]. Denna integreras med kompressorer, pumpar, sensorer, kylmedel, bränsle och andra nödvändiga stödsystem. Beroende på val av bränsle kan användningen av bränsleceller resultera i högre energieffektivitet jämfört med en förbränningsmotor [41], ett netto-noll utsläpp av koldioxid, samt inga förorenande utsläpp [42].

Bränslecellstypen protonutbytesmembran (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) konverterar direkt den kemiska energin från en elektrokemisk reaktion till elektrisk energi. I [43] har PEMFC en energiomvandlingseffektivitet på 55%. Detta i kombination med väte som bränsle ger bränslecellen ytterligare fördelar i form av låg klimatpåverkan och hög specifik energi. En annan fördel är att processen kan utföras antingen i rumstemperatur eller låga drifttemperaturer, vilket innebär snabbare kylning och uppvärmning, som i sin tur möjliggör snabb uppstart och anpassning till förändrat effektbehov [44].

Fastoxidbränslecellen (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) har till skillnad från PEMFC en högre drifttemperatur, vilket medför flexibilitet i val av bränsle [45]. Förbränning av exempelvis väte, metanol, naturgas, diesel och ammoniak kan ske, både i gas- och flytande form. Bränslen i flytande form medför en högre energitäthet än för alternativ i gasform [46]. Även SOFC har potential att leverera en verkningsgrad med ett värde runt 60% och med ett drifttidsrekord på 10 år identifieras den som en lovande teknologi för fartyg med längre distanser [45]. Däremot har systemet, som konsekvens av den högre drifttemperaturen, en lång uppstartstid och är svåradaptat till hastighetsförändringar. Detta innebär att det skulle behöva interageras i någon form av hybridlösning, exempelvis med batterier för att kunna klara av hastighetsförändringarna under en färdsträcka.

I Figur 2.4 jämförs ett urval av tekniska egenskaper för bränslecellsvarianterna PEMFC och SOFC. Diagrammets skala sträcker sig från lägsta värde (1) i centrum till högsta värde

(5) vid ytterkanten. Ett större område inom en kategori indikerar att bränslecellstypen presterar bättre i det specifika kriteriet. Datan som används är hämtad från [47] och [45].



Figur 2.4: Jämförelse av egenskaper hos PEMFC och SOFC

För både PEMFC och SOFC kan väte användas som bränsle. Vätet kan vara i antingen gas eller flytande form. I [48] beskrivs dock en klar nackdel med väte, vilket är dess låga energitäthet per volymenhet, samt dess explosivitet och lättantändliga egenskaper. Även i flytande form medför vätet en energitäthet som är 4,5 gånger lägre än det vanliga alternativet för marint bränsle som är marin gasolja (Marine gas oil, MGO). Bevarandet av vätet i flytande form kräver dessutom kraftig isolering, då temperaturen behöver hållas vid -253°C . Ännu en risk med lagring av väte i flytande form är att en del förångas dagligen då tankarna inte är helt täta [49]. Denna förlust kan ligga på cirka 0,1% per dag när en effektiv behållare används.

Användning av SOFC med metanol medför ett flertal fördelar. Bland annat finns stor bredd av framställningsmetoder och bränslet går att göras kolneutralt med förnybar energi [46]. Används istället ammoniak som bränsle till SOFC är fördelen att bränslet redan produceras storskaligt och omfattas av etablerade säkerhetsrutiner [48]. En lagringstemperatur på -33°C och en energitäthet som är 2,9 gånger lägre än för diesel underlättar lagringen till havs. En klar nackdel med alternativet är dock att ammoniak är giftigt,

vilket kan ge konsekvenser för naturlivet vid läckage och skador för de som arbetar med det.

För att avgöra den faktiska mängden energi som kan utvinnas från bränslet, utan att inkludera den latent värmeenergi i vattenånga som bildas vid förbränningen, kan lägre värmevärde (LHV) användas [50]. Eftersom vattenången inte påverkar den effekt som levereras från bränslecell till motor är LHV ett relevant värde att använda vid dimensionering av bränslemängd. Denna faktor varierar för de olika bränslealternativen och utgår från förbränning av en massenhet bränsle [50].

2.3.3 Solcellssystem

Solceller omvandlar ljusenergi till elektricitet genom den fotovoltaiska effekten [51]. Fotovoltaisk teknik innebär att solenergi direkt omvandlas till likström genom solceller. Det finns flera faktorer som påverkar solcellers verkningsgrad, såsom temperatur, solljusexponering, samt damm och partiklar som samlas på solcellens yta [52]. När temperaturen stiger minskar verkningsgraden för omvandlingsprocessen från solenergi till ström [53].

När man idag talar om solceller delar man ofta in dem i tre generationer. Den första generationens solceller består av mono- och multikristallina solceller [54]. Den andra generationen, tunnfilmsceller, använder samma teknologi men de är tunnare än första generationens solceller. Den tredje generationens solcellsteknik är fortfarande på forskningsstadiet, men den förväntas ge ökad effektivitet jämfört med de tidigare generationerna.

I [52] presenteras en lösning för att öka solcellers motståndskraft mot det krävande havsklimatet, där hög salthalt och luftfuktighet kan orsaka korrosion. För att skydda solcellerna föreslås användning av galvaniserade metaller eller andra korrosionsskyddande beläggningar, samt inkapsling med extra glasskivor.

Första generationens solceller använder kristallina kiselplattor för att omvandla solenergi till likström, med de två typerna mono- och multikristallina solceller [54]. Vidare beskrivs att monokristallina solceller produceras genom den så kallade Czochralskiprocessen, vilket

är en arbetsintensiv process som kräver speciella verktyg. Detta gör slutprodukten dyr, men ger en hög teoretisk verkningsgrad på upp till 26,1% i laboratorium [54]. Konventionella solceller har ofta något lägre verkningsgrad. Monokristallina har en årlig nedbrytning som uppskattas till 0,93% [55]. Multikristallina celler skapas genom att kombinera olika kristaller. Under tillverkningsprocessen kyls de smälta kristallerna i en grafitfylld form. Denna form kan återanvändas, vilket gör dem mer kostnadseffektiva jämfört med monokristallina solceller, men de har en något lägre verkningsgrad som följd [56].

Andra generationens solcellsteknik bygger på samma grund som första generationen, där kiselplattor används som bas. Skillnaden är att dessa solceller är betydligt tunnare, från 350 μm ner till tunnfilmsceller med en μm tjock kiselplatta [54]. Vidare beskrivs att det som följd gör dem avsevärt billigare att producera eftersom materialkostnaden minskar, men det leder också till en lägre verkningsgrad jämfört med första generationens solceller.

Det finns tre huvudkategorier inom andra generationens solceller vilka är kadmiumtellurid (CdTe)-, koppar-indium-gallium-selen (CIGS)- och amorfa kisel-solceller [57]. CdTe beskrivs som den solcellstyp som har kortast återbetalningstid och de lägsta koldioxidutsläppen samt har en teoretisk verkningsgrad uppmätt till 23,3% [54]. Däremot pågår en debatt kring användningen av kadmium på grund av dess mycket giftiga egenskaper i ren form. Detta gör även återvinningsprocessen av denna solcellstyp dyr och komplicerad. Den har en årlig nedbrytning på cirka 0,3% [58]. I [54] beskrivs att CIGS-solceller är lätta och böjliga, vilket gör dem mycket anpassningsbara jämfört med många andra stela solcellstyper. Vidare beskrivs att Amorfa kisel-solceller är relativt billiga att tillverka eftersom lågtemperaturprocesser kan implementeras, vilket möjliggör användning av flexibla substrat, såsom billiga polymermaterial. Den största nackdelen med amorfa kisel-solceller är deras instabilitet och relativt låga verkningsgrad på 13,8% [54].

I [54] beskrivs problemen som kvarstår innan tredje generationens solceller kan införas på den kommersiella marknaden. Problemen är bland annat att det kvarstår behov av testning och forskning då det fortfarande finns brister med stabilitet, verkningsgrad och långsiktig nedbrytning. Tredje generationens solceller omfattar färgämnessensiterade, po-

lymerbaserade, nanokristallbaserade och koncentrerande solceller. Koncentrerande solceller använder speglar och linser för att fokusera solljus på små ytor och kan kombineras med olika solcellstyper, där flerövergångssolceller har visat den högsta bekräftade verkningsgraden hittills på 47.6% i laboratorium [54].

2.4 Miljöpåverkan

Vid drift av fartyg är det viktigt att förstå vilka miljökonsekvenser olika metoder för energiförsörjning medför. Valet av energiförsörjningssystem har en avgörande roll för fartygets totala miljöpåverkan, från produktionen till drift och slutligen återvinning. Detta avsnitt presenteras teori angående miljöpåverkan kopplade till batterier, bränsleceller och solceller.

2.4.1 Livscykelanalys

En livscykelanalys (LCA) är en väl utarbetad metod för att uppskatta en produkts miljöpåverkan genom att följa resursflöden och utsläpp från råmaterialutvinning till användning och slutligen avfallshantering. Metoden är särskilt användbar för att analysera komplexa tekniska system och identifiera vilka delar av livscykeln som har störst miljöpåverkan och därmed kan anses ha högst prioritet i ett förbättringsarbete. Resultaten ligger ofta till grund för hållbarhetsbedömningar, miljömärkning och utveckling av miljövänligare produkter [59]. Under inventeringsfasen samlas kvantitativa data om energi- och materialflöden samt utsläpp till luft, vatten och mark. Denna data kopplas sedan till olika miljöpåverkanskategorier, till exempel klimatpåverkan, försurning eller resursförbrukning. En indikator som kan användas är global uppvärmningspotential (GWP).

2.4.2 Global uppvärmningspotential

Ett sätt att undersöka miljöpåverkan är att använda GWP, vilket kan mätas i koldioxidekvivalenter. Att mäta i koldioxidekvivalenter innebär att varje växthusgas omräknas till den mängd koldioxid som skulle ge motsvarande klimatpåverkan, vilket gör att olika

utsläpp kan jämföras på ett enhetligt sätt [60]. För till exempel fartyg kan detta uttryckas i massa koldioxidekvivalenter per använd el-energi (kg CO₂e/kWh).

2.4.3 Batterisystem

Batterier är en viktig del av utvecklingen mot ett samhälle som inte är beroende av fossila bränslen. Trots detta används ofta fossila bränslen för de processer som krävs för tillverkningen. Batteriers miljöpåverkan beror till stor del av dess sammansättning och var batteriet tillverkas. De faser som har störst miljöpåverkan i batteriets livscykel är utvinning- och tillverkningsfasen, då dessa faser är mest energikrävande [61]. De metaller som krävs för tillverkningen av batterier är exempelvis litium, nickel, kobolt och aluminium.

Hur stor miljöpåverkan utvinningen har beror på batteriets kemiska sammansättning. Till exempel innehåller LFP-batterier inte lika stora andelar nickel och kobolt som NMC-batterier gör, vilket är fördelaktigt då utvinningen av Nickel och Kobolt bidrar till växthusgasutsläpp och svaveloxidutsläpp [62].

För LFP-batterier används ofta hydrometallurgi och direkt återvinning som återvinningsmetoder medan NMC-batterier ofta återvinns med hydrometallurgi och pyrometallurgi [63]. Hydrometallurgi innebär att batterier först förbehandlas och mals ned. Metaller löses sedan upp i syror som svavelsyra eller tiourea och metallåtervinning tillämpas via till exempel utfällning eller elektrolys [64]. Processen ger hög selektivitet, lägre miljöpåverkan än pyrometallurgi och är effektiv för återvinning av litium, nickel, kobolt och mangan. Pyrometallurgi innebär upphettning i ugn där organiska ämnen förbränns och metaller som nickel, kobolt och koppar koncentreras i en smälta [64]. Metoden kräver hög energiförbrukning och medför risk för utsläpp av farliga ämnen så som Polybromerade dibensofuraner och Naftalen [65].

2.4.4 Bränslecellssystem

Ett potentiellt miljövänligt alternativ är bränsleceller. Bränslecellers miljöpåverkan beror på fler faktorer än endast valet av bränsle. Både PEMFC och SOFC består till stora delar av metall, främst rostfritt stål som kan återvinnas många gånger utan att få försämrade kvalitet [66]. Möjliga återvinningsprocesser kan vara hydrometallurgi eller pyrometallurgi som även tillämpas för batterier.

Platina är ett avgörande material vid tillverkning av PEM-celler, främst på grund av dess funktion i katalysatorn [67]. Enligt [68] står platina för 63,5% av CO_2e vid tillverkning av en 48 kW PEMFC stack. Om återanvänd platina används istället för jungfrumaterial kan CO_2e minska med 29%.

Miljöpåverkan under användningsfasen av en bränslecell beror i hög grad på valet av bränsle. För PEMFC är vätgas ett vanligast alternativ och kommer med fördelar som att det endast genererar vatten som restprodukt och inte ger upphov till några CO_2 -utsläpp vid användning [48]. Väte kan även framställas på ett miljövänligt sätt genom elektrolys med el från förnybara energikällor, såsom vindkraft eller solceller. Detta så kallade gröna väte medför en produktion utan utsläpp av växthusgaser, där restprodukterna utgörs av syrgas och vatten [69]. Trots detta är endast cirka 0,6% av den globala väteproduktionen grön, och kostnaden för denna metod är två till fem gånger högre än för grå vätgas [47]. Den senare nämnda hade ett genomsnittligt inköpspris på 1,27 USD per kg under 2020. Grå vätgas är en av de minst miljövänliga formerna och står för cirka 73% av den totala produktionen globalt. Den framställs genom ångreformeringsprocess av naturgas, en process som medför betydande utsläpp av koldioxid.

För SOFC finns möjligheten att välja flera olika typer av bränslen. Ett alternativ är ammoniak, vars produktion vanligtvis utgår från den så kallade Haber-Bosch metoden, där vätgas och kväve konverteras till ammoniak [70]. Det går därmed att framställa grön ammoniak genom att använda grönt väte och extrahera kvävgas från luften med hjälp av förnybar energi [48]. För närvarande utgör dock grön ammoniak mindre än 1% av den

totala ammoniakproduktionen [71]. Även metanol går att framställa på ett mer miljövänligt sätt. Traditionell framställning utgår från fossila bränslen, men grön metanol kan istället syntetiseras med hjälp av biometan eller genom att kombinera grön vätgas med koldioxid infångad från atmosfären eller industriella processer [72]. Förnybar energi används då som energikälla i framställningen. Koldioxidinfångning är en metod som är under utveckling och antalet anläggningar förväntas öka de kommande åren. År 2023 fanns det 41 anläggningar i bruk för koldioxidinfångning [73].

2.4.5 Solcellssystem

Framställningen av solceller kräver en stor mängd energi, vars produktion bidrar till negativ miljöpåverkan. Produktionen av solceller sker främst i Kina och där används ofta fossila bränslen till framställningen [74]. Den energi som krävs för att tillverka solceller kan ta cirka tre år för solcellen att producera, vilket motsvarar den så kallade energiåterbetalningstiden [75].

I [76] presenteras tillverkning - och återvinningsprocesser för monokristallina- och CdTe solceller. För att solceller ska vara ett miljövänligt alternativ är korrekt återvinning avgörande eftersom tillverknings- och återvinningsprocessen är mycket energiintensiv, samt att solceller i vissa fall innehåller mycket giftiga ämnen så som kadmium. Råmaterialen bryts i gruvor och genomgår kemiska processer för att nå den renhet som krävs. Själva tillverkningen är mycket energikrävande, särskilt eftersom moduler generellt pressas samman under högt tryck och temperatur. Enligt [77] består solceller till cirka 70% av glas och dess framställning är särskilt energikrävande. Denna process kräver att sand och andra ämnen hettas upp till cirka 1500°C innan materialet formas [78].

I [79] beskrivs hur GWP för en kvadratmeter monokristallin solcellsmodul påverkas beroende på var tillverkningen sker. Studien visar att det kan skilja sig med upp till 55% beroende på om produktionen sker i Norge eller Malaysia, vilket främst beror på variationer i energimixen. Under användning krävs en viss mängd vatten och kemikalier krävas för att hålla solcellerna rena från salt och smuts, även om regn naturligt bidrar till att delvis hålla rent [80].

Materialåtervinningen av solceller genomförs med olika metoder beroende på solcellstyp. Generellt används värme samt en blandning av mekaniska och kemiska processer för att skapa mindre beståndsdelar och dela upp de olika materialen med hjälp av filter och roterande trummor [76]. För CdTe kan 90% av solcellens vikt återvinnas samt 95% av Kadmium och Tellur, vilket minskar resurser som krävs för framtida produktion [76].

3

Metod och genomförande

I det här kapitlet beskrivs den metodik som ligger till grund för studien. I ett tidigt skede kontaktades företag och personer relevanta för studien för att få utlåtande från experter inom området. Syftet var att få rimliga perspektiv och att etablera viktiga kontakter för relevant data samt för att få bekräftande av gjorda antaganden. Intervjuer hölls med Hans Tistrand och Naomi Andersson, i deras roll som projektledare på Stena Teknik samt Per Mottram Hogström i hans roll som universitetslektor vid Marin teknik på Chalmers Tekniska Högskola. Utöver detta utfördes en bred litteraturstudie av tidigare forskning om elektrifierade fartyg, vilken pågick under hela arbetet.

Modellerade komponenter är tänkta att representera typiska produkter på marknaden. Det innebär att datan baserades på jämförande rapporter utifrån det som vanligtvis förekom i verkliga installationer.

3.1 Dimensionering av elektrisk drivlina

För att kunna besluta vilket energiförsörjningssystem som var lämpligast behövde den elektriska drivlinan dimensioneras och energi- och effektbehovet bestämmas. Vid dimensionering av den elektriska drivlinan förutsatte studien att färjan skulle genomgå en eftermontering, där den nuvarande konventionella drivlinan skulle ersättas av en helektrisk drivlina. Utöver installationen av den elektriska drivlinan antogs det att inga ytterligare förändringar skulle göras av färjans konstruktion. De existerande propellrarna, växellådorna samt skrovet användes därför i projektet. Dimensioneringen av drivlinan utgick

från den valda referensfärjan, Stena Jutlandica, och en metod baserad på admiralitetsformeln. Driftprofilen analyserades utifrån verklig loggad hastighetsdata. Nedan presenteras metoderna som låg till grund för övergången till elektrisk drivlina.

3.1.1 Studerad färja

Projektet utgick från den existerande RoPax-färjan Stena Jutlandica som trafikerar sträckan Göteborg-Fredrikshamn sedan många år och vars specifikationer presenteras i Tabell 3.1.

Tabell 3.1: Specifikationer för Stena Jutlandica [81], [82]

Specifikation	Värde	Enhet
Längd	184,3	[m]
Bredd	29,3	[m]
Lastkapacitet passagerare	1 500	[personer]
Lastkapacitet bilar	550	[st]
Bruttoton (Färjans totalt inneslutna volym)	29 691	[ton]
Max-hastighet	21,5	[knop]
Djupgående	6	[m]
Dieselmotor	4 x MAN 9L 40/54	
Motoreffekt	25 920	[kW]

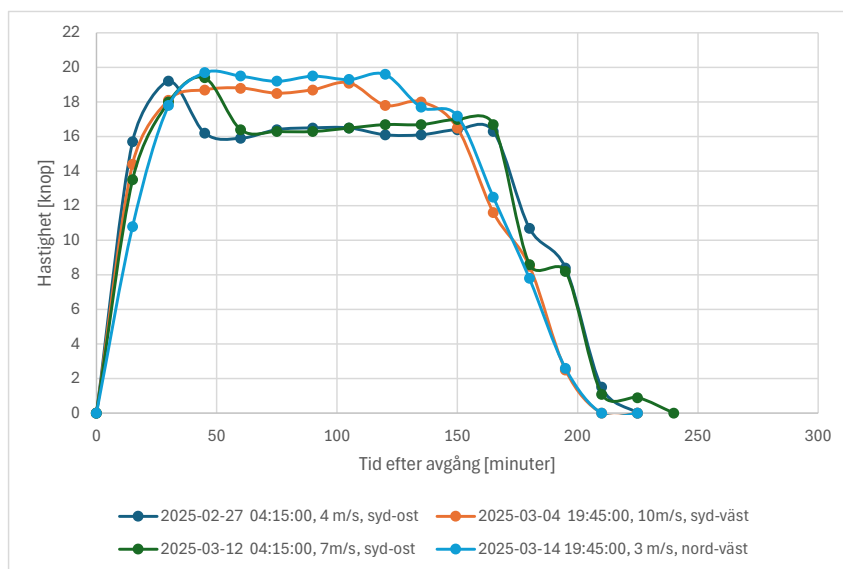
I [83] beskrivs drivlinans uppbyggnad och dess ingående komponenter. Varje motor har en installerad effekt på 6 480 kW och är monterad i par, där varje motorpar är anslutet till en separat ingång på växellådan. Färjan är utrustad med dubbelingångs marina reduktionsväxellådor av typen Renk Tacke NDSHL Z600. Från växellådorna överförs kraften via propelleraxlar till två ställbara KaMeWa-propellrar med en diameter på 4800 mm. För att minska den mekaniska belastningen är stödlager monterade längs propelleraxlarna [84]. Stena Jutlandica är idag utrustad med NMC-batterier som används för att driva bogpropellrar och assistera vid hamnmanövrering, vilket bidrar till minskade utsläpp i hamnen. [85], [32].

3.1.2 Driftprofil

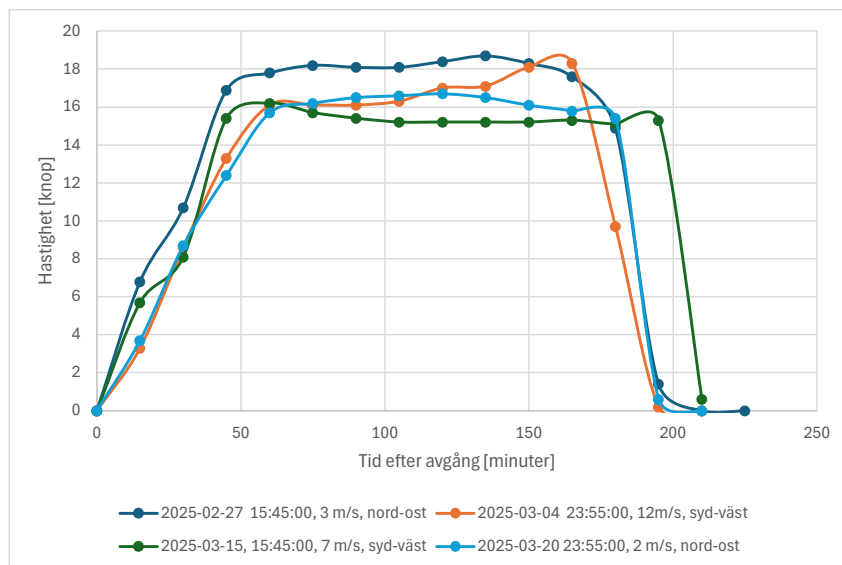
Data om färjans drift i form av hastighet över tid låg till grund för de beräkningar av effektbehov och energiförbrukning som användes. Driftdata för Stena Jutlandica hämta-

des från hemsidan *Sea Web* och omfattade data från de senaste 30 dagarna [86]. *Sea Web* är en databas som samlar in information om olika fartyg, inklusive hastighet, med en samplingsperiod på 15 minuter när fartygen är i rörelse. De olika turerna (Fredrikshamn-Göteborg samt Göteborg-Fredrikshamn) har något skilda driftprofiler vilket ses i Figur 3.1 och Figur 3.2. Detta orsakas bland annat av Göteborgs hamns geografiska läge. Färjan behöver vända och hålla en lägre hastighet inom Göteborgs skärgård, vilket inte behövs vid utpassage från Fredrikshamn. Driftprofilerna kom därför att behandlas individuellt.

Baserat på fyra olika avgångar under februari och mars 2025 togs en genomsnittlig driftprofil för varje rutt fram. Av de olika avgångarna var två under dagtid och två nattid. De hade även olika vindförhållandena för att representera den generella driftprofilen. Vinddata hämtades från Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI) från mätstation Vinga [87]. Denna station valdes då det är den yttersta mätstationen i färdriktningen från Göteborg till Fredrikshamn.

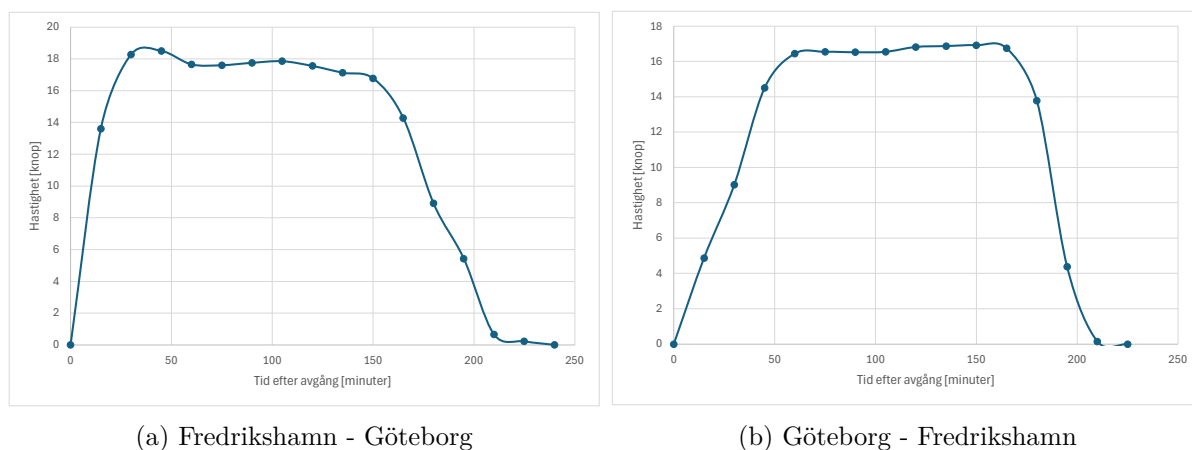


Figur 3.1: Loggade driftprofiler för ruten Fredrikshamn - Göteborg



Figur 3.2: Loggade driftprofiler för rutten Göteborg - Fredrikshamn

Använda driftprofiler presenteras i Figur 3.3. Dessa driftprofiler låg till grund för beräkningarna för effekt och energiförbrukning. Den insamlade datan hade därför avgörande betydelse för att kunna uppskatta energi- och effektbehovet under en representativ tur, vilket motsvarar en enkelresa.



Figur 3.3: Använda driftprofiler för respektive rutt

3.1.3 Effektbehov vid framdrift

Eftersom Stena Jutlandica i dagsläget är utrustat med dieselmotorer och målet var att ersätta dessa med elmotorer, krävdes en ny uppskattning av den installerade effekten.

3. Metod och genomförande

För att kunna bestämma elmotorns högsta mekaniska uteffekt under kontinuerlig drift, $P_{b,ny}$ installerad, behövde admiralitetskonstanten, C , först uppskattas utifrån data från Stena Jutlandicas specifikationer. Utifrån dieselmotorernas installerade effekt, $P_{b,installerad}$ uppskattades effektbehovet för motorn vid designfart i stilla vatten, $P_{b,design}$, utan de estimerade marginalerna för Sea- och Engine margin enligt

$$P_b[\text{W}] = \frac{P_{b,installerad, [\text{W}]}}{(1 + \text{sea margin})} \quad (3.1a)$$

$$P_{b,design}[\text{W}] = \frac{P_b, [\text{W}]}{(1 + \text{engine margin})} \quad (3.1b)$$

Därefter beräknades C utifrån Stena Jutlandicas nuvarande maximala hastighet, v_{\max} , samt displacementet, ∇ . Beräkningen utfördes enligt

$$C = \frac{\nabla_{[\text{ton}] }^{2/3} \cdot v_{\max, [\text{knop}]}^3}{P_{b,design, [\text{kW}]}} \quad (3.2)$$

Relevant indata och de beräknade värdena som använts finns presenterade i Tabell 3.2.

Tabell 3.2: Data för beräkning av P_b , $P_{b,design}$ och C baserat på befintlig data från Stena Jutlandica

Specifikation	Värde	Enhet	Källa
P_b , installerad	25 920	[kW]	[81]
Sea margin	17,5	[%]	[24]
Engine margin	12,5	[%]	[25]
v_{\max}	21,5	[knop]	[81]
∇	18 400	[ton]	[86]
P_b	22 060	[kW]	
$P_{b, design}$	19 600	[kW]	
C	353,25		

Det beräknade värdet på C användes därefter för att bestämma effektbehovet över ett intervall, $P_{b, design, ny}$, vid de hastigheter som tagits fram från driftprofilen och presenteras

3. Metod och genomförande

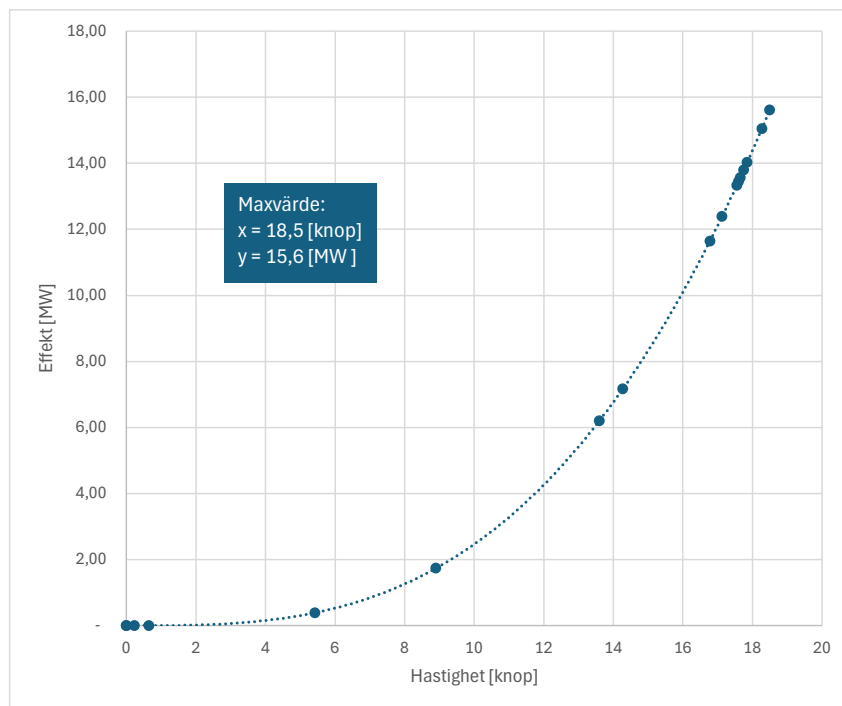
i Figur 3.3. För att göra detta beräknades effekten vid varje uppmätt hastighet med 15 minuters intervall. Beräkningen gjordes genom att omforma ekvation (3.2) enligt följande

$$P_{b,\text{design},\text{ny}} = \frac{\nabla_{[\text{ton}] }^{2/3} \cdot v_{[\text{knop}]}^3}{C} \quad (3.3)$$

En sea margin på 25% valdes här för att representera maxvärdet i intervallet för sea margin från Wärtsilä [24], detta för att färjan ska klara ett högre motstånd orsakat av väderförhållanden. Sea margin tillämpas på $P_{b,\text{design},\text{ny}}$ enligt

$$P_{b,\text{ny}} = P_{b,\text{design},\text{ny}} [\text{kW}] \cdot (1 + \text{sea margin}) [\text{kW}] \quad (3.4)$$

I Figur 3.4 presenteras den beräknade effekten $P_{b,\text{ny}}$ för de olika hastigheterna färjan uppnår i driftprofilen.



Figur 3.4: Effekt $P_{b,\text{ny}}$ över hastighet

För att slutligen kunna bestämma elmotorns högsta mekaniska uteffekt under kontinuerlig drift, $P_{b,\text{installerad},\text{ny}}$, togs den maximala effekten $P_{b,\text{ny max}}$, vilket kan avläsas i Figur 3.4

som 15,6 MW vid en hastighet på 18,5 knop. På detta adderades en engine margin på 12,5%, då den antas vara densamma som den antagna för Stena Jutlandicas nuvarande installerade effekt. Den nya installerade effekten beräknades enligt

$$P_{b,\text{installerad, ny}} = P_{b,\text{ny max}} \cdot (1 + \text{engine margin}) \quad (3.5)$$

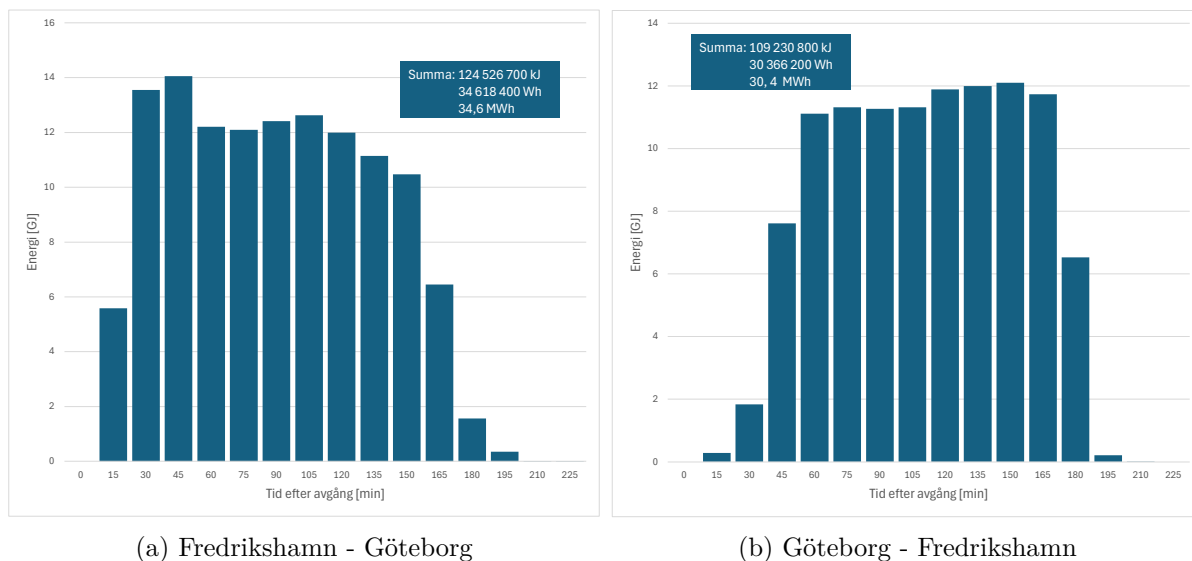
Den nya installerade effekten $P_{b,\text{installerad, ny}}$ blev då 17,6 MW.

3.1.4 Energibehov

För att sedan uppskatta den totala energiförbrukningen, E beräknades integralen av $P_{b,\text{ny}}$ genom en uppskattning av 15-minutersblock. Detta då hastighetsdatan endast sparades ner var 15:e minut. Energiförbrukningen för varje intervall adderades sedan till den totala energiförbrukningen för hela resan. Detta gjordes för de båda generella driftprofilerna (Göteborg-Fredrikshamn och Fredrikshamn-Göteborg) enligt

$$E \text{ [kJ]} = \sum P_{b,\text{ny[kW]}} \cdot 15_{\text{[min]}} \cdot 60_{\text{[s/min]}} \quad (3.6)$$

Figur 3.5 visar energiförbrukningen för motorn. De motsvarar den beräknade integralen baserad på de generella driftprofilerna.



Figur 3.5: Uppskattad energiförbrukning för motor

Detta energibehov inkluderar sea margin då denna påverkar energiförbrukningen. Den maximala energiförbrukningen för motorn, E_{\max} beräknades till 124 500 MJ vilket motsvarar 34,6 MWh per tur färjan åker.

3.2 Dimensionering av energiförsörjningssystem

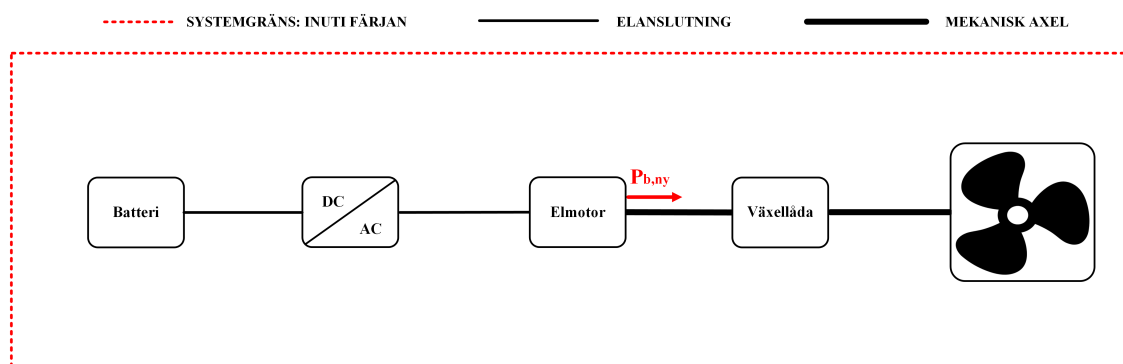
För att dimensionera energiförsörjningssystemet valdes batterier och bränsleceller baserat på data och tillgänglig litteratur. Genom att undersöka vilka alternativ som förekom inom den marina sektorn beslutades att jämföra NMC-batterier med LFP-batterier, då dessa båda är vanliga inom maritima tillämpningar men skiljer sig åt i fråga om energitätet, livslängd och miljöpåverkan. LTO-batterier är också en etablerad batteriteknik och används i vissa marina tillämpningar. I denna studie har de dock valts bort till förmån för de andra alternativen på grund av dess höga kostnad och låga energitätet som innebär att de kräver mer utrymme och vikt för samma energimängd. För bränsleceller jämfördes PEMFC och SOFC, eftersom de representerar olika driftprinciper och temperaturintervall, vilket påverkar effektivitet och användningsområde. För solceller jämfördes monokristallina-solceller med CdTe-solceller eftersom de skiljer sig i energigenerering, kostnad och miljöpåverkan. De olika alternativen utvärderades utifrån aspekterna energi-

förbrukning, miljöpåverkan och kostnad. Datan ligger till grund för en slutlig utvärdering och rekommendation av teknikval.

3.2.1 Uppskattning av total energiförbrukning

För att beräkna den totala energiförbrukningen för de olika energiförsörjningssystemen modellerades drivlinas verkningsgrad från energikälla till elmotor via medelverkningsgraderna för de ingående komponenterna. Endast de system som fanns ombord på färjan studerades. Drivlinekonfigurationerna för batteridrift och bränslecellsdrift baserades på [32] och på antaganden om vilka komponenter som fanns ombord på färjan. Eftersom växellådan och propellern är densamma som för den konventionella drivlinan togs inte verkningsgraderna för dessa i beaktande.

I Figur 3.6 beskrivs konfigurationen som behövs för ett energiförsörjningssystem ombord på färjan baserat på batterier. Denna konfiguration består av batterier, en växelriktare som omvandlar likström till växelström, elmotor, växellåda och propeller. $P_{b,ny \max}$ visar uteffekten från motorn.



Figur 3.6: Drivlinekomponenter och konfiguration för batteridrift

För att få fram energilagringsbehovet för ett energiförsörjningssystem baserat på batteridrift beräknades den totala verkningsgraden mellan propeller och batteri ut med följande beräkning

$$\eta_{\text{total, batteridrift}} = \eta_{\text{Batteri}} \cdot \eta_{\text{DC-AC}} \cdot \eta_{\text{Elmotor}} \quad (3.7)$$

3. Metod och genomförande

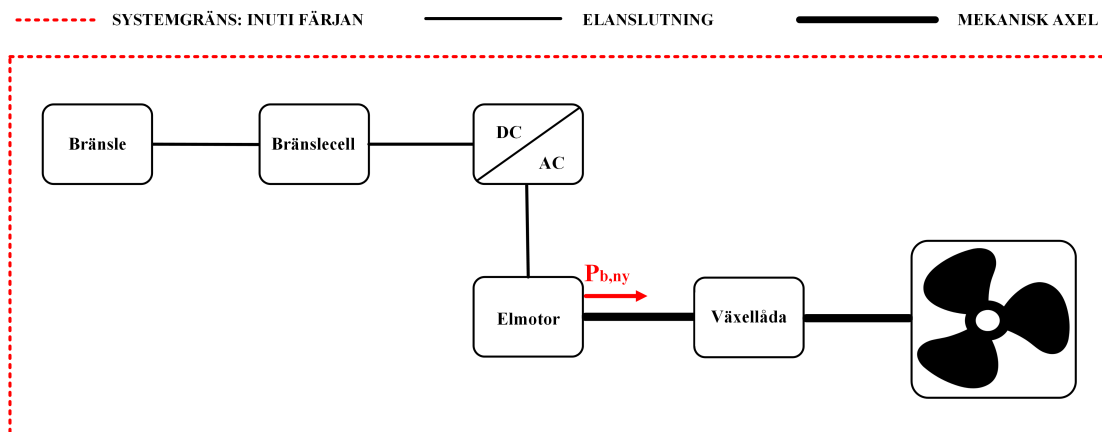
Beräkningen gjordes för både LFP- och NMC-batterier för att jämföra skillnaden av energilagringsbehovet men eftersom LFP- och NMC-batterier uppvisar liknande verkningsgrad inom det aktuella laddningsintervallet, antas samma verkningsgrad för båda batterityperna i denna studie [88]. Beräkning av den totala verkningsgraden för batteridrift med tillhörande verkningsgrader för drivlinekomponenter presenteras i Tabell 3.3 tillsammans med energiförbrukningen för batterier som beräknas enligt

$$\text{Energiförbrukning[MWh]} = \frac{E_{\text{max,[MWh]}}}{\eta_{\text{total}}} \quad (3.8)$$

Tabell 3.3: Beräkning drivlina batteri

Specifikation	Värde	Enhet	Källa
η_{batteri}	98	[%]	[89]
$\eta_{\text{DC-AC}}$	96	[%]	[90]
η_{Elmotor}	95	[%]	[91]
$\eta_{\text{total, batteridrift}}$	89,4	[%]	
Energiförbrukning _{Batteri}	38,7	[MWh]	

För energiförsörjningssystemet baserat på bränsleceller ser drivlinan ut enligt Figur 3.7 där $P_{b,ny}$ även här visar uteffekten från motorn.



Figur 3.7: Drivlinekomponenter och konfiguration för bränslecellsdrift

Likt för konfigurationen för batterier tas inte växellådans och propellerns verkningsgrad i beaktande. Den totala verkningsgraden, mellan propeller och bränslet, för bränslecellsdrift beräknades enligt

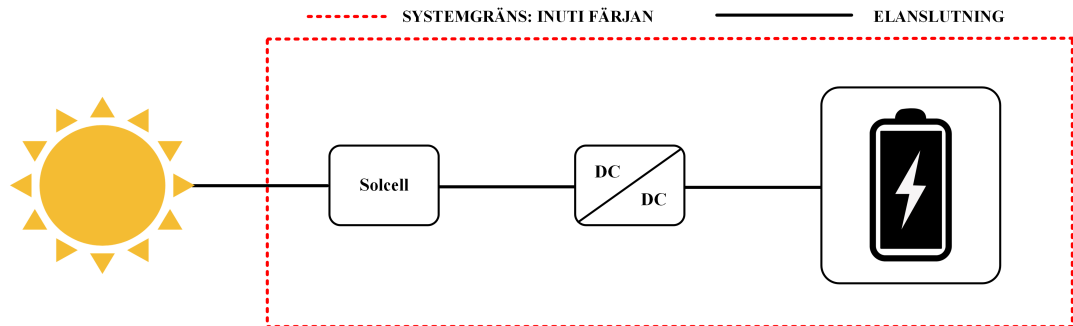
$$\eta_{\text{total, bränslecellsdrift}} = \eta_{\text{Bränslecell}} \cdot \eta_{\text{DC-AC}} \cdot \eta_{\text{Elmotor}} \quad (3.9)$$

Beräkningen för totalverkningsgraden för drivlinesystemet med bränslecellerna PEMFC och SOFC redovisas i Tabell 3.4 tillsammans med energiförbrukningen för respektive bränslecell som beräknas på samma sätt som för batterier i (3.12).

Tabell 3.4: Beräkning drivlina bränslecell

Specifikation	Värde	Enhet	Källa
η_{PEMFC}	55	[%]	[43]
η_{SOFC}	58	[%]	[43]
$\eta_{\text{DC-AC}}$	96	[%]	[90]
η_{Elmotor}	95	[%]	[91]
$\eta_{\text{total, PEMFC}}$	50,2	[%]	
$\eta_{\text{total, SOFC}}$	52,9	[%]	
Energiförbrukning _{PEMFC}	69,0	[MWh]	
Energiförbrukning _{SOFC}	65,4	[MWh]	

De ingående komponenterna för solcellsinstallationen visas i Figur 3.8. Eftersom solenergi omvandlas till likström med hjälp av fotovoltaisk teknik behövdes endast en DC/DC-omvandlare innan energin kunde lagras i batteriet.



Figur 3.8: Komponenter för solcellssystem

Beräkningarna för den totala verkningsgraden för solceller följer enligt

$$\eta_{\text{total, solcell}} = \eta_{\text{Solcell}} \cdot \eta_{\text{DC-DC}} \cdot \eta_{\text{Batteri}} \quad (3.10)$$

Totalverkningsgraderna för solcellssystemet baserat på solcellstyperna Monokristallina och CdTe redovisas i Tabell 3.5.

Tabell 3.5: Beräkning drivlina solcell

Specifikation	Värde	Enhet	Källa
$\eta_{\text{Monokristallin}}$	20,5	[%]	[92]
η_{CdTe}	18,0	[%]	[92]
$\eta_{\text{DC-DC}}$	97,5	[%]	[93]
η_{Batteri}	98	[%]	[89]
$\eta_{\text{total, Monokristallin}}$	19,6	[%]	
$\eta_{\text{total, CdTe}}$	17,2	[%]	

3.2.2 Hotellast

Eftersom hotellasten inte bidrar till färjans framdrift adderas denna direkt till det totala energibehovet. Detta enligt följande:

$$E_{\text{Hotellast}}[\text{MWh}] = \text{Hotellast}_{[\text{kW}]} \cdot t_{[\text{h}]} \quad (3.11\text{a})$$

$$\text{Energiförbrukning}_{\text{inkl. Hotellast}}[\text{MWh}] = \frac{E_{\text{max}}[\text{MWh}]}{\eta_{\text{total}}} + E_{\text{Hotellast}}[\text{MWh}] \quad (3.11\text{b})$$

Där t är den totala drifttiden per tur och E_{max} det maximala energibehovet. Värdena från beräkningarna presenteras i Tabell 3.6.

Tabell 3.6: Beräkning hotellast

Specifikation	Värde	Enhet	Källa
Hotellast	1,5	[MW]	[94], [95]
t	3,5	[h]	[17]
$E_{\text{Hotellast}}$	5,25	[MWh]	
Energiförbrukning _{Batteri, inkl hotellast}	44,0	[MWh]	
Energiförbrukning _{PEMFC, inkl hotellast}	74,3	[MWh]	
Energiförbrukning _{SOFC, inkl hotellast}	70,7	[MWh]	

I Figur 4.1 presenteras även jämförelsen i form av stapeldiagram.

3.2.3 Överdimensionering

För att förlänga livslängden rekommenderas det att inte nyttja ett batteris fulla kapacitet. Det optimala användningsområdet ligger på 40% av batterikapaciteten, vilket leder till att batterisystemet behöver överdimensioneras för att klara av det energibehov som önskas. Det här var något som behövde tas hänsyn till vid uppskattning av kostnader, miljöpåverkan och vikt. Beräkningen för överdimensioneringen gjordes enligt

$$\text{Energikapacitet}_{\text{batteri}} [\text{MWh}] = \frac{\text{Energiförbrukning}_{\text{inkl. Hotellast}} [\text{MWh}]}{0,4} \quad (3.12)$$

Beräkningarna gav att energikapaciteten behövde vara 110 MWh för batterisystemet och resultatet visualiseras i Figur 4.2.

3.3 Kostnadsuppskattning

En kostnadsuppskattning genomfördes för att kunna jämföra de olika energiförsörjningssystemen ur ett ekonomiskt perspektiv. Kostnadsberäkningarna inkluderar inköpskostnad och driftkostnad under färjans livslängd. Vissa kostnadsposter var ursprungligen angivna i euro eller amerikanska dollar och har därför omräknats till svenska kronor baserat på den genomsnittliga växelkursen för 2024 [96].

3.3.1 Elpris

Vid estimering av kostnader för både batterier och solceller krävs en uppskattning av elpriset. Denna påverkas av flera faktorer, såsom den faktiska elförbrukningen samt fasta avgifter kopplade till exempelvis elnätet.

På senare tid har elbolagen även börjat tillämpa effektbaserade avgifter. Dessa utgör en extra kostnad per månad och baseras på den högsta uppmätta effekten under perioden. Denna effekt beräknas enligt

$$\text{Maxeffekt} [\text{kW}] = \frac{\text{Energiförbrukning} [\text{kWh}]}{\text{Laddningstid} [\text{h}]} \quad (3.13a)$$

$$\text{Summa effektbaserat elpris} [\text{SEK}] = \text{Maxeffekt} [\text{kW}] \cdot \text{Effektpris} [\text{SEK/kW}] \quad (3.13b)$$

För att bibehålla den nuvarande tidtabellen antogs en laddningstid på 45 minuter [17]. Beräkningen av det effektbaserade elpriset redovisas i Tabell 3.7.

Tabell 3.7: Effektbaserat elpris

Specifikation	Värde	Enhet	Källa
Energiförbrukning _{batteri, inkl hotellast}	44 000	[kWh]	
laddningstid _{min}	45	[minuter]	
Pris effekt	52,4	[SEK/(kW · mån)]	[97]
Maxeffekt	58 600	[kW]	
Summa elpris effekt (fast)	3 070 000	[SEK/mån]	

Det slutgiltiga uppskattade elpriset beräknades genom att inkludera flera relevanta kostnadsposter, såsom spotpris, elnätavgifter, skatter samt tillägg från elhandelsbolag. Dessa värden redovisas i Tabell 3.8 och baseras på aktuella uppgifter från Göteborg Energi och andra relevanta källor. Både rörliga och fasta kostnadskomponenter inkluderades för att ge en så realistisk bild som möjligt av den totala elkostnaden för färjans drift.

Tabell 3.8: Elpris år 2024

Specifikation	Värde	Enhet	Källa
Spotpris (medel 2024)	0,4088	[SEK/kWh]	[98]
Elnätspris (rörlig)	0,062	[SEK/kWh]	[97]
Elhandelsbolagstillägg	0,069	[SEK/kWh]	[99]
Elskatt	0,43	[SEK/kWh]	[100]
Elnätspris (fast)	1000	[SEK/mån]	[97]
Pris effekt (fast)	3 070 000	[SEK/mån]	
Summa Elpris (rörlig)	0,968	[SEK/kWh]	
Summa Elpris (fast)	3 071 000	[SEK/mån]	

3.3.2 Batterisystem

För att beräkna kostnaden för batterisystemet undersöktes inköpskostnad och driftkostnad. De värden som beräkningarna baserades på presenteras i Tabell 3.9.

Tabell 3.9: Värden för beräkning av kostnad för batteri

Specifikation	Värde	Enhet	Källa
Energiförbrukning _{Batteri}	44	[MWh]	
Inköpspris NMC-batterier	4 573	[SEK/kWh]	[101]
Inköpspris LFP-batterier	4 289	[SEK/kWh]	[101]
Batterilivslängd	9	[år]	[23]
Livslängd färja	40	[år]	[23]
Antal installationer	4	[st]	

Inköpskostnaden beräknades med hjälp av inköspriset per energilagringenhet enligt

$$\text{Inköpskostnad [SEK]} = \text{Inköspris}_{[\text{SEK/kWh}]} \cdot \text{Batterikapacitet}_{[\text{kWh}]} \quad (3.14)$$

För att ta hänsyn till att batterierna degraderas antas det att batterierna byts ut efter nio år. Det antas därför att fyra installationer sker under färjans livslängd. En femte installation uteslöts, då det bedömdes som ekonomiskt ineffektivt. Bytet skulle ha skett slutet av färjans livslängd, vilket innebär att det nya batterisystemet inte skulle hinna utnyttjas fullt ut under de återstående fyra åren, med hänsyn till dess längre livslängd. Det här resulterade i en total inköpskostnad under färjans livslängd enligt

$$\text{Inköpskostnad}_{40 \text{ år}} [\text{SEK}] = \text{Inköpskostnad}_{[\text{SEK}]} \cdot 4_{[\text{installationer}]} \quad (3.15)$$

Sedan uppskattades driftkostnaderna för en tur, ett dygn, ett år samt för färjans uppskattade livslängd. Energiförbrukningen multiplicerades med den rörliga elkostnaden och den fasta elkostnaden adderades först vid beräkningen av den totala driftkostnaden för ett år, då den fasta delen angavs per månad. Detta beräknades enligt

$$\text{Driftkostnad}[\text{SEK}/\text{tur}] = \text{Energiförbrukning}_{\text{batteri, [kWh/tur]}} \cdot \text{Elpris (rörligt)}_{[\text{SEK}/\text{kWh}]} \quad (3.16a)$$

$$\text{Driftkostnad}[\text{SEK}/\text{dygn}] = \text{Driftkostnad}[\text{SEK}/\text{tur}] \cdot \text{Turer per dygn}_{[\text{tur}/\text{dygn}]} \quad (3.16b)$$

$$\begin{aligned} \text{Driftkostnad}[\text{SEK}/\text{år}] &= \text{Driftkostnad}[\text{SEK}/\text{dygn}] \cdot 365_{[\text{dygn}/\text{år}]} \\ &+ \text{Elpris (fast)}_{[\text{SEK}/\text{mån}]} \cdot 12_{[\text{mån}/\text{år}]} \end{aligned} \quad (3.16c)$$

$$\text{Driftkostnad}[\text{SEK}/40 \text{ år}] = \text{Driftkostnad}[\text{SEK}/\text{år}] \cdot 40_{[\text{år}]} \quad (3.16d)$$

Inköps-, drift-, samt total kostnad under livstiden sammanställs i 4.2.1.

3.3.3 Bränslecellssystem

För att uppskatta totalkostnaden för att täcka energibehovet inkluderades bränslecellernas inköpspris, bränslekostnad samt kostnad för utbyte av bränslecellsstacks efter att deras respektive livslängd förbrukats. Inköp av bränsleceller baserades på effektbehovet för bränslecellen. För att beräkna denna effekt användes drivlinekomponenternas verkningsgrader mellan växellådan och bränslecellen enligt

$$P_{\text{Bränslecell}}[\text{kW}] = \frac{P_{b,ny \text{ installerad, [kW]}}}{\eta_{\text{Elmotor}} \cdot \eta_{\text{DC-AC}}} \quad (3.17)$$

De värden som användes i kostnadsberäkningarna för bränslecellerna PEMFC och SOFC, med tillhörande bränslealternativ, redovisas i Tabell 3.10.

Tabell 3.10: Värden för beräkning av kostnad bränslecell

Specifikation	Värde	Enhet	Källa
Inköpspris PEMFC	8 027	[SEK/kW]	[42]
Inköpspris SOFC	14 089	[SEK/kW]	[42]
Verkningsgrad PEMFC	55	[%]	[43]
Verkningsgrad SOFC	58	[%]	[43]
LHV flytande väte	33,3	[kWh/kg]	[102]
LHV metanol	5,54	[kWh/kg]	[102]
LHV flytande ammoniak	5,17	[kWh/kg]	[42]
Inköpspris grönt väte	57,3	[SEK/kg]	[103]
Inköpspris grön metanol	24,9	[SEK/kg]	[104]
Inköpspris grön ammoniak	9,6	[SEK/kg]	[105]
Livslängd PEMFC	20 000	[h]	[106]
Livslängd SOFC	40 000	[h]	[107]
n	4	[turer/dygn]	[17]
t	3,5	[h]	[17]
Från tidigare beräkningar	Värde	Enhet	
$P_{\text{bränslecell}}$	19 260	[kW]	
Energiförbrukning _{PEMFC}	74 300	[kWh]	
Energiförbrukning _{SOFC}	70 700	[kWh]	

Beräkningsprocessen inleddes med att beräkna den totala inköpskostnaden som

$$\text{Inköpskostnad [SEK]} = P_{\text{bränslecell, [kW]}} \cdot \text{Inköpspris}_{\text{[SEK/kW]}} \quad (3.18)$$

Vidare inkluderades kostnaderna för färjans uppskattade livslängd, där kostnader för utbyte av bränsleceller inkluderades, för att ta hänsyn till att bränslecellen degraderar. Detta inleddes med att beräkna antalet timmar som färjan skulle vara i drift under sin livslängd enligt

$$T_{\text{drift}}[\text{h}] = 40_{\text{år}} \cdot 365_{\text{dagar/år}} \cdot t_{[\text{h/tur}]} \cdot n_{[\text{turer/dygn}]} \quad (3.19)$$

där t och n motsvarade specifika värden för Stena Jutlandica. Därefter beräknades antalet byten av bränsleceller baserat på bränslecellens livslängd $B_{\text{livslängd}}$ och den totala drifttiden enligt

$$\text{Antal byten}[\text{st}] = \frac{B_{\text{livslängd, [h]}}}{T_{\text{drift, [h]}}} \quad (3.20)$$

Kostnaden för utbyte av bränslecellerna under drifttiden uppskattades vara densamma som inköpskostnaden, vilket gjorde att den totala inköpskostnaden för 40 år kunde beräknas enligt

$$\begin{aligned} \text{Inköpskostnad}_{\text{bränslecell, 40 år}}[\text{SEK}] &= \text{Inköpskostnad}_{\text{bränslecell, [SEK]}} \\ &+ \text{Antal byten}_{[\text{st}]} \cdot \text{Inköpskostnad}_{\text{bränslecell, [SEK]}} \end{aligned} \quad (3.21)$$

Sedan beräknades massan bränsle som skulle användas i bränslecellen för att kunna beräkna kostnaden per tur för bränslet enligt

$$m_{\text{bränsle}}[\text{kg}] = \frac{\text{Energiförbrukning}_{\text{bränslecell, [kWh]}}}{\eta \cdot \text{LHV}_{\text{bränsle, [kWh/kg]}}} \quad (3.22)$$

$$\text{Kostnad}_{\text{bränsle}}[\text{SEK/tur}] = m_{\text{bränsle, [kg/tur]}} \cdot \text{Pris}_{\text{bränsle, [SEK/kg]}} \quad (3.23)$$

där η är bränslecellens verkningsgrad och $\text{LHV}_{\text{bränsle}}$ motsvarar lägre värmevärde för bränslet. Med en given kostnad per tur för respektive bränslealternativ kunde sedan driftkostnad för hela livslängden beräknas enligt

$$\text{Driftkostnad}_{40 \text{ år, total}}[\text{SEK}] = \text{Kostnad}_{\text{bränsle, [SEK/tur]}} \cdot \left(40_{[\text{år}]} \cdot 365_{[\text{dagar/år}]} \cdot n_{[\text{turer/dygn}]} \right) \quad (3.24)$$

vilket slutligen ledde till att den totala kostnaden kunde beräknas med hjälp av (3.21) och (3.24) enligt

$$\text{Total kostnad}_{40 \text{ år}}[\text{SEK}] = \text{Inköpskostnad}_{40 \text{ år, [SEK]}} + \text{Driftkostnad}_{40 \text{ år, [SEK]}} \quad (3.25)$$

Inköps-, drift-, samt total kostnad under livstiden sammanställs i 4.2.2.

3.3.4 Solcellssystem

Då färjan är utformad för att användas i Kattegatt, där soltimmarna är begränsade och ojämnt fördelade över året, betraktas solceller inte som en tillförlitlig energikälla vid dimensionering av energilagret. Däremot kan solceller på lång sikt generera ekonomisk vinst, vilket ligger till grund för en kalkyl med syfte att utvärdera om drift- och installationskostnaden kan återbetalas inom färjans antagna livslängd.

Beräkningarna förenklades eftersom det var svårt att exakt förutspå hur färjan rör sig mellan olika turer. Vid dåligt väder kan färjan kränga, vilket resulterar i att solcellerna ibland skuggas, moln kan även leda till samma problem. Dessutom antogs det att solcellerna inte påverkas av smuts eller saltbeläggningar som kan minska elproduktionen. Det antogs även att halva färjans övre yta täcks av solceller, eftersom detta bedömdes vara en rimlig avvägning mellan funktionalitet och säkerhet. Baserat på Tabell 3.1 beräknades denna yta till 2700 m² och solcellerna monteras platt på däckets, eftersom det ger högre effektivitet jämfört med vertikalt [108]. För enkelhets skull tas färjans relativa position i förhållande till solen ej i beaktande, eftersom färjan rör sig kontinuerligt under hela dygnet och därmed exponeras för solens samtliga positioner.

Då inköpskostnaden för CdTe-solceller inte hittades, användes kostnaden för CIGS-solceller istället. CIGS-solceller är en annan typ av tunnfilmssolcell och därför antogs kostnaden vara likvärdig.

Tabell 3.11: Strålningsdata som krävs för att beräkna den genererade elektriciteten

Specifikation	Värde	Enhet	Källa
Globalstrålning Göteborg 2024	972,4	[kWh/m ²]	[109]
Globalstrålning Skagen 2024	1 002,2	[kWh/m ²]	[110]
η_{solcell} , Monokristallin	20,5	[%]	[92]
η_{solcell} , CdTe	18	[%]	[92]
$\eta_{\text{DC/DC}}$	97,5	[%]	[93]
η_{Batteri}	98	[%]	[89]
Årlig nedbrytning Monokristallin	0,93	[%]	[55]
Årlig nedbrytning CdTe	0,3	[%]	[92]
Rörligt elpris	0,968	[Kr/kWh]	Tabell 3.8

Beräkningarna baseras på globalstrålning i Skagen och Göteborg. Globalstrålning definieras som samtlig solinstrålning (direkt och diffus) mot en horisontell yta och mäts i enheten W/m^2 [111]. Datan för Göteborg hämtades från SMHI, medan data för Fredrikshamn baserades på timvisa mätningar från Danmarks Meteorologiske Institut (DMI) för Skagen, den närmaste tillgängliga mätstationen. Den totala solinstrålningen under 2024 summerades och det antogs att färjan tillbringar hälften av tiden i respektive stad. Totala globalstrålningen för färjan beräknas enligt

$$\text{Globalstrålning, } G \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \right] = \frac{G_{\text{Göteborg}}}{2} + \frac{G_{\text{Skagen}}}{2} \quad (3.26)$$

Globalstrålningen multipliceras sedan med arean, A , av solceller samt solcellernas verkningsgrad för att beräkna den årliga elproduktionen i kWh . För att beakta den gradvisa minskningen av solcellernas effektivitet över tid, tillämpades även en skalningsfaktor som representerar den årliga degraderingen efter installation.

$$\text{Genererad energi [kWh]} = G \cdot A_{\text{solceller}} \cdot \eta_{\text{solcell}} \cdot \eta_{\text{DC/DC}} \cdot \left(\frac{100 - \text{nedbrytning} \cdot x}{100} \right) \quad (3.27)$$

där x är antal år efter installation.

För att beräkna den mängd energi som kan nyttjas ombord på färjan multiplicerades genererad energi med batterilagrets verkningsgrad, η_{batteri} enligt

$$\text{Nettoenergi [kWh]} = \text{Genererad energi}_{[\text{kWh}]} \cdot \eta_{\text{batteri}} \quad (3.28)$$

Därefter multipliceras den genererade energin med elpriset för laddning för att beräkna hur mycket besparingar som görs per år med hjälp av solcellssystemet.

$$\text{Insparad kostnad per år [SEK]} = \text{Genererad energi}_{[\text{kWh}]} \cdot \text{Elpris}_{[\text{SEK/kWh}]} \quad (3.29)$$

där elpriset representerar det rörliga elpriset från Tabell 3.8. Installationskostnaden beräknas utifrån anläggningskostnad för solcellerna enligt

$$\text{Total installationskostnad [SEK]} = \text{Kostnad per m}^2 \text{ [SEK]} \cdot A_{\text{solceller}} \quad (3.30)$$

Kostnad för respektive solcell per kvadratmeter samt den totala installationskostnaden presenteras i Tabell 3.12

Tabell 3.12: Installationskostnad för solceller

Monokristallina solceller		
Specifikation	Värde [SEK]	Källa
Kostnad per m ²	2667	[112]
Total installationskostnad	7 200 000	
CIGS-solceller		
Specifikation	Värde [SEK]	Källa
Kostnad per m ²	1347	[113]
Total installationskostnad	3 600 000	

Den insparade kostnaden per år jämfördes sedan med installationskostnaden för systemet för att uppskatta efter vilken tid som solcellsininstallationen genererar vinst, vilket presenteras i resultatet i 4.2.4.

3.4 Solcellssystemets genererade energi och dess täckningsgrad av hotellast

Då solcellssystemet inte dimensionerades för att på egen hand driva färjan, analyserades istället möjligheten att använda systemet för att täcka hotellasten, samt i vilken utsträckning detta var genomförbart. I (3.28) beräknades den nettoenergi som kan användas för att avlasta hotellasten. För att beräkna den totala energin som solcellssystemet genererar multiplicerades nettoenergin med solcellens livslängd enligt

$$\text{Total energi [GWh]} = \text{Nettoenergi} \cdot \text{Livslängd}_{40\text{år}} \quad (3.31)$$

Vidare beräknades den totala hotellasten enligt

$$\text{Total Hotellast [GWh]} = \text{Hotellast} \cdot T_{\text{drift, [h]}} \quad (3.32)$$

där T_{drift} , som motsvarar den totala drifttiden under färjans livstid beräknades enligt (3.19).

Slutligen jämfördes den totala energi som genererats av solcellssystemet med den totala hotellasten för att bestämma täckningsgraden enligt

$$\text{Täckningsgrad[\%]} = \frac{\text{Total energi}_{[\text{GWh}]}}{\text{Total hotellast}_{[\text{GWh}]}} \quad (3.33)$$

Resultatet redovisas i avsnitt 4.1.2 och illustreras i Figur 4.4.

3.5 Uppskattning av miljöpåverkan

För att uppskatta klimatpåverkan från de studerade energiförsörjningssystemen användes data från publicerade livscykelanalyser. Utsläppen beräknades i form av respektive systems GWP. Fokus låg på att identifiera utsläppen för de olika delarna i livscykeln: produktion, användning och återvinning.

3.5.1 Batterisystem

Uppskattningen av utsläppen under batterisystemets livscykel baserades på undersökningar av utsläppen under stadierna produktion, användning och återvinning. För produktions- och återvinningsfasen användes emissionsdata från en publicerad livscykelanalys som presenterade GWP i kg CO₂e/kWh för NMC-batterier och LFP-batterier [63]. Med hänsyn till att batterierna behöver bytas ut under färjans livslängd beräknades den totala miljöpåverkan baserat på det uppskattade antalet batteribyten och utsläppen vid nyproduktion. Utsläppen under användningsfasen beräknades med utgångspunkt i den genomsnittliga klimatpåverkan från Sveriges elproduktion år 2024. Beräkningen av det sammanlagda klimatavtrycket över 40 år baserades på energiförbrukning under drift samt batterisystemets totala kapacitet med överdimensionering, vilket låg till grund för uppskattningen av utsläpp. Använd indata presenteras i Tabell 3.13.

Tabell 3.13: Värden för beräkning av miljöpåverkan för batterisystem

Specifikation	Värde [kgCO ₂ e/kWh]	Källa
Produktion NMC	87,1	[63]
Produktion LFP	76,7	[63]
Elmix Sverige 2024	0,039	[114]
Återvinning NMC hydrometallurgi	-10	[63]
Återvinning NMC pyrometallurgi	0	[63]
Återvinning LFP hydrometallurgi	-45	[63]
LFP direkt återvinning	10	[63]
Från tidigare beräkningar	Värde	Enhet
Antal installationer	4	[st]
n	4	[turer/dygn]

Eftersom batterisystemet överdimensionerades måste hela dess kapacitet beaktas i uppskattningen för miljöpåverkan under produktionsfasen. Färjans livslängd överstiger livslängden för samtliga undersökta batterityper, vilket innebär att totala antalet installationer behövde inkluderas. Miljöpåverkan under produktionen beräknades därför enligt

$$\text{GWP}_{\text{Produktion, styck}} [\text{kg CO}_2\text{e}] = \text{Batterikapacitet}_{[\text{kWh}]} \cdot \text{GWP}_{\text{Produktion, batteri}} [\text{kg CO}_2\text{e/kWh}] \quad (3.34a)$$

$$\text{GWP}_{\text{Produktion, 40 år}} [\text{kg CO}_2\text{e}] = \text{GWP}_{\text{Produktion, styck}} [\text{kg CO}_2\text{e}] \cdot \text{Antal installationer}_{[\text{st}]} \quad (3.34b)$$

Vid beräkning av utsläpp under användning beaktas enbart den faktiska energiförbrukningen, vilket innebär att den överdimensionerade delen av batteriet exkluderas eftersom den inte används vid drift. Beräkningen genomfördes enligt följande

$$\text{GWP}_{\text{Användning}}[\text{kg CO}_2\text{e/tur}] = \text{Energiförbrukning}_{[\text{kWh/tur}]} \cdot \text{GWP}_{\text{Elmix}}[\text{kg CO}_2\text{e/kWh}] \quad (3.35\text{a})$$

$$\text{GWP}_{\text{Användning, 40 år}}[\text{kg CO}_2\text{e}] = \text{GWP}_{\text{Användning}}[\text{kg CO}_2\text{e/tur}] \cdot n_{[\text{tur/dygn}]} \cdot 365_{[\text{dygn/år}]} \cdot 40_{[\text{år}]} \quad (3.35\text{b})$$

För återvinningen av batterisystemet gjordes beräkningarna på samma sätt som för produktionsfasen enligt

$$\text{GWP}_{\text{Återvinning, styck}}[\text{kg CO}_2\text{e}] = \text{Batterikapacitet}_{[\text{kWh}]} \cdot \text{GWP}_{\text{Återvinning, batteri}}[\text{kg CO}_2\text{e/kWh}] \quad (3.36\text{a})$$

$$\text{GWP}_{\text{Återvinning, 40 år}}[\text{kg CO}_2\text{e}] = \text{GWP}_{\text{Återvinning, styck}}[\text{kg CO}_2\text{e}] \cdot \text{Antal installationer}_{[\text{st}]} \quad (3.36\text{b})$$

Miljöpåverkan för de olika stadierna summerades och resultaten för de olika batteriernas totala miljöpåverkan under färjans livslängd presenteras i Tabell 4.3

3.5.2 Bränslecellssystem

För att undersöka bränslecellssystemets miljöpåverkan under hela livscykeln studerades GWP för produktion, användning och återvinning. Värden för att göra detta är hämtade från livscykelanalyser. Miljöpåverkan vid användning inkluderade både utsläpp under produktion av det använda bränslet samt utsläpp från bränslet under drift. Dessa värden presenteras i Tabell 3.14.

Tabell 3.14: Värden för att beräkna miljöpåverkan under användning

Specifikation	Värde [kg CO ₂ e/MJ]	Källa
Bränsleproduktion grönt väte	0,0217	[115]
Bränsleproduktion grön metanol	- 0,0411	[115]
Bränsleproduktion grön ammoniak	0,0257	[115]
Drift grönt väte	0	[115]
Drift grön metanol	0,0691	[115]
Drift grön ammoniak	0	[115]

Värden som används för beräkning av miljöpåverkan för bränslecellsystemen presenteras i Tabell 3.15.

Tabell 3.15: Värden för beräkning av miljöpåverkan för bränslecellssystem

Specifikation	Värde	Enhet	Källa
Produktion PEMFC	112	[kg CO ₂ e/kW]	[116]
Produktion SOFC	550	[kg CO ₂ e/kW]	[117]
Användning grönt väte	0,0217	[kg CO ₂ e/MJ]	
Användning grön metanol	0,028	[kg CO ₂ e/MJ]	
Användning grön ammoniak	0,0257	[kg CO ₂ e/MJ]	
Återvinning+produktion	87,8	[% av produktionen]	[116]
Från tidigare beräkningar			
$P_{\text{bränslecell}}$	19 260	[kW]	
$m_{\text{bränsle, väte}}$	4 055	[kg]	
$m_{\text{bränsle, ammoniak}}$	23 576	[kg]	
$m_{\text{bränsle, metanol}}$	22 002	[kg]	
Antal installationer PEMFC	10	[st]	
Antal installationer SOFC	5	[st]	

För att beräkna påverkan under produktion för respektive bränslecell krävs, liksom för batterierna, att hänsyn tas till att bränslecellerna behöver bytas ut under färjans livslängd.

Till skillnad från batterierna, vars miljöpåverkan baseras på kapacitet, utgår beräkningen för bränsleceller istället från den maximala effekten inuti bränslecellen. Beräkningen genomfördes enligt följande:

$$\text{GWP}_{\text{Produktion, styck}} [\text{kg CO}_2\text{e}] = P_{\text{bränslecell}} [\text{kW}] \cdot \text{GWP}_{\text{Produktion, bränslecell}} [\text{kg CO}_2\text{e/kW}] \quad (3.37\text{a})$$

$$\text{GWP}_{\text{Produktion, inkl byten}} [\text{kg CO}_2\text{e}] = \text{Antal byten}_{[\text{st}]} \cdot \text{GWP}_{\text{Produktion, styck}} [\text{kg CO}_2\text{e/st}] \quad (3.37\text{b})$$

Användningen baserades på respektive bränsles GWP. Detta gjordes genom att först beräkna den utvunna energimängden från varje bränsle, $E_{\text{Bränsle}}$, enligt

$$E_{\text{Bränsle}} [\text{MJ/tur}] = m_{\text{bränsle}} [\text{kg/tur}] \cdot \text{LHV}_{\text{bränsle}} [\text{MJ/kg}] \quad (3.38\text{a})$$

$$\text{GWP}_{\text{Användning}} [\text{kg CO}_2\text{e/tur}] = E_{\text{Bränsle}} [\text{MJ/tur}] \cdot \text{GWP}_{\text{Användning, bränslecell}} [\text{kg CO}_2\text{e/MJ}] \quad (3.38\text{b})$$

$$\text{GWP}_{\text{Användning, 40 år}} [\text{kg CO}_2\text{e}] = \text{GWP}_{\text{Användning}} [\text{kg CO}_2\text{e/tur}] \cdot n_{[\text{tur/dygn}]} \cdot 365_{[\text{dygn/år}]} \cdot 40_{[\text{år}]} \quad (3.38\text{c})$$

Under användningsfasen har valet av bränsle betydelse för mängden utsläpp under livscykeln. I miljöberäkningarna gjordes valet att endast ta hänsyn till de gröna bränslealternativen väte för PEMFC, ammoniak och metanol för SOFC med förnybar energi vid produktion. Detta för att kunna finna det miljövänligaste alternativet innan slutgiltigt val av bränsle och bränslecellsvariant.

För återvinningen av bränslecellen användes en procentsats på 87,8% av GWP för produktionen eftersom återvinning innebar att utsläppen för produktionen minskade. Samma procentsats antogs gälla för både PEMFC och SOFC då ingen information om GWP för återvinning av SOFC hittades.

Miljöpåverkan för de olika livscykelstadierna summerades och den totala miljöpåverkan under hela färjans livslängd för de olika bränslecellerna med tillhörande bränslen finns presenterade i Tabell 4.4.

3.5.3 Solcellssystem

För att beräkna solcellers miljöpåverkan användes de utsläpp som uppstår under produktion, användning och återvinning av monokristallina- och CdTe- solceller.

I [92] jämförs den totala globala uppvärmningspotentialen (GWP) för en CdTe-solcell producerad i USA med en cell producerad i Indien. Studien visar att emissionerna under livscykeln var 190 kg CO₂e respektive 268 kg CO₂e, vilket främst beror på skillnader i energimix under produktion och återvinning. I Indien står produktionen för 52% av totalt GWP för solcellen medan motsvarande värde i USA är 29%. Detta förklaras av skillnaden i energimix, då energimixen från Indien baseras på en högre andel kolkraft. I studien genomfördes ingen motsvarande jämförelse för monokristallina solceller, men en liknande relation skulle kunna antas eftersom även dessa har en energikrävande produktion.

Hur de olika livscykelstadierna påverkar den totala globala uppvärmningspotentialen presenteras i procent i [76]. Vidare framgår att produktionen och framtagningen av ingående råmaterial och komponenter utgör det stadiet med överlägset störst utsläpp för både CdTe- och monokristallina solceller, förutsatt att cellerna i slutstadiet inte återvinns utan hamnar i deponi. Om man istället återvinner solcellerna på korrekt sätt minskade den totala GWP för monokristallina, medan värdet för CdTe-solceller ökade, vilket beror på de energiintensiva processer som används.

Den procentuella fördelningen av GWP per livscykelstadium multiplicerades med den totala utsläppsmängden i kg/m^2 från [92], för att få utsläppen uttryckta i kg/m^2 per livscykelstadium. Resultatet sammanställs i Tabell 3.16 för att ge en överblick över de olika scenarierna.

Tabell 3.16: Emissioner per m² för solceller med och utan återvinning[kg CO₂e/m²]

Specifikation	Produktion	Avveckling	Totalt	Källa
Monokristallina utan återvinning	722	38	760	[76], [92]
Monokristallina med återvinning	319	327	646	[76], [92]
CdTe utan återvinning	259	11	270	[76], [92]
CdTe med återvinning	259	28	287	[76], [92]

3.6 Viktuppskattning av studerade drivlinor

För att undersöka om färjan kunde bibehålla den lastkapacitet som den nuvarande färjan har gjordes uppskattningar av vikten för både den konventionella och elektriska drivlinan, samt dess olika energisystem. Vikten för den konventionella drivlinan beräknades genom att summera vikten av befintliga motorer och det nuvarande bränslet. Vikten för den konventionella drivlinan jämfördes sedan med den totala vikten för drivlinan med batterisystem samt med bränslecellssystem. Det undersöktes även hur vikten påverkades vid addering av solcellssystem. Värdena som användes i viktberäkningarna är uppskattningar och syftar enbart till att ge en indikation på om en elektrisk drivlina hade medfört högre vikt jämfört med en konventionell drivlina. Inga jämförelser mellan olika batteri-, bränslecell- eller solcellstyper gjordes därför. Vikten för kringutrustning undersöktes inte utan endast vikten för de huvudsakliga systemen. De givna värdena och vikten för den konventionella drivlinan presenteras i Tabell 3.17.

Tabell 3.17: Uppskattad vikt för konventionell drivlina

Specifikation	Värde	Enhet	Källa
MAN 9L 40/54	97	[ton]	[118]
Antal motorer	4	[st]	[81]
Tankar	862	[m ³]	[86]
Bränsledensitet	980	[kg/m ³]	[119]
Total vikt	1 233	[ton]	

För att ta fram vikten för elmotorn användes en elmotor av liknande märkeffekt. För att uppfylla effektbehovet för färjan behövdes fyra motorer varav en elmotor hade vikten

59,3 ton. För att beräkna vikten för batterisystemet användes ett godtyckligt NMC-batteri för energi per viktenhet. Det totala energilagret, med överdimensioneringen, användes sedan för att beräkna den totala vikten. De använda och beräknade värdena presenteras i Tabell 3.18.

Tabell 3.18: Uppskattad vikt batteridrift

Specifikation	Värde	Enhet	Källa
Gravimetrisk energi	127,3	[Wh/kg]	[120]
Vikt elmotor	59,3	[ton]	[91]
Antal elmotorer	4	[st]	
Total vikt	1 101	[ton]	

Viktberäkningarna för drivlinan med bränslecellssystemet baserades på vikten för bränslecellerna och bränslet. För att beräkna vikten för bränslet användes energiförbrukningen för PEMFC och energitätheten för väte. Sedan beräknades vikten för bränslecellerna med hjälp av vikten per effekt. De givna och beräknade värden presenteras i Tabell 3.19.

Tabell 3.19: Uppskattad vikt bränslecell tillsammans med bränsle på 19,3 MW och 74,3 MWh

Specifikation	Värde	Enhet	Källa
Energitäthet väte	33,33	[kWh/kg]	[42]
Vikt bränsle	2,2	[ton]	
Vikt för bränslecell per kW	0,3	[kg/kW]	[121]
Vikt för bränslecell och bränsle	8,5	[ton]	
Vikt för elmotor	59,3	[ton]	[120]
Antal elmotorer	4	[st]	
Total vikt	246	[ton]	

För att beräkna vikten för solcellssystemet multiplicerades vikten per kvadratmeter med den totala uppskattade ytan som solceller kunde appliceras på. Beräkningar och värden presenteras i Tabell 3.20.

Tabell 3.20: Uppskattad vikt solcellssystem

Specifikation	Värde	Enhet	Källa
Vikt per kvadratmeter	2,85	[kg/m ²]	[122]
Yta	2 700	[m ²]	
Total vikt	8	[ton]	

3.7 Samhälleliga och etiska aspekter

Vid dimensioneringen av energiförsörjningssystemen ombord på den eldrivna färjan uppstod ett antal samhälleliga och etiska frågeställningar som behövde beaktas. Dessa aspekter har hanterats genom diskussion och analys av litteratur under hela arbetets gång. De frågeställningar som beaktades har bland annat varit hur elektrifieringen kan bidra till positiva effekter, vilka begränsningar som finns med de miljövänliga alternativen samt vilka konsekvenser elektrifieringen kan få på social tillgänglighet.

4

Resultat

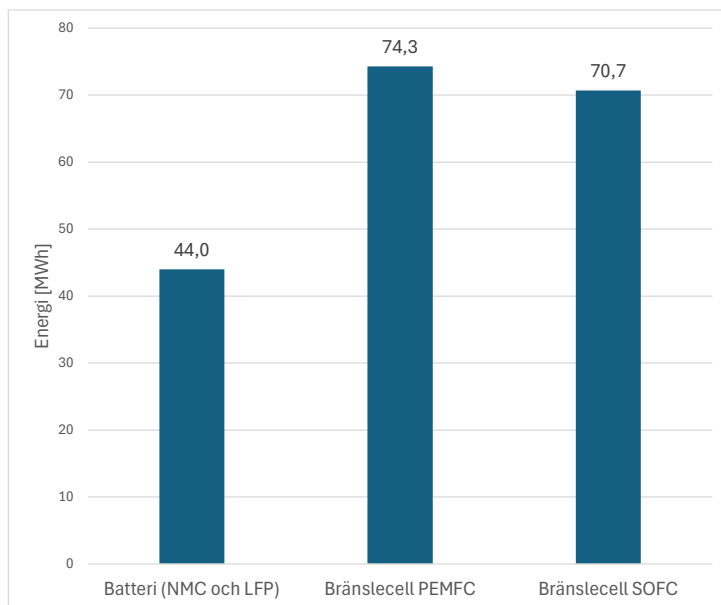
I detta kapitel presenteras de resultat som tagits fram, inklusive dimensioneringen av energiförsörjningssystem med fokus på energiförbrukning, uppskattning av kostnader och miljöpåverkan. En slutlig jämförelse görs som underlag för rekommendation av energiförsörjningssystem.

4.1 Effekt-och energidimensionering

Detta avsnitt presenterar resultaten av dimensionering av effekt- och energibehov för den eldrivna färjan. Beräkningarna har genomförts enligt metoden i avsnitt 3.1 - 3.2 samt 3.4 och ligger till grund för den fortsatta analysen av energiförsörjningssystemen. Med utgångspunkt i (3.4) beräknades den nya installerade effekten för färjan till 17,6 MW. Den färd med högst energibehov var ruten Fredrikshamn till Göteborg med ett energibehov på 34,6 MWh, vilket motsvarar värdet innan verkningsgrader för de olika energiförsörjningssystemen har tagits i beaktande.

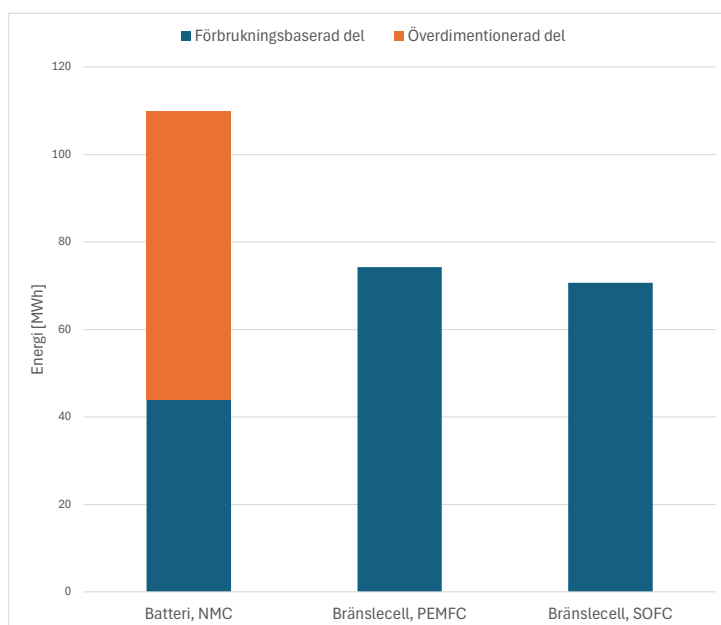
4.1.1 Energiförsörjningssystemets energibehov

Med hjälp av de totala verkningsgraderna och addering av hotellasten för respektive energiförsörjningssystem beräknas den totala energiförbrukningen för respektive system. Dessa presenteras i Figur 4.1 och representerar en tur.



Figur 4.1: Energiförbrukning för respektive energiförsörjningssystem

I Figur 4.2 motsvarar den orangea delen överdimensioneringen som behövs för att hålla batterisystemet inom det optimala laddningsintervallet.



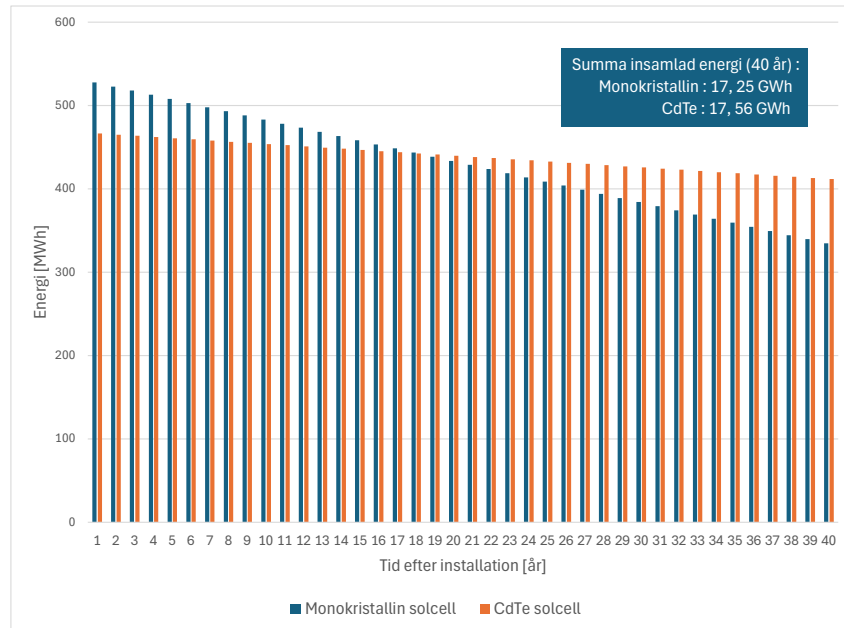
Figur 4.2: Energikapacitet med överdimensionering av batterier

4.1.2 Solcellssystem

Den totala genererade energin från de två olika solcellstyperna under färjans livslängd presenteras i Figur 4.3. Figuren visar att den totala mängden insamlad energi blir större

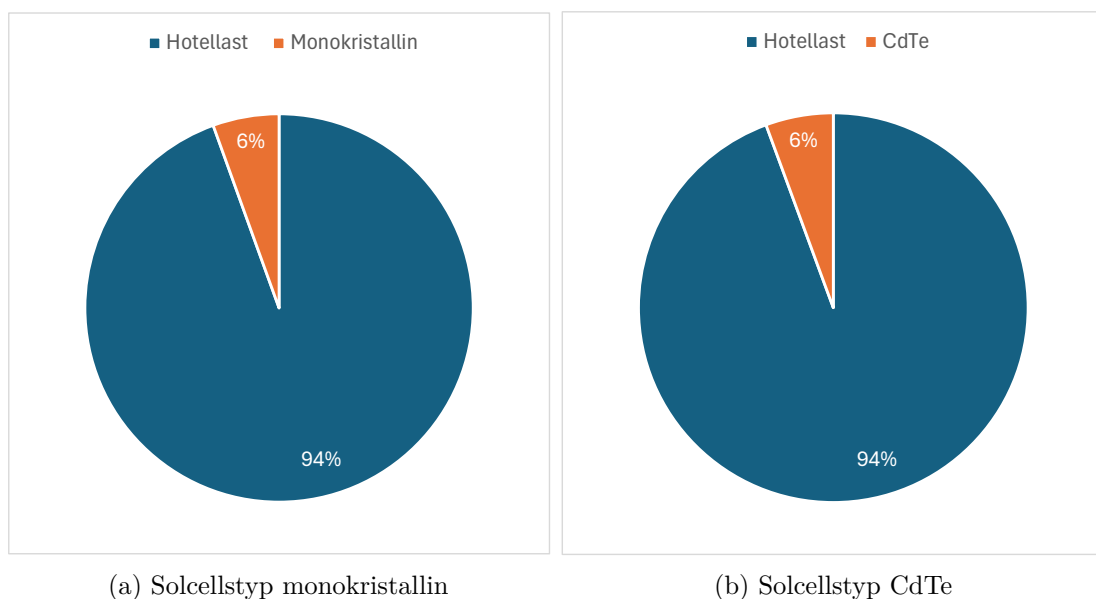
4. Resultat

för CdTe än för monokristallina, trots den initialt lägre verkningsgraden.



Figur 4.3: Insamlad energi för monokristallina- respektive CdTe-solcellssystemet.

Figur 4.4 representerar hur stor andel av energibehovet för hotellasten som respektive solcellstyp potentiellt kan täcka, där det totala energibehovet för hotellasten under färjans livslängd uppgår till 307 GWh och beräknades enligt (3.33). Resultatet blev att täckningsmöjligheten hade samma andel för både monokristallina och CdTe-solceller.



Figur 4.4: Täckningsmöjlighet av total hotellast för solcellssystemet

4.2 Livstidskostnad

I det här avsnittet presenteras resultaten av kostnadsuppskattningen för batteri-, bränslecell- och solcellssystemen.

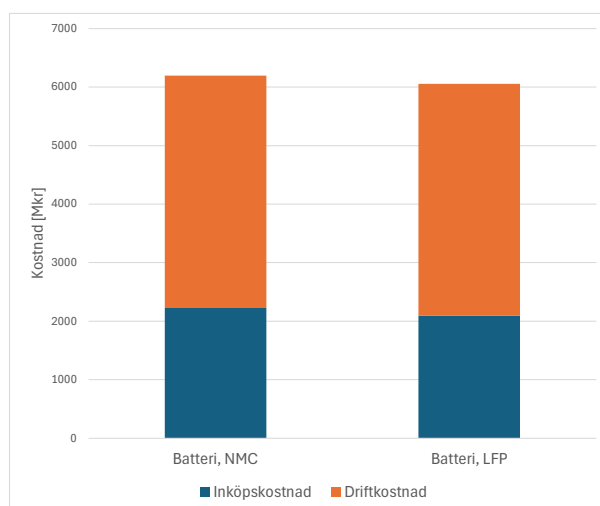
4.2.1 Batterisystem

Med hjälp av värden och ekvationer i avsnitt 3.3.1 och avsnitt 3.3.2 blev resultatet för kostnaden av batterisystemen under hela färjans livslängd enligt Tabell 4.1.

Tabell 4.1: Kostnad för drift av färja med batterisystem, inklusive fyra byten [Mkr]

Specifikation	NMC	LFP
Inköpskostnad 40 år	2 011	1 887
Driftkostnad 40 år	3 962	3 962
Total kostnad 40 år	5 973	5 849

Det här resultatet innebär att NMC-batterier är dyrare än LFP-batterier, även om kostnadsskillnaden procentuellt är liten. Detta visualiseras även i Figur 4.5.



Figur 4.5: Jämförelse av kostnad för batterisystem, 40 år

4.2.2 Bränslecellssystem

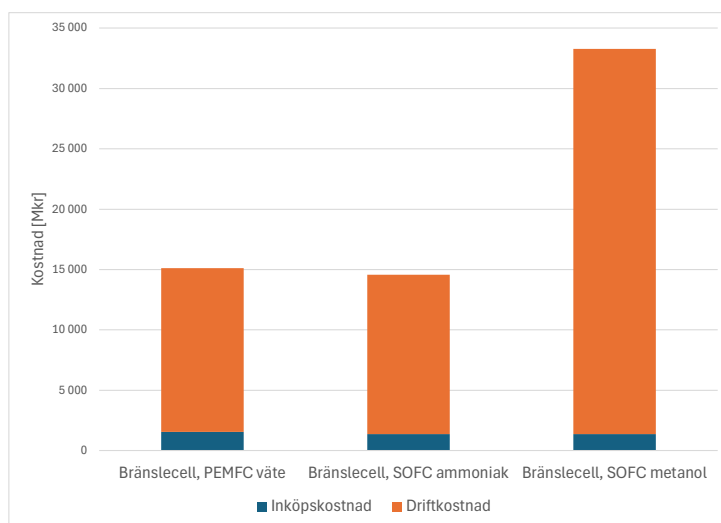
Baserat på ekvationerna i avsnitt 3.3.3 beräknades kostnaden för de olika bränslecellerna, kombinerat med de olika bränslealternativen. I Tabell 4.2 visas resultatet av kostnadsbe-

räkningen för inköpskostnad, driftkostnad den totala kostnaden under 40 år.

Tabell 4.2: Kostnad bränsleceller [Mkr]

Specifikation	PEMFC	SOFC	SOFC
	Grönt väte	Grön ammoniak	Grön metanol
Inköpskostnad 40 år	1 546	1 357	1 357
Driftkostnad 40 år	13 576	13 211	31 934
Total kostnad 40 år	15 122	14 568	33 291

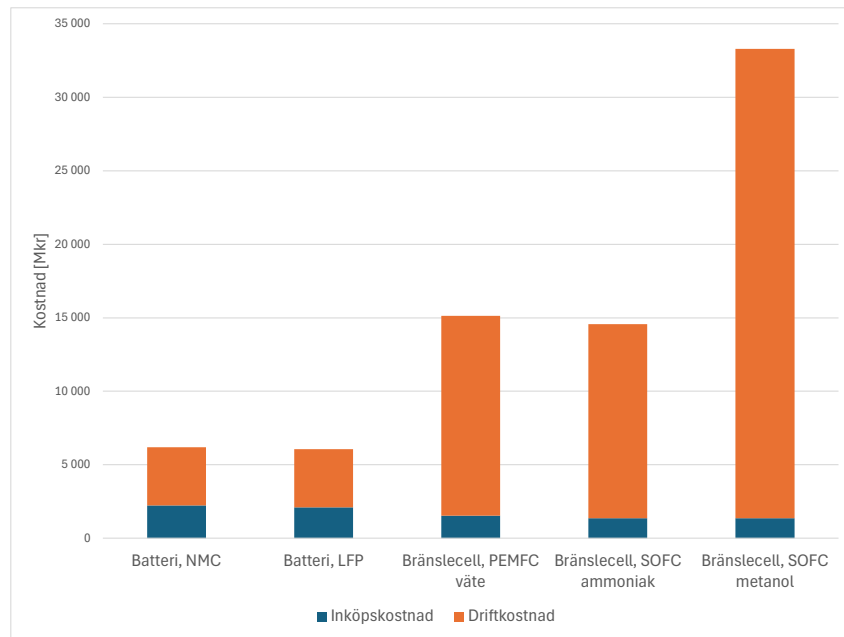
I Tabell 4.2 går det att avläsa att den totala kostnaden är relativt lika för PEMFC med grönt väte och SOFC med grön ammoniak. För SOFC med grön metanol är kostnaden mer än dubbelt så hög jämfört med de två andra alternativen. Det här indikerar att den största skillnaden för kostnaden beror på val av bränsle, vilket visualiseras i Figur 4.6.



Figur 4.6: Jämförelse av kostnad för bränslecellssystem, 40 år

4.2.3 Jämförelse av batteri- och bränslecellssystem

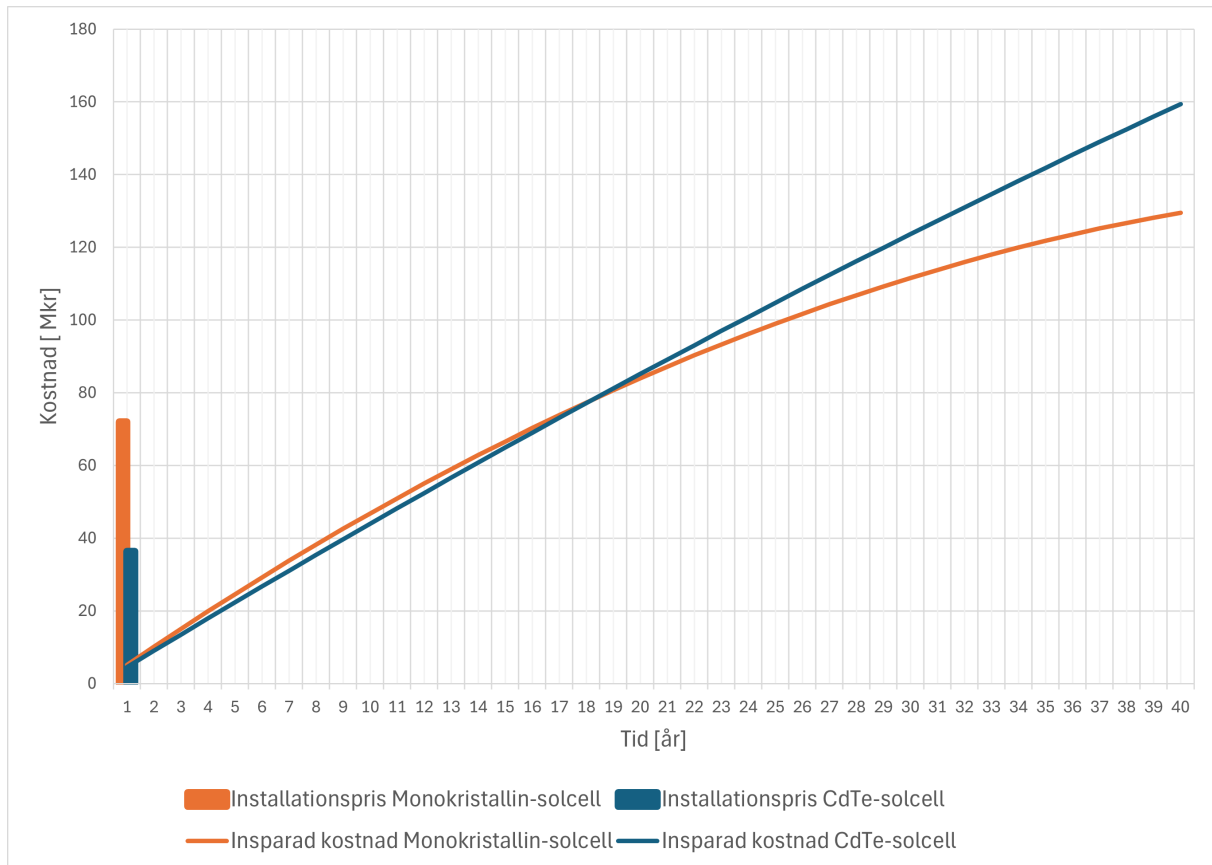
Figur 4.7 visar en jämförelse av kostnad mellan de olika batteri- och bränslecellssystemen för att visualisera skillnaderna. Utav alla olika system var det alternativ med lägst total-kostnad LFP-batterier. Detta trots att inköpskostnaden för både PEMFC och SOFC blev billigare.



Figur 4.7: Jämförelse mellan kostnad för batteri- och bränslecellssystem

4.2.4 Solcellssystem

Med hjälp av (3.26) - (3.30) i avsnitt 3.3.4 kan installationskostnaden och den insparade kostnaden visualiseras i Figur 4.8 för att jämföra solcellstyperna. Grafen beskriver de långsiktiga besparingar som uppnås genom installation av solceller. Resultatet blir att monokristallina solceller genererar vinst efter 16,5 år och CdTe-solceller efter åtta år.



Figur 4.8: Installationskostnad och insparad kostnad för monokristallina- och CdTe-solceller.

4.3 Miljöpåverkan under färjans livstid

Nedan följer resultatet från uppskattningen av miljöpåverkan i metodavsnitt 3.5 utifrån produktion, användning och återvinning för batteri-, bränslecell- och solcellssystem.

4.3.1 Batterisystem

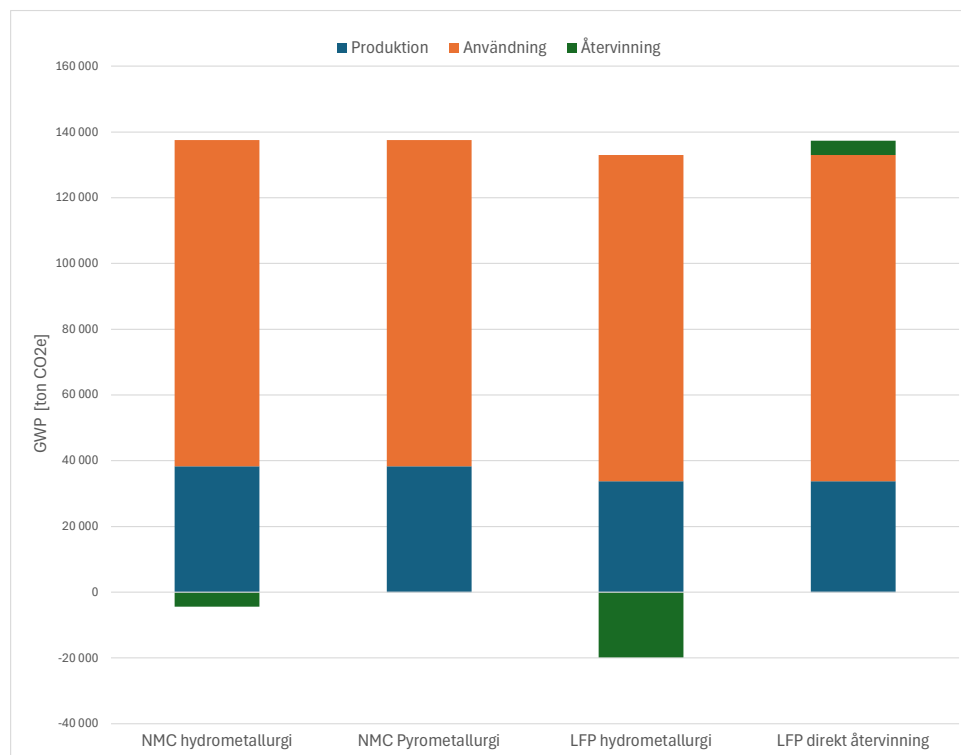
Baserat på metoden i avsnitt 3.5.1 blev resultatet för uppskattningen av miljöpåverkan för de olika batterisystemen enligt Tabell 4.3. De framtagna värdena motsvarar den totala miljöpåverkan för batterisystemen under hela färjans livslängd.

4. Resultat

Tabell 4.3: Miljöpåverkan för batterier och tillhörande återvinningsmetoder för hela färjans livslängd.

Specifikation	ton CO ₂ e
NMC-batterier med hydrometallurgi	133 100
NMC-batterier med pyrometallurgi	137 500
LFP-batterier med hydrometallurgi	113 200
LFP-batterier med direkt återvinning	137 400

Jämförelsen resulterade i att det miljövänligaste alternativet var LFP-batterier med hydrometallurgi som återvinningsmetod vilket också åskådliggörs i Figur 4.11. I figuren motsvarar den blåa delen produktionen, den orangea användningen och den gröna återvinningen.



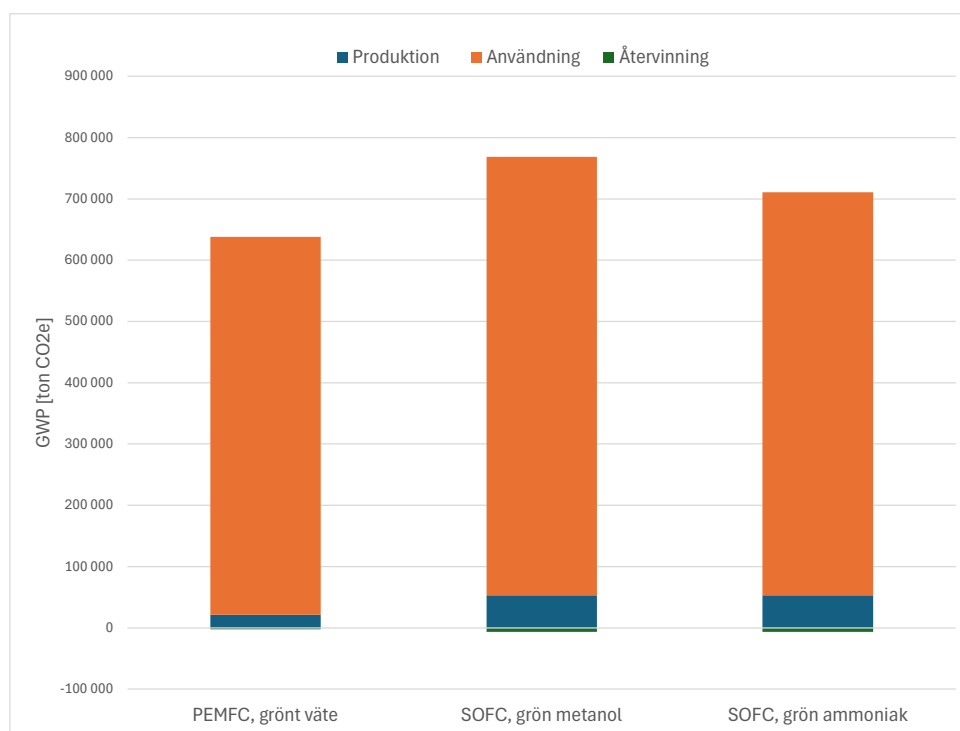
Figur 4.9: Miljöpåverkan för de olika batterityperna med tillhörande återvinningsmetoder under hela färjans livslängd

4.3.2 Bränslecellssystem

Resultatet av miljöpåverkan för de olika bränslecellerna med de olika bränslena visas i Tabell 4.4, där PEMFC med grönt väte som bränsle var det miljövänligaste alternativet. Resultatet visualiseras också i Figur 4.10 där miljöpåverkan för de olika faserna i livscykeln även syns. Även dessa värden representerar miljöpåverkan för bränslecellssystemen under hela färjans livslängd.

Tabell 4.4: Miljöpåverkan av olika bränsleceller och bränslen för hela färjans livslängd

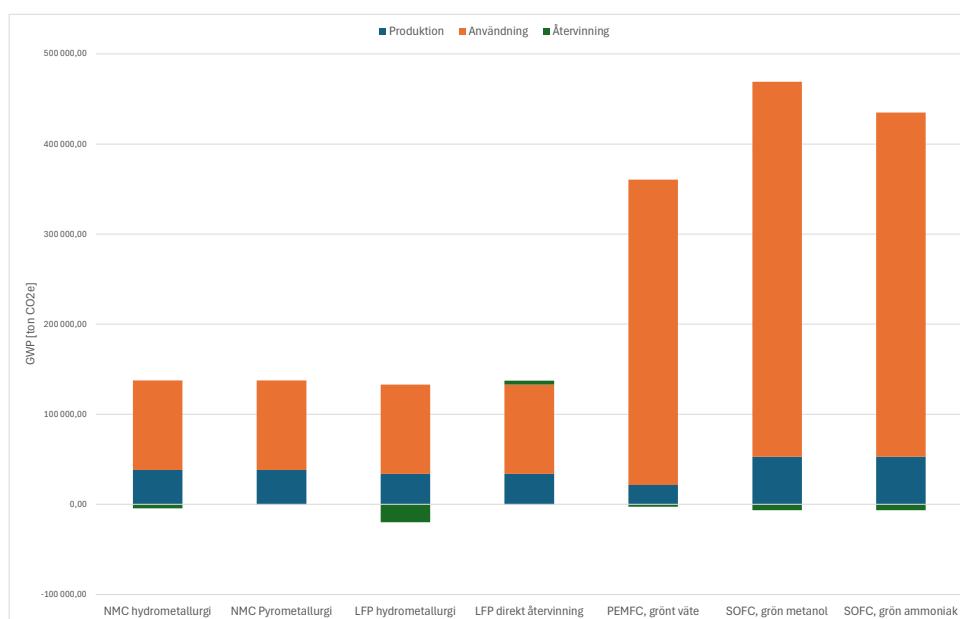
Specifikation	Ton CO ₂ e för 40 år
PEMFC med grönt väte	635 600
SOFC med grön ammoniak	704 700
SOFC med grön metanol	762 500



Figur 4.10: Miljöpåverkan för de olika bränslecellssystemen med tillhörande bränslen under färjans livslängd

4.3.3 Jämförelse av miljöpåverkan för batteri- och bränslecellssystem

I Figur 4.11 presenteras skillnaden av miljöpåverkan för alla olika sorters batteri-och bränslecellssystem. Resultatet visar att LFP-batterier med hydrometallurgi som återvinningsmetod är det miljövänligaste alternativet.



Figur 4.11: Miljöpåverkan för de olika systemen under hela färjans livslängd

4.3.4 Solcellssystem

Jämförelsen av monokristallina och CdTe-solceller som baserades på livscykelanalyser gav resultatet som sammanställs i Tabell 4.5. Resultatet visar att CdTe-solceller är det miljövänligaste alternativet, både med och utan återvinning.

Tabell 4.5: Emissioner för total solcellsinstallation [Ton CO₂e].

Specifikation	Med återvinning	Utan återvinning
Monokristallin	1 561	2 052
CdTe	775	729

4.4 Påverkas lastkapacitet?

Resultaten av viktberäkningarna från metoden i avsnitt 3.6 presenteras i Tabell 4.6. Eftersom den totala vikten för den konventionella drivlinan uppskattades till 1 232,76 ton blev resultatet att varken elmotorn och batterierna eller elmotorn och bränslecellssystemet väger mer än den konventionella drivlinan. När solcellernas vikt adderades till detta blev vikten fortfarande lägre.

Tabell 4.6: Resultat för viktberäkningar

Data	Värde [ton]
Vikt elmotor och batterier	1 101
Vikt elmotor och bränslecellssystem	246
Vikt för solceller	8

4.5 Kvalitativ resultatsammanställning

Utifrån resultaten från jämförelserna av de olika batteri-, bränslecell- och solcellsvarianterna kunde till slut ett val göras av vilka varianter som var mest lämpade. Resultaten sammanfattas i Tabell 4.7, 4.8 och 4.9 där ”-” anger att alternativet är sämre än det andra, ”+” anger att alternativet är bättre än det andra och ”x” betyder att de är likvärdiga.

Tabell 4.7: Jämförelse av batterier

	NMC-batterier	LFP-batterier
Energiförbrukning under drift	x	x
Kostnad	-	+
Miljöpåverkan	-	+
Summa ”+”	0	2
Summa ”-”	2	0
Resultat: Välj LFP-batterier		

Resultatet visade att LFP-batterier är lämpligast då de är billigare och har lägre miljöpåverkan än NMC-batterier.

4. Resultat

Tabell 4.8: Jämförelse av bränsleceller

	PEMFC grönt väte	SOFC grön ammoniak	SOFC grön metanol
Energiförbrukning under drift	-	x	x
Kostnad	-	+	-
Miljöpåverkan	+	-	-
Summa ”+”	1	1	0
Summa ”-”	2	1	2
Resultat: Välj SOFC med grön ammoniak som bränsle			

Då både PEMFC med grönt väte och SOFC med grön ammoniak fick ett ”+” men SOFC med grön ammoniak fick ett ”x” betyder det att SOFC med grön ammoniak är fördelaktigt ur två aspekter. Det här innebär att SOFC med grön ammoniak är det lämpligaste alternativet.

Tabell 4.9: Jämförelse av solceller

	Monokristallina solceller	CdTe-solceller
Totalt insamlad energi	-	+
Kostnad	-	+
Miljöpåverkan	-	+
Summa ”+”	0	3
Summa ”-”	3	0
Resultat: Välj CdTe-solceller		

Eftersom CdTe-solceller var mest fördelaktiga ur alla aspekter valdes denna solcellstypen.

Det slutgiltiga resultatet blev att LFP-batterier, SOFC med grön ammoniak och CdTe-solceller valdes då dessa alternativ hade mest fördelar vad gäller energiförbrukning (Insamlad energi för solceller), kostnad och miljöpåverkan.

4.6 Rekommendation av energiförsörjningssystem

För att avgöra vilket energiförsörjningssystem som var mest fördelaktigt för den eldrivna färjan gjordes en jämförelse av LFP-batterier, som var den lämpligaste batteritypen och SOFC med grön ammoniak som bränsle, som var den lämpligaste bränslecellstypen. Jämförelsen presenteras i Tabell 4.10.

Tabell 4.10: Jämförelse av energiförsörjningssystem

	LFP-batterier hydrometallurgi	SOFC grön ammoniak	Enhet
Energiförbrukning	44 (+)	71 (-)	[MWh]
Kostnad	5 849 (+)	31 934 (-)	[Mkr]
Miljöpåverkan	113 200 (+)	704 700 (-)	[ton CO _{2e} /kWh]
Summa”+”	3	0	
Summa”-”	0	3	
Resultat: Välj LFP-batterier			

Resultatet kan summeras till att LFP-batterier är lämpligare inom alla aspekter. Därav är LFP-batterier det system som rekommenderas.

5

Diskussion

I detta kapitel diskuteras resultatets tillförlitlighet med fokus på energiförbrukning, kostnad och miljöpåverkan. Även möjligheten att bibehålla färjans lastkapacitet och hastighet behandlas. Kapitlet avslutas med en genomgång av identifierade felkällor samt förslag på framtida arbeten.

5.1 Batteri som energiförsörjningssystem

Batterier är en beprövad teknik för energiförsörjning och bedöms vara väl lämpade för eldrivna färjor. En av batterisystemets främsta fördelar är den höga verkningsgraden där endast små energiförluster uppstår, vilket innebär att en stor andel av den lagrade energin kan levereras ut till propellern. Därmed blev energiförbrukningen lägre än för bränsleceller som har lägre verkningsgrad. En nackdel är dock att ett energikapaciteten för batterier bör vara 60% överdimensionerat på grund av batteriers optimala laddningsintervall. Eftersom beräkningarna redan inkluderar höga marginaler, i form av en högt vald sea margin, finns dock en möjlighet att de 110 MWh som energilagret motsvarar är överskattat. Det här innebär att energilagret troligtvis hade kunnat minskas något, utan att skada batterisystemet.

Batterisystemets miljöpåverkan uppstår främst genom användning av fossila bränslen vid framställning. Om produktionen hade skett i Sverige hade troligen miljöpåverkan minskat avsevärt.

Kostnadsbilden för batterier kan komma att förändras i takt med att tekniken utvecklas. Ökad produktion och förbättrade tillverkningsmetoder förväntas leda till lägre priser, vilket skulle kunna förbättra systemets ekonomiska lönsamhet över tid.

Arbetet baserades på antagandet att laddningsinfrastruktur redan existerar, vilket inte är i linje med de nuvarande förutsättningarna. I nuläget saknas den laddningsinfrastruktur som krävs för att möta färjans energibehov, vilket innebär att resultatet inte är genomförbart i praktiken. Om arbetet istället hade anpassats till den laddningsinfrastruktur som finns idag hade troligen laddningstiden behövts öka väsentligt. Detta skulle i sin tur leda till färre resor per dag vilket hade påverkat tidtabellen. I takt med att laddningsinfrastrukturen utvecklas finns det möjlighet att kortare laddningstider skulle kunna bidra till att tidtabellen kan bibehållas.

5.2 Bränsleceller som energiförsörjningssystem

Trots att batterier visat sig vara det mest fördelaktiga utifrån energiförbrukning, kostnad och miljöpåverkan bör även bränsleceller övervägas. Resultatet visar att bränsleceller som energiförsörjningssystem har högre energiförbrukning än batterier. Det orsakas av att bränslecellssystemet har en mycket lägre verkningsgrad än batterier. Den bränslecell som är mest lämpad för färjan är SOFC med grön ammoniak som bränsle. SOFC är en bränslecell som på grund av sin höga arbetstemperatur reagerar långsamt på effektförändringar, vilket innebär att de har sämre manövreringsegenskaper jämfört med batterier eller PEM-FC. Det här gör att SOFC kan lämpa sig för en hybridlösning med exempelvis batterier för att snabbare kunna reagera på effektförändringar och klara en hel färdsträcka. Vid analys av energiförbrukningen för ett energiförsörjningssystem baserat på bränsleceller antas bränsletankarna vara helt täta. Det här är ett optimistiskt antagande och troligtvis förekommer förluster i form av bränsle som förångas. Eftersom inte detta har tagits i beaktande finns en risk att det förekommer högre förluster.

Bränslecellers miljöpåverkan beror huvudsakligen på valet av bränsle och dess produk-

tionsprocess. Eftersom grön ammoniak valdes som bränsle innebär detta att väte framställs från elektrolys med grön el och vatten, som sedan kombineras med kvävgas extraerad från luften. Det här kommer med fördelen att inga utsläpp sker under användning men med en nackdel av en märkbart hög kostnad eftersom produktionen av grönt väte, som grön ammoniak baseras på, är mycket begränsad. Det här medför också en osäkerhet kring om den gröna ammoniaken kommer finnas tillgänglig för färjan. Om andra bränslen, som inte är gröna, hade undersökts hade troligen kostnaden minskat och tillgängligheten ökat. SOFC är däremot flexibel med vilken typ av bränsle som kan förbrännas i bränslecellen och därmed kan andra bränslen ersätta om det skulle uppstå brist på grön ammoniak.

På grund av den låga tillgängligheten av grön ammoniak, SOFCs långsamma reaktion på hastighetsförändringar och att energiförbrukningen är högre än för batterier lämpar sig inte ett energiförsörjningssystem enbart baserat på bränsleceller.

5.3 Solceller som energiförsörjningssystem

Utifrån aspekten energiförbrukning kan solceller inte bidra med energi som täcker hela energibehovet för färjan. Detta beror på den låga solinstrålningen. Därför blev resultatet att den energi som genereras från solcellerna kan användas som ett komplement till hotellasten. Eftersom ytan uppskattats finns det en möjlighet att den faktiska installationsytan som kan användas är större eller mindre än den uppskattade ytan. Figur 4.4 indikerar att även om solcellsinstallationens yta ökar markant kommer det totala energibehovet för hotellasten fortfarande vara mycket högre. Om ytan skulle vara något större eller mindre bedöms därför inte göra en stor skillnad för resultatet. Dessutom är solinstrålning en relativt flyktig energikälla, då den genererade energin varierar mellan olika dagar. Därav är det inget alternativ att enbart ha detta som energiförsörjningssystem.

Vid val av svenskproducerade solceller skulle GWP minska drastiskt för solceller. Detta på grund av att det främst är energin för produktion och återvinning som bidrar till utsläpp. Även faktumet att solcellerna annars behöver transporteras från Asien, exempelvis från Kina där den största produktionen i dagsläget sker, bidrar till höga utsläpp som kan

undvikas med hjälp av svenskproducerade solceller. Det skulle dock medföra högre installationskostnader, då svenskproducerade varor generellt är dyrare. Det är en avvägning som rederier själva måste göra.

Ur ett kostnadsperspektiv innebär installation av solceller en initial investering som kan vara relativt hög. På lång sikt kan dock driftkostnaderna minska, eftersom solenergi är kostnadsfri efter installationen. Detta kan potentiellt ge en positiv ekonomisk effekt över färjans livslängd, vilket visualiseras i Figur 4.8. De förenklingar som gjorts i samband med beräkningarna (3.26) - (3.30) ansågs som nödvändiga för projektet, men kan ha påverkan på den faktiska produktionen.

Den krävande miljö som solcellerna utsätts för kan också påverka deras nedbrytning, vilket på sikt kan försämra energiproduktionen. Detta kan i sin tur påverka lönsamhet negativt. Om solcellssystemet skulle behöva bytas ut skulle miljöbelastningen och installationskostnaden fördubblas då det krävs nyproduktion av solcellssystemet. Detta skulle också innebära att färjan hade behövt tas ur drift för reparation, vilket hade orsakat förluster för Stena Line. Vid beräkningen av utsläppen för de olika livscykelstadierna användes ett procentuellt fördelat värde från en LCA i kombination med ett absolut värde i kg/m^2 hämtat från en annan LCA. Detta tillvägagångssätt är inte optimalt för att ta fram exakta resultat, men bedöms som tillräckligt tillförlitligt i och med att syftet främst är att möjliggöra en jämförande analys.

5.4 Bibehålls färjans lastkapacitet?

Vid jämförelse av vikten för den konventionella drivlinan och den elektriska drivlinan blev resultatet att den elektriska drivlinan skulle väga mindre än den konventionella, oavsett energiförsörjningssystem. Då den konventionella färjan endast behöver tankas varannan vecka minskar vikten för bränslet successivt innan den tankas igen. Om den eldrivna färjan hade haft ett energiförsörjningssystem bestående av endast batterisystem, är vikten konstant. Detta innebär att färjan behöver vara konstruerad för att klara en konstant vikt

under en längre period snarare än en vikt som minskar successivt. Detta kan eventuellt leda till materialutmattning eller stressfrakturer i skrovet.

När beräkningarna för vikten gjordes inkluderades inte kringutrustning utan endast vikten för de de huvudsakliga systemen. För batterisystemet beaktades endast vikten för batterierna och elmotorn, för bränslecellssystemet beaktades vikten för bränslecellen, bränslet och elmotorn och för solcellssystemet beaktades endast vikten för solcellerna. Det som inte beaktades var till exempel skyddsväggar, vilket kommer addera vikt för den eldrivna färjan. Det här leder till att vikten för den eldrivna färjan troligen är högre än de redovisade värdena. Dock togs inte vikten för tankarna i den konventionella drivlinan heller hänsyn till, vilket innebär att vikten för den konventionella drivlinan också är högre och därför anses det vara jämförbara värden.

5.5 Metodval

De metoder som legat till grund för projektet baseras på rekommendationer och grundar sig i en kombination av kvantitativa tekniska beräkningar och kvalitativa datainsamlingar, där fokus låg på att skapa en realistisk och tillämpbar jämförelse mellan olika energiförsörjningssystem för en eldriven färja. Eftersom projektet syftar till att ge ett beslutsunderlag snarare än att utveckla nya teknologier, valdes en modellbaserad ansats där insamlad driftdata kombineras med etablerade formler och parametrar från litteraturen.

Ett metodval var att använda en förenklad modell för fartygsframdrift baserad på admiraltetsformeln. Detta eftersom den möjliggör rimliga uppskattningar av effektbehov utifrån fartygsdata, utan att kräva tillgång till detaljerade geometrier eller komplexa simuleringsmiljöer. Denna förenkling är motiverad av arbetets syfte och omfattning.

Beräkningarna är baserade på hastighetsdata loggad med ett 15 minuters intervall för fyra olika dagar. Även om datan speglar verkliga förhållanden, är urvalet begränsat både vad gäller tid och väderförhållanden. Detta innebär att resultatet inte nödvändigtvis fångar alla variationer vad gäller drift och väder.

Metodiken i arbetet har möjliggjort kvantitativa jämförelser mellan alternativen på en övergripande nivå, men resultaten bör tolkas med medvetenhet om de förenklingar och antaganden som ligger till grund för analysen. En mer detaljerad modellering eller mer omfattande dataunderlag hade kunnat stärka slutsatserna och möjliggöra en mer generell tillämpning av resultaten.

5.6 Resultatdiskussion

Resultatet från studien är att det är teoretiskt möjligt att driva en elektrisk färja uteslutande med batterier. Dock skull det höga effektbehovet för laddning ställa höga krav på en välutvecklad laddningsinfrastruktur för att kunna tillgodose den laddningseffekt som behövs för att kunna upprätthålla den befintliga tidtabellen. Detta indikerar att en hybridlösning, där bränsleceller kombineras med batterier, kan vara en realistiskt alternativ. Genom att integrera bränsleceller kan delar av energibehovet avlastas från batterisystemet, vilket minskar kravet på en hög laddningseffekt. Eftersom bränslecellerna dessutom har kortare tankningstid än batterier, kan det bidra till att tidtabellen hålls även vid begränsad laddningskapacitet för batterierna. Eftersom SOFC med grön ammoniak som bränsle reagerar långsamt på effektförändringar och grön ammoniak är en begränsad resurs är det fördelaktigt att kombinera bränslecellerna med batterier. Den optimala fördelningen mellan batterier och bränsleceller har dock inte fastställts inom ramen för denna studien, men resultaten indikerar att batterier bör utgöra den huvudsakliga energikällan på grund av bland annat den begränsade tillgången på grön ammoniak. Som tillägg till kombinationen av batterier och bränsleceller kan solceller användas för att delvis försörja system ombord på färjan som inte används för framdrift.

Vid undersökningen av miljöpåverkan för de olika energiförsörjningssystemen användes livscykelanalyser från olika källor då ingen analys som jämförde de olika systemen kunde hittas. Det här innebär att jämförelsen har gjorts med olika förutsättningar. Eftersom en livscykelanalys bygger på olika antaganden och avgränsningar, som till exempel systemgränser, kan resultaten därför skilja sig mellan olika studier. Likaså påverkar valet av data,

som till exempel valet av energimix och transportsystem. Detta innebär att jämförelser mellan olika livscykelanalyser måste göras med försiktighet.

5.7 Samhälleliga och etiska aspekter

Arbetet tar upp hur elektrifiering kan bidra till positiva effekter såsom minskade utsläpp och förbättrad luftkvalitet, vilket kan gynna både klimatet och närboende i hamnområden. Samtidigt uppmärksammas vissa begränsningar, exempelvis att vätgas och batterier i dagsläget främst framställs från fossila källor, vilket kan påverka den totala klimatnyttan. Vidare belyses att en elektrifierad drift kan innebära ökad belastning på det lokala elnätet samt ställa krav på ny infrastruktur i hamnar. Även frågor om social tillgänglighet har tagits i beaktande, där det är viktigt att ha i åtanke att tekniken inte bör leda till ökade biljettpriser eller minskad tillgång till färjetrafik. Dessa aspekter har inte analyserats i detalj, men har beaktats i val av antaganden och avgränsningar i arbetet. Etiska och samhälleliga faktorer förstärker dock vikten av att välja ett hållbart energiförsörjningssystem.

5.8 Förslag för framtida arbete

Utifrån resultatet av studien har ämnen för framtida arbete identifierats. Ett förslag kan vara att förbättra den här studien, med bättre data och bättre modeller för att jämföra de olika energiförsörjningssystemen, vilket hade kunnat göras med mer djupgående intervjustudie, simuleringar och prototyper. Det här hade kunnat göras med längre tidsram och lämpar sig därför för fortsatt arbete med studien.

En fortsättning på studien kan göras genom att till exempel undersöka vilken den optimala fördelningen av batterier och bränsleceller är. Det vore också relevant att i framtida studier undersöka hur stor laddningsinfrastruktur som är möjlig och på så sätt undersöka om alla rutter är möjliga att elektrifiera i framtiden. Även andra faktorer som kan påverka räckvidden hade varit intressanta att undersöka. Vidarearbete kring hur solcellernas vikt

påverkar stabiliteten, med tanke på hur högt upp de är placerade, hade varit relevant att undersöka med hjälp av simuleringar.

En möjlig framtida studie kan vara att undersöka kritiska aspekter kopplade till återvinning av material i energisystem, såsom batterier och bränsleceller. Effektiv och hållbar återvinning är avgörande för att minska miljöpåverkan, säkerställa resurseffektivitet och minimera beroendet av nyutvinning av sällsynta eller miljöbelastade material.

Till sist finns det även ett behov av att undersöka hur förnybara energikällor kan användas i större utsträckning. Till exempel bör möjligheten att använda segel som ett komplement för framdrift undersökas, både vad gäller teknisk genomförbarhet och dess påverkan på den totala energiförbrukningen. I takt med att tredje generationens solcellsteknik utvecklas hade eventuellt koncentrerande solceller kunnat implementeras, vilket potentiellt skulle kunna mer än fördubbla energiproduktionen från solcellsanläggningen.

6

Slutsats

Arbetet visar att ett energiförsörjningssystem för en eldriven färja kan dimensioneras med hjälp av batterier, bränsleceller och solceller. De alternativ som bedömdes som mest lämpligt utifrån energiförbrukning, kostnad och miljöpåverkan var LFP-batterier, SOFC med grön ammoniak och CdTe-solceller.

Varken SOFC eller solceller är energiförsörjningssystem som hade kunnat tillämpas självständigt för denna applikation. Om SOFC med grön ammoniak hade använts självständigt hade det medfört svårigheter med manövrering och begränsad tillgång på bränsle. Solceller begränsas av låg verkningsgrad, begränsad installationsyta och varierande solinstrålning. Detta innebär att de endast kan användas som komplement främst för att försörja hotellasten. I kombination med batterier kan både bränsle- och solceller bidra till att täcka färjans totala energibehov.

När den konventionella drivlinan byts ut mot en elektrisk drivlina blir inte vikten för drivlinan högre, oavsett val av de undersökta energiförsörjningssystemen. Det här medför att färjans lastkapacitet kan bevaras under förutsättning att hastigheten är densamma som för den loggade driftprofilen för Stena Jutlandica.

En hypotes av arbetet är att det med dagens teknik är det mest fördelaktigt med LFP-batterier som energiförsörjningssystem utifrån aspekterna energiförbrukning, kostnad och miljöpåverkan för en eldriven färja på sträckan Göteborg-Fredrikshamn. En kombination av batteri- och bränslecellssystem hade varit intressant att undersöka vidare.

Referenser

- [1] Stena Rederi. ”Stena Jutlandica.” 2013 [Online]. Tillgänglig: <https://stenaexternal.imageshop.se/1372044/Detail/Index/3669458>. (Hämtad: 2025-05-12).
- [2] S. Dhar m.fl., ”Transport,” i *Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, juli 2023, kap. 11, s. 1049–1160. DOI: 10.1017/9781009157926.012.
- [3] Europeiska kommissionen. ”En europeisk klimatlag.” u.å. [Online]. Tillgänglig: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-climate-law_sv. (Hämtad: 2025-02-04).
- [4] B. Garberg, ”Handlingsplan för gröna sjöfartskorridorer,” Trafikverket, Borlänge, Sverige, 2024, [Online]. Tillgänglig: <https://trafikverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1879215/FULLTEXT01.pdf>. Hämtad: 2025-02-08.
- [5] DNV. ”Batteries-Alternative Fuels Insight.” [Online]. Hämtad: Maj. 2, 2025. (u.å), URL: <https://store.veracity.com/premium-access-alternative-fuels-insight-afi>.
- [6] H. Abrahamsen, *Ellen: A Fully Electric Ferry Traveling in Ranges Never Seen Before, Presented at Decarbonisation of the Maritime Sector Conference, Green Hysland Project*, Presentation slides, okt. 2022. URL: https://greenhysland.eu/wp-content/uploads/2022/10/2022-10-05_Decarbonisation-of-the-Maritime-Sector_Ellen-eFerry_compressed.pdf.
- [7] Y. Bowes, ”Aurora i framkant efter fem år med eldrift,” *Sjömannen*, jan. 9, 2024, [Online]. Tillgänglig: <https://www.sjomannen.se/reportage/ombord/aurora-i-framkant-efter-fem-ar-med-eldrift/>. Hämtad: 2025-01-31.
- [8] L. Lundstedt, ”Fossilfriare skärgård – En förstudie om möjligheter och förutsättningar för en fossilfri båttrafik i Bottenvikens skärgård,” Bottenvikens skärgård

- kommunsamverkan genom Luleå kommun, Luleå, Sverige, KFF 2021/421, 2021, [Online]. Tillgänglig: <https://www.bottenvikensskargard.se/wp-content/uploads/2021/11/Fossilfriare-skargard-BVS-final.pdf>. Hämtad: 2025-05-03.
- [9] Stena Line. ”Stena Elektra – from vision to vessel.” u.å. [Online]. Tillgänglig: <https://stenaline.com/stena-elektra-from-vision-to-vessel/>. (Hämtad: 2025-01-31).
- [10] DNV. ”Fuel Cell-Alternative Fuels Insight.” [Online]. Hämtad: Maj. 2, 2025. (u.å), URL: <https://store.veracity.com/premium-access-alternative-fuels-insight-afi>.
- [11] Powercell group, privat kommunikation, febr. 2025.
- [12] Powercell Group. ”World’s largest marine fuel cell installation.” u.å. [Online]. Tillgänglig: <https://powercellgroup.com/worlds-largest-marine-fuel-cell-systems/>. (Hämtad: 2025-02-12).
- [13] Norwegian ferry routes. ”Ferry schedule for Bodø - Moskenes.” u.å. [Online]. Tillgänglig: <https://www.fergeruter.info/timetable/bodo-moskenes?>. (Hämtad: 2025-05-05).
- [14] C. Ghenai, M. Bettayeb, B. Brdjanin och A. K. Hamid, ”Hybrid solar PV/PEM fuel Cell/Diesel Generator power system for cruise ship: A case study in Stockholm, Sweden,” *Case Studies in Thermal Engineering*, årg. 14, sept. 2019. DOI: 10.1016/j.csite.2019.100497.
- [15] Direct Ferries. ”Populära Färjerederier för Stockholm - Mariehamn.” u.å. [Online]. Tillgänglig: https://www.directferries.se/stockholm_mariehamn_farja.htm. (Hämtad: 2025-05-05).
- [16] T. Albaghjati, K. Eliasson, E. Johansson, K. Karlsson, E. Stenvall och V. R. Svensson, ”Dimensionering och miljöutvärdering av elektrisk drivlina till färja,” kandidatuppsats, Institutionen för elektroteknik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg, Sverige, 2021. [Online] Tillgänglig: <https://hdl.handle.net/1234567>.
- [17] Stena Line. ”Trafikinformation.” u.å. [Online]. Tillgänglig: <https://booking.stenaline.se/trafikinformation>. (Hämtad: 2025-02-11).
- [18] Direct Ferries. ”Gothenburg – Frederikshavn.” u.å. [Online]. Tillgänglig: https://www.directferries.com/gothenburg_frederikshavn_ferry.htm. (Hämtad: 2025-05-09).

- [19] Marine Traffics. "STENA JUTLANTICA." u.å. [Online]. Tillgänglig: https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:320298/mmsi:265410000/imo:9125944/vessel:STENA_JUTLANDICA. (Hämtad: 2025-02-13).
- [20] Nordcad. "Spara tid och förbättra noggrannheten med branschens ledande meshing." u.å. [Online]. Tillgänglig: <https://www.nordcad.se/produkter-och-losningar/cfd/meshing/>?. (Hämtad: 2025-02-09).
- [21] A. F. Molland, S. R. Turnock och D. A. Hudson, *Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Ship Propulsive Power*, 2. utg. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2017, ISBN: 9781107142060. DOI: 10.1017/CBO9780511974113. URL: <https://www.cambridge.org/core/books/ship-resistance-and-propulsion/9BAA3B1283F70D4BA087DB0A64070419>.
- [22] Wärtsilä. "Admiralty Coefficient, Admiralty Constant." u.å. [Online]. Tillgänglig: <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/admiralty-coefficient-admiralty-constant>. (Hämtad: 2025-05-02).
- [23] Per Mottram Hogström, Chalmers tekniska högskola, privat kommunikation, febr. 2025.
- [24] Wärtsilä. "Sea margin." u.å. [Online]. Tillgänglig: <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/sea-margin>. (Hämtad: 2025-04-08).
- [25] Wärtsilä. "Engine margin." u.å. [Online]. Tillgänglig: <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/engine-margin>. (Hämtad: 2025-04-08).
- [26] S. Thorburn, "Electric passenger ferries: Future charging infrastructure," ABB, Zürich, Schweiz, tekn. rapport, 2021, [Online]. Tillgänglig: <https://library.e.abb.com/public/2377c8c44d3d4f94a8a8d838e52541e5/Electric%20passenger%20ferries.pdf> Hämtad: 2025-03-20.
- [27] MAN Energy Solutions, "Basic Principles of Ship Propulsion," MAN Energy Solutions, Köpenhamn, Danmark, 2018, [Online]. Tillgänglig: https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync-archive/basic-principles-of-ship-propulsion-eng.pdf?sfvrsn=48fc05b5_7. Hämtad: 2025-03-27.
- [28] *Technical Explanation for Inverters*, Kyoto, Japan: OMRON Corporation, u.d. [Online]. Tillgänglig: https://www.ia.omron.com/data_pdf/guide/9/inverter_tg_e_1_1.pdf, Hämtad: 2025-04-20.

- [29] N. Mjøs m.fl., "DNV GL Handbook for Maritime and Offshore Battery Systems," DNV GL Maritime Advisory, 2016-1056, Rev. V1.0, 2016, [Online]. Tillgänglig: https://sustainableworldports.org/wp-content/uploads/DNV-GL_2016-Handbook-maritime-offshore-battery-systems-report.pdf. Hämtad: 2025-03-28.
- [30] B. Craig, "The Future of Batteries in the Marine Sector: What Lies Beyond the Horizon?" University of Southampton, Southampton, England, 2020, [Online]. Tillgänglig: <https://www.southampton.ac.uk/~assets/doc/The%20Future%20of%20Batteries%20in%20the%20Marine%20Sector.pdf?>. Hämtad: 2025-04-08.
- [31] R. Borah, F. Hughson, J. Johnston och T. Nann, "On battery materials and methods," *Materials Today Advances*, årg. 6, juni 2020. DOI: 10.1016/j.mtadv.2019.100046.
- [32] Hans Tistrand, Stena Teknik, privat kommunikation, mars 2025.
- [33] S. Ma m.fl., "Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review," *Progress in Natural Science: Materials International*, årg. 28, nr 6, s. 653–666, dec. 2018. DOI: 10.1016/j.csite.2019.100497.
- [34] R. Sachitanand. "LFP or NMC batteries – which solution is better for maritime?" okt. 13, 2021. [Online]. Tillgänglig: <https://echandia.se/insights/article/lfp-nmc-batteries/>. (Hämtad: 2025-03-16).
- [35] G. L. Trombetta, S. G. Leonardi, D. Aloisio, L. Andaloro och F. Sergi, "Trends in Electrical Energy Storage Technologies for Electric Vehicles," *Energies*, årg. 17, nr 5, 2024. DOI: 10.3390/en17051019.
- [36] R. Wang, G. Liu, C. Wang, Z. Ji och Q. Yu, "A Comparative Study on Mechanical-Electrical-Thermal Characteristics and Failure Mechanism of LFP/NMC/LTO Batteries under Mechanical Abuse," *eTransportation*, årg. 22, 2024. DOI: 10.1016/j.etrans.2024.100359.
- [37] California Air Resources Board, "Appendix E: Battery Cost for Heavy-Duty Electric Vehicles," California Air Resources Board, 2017, [Online]. Tillgänglig: <https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2020-06/Appendix%20E%20Battery%20Cost%20for%20Heavy-Duty%20Electric%20Vehicles.pdf>. Hämtad: 2025-02-15.

- [38] Y. Miao, P. Hynan, A. von Jouanne och A. Yokochi, "Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements," *Energies*, årg. 12, nr 6, 2019. DOI: 10.3390/en12061074.
- [39] Nationalencyklopedin. "Bränslecell." u.å. [Online]. Tillgänglig: <https://www.nec.se/uppslagsverk/encyklopedi/lÅeng/brÅdnslecell>. (Hämtad: 2025-03-08).
- [40] International Maritime Organization. "Fuel cell." u.å. [Online]. Tillgänglig: <https://futurefuels.imo.org/home/future-insight/technologies/fuel-cell/>. (Hämtad: 2025-03-09).
- [41] K. Durkin m.fl., "Hydrogen-Powered Vehicles: Comparing the Powertrain Efficiency and Sustainability of Fuel Cell versus Internal Combustion Engine Cars," *Energies*, årg. 17, nr 5, 2024. DOI: 10.3390/en17051085.
- [42] Z. Wang, H. Tang, Z. Wu, Y. Ji och F. Han, "Evaluating fuel cell power systems for coastal and inland waterway vessels: Technical and economic perspectives," *Energy Conversion and Management*, årg. 323, 2025. DOI: 10.1016/j.enconman.2024.119200.
- [43] F. M. Kanchiralla, S. Brynolf och A. Mjelde, "Role of biofuels, electro-fuels, and blue fuels for shipping: environmental and economic life cycle considerations," *Energy & Environmental Science*, årg. 17, s. 6393–6418, 2024. DOI: 10.1039/D4EE01641F.
- [44] W. Chen, B. Chen, K. Meng, H. Zhou och Z. Tu, "Experimental Study on Dynamic Response Characteristics and Performance Degradation Mechanism of Hydrogen-Oxygen PEMFC During Loading," *International Journal of Hydrogen Energy*, årg. 48, nr 12, s. 4800–4811, 2023. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.036.
- [45] F. Baldi, S. Moret, K. Tammi och F. Maréchal, "The role of solid oxide fuel cells in future ship energy systems," *Energy*, årg. 194, 2020. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116811.
- [46] T. Meng m.fl., "Optimization and efficiency analysis of methanol SOFC-PEMFC hybrid system," *International Journal of Hydrogen Energy*, årg. 47, nr 64, s. 27 690–27 702, 2022. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.06.102.
- [47] M. E. Solutions, "Hydrogen in shipping," MAN Energy Solutions, 2025, [Online]. Tillgänglig: <https://www.man-es.com/campaigns/download-Q1-2025/Download/>

- hydrogen - in - shipping / faffa612 - 4edc - 4a2a - a5f9 - df89c632a431 / Future - Fuels - Hydrogen / 5BC163A3579848B36C7C3FBF3F637412B9F75AEE / ?cid = 60b82422 - 3760 - 4f90 - 8f17 - 63a33dfe4566. Hämtad: 19 april 2025.
- [48] MAN Energy Solutions, "A Maritime Energy Transition," MAN Energy Solutions, Köpenhamn, Danmark, 2025, [Online]. Tillgänglig: <https://www.man-es.com/campaigns/download-Q1-2025/Download/a-maritime-energy-transition/bee9b06b-c251-49b5-9d4c-ddd7f9cd35c0/Maritime-Energy-Transition/5BC163A3579848B36C7C3FBF3F637412B9F75AEE/?cid=60b82422-3760-4f90-8f17-63a33dfe4566>. Hämtad: 2025-03-10.
- [49] Tukes. "Säkerhet vid hantering och lagring av vätgas." 2024. [Online]. Tillgänglig: <https://tukes.fi/sv/sakerhet-vid-hantering-och-lagring-av-vatgas#flytande-vate>. (Hämtad: 2025-05-06).
- [50] S. Erdoğan, "LHV and HHV prediction model using regression analysis with the help of bond energies for biodiesel," *Fuel*, årg. 301, 2021. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.121065.
- [51] S. Sharma, K. K. Jain och A. Sharma, "Solar Cells: In Research and Applications—A Review," *Scientific Research*, årg. 6, nr 12, 2015. DOI: 10.4236/msa.2015.612113.
- [52] M. Paulson och M. Chacko, "Marine Photovoltaics: A Review of Research and Developments, Challenges and Future Trends," *International Journal of Scientific & Technology Research*, årg. 8, nr 9, 2019, [Online]. Tillgänglig: <https://www.ijstr.org/final-print/sep2019/Marine-Photovoltaics-A-Review-Of-Research-And-Developments-Challenges-And-Future-Trends.pdf>. Hämtad: 2025-04-08.
- [53] P. Singh och N. Ravindra, "Temperature dependence of solar cell performance—an analysis," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, årg. 101, s. 36–45, 2012. DOI: 10.1016/j.solmat.2012.02.019.
- [54] K. Lu, "Comparison and Evaluation of Different Types of Solar Cells," *Applied and Computational Engineering*, årg. 23, nr 1, s. 263–270, 2023. DOI: 10.54254/2755-2721/23/20230664.
- [55] D. M. Atia, A. A. Hassan, H. T. El-Madany, A. Y. Eliwa och M. B. Zahran, "Degradation and energy performance evaluation of mono-crystalline photovoltaic

- modules in Egypt,” *Scientific Reports*, årg. 13, 2023. DOI: 10.1038/s41598-023-40168-8.
- [56] D. Camel, E. Cierniak, B. Drevet, R. Cabal, D. Ponthenier och N. Eustathopoulos, ”Directional solidification of photovoltaic silicon in re-useable graphite crucibles,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, årg. 215, 2020. DOI: 10.1016/j.solmat.2020.110637.
- [57] M. B. Askari, V. M. M. Abadi och M. Mirhabibi, ”Types of Solar Cells and Application,” *American Journal of Optics and Photonics*, årg. 3, nr 5, 2015. DOI: 10.11648/j.ajop.20150305.17.
- [58] V. Fthenakis, E. Leccisi och P. Sinha, ”Updated sustainability status of cadmium telluride thin-film photovoltaic systems and projections,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, årg. 32, nr 12, 2024. DOI: 10.1002/pip.3837.
- [59] R.Itten, R.Frischknecht och M.Stucki, ”Life Cycle Inventoris of electricity Mixes and Grid,” 2012.
- [60] Naturvårdsverket. ”Beräkna klimatpåverkan.” 2023. [Online]. Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/vagledning-och-stod/luft-och-klimat/berakna-klimatpaverkan/>. (Hämtad: 2025-04-25).
- [61] *Batteriers miljöpåverkan*, Stockholm, Sverige: Power Circle, u.d. [Online]. Tillgänglig: https://powercircle.org/batteriers_miljopaverkan.pdf, Hämtad: 2025-03-28.
- [62] E.Mattson, E.Lindblom och E.Emilsson, ”Miljöeffekter av elnät och energilagring,” Svenska Miljöinstitutet, Stockholm, Sverige, 2021, [Online]. Tillgänglig: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2%3A1549438/FULLTEXT01.pdf>. Hämtad: 2025-03-28.
- [63] J.Quan m.fl., ”Comparative life cycle assessment of LFP and NCM batteries including the secondary use and different recycling technologies,” *International Journal of Hydrogen Energy*, årg. 819, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153105.
- [64] L. H. Xavier, M. Ottoni och L. P. P. Abreu, ”A comprehensive review of urban mining and the value recovery from e-waste materials,” *Resources, Conservation and Recycling*, årg. 190, 2023. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106840.

- [65] S. Manikandan, D. Inbakandan, C. V. Nachiyar och S. K. R. Namasivayam, "Towards sustainable metal recovery from e-waste: A mini review," *Sustainable Chemistry for the Environment*, årg. 2, 2023. DOI: 10.1016/j.scenv.2023.100001.
- [66] S. Sarner, A. Schreiber, N. H. Menzler och O. Guillon, "Recycling Strategies for Solid Oxide Cells," *Advanced Energy Materials*, årg. 12, nr 35, 2022. DOI: 10.1002/aenm.202201805.
- [67] J. Hou m.fl., "Platinum-group-metal catalysts for proton exchange membrane fuel cells: From catalyst design to electrode structure optimization," *Energy Chem*, årg. 2, nr 1, 2020. DOI: 10.1016/j.enchem.2019.100023.
- [68] M. Mori m.fl., "Life cycle sustainability assessment of a proton exchange membrane fuel cell technology for ecodesign purposes," *International Journal of Hydrogen Energy*, årg. 48, nr 99, 2023. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.05.255.
- [69] C. Martínez de León, P. Molina, C. Ríos och J.J. Brey, "Green hydrogen production's impact on sustainable development goals," *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.12.355.
- [70] F. B. Juangsa, A. R. Irhamna och M. Aziz, "Production of ammonia as potential hydrogen carrier: Review on thermochemical and electrochemical processes," *International Journal of Hydrogen Energy*, årg. 46, 2021. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.01.214.
- [71] World Economic Forum, "Net Zero Tracker 2023: Ammonia," World Economic Forum, Geneva, Schweiz, 2023, [Online]. Tillgänglig: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Net_Zero_Tracker_2023_AMMONIA.pdf. Hämtad: 2025-04-16.
- [72] Perpetual Next. "How green methanol is made." 2024. [Online]. Tillgänglig: <https://perpetualnext.com/en/news/how-green-methanol-is-made/>. (Hämtad: 2025-04-20).
- [73] Global CCS Institute, "Global Status of CCS: 2024 – Collaborating for a Net-Zero Future," Global CCS Institute, tekn. rapport, jan. 2024, Online report. URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2024/01/Global-Status-of-CCS-Report-1.pdf>.

- [74] D. Mlynarczyk, "Solcellernas plats i framtidens energi i Sverige," Självständigt arbete, Linneuniversitetet, Kalmar, Sverige, 2022. [Online] Tillgänglig: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1736368/FULLTEXT01.pdf>.
- [75] Greenpeace Sverige. "Solcellers miljöpåverkan." 2024. [Online]. Tillgänglig: <https://www.greenpeace.org/sweden/snabbfakta/energi/solcellers-miljopaverkan/>. (Hämtad: 2025-05-05).
- [76] M. Vellini, M. Gambini och V. Prattella, "Environmental impacts of PV technology throughout the life cycle: Importance of the end-of-life management for Si-panels and CdTe-panels," *Energy*, årg. 138, s. 1099–1111, 2017. DOI: 10.1016/j.energy.2017.07.031.
- [77] S. Hemming. "Uppbyggnad av solceller: Vad för material är solpaneler gjorda av?" 2025. [Online]. Tillgänglig: <https://hemsol.se/solceller/uppbyggnad-material/>. (Hämtad: 2025-04-25).
- [78] Nordic Manufacturing. "Hur tillverkas glas – Vilka ingredienser används?" 2025. [Online]. Tillgänglig: <https://nordicmanufacturing.net/hur-tillverkas-glas/>. (Hämtad: 2025-04-25).
- [79] V. Fthenakis, R. Betita, M. Shields, R. Vinje och J. Blunden, "Life Cycle Analysis of High-Performance Monocrystalline Silicon Photovoltaic Systems: Energy Payback Times and Net Energy Production Value," *27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Frankfurt, Tyskland, 2012. DOI: 10.4229/27THEUPVSEC2012-6CV.4.14.
- [80] N. Najmi och A. Rachid, "A Review on Solar Panel Cleaning Systems and Techniques," *Energies*, årg. 16, nr 24, 2023. DOI: 10.3390/en16247960.
- [81] Stena Line. "Stena Jutlandica." u.å. [Online]. Tillgänglig: <https://stenaline.com/about-us/our-ships/stena-jutlandica/>. (Hämtad: 2025-05-02).
- [82] Stena Line Freight. "Stena Jutlandica." [Online]. Tillgänglig: <https://stenalinefreight.com/routes/vessels/Stena-Jutlandica/>. Hämtad: 9 mars 2025. (2025).
- [83] Ship Technology. "Stena Jutlandica Train, Vehicle and Passenger Ferry." u.å. [Online]. Tillgänglig: <https://www.ship-technology.com/projects/jutlandica/>. (Hämtad: 2025-03-09).

- [84] T. Lee, G. Song, J. Kim, J. Lee och H. Park, "Effect of Propeller Eccentric Forces on the Bearing Loads of the Complicated Shafting System for Large Container Ships," *Fifth International Symposium on Marine Propulsors smp'17*, Espoo, Finland, 2017, [Online]. Tillgänglig: <https://www.marinepropulsors.com/proceedings/2017/MA3-3.pdf> Hämtad 2025-05-09.
- [85] Lighthouse. "Stena har skrivit batterikontrakt för Jutlandica." 2018. [Online]. Tillgänglig: <https://lighthouse.nu/sv/aktuellt/nyheter/stena-har-skrivit-batterikontrakt-foer-jutlandica>. (Hämtad: 2025-04-28).
- [86] SP Global Commodity Insights. "STENA JUTLANDICA." u.å. [Online]. Tillgänglig: <https://maritime.ihs.com/Ships/Details/Index/9125944>. (Hämtad: 2025-05-05).
- [87] SMHI. "Vind." u.å. [Online]. Tillgänglig: <https://www.smhi.se/data/temperatur-och-vind/vind/wind/71380>. (Hämtad: 2025-02-25).
- [88] J. Song. "Charged Choices: The LFP VS NMC Question." 2020. [Online]. Tillgänglig: <https://www.ihiterrasan.com/posts/charged-choices-the-lfp-vs-nmc-question?>. (Hämtad: 2025-05-09).
- [89] *Clean energy solutions that save money from day one*, Wancover, Kanada: Shift, u.d. [Online]. Tillgänglig: <https://shift-cleanenergy.com/brochure/>, Hämtad: 2025-05-05.
- [90] *ABB industrial drives ACS1000 drives 315 to 5000 kW*, Zurich, Schweiz: ABB, 2018. [Online]. Tillgänglig: https://agonenerji.com.tr/wp-content/uploads/2021/04/ACS1000_medium_voltage_drive_catalog_3BHT490400R0001_RevK_EN.pdf, Hämtad: 2025-05-04.
- [91] *System Project Guide For Passenger Vessels*, Zurich, Schweiz: ABB, 2011. [Online]. Tillgänglig: https://library.e.abb.com/public/608df0ae42ea2ce8c1257abd004ff506/ABB_System_Project_Guide_Passenger_Vessels.pdf, Hämtad: 2025-05-05.
- [92] V. Fthenakis, E. Leccisi och P. Sinha, "Updated sustainability status of cadmium telluride thin-film photovoltaic systems and projections," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, årg. 32, 2024. DOI: 10.1002/pip.3837.
- [93] *ABB industrial drives ACS880, drive modules 0.55 to 3200 kW*, Zurich, Schweiz: ABB, 2025. [Online]. Tillgänglig: <https://library.e.abb.com/public/a2cb7f45967d4cc6900ea5bcf30>

- ACS880_drive_modules_catalog_3AUA0000115038_RevP_EN.pdf, Hämtad: 2025-05-04.
- [94] D. Stenersen och H. Lundström, "WP2-Propulsion technology options for alternative marine fuels: HOPE-Hydrogen fuel cells solutions in shipping in relation to other low carbon options-a Nordic perspective," SINTEF Ocean AS, IVL Svenska Miljöinstitutet, 2023, [Online]. Tillgänglig: <https://www.ivl.se/download/18.3fde679d1872953d91311300/1681903620374/WP2%20Technology%20option-report-V2.pdf>. Hämtad: 2025-05-01.
- [95] A. Andersson m.fl., "Stena Volta: Fully Electric RoPax for Stena Teknik," Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper, Chalmers tekniska högskola, 2018.
- [96] Sveriges Riksbank. "Sök års- och månadsgenomsnitt valutakurser." u.å. [Online]. Tillgänglig: <https://www.riksbank.se/sv/statistik/rantor-och-valutakurser/sokars--och-manadsgenomsnitt-valutakurser/>. (Hämtad: 2025-05-09).
- [97] Göteborg Energi. "Elnätsavgiften." u.å. [Online]. Tillgänglig: <https://www.goteborgenergi.se/foretag/elnat/elnatsavgiften#pris>. (Hämtad: 2025-04-28).
- [98] Elbruk. "Elpriser 2024." u.å. [Online]. Tillgänglig: <https://www.elbruk.se/elprishistorik-2024>. (Hämtad: 2025-04-28).
- [99] Hitta Elavtal. "Hitta det bästa elbolaget för dig!" u.å. [Online]. Tillgänglig: <https://hittaelavtal.se/elbolag/https://hittaelavtal.se/elbolag/>. (Hämtad: 2025-05-02).
- [100] Skatteverket. "Höjd skatt på el 1 januari 2025." 2024. [Online]. Tillgänglig: <https://www.skatteverket.se/foretag/skatterochavdrag/punktskatter/nyheterinompunktskatter/2024/nyheterinompunktskatter/hojdskattpael1januari2025.5.52140d4a192a01c3d481f.html>. (Hämtad: 2025-05-02).
- [101] M. K. Fayas, "Energy Transition towards Sustainable Shipping: Environmental and Economic Life Cycle Considerations," Paper IV, inskickad för publicering, under granskning, opublicerad.
- [102] Engineering Toolbox. "Fuels - Higher and Lower Calorific Values." u.å. [Online]. Tillgänglig: https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html. (Hämtad: 2025-05-04).

- [103] Business Analytiq. "Green Hydrogen Price Index." u.å. [Online]. Tillgänglig: <https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/green-hydrogen-price-index/>. (Hämtad: 2025-03-27).
- [104] Methanol Institute, "The Economic Value of Methanol for Shipping," Methanol Institute, 2024, [Online]. Tillgänglig: https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2024/09/ECONOMIC-VALUE-OF-METHANOL-FOR-SHIPPING-PAPER_final.pdf, Hämtad: 2025-03-27.
- [105] SP Global Commodity Insights. "Interactive Ammonia Price Chart: Natural Gas Feedstock – Europe, USGC, Black Sea." u.å. [Online]. Tillgänglig: <https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/news-research/latest-news/energy-transition/051023-interactive-ammonia-price-chart-natural-gas-feedstock-europe-usgc-black-sea>. (Hämtad: 2025-03-27).
- [106] International Maritime Organization. "Annex 2: Maritime Transport and the Energy Transition – Regulatory and Policy Considerations." 2023. [Online]. Tillgänglig: https://www.un.org/Depts/los/consultative_process/icp23/MacLaineAnnex2.pdf. (Hämtad: 2025-04-02).
- [107] M. T. Mehran, M. Z. Khan, R. Song m. fl., "A comprehensive review on durability improvement of solid oxide fuel cells for commercial stationary power generation systems," *Applied Energy*, årg. 352, 2023. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.121864.
- [108] G. Battineni och G. H. Sibanda, "Marine Photovoltaics: A Review Of Research And Developments, Challenges And Future Trends," *International Journal of Scientific & Technology Research*, årg. 8, nr 9, 2019, [Online]. Tillgänglig: <https://www.ijstr.org/final-print/sep2019/Marine-Photovoltaics-A-Review-Of-Research-And-Developments-Challenges-And-Future-Trends.pdf>.
- [109] SMHI, "Året 2024 - Nederbörd, solsken och strålning," 2025, [Online]. Tillgänglig: https://www.smhi.se/pd/klimat/pdf_stats/year/SMHI_vov_precipitation_sunshine_24.pdf.
- [110] DMI. "Observationer." u.å. [Online]. Tillgänglig: <https://www.dmi.dk/friedata/observationer>. (Hämtad: 2025-03-11).

- [111] SMHI. "Globalstrålning under året och dygnet." u.å. [Online]. Tillgänglig: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/stralning/globalstralning-under-aret-och-dygnet>. (Hämtad: 2025-03-06).
- [112] P. Ahrberg. "Solcellsanläggning: Att tänka på inför ditt köp." 2024. [Online]. Tillgänglig: <https://www.solcellsoffterter.se/solcellsanlaggning/>. (Hämtad: 2025-05-04).
- [113] C. Oon och K. Ng, "CIGS Photovoltaics For The Urban Tropics," *Energy Procedia*, årg. 143, 2017. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.12.754.
- [114] Low carbon power. "Electricity in Sweden in 2024." u.å. [Online]. Tillgänglig: <https://lowcarbonpower.org/region/Sweden>. (Hämtad: 2025-05-09).
- [115] S. Brynolf m.fl., "Life Cycle Assessment of Marine Fuels in the Nordic Region – Task 1C (version 1.1)," Chalmers tekniska högskola, Göteborg, Sverige och Svenska miljöinstitutet, Göteborg, Sverige, 2023, [Online]. Tillgänglig: <https://futurefuelsnordic.com/life-cycle-assesment-of-selected-fuels/>. Hämtad: 2025-05-15.
- [116] R.Stropnik, A.Lotrič, M. A.B.Montenegro och M.Morl, "Critical materials in PEM-FC systems and a LCA analysis for the potential reduction of environmental impacts with EoL strategies," *Energy Science Engineering*, årg. 7, s. 2519–2539, 2019. DOI: 10.1002/ese3.441.
- [117] E. Rillo m.fl., "Life Cycle Assessment (LCA) of biogas-fed Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) plant," *Energy*, årg. 126, s. 585–602, 2017. DOI: 10.1016/j.energy.2017.03.041.
- [118] *MAN BW Diesel Two-stroke Propulsion Programme*, Augsburg, Tyskland: MAN, 1999. [Online]. Tillgänglig: <https://engine.od.ua/ufiles/MAN-Program-2000.pdf>, Hämtad: 2025-05-05.
- [119] Energy Net. "ISO 8217:2005 - RMD 80." u.å. [Online]. Tillgänglig: <https://www.energynet.com.cy/rmd-80.html>. (Hämtad: 2025-05-01).
- [120] *Energy M2 Modules (G-NMC)*, Yverdon-les-Bains, Schweiz: Leclanché, u.d. [Online]. Tillgänglig: <https://www.leclanche.com/wp-content/uploads/2020/10/LECLANCHE-plaquette-G-NMC-KMWEB.pdf>, Hämtad: 2025-05-06.

- [121] H. Alfredsson och C. Swenson, "Bränslecell jämfört med dieselgenerator," examensarbete, Institutionen för sjöfart och marin teknik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg, Sverige, 2017. [Online] Tillgänglig: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/250182/250182.pdf>.
- [122] H. Alfgården, I. Andersson, F. Bratt, M. Brännman, U. Einarsson och K. Karlsson, "Tekno-ekonomisk utvärdering av solceller på elektrifierade fordon," kandidatarbete, Institutionen för elektroteknik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg, Sverige, 2022.

INSTITUTIONEN FÖR ELEKTROTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2025
www.chalmers.se



CHALMERS