



RAPPORT

Datum:
2019-04-23

SSPA Rapport Nr.:
RE20167949-18-00-C

Projektledare:
Philippe Ghawi

Sjöfartsverket

Att:

Albert Hagander, Teknisk Chef, Sjöfartsverket Rederi, 601 78 Norrköping

Rapporten sänds endast via mail till albert.hagander@sjofartsverket.se

Referens:



Co-financed by the Connecting Europe
Facility of the European Union

Författare:
Philippe Ghawi
philippe.ghawi@sspa.se
+46 31 772 91 91
+46 73 072 91 91

Batterihybriddrift för isbrytare med dieselelektrisk framdrivning

*Utredning av de operativa, tekniska och ekonomiska förutsättningarna för
batterihybriddrift på en Östersjöisbrytare*

SSPA Sweden AB

Magnus Forsberg
Platschef
Ship Design Stockholm

SSPA Sweden AB

Philippe Ghawi
Projektledare
Ship Design Stockholm

SSPA SWEDEN AB – YOUR MARITIME SOLUTION PARTNER

HUVUDKONTOR: Box 24001 · 400 22 Göteborg · Sverige · Tel: 031-772 90 00 · Fax: 031-772 91 24

BESÖKSADRESS: Chalmers Tvärgata 10 · 412 58 Göteborg · Sverige

REGIONKONTOR: Fiskargatan 8 · 116 20 Stockholm · Sverige · Tel: 031-772 90 00 · Fax: 08-31 15 43

INTERNET: www.sspa.se · E-MAIL: postmaster@sspa.se · ORG NR/VAT NO: SE556224191801

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
1.1	Bakgrund.....	1
1.2	Mål och syfte.....	1
1.3	Omfattning.....	1
1.4	Avgränsningar	2
1.5	Metod	2
2	Batteriteknik och dess applikationer.....	3
2.1	Batteriframdrift i sjöfart.....	3
2.2	Systemalternativ.....	4
2.3	Isbrytarens effektbehov	5
2.4	Effekterna av en batteriinstallation på en isbrytare	9
3	Driftprofil.....	15
4	Regelverk och standarder	19
5	Systemutformning.....	21
5.1	Atle-klassens drivlina och framdrivningssystem	21
5.2	Batteriinstallationens delsystem.....	24
5.3	Inkoppling av batterierna på drivlinan	25
5.4	Placering av batterierna	27
6	Batteriteknologi	30
6.1	Cell- och packkonstruktion	30
6.2	Batterikemier.....	32
7	Batterikoncept.....	37
7.1	Konceptbeskrivning.....	37
7.2	Slutsatser	38
8	Bränslebesparing och reducering av motortimmar	39
8.1	Metodbeskrivning.....	39
8.2	Verifiering av simuleringsverktyg	41
8.3	Simuleringsresultat av batterihybriddrift	42
9	Livscykelkostnad	44
9.1	LCC-modell	44
9.2	LCC för batteriinstallation på Atle-klassisbrytare.....	47
10	Slutsatser och diskussion.....	50
10.1	Sammanfattning.....	50
10.2	Osäkerheterna i resultatet.....	50
10.3	Outredda faktorer	51
10.4	Miljövinster	52
10.5	Övriga outredda frågeställningar	53
11	Referenser	53

Sammanfattning

Effektbehovet för en isbrytare varierar ofta och mycket. En isbrytare har vid många tillfällen fler dieselmotorer igång än vad som för stunden krävs för framdrivningen. Med batterihybriddrift, där lastspikar skulle kunna tas av batteriet, skulle färre dieselmotorer behöva vara igång. På så sätt skulle varje motor arbeta vid en högre och jämnare belastning, vilket medför effektivare effektuttag. Utöver minskade bränslekostnader skulle antalet motortimmar reduceras och därmed också kostnaderna för service och underhåll.

Målet med detta projekt har varit att kartlägga och kvantifiera potentialen med batterihybriddrift på en dieselelektrisk Östersjöisbrytare såväl praktiskt som tekniskt och ekonomiskt.

Rapporten börjar med att förklara principerna för batteriframdrivning och varför denna teknik är lämplig för just isbrytare. De ingående komponenterna och delsystemen beskrivs, och slutligen kvantifieras effekterna av batterihybridframdrivning genom beräkningar av bränslebesparing och livscykelkostnad.

Till grund för arbetet som denna rapport presenterar ligger en omfattande datainsamling avseende isbrytarnas operativa användning. Den insamlade data har använts för att kunna bekräfta isbrytarnas driftprofil, dvs. hur mycket och hur ofta dessa lastspikar förekommer. Driftprofilen har varit ett viktigt ingångsvärde för att kunna beräkna en realistisk bränslebesparing och livscykelkostnad.

Sammanfattningsvis visar resultatet att en Atle-klassisbrytare är ett lämpligt fartyg att modifiera med batterihybriddrift. De främsta anledningarna är

- Praktiskt möjligt – Isbrytarna har tillräckligt med utrymme och stabilitet för en batterihybridinstallation. De har fördelen att ha en diesel-elektrisk drivlina där inkoppling av batterierna enkelt kan åstadkommas.
- Effektivare drift – Reducerad bränsleförbrukning och minskat antal motortimmar leder till lägre operativa kostnader, mindre miljöutsläpp och minskade underhållskostnader.
- Utökad prestanda – Effekt och energi finns tillgänglig direkt utan fördröjning.

Arbetet visar att en lämplig batterihybridinstallation är av litium-jon teknologi med kapacitet mellan 1000 och 2000 kWh och effektuttag på minst 3250 kW. Batteriets förmåga kan liknas vid en extra dieselmotor som kan leverera full effekt under 12 respektive 35 minuter. Om batteriet används till sin fulla potential kan det ge en genomsnittlig årlig besparing av 125 m³ diesel. Det motsvarar 240 ton CO₂-utsläpp eller 800 000 SEK med dagens dieselpris.

Betraktas samtliga kostnadsposter skulle de operativa kostnaderna under ett genomsnittligt normalår kunna minskas med nästan 2 000 000 SEK.

Trots dessa fördelar visar en jämförelse av livscykelkostnaden att batterihybridinstallationen endast återbetalar sig i ett av de undersökta framtidsscenarierna.

Förutsättningarna för att batterihybridinstallation ska kunna återbetala sig är

- Högre operativa kostnader – Dagens låga priser på drivmedel gör att ”gröna investeringar” har svårt att motiveras ekonomiskt.
- Längre säsong – Isbrytarna används i genomsnitt en tredjedel av året och i genomsnitt är huvudmaskineriet igång en tredjedel av den tiden. Det låga driftsuttaget resulterar i små operativa kostnader och, med en given procentuell bränslebesparing, därmed även små besparingar.
- Lägre batteripriser – Även om batteripriserna under senare tid har minskat är dagens anskaffningskostnader, för både batterier, batterihybridsystem och installation, fortfarande för höga.
- Längre tidshorisont – Livscykelkostnadsanalysen visar på en positiv återbetalningstrend, men tidshorisonten behöver vara längre än de 10 år som denna studie sträcker sig till att betrakta.

Det finns idag vedertagna metoder för att räkna om miljöpåverkan till kostnad. Det är inte ovanligt att använda sådana kostnadsposter, i t.ex. budget- och investeringskalkyler, för att motivera miljövänlig teknik. I detta arbete har inga sådana metoder använts.

Återstående frågeställningar som kan ha en inverkan på resultatet och som inte kunnat besvaras i arbetet är följande.

- Det har inte kunnat fastställas vilken inverkan batterihybriddriften eventuellt skulle kunnat ha på att utjämna dieselmotorernas snabba lastväxlingar, vilket därför har utelämnats. Detta ska inte förväxlas med lastoptimering utan om de vedertagna beräkningsmodellernas giltighet under snabba lastväxlingar, mer om det i kapitel 2.4.2.2.
- Det har inte funnits någon information om hur mycket dieselmotorernas förbättrade arbetsbelastning påverkar slitaget. Minskning av underhållskostnaderna som resultat av detta fenomen har därför utelämnats vid beräkning av livscykelkostnaden. Detta ska inte förväxlas med minskningen av underhållskostnaderna som resultat av minskat antal motortimmar.

Abstract

The power demand of an icebreaker during operation varies rapidly, both magnitude and rate. When the icebreaker assists other vessels, it often has more diesel engines online than what is momentarily needed to fulfil the peak power demand.

A battery hybrid system aboard could enable fewer running diesel engines, resulting in higher individual engine load and hence more efficient power outtake. In addition to reduced fuel costs and lowered emissions, maintenance costs would be reduced due to fewer engine hours.

The aim of this project has been to investigate and quantify the potential of retrofitting a diesel-electric Baltic Sea icebreaker with battery hybrid propulsion, from a practical and technical as well as economical perspective.

The report starts by describing the principles of battery hybrid propulsion and explains why icebreakers are a suitable application. This is followed by descriptions of the components and subsystems. Lastly, the effects of battery hybrid propulsion are quantified by calculating fuel savings, reduced engine hours, cost of batteries and how much operational costs can be reduced.

The work has been based on a comprehensive data collection on the operational use of icebreakers. The data has been used to confirm the operating profile of the icebreakers, i.e. how much and how often these rapid load variations occur. The operating profile has been an essential input to be able to calculate an accurate fuel saving and life cycle cost.

In summary, the outcome of the project shows that an Atle-class icebreaker is a suitable application for battery hybrid propulsion. The main reasons are

- Practically possible - The icebreaker have enough space and stability for housing the battery hybrid installation. It has the advantage of having a diesel-electric powertrain into which the batteries can be integrated.
- Efficient operation - Reduced fuel consumption and less engine hours lead to lower operational costs, less environmental impact and reduced maintenance costs.
- Extended performance – Standby power and energy.

The result of the project shows that a suitable solution would be a lithium ion battery with capacity between 1000 and 2000 kWh and power output of at least 3250 kW. The battery's ability could be compared to an additional diesel engine able to deliver full power for 12 and 35 minutes, respectively. Such installation could, when used to its full potential, provide an average annual fuel saving of 125 m³ diesel. This corresponds to 240 tonnes of CO₂ emissions

or 800,000 SEK given today's diesel price. Considering all expense items, operating costs could be reduced by almost 2,000,000 SEK over an average normal year.

Despite these operational and environmental benefits, the battery hybrid installation only pay back itself in one of three investigated probable future scenarios. The following circumstances are required its ability to repay itself

- Longer season - An icebreaker season last on average during one third of the year. During the season, the icebreaker runs its main propulsion system on average about one third of the time. The small operational time results in low operational expenses and, with a given fuel saving percentage, hence small operational cost savings.
- Higher operational costs - The current low fuel price makes environmental friendly technology investments difficult to motivate.
- Lower battery prices - Although battery prices have been decreasing, today's acquisition costs, both batteries and installation, are still too expensive.
- Longer investment horizon - The life cycle cost analysis shows a positive repayment trend, but the regarded timespan needs to be longer than the 10 years that this study extends to be able to repay.

Today there are available methods to recalculate environmental impact to expenses. It is not uncommon to use such, for example in budgeting and investment plans, to help motivate environmentally friendly technology. However, no such costs have been used in this project.

Finally, the following issues, which may have an impact on the outcome remain to be answered

- It has not been possible to determine the effect of batteries potential of equalizing, or smoothening out, the loads of diesel engines. This effect has therefore been omitted when calculating fuel savings (this is more related to the validity of calculation models during rapid load changes, more specifically in chapter 2.4.2.2). This should not be confused with load optimization.
- There has been no information about how much the diesel engine's improved workload affects the wear. Therefore, the reduction of maintenance costs due to this has been omitted from calculation of the maintenance cost reduction. This should not be confused with the reduction in maintenance costs as a result of reduced engine hours.

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Effektbehovet för en isbrytare varierar ofta och mycket. Vid assistans och isbrytning behöver isbrytarna snabbt kunna växla mellan full framåt och back. Tillgång till det stundvis höga effektbehovet åstadkoms genom att ha igång flera dieselmotorer än vad som momentant krävs för framdriften. Detta leder till att dieselmotorerna får arbeta med lägre verkningsgrad, med ökad bränsleförbrukning och högre utsläpp som konsekvens. Utifrån denna vetenskap väcktes frågan om möjligheterna med ett energilager som kunde säkra hög tillgänglig effekt på ett mer miljö- och kostnadseffektivt sätt.

Under isvinter 2015/2016 startades en omfattande datainsamling av Atle-klassisbrytarens operativa användning, se *Sammanställning av driftsdata* (SSPA, 2017), med syftet på att ge svar på hur mycket och hur ofta dessa lastvariationer förekom. Information från denna datainsamling har varit en förutsättning för de detaljerade beräkningar och analyser som genomfört i detta arbete och som varit en nödvändighet för att med tillräcklig konfidens kunna dra rätt slutsatser från ett komplext och tidigare utforskat område.

1.2 Mål och syfte

Målet med denna utredning har varit att undersöka de praktiska, tekniska och ekonomiska förutsättningarna för att modifiera en befintlig isbrytare i Atle-klass för batterihybriddrift.

Projektet har genomförts med syftet att skapa ett underlag till stöd för Sjöfartsverkets beslut i frågan – att modifiera isbrytare av Atle-klass med batterihybridframdrivning eller inte.

1.3 Omfattning

Denna rapport omfattar

- Generell information om elektrifiering och batteriframdrivning inom sjöfarten samt förklaring till varför batterihybriddrift kan vara lämpligt för en isbrytare.
- Redogörelse för batteriinstallationer ombord på fartyg, beskrivningar av de ingående komponenterna och nödvändiga hjälpsystemen. Utredning av batteriernas placering och inkoppling till övriga drivlinan.
- Presentation av relevanta batteriteknologier. Vikter, volymer och kostnader för några lämpliga batterikoncept.

- Kortfattad beskrivning och verifiering av det utvecklade simuleringsprogrammet. Redovisning av bränslebesparing och minskning av motortimmar till följd av en batteriinstallation.
- Presentation av beräkningsmodell för livscykelkostnad, LCC, avseende anskaffning, underhåll och operationella kostnader. Utvärdering av LCC-modellen för två fall; ett förslag på batteriinstallation och utan batteriinstallation.

1.4 Avgränsningar

I denna utredning har följande avgränsningar och begränsningar gjorts

- Utredningen har begränsats till idag tillgänglig och beprövad teknik. Det gäller i synnerhet materialval i batteriteknologier. Tillämpningen av batterihybrid drift för en isbrytare är inte beprövat.
- Att genomföra en kostnadsanalys av en batteriinstallation är tidskrävande. Förutom rena prisuppgifter krävs omfattande indata, t.ex. detaljerad driftprofil, batterispecifika data (kWh, c-rate), motordata (specifik bränsleförbrukning för olika varvtal/effektuttag, underhållsintervall mm.). Därför har endast en kostnadsanalys för den batteriinstallation som bedömts vara mest lämplig presenterats.
- Kostnader för energi, bränsle och batterier har historiskt visat sig kunna variera mycket. Kostnadsanalysen har därför begränsats till att blicka 10 år framåt i tiden. Längre tidshorisont än så bedöms inte ge realistiskt förankrade resultat.
- Denna studie fokuserar på att undersöka effekterna av batterihybrid drift på fartygets framdrivningssystem. Detta inkluderar till viss del även hjälpmotorerna då de driver huvudmaskineriets kringssystem. Däremot har ingen ytterligare avlastning av hjälpkärrorna beaktats, t.ex. låta batterierna driva hotellet vid stillaliggande i isen. Tillskillnad från framdrivningsmaskineriet har inte heller minskning av underhållskostnad för hjälpmotorerna till följd av batterihybrid drift beaktats.
- Uppladdningar av batterierna vid hamnanlöp under isbrytarsäsongen har inte beaktats.

1.5 Metod

Metoder som använts presenteras i respektive avsnitt.

2 Batteriteknik och dess applikationer

Batteriprestanda har under 2000-talet utvecklats i allt högre takt. Utvecklingen har drivits av målsättningar som lägre operativa kostnader, minskade utsläpp eller ökad prestanda för dess applikationer.

Ökad tillgång på litium-jon batterier samt effektivare tillverkning har dessutom bidragit till sjunkande priser på dessa batterier. Under samma tid har priset på petroleumbaserade drivmedel ökat och med den rådande osäkerheten kring dess framtida tillgänglighet letar flera användare efter effektivare lösningar.

Dessa faktorer har lett till att det i fler och fler applikationer uppnåtts en brytpunkt, där anskaffningskostnaderna för batterierna återbetalas genom de minskade operativa kostnaderna.

Sedan 2010 har en mängd yrkesfartyg installerat batterier för framdrivning, huvudsakligen passagerar- och fordonstrafik inom närsjöfart, kollektivtrafik, specialfartyg, offshore supplyfartyg och bogserfartyg. Ännu finns ingen isbrytare med sådant.

2.1 Batteriframdrift i sjöfart

I sjöfartssammanhang kan elektrifiering och batterihybridiseringen ses inom en mängd segment, nedan listas några nämnvärda exempel.

- 1913 Juli. Sveriges första helelektriska fartyg, passagerarfärjan Hamnfärjan I, tas i drift mellan Marstrand och Koön (Spårvagnen, 2017). 1948 får linjen ett tillskott i form av den nyare passagerarfärja Hamnfärjan II. Fartyget drivs av en ASEA motor på 8 hk och en batteribank på 40 battericeller á 2 V vardera, vilka sammankopplade levererade 80 V. 1960 tas Hamnfärjan I ur drift och 1985 tas Hamnfärjan II ur drift. Det dröjer ungefär ett sekel från dess att Sveriges första elektriska färja sats i trafik tills att batterier på alvar börjar övervägas som ett alternativ för framdrivning inom sjöfarten.
- 2013. Viking Lady, OSV (Offshore Supply Vessel), modifieras med en batteribank på ca. 450 kWh för effektivare DP¹-drift. 2015 hävdar ägaren Eidesvik att det minskat fartygets årliga bränsleförbrukning med 15% (Wärtsilä, 2017).
- 2014. Skärgårds- och pendelbåttrafiken i Stockholm får ett nytillskott i form av den helelektriska passagerarfärjan E/S Sjövägen. Den befintliga färjan M/S Moritz elektrifieras och byter namn till E/S Movitz. Flera

¹ Dynamic Positioning, ett kontrollsystem som med hjälp av GPS automatisk håller fartygets position på vattnet. Det åstadkoms genom att styra fartygets propellrar och trustar, vilket i praktiken kan ses som små effektpulser över tiden. I kombination med höga krav på redundans har batteritekniken visat sig vara en lämplig teknik, där det alltmer börjar ses som standard.

liknande projekt pågår, bl.a. den helt elektriska snabbfärjan BB Green, som fr.o.m. 2016 testas i Stockholm.

- 2015 Maj. E/V Ampere, Sognefjord Norge, blir världens första helelektriska bil- och passagerarfärja. Färjan, som har plats för 360 passagerare och 120 fordon, drivs av två elmotorer på 450 kW vardera samt en batteribank på 260 kWh. Tomma batterier rullas av i hamn samtidigt som fulladdade batteri körs ombord och kopplas in.
- 2016. Scandlines tar leverans av två batterihybridfärjor för linjen Rostock – Gedser, M/V Copenhagen och M/V Berlin. Rederiet planerar samtidigt att konvertera sina RoPax-färjor Tycho Brahe och Aurora till helelektrisk framdrivning med 4 MWh batterikapacitet.
- 2017. Brittiska polarforskningsfartyget RRS Sir David Attenborough kölsträcktes under våren 2017. Fartyget har designats med en batteribank på 1450 kWh för effektivare drift samt för elförbrukning vid stillaliggande i isen. Leverans av fartyget är planerat till 2019.

2.2 Systemalternativ

I vissa applikationer utgör batterierna den enda energilagringen medan de i andra utgör en delmängd. Nedan förklaras de olika systemalternativen för batteridrift.

2.2.1 PEV

Plug-in electric vehicle är en helelektrisk farkost där all energilagring görs i batteriet. En alternativ benämning som ibland används är BEV, *Battery Electric Vehicle*. För fartyg innebär det att batteriet laddas vid kaj och töms vid gång till sjöss.

Fartygstyper som lämpar sig för detta har korta överfarterstider och låga effektbehov, närhet till el-infrastruktur på land och en fast rutt (A till B tur och retur) under lång tid. Detta är typiskt pendelbåtar i urban miljö eller vägfärjor.

För en isbrytare som ska kunna vara ute till sjöss långa perioder med högt effektbehov är ett helelektriskt alternativ inte möjligt givet dagens batteriprestanda och -priser.

2.2.2 HEV

Hybrid electric vehicle är en farkost som kombinerar batteriets energilagring förmåga tillsammans med annan energiproduktion för framdrivning, exempelvis en förbränningsmotor.

Grundprinciperna för hybriddrift är att låta batteriet hantera

- sporadiska eller återkommande lastökningar (t.ex. en bogserbåt eller bilkörning i stadstrafik)
- låga laster över längre tid (t.ex. ett offshore-fartyg som ligger på DP)

Genom att låta batteriet hantera dessa, kan förbränningsmotorn få arbeta effektivare (på optimalt varvtal med jämnare och optimal belastning). I detta alternativ laddas batterierna således inte vid kaj, utan av motorns tillfälliga överkapacitet.

Till skillnad från PEV-applikationer designas HEV-applikationer för att använda en liten del av sin batteribank. PEV-applikationer använder typiskt 70-90% av batteriernas totala energikapacitet, medan HEV-applikationer enbart använder 5-25% (och lever således mycket längre). Mer om detta i kapitel 6.

2.2.3 PHEV

Plug-in hybrid vehicle är en farkost med batterihybriddrift som samtidigt har möjlighet att ladda upp sina batterier via landanslutning. PHEV är en kombination av systemalternativen PEV och HEV.

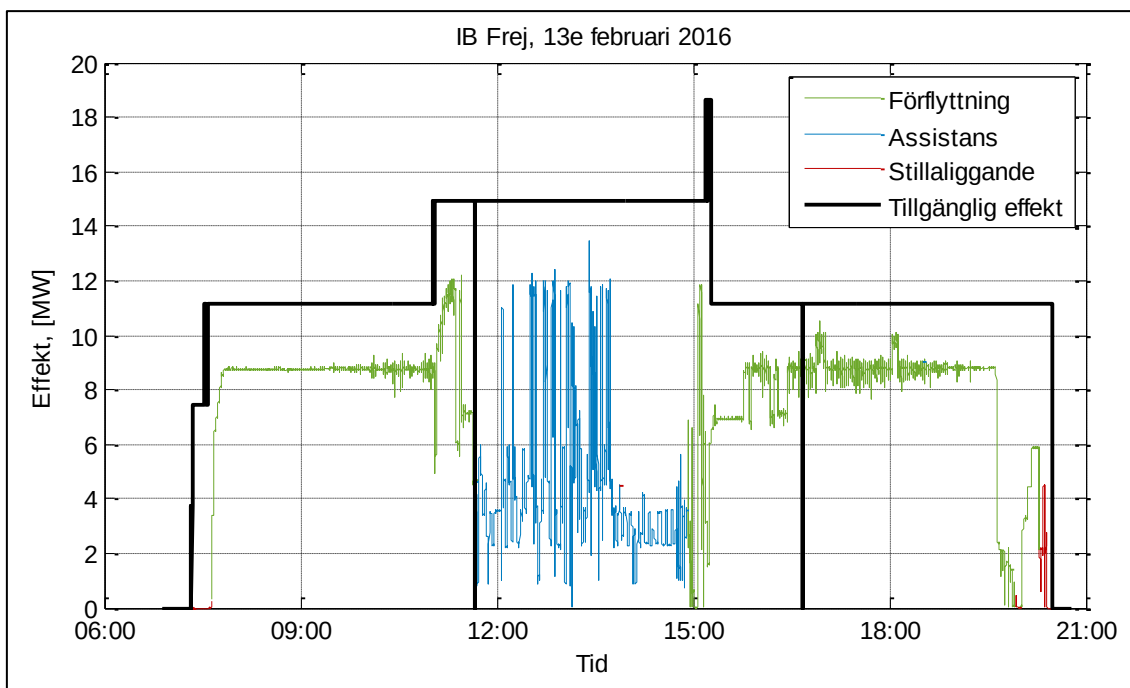
PHEV når sin högsta potential på farkoster som ofta får möjlighet att ladda upp sina batterier från en billigare "off-grid" källa. Detta är t.ex. en Toyota Prius som varje kväll efter pendling till och från arbetet kan laddas. För en isbrytare, som anlöper kaj få och korta tillfällen under isbrytarsäsongen, är fördelarna med detta små.

Till skillnad från vägfordonssidan har sjöfarten en tradition av att kunna ansluta till landkraft vid kaj. För isbrytarna innebär det att stora delar av denna infrastruktur redan finns ombord.

2.3 Isbrytarens effektbehov

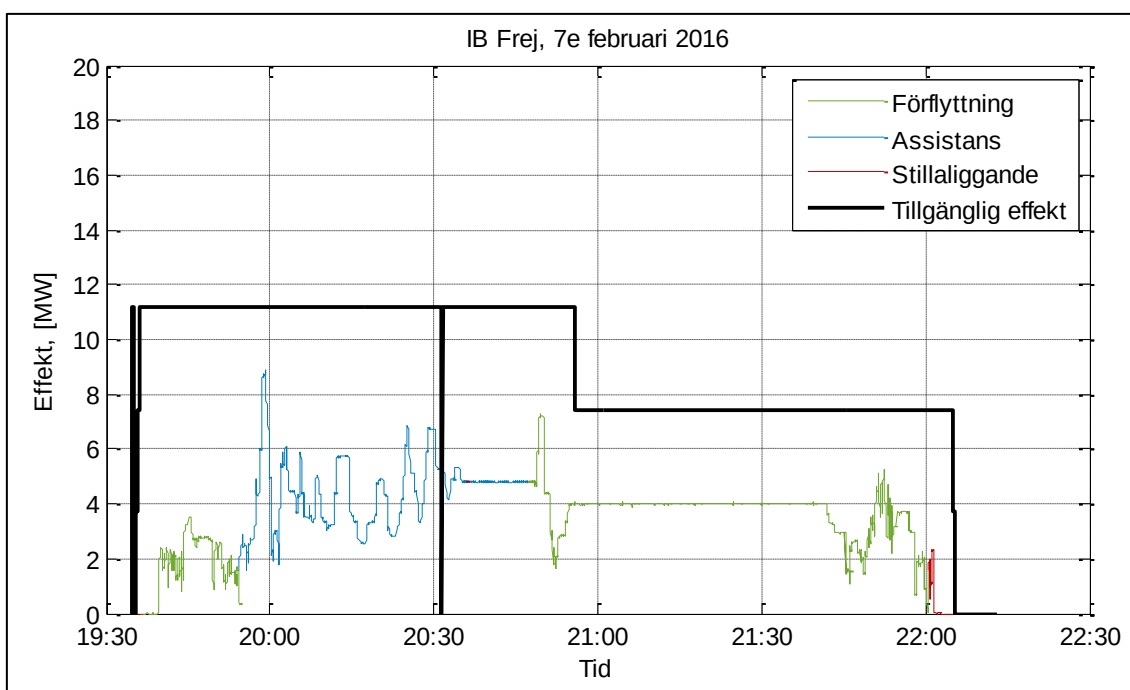
När isbrytarna assisterar (leder) andra fartyg behöver de stundvis ha möjlighet att ta ut ökad effekt för att t.ex. undvika att bli påseglade bakifrån. I dagsläget åstadkoms den högre tillgängligheten på effekt genom att ha igång flera dieselmotorer. På så sätt kan momentant erfordrad effekt erhållas utan att plötsligt behöva starta upp flera dieselmotorer.

I Figur 1 presenteras effektbehovet tillsammans med den tillgängliga effekten för ett isbrytaruppdrag. Informationen i figuren kommer från mätningar ombord på IB Frejs drivlina från isvintern 2015/2016 (SSPA, 2016). Figuren illustrerar hur effektbehovet varierar för isbrytarens olika aktiviteter, där grön linje representerar effektbehovet vid förflyttning, blå linje assistans och röd stillaliggande. Den tillgängliga effekten under de olika aktiviteterna representeras av den svarta linjen.



Figur 1. Effektbehov (summerad propelleraxeleffekt) samt tillgänglig effekt (summerad dieselmotoreffekt) uppmätt på IB Frej den 13e februari 2016.

Figur 2 illustrerar effektbehovet och den tillgängliga effekten på IB Frej från ett annat tillfälle under isvintern 2015/2016. Flera fall redovisas i rapporten *Sammanställning av driftsdata* (SSPA, 2017).



Figur 2. Effektbehov och tillgänglig effekt uppmätt på IB Frej den 7e februari 2016.

Bedömningen av hur mycket effekt som behöver vara tillgängligt, dvs. hur många dieselmotorer som behöver vara igång, beslutas av styrmannen. Beslutet fattas utifrån lägesituationen med målsättningen att kunna framföra fartyget eller genomföra den aktuella operationen på ett säkert sätt. Under svårare förhållanden, t.ex. nedsatt sikt eller mörker, behöver tillgängligheten vara högre för att kunna hantera en oförutsedd händelse.

I Figur 1 ses hur den tillgängliga effekten ökades innan assistansen för att kunna hantera det bedömda effektbehovet. Även om en ökning i detta fall erfordrades (jämför effekt-spikarna under den tillgängliga effekten), så var nyttjandet av den tillgängliga effekten till synes lågt.

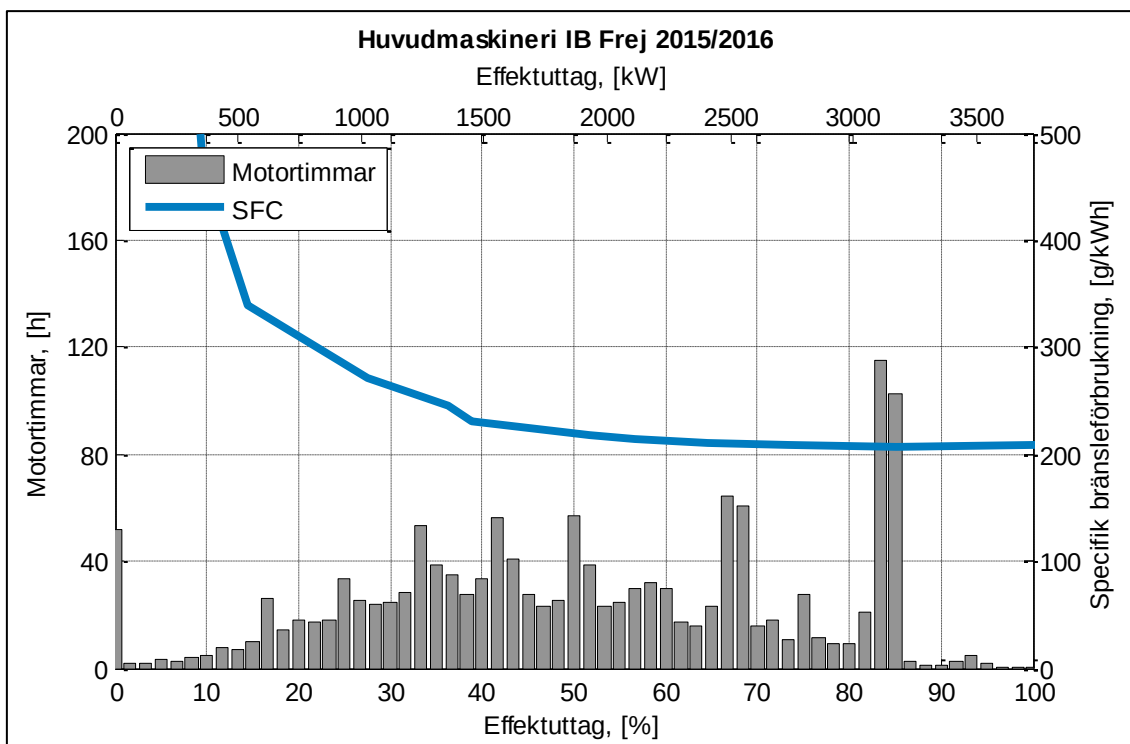
För det specifika isbrytaruppdraget i Figur 1 var den genomsnittliga nyttjandegraden av effekten under assistansaktiviteten, dvs. kvoten mellan behövd effekt och tillgänglig effekt, 27,7 %. För samtliga assistansaktiviteter uppmätt på IB Frej under isvintern 2015/2016 var nyttjandegraden 41,5 %. För aktiviteten förflyttning var motsvarande kvot 55,1 %.

Från ett motorperspektiv innebär den lågt nyttjade tillgängliga effekten, lågt belastade motorer. De gråa staplarna i Figur 3 representerar effektuttaget i tid (motortimmar) på IB Frejs dieselmotorer i under mätperioden 2015/2016. I figuren visas också motorernas verkningsgrad, som specifik bränsleförbrukning (blå linje) för samma effektskala. Den specifika bränsleförbrukningen, eller *SFC*, används för att jämföra motorers verkningsgrad och mäts i gram förbrukat bränsle per energiuttag, g/kWh. Figur 4 visar motsvarande för mätperioden 2016/2017. Jämfört med Figur 3, visar Figur 4 att det 2016/2017 loggades flera motortimmar. Staplarna vid 85% av installerad effekt är högre och en "puckel" runt 50% syns mer tydligt medan tiden med 0 effektuttag är lika.

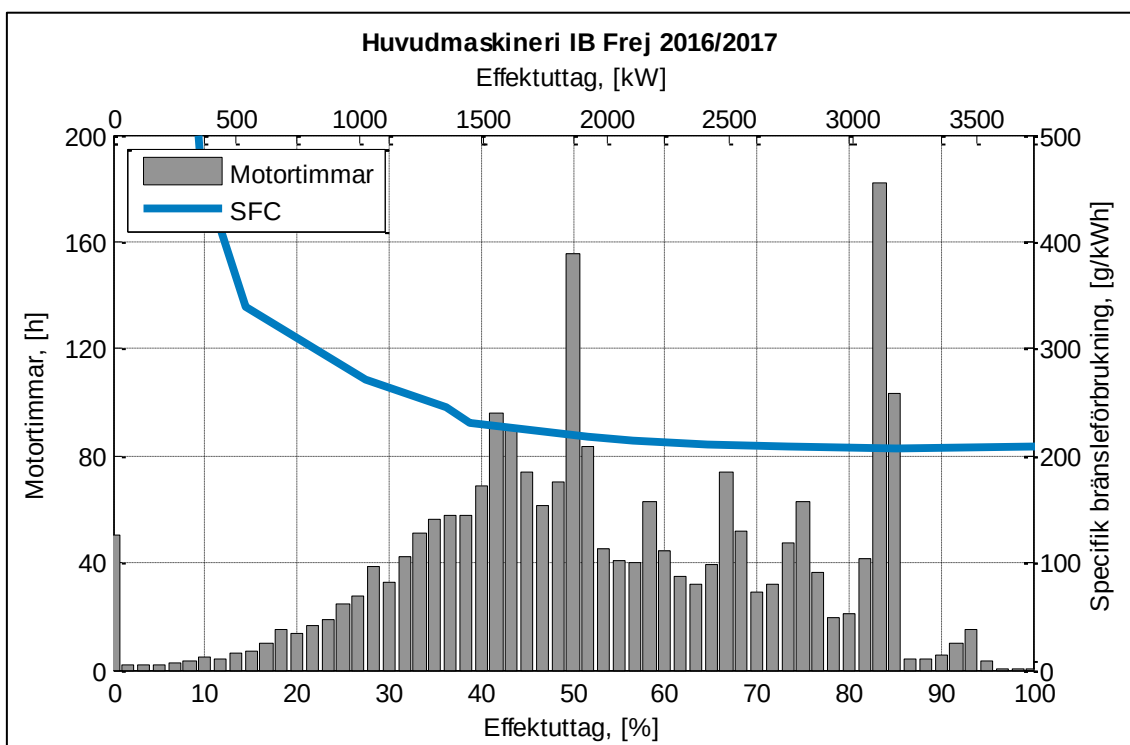
Genom att studera *SFC*-kurvan för IB Frejs dieselmotorer inses att motorerna har en högre verkningsgrad vid hög belastning. Den låga nyttjandegraden av den tillgängliga effekten innebär således att varje enskild dieselmotor får arbeta på en låg belastning, något som i sin tur innebär låg verkningsgrad.

Genom att tillföra ett batteri, som vid behov förbrukas för att möta effektbehovet och som laddas då överkapacitet av motoreffekt finns, skulle möjliggöra att reducera antalet dieselmotorer igång. Något som i sin tur skulle leda till högre belastning och därmed effektivare drift för de återstående dieselmotorerna som är igång. "Potentialen" kan delvis ses direkt i Figur 3 och Figur 4 genom att jämföra motortimmarna med *SFC*-kurvan (effektuttag mellan 0% och 40%).

Det ska visas att det finns flera fördelar kopplade till att ha färre antal dieselmotorer igång än enbart förbättrad drift. I nästa kapitel listas och förklaras vilka effekter som vill uppnås med en batteriinstallation ombord på en isbrytare samt hur det löser utmaningen med att ha stundvis hög tillgänglig effekt på ett effektivt sätt.



Figur 3. Effektuttag för IB Frejs samtliga dieselmotorer under mätperioden 2015/2016 representerade som staplar för antalet motortimmar som effektspannet förekom (avläses på vänster axel). Den blåa linjen representerar dieselmotorernas specifika bränsleförbrukningskurva (avläses på höger axel), givet ett konstant varvtal på 845 rpm och samma effektskala.



Figur 4. Effektuttag och specifik bränsleförbrukningskurva för IB Frej isvintern 2016/2017.

2.4 Effekterna av en batteriinstallation på en isbrytare

En batterihybridinstallation syftar vanligtvis till att minska miljöpåverkan eller de operativa kostnaderna. Givet isbrytarens uppdrag, och dess förutsättningar att utföra det på ett säkert sätt, kan en batteriinstallation för hybriddrift förefalla lämplig.

I avsnitten under förklaras effekterna av att tillföra en batteriinstallation till en isbrytares drivlina mer noggrant. Dessa effekter kvantifieras i kapitel 8, *Bränslebesparing och reducering av motortimmar*, för att sedan kunna beräkna och jämföra batteriinstallationens livscykelkostnad i kapitel 9, *Livscykelkostnad*.

2.4.1 Färre motortimmar

Batterihybriddrift möjliggör ett reducerat antal dieselmotorer igång jämfört med samma drivlina utan batteri. Detta har tre gynnsamma effekter; längre tid mellan motorservice, minskad smörjolförbrukning samt minskad bränsleförbrukning för hjälpmotorer.

2.4.1.1 Längre tid mellan motorservice

Ett minskat antal motortimmar innebär längre tid mellan det driftstidsberoende underhållet ("500-timmars service", "1000-timmars service", osv.). Något som i sin tur leder till minskade underhållskostnader.

2.4.1.2 Minskad smörjolförbrukning

Det finns en koppling mellan antalet motortimmar och mängden förbrukad smörjolja. Den genomsnittliga smörjolförbrukningen för Atle-klassens huvudmotorer är 0,011 m³ per motortimme, med ytterligheterna 0,005 och 0,017. Under hösten 2017 var listpriserna på marin smörjolja mellan 50 - 65 SEK/liter.

2.4.1.3 Bränsleförbrukning för huvudmotorernas kringsystem

Ombord på isbrytarna finns fyra hjälpmotorer för att driva bl.a. elproduktionen ombord, boggerspelet, krängningssystemet och huvudmaskineriets kringsystem. För varje huvudmaskineri som är igång förbrukar dess kringsystem (pumpar för kylvatten, smörjolja, bränsle, magnetiseringstransformatorer, etc.), i genomsnitt 120 kW.

Givet att hjälpmotorerna har en lägsta SFOC på 210 g/kWh förbrukas ungefär 30 liter diesel i timmen för att hålla igång en av fartygets fem huvudmaskiner. Mer om detta finns att läsa i kapitel 3.1.5, *Hjälpmotorer*.

Hur mycket en batterihybridinstallation kan reducera ett fartygs motortimmar beror på en rad faktorer, där de mest centrala är följande.

- Drivlinans konfiguration. Vad är förutsättningarna och potentialen att minska antalet motortimmar? T.ex. antal förbränningsmotorer

i drivlinan, respektive motors installerade effekt, osv. (jämför en drivlina med *en stor motor* med en drivlina med *10 små motorer*)

- Batteriets kapacitet (energiinnehåll och effektuttag) avgör hur ofta samt i vilka situationer ett reducerat antal förbränningsmotorer skulle vara möjligt.
- Fartygets användning och effektbehov, hur ofta och hur mycket (driftprofil).
- Avsikt att använda batteriet. På isbrytarna beslutar en operatör om den tillgängliga effekten. På så sätt kan en hög tillgänglig effekt från motorerna alltid åstadkommas, vilket i sin tur minskar användningen av batteriets förmåga. Således har de som beslutar om fartygets operation en inverkan.

Svaret på frågan om hur mycket en batteribank kan minska antalet motortimmar kräver således en komplex och omfattande utredning för varje specifikt fall av punkterna ovan. Utredningen av detta är dessutom kopplat till frågeställningen om *hur mycket en batteriinstallation kan minska bränsleförbrukningen*, mer om detta i nästa kapitel.

2.4.2 Lägre bränsleförbrukning

En batterihybridinstallation bidrar till en *optimalare* och *jämnare* belastning för fartygets förbränningsmotorer, vilket innebär en minskad bränsleförbrukning jämfört med samma fartyg utan batteri. I avsnitten nedan beskrivs effekter av dessa två fenomen.

2.4.2.1 Optimal belastning

Ett vanligt sätt att presentera en förbränningsmotors verkningsgrad är som *specifik bränsleförbrukning*, SFC eller SFOC. SFC varierar beroende på förbränningsmotorns typ (diesel, LNG, metanol, osv.), konstruktion, om det är en låg-varvig eller hög-varvig motor, mekaniskt- eller elektroniskt reglerad insprutning, osv. SFC varierar dessutom för samma motortyp mellan olika motorleverantörer.

För en och samma motor varierar SFC beroende på motorns varvtal och effektuttag. I Figur 3 visas hur SFC-kurvan för Atle-klassisbrytarnas dieselmotorer, Pielstick PC 2.2, ser ut för olika effektuttag givet ett konstant varvtal på 485 rpm.

Generellt sett arbetar förbränningsmotorer effektivare vid högre belastning, vilket också ses i Figur 3. Jämfört med andra dieselmotorer har Atle-klassens förbränningsmotorer en relativt slät SFC-kurva för ett stort effektspektrum (mellan ca. 40% till 100%).

På så sätt ger olika förbränningsmotorer olika förutsättningar för en batterihybridinstallations potential att minska bränsleförbrukningen. Där en motor med en tydligare optimal driftspunkt har "mer att vinna" på att anpassa motorns belastning jämfört med en motor med en "slätare" SFC-kurva.

Genom att multiplicera effektuttaget med SFC kan motorns bränsleförbrukning beräknas, detta visas i ekvation [1] nedan.

$$C(t) = P(t) \cdot SFC(n(t), P(t)) \quad [1]$$

Där

$C(t)$ är bränsleförbrukningen i g/h

$P(t)$ är effektuttaget i kW

$SFC(n(t), P(t))$ är den specifika bränsleförbrukningen i g/kWh som beror på motorns varvtal $n(t)$ i rpm och effekt $P(t)$ i kW

Hur mycket en given batteriinstallation kan minska bränsleförbrukningen beror, på samma sätt som minskning av antalet motortimmar, på en mängd faktorer såsom; typ av drivlina, antal motorer, motorernas effekt och SFC, batterispecifika data, fartygets driftprofil, osv.

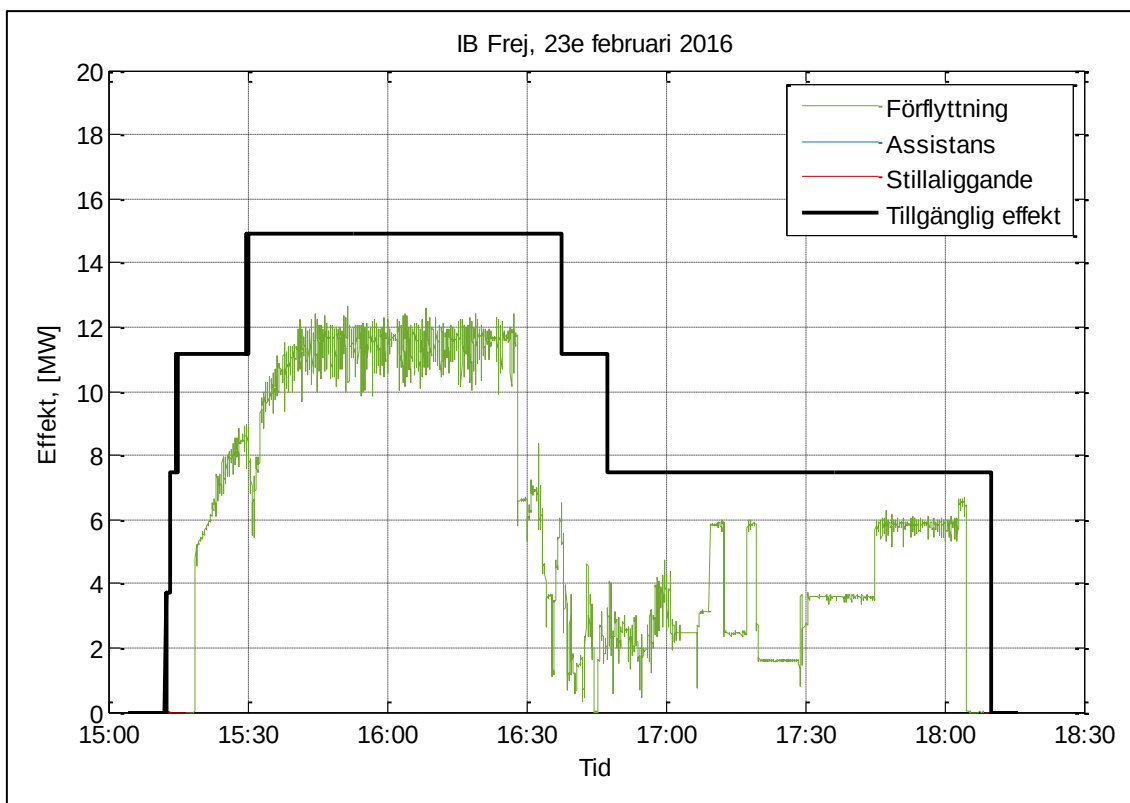
För att kunna ge ett säkert svar på dessa frågor har ett simuleringsverktyg utvecklats inom detta projekt. Beräkningarna av hur mycket bränsleförbrukningen kan reduceras har genomförts i detta simuleringsverktyg.

Kapitel 8, *Bränslebesparing och reducering av motortimmar*, beskriver och verifierar simuleringsverktyget. I samma kapitel presenteras resultaten för de beräknande bränslebesparingarna och minskning av antalet motortimmar.

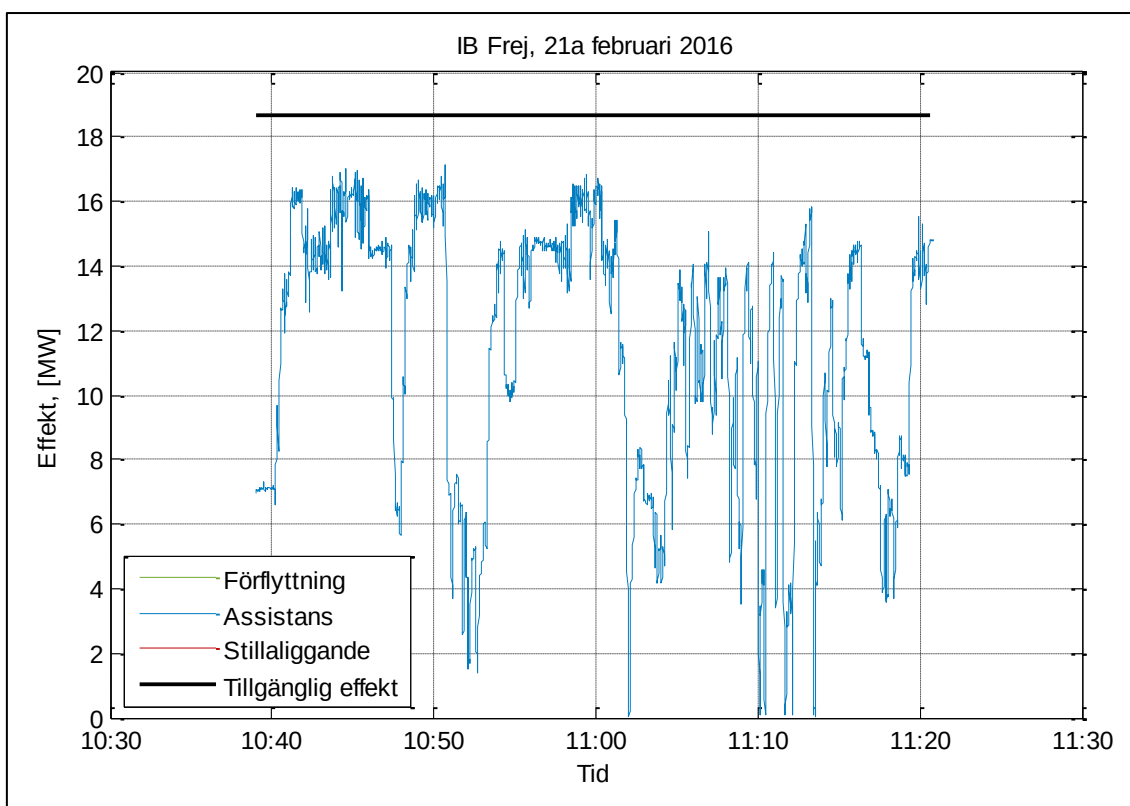
2.4.2.2 Jämnare belastning

Variationer i fartygets effektbehov uppkommer som resultat av inre påverkan, t.ex. ett gaspådrag, eller från yttre faktorer, t.ex. vind, vågor, is eller vattenströmmar.

Figur 5 illustrerar hur framdrivningseffekten på en isbrytare varierar vid förflyttning i is. I detta fall genereras variationerna från isens ojämnheter, då isen bryts, isflak som träffar propellrarna, osv. Vid tiden 15:30 till 16:30 kan det ses hur framdrivningseffekten varierade med ca 2 MW. Som jämförelse kan effekten för förflyttning i öppet vatten ses vid 17:30.



Figur 5. Framdrivningseffekt för förflyttning uppmätt på IB Frej den 22a februari 2016



Figur 6. Framdrivningseffekt under assistans uppmätt på IB Frej den 21a februari 2016

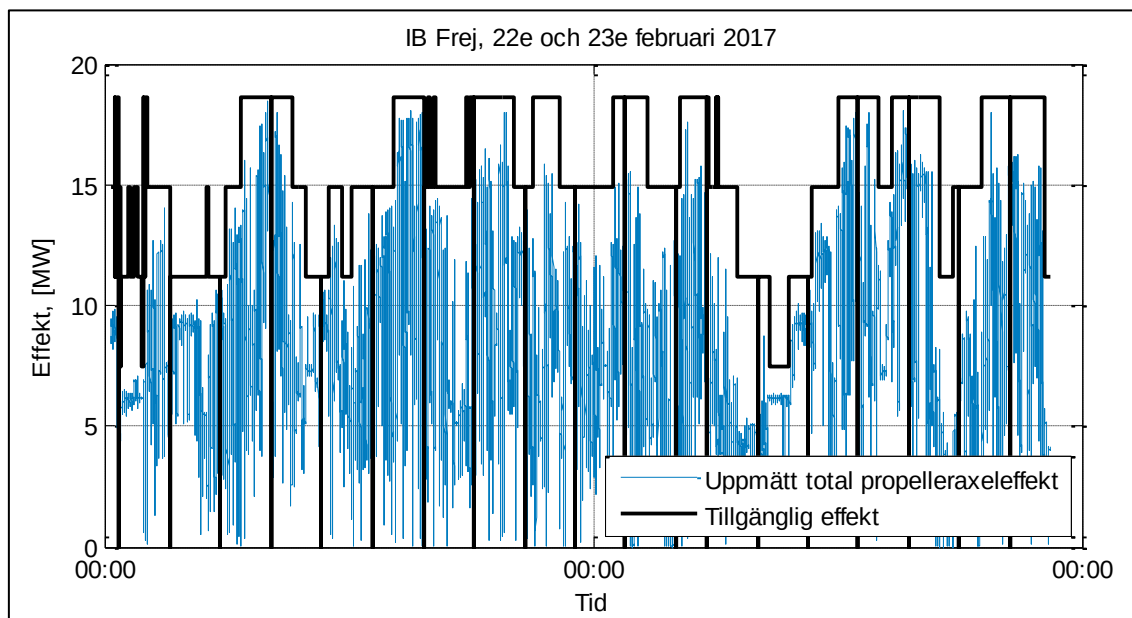
Samma fenomen kan ses under andra isbrytaraktiviteter. Figur 6 visar framdrivningseffekten för ett assistansuppdrag med en högre tidsupplösning, tiden mellan strecken är här 10 minuter. I detta fall uppkommer lastvariationerna i figuren dels genom följande.

- Intern påverkan. De stora lastvariationerna, 0 till 16 MW på några få sekunder. Dessa uppstår till följd av ändrat gaspådrag.
- Extern påverkan. Mindre lastvariationer, likande de vid förflyttning i is i Figur 5 förekommer också i Figur 6 om ca. 1 MW.

Varierande motorbelastning innebär en ökad bränsleförbrukning jämfört med en jämn drift, dvs. konstant varvtal och effektuttag. Från kontakt med motorleverantörer anges uppmätta ökningar av bränsleförbrukningen på 1 % – 3 % för mellanvarviga dieselmotorer och 7 % – 10 % för motsvarande LNG-motorer som resultat av varierande (sinusformad) belastning i laboratorium.

Mer information än så har inte kunnat hittas gällande ökad bränsleförbrukning vid varierande last. Detta har därför uteslutits från kostnadsberäkningarna i kapitel 9, *Livscykelkostnad*, för batterihybriddrift.

Figur 7 visar slutligen ett exempel på en mycket krävande isbrytning med kraftiga lastvariationer under 48 timmar. Den loggade bränsleförbrukningen ombord på IB Frej under dessa två dygn var 107 m³, med ett bränslepris på 4,5 SEK/liter motsvarar detta en kostnad på nästan en halv miljon kronor.



Figur 7. Uppmätt effekt och tillgänglig motoreffekt på IB Frej den 22a och 23e februari 2017.

2.4.3 Minskat slitage

Utöver lägre verkningsgrad, innebär låg motorbelastning dessutom utökat slitage.

Låg belastning på dieselmotorerna medför ökad mängd oförbränt bränsle samt ökad mängd smörjolja som passerar kolringarna upp i förbränningsrummet. Dessa bildar sot i cylindrarna och på kolvarna som i förtid sliter ner cylindrarna.

Den högre belastningen, som en batteriinstallation medför, skulle således leda till ett minskat slitage och i sin tur minskade kostnader för underhållsarbete och reservdelar. För isbrytarna i Atle-klassens har det årliga underhållet av förbränningsmotorerna i genomsnitt kostat 850 kSEK.

Det har inte kunnat hittas någon information om hur mycket en ökad motorbelastning i sin tur minskar slitaget och därmed underhållskostnaderna. För kostnadsberäkningarna i kapitel 9, *Livscykelkostnad*, har kostnadsminskningen som följd av denna effekt utelämnats. Observera att detta inte ska förväxlas med minskning av underhållskostnaderna till följd av minskad gångtid, se kapitel 2.4.1.1.

2.4.4 Utökad manövrerbarhet

Energien som finns lagrad i batteriet finns direkt tillgänglig utan fördröjning. På så vis skulle en batteriinstallation kunna bidra till utökad manöverförmåga.

Nedan listas några utökade förmågor som relaterar till detta.

- Momentant tillgänglig extra kraft, vid bogsering eller ledning.
- Snabbare upp-rampning av effekten, (förbränningsmotor i kombination med batteri).
- Snabbare start från stillaliggande, vid kaj eller i isen, se tids-stapeln vid effekten 0 kW i Figur 3 och Figur 4.
- "Grönare" profil - möjlighet att lägga till och kasta loss utan förbränningsmotorer igång.

3 Driftprofil

Driftprofilen beskriver hur ett fartyg används. Beroende på fartygets typ och syfte kan driftprofilen definieras på olika sätt, t.ex. fart eller effekt, timmar vid 85% av MCR eller motorrating, osv.

I detta projekt har enbart relevanta parametrar för utvärderingen av en batterihybridinstallation beaktats, huvudsakligen Atle-klassens effektbehov och driftstimmar. Driftprofilen har skapats utifrån insamlad data från isbrytarnas aktiviteter och aktiviteternas effektbehov, se (SSPA, 2017).

3.1.1 Isvintrar

Sjöfartsverket klassificerar isvintrar som lindrig, normal eller sträng beroende på isens maximala utredning i Östersjön. Tabell 1 presenterar en antagen fördelning av isvintrarna för 10 år framåt. Fördelningen är inhämtad från driftprofilen för Sjöfartsverkets nya isbrytare, IB2020, se (Sjöfartsverket, 2017).

Tabell 1. Antagen förekomst av isvintrar i framtiden.

	Lindrig	Normal	Sträng
Relativ förekomst typ av isvinter, f_{isv}	30 %	50 %	20 %

3.1.2 Aktivitet

Mellan åren 2000 och 2016 loggades isbrytarnas verksamhet i IBNet, ett elektroniskt informations- och ledningssystem för isbrytarverksamheten. I IBNet registrerades isbrytarnas aktivitet som förflyttning, assistans, stillaliggande eller lokalisbrytning, (SSPA, 2017).

- *Förflyttning* avser aktivitet där isbrytaren är i rörelse utan att aktivt assistera ett annat fartyg, såväl i is som öppet vatten. Exempel på detta är när isbrytaren går ut och möter ett anlöpande fartyg innan assistans sker.
- *Assistans* avser isbrytarens huvuduppgift, att aktivt assistera ett eller flera andra fartyg genom att bereda en farbar ränna i isen, bryta loss ett fastfruset fartyg, bogsering i is, osv. I IBNet är denna aktivitet uppdelad i underkategorierna bogsering eller ledning.
- *Lokalisbrytning* är de tillfällen då isbrytaren utför isbrytning på uppdrag av exempelvis hamnar, något som inte ingår i dess ordinarie uppgift.
- Övrig tid loggas som *stillaliggande*, exempelvis när fartyget ligger vid kaj i väntan på uppdrag, ligger stilla till sjöss i väntan på anlop eller ligger still i isen och trafikleder andra fartyg.

I Tabell 2 visas det genomsnittliga antalet timmar som en Atle-klassisbrytare spenderar på de respektive aktiviteterna per isvinter.

Tabell 2. Timmar per isbrytaraktivitet uppdelat efter typ av isvinter. Informationen kommer från IBNet och är ett genomsnitt av alla Atle-klassisbrytarnas aktivitetsfördelning mellan 1999 till 2016.

		Lindrig	Normal	Sträng
Assistans	[h]	266	395	886
Förflyttning	[h]	323	355	648
Stillaliggande (under isvinter)	[h]	1793	2046	1621
Stillaliggande (resten av året)	[h]	6385	5973	5605

3.1.3 Driftsdata

En sammanställning av Sjöfartsverkets driftsuppföljning av Atle-klassisbrytarna presenteras i Tabell 3. Tabellen redovisar genomsnittsvärden för olika driftsdata för samtliga isbrytare i Atle-klass uppdelat efter typ av isvinter. Siffrorna skiljer sig lite grand från informationen i Tabell 2 då data från isvintern 2015/2016 inte finns med.

Tabell 3. Driftsdata uppdelat efter typ av isvinter. Informationen kommer från Sjöfartsverkets egen uppföljning och är ett genomsnitt av alla Atle-klassisbrytarnas driftsdata mellan 2008 till 2015.

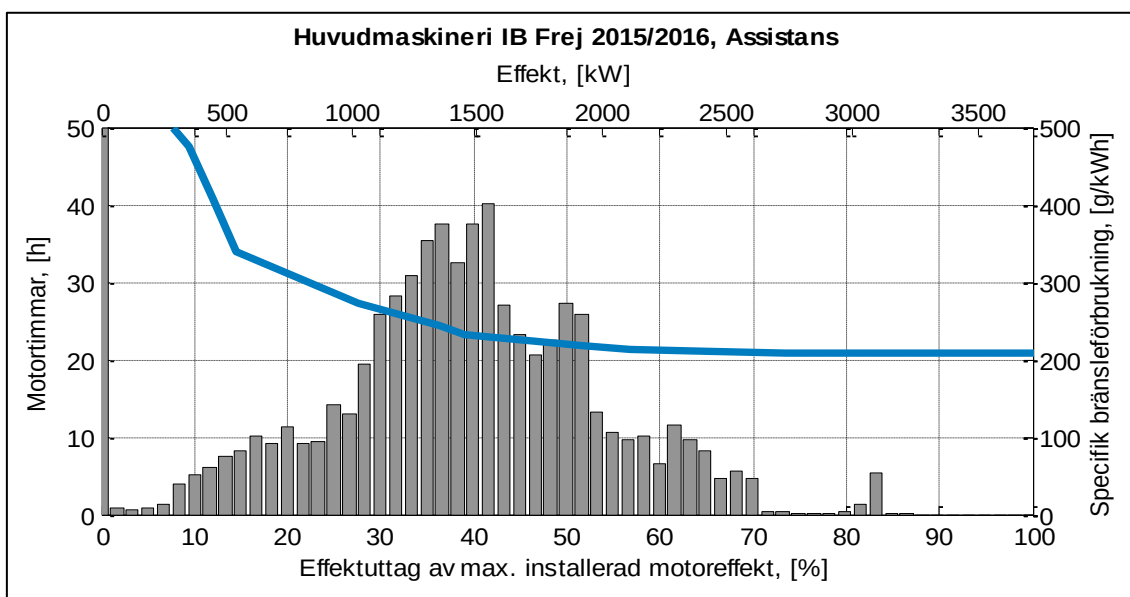
		Lindrig	Normal	Svår
Operativa timmar	[h]	596	1039	1689
Motortimmar HM	[h]	1860	3676	6109
Förbrukning HFO (för framdrivning)	[m ³]	872	1793	3033
Förbrukning smörjolja	[m ³]	23	54	69
Motortimmar HM / Operativa timmar	[1]	3.13	3.56	3.62
HFO / Motortimmar HM	[1]	0.54	0.48	0.50
HFO / Operativa timmar	[m ³ /h]	1.70	1.72	1.80
Smörjolja / Motortimmar HM	[m ³ /h]	0.011	0.015	0.011

3.1.4 Effektbehov

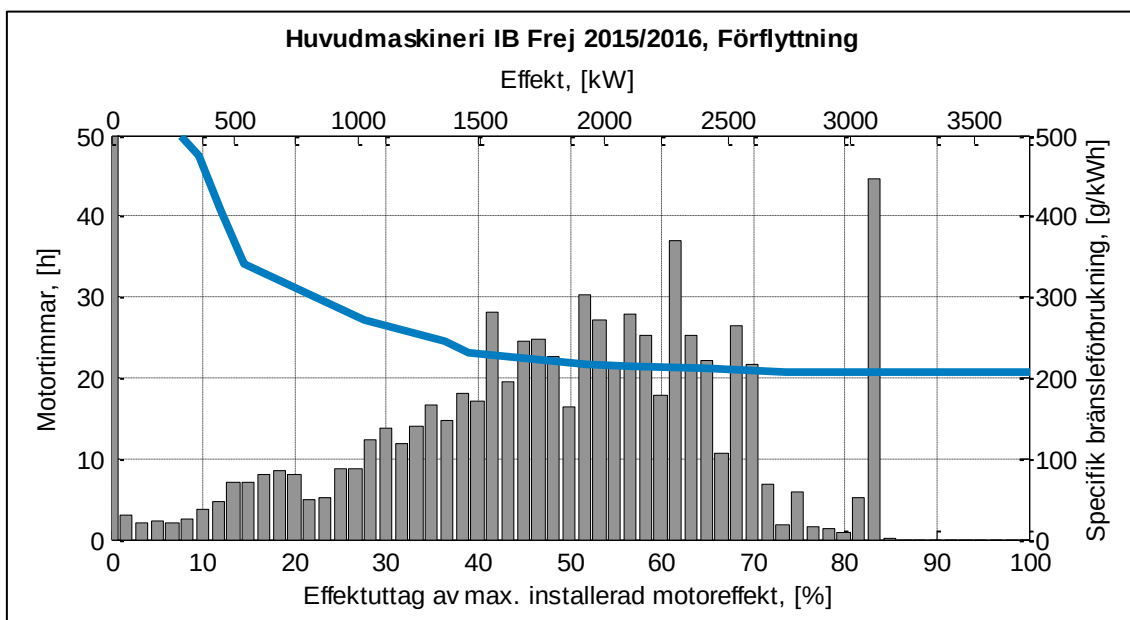
Under isvintern 2015/2016 genomfördes mätningar på isbrytaren Frejs drivlina. Totalt loggades mätdata under 50 dygn mellan den 2a februari till 5e mars samt 12e april till 30e april. Mätningarna uppmätte bland annat isbrytarens effektbehov, som den elektriska effekten på de fyra propelleraxlarna, antalet dieselmotorer igång, motorernas varvtal, etc. Mer detaljerad information om mätningarna finns redovisat i (SSPA, 2017). Genom att kombinera mätdata med data från IBNet kunde effektbehovet för isbrytarens olika aktiviteter

erhållas. Figurerna Figur 1, Figur 2, Figur 5 och Figur 6 visar exempel på när dessa kombinerats.

Genom att göra så har också isbrytarens effektbehov kunna sorteras per aktivitet. Figur 8 och Figur 9 visar hur effektbehovet såg ut för de aktiviteter där framdrivningsmaskineriet varit igång, assistans respektive förflyttning. Dessa har använts vid beräkningarna av bränslebesparingarna vid batterihybriddrift, se kapitel 8, *Bränslebesparing och reducering av motortimmar*, och Figur 16.



Figur 8 - Effektfördelning för "Assistans" för mätdata under isvintern 2015/2016.



Figur 9 – Effektfördelning för "Förflyttning" för mätdata under 2015/2016.

Motsvarande mätning på IB Frejs drivlina genomfördes under isvintern 2016/2017 men har inte kunnat sorteras per aktivitet då det inte kunnat erhållas utdrag från deras nya loggningssystem *IBNext*.

3.1.5 Hjälpmotorer

Ombord på Atle-klass isbrytarna finns fyra hjälpmotorer för att driva elproduktionen för hotellet, bogserspelet, krängningssystemet samt de kringsystem som håller igång framdrivningsmaskineriet.

Hjälpmotorerna är av typen Wärtsilä 624 TS och har uppskattningsvis en lägsta SFOC på 210 g/kWh. Antalet hjälpmotorer som är igång och hur effektfördelningen görs mellan dem beslutas om från fall till fall. Vanligtvis är två hjälpmotorer igång när fartyget körs med framdrivningsalternativ 2+2 och tre hjälpmotorer igång vid alternativ 4+6, se Tabell 4. När det dessutom finns ett behov av att använda bogserspel och/eller krängningssystem körs alla fyra generatorer samtidigt.

Tabell 4. Producerad effekt för olika driftsfall.

Driftsfall	Antal framdrivningsmaskiner igång	Total effektförbrukning generatorer [kW]
Stillaliggande i isen eller i hamn	0	280
Framdrift med kopplingsalternativ 2+2	2	750
Framdrift med kopplingsalternativ 2+4	3	860
Framdrift med kopplingsalternativ 4+4	4	980
Framdrift med kopplingsalternativ 4+6	5	1100

I Tabell 4 kan det ses att kringsystemen för en framdrivningsmotor erfordrar mellan 110 – 120 kW. Ett antal av dessa listas tillsammans med märkeffekt nedan.

- Cylinderkylvattenpump, 21,0 kW
- Sjökylvattenpump, 18,5 kW
- Smörjoljepump, 29,0 kW
- Bränslematarpump, 1,0 kW
- Spolluftfläkt, 17,0 kW
- Automatfilter, 1,0 kW
- Magnetiseringstransformatorer, etc.

4 Regelverk och standarder

Det finns en mängd kravställare på hur ett fartyg och dess system ska utformas. Utöver fartygets ägare, ställer flaggstaten (Transportstyrelsen i detta fall) krav på design och utförande, operatören kan ställa krav på utformning, kunden kan kravställa fart och miljöprestanda, osv.

I tillägg till renodlade krav och regelverk finns standarder och design guide-lines från olika institutioner. Dessa kan användas om fartygsägaren själv saknar relevant kunskap om ett specifikt område eller för att förenkla kravställande vid upphandling. Inom sjöfarten fyller klassificeringssällskapen denna roll.

Inom SSPAs åtagande i förstudien till Sjöfartsverkets framtida isbrytare IB2020 har delutredningen *Regler – övergripande samt klass* (SSPA DP6, 2017) genomförts. Rapporten ger en omfattande insyn i relevanta regelverk och viktiga krav, nutida och framtida (kommande) krav, som berör en isbrytare generellt, samt en komplett sammanställning av de olika kravställarna (nationella, internationella, ägarkrav, etc.) på en isbrytare.

Detta kapitel presenterar de identifierade regler och standarder som specifikt berör en batteriinstallation ämnad för framdrift. I kapitel 4.1.1 listas regelverk och föreskrifter som berör en batteriinstallation för framdrivning.

4.1.1 Regelverk och föreskrifter gällande batteridrift

I Tabell 5 presenteras en sammanställning av de identifierade regelverken och föreskrifterna som berör en batteriinstallation för framdrivning på fartyg.

Tabell 5. Regelverk, standarder och föreskrifter för batteriinstallationer för framdrivning

Regelverk	Beskrivning	Typ
Sjöfartsverket (fartygsägare)	Inga specifika krav för batteridrift för framdrivning (t.ex. byggnadsföreskrifter).	-
Transportstyrelsen	Inga specifika regler för batteridrift för framdrivning. Generella regler förekommer för batteriinstallationer förekommer (i el- och maskinsammanhang).	Krav
DNVGL	"Newbuildings special equipment and systems – Additional class, Tentative rules for battery power, July 2016". • 2012 års revision innehåller specifika regler. • 2016 års version är alla regler borttagna och hänvisning görs enbart till <i>DNVGL Ship rules Pt.6 Ch.2 Sec.1</i> - "Newbuildings Special Equipment and Systems – Additional Class, Redundant Propulsion, July 2011".	Design guideline
DNV	Guideline No.23 – "DNV Guideline for FMEA of Redundant Systems"	Design guideline

Lloyd's	"Battery Installations, Key hazards to Consider and Lloyds Register's Approach to Approval, Second Edition, January 2016 – A Lloyd's Register Guidance Note". Guidance note för större batteriinstallationer	Design guideline
Lloyd's	Specifika regler och bedömningsprocess finns i: LR Rules, Part 7, Chapter 14 - Rules and Regulations for the Classification of Ships, OTHER SHIP TYPES AND SYSTEMS, Requirements for machinery and engineering systems of unconventional design.	Design guideline
Lloyd's	Vidare vägledning finns i: Ship Right, Design and Construction, Additional Design Procedures, Assessment of Risk Based Designs (ARBD), April 2014	Design guideline
IEC	Publication 60812 "Analysis techniques for System Reliability – Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA)"	Standard

Undersökningen visade att det inte finns några specifika nationella krav avseende batteriinstallationer för framdrivning på fartyg. Transportstyrelsen har generella krav på utformning av batteriinstallationer som överstiger en viss energimängd. Dessa krav ska följas, men anses enbart utgöra en miniminivå då de inte är avsedda för denna typ av (storlek) applikation.

Klassificeringssällskapen har följt utvecklingen av batteridrift noggrannare. De undersökta klassificeringssällskapen, DNVGL och LR, har båda tagit fram riktlinjer för design av batteriinstallation för framdrivning. Då tekniken, och erfarenheterna från dess applikationer, utvecklas snabbt är samtliga regler preliminära (provisional)².

Klassningssällskapen har möjlighet att godkänna och klassa enskilda system, t.ex. en batteriinstallation. Trots att reglerna för batteridrift av fartyg är preliminära och under utveckling har de större klassningssällskapen god erfarenhet av att inspektera och godkänna denna typ av installationer.

För en batterihybridinstallation skulle engagemanget från ett klassificeringssällskap kunna innehålla åtaganden som initial riskanalys, system- och ritningsgranskning samt byggnationsinspektion. Efter byggnation skulle installationen kunna inspekteras rutinmässigt, en gång per år. Kostnaderna för det initiala arbetet bedöms ligga runt 300 - 500 kSEK och 30 - 50 kSEK per inspektionstillfälle.

² Vissa av dessa har dessutom ändrats under tiden rapporten reviderats.

5 Systemutformning

I detta kapitel beskrivs hur en batteriinstallation ombord på Alte-klass isbrytarna skulle kunna se ut, dels var batterierna lämpligt placeras samt hur de kan kopplas in på den elektriska drivlinan.

Kapitlet inleds med en beskrivning av Alte-klass isbrytarnas framdrivningsmaskineri och batteriinstallationens delsystem.

5.1 Atle-klassens drivlina och framdrivningssystem

Sjöfartsverkets Atle-klass isbrytare utgörs av tre fartyg, Atle, Frej och Ymer. De är systerfartyg och byggda mellan 1974-1977 på Wärtsilävarvet i Helsingfors³. Isbrytarna är avsedda att vara eskorterande isbrytare för alla förekommande isförhållanden i Östersjön, Bottenhavet och Bottenviken. De gör maximalt 19 knop och har en kapacitet att bryta 1.2 m tjock is i 3 knops fart.

Framdrivningen, se Figur 10, är dieselelektrisk och består av

- 5 stycken medelvarviga dieselmotorer, på 3730 kW vardera, som var och en är fast förbundna med två likströmgeneratorer, a och b, en försörjer babords- och en som försörjer styrbords drivlina. Dieselmotorerna arbetar på ett konstant varvtal på 485 rpm.
- Propulsionen åstadkoms genom fyra fasta propellrar, två förliga och två akterliga. De är vardera kopplade via raka axlar till två lika likströmsmotorer, dvs. totalt 8 st. De förliga motorerna kan leverera 3210 kW på vardera propelleraxel, medan de aktra kan leverera 4910 kW, dvs. totalt 16240 kW.
- Drivlinan styrs med Ward Leonard reglering. Det innebär att
 - propellermotors varvtal styrs genom spänningen i kretsen
 - kretsens spänning regleras genom att ändra generatorns magnetiseringsström
 - generatorn begär effekt från respektive dieselmotor
- Beslut om val av antalet inkopplade huvudgeneratoraggregat görs av en operatör (styrman/navigatör) utifrån bedömning av olika parametrar, såsom isläget, typ av aktivitet, etc. Vilka motorer som startas beslutas från maskinövervakningscentralen, baserat på motorernas gångtimmar och övriga status. Beroende på hur många motorer som väljs att vara igång matar de standardmässigt propellermotorerna enligt Tabell 1.
- Utöver framdrivningssystemet finns fyra separata mindre hjälpmaskiner för övrig elproduktion ombord, bl.a. pumpar och fläktar för

³ Numera Arctech Helsinki Shipyard

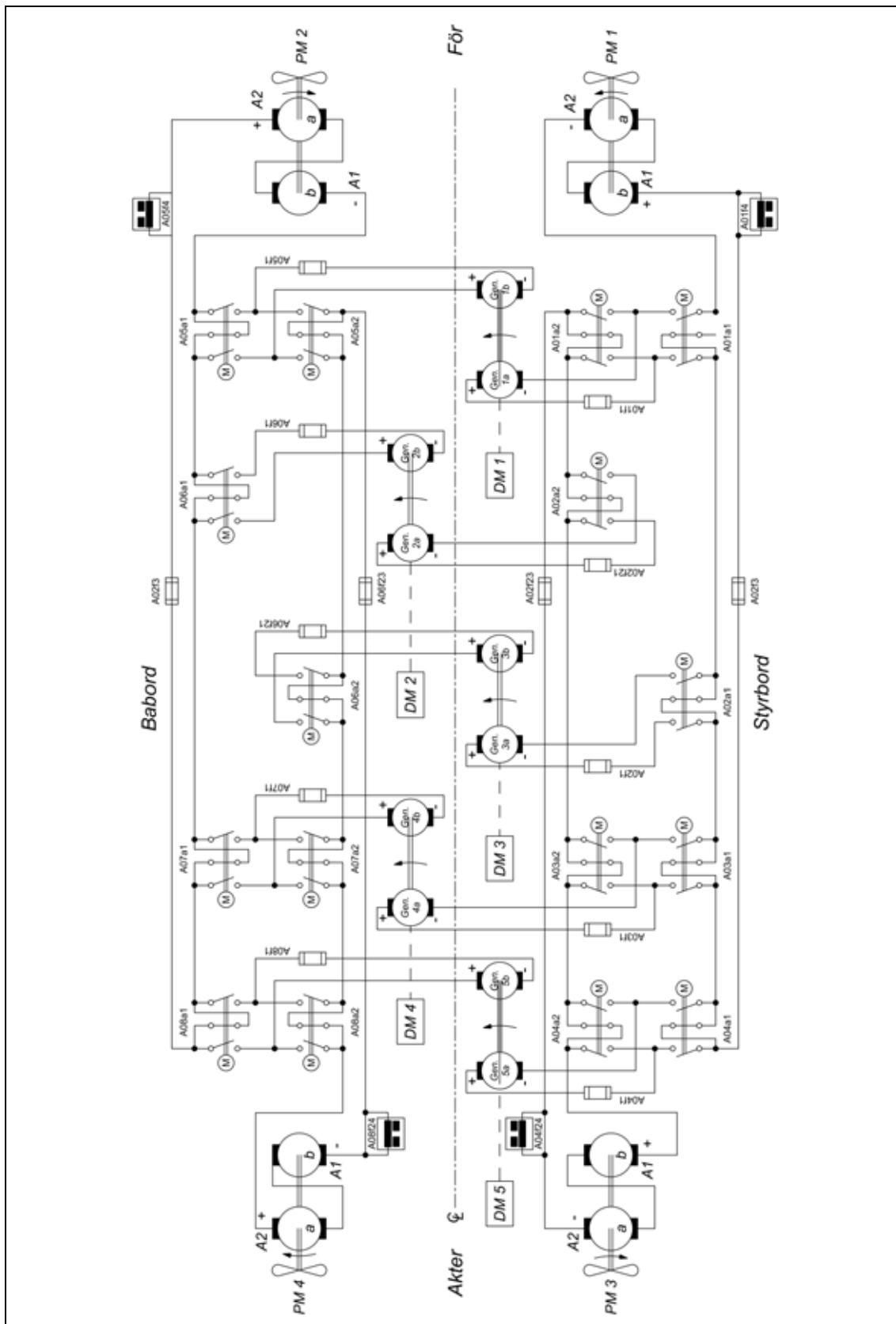
framdrivningsmotorer, elektricitet till inredning och brygga, uppvärmning, vattenrening, bogserspel, etc.

Tabell 6. Standard elektrisk matning vid olika antal dieselmotorer igång.

Dieselmotorer igång	Benämns	Elektrisk matning	
1	Som regel alltid minst två dieselmotorer igång		
2	2+2	Generator 1	förliga SB propellermotor
		Generator 2	förliga BB propellermotor
		Generator 2	akterlig SB propellermotor
		Generator 1	akterlig BB propellermotor
3	2+4	Generator 1	förliga SB propellermotor
		Generator 2	förliga BB propellermotor
		Generator 2 och 3	akterlig SB propellermotor
		Generator 1 och 3	akterlig BB propellermotor
4	4+4	Generator 1 och 3	förliga SB propellermotor
		Generator 2 och 4	förliga BB propellermotor
		Generator 2 och 4	akterlig SB propellermotor
		Generator 1 och 3	akterlig BB propellermotor
5	4+6	Generator 1 och 3	förliga SB propellermotor
		Generator 2 och 4	förliga BB propellermotor
		Generator 2, 4 och 5	akterlig SB propellermotor
		Generator 1, 3 och 5	akterlig BB propellermotor

I Figur 10 visas ett enlinjeschema för framdrivningssystemet.

Numreringen av generatorer i tabellen ovan syftar inte på deras de-facto numrering ombord utan förklarar hur matningen från generatorerna fördelas mellan BB- och SB-sida samt mellan förlig- och akterlig propellerkrets när olika antal dieselmotorer är igång.



Figur 10. Enlinjeschema för Atle-klass framdrivningssystem.

5.2 Batteriinstallationens delsystem

En batterihybridinstallation på ett fartyg består av ett antal delsystem. De mest centrala är

- Batterier

I marina applikationer är batterierna paketerade i batteripack, som sedan monteras i rack (ställningar). Batteripacken innehåller battericeller, batteristyrning, batteriövervakning, osv. Tillsammans utgör batteripacken den totala batteribanken. De ingående delarna i batteripacken beskrivs närmare i *6.1 Cell- och packkonstruktion* och *6.2 Batterikemier*.

- Energy Management System

Energy Management System, EMS, reglerar fördelningen mellan energi- och effektbehov mellan drivlina och batteribank. Det skall inte förväxlas med *Battery Management System, BMS*, som gör motsvarande i *batteripacken* för varje enskild *battericell*, mer om detta i kapitel *6.1.3 Batteripack och dess komponenter*.

För denna utredning anses *EMS* tillhöra fartyget medan *BMS* tillhör batteripacken.

För en batterihybridinstallation på Atle-klass kommer det tillkommande *EMS*:et behöva anpassas till det befintliga reglersystemet ombord.

- Informations- och styrsystem

På bryggan och i maskincentral presenteras batteristatus likt en maskinconning. Omfattning av informationsflödet och fördelning av styrfunktionen görs med fördel i projektets senare fas tillsammans med input från berörda operatörer.

- Kylsystem

När batterier laddas och urladdas bildas värme. Temperaturen i batterierna påverkar dess livslängd, där höga temperaturer har en signifikant negativ inverkan på batteriernas livslängd. För denna applikation med de effektuttag som fordras, är ett vattenkylsystem nödvändigt. Mer om detta i kapitel *6.1.3 Batteripack och dess komponenter*.

- Brandsläckningssystem

Vissa batterityper har risk att utveckla brand. Mer om detta i kapitel *6.1.4 Säkerhetsrisker och termisk rusning*. Klassificeringssällskapen behandlar brandskydd i sina riktlinjer för design av batteriinstallationer för framdrivning på fartyg. Reglerna bedömer vilka typer av säkerhetssystem, släckning, ventilation, osv., som erfordras givet ett specifikt fall.

5.3 Inkoppling av batterierna på drivlinan

Det finns en några olika möjligheter för inkoppling av batterierna på drivlinan. Alternativen som finns listas och ett koncept från en systemleverantör presenteras.

5.3.1 Inkopplingsalternativ

Två huvudsakliga grundmöjligheter kan identifieras för inkoppling av batterierna på drivlinan, parallellt eller i serie med propellerkretsen, och för det parallellkopplade fallet, över propellermotorerna eller generatorerna.

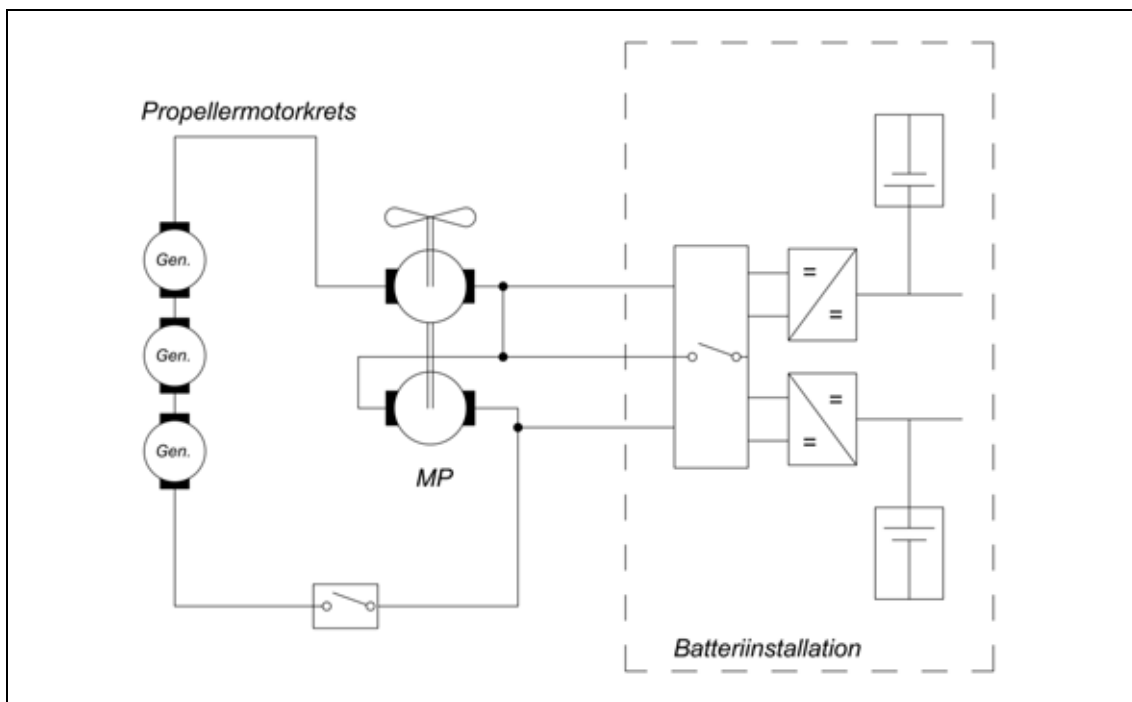
- Seriekoppling – Att koppla på batterierna som en extra generator, i serie, innebär höga strömmar genom de elektriska komponenterna i batteriet. Nominella strömmar från generatorerna är 3250 A med maximala värden på 5000 A (stundvis).
- Parallellkoppling – över generatorerna eller över propellermotorerna, eller både och.

Vilket som är det mest passande alternativet mellan att parallellkoppla över generatorerna, propellermotorerna eller båda har inte utretts. Likaså har det inte utretts hur fördelningen av batterier ska arrangeras, t.ex. om batteriet fördelas mellan några enskilda generatorer (t.ex. 3, 4 och 5), enbart de aktra propellermotorerna, osv.

5.3.2 Koncept på inkoppling

I Figur 11 presenteras ett koncept för inkoppling av batterierna till drivlinan. I det föreslagna konceptet parallellkopplas lika stora batterierna över samtliga propellermotorer.

Nominella spänningen över de förliga propellermotorerna är 2x534 V och det kan därför användas standardkomponenter för att koppla in batteriet. För de aktra propellermotorerna blir den nominella spänningen för stor. Så för att kunna hålla sig till standardkomponenter kopplas istället batteriet över var sin ”propellerhalva”, se Figur 11.



Figur 11. Koncept från systemleverantör.

5.3.3 Slutsats

Resultatet visar att det är tekniskt möjligt att koppla in batterierna på drivlinan med standardkomponenter.

Vilken konfiguration som är lämpligast behöver utredas vidare.

5.4 Placering av batterierna

För fartyg som modifieras med batteriinstallation är det inte ovanligt att installationen till stor grad förtillverkas, t.ex. förmontering i en container som placeras på däck. På så sätt blir installationen ombord billigare samtidigt som utrymme skapas ombord. På nybyggnationer är det vanligare att batterierna får en dedikerad plats ombord.

Detta kapitel behandlar batteriernas placering ombord på isbrytaren. Vikter och volymer på några lämpliga batterikoncept finns redovisat i kapitel 7, *Batterikoncept*. Volymerna för dessa koncept ligger till grund för utrymmesanalyserna i detta kapitel.

Vikterna tillsammans med de funna placeringarna har använts för att undersöka batteriinstallationens inverkan på fartygets stabilitet. Resultatet visar att batteriinstallationen har liten inverkan på fartygets vertikala tyngdpunkt (batterierna utgör knappt 1 % av fartygets lättvikt).

Sammanfattningsvis bedöms det finnas goda möjligheter för att välja batteriernas placering på några olika ställen ombord. Ett lämpligt alternativ är att dela upp batterierna mellan lastrum på däck 3 och något av de förliga förråden på däck 3. Eventuellt tillkommande elektronik för batteriinstallationen kan placeras i apparatrummet på däck 2, se Figur 12.

5.4.1 Placering av batterierna

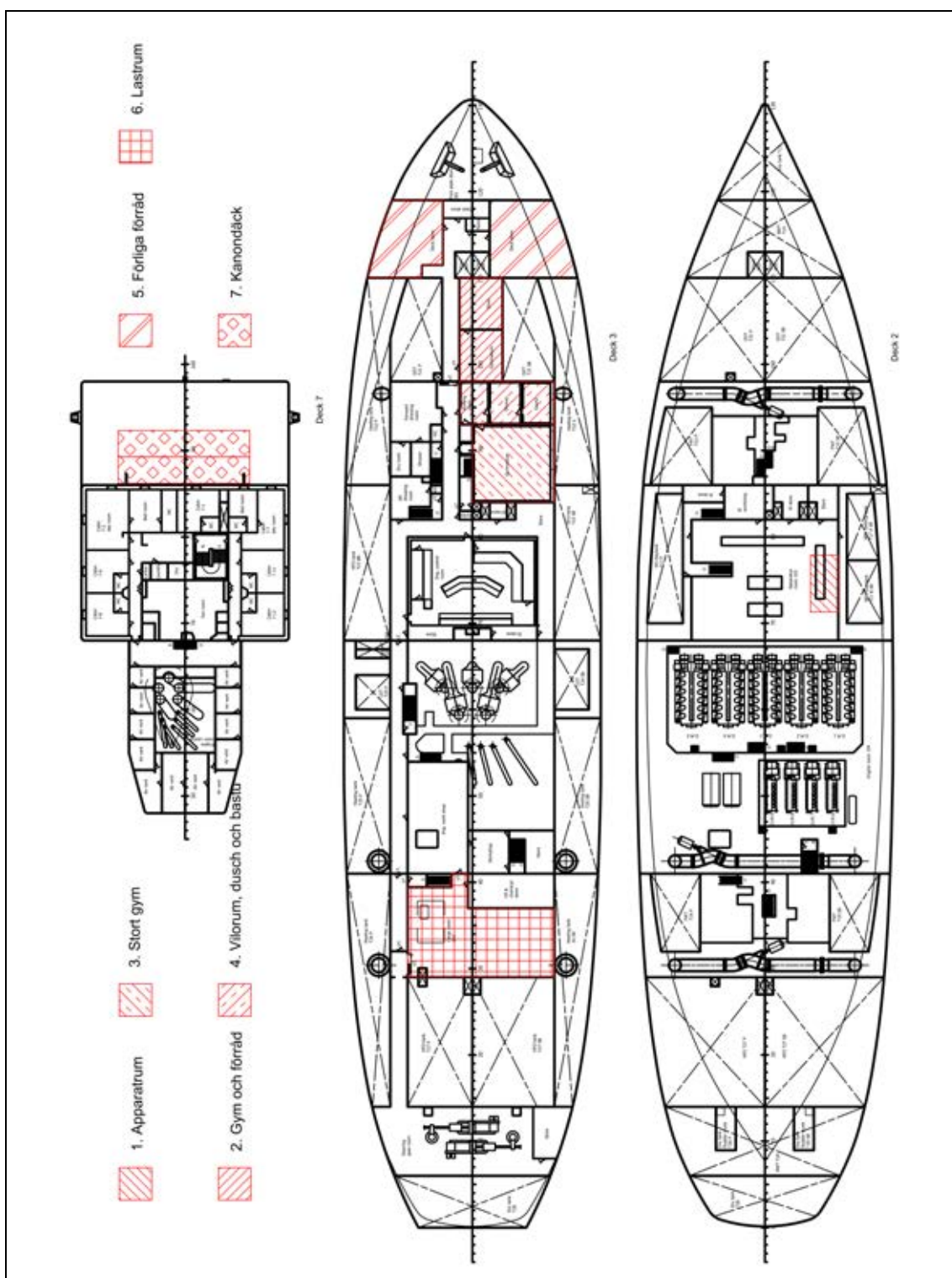
Detta kapitel presenterar alternativen för batteriernas fysiska placering. Alternativen har identifierats såsom lämpliga utifrån besök ombord, intervjuer samt tekniska såväl som ekonomiska förutsättningar.

5.4.1.1 Appartrum

Apparatrum, se alternativ (1) i Figur 12, är ett el-aparatrum på däck 2. Rummet är lokaliserat ovanför generatorrummet samt pumprummet och under maskincentralen. I rummet finns huvudtavlor för reglering av de elektriska komponenterna i drivlinan, tavlor för in- och urkoppling av generatorerna till propellermotorkretsarna, magnetiseringstransformatorer till generatorer och propellermotorer samt reservtransformatorer.

I rummet finns rack och tavlor som inte längre är i drift. Exempel reglering av fartygets magnetminskydd, något som inte längre används och redan delvis börjat demonteras.

Detta utrymme är för litet för att kunna rymma en batteriinstallation med dimensionerna i enlighet med kapitel 7 *Batterikoncept*. Däremot kan det ge plats för eventuell tillkommande EMS och ny regleringsutrustning för batterierna.



Figur 12. Generalarrangemang med möjliga batteri-placeringar ombord inritat.

5.4.1.2 Förlig inredning däck 3

I den förliga delen på däck 3 finns några lämpliga platser. Dessa är

- (2) Lilla gymrummet och intilliggande förråd (före detta amm-durk)
- (3) Stort gym
- (4) Vilorummet, shower och sauna
- (5) Förliga förråd, babord och styrbord

En batteriinstallation i något av de förliga rummen på däck 3 förutsätter att befintlig inredning rivs och ny plats för förvaring eller rekreativa utrymmen ersätts på annat ställe.

De akre rummen (4) och (5), har en fördelaktig placering när det gäller åtkomst till relevanta inkopplingspunkter. Alternativ (4) är placerat rakt ovanför apparatrum och förligt propellermotor rum. Alternativ (5) är lokaliserat ovanför förligt propellermotorrum.

Jämfört med alternativet beskrivet i 5.4.1.1 innebär dessa ett större ingrepp vad avser anslutningar till de relevanta elektriska inkopplingspunkterna på drivlinan, med skott och däcksgenomföringar.

5.4.1.3 Lastrum däck 3

I den aktra delen av däck 3 finns ett lastrum, (6) i Figur 12, som är åtkomligt från en däckslucka i huvuddäck. Lastrummet används i dagsläget till allmän förvaring.

Fördelen med att placera batterierna i lastrummet är en enklare installation, där förmontering kan göras i fabrik och enklare lyftas på plats ombord.

Lastrummet är beläget ovanför det aktra propellerrummet, vilket betyder att inkoppling till elektriska drivlinan görs med en durkgenomföring. Att koppla in batterierna på den förliga propellerkretsen innebär ett större ingrepp.

5.4.1.4 Kanondäck

Kanondäcket är placerat på den förligaste delen av däck 7. Under tiden fartyget var militärt stod där två 40 mms luftvärnskanoner. Dessa är borttagna och däcket är idag oanvänt.

En placering av batteribanken på däck 7, se (7) i Figur 12, innebär möjligheten att förtillverka batteriförvaringen, t.ex. container, som kan lyftas ombord.

På ritningarna går ett schakt genom fartyget, från apparatrum till bryggan, i anslutning till kanondäck. Om detta alternativ väljs behöver förutsättningarna för att använda schaktet undersökas närmare.

6 Batteriteknologi

Detta kapitel innehåller generell information om batteriteknologi. Först presenteras ett avsnitt om litium-jon batteriernas konstruktion, uppbyggnad, utformning samt ingående system. Slutligen redovisas ett kapitel om olika batterityper.

I kapitel 7, *Batterikoncept*, presenteras och evalueras några lämpliga batterikoncept för isbrytaren.

6.1 Cell- och packkonstruktion

6.1.1 Cellkonstruktion

En battericell består av aktivt anod- och katodmaterial, samt inaktivt material för att leda ström till- och från elektroderna. De främsta inaktiva materialen är strömmuppsamlare, elektrolyt och separator, samt cellhöljet. Beroende på hur elektroderna utformas kan olika egenskaper erhållas.

6.1.2 Energi- och effektoptimering

Att öka energin hos en cell görs antingen genom att öka cellspänningen eller mängden aktivt material. Att öka effektegenskaperna hos en cell kräver emellertid att man minskar resistanser mellan och inuti de olika materialen (framför allt masstransport och jonledning).

Som en följd av dessa motverkande krav på energi och effekt måste alltid en kompromiss göras: en cell kan antingen vara energioptimerad eller effektoptimerad.

Hög effekt från en energioptimerad cell resulterar i stor polarisering och därmed stora förluster. Det är därför viktigt att använda en cell optimerad för avsedd användning. Effektoptimerade celler anpassade för hybridelektriska applikationer är långt ifrån lämpliga för helelektrisk drift och vice versa.

I dagsläget är effektoptimerade celler generellt sett dyrare än energioptimerade celler per kWh.

6.1.3 Batteripack och dess komponenter

För att gå från cell till batteripack seriekopplas ett antal celler. Antalet seriekopplade celler ger den nominella systemspänningen. De seriekopplade strängarna parallellkopplas och skapar på så sätt det efterfrågade energi- och effektbehovet.

Förutom de sammankopplade cellerna, innehåller ett batteripack dessutom ett antal elektroniksystem för att övervaka cellspänning, strömmar och temperaturer, samt en styrenhet (*BMS, battery management system*, eller

BMU, battery management unit). Styrsystemet säkerställer optimal prestanda givet hög säkerhet och lång livslängd.

I tillägg innehåller ett batteripack bland annat ett kylsystem (luft, forcerad luft, vätska eller kylmedium), kontaktorer, reläer, säkringar, frångiljare, osv.

6.1.4 Säkerhetsrisker och termisk rusning

Att kontrollera cellspänning och temperatur är direkt avgörande för batterisäkerheten. Cellerna måste hållas inom de spännings- och strömgränser som leverantören anger för att garantier ska gälla.

Upp- och urladdning av batterier genererar värme. Det termiska systemet bör säkerställa att celltemperaturen och temperaturgradienterna i batteripacket är inom ett fördefinierat område.

En vanlig säkerhetsrisk som diskuteras är termisk rusning (thermal runaway). Detta är en mycket snabb ökning av celltemperaturen och hör ofta ihop med att cellerna öppnas okontrollerat och med, till exempel, brand och/eller explosion som följd. Den utlösande faktorn för termisk rusning kan vara överladdning eller överurladdning, överhettning, mekanisk påverkan och externa och interna kortslutningar.

Normalt ska en överladdningssäkerhetsanordning avbryta laddningsförfarandet, men i händelse av t.ex. elfel kan överladdningen fortsätta. Vanligtvis innehåller celler någon form av övertrycksskydd, som frångopplar cellen från att laddas och/eller möjliggör att eventuell gas som genererats inne i cellen kan släppas ut. Vid överladdning eller överurladdning ska batteriets styrenhet upptäcka felet, då dessa normalt orsakas av defekta anslutningar i laddnings- eller urladdningskretsen eller i batteripackets elektroniska system. Andra orsaker som kan resultera i termisk rusning är interna kortslutningar i cellerna som följd av tillverkningsdefekter.

6.1.5 Installerad eller tillgänglig energi

Batteripackets energiinnehåll specificeras antingen som installerad energi eller tillgänglig (användbar) energi. Den tillgängliga energin motsvarar energimängden i laddningsfönstret (kallas *SOC, State of Charge*) där alla upp- och urladdningskrav uppfylls.

Beroende på applikation och cellernas optimering, används olika begränsade laddningsfönster för att säkerställa effektprestandan och förlänga batteriets livslängd. Det finns en maximal effektnivå som batteriet ska kunna leverera och acceptera, och den nivån ska vara oberoende av laddningsfönster. Effektprestandan, både vid upp- och urladdning, beror dock på laddningsnivån hos batteriet. Vid höga nivåer är höga effektuttag möjliga, och vid låga nivåer är istället förmågan att acceptera laddeffekt hög.

För HEV-applikationer är den användbara energin vanligtvis ca. 25% av den totala, men kan vara så låg som 3-5%. Vanligtvis används ett SOC runt 50% laddningsgrad, dvs. för 25% användbar energi används ett SOC-fönster på 25% mellan ca. 35-65% laddningsgrad.

50 % laddningsgrad innebär att batteriets installerade (köpta) storlek är dubbelt så stor som den energimängd som används. För HEV-applikationer med 25 % användbar energi är därmed den installerade storleken hos batteriet 4 gånger så stor som den använda energimängden.

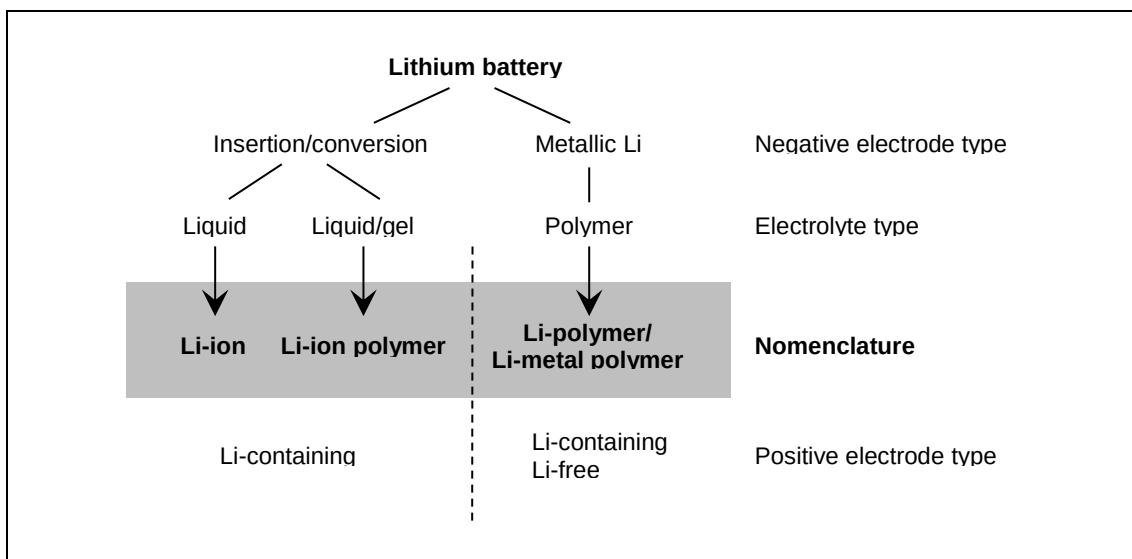
För driftsfall där helelektrisk drift förekommer, dvs. PHEV- och PEV-applikationer, används en större andel av den totala energin och 70-85% är vanliga nivåer beroende på cellkemi. För att inte förstöra cellmaterialen och därmed förkorta livslängden används vanligtvis för Li-jonbatterier ett SOC-fönster mellan 10-15 och 95 % - dvs. man varken laddar ur eller upp batterierna helt och hållet. Batteriets styrenhet säkerställer att dessa gränser hålls (Berg, 2015). För en PEV-applikation med 80 % användbar energi är den installerade storleken hos batteriet 1,25 gånger så stor som den använda energimängden.

6.2 Batterikemier

För denna utredning har tre olika batteriteknologier studerats: Li-jonbatterier, bly-syrabatterier och superkondensatorer. Vidare har tre olika varianter av Li-jonbatterier har använts: NMC, LFP och LTO. Beskrivningar samt för- och nackdelar med dessa teknologier presenteras i detta avsnitt.

Kortfattat kan följande jämförelse mellan de olika batteriteknologierna göras:

- Li-jonbatterier: hög energi och effekt möjlig, högst cellspänning av teknologierna, kräver elektronisk övervakning
- Bly-syrabatterier: låg cyklingsprestanda, tunga och volymkrävande, robust och enkel teknik, lägst cellspänning av teknologierna
- Superkondensatorer: låg temperaturpåverkan och lång cyklingslivslängd, cellspänning emellan Li-jon- och bly-syrabatterier, höga effektuttag möjliga, låg energitäthet (volymkrävande), inte beprövad för denna applikation



Figur 13. Olika varianter av laddningsbara litiumbatterier

6.2.1 Li-jonbatterier

Bland de olika batteriteknologier som används för elektriska fordon är Li-jontekniken den mest attraktiva på grund av en kombination av hög cellspänning, hög energitäthet och effektegenskaper. Li-jonbatterier är en av många medlemmar i familjen litiumbatterier, där olika materialval resulterar i celler med olika egenskaper. De olika varianterna sammanfattas i Figur 13.

Li-batterier kategoriseras utifrån vilket aktivt material som används som negativ elektrod: metallisk litium eller ett inlagringsmaterial. Om metalliskt litium (ofta en tunn metallfolie) används, är resultatet antingen ett Li-metall- eller ett Li-metallpolymerbatteri. Li-jonbatterier å andra sidan innehåller alltid en anod bestående av ett inlagringsmaterial.

Valet av katodmaterial är det som oftast definierar Li-joncellerna (NMC, LFP-celler, osv.). Nedan följer en kort sammanfattning av för- och nackdelar för de olika Li-jonbatterierna som används i denna studie.

6.2.1.1 NMC

Den i fordonssammanhang vanligaste celltypen av Li-jonbatterier är NMC-celler. Förkortningen avser ett katodmaterial bestående av nickel, mangan och kobolt – $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z)\text{O}_2$. Det finns idag ingen standardiserad kombination av x , y , och z , utan detta kan variera från tillverkare till tillverkare. Vid introduktionen av NMC-materialet var den vanligaste kombinationen $x=y=z$, men nu går allt flera mot lösningar med högre Ni-halt: NMC442 ($x=y=0,4$ och $z=0,2$) och NMC811 ($x=0,8$ och $y=z=0,1$). I alla beräkningar i denna studie, se kapitel 7, har NMC442 använts. Som anod i NMC-celler används idag uteslutande grafit.

NMC-celler kännetecknas som energirika och med högst cellspänning av de Li-jonceller som idag finns på marknaden. Dock är effektegenskaperna begränsande då den kemiska strukturen är mindre stabil och kan i vissa fall vara instabil. Det senare gäller vid höga cellspänningar och NMC-celler ska inte laddas över den gräns som celltillverkarna sätter som max. Vid överladdning kan strukturen sönderdelas och gas utvecklas. Detta leder till irreversibel kapacitetsförlust. Vidare är NMC-celler oftast känsligare för höga och låga temperaturer.

6.2.1.2 LFP

Katodmaterialet litiumjärnfosfat (LiFePO_4) förkortas LFP och är ett material som möjliggör höga effektuttag. Jonledningen i materialet är lågt, och kräver att kolbelagda nanopartiklar av LFP används; därav effektegenskaperna. LFP-celler som finns på marknaden innehåller uteslutande grafit som anodmaterial. Cellspänningen och energiinnehållet är lägre än för NMC-celler.

Urladdningskurvan för LFP-celler är flack och gör att förhållandena är mycket lika över ett stort laddningsfönster. En utmaning är dock att bestämma laddningstillståndet.

LFP-celler omnämns ibland som 'säkra celler'. Det finns inga säkra batterier, men i händelse av fel blir konsekvensen mindre för LFP-celler än för NMC-celler. De senare fattar lätt eld, medan LFP-celler kan utveckla gas och rök men sällan öppna lågor. Detta har till stor del att göra med att det inte kan frigöras syrgas inne i LFP-celler (syre som finns bundet till fosfor i fosfat är mycket stabilt bundet).

6.2.1.3 LTO

LTO är en förkortning för litiumtitanat ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) och är ett anodmaterial. Detta är idag den enda Li-joncellstyp som benämns utifrån anodmaterialet.

Katodmaterialet som oftast används i kombination med LTO är LiMn_2O_4 , eller LiMn_2O_4 i kombination med NMC.

LTO-celler är stabilare än LFP- och NMC-celler under cykling då dess kristallstruktur är stabil. Detta möjliggör höga effektuttag utan att skada cellen, mer om detta i kapitel 6.2.4, *Livslängd*.

Cellspänningen är ca. 1,4 V lägre än för motsvarande cell med grafit som anod. Det gör att det krävs fler celler för att uppnå erforderlig systemspänning för en given applikation.

När celler av LTO-typ laddas ur kan, på grund av materialens katalytiska egenskaper, elektrolyten sönderdelas och cellen svälla som en konsekvens av gasutveckling från elektrolytsönderdelningen.

6.2.2 Bly-syrabatterier

Blybatteriet är den mest använda batteritekniken inom fordonsindustrin: startbatteriet. Med mer än 140 års utveckling är Pb-syrabatteriet en mycket robust teknik. Då bly är en tungmetall ($11,3 \text{ kg/dm}^3$) blir tekniken själv tung och skrymmande och på grund av sin miljöpåverkan är bly mer eller mindre förbjudna att användas i många tillämpningar. Detta har dock resulterat i att Pb-syrabatterier är en av världens mest återanvända produkter.

Pb-syrabatterier finns i nästan alla storlekar (Ah) och olika utformningar. Djupa urladdningscykler av en Pb-syracell resulterar normalt i en temperaturökning på grund av den höga inre resistansen. För att minimera värmeutvecklingen använder man ofta tjockare och förstärkta elektroder. Tjockare elektroder resulterar i en lägre laddningskapacitet, och därför måste batteriet ofta överdimensioneras. Ett alternativ till detta är att kombinera ett Pb-syrabatteri med en asymmetrisk kondensator, där Pb-syradelen är ansvarig för att uppfylla energikraven och kondensatorns del uppfyller effektkraven. I denna studie har en sådan lösning använts där de båda teknologierna kombineras i en och samma cell.

6.2.3 Superkondensatorer

Elektrokemiska dubbellagerskondensatorer, även kända som superkondensatorer, är celler vars lagrade energi endast kan utnyttjas under korta, begränsande tidsintervall: dvs höga effekter kan erhållas. Den grundläggande skillnaden mellan en superkondensator och ett batteri är att energin lagras *elektrostatiskt* i en superkondensator, medan i ett batteri lagras energin *elektrokemiskt*. Urladdningstiden är mycket kortare för en superkondensator än för ett batteri då inga kemiska reaktioner är involverade är processerna för laddning och urladdning mycket snabba.

En superkondensator är lik en battericell: två elektroder, en separator och en elektrolyt. Elektroderna är vanligtvis identiskt uppbyggda och består av mikroporöst kol, för att maximera elektrodarean. Elektrolyten är vanligtvis en vätska, antingen organisk eller vattenbaserad.

Cellspänningen för en superkondensator baserad på en vattenhaltig elektrolyt är ca 1 V, eller ca 3 V om en organisk elektrolyt använts. Idealiskt är cellspänningen direkt proportionell mot laddningstillståndet. På grund av de linjära urladdningsspänningsegenskaperna och den begränsade tillgängliga energitätheten kan effekt endast levereras under mycket korta tider, normalt några tiotals sekunder.

Till skillnad från batterier kan superkondensatorer använda hela spänningsområdet (ner till 0 V) utan att skada cellen, och därför är det vanligt att transportera och lagra superkondensatorerna helt urladdade och kortslutna.

6.2.4 Livslängd

Ett batteri förlorar succesivt sin prestanda när det används men också med tiden (kalendertid). Hur snabbt batteriets prestanda förloras beror på vilken typ av batteri (kemisk sammansättning), i- och urladdningsdjupet (DoD), i- och urladdningshastighet (c-rate), batteritemperatur, osv. Det är svårt att ge ett säkert svar på hur länge ett batteri håller utan att ha ett stort underlag av testresultat som avspeglar den tänkta användningen eller erfarenheter från dess tillämpning.

Livslängden avser det tidsspann under vilket batteriet ska kunna leverera sin önskade prestanda. På så sätt är batteriet inte nödvändigtvis obrukbart efter att det nått sin tänkta livslängd.

Det finns åtgärder för att kunna förlänga livslängden på sina batterier om det från erfarenheterna visat sig vara. t.ex. underdimensionerat. Alternativen är

- installera mer batterier
- begränsa prestandan

De batterileverantörer som projektet har varit i kontakt med uppger att marknaden idag är ointresserad av batteriteknik som håller längre än 10 år. Då utvecklingen avseende prestanda och pris går så fort att köparna riskerar att sitta med omoderna batterier väljer de istället en kortare livslängd och byter batterier tidigare.

7 Batterikoncept

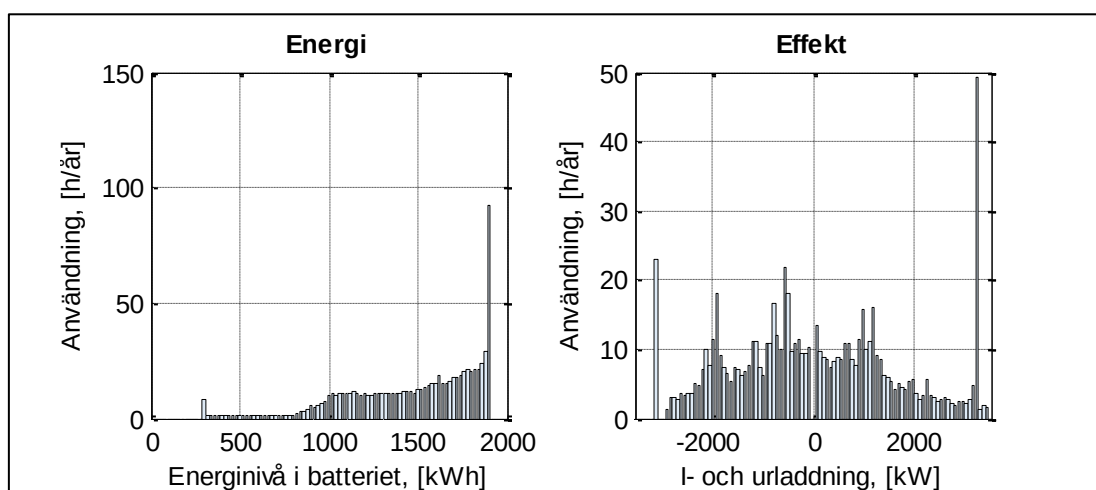
I detta kapitel presenteras och utvärderas ett lämpligt batterikoncept. Batterikonceptet avser batteribanken, dvs. batteripack, rack, laddare, kylning, osv, se kapitel 6.1.3 *Batteripack och dess komponenter*.

Utvärderingen redovisar vikt, volym och kostnad för batteriteknologierna Li-jon LFP, Li-jon NMC och Bly-syra.

7.1 Konceptbeskrivning

Batterikonceptet har valts utifrån kunskapen om isbrytarens effektbehov, kapitel 2.3, samt vetenskap om dess potential, kapitel 2.4.2 och 8.3.

- Max effektuttag 3250 kW
- Tillgänglig energi 2000 kWh
- Systemspänning 600 V
- Livslängd 10 år
- Genomsnittlig användning per år av batteriet i enlighet med Figur 14.



Figur 14. Batteriets användning (driftprofil).

7.1.1 Budgetofferter från batterileverantörer

Sammanställning av budgetofferter från batterileverantörer på det valda batterikonceptet finns sammanfattat i Tabell 7.

- **Leverantör A**, li-jon NMC, energioptimerade celler, totalt installerad energi 2440 kWh, 1900 kWh tillgänglig energi, 3250 kW, systemspänning 400-600 V. Ingen livslängd anges. I priset ingår rack för luftkylning, kostnader för klassning och montering av batteripack i racken ombord.
- **Leverantör B**, li-jon LFP, lämnade två budgetofferter. I priset ingår dokumentation, rack, klassning, FAT, driftsättning, etc.
 - o totalt installerad energi 1935 kWh, 1480 kWh tillgänglig energi, 3500 kW, livslängd 10 år.
 - o totalt installerad energi 2140 kWh, 1900 kWh tillgänglig energi, 3500 kW, livslängd 5 år.
- **Leverantör C**, bly-syra, angav inget pris. Leverantören uppgav att den långa livslängden var dimensionerande. För att kunna klara kraven behövdes en dyrare gelad-rörplattscells väljas.

Tabell 7. Sammanställning av budgetofferter från batterileverantörer.

	Energi install. [kWh]	Energi, tillgäng. [kWh]	Effekt max. [kW]	Vikt [ton]	Volym [m ³]	Kostnad ⁴ [MSEK]	Livstid [År]
Lev. A	2440	1952	3250	35	33	13,5	Ej garant.
Lev. B	1935	1480	3500	37	57	18,0	10
Lev. B	2140	1900	3500	42	64	20,0	5
Lev. C	Ej angivet	1900	3500	400	310	Ej angivet	10

7.2 Slutsatser

Sammanfattningsvis förefaller

- Bly-syra batterier kunna uteslutas för detta batterikoncept på grund av den stora vikten och volymen som de minst erfordrar.
- Li-jonbatterier av NMC-typ förefaller vara den mest kostnadseffektiva lösningen (motsvarar 650 \$/kWh).
- Li-jonbatterier av LFP-typ förefaller vara dyrare (1150 \$/kWh).

⁴ Samtliga kostnader är från Q3 2017.

8 Bränslebesparing och reducering av motortimmar

För att kunna kvantifiera effekterna av batterihybriddrift på en Atle-klassisbrytare, främst i termer av bränslebesparing och minskat antal motortimmar, utvecklades ett simuleringsverktyg. I detta kapitel beskrivs och verifieras simuleringsverktyget. Slutligen presenteras resultatet av simuleringarna.

8.1 Metodbeskrivning

Figur 15 presenterar ett flödesschema för simuleringsverktyget och Figur 16 presenterar ett illustrativt utdrag av resultatet. Figurerna kan användas som stöd till beskrivningen under.

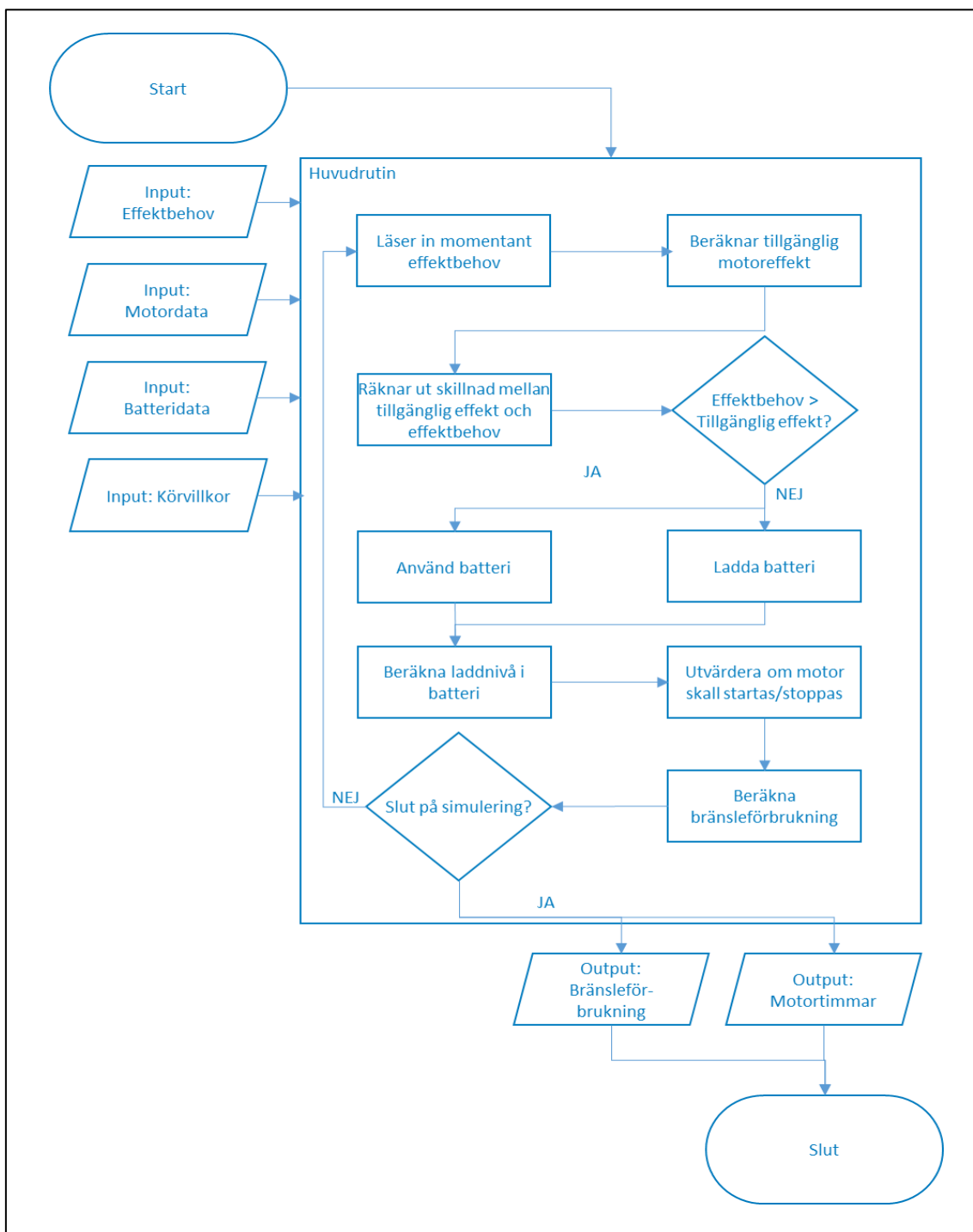
Simuleringen börjar med att läsa in följande indata.

- Effektbehov - den summerade propelleraxeeffekten ombord, beskrivet i driftsprofilen, och den relaterade samplingshastigheten.
- Motordata – Antal motorer samt deras installerade effekt (uttryckt i kW), optimal driftspunkt (uttryckt i procent av maxeffekt), verkningsgrad i drivlinan, specifik bränsleförbrukning (uttryckt i g/kWh), uppstartstid och avkylningstid för motorer, bränslets densitet.
- Batteridata – information om batteribanken som simuleras: Storlek (uttryckt i kWh), effekt (uttryckt i kW) och verkningsgrad för upp- och urladdning.
- Körvillkor – begränsningar i systemet för simulering: Maximal/minimal tillåten laddningsnivå i batteri, minsta antal motorer som tillåts vara igång simultant, tröskelvärden i batteri för när en motor till skall starta/stängas av, antal huvudmotorer igång vid start av simulering, startnivå i batteri.

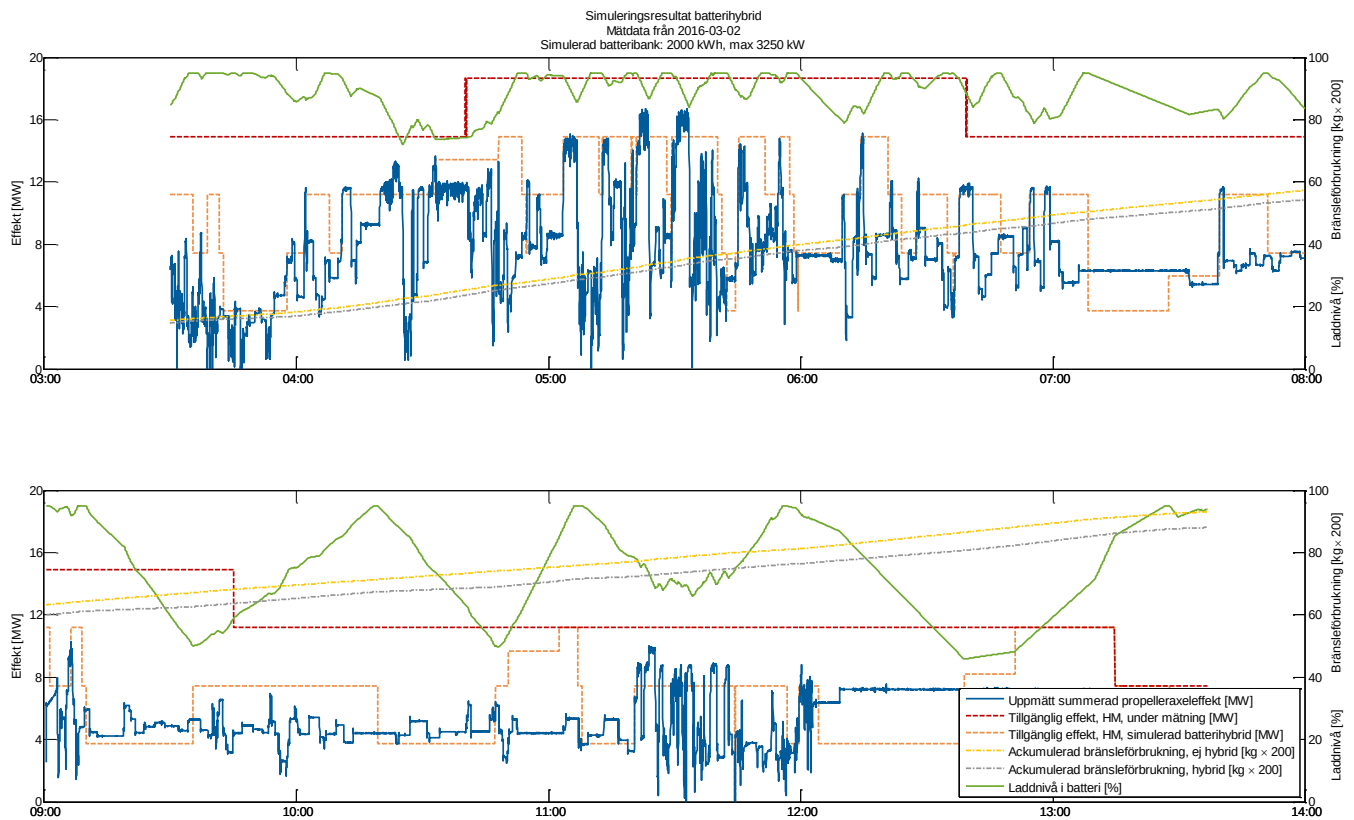
Efter inläsningen startar beräkningarna i följande ordning

- Den momentana tillgängliga effekten beräknas, som summan av de motorer som är igång och jämförs med det momentana effektbehovet.
- Om den tillgängliga effekten är större än effektbehovet körs motorerna fortsatt på optimal driftspunkt och överskottet laddar batteriet.
- Om tillgänglig effekt är lägre än effektbehovet används batteriet till att täcka upp skillnaden mellan effektbehov och tillgänglig effekt.

- Efter användning av batteriet uppdateras batterinivån. Om batteriet laddats till övre gräns skickas signal att stänga av en motor, om batteriet laddats till undre gräns skickas signal att starta en motor (detta görs för att efterlikna befälets beslut i valet att starta eller stänga av dieselmotorerna).



Figur 15. Flödesschema för simuleringsverktyg.



Figur 20: Resultat från simulering med batterihybrid baserat på uppmätt effektbehov på 17 maj den 26 mars 2016. Startkriterier för när motor slås igång är när batterinivå är under 50% av full laddning (se vid c:a 09:30, undre figur) eller när det föreligger ett behov av större effekt än tillgängliga motorer och batteri tillsammans kan leverera (se c:a 05:00 övre figur, detta simulerar att befäl säkerställer att tillbörlig effekt finns tillgänglig vid operation). Stoppkriterium för när motor slås av är när batterinivå når 95% av full laddning (se bl.a. c:a 11:00 undre figur), vilket skickar stoppsignal i simuleringen. Detta stopp kan vid stora effektvariationer bli tämligen korta på grund av ett föreliggande högt effektbehov där befäl justerar tillgänglig effekt (se mellan 05:00 och 06:00 övre bild). Motorers starttid är vid kallstart 3 minuter till 60% av effekt och 15 minuter till 100% effekt (se c:a 04:30 övre bild). Vid stopp av motor tar det 30 minuter för motor att bli kall, återstartas motorn inom denna tid anses motorn vara varm och har en starttid på 1 minut till 100% effekt (se mellan 06:00 och 07:00 övre bild).

Efter detta beräknas momentan bränsleförbrukning för varje enskild dieselmotor baserat på effektuttaget och SFC-kurva, i enlighet med ekvation [1]. Den momentana bränsleförbrukningen adderas till den totala bränsleförbrukningen.

När rutinen räknat igenom varje tidpunkt i effektbehovet sammanställs total bränsleförbrukning och antal motortimmar varpå programmet avslutas.

8.2 Verifiering av simuleringsverktyg

För att verifiera simuleringsverktyget har uppmätt effektbehov, information om hur många dieselmotorer som varit igång använts tillsammans samt den specifika bränsleförbrukningskurvan använts för att räkna ut ett referensvärde för bränsleförbrukning. Då dieselmotorernas individuella belastning inte varit

känd har det antagits att effektbehovet fördelats jämnt över det antalet som varit igång.

Den beräknade bränsleförbrukningen ligger inom 1% av den registrerade bränsleförbrukning ombord enligt maskinloggböckerna för de dagarna som effektmätningarna gjorts, se Tabell 8 nedan.

Tabell 8. Verifiering av simuleringsverktyget. Jämförelse av beräknad och loggad bränsleförbrukning.

	Total	
Beräknad bränsleförbrukning	770	m ³
Bränsleförbr. enligt isbrytarens maskindagbok, för motsvarande mätperiod	764	m ³

8.3 Simuleringsresultat av batterihybriddrift

8.3.1 Bränslebesparing

Besparingspotential för olika batterikoncept redovisas i Tabell 9 nedan.

Tabell 9. Bränslebesparing för dieselmotorerna för olika batterikoncept, varierande energimängd och effektuttag.

	[kW]					
	2000		3250		3750	
[kWh]	Assistans	Förflyttning	Assistans	Förflyttning	Assistans	Förflyttning
500	-	-	6.6%	3.6%	7.0%	3.9%
1000	-	-	7.9%	4.0%	8.2%	4.1%
1500	8.4%	4.0%	9.2%	4.3%	9.4%	4.4%
2000	8.4%	4.3%	9.1%	4.3%	9.2%	4.7%
2500	8.3%	4.4%	8.9%	4.6%	9.5%	5.0%

Resultatet från simuleringen visar att bränslebesparingen är nästan dubbel så stor under assistans jämför med under förflyttning. Besparingen som eventuellt kan erhållas genom att motorerna får arbeta jämnare, se kapitel 2.4.2.2 om jämnare belastning, ingår ej i denna besparing.

För ett genomsnittsår innebär detta ungefär ca. 6.5% bränslebesparing, vilket med bränsleförbrukningen i simuleringarna motsvarar ca. 70 ton diesel.

8.3.2 Reducerade motortimmar

I Tabell 10 nedan presenteras reduceringen av antalet motortimmar som resultat av en batterihybriddrift för olika batterikoncept.

Tabell 10. Reducering av motortimmar för dieselmotorerna för olika batterikoncept, varierande energimängd och effektuttag.

	[kW]					
	2000		3250		3750	
[kWh]	Assistans	Förflyttning	Assistans	Förflyttning	Assistans	Förflyttning
500	-	-	24.4%	28.4%	24.3%	28.2%
1000	-	-	36.5%	31.3%	36.1%	30.7%
1500	44.1%	31.3%	45.3%	32.4%	45.5%	32.4%
2000	44.0%	31.3%	45.5%	32.7%	45.7%	32.8%
2500	44.1%	31.3%	45.8%	32.7%	45.6%	32.5%

För ett genomsnittsår innebär detta potentiellt 40% minskning av antalet motortimmar för dieselmotorerna, vilket motsvarar ca. 1000 timmar.

9 Livscykelkostnad

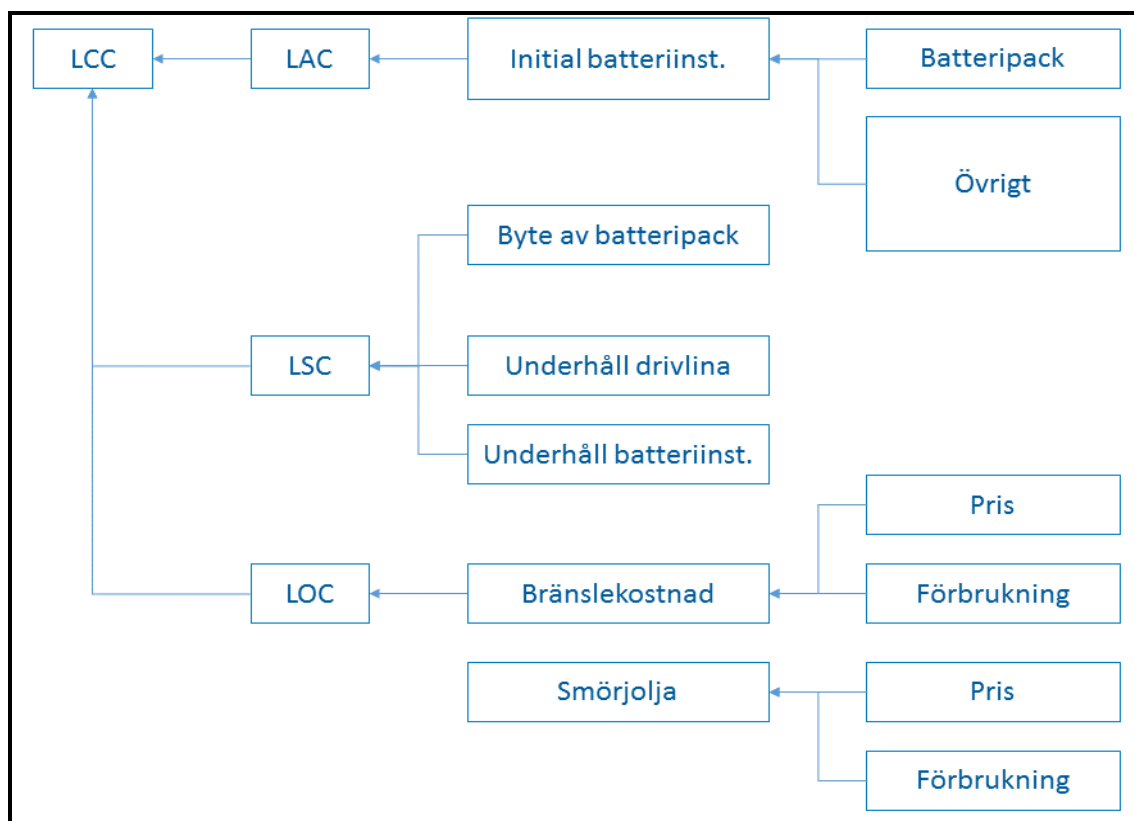
I detta avsnitt utvärderas livscykelkostnaden för batterihybridinstallationen på Atle-klass. Syftet med att utvärdera livscykelkostnaden är för att skapa en förståelse för hur de olika kostnadsposterna skiljer sig mellan olika alternativ, framtidsscenarier, med batteribank och utan, osv.

För att kunna göra det har en LCC-modell utvecklats. I följande avsnitt presenteras först beräkningsmodellen för livscykelkostnaden och slutligen resultatet från beräkning av livscykelkostnaden.

9.1 LCC-modell

LCC, *life cycle costs*, har brutits ned i anskaffningskostnader (LAC), driftskostnader (LOC) och underhållskostnader (LSC). Dessa kostnadskategorier har vidare brutits ned enligt Figur 17. I följande avsnitt beskrivs beräkningsmodellerna för dessa kostnadselement samt ingångsvärden. Den totala livscykelkostnaden beräknas enligt [2].

$$LCC = LAC + LSC + LOC \quad [2]$$



Figur 17. LCC-träd för batterihybridinstallation.

9.1.1 Anskaffningskostnader – LAC

LAC, *life acquisition costs*, avser anskaffningskostnaderna och beräknas som summan av kostnaden för batteripacken, K_{batt} , samt för de övriga initiala anskaffningskostnaderna för batterihybridinstallationen, $K_{övrigt}$, se ekvation [3].

$$LAC = K_{batt} + K_{övrigt} \quad [3]$$

I kapitel 6.1.3 definieras batteripack och i kapitel 7 presenteras kostnader för några olika batterikoncept för isbrytaren. I K_{batt} ingår således kostnaderna för batterierna, batteriövervakningssystemet, batteriladdare, BMS, osv.

De övriga kostnaderna, $K_{övrigt}$, avser här kostnader för design av batteriinstallationen, initiala kostnader för klassificeringssällskap, installation och integrering med övrig drivlina, kostnader för övriga erforderade kringsystem som kylning, ventilation och brandskydd, programmering och konfigureringsinformationssystem på bryggan. För en batterihybridinstallation av denna typ handlar det om uppskattningsvis om 8 – 12 MSEK.

9.1.2 Underhållskostnader – LSC

LSC, *life support costs*, beräknas som summan av det totala underhållet av drivlinan (både dieselmotorer och batterier) samt eventuella batteribytten, $K_{byte\ batt}$. De totala underhållskostnaderna beräknas genom att summera de årliga kostnaderna för underhållet av dieselmotorerna, $k_{UH\ mot}$, och batterierna, $k_{UH\ batt}$, för att sedan multiplicerat det antalet år som avser, $n_{år}$. Beräkning av LSC presenteras i ekvation [4].

$$LSC = n_{år} \cdot (k_{UH\ mot} \cdot r_{RH} + k_{UH\ batt}) + K_{byte\ batt} \quad [4]$$

$k_{UH\ batt}$ avser de årliga kostnaderna för det avhjälpande underhållet (när saker går sönder) för hela batterihybridinstallationen samt årlig tillsyn. Kostnaderna är i sammanhanget små och har erhållits från kontakt med leverantörer.

De årliga underhållskostnaderna för motorerna $k_{UH\ mot}$ har antagits minska proportionellt med reduktionen av antalet motortimmar, r_{RH} . I fallet utan batterierna är r_{RH} satt till 1.

$K_{byte\ batt}$ avser den totala kostnaden för eventuella bytet av batteribanken. Svårigheten i kostnadsbedömningen för denna kostnadspost ligger dels i svårigheten att bedöma livslängden på batterier men också

batteriprisutvecklingen på längre sikt. För enkelhetens skull har ett batteribyte antagits efter 10 år.

9.1.3 Driftkostnader – LOC

LOC, *life operational costs*, avser batterihybridinstallationens operationella kostnader och beräknas utifrån bränsleförbrukning för framdrivning, $K_{brän}$, bränsleförbrukning för kringssystem, $K_{KSbrän}$, och smörjolfjeförbrukning, K_{smol} , i enlighet med ekvation [5].

$$LOC = K_{brän} + K_{KSbrän} + K_{smol} \quad [5]$$

9.1.3.1 Bränsleförbrukning framdrivning

Beräkningen av $K_{brän}$ redovisas i ekvation [6].

$$K_{brän} = n_{år} \cdot k_{brän} \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{r_{brän}}{100}\right) \cdot \sum_{isvintrar} (f_{isv} \cdot br_{isv}) \quad [6]$$

Där $n_{år}$ representerar antalet år som beräkningen avser, $k_{brän}$ kostnaden för bränslet, ρ bränslets densitet och $r_{brän}$ reduktionen av bränsleförbrukning i procent. Variabeln f_{isv} motsvarar den procentuella fördelningen av isvintrar (lindrig, normal och svår) och br_{isv} den genomsnittliga bränsleförbrukningen per isvintrar. Bränslekostnader för MGO har inhämtats från rapporten *IB2020 DP 5: Val av bränsle* (SSPA DP5, 2017) och för tre olika framtidsscenarier avseende prisutveckling.

9.1.3.2 Bränsleförbrukning kringssystem

Beräkningen av $K_{KSbrän}$ redovisas i ekvation [7].

$$K_{brän} = n_{år} \cdot k_{brän} \cdot \left(\frac{120 \cdot 210}{\rho}\right) \cdot \left(1 - \frac{r_{RH}}{100}\right) \cdot \sum_{isvintrar} (f_{isv} \cdot t_{RH_{isv}}) \quad [7]$$

Där $n_{år}$ representerar antalet år som beräkningen avser, $k_{brän}$ kostnaden för bränslet och ρ bränslets densitet. 120 kW är effektförbrukningen för dieselmotorernas kringssystem och 210 g/kWh är hjälpmotorernas SFC, se kapitel 3.1.5. Variabeln f_{isv} motsvarar den procentuella fördelningen av

isvintrar (lindrig, normal och svår) och $t_{RH_{isv}}$ det genomsnittliga antalet motortimmar per isvinter. r_{RH} representerar minskningen av antalet motortimmar vid batterihybriddrift.

9.1.3.3 Smörjolförbrukning

Beräkningen av K_{smol} redovisas i ekvation [8].

$$K_{smol} = n_{år} \cdot k_{smol} \cdot SOC \cdot \left(1 - \frac{r_{RH}}{100}\right) \cdot \sum_{isvintrar} (f_{isv} \cdot t_{RH_{isv}}) \quad [8]$$

Där k_{smol} representerar kostnaden för smörjolja och SOC förbrukningen av smörjolja. Variabeln f_{isv} motsvarar den procentuella fördelningen av isvintrar (lindrig, normal och svår) och $t_{RH_{isv}}$ det genomsnittliga antalet motortimmar per isvinter. r_{RH} representerar minskningen av antalet motortimmar vid batterihybriddrift.

9.2 LCC för batteriinstallation på Atle-klassisbrytare

I detta kapitel redovisas livscykelkostnaden för en batterihybridinstallation på en Atle-klassisbrytare. Kostanden har beräknats med LCC-metoden, beskriven i kapitel 9.1, för en Atle-klass isbrytare med och utan batterihybridinstallation.

Båda alternativen, med och utan batteriinstallation, har utvärderats för tre olika framtidsscenarier. Scenarierna representerar olika framtidsförutsättningar för en batteriinstallation, jämfört med att inte välja det.

- Ofördelaktiga förutsättningar för batteriinstallationen, jämfört med att inte välja att tillföra en batteriinstallation.
- Normala förutsättningar för batteriinstallationen
- Fördelaktiga förutsättningar för batteriinstallationen, jämfört med att inte välja att tillföra en batteriinstallation.

Indata till LCC-beräkningen som inte framgår i kapitel 9, finns att hitta i övriga kapitel i rapporten. En komplett lista med samtliga indata till LCC-beräkningen finns sammanställd i Tabell 11. Tabellen innehåller också hänvisningar till var samtliga indata finns redovisade i rapporten.

9.2.1 Ingångsvärden och antaganden

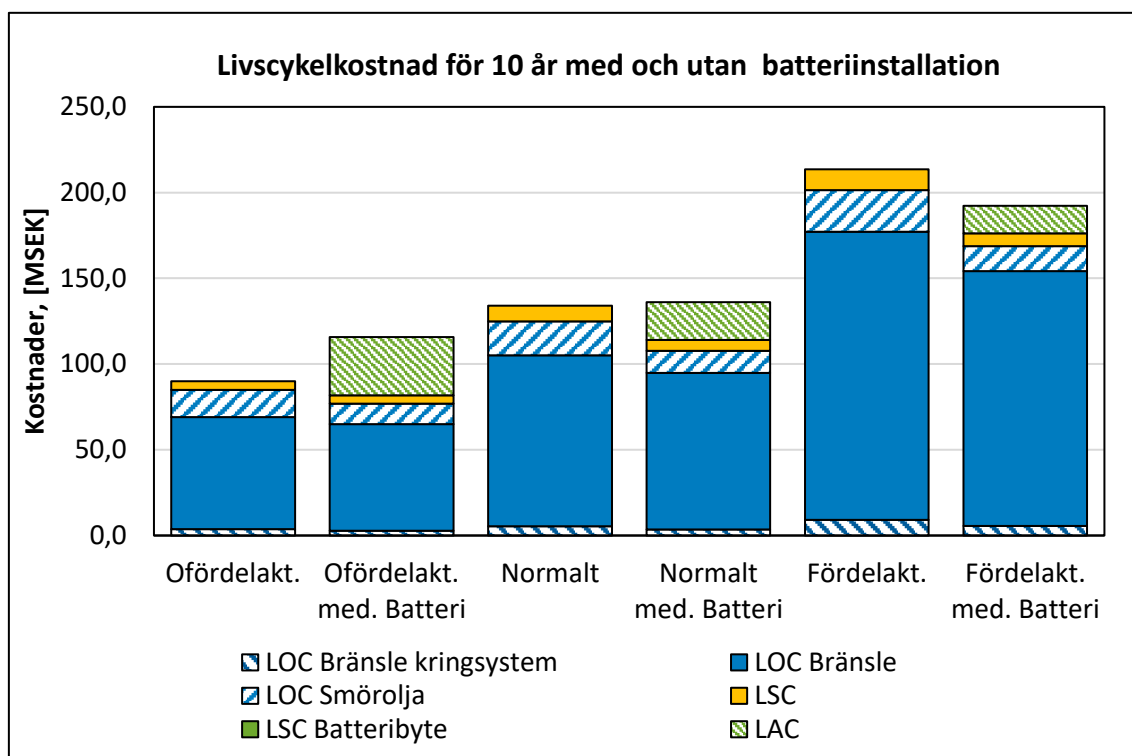
Tabell 11 redovisar samtliga indata som använts i LCC beräkningen.

Tabell 11. Sammanställning av indata för beräkning av livscykelkostanden.

	Parameter	Enhet	Atle-klass isbrytare utan batteribank			Atle-klass isbrytare med batteribank PHEV, Li-jon LFP, 2000 kWh, 3250 kW			Kom.
			Oförd.	Norm.	Förd.	Oförd.	Norm.	Förd.	
Generellt	Antal år, $n_{\text{år}}$	år	10	10	10	10	10	10	Se kap. 1.4
	Relativ förekomst isvinter, f_{isv}	%							Se kap. 3.1.1
	- Lindrig		40	30	20	40	30	20	
	- Normal		50	50	50	50	50	50	
	- Sträng		10	20	30	10	20	30	
LCA	Batteripack, K_{batt}	MSEK	0	0	0	22	16	10	Se kap. 7.1.1
	Övriga kostnader, $K_{\text{övrigt}}$	MSEK	0	0	0	12	8	6	Se kap. 9.1.1
LSC	Underhåll motorer, $k_{\text{UH mot}}$	MSEK/år	0.5	0.9	1.2	0.375	0.585	0.72	Se kap. 9.1.2
	Underhåll batteri, $k_{\text{UH batt}}$	MSEK/år	0	0	0	0.1	0.05	0.025	Se kap. 9.1.2
	Byte batteripack $K_{\text{byte batt}}$	MSEK	0	0	0	0	0	0	Efter 10 år, se 9.1.2
LOC	Bränsleförbrukning, genomsnittlig	m ³ /år	1750	2000	2250	1750	2000	2250	Se kap. 3.1.3
	Kostnad bränsle, $k_{\text{brän}}$	SEK/ton	4500	6000	9000	4500	6000	9000	Se kap. 10
	Densitet bränsle, ρ	ton/m ³	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	MGO
	Bränslebesparing, $r_{\text{brän}}$	%	0	0	0	4,0	6,5	8,5	Se kap. 8.3.1
	Kostnad smörjolja, k_{smol}	kSEK/m ³	50	55	60	50	55	60	Se kap. 2.4.1
	Förbrukning smörjolja, SOC	m ³ /RH	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	Se kap. 2.4.1
	Minskning av motortimmar, r_{RH}	%	0	0	0	25	35	40	Se kap. 8.3.2

9.2.2 Resultat

Resultatet av LCC beräkningen presenteras i Figur 18 och Tabell 12.



Figur 18. Grafisk sammanställning av resultatet från LCC-beräkningen, för isbrytare av Atle-klass, med- och utan batterihybridinstallation.

Tabell 12. Numerisk sammanställning av resultatet från LCC-beräkningen, för isbrytare av Atle-klass, med- och utan batterihybridinstallation.

	Atle-klass isbrytare			Atle-klass isbrytare med batterihybrid drift		
	Ofördelakt.	Normalt	Fördelakt.	Ofördelakt.	Normalt	Fördelakt.
LAC	0.0	0.0	0.0	34.0	24.0	16.0
LSC	5.0	9.0	12.0	4.8	6.4	7.5
LOC	84.9	125.0	201.5	76.9	107.7	168.3
LCC	89.9	134.0	213.5	115.7	138.0	191.8

10 Slutsatser och diskussion

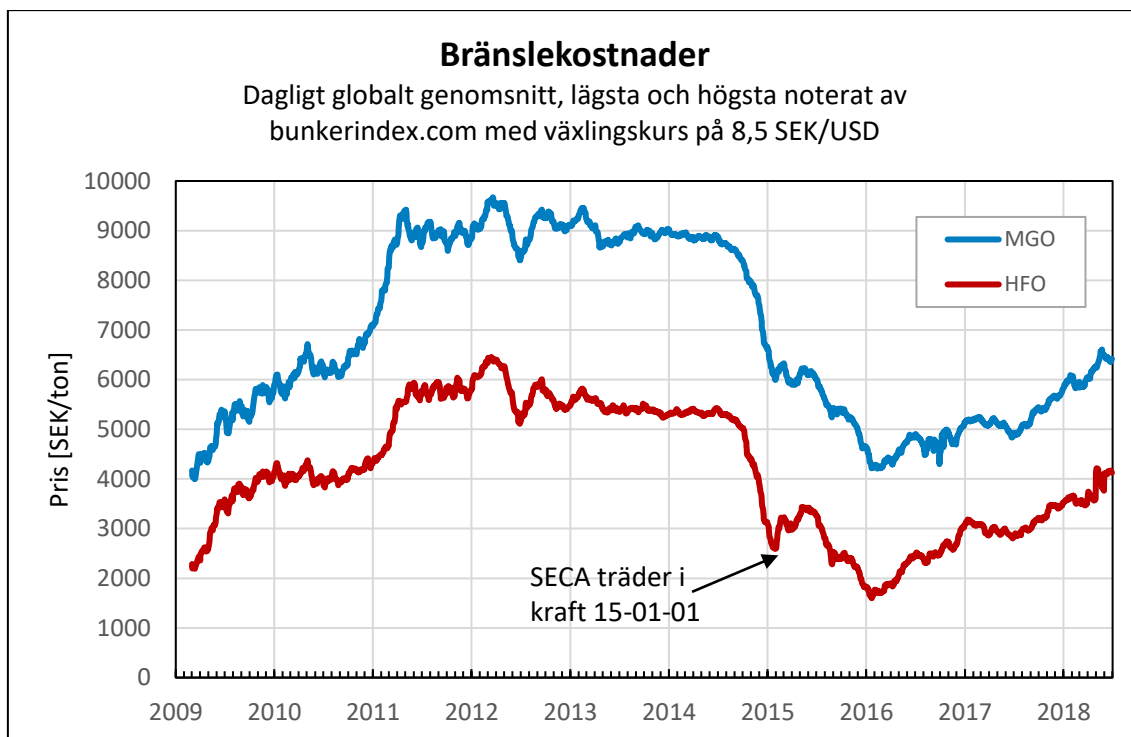
10.1 Sammanfattning

Trots att de operativa, miljömässiga och kostnadsmässiga fördelar som en batterihybridinstallation medför återbetalar den sig enbart i ett av de undersökta framtidsscenarierna. Genom att analysera resultatet av livscykelkostnaden kan följande slutsatser dras kring förutsättningarna för batterihybridinstallationens möjligheter att återbetala sig.

- Högre operativa kostnader – Dagens låga priser på drivmedel gör att ”gröna investeringar” har svårt att motiveras ekonomiskt.
- Högre bränslebesparing – En högre procentuell bränslebesparing ger en snabbare återbetalning av investeringen. I detta fall begränsas förbättringspotentialen av fartyget befintliga motorer, som redan är väl valda för isbrytarnas verksamhet. Deras karakteristik och verkningsgrad gör att det är svårt att räkna fram en större procentuell bränslebesparing med en batterihybriddrift.
- Längre säsong – Isbrytarna används i genomsnitt en tredjedel av året och i genomsnitt är huvudmaskineriet igång en tredjedel av den tiden. Det låga driftsuttaget resulterar i låga operativa kostnader och, med en given procentuell bränslebesparing, därmed även små operationella kostnadsbesparingar.
- Lägre batteripriser – Batteripriserna har under senare tid minskat till följd av utökad och effektiviserad produktion. Trots att trenden tyder på en fortsatt minskning är dagens anskaffningskostnader fortfarande för höga i relation till besparingarna i detta fall.
- Längre tidshorisont – Analys av livscykelkostnaden visar på en positiv återbetalningstrend, men tidshorisonten behöver vara längre än de 10 år som denna studie betraktar.

10.2 Osäkerheterna i resultatet

Kostnadsuppskattningarna för framtiden hör till de största osäkerheterna i studien. Några av de mest svårbedömda kostnadsposterna är dessutom de mest centrala i LCC-beräkningen. I synnerhet kostnader för drivmedel, se Figur 19, och batterier.



Figur 19. Bränslekostnader för MGO och HFO i kronor per ton från bunkerindex.com (Bunker Index, 2018) beräknat med en växlingskurs på 8,5 SEK/USD.

En annan, mindre, osäkerhet är batteriets potential att reducera bränsleförbrukningen och antalet motortimmar. Trots avancerade beräkningar och simuleringar, kommer batteriets förmåga i realiteten att bestämmas av en operatör (genom att välja hur många motorer som ska vara igång).

10.3 Outredda faktorer

10.3.1 Minskat slitage vid förbättrad belastning

I kapitel 2.4.3, *Minskat slitage*, förklaras det hur batterihybriddrift har en positiv inverkan på dieselmotorernas arbetsbelastning. I utredningen har det inte kunnat fastställas hur mycket den förbättrade arbetsbelastningen påverkar dieselmotorernas slitage. En eventuell minskning av underhållskostnaderna som resultat av detta har därför utelämnats vid beräkning av livscykelkostnaden.

Observera att detta inte ska förväxlas med minskning av underhållskostnaderna som resultat av det reducerade antalet motortimmar, se kapitel 9.1.2, *Underhållskostnader – LSC*.

10.3.2 Bränslebesparingar från eliminering av ojämn belastning

I utredningen har det funnits misstankar om att de mekaniska dieselmotorernas oscillerande reglerstång, från snabba lastvariationer, eller underdimensionerade turboaggregat, från snabba gaspådrag, skulle medföra en förhöjd bränsleförbrukning, se kapitel 2.4.2.2, *Jämnare belastning*. Samt, att den förhöjda bränsleförbrukningen inte kunna inte fångas upp av de vedertagna beräkningsmetoderna för att beräkna bränsleförbrukning, se ekvation [1] på sidan 11.

I arbetet har det inte kunnat hittas tillräcklig information om vilken inverkan batterihybriddrift skulle ha på dessa fenomen. Någon bränslebesparing som resultat av detta har därför inte inkluderats i beräkningen av livscykelkostnaden. Observera att detta inte ska förväxlas med bränslebesparing till följd av lastoptimering, se kapitel 2.4.2.1, *Optimal belastning*.

För att utreda detta fenomen behöver en noggrannare mätning av den aktuella motorkonfigurationen att göras, genom flöde av bränsle till dieselmotorerna, vridmoment på utgående axeltapp, rpm, set-värde, etc.

10.3.3 Längre tidshorisont för batterihybridframdrivningen

Initialt i projektet beslutades att LCC analysen skulle blicka 10 år framåt, med motiveringen att längre tidshorisont skulle ge allt för osäkra resultat.

Det är inte orimligt att anta att själva infrastrukturen för batterihybrid-installationen håller 20 - 30 år. Om LCC analysen istället genomförs med en tidshorisont på 20 år (med samma indata samt inkl. kostnader för batteribytten) så återbetalar sig också batterihybridinstallationen för det *normala* framtidsscenariet.

10.3.4 Mätdata endast från en lindrig isvinter

Den beräknade bränslebesparingen och reduktionen av motortimmar grundar sig på mätdata registrerad under de mildaste delarna av en lindrig isvinter (2015/2016), se (SSPA, 2017). Vilken inverkan detta har på resultatet (från simuleringarna av bränslebesparingen) har inte kunnat utredas.

Motsvarande mätdata från isvintern 2016/2017 har sammanställts men inte kunnat sorteras efter IB Frejs aktiviteter, då utdrag från IBNext inte har kunnat erhållas.

10.4 Miljövinster

I Trafikverkets författning *Analysmetoder och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn* (Trafikverket, 2016) (ASEK) anges direktiv för att kunna omsätta miljöutsläpp och miljöpåverkan till kostnader.

Det är inte ovanligt att sådana kostnadsposter inkluderas i budget- eller investeringskalkyler för att enklare kunna motivera miljövänlig teknik. Några sådana metoder har inte använts i detta arbete.

10.5 Övriga outredda frågeställningar

- Den exakta inkopplingen, arrangemang och fördelning av batterier i drivlinan, se kapitel 5.3, *Inkoppling av batterierna på drivlinan*.
- Vilken av Atle-klassisbrytarna som är mest lämplig att modifieras. De olika isbrytarna kan ha olika uppgifter (driftprofiler) och således vara olika lämpade för batterihybriddrift. Dieselmotorerna på IB Ymer har dessutom modifierats med common rail insprutning vilket kan ha en inverkan på potentialen att minska bränsleförbrukningen.

11 Referenser

- Berg, H. (2015). *Batteries for Electric Vehicles – Materials and Electrochemistry*. Cambridge: Cambridge University Press. doi:<https://doi.org/10.1017/CBO9781316090978>
- Bunker Index. (den 08 08 2018). Hämtat från <http://www.bunkerindex.com>:
<http://www.bunkerindex.com/prices/indices.php>
- Sjöfartsverket. (2017). *Driftprofil för IB2020*. Norrköping: Sjöfartsverket.
- Spårvagnen. (den 23 Maj 2017). *Historia*. Hämtat från Färjans vänner Marstrand:
<http://www.sparvagnen.com/historia.php>
- SSPA. (2017). *Sammanställning av driftdata*. Stockholm: SSPA Sweden AB.
- SSPA DP5. (2017). *IB2020 DP5: Val av bränsle*. SSPA RE20167949-08-00-A.
- SSPA DP6. (2017). *IB2020 DP6: Regler - övergripande samt klass*. Stockholm: SSPA Sweden AB.
- Trafikverket. (2016). *Analysmetoder och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn: ASEK 6.0*. Stockholm: Trafikverket.
- Wärtsilä. (den 31 05 2017). *Innovation*. Hämtat från www.wartsila.com:
<https://www.wartsila.com/twentyfour7/innovation/harvesting-power-for-a-fitful-lady>