



CHALMERS



Dimensionering och miljöutvärdering av elektrisk drivlina till färja

EENX15-21-01

Kandidatarbete inom Elkraftteknik

Taher Albaghjati, Klara Eliasson, Erik Johansson, Kristoffer Karlsson,
Emma Stenvall, Vilhelm Rosengren Svensson

INSTITUTIONEN FÖR ELEKTROTEKNIK

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2021

www.chalmers.se

Abstract

The development and implementation of electric propulsion systems in the maritime sector has not advanced as far as the automotive industry. At the same time more demands are being set to reduce the emissions of hazardous particles. To contribute to the expansion of electric ferries the aim of this study is to equip one large and one small ferry (for example Stena Danica and Älvsnabben) with a fully electric propulsion system. In order to dimension the systems for the ferries' the required power and energy consumption needed to be calculated. Based on the targeted requirements and estimated energy consumption the goal was to find an appropriate energy storage and components for the propulsion system, such as a motor and converter. In this study two different energy storage options were analysed, they were fuel cells and lithium-ion batteries. When the design of the propulsion system was finished, the final aim of the study was to determine if the system was reasonable to implement from an economic and an environmental point of view. This work is based on a literature study, a mechanic model and logged data of the two ferries' different trips.

The dimensioning of the two ferries' electric propulsion system was based on their current way of driving and in this study the system for the larger ferry was decided to last for 3.5 hours and the small one for 8 hours. This requirement resulted in a battery storage of 110 MWh for the larger ferry and 1.7 MWh for the smaller one. From this, the components of the propulsion system were decided to be two synchronous motors of 15 MW each for the large ferry, while the smaller ferry has two asynchronous motors of 350 kW each. The study indicates that a fully electric propulsion system is a favourable implementation on both ferries from an economic and an environmental point of view where the analysis was over a period of ten years. It was concluded that lithium-ion batteries were the most beneficial energy storage compared to fuel cells and conventional fossil fuel. For the large ferry, the change becomes profitable after 1-7 years, and for the small ferry after 2-21 years. The study compared the emissions from a conventional with an electrical propulsion system, where the electricity and battery production were compared to a combustion engine. The carbon dioxide emissions from the large ferry were reduced by 85 % and by 87 % for the small ferry. The nitrogen oxide emissions were reduced by 99 % for both ferries'. The sulphur dioxide emissions were calculated within a interval which resulted in that the emissions from the lower end of the interval could reduce by 63 % for the large ferry and by 71 % for the small ferry, while at the higher end of the interval the emissions from the large ferry could increase by 90 % and by 36 % for the small ferry.

Sammandrag

Utvecklingen och implementeringen av helelektriska drivlinor inom sjöfartssektorn har inte kommit lika långt som elbilsbranschen. Samtidigt ställs det på både internationell och regional nivå högre krav på fartyg för att minska utsläppen av hälso- och miljöfarliga ämnen. Så för att bidra till denna utveckling av helelektriska färjor är syftet med studien att dimensionera en helelektrisk drivlina till en större och en mindre färja (liknande Stena Danica och Älvsnabben). Detta utförs genom att beräkna färjornas effektbehov och energiförbrukning med avseende på drift. Utifrån dimensioneringskraven och energiförbrukningen var målet att finna lämpliga energilagringssystem och komponenter till drivlinorna såsom motorer samt omriktare. Energilagringssystemalternativen som undersöks i studien är bränsleceller och litiumjonbatterier. Efter att dimensioneringarna slutfördes var studiens slutliga syfte att avgöra om implementeringen var rimlig ur ett kostnads- och miljöperspektiv. Arbetet är baserat på en litteraturstudie, mekanisk modell och loggning av data från respektive färjas drift.

Färjorna dimensionerades utifrån deras nuvarande körsätt och kraven som sattes var att den större färjan skulle klara av en färd på 3,5 timmar och den mindre en på 8 timmar. Dessa krav ledde till ett batterilager på 110 MWh för den stora färjan och 1,7 MWh för den mindre. Dimensioneringen av den helelektriska drivlinan innebär att den större färjan får två synkronmotorer på 15 MW vardera medan den mindre får två asynkronmotorer på 350 kW vardera. I studien ses det vara lämpligt att tillämpa helelektrisk drift på båda färjorna från kostnads- och miljöperspektiven, där de två analysen utfördes under en tioårsperiod. Detta eftersom litiumjonbatterier visade sig vara det mest fördelaktiga energilagringssystemalternativet för båda färjorna jämfört med alternativet bränsleceller och konventionell fossilbränsle drift. Konverteringen till elektrisk drivlina för en stora färjan anses bli lönsam efter 1-7 år, och den lilla efter 2-21 år. I studien utförs en miljöanalys där konventionell och helelektrisk drift jämförs, där utsläppen från el- och batteriproduktion ställs gentemot utsläppen från en förbränningsmotor. Med helelektrisk drift minskar koldioxidutsläppen för den stora färjan med 85 % och med 87 % för den lilla färjan. Medans kväveoxidutsläppen minskar med 99 % för båda färjorna. Svaveloxidutsläppen beräknades inom ett intervall, vars nedre del resulterade i att utsläppen minskar med 63 % för den stora färjan och 71 % för den lilla färjan, medan den andra sidan av intervallet ger en ökning av 90 % för den stora färjan och 36 % för den lilla färjan.

Förord

Författarna vill rikta ett stort tack till vår handledare Emma Grunditz för all vägledning genom projektets gång. Utan ditt stöd, engagemang och välvilja till oss och projektet hade genomförandet av studien blivit mycket svårare.

Vi vill också tacka Arash Eslamdoosh på Chalmers som bidragit med väsentlig Matlab-kod för beräkning av adderat vågmotstånd. Författarna vill även tacka Per Wimby på Stena Line som bidragit med information angående färjorna, Anders Nordelöf på Chalmers för information angående batteriers miljöpåverkan, Hans Berglund från ABB för intervjun och information angående drivlinans komponenter. Även ytterligare kontaktpersoner som bidragit till att projektet blev så omfattande som möjligt.

Innehåll

1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	2
1.3 Frågeställningar	2
1.4 Avgränsningar	2
2 Teoretisk Bakgrund	4
2.1 Drivlinor i fartyg	4
2.1.1 Konventionell drivlina	4
2.1.2 Elektrisk drivlina	5
2.2 Helelektriska drivlinans omriktare	6
2.3 Energilager	7
2.4 Miljöpåverkan från fartyg	8
2.4.1 Utsläpp och dess effekter	8
2.4.2 Regelverk kring luftföroreningar	8
2.5 Beräkning av krafter på fartyg	9
2.5.1 Motståndsestimering med Holtrop & Mennens metod	9
2.5.2 Adderat vågmotstånd	10
2.5.3 Luftmotstånd	10
2.5.4 Acceleration	10
2.6 Energiförbrukning och maximal motoreffekt under drift	11
3 Metod	13

3.1	Dimensionering av elektrisk drivlina	13
3.1.1	Fakta om färjorna	13
3.1.2	Väderförhållanden i Kattegatt	13
3.1.3	Väderförhållanden i Göta älv	14
3.1.4	Ruttloggning	14
3.1.5	Typ av elektrifiering	14
3.1.6	Estimering av hydrodynamiskt motstånd	14
3.1.7	Energilagers livslängd	15
3.1.8	Dimensionering av energilagring	15
3.1.9	Dimensionering av motoreffekt	17
3.1.10	Laddningseffekt	17
3.2	Beräkning av kostnad	17
3.3	Beräkning av utsläpp	19
3.3.1	Konventionell drivlina	21
3.3.2	Helelektrisk drivlina	22
3.4	Hantering av etiska frågor	23
4	Genomförande och resultat	24
4.1	Dimensionering av elektrisk drivlina	24
4.1.1	Fakta om färjorna	25
4.1.2	Driftkrav	27
4.1.3	Motstånd som funktion av hastighet	27
4.1.4	Loggad drift	33
4.1.5	Effekt och energiförbrukning till följd av loggad data	34

4.2	Dimensionering av energilagringssystem, motor och omriktare	41
4.3	Kostnadsestimering	44
4.4	Val av komponenttyper och energilagring	51
4.4.1	Batteriuppsättning	51
4.4.2	Laddningseffekt	51
4.5	Beräkning av utsläpp	52
4.5.1	Konventionell drivlina	52
4.5.2	Helelektrisk drivlina	56
4.5.3	Jämförelse av konventionell och helelektrisk drivlina	58
4.6	Etiska frågor	62
5	Diskussion	63
5.1	Rimlighetsbedömning av dynamisk modell	63
5.2	Resultat från dynamisk modell	63
5.3	Dimensionering	64
5.4	Kostnad	65
5.5	Miljö	66
5.6	Etik	67
5.7	Framtida arbete	67
6	Slutsats	68
	Referenser	70
	Bilagor	77

1 Inledning

År 2015 etablerades Parisavtalet vars ändamål är att den globala medeltemperaturen inte ska öka med mer än 1.5 °C jämfört med medeltemperaturen innan industrialiseringen [1]. Strax efter Parisavtalet gick igenom satte Sverige upp egna klimatmål som innebär att landet ska vara klimatneutralt år 2045 [1], dvs. inte bidra med några nettoutsläpp. Med den målsättningen måste det ske en förändring inom bland annat transportsektorn som i nuläget står för nästintill en tredjedel av landets totala växthusgasutsläpp [2]. I och med kraven som ställs på internationell och regional nivå påbörjas arbetet mot en fossilfri transportsektor.

1.1 Bakgrund

Utvecklingen och dimensioneringen av elektriska drivlinor inom vägtransporten har skett under en längre tid i jämförelse med sjötrafiken. Däremot har intresset hos företag för helelektriska sjöfartyg ökat vilket innebär att området fått mer utvecklingsmöjligheter. Det har under det senaste decenniet satts flertalet elektriska färjor i drift i bland annat Sverige, Norge och Danmark. Världens första helelektriska bil- och personfärja vid namn Ampere driftsattes i Norge år 2015, utrustad med litiumjonbatterier med en total kapacitet på 1 MWh [3]. Senare vid år 2019 blev den danska färjan Ellen den största elektriska färjan i världen, också utrustad med litiumjonbatterier med en total kapacitet på 4.3 MWh [4]. I Sverige är de två största eldrivna färjorna i nuläget Aurora och Tycho Brahe, som färdas mellan Helsingborg och Helsingör på 20 minuter med en total energikapacitet på 4.16 MWh vardera [5]. Med tanke på de klimatmål som ska uppnås och behovet av utveckling mot helelektrifierade sjöfordon ska denna studie undersöka möjligheten att dimensionera en elektrisk drivlina till en större och mindre färja (liknande Stena Danica och Älvsnabben) samt analysera deras klimatpåverkan.

Stena Line och Västtrafik har redan inlett arbetet för att minska sina klimatavtryck. Företaget Stena Line kommer att i tre steg elektrifiera färjan Stena Jutlandica, som färdas samma sträcka som Stena Danica, nämligen Göteborg - Fredrikshamn [6]. Just nu befinner de sig i det första stadiet som innebär att förse färjan med eldrivna bogpropellrar som används inom hamnområden. Västtrafik, företaget som Älvsnabben körs via, har installerat batteridrift på en av deras färjor vid namn Elvy som färdas mellan Lindholmen och Stenpiren [7]. Båda företagen gör alltså ansatser mot en framtid inom elektrifierade färjor, vilket sammanfaller med studiens slutliga syfte som är att tillämpa en elektrisk drivlina med lämpligt energilager och undersöka om det är rimligt ut en ekonomisk och miljömässig aspekt.

1.2 Syfte

Projektets syfte är att tillämpa en helelektrisk drivlina på en större och mindre färja (liknande Stena Danica och Älvsnabben). Studien fokuserar framförallt på att beräkna färjornas effektbehov och energiförbrukning som funktion av drift vid olika väderförhållanden i syftet att kunna utföra dimensioneringen av elmotorer samt olika energilagringssalternativ. Studien avser dessutom att finna lämpliga komponenter till drivlinorna. Det slutliga målet med studien är att ur ett kostnads- och miljöperspektiv, där konventionell drift ställs mot elektrisk drift med olika energilagringssalternativ, undersöka och ta ställning till om det är rimligt att helelektrifiera den stora och lilla färjan.

1.3 Frågeställningar

Frågeställningar som kommer att besvaras i rapporten är:

- Hur ser effekt- och energibehovet för den stora och lilla färja (liknande Stena Danica och Älvsnabben) ut idag med avseende på drift?
- Vilken typ av komponenter samt storlekar är lämpliga i en elektrisk drivlina för den stora och lilla färjan?
- Hur stor är energiförbrukningen för den stora och lilla färjan med helelektrisk drivlina jämfört med konventionella drivlina?
- Hur stora är emissionerna från den stora och lilla färjan med helelektrisk drivlina jämfört med konventionell drivlina då endast drivlinorna byts ut?
- Hur stora blir kostnaden för energilager samt förbrukad elenergi jämfört med kostnaden för förbrukat fossilt bränsle för den stora och lilla färjan med konventionell samt helelektrisk drivlina då endast drivlinorna byts ut?

1.4 Avgränsningar

Detta kandidatarbete har begränsade resurser i form av antal arbetstimmar och kompetenser. Därav följer nedan ett antal avgränsningar för att begränsa projektets omfattning. Studien utgår ifrån att fartygen fortsätter köras på samma sätt som idag med avseende på avgångar och hastigheter. Projektet avser att göra rimliga antaganden som grundar sig i matematiska modeller och litteratur. Detta för att minska projektets komplexitet i förhållande till projektets resurser. Projektet avser inte att:

- designa eller konstruera en färja i sin helhet utan avser endast att dimensionera en elektrisk drivlinan med elektrisk motor, omriktare och energilagring av komponenter som finns på marknaden idag till en större och mindre färja baserat på färjornas konstruktion i nuläget.
- positionera komponenterna för den elektriska drivlinan på respektive färja utan endast utföra dimensioneringen med avseende på färjornas nuvarande förutsättningar.
- genomföra en fullständig livscykelanalys (LCA) eftersom det är alltför omfattande för att kunna utföras med projektets resurser.
- designa hur fartygen manövreras utan studien utgår ifrån färjornas nuvarande utrustning för manövrering t.ex. roder och bogrpropellrar.
- designa hjälp- eller säkerhetssystem till energilagringssystemet såsom övervakningssystem eller värme-/kylsystem till dessa komponenter eftersom dessa kommer bero på många olika faktorer som klimat och typ av energilagring vilket ökar komplexiteten i projektet.
- behandla andra energilagringssystem än batterier och bränsleceller i studien på grund av att batterier är en mogen teknik och bränsleceller har blivit populärt bland kunder som vill fortsätta sin drift så som den ser ut idag.
- dimensionera batteriet mot strömförsörjningen av båtens bekvämlighet-/hjälpssystem. Projektgruppen kan komma att betrakta dessa som en samlad och förenklad last av alla systemen.
- behandla laddningsinfrastruktur, då det skulle göra projektet för omfattande. Projektet antar att laddningsinfrastruktur inrättas av en energiproducent.

2 Teoretisk Bakgrund

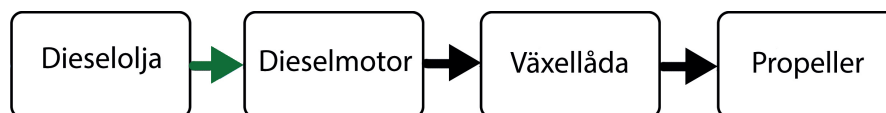
I detta avsnitt behandlas de underliggande teoretiska resonemang som studien grundas i. Avsnittet avser att tillhandahålla läsaren en förståelse för studiens vidare resonemang. Först presenteras konceptet av en konventionell drivlina, följt av information gällande elektrisk drivlina och tillhörande komponenter. Sedan introduceras sjöfartens inverkan på miljön med relevanta emissionstyper. Här presenteras även ett avsnitt om olika krafter som påverkar fartyg samt nödvändiga ekvationer för att beräkna energiförbrukning och maximal motoreffekt under drift.

2.1 Drivlinor i fartyg

En drivlina är de komponenter som krävs för att ett fordon ska kunna drivas framåt. Grundkomponenter som ingår i drivlinor för fartyg är motorer, propellrar, axlar, växellådor m.m. Beroende på fartygets konstruktion, storlek och kravspecifikation krävs olika konfigurationer av olika typer av komponenter.

2.1.1 Konventionell drivlina

En konventionell drivlina till fartyg har under de senaste hundra åren bestått av en eller flera dieselmotorer och många olika mekaniska delar såsom axlar, växellådor och propellrar [8], se Figur 1 för en överblick.

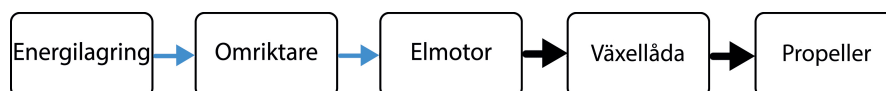


Figur 1: En sammanfattning av komponenterna som en dieseldrivlina för fartyg består av. Svarta pilar avser mekaniska anslutningar och den gröna symboliserar ett flöde av dieselolja.

Dieselmotorn är en förbränningsmotor som förbränner diesel- eller tjockolja för att vrida en axel som förbinder motorn med en växellåda. Växellådan används för att få propellern att rotera snabbare eller långsammare än motorn. Att få motorn att rotera snabbare eller långsammare istället för att använda en växellåda är inte ett fördelaktigt alternativ eftersom förbränningsmotorer har en arbetspunkt som ger bäst verkningsgrad. Om man avviker mycket från den minskar drastiskt dess, och därmed hela systemets, verkningsgrad. Att just dieselmotorer har varit och är den främst förekommande motorn inom sektorn är för att de är mer bränsleeffektiva än andra förbränningsmotorer samt att de utvecklar högt vridmoment även vid låga varvtal [9].

2.1.2 Elektrisk drivlina

En elektrisk drivlina på ett fartyg består bland annat av komponenter som ses i Figur 2. Utgångspunkten för att driva en helelektrifierad färja är energilagret. Från lagret leds likström till en omriktare som omvandlar den till växelström med rätt frekvens och amplitud för elmotorn. Motorerna som används är antingen synkron- eller asynkronmotorer beroende på fartygets effektbehov. Motorn är kopplad till en växellåda, via en axel, som leder till propellern som slutligen gör att fartyget kan drivas framåt.



Figur 2: Överblick av komponenterna som en helelektrisk drivlina för fartyg består av. Blå kopplingar avser elektrisk anslutning medan svart avser mekanisk.

På 1980-talet öppnade framstegen inom halvledarkomponenter upp för nya sätt att styra hastigheten hos elmotorer med hjälp av kraftelektronik [8]. Detta bidrog kraftigt till att popularisera elmotorer inom vissa delar av sjöfarten eftersom frekvensstyrning med hjälp av elektronik innebär att man kunde använda sig av en dielelektrisk lösning. Detta är fördelaktigt eftersom elmotorer har ett mycket högre spann på varvtal som ger högre verkningsgrad än dieselmotorer. Om mindre energi behövs till framdrivning kan någon av dieselgeneratorerna stängas av istället för att ha en större dieselgenerator vars varvtal måste reduceras alternativt använda en växellåda som sänker verkningsgraden. Denna typ av lösning blev populär inom delar av sjöfart där man har kraftigt varierande effektbehov eller stora ”hotellaster”, alltså stora effektbehov till följd av annat än fartygets framdrivning.

Även om elmotorer alltså började bli mer populära inom sjöfart var det givetvis inte möjligt att helt frångå dieseldrift och endast nyttja eldrift. Anledningen till detta var att det då som nu inte fanns något sätt att lagra elektrisk energi som är i närheten lika energitätt som diesel. Dieselolja är fortfarande nästan 40 gånger mer energitätt än litiumjonbatterier [10].

En elmotor består av en stator som inte rör sig och en rotor som roterar. Inom elmotorbranschen finns det olika typer av motorer, bl.a. synkron- och asynkronmotorer vilka är de två typerna som används för framdrivning av fartyg. En synkronmotor roterar med det synkrona varvtalet hos spänningen som induceras i motorn medan en asynkronmotor roterar med en något lägre hastighet än spänningen. Synkronmotorn har en mer komplicerad och därmed dyrare rotor. För det högre priset får man en motor som har mindre förluster och därmed en högre verkningsgrad vilket det är den huvudsakliga anledningen till att man väljer synkrona motorer. Det innebär att den kostsamma grundinvesteringen kan bli lönsam i längden eftersom den högre verkningsgraden innebär mindre utgifter vid drift [11]. Värt att nämna är också att en motor som är byggd för att utveckla en viss effekt kommer att vara något större om den är synkron istället för asynkron. När det kommer till sjöfart har det varit effektbehovet som avgjort valet av motortyp. För effektbehov

under 5 MW har asynkronmotorer dominerat medans synkronmotorer varit vanligast för fartyg med större effektbehov [8]. En annan intressant sak med synkronmotorer är att man kan reglera motorns effektfaktor och på så vis avgöra om motorn blir en induktiv eller kapacitiv last för båtens elsystem. Detta är fördelaktigt på ett fartyg där många små asynkronmotorer används för t.ex hissar eftersom dessa producerar reaktiv effekt som kan kompenseras bort med en synkronmotor.

På 1990-talet introducerade företaget ABB en teknologi som heter Azipod. Många andra tillverkare tog efter denna teknik och började producera ”podded thrusters”. Vilket innebär att elmotorn sitter i en metallhållare som sitter utanför skeppets skrov med propellern kopplad direkt till motorn istället för att motorn sitter inne i båten och är sammankopplad med propellern via en växellåda och drivaxlar [8]. Denna innovation har kommit att bli industristandard inom isbrytar- och kryssningssegmenten eftersom den innebär bättre isbrytaregenskaper och högre verkningsgrad för drivlinan. Dessutom behöver man inte roder eftersom propellern kan rotera 360 grader. För denna typ av motorlösning används asynkronmotorer.

2.2 Helelektriska drivlinans omriktare

Omriktaren i en elektrisk drivlina kan ha flertalet olika funktioner. Om fartyget använder sig av generatorer brukar första omriktarsteget vara en transformator som sänker spänningens amplitud närmare till det värdet som motorn behöver och därefter likriktas spänningen oftast med dioder. Sist används kraftelektronik för att växelrikta spänning igen så att motorn matas med rätt spänningsamplitud och frekvens [12].

I en helt elektrisk drivlina är spänningen från energilagringen redan en likspänning vilket innebär att transformatorsteget och likriktarsteget inte behövs. Då kvarstår endast omriktarsteget där man med hjälp av kraftelektronik växelrikta strömmen så att den får rätt frekvens och amplitud för motorn. [13]. Det är vanligt att man använder Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs) när man bygger omriktare som ska klara av att omrikta höga spänningar och strömmar men ibland används istället olika typer av tyristorer. Dessa typer av halvledarkomponenter finns tillgängliga för spänningar och strömmar uppemot flera kV och kA [14].

För helelektriska fartyg kan det vara praktiskt att ha ett elnät ombord som använder sig av likspänning istället för växelspanning [8]. Ett sådant system öppnar upp för att styra varje elkonsument ombord självständigt vilket skulle leda till energibesparningar. För ett sådant elnät är en systemspänning på 1 kV DC väldigt vanligt och alla komponenter som behöver drivas med växelspanning utrustas med sina egna omriktare. På så vis sparar man plats som går åt till ett större styrsystem i ett AC-system och man sparar också energi när man kan reglera alla växelströmsförbrukare i systemet enskilt [15].

2.3 Energilager

En av de vanligaste energilagringstyperna är batterier, vilket det finns många olika sorter av. De mest förekommande batterityperna på dagens marknad är natriumsvavel, litiumjon, bly-syra och flödesbatterier. De olika batterityperna har olika tillämpningsområden och egenskaper som innebär att vissa är mer lämpliga inom elektrisk fordons- eller fartygsdrift än andra. När det kommer till de olika batterityperna har natriumsvavelbatterier hög energidensitet och verkningsgrad samtidigt som de klarar av tusentals laddningscykler, vilket resulterar i lång livslängd [16]. Dock kräver denna batterityp höga driftstemperaturer vilket gör att de lämpar sig för tillämpningar som lastutjämning i elnät där storlek och temperatur inte utgör ett problem. Litiumjonbatterier har också väldigt hög energidensitet samt verkningsgrad, på över 90 % [16]. Denna batterityp har blivit dominerande inom fordonsindustrin på grund av den höga energi- och effekttätheten jämfört med de andra batteriteknikerna [17]. Nackdelen ligger än så länge i teknikens kostnad som fortfarande anses dyr i förhållande till de andra batterityperna. Bly-syra batterier har låg energidensitet men är däremot ett av de billigaste alternativen bland batterityperna [16]. De klarar dock bara ett par hundratal laddningscykler och har därför använts i elnätssammanhang för kraftförsörjning i teleanläggningar och nätstationer. Flödesbatterier har långa livslängder men har dock låg energidensitet [18]. Som följd lämpar de sig inte för användning i fartyg på grund av batteriteknikens storlek.

En annan omtalad energilagringmetod är bränsleceller, som får sin energi med hjälp av vätgas och syre. Bränsleceller omvandlar den kemiska energin från vätgas till elektricitet och värme där vatten är den enda restprodukten. Utöver vatten bildas överskottsvärme som kan användas till uppvärmning i systemet, till skillnad från vid batteridrift där avsevärt mycket mindre värmeförluster skapas. Dagens bränslecellsbilar har en verkningsgrad på cirka 50 % vilket gör dem mer effektiva än bensin- eller diesel- motorer men mindre energieffektiva än batteridrivna [19]. Bränslecellsteknikens konkurrens med batteritekniken härstammar från att bränsleceller kan fylla på vätgastanken på endast några minuter, precis som dagens förbränningsmotorer. Med andra ord behöver inte användarna anpassa sig till längre laddningstider.

Nedan följer en tabell med bland annat verkningsgrad och kostnader för de olika batterityperna, för att enklare kunna jämföra dem med varandra. Effektkostnaden är här uttryckt i Euro per kilowatt (€/kW) medans energikostnaden är i Euro per kilowattimme (€/kWh). Även bränsleceller har inkluderats i denna tabell för att ställa det i kontrast till batterierna.

Tabell 1: Tabell över de olika batteritypernas och bränslecellers verkningsgrader, energidensitet, energi- och effektkostnad enligt [20].

Batterityp	Verkningsgrad [%]	Energi-densitet [Wh/kg]	Energi-kostnad [€/kWh]	Effekt-kostnad [€/kW]
Natriumsvavel	85-90	150-240	200-900	700-2000
Litiumjon	85-100	75-250	200-1800	700-3000
Bly-syra	60-95	30-50	50-300	200-650
Flödesbatteri	70-85	60-80	100-1000	500-2500
Bränsleceller	20-50	80-104	1-150	550-1600

2.4 Miljöpåverkan från fartyg

Vid fordon och fartygsdrift är det viktigt att vara medveten om de utsläppen som konventionell drift leder till och vilka konsekvenser som blir till följd av verksamheten. Man måste också vara medveten om globala och lokala regler eller lagar så att dessa inte bryts under driftens gång. Därmed följer en kort presentation av utsläpp och regelverk som är relevanta för drift av färjor i Göta älv och sträckan mellan Göteborg och Fredrikshamn.

2.4.1 Utsläpp och dess effekter

De huvudsakliga utsläppen från transportsektorn är koldioxid, kväveoxider och svaveloxider. CO₂ (koldioxid) bidrar till den globala uppvärmningen. Dessa temperaturhöjningar leder till konsekvenser världen över såsom stigande havsnivåer, torra och allmänpåverkade ekosystem [21]. NO_x (kväveoxider) består av två olika sammansättningar, dvs. kväveoxid och kvävedioxid, vilka leder till eutrofiering, annars känt som övergödning av vatten, och kan även leda till irriterade luftvägar hos människor [22]. En konsekvens av övergödning är algblooming i sjöar, som slutligen leder till syrebrist i vattnet [23]. SO_x (svaveloxider) är en sammanställning av olika varianter av svavel och syre. Svaveloxidutsläpp leder bland annat till försurning av vattenområden och mark [24]. I förlängningen kan försurningen leda till att ekosystem hamnar ur balans. Det kan i värsta fall leda till att vattenlevande djur påverkas så pass mycket av förändringarna i deras ekosystem så att deras livsmiljö tillslut blir obebodig [23].

2.4.2 Regelverk kring luftföroreningar

För att reglera sjöfartens utsläpp finns det internationella krav som fastställs av International Maritime Organization (IMO). Organisationens uppgift är att skapa regler för sjötransporten över hela världen rörande bland annat utsläpp och säkerhet [25]. För svavelutsläpp gäller att fartyg ska använda ett bränsle med en mängd svavel som är 0.5 % eller lägre av drivmedlets totala vikt [26]. Kväveoxidhalten regleras i tre olika nivåer, tier 1, 2 och 3, med avseende på året fartyget

byggdes och inkluderar dessutom fallen då motorn bytts ut [26]. Det finns vattenområden som ställer striktare krav på utsläppen av svavel och kväveoxider, så kallade Emission Control Areas (ECA). Dessa krav gäller på emissioner av bl.a. svavel- och kväveoxider för att minska utsläpp av miljö- och hälsofarliga partiklar [26]. Sulphur Emission Control Areas (SECA) innefattar bland annat två svenska vattenområden som är Nordsjön och Östersjön [27]. I nuläget är den största svavelhalten som får förekomma i drivmedlet av ett sjöfartyg inom SECA 0.1 % av drivmedlets totala vikt [28].

2.5 Beräkning av krafter på fartyg

Ett fartyg påverkas under drift av ett antal olika krafter. Dessa krafter delas vanligen upp i hydrodynamiskt motstånd från vattnet, luftmotstånd och kraften som krävs för att färjan ska accelerera. Motståndet från vattnet beror på många olika faktorer såsom skrovparametrar, hastighet, vågor m.m. Vanligtvis utförs dessa beräkningar med hjälp av beräkningsströmningsdynamik, eller på engelska Computational Fluid Dynamics (CFD), vilket kräver 3D-modeller av färjornas skrov. Dessa simulationer tar lång tid att köra även med stor beräkningskraft och hade behövt köras flera gånger för att simulera olika förhållanden och olika hastigheter. Ett alternativ till beräkningsströmningsdynamik är empiriska metoder som ofta bygger på regressionsanalyser. De kräver generellt mindre beräkningskraft och mindre information om skrovets utformning men på bekostnad av resultatets noggrannhet. En av dessa är Holtrop & Mennens metod.

2.5.1 Motståndsestimering med Holtrop & Mennens metod

Holtrop & Mennens metod är en vedertagen modell [29] originellt skriven år 1978 av J. Holtrop och G.G.J Mennen för projektering av motstånd hos deplacerande och halvdeplacerande fartyg [30]. Metoden är empirisk och använder sig utav ett fåtal parametrar baserade på fartygets dimensioner samt skrovutformning. Holtrop & Mennens metod lämpar sig därför väl för denna typ av arbete där informationstillgången är begränsad. Metoden bygger på regressionsanalys vilket innebär att fartygets parametrar behöver överlappa med de parametrar som återfinns hos de fartygsmodeller som ingått i regressionsanalysen. Modellen projekterar fartygets provtursmotstånd vilket förutsätter förhållandena ingen vind, inget svall eller vågor, att vattnet är djupt samt att skrovet är helt och fritt från beväxning.

En guide som beskriver hur man använder metoden återfinns i bilaga A. Där återfinns även metodens begränsningsintervall för olika parametrar. Felmarginalen som man typiskt ser med Holtrop & Mennens metod ligger runt 1 %-16 % för låga så kallade Froude-tal [31] förutsatt att man håller sig inom begränsningsintervallen. Felmarginalen kan öka upp till 70 % när Froude-talet närmar sig begränsningsintervallets övre gräns och tenderar även att bli större med nyare fartyg eftersom fartygen som testades och användes i regressionsmodellen är från eran när metoden utarbetades av författarna.

2.5.2 Adderat vågmotstånd

Adderat vågmotstånd är det motstånd som uppstår på grund av naturliga vågor som förekommer i havet. Detta motstånd varierar kraftigt med vågornas storlek och också med vågornas angreppsvinkel. Vågmotståndet är som störst när våglängden är ungefär lika lång som fartyget och beror på våghöjden i kvadrat [32]. Eftersom det alltid förkommer vågor i olika grad till sjöss är det ett viktigt motstånd att inkludera i motståndsestimeringar. Detta gör vanligtvis med beräkningsströmningsdynamik eller med hydrodynamiska modelltester.

2.5.3 Luftmotstånd

Ett av antagandena i Holtrop & Mennens metod är att seglatsen är fri från vind. För att kompensera för detta kan luftmotstånd adderas. Motståndet beror på färjans relativa hastighet till vinden och beror också på vindens angreppsvinkel. Luftmotståndet beräknas enligt

$$F_{luft} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{luft} \cdot A \cdot C_d \cdot (V_{fartyg} + V_{vind})^2 \quad (1)$$

där ρ_{luft} [kg/m³] är luftens densitet, C_d [-] är motståndskoefficienten, A [m²] är färjans area över vattnet vilket varierar med angreppsvinkeln. Färjans hastighet relativt vinden beskrivs av $V_{fartyg} + V_{vind}$ [m/s] och kan generellt skrivas med vektorer för att beskriva vindens angreppsvinkel.

2.5.4 Acceleration

Färjans acceleration, a [m/s²], kan beräknas med hjälp av centralmetoden och dess hastighet som funktion av tid enligt:

$$a = \frac{V_{fartyg}(n+1) - V_{fartyg}(n-1)}{t(n+1) - t(n-1)} \quad (2)$$

där t [s] är fortlöpt tid och n är tidpunktens index.

Kraften som färjan behöver generera för att accelerera med den framräknade accelerationen beräknas med hjälp av Newtons andra lag enligt

$$F_{acc} = ma \quad (3)$$

där m är fartygets massa i [kg].

2.6 Energiförbrukning och maximal motoreffekt under drift

Med hjälp av de uppskattade motstånden som funktion av färjans hastighet under olika loggade seglatser har respektive färjas effekt för framdrivning under färd uppskattats. Den största uppskattade effekten under respektive färjas loggade färder kan sedan användas för att dimensionera den maximala motoreffekten. För att uppskatta energiförbrukningen som konsekvens av framdrivningen kan effektkurvan integreras. Den negativa effekt som uppstår till följd av negativ acceleration när fartygen saktar ned kan antas absorberas av vattnet och kan alltså inte återgenereras.

Fartygets bruttoeffekt

Bruttoeffekten är den effekt som propellern behöver generera för att driva fartyget framåt vid varje given tidpunkt i hastighetsloggningen. Motstånden summeras i varje mätpunkt och multipliceras med hastigheten för att få fartygets effektbehov vid varje tidpunkt enligt

$$P_b = \sum F \cdot V_{fartyg} \quad (4)$$

där F [N] är den dynamiska modellens olika motståndskomponenter i varje tidssteg och V_{fartyg} [m/s] är den loggade fartygshastigheten vid tidpunkten.

Beräkning av motoreffekt

Motoreffekten är den effekten som motorn levererar på utgående axel. Det är alltså bruttoeffekten dividerad med de verkningsgrader som återfinns hos komponenter som är belägna mellan motorn och vattnet, så som propeller, växellådor, drivknutar, etcetera.

Verkningsgraden är sällan ett fixt värde utan kan bero på t.ex varvtal eller belastning. Propellerns verkningsgrad beror på komplexa flödesdynamiska samband. Det är viktigt att propellern opererar vid ett visst varvtalsintervall för att verkningsgraden skall vara hög. Om propellern snurrar med ett för högt varvtal kan kaviteter i flödet uppstå vilket sänker propellerns verkningsgrad drastiskt.

Beroende på val av elmotor kan det finnas behov av varvtalsreduktion i form av en växellåda vilket även den har en verkningsgrad. Detta eftersom propellerns varvtal inte får överstiga det varvtal den är designad för.

Motoreffekten P_m vid varje tidpunkt kan beräknas som

$$P_m = \frac{P_b}{\Pi\eta_{vp}} \quad (5)$$

där P_b är bruttoeffekten angiven ovan och $\Pi\eta_{vp}$ är produkten av verkningsgraderna belägna mellan motorn och vattnet.

Systemets nettoenergiförbrukning

För att beräkna energibehovet för en tur integreras motoreffekten och divideras sedan på de övriga elektriska verkningsgraderna, η_e , så som motorn och omriktaren. På detta sättet kan en uppskattning göras på hur stor energilagring som krävs.

$$E = \frac{1}{\Pi\eta_e} \int_{t_{start}}^{t_{slut}} P_m dT \quad (6)$$

3 Metod

I detta kapitel presenteras metodiken som låg till grund för studien. Inledningsvis redovisas de olika delmoment som utfördes för att kunna dimensionera färjornas drivlinor. Därefter redogörs tillvägagångssättet som användes för att kunna genomföra kostnad- och miljöanalysen. Slutligen presenteras hur studien har valt att hantera etiska aspekter.

3.1 Dimensionering av elektrisk drivlina

Dimensioneringsprocessen bestod av flera olika delmoment vars metod redogörs nedan. Först samlades information om den större och mindre färjan in. Även information angående Kattegatt och Göta älv samt information angående loggning av respektive färja. Därefter bestämdes vilken typ av elektrifiering som skulle utföras och hur det hydrodynamiska motståndet skulle estimeras. Sist redovisas metodiken för dimensioneringen av motoreffekt och energilagringalternativen samt hur laddningseffekt beräknades.

3.1.1 Fakta om färjorna

Information angående fartygen har hittats med litteraturundersökning. Majoriteten av datan har hämtats från respektive rederis hemsida, vetenskapliga rapporter och artiklar. Gruppen har även varit i kontakt med personer på respektive rederi där viss information hämtats.

3.1.2 Väderförhållanden i Kattegatt

För dimensionering av färjorna måste vågor och vind tas hänsyn till då det uppstår ett motstånd för färjornas rörelse som kan påverka energiförbrukningen hos fartygen. För dimensionering av den större färjan som färdas mest i Kattegatt används vågdata för fyra olika driftfall som presenteras i tabellen nedan. Denna data används för att uppskatta vågförhållanden i Kattegatt.

Tabell 2: Kattegatts vågdata [33].

Våg- och vindförhållande	Vindhastighet [m/s]	Medelvåghöjd [m]	Medelvåglängd [m]	Vågshastighet [km/s]	Period [s]
Stilla sjö	0	0	0	0	0
Smul sjö	3	0,5	10	13,9	2,6
Grov sjö	11	2,0	50	31,1	5,8
Mycket svår sjö	23	4,5	100	44	8,2

3.1.3 Väderförhållanden i Göta älv

Strömmen i Göta älv har relativt låg hastighet och varierar normalt mellan 0.7-1.0 m/s [34]. Dock kör bara färjan stundtals rakt emot flödesriktningen och därmed blir det ökade motståndet svårt att approximera. Därför har strömmen valts att inkluderas in i en säkerhetsfaktor för dimensioneringen av den mindre färjan, då den relativa hastigheten är liten och färjan stundtals färdas medströms. Gällande vågorna i älven är fallet annorlunda än vad det är i Kattegatt, då vågorna som skapas i älven ofta är mycket små [35].

3.1.4 Ruttloggning

I studien ligger data om färjornas drift till grund för beräkning av respektive färjas energiförbrukning och effektbehov. Datan för den större färjan har samlats in från *www.marinetraffic.com* i form av djupgående vid loggningstillfället och hastigheten har noterats varje minut då hemsidan följer färjan i realtid. För den mindre färjan har data i form av hastighet samlats in via GPS-loggning, medans information om djupgående har tagits från datablad. GPS:n som användes vid loggningen var Garmin CX60 och den samlade in hastigheten varje sekund.

3.1.5 Typ av elektrifiering

Studien utgår från att det blir en eftermontering på både den stora och lilla färjan. Det innebär att den konventionella drivlinan helt ska ersättas med en helelektrisk drivlina. Utöver implementeringen av den helelektriska drivlinan förutsätter studien att det inte kommer att ske några förändringar i färjornas uppbyggnad, dvs. inga förändringar av t.ex. skrov eller propellrar, eller färjornas sätt att framföras.

3.1.6 Estimering av hydrodynamiskt motstånd

Som beskrivet i kapitel 2.5 är beräkningsströmningsdynamik det föredragna sättet att estimerar flödesdynamiskmotstånd på fartyg vilket kräver 3D-modeller av fartygens skrov och ett datorkluster att köra dessa simulationer på. Detta är resurser som gruppen inte har haft tillgång till och därför valde gruppen att använda empiriska metoder för beräkning av detta motstånd.

Beräkningarna i denna rapport bygger på Holtrop & Mennens uppdaterade utgåva ifrån 1982 [36]. Modellen har sedan kompletterats med tillägg som adderat vågmotstånd, luftmotstånd och motstånd som funktion av acceleration beskrivet i kapitel 2.5.

Vinden antas angripa färjan rakt framifrån under hela färden vilket ger upphov till en något

större energiförbrukning eftersom vinden normalt angriper från olika vinklar under en normal tur och den transversella arean, A [m^2], har antagits vara kvadratisk. Luftmotståndskoefficienten, C_d [-], har uppskattats vara ett rätblock och satts till $C_d = 1$ enligt Frank M. Whites handbok Fluid Mechanics in SI units [37]. I handboken återfinns även ekvation (1).

Vågmotståndet har beräknats med hjälp av en MATLAB-kod. Programmet har tillhandahållits utav Arash Eslamdoosh, docent på institutionen Mekanik och maritima vetenskaper på avdelningen för marin teknik på Chalmers. Programmet bygger på Strip Theory och kräver endast fyra fartygsparametrar för att förenklat beskriva skrovets egenskaper [32]. Utöver detta krävs också fartygets hastighet, signifikant våghöjd och vågornas period. Vågornas antas angripa fartygen rakt framifrån under hela resan.

3.1.7 Energilagers livslängd

Litiumjonbatterier som alla andra batterityper har en livslängd som kan beror på många faktorer, bland annat antalet laddningscykler batteriet har, vilket är ett mått på det antal gånger ett batteri kan upp och urladdas innan dess prestanda börjar försämrans. Det är möjligt att förlänga livslängden genom att bland annat inte ladda batterierna allt för ofta och hålla dess totala laddningskapacitet inom ett intervall mellan 20 % till 80 % [38]. Bränslecellers livstid beror inte på hur ofta de laddas, utan istället på antal timmar i bruk.

Batteriet på den stora och lilla färjan beräknades enligt

$$\text{Batteriets livstid [år]} = \frac{\text{Antal laddningscykler under batteriets livstid}}{\text{Färjans laddningscykler [1/år]}} \quad (7)$$

och bränslecellernas livstid för färjorna beräknades enligt

$$\text{Bränsleceller livstid [år]} = \frac{\text{Livstid [timmar]}}{\text{Antal timmar i drift [1/år]}} \quad (8)$$

3.1.8 Dimensionering av energilagring

Dimensioneringen för den stora och lilla färjan har baserats på beräknad energiförbrukning vid loggad drift. Där undersöktes färjornas drift vid fyra olika väderförhållanden, varav endast resultatet från grov sjö låg till grund för dimensioneringen av energilagring. Detta beslut baserades på det faktum att det kommer att uppstå flera olika väderförhållanden på vattnet som både den större och mindre färjan ska kunna klara av. Däremot anses inte resultatet som från driftsfallet mycket grov sjö under hela resan anses vara realistisk att utgå ifrån eftersom de väderförhållandena är relativt ovanliga. Det som ansågs vara mer relevant var att färjorna skulle kunna klara av en relativt tuff färd och ges marginal för att klara korta perioder under svårare

omständigheter.

Eftersom loggningen sker i samband med en tur för respektive färja, innebär det att energiförbrukningen endast är med avseende per tur. Vilket innebär att antalet turer som färjorna dimensioneras efter måste ingå i dimensioneringen. Detta krav utgår ifrån antalet timmar som färjan ska färdas innan laddning. I studien ställs kravet att den större färjan ska klara en tur, dvs. från Göteborg till Fredrikshamn, som under bra väderförhållanden tar 3.5 timmar. Det innebär att den stora färjan dimensionerades utifrån den kortaste möjliga färden. På den mindre färjan ställs kravet på att klara av en hel dag, dvs. 8 turer, som uppskattas vara cirka 8 timmar och 48 minuter.

Dimensioneringen av de två energilagringssystemalternativen inleddes med nettoenergiförbrukningen, från driftsfallet grov sjö, och antalet turer färjorna skulle färdas för att få den totala energiförbrukningen. Därefter överdimensionerades energilagringssystemalternativen med en felmarginal på 15 % för att täcka eventuella felmarginaler, såsom varierande effektbehov utifrån olika väderlekar. Även energilagringssystemalternativets verkningsgrad, dvs. batteriets och bränslecellens enskilda verkningsgrad, ingick för att ta hänsyn till att inte all energi som lagras går till motorn. Dessa verkningsgrader antogs vara fixa i studien. Dessutom var ett krav att batteriernas energikapacitet skulle hållas inom ett intervall mellan 20 % och 80 %. Det innebar att en faktor på 60 % användes för att ta hänsyn till intervallet. I denna processen avrundas även energikapaciteten till dimensioner där laddningsprocessen blir mer skonsam för energilagringssystemalternativets livstid under dimensioneringsprocessen. Beräkningen av de slutliga dimensioneringarna av den stora och lilla färjan utfördes alltså genom att 15 % adderades på nettoenergiförbrukningen, som multiplicerades med antalet turer per dag, som därefter dividerades med respektive energilagringssystemalternativets verkningsgrad. Lithiumjonbatterier dividerades även med en faktor på 0,6 för laddningsområdet.

Eftersom dimensioneringen utgår från den dynamiska modellen inkluderades inte hotellaster i den beräknade nettoenergiförbrukningen. Vilket innebar att energiförbrukningen som hotellasterna kräver per resa adderades till den slutliga dimensioneringen. För den större färjan adderades 1 MWh per resa, detta värde erhöles från en kontaktperson inom Stena Line [39] och anses vara en uppskattad siffra. I studien antas hotellaster hos den mindre färjan kräva en så förhållandevis liten mängd energi att den bortses från i den slutliga dimensioneringen.

Efter att respektive färjas energiförbrukning dimensionerats med båda energilagringssystemalternativen, beräknades storleken av respektive dimensionering i form av massa och volym för att få en uppfattning om respektive alternativ var rimligt. Sedan beräknas även hur batterierna skulle kopplas om man använde sig av litiumjoncellerna NCR21700A från tillverkaren Panasonic [40]. Först divideras den önskade energikapaciteten på hela batteriet med kapaciteten per cell. Då fås det antalet celler som behövs för att uppnå rätt kapacitet. Sedan divideras den önskade spänningen för batteriet med spänningen över varje cell för att beräkna hur många battericeller som behöver kopplas i serie för att få rätt spänning över dem. Nästa steg är att dividera det totala antalet celler med antalet i en sådan serie för att beräkna hur många sådana serier som behövs.

Det talet man får kommer säkerligen innehålla decimaler och behöver därför avrundas upp eller ner beroende på vad som resulterar i den minsta avvikelsen från den önskade kapaciteten. Efter avrundningen multipliceras antalet serier med antalet celler i serie och energikapaciteten per cell för att få den resulterande kapaciteten för hela batteriet.

3.1.9 Dimensionering av motoreffekt

Dimensioneringen av motoreffekten för den stora och lilla färjan har baserad på beräknad motoreffekt vid loggad drift. Utifrån de fyra undersökta väderförhållanden utgick dimensioneringen ifrån resultatet från mycket svår sjö. Detta väderförhållande valdes på grund av att färjan ska klara av en tuff färd och utan problem fortfarande kunna ta sig in till hamn. Dessutom delades den totala motoreffekt upp på två motorer av säkerhetsskäl om den ena motorn skulle fallera.

3.1.10 Laddningseffekt

Färjornas efterfrågade laddningseffekt bestämdes med hjälp av beräkningarna med avseende på batteriernas energiförbrukning vid grov sjö och färjornas tidtabeller. Detta eftersom färjornas laddningseffekt behöver anpassas i förhållande till hur länge färjorna är ur drift. Laddningseffekten anpassades utifrån tidsschemat som den större och mindre färjan har i nuläget eftersom studien utgår från färjornas nutida körsätt.

Beräkningen utgick från nettoenergiförbrukningen, dvs. endast framdrift per tur, vilket innebar att hotellasterna för den stora färjan behövdes adderas till den totala energiförbrukningen. Det var inte fallet för den mindre färjan eftersom hotellasterna antas vara förhållandevis små. Det innebar att den totala energiförbrukningen som stod till grund för att beräkna laddningseffekt var energiförbrukningen per tur och hotellaster. För den mindre färjan var det endast energiförbrukningen per dag, som beräknades genom att uppskatta antal turer per dag. Därefter dividerades den totala energiförbrukningen för färjorna med verkningsgraden för batteriet och antalet timmar som antogs finnas tillgängliga för laddning för att få den slutliga laddningseffekten.

3.2 Beräkning av kostnad

För att få en bättre uppfattning om det skulle vara lämpligt att genomföra omställningen till helelektrisk drift har en enkel kostnadsanalys genomförts, där kostnaden för helelektrisk drift jämfördes med konventionell drift. Med fokus på två miljövänliga energilagringssystem som anses vara bland de mest lovande alternativen, vilka var vätgas bränsleceller och litiumjonbatterier, har en jämförelse utförts mellan dem och en förbränningsmotor. I kostnadsanalysen har marknadspriset för Teslas litiumjonbatterier använts eftersom information om batterierna var

lättillgänglig. Som jämförelse för Teslas låga pris har en studie av Inter-American development bank på litiumjonbatterier vid maritint bruk använts [41]. Priset av bränsleceller är från en tidigare uppsats som har undersökt dessa kostnader [42]. I kostnadsanalysen har kostnader för installation, hjälpsystem och underhåll bortsetts från. Detta då det inte fanns någon tillgänglig data att uppskatta dem ifrån.

I kostnadsanalysen beräknades totala kostnaden för bränsleceller och batterier beräknat enligt

$$Total\ kostnad\ [\text{SEK}/\text{år}] = Fast\ kostnad\ [\text{SEK}] + Rörlig\ kostnad\ [\text{SEK}/\text{år}] \quad (9)$$

Den fasta kostnaden för bränsleceller ($Fast\ kostnad_{bc}$) beräknades enligt

$$Fast\ kostnad_{bc}\ [\text{SEK}] = Pris\ på\ vätgastank\ [\text{SEK}] + Pris\ på\ bränsleceller\ [\text{SEK}] \quad (10)$$

och den fasta kostnaden för batterier ($Fast\ kostnad_b$) beräknades enligt

$$Fast\ kostnad_b\ [\text{SEK}] = Pris\ på\ batteri\ [\text{SEK}] + Fast\ elnätsavgift\ för\ laddning\ [\text{SEK}] \quad (11)$$

Med den fasta kostnaden framtagen utfördes därefter en utvärdering av priset på bränsle för drift under tio år för de två elektriska drivlinorna samt den konventionella drivlinan. Eftersom färjorna redan har förbränningsmotorer anses den fasta kostnaden vara noll för detta alternativ då inget byte utförs. Den rörliga kostnaden för diesel beräknades enligt

$$Rörlig\ kostnad\ [\text{SEK}/\text{år}] = \frac{Energiförbrukning\ [\text{kWh}/\text{år}]}{\eta_{dieselmotor}} \quad (12)$$

Den rörliga kostnaden för bränsleceller beräknades enligt

$$Rörlig\ kostnad\ [\text{SEK}/\text{år}] = Av_{bc}\ [\text{SEK}/\text{år}] + \frac{Vätgas\ [\text{SEK}/\text{kWh}] \cdot Energiförbrukning\ [\text{kWh}/\text{år}]}{\eta_{bränsleceller}} \quad (13)$$

där Av_{bc} står för avskrivningar av nya bränsleceller. Den rörliga kostnaden för litiumjonbatterier beräknades enligt

$$Rörlig\ kostnad\ [SEK/\text{år}] = Av_b\ [SEK/\text{år}] + \frac{Elpris\ [SEK/kWh] \cdot Energiförbrukning\ [kWh/\text{år}]}{\eta_{batterier}} \quad (14)$$

där Av_b står för avskrivningar av nya batterier, och elpriset beräknades enligt

$$Nettopris\ [SEK/kWh] = Bruttopris\ [SEK/kWh] + Elskatt\ [SEK/kWh] + R.\ elnätsavgift\ [SEK/kWh] \quad (15)$$

där $R.\ elnätsavgift$ står för Rörlig elnätsavgift.

Bruttopriset på el som batterierna konsumerar under laddningen har uppskattats med hjälp av marknadsdata från den största börsmarknaden för el i Europa, dvs. Nordpool [43]. Datan som har använts är dagspriset på el i de områden färjorna kan ladda medan priset på vätgas har tagits från en rapport av International Council on Clean Transportation [44]. Jämförelsen med den konventionella drivlinans kostnad har gjorts mot dagspriset av diesel [45]. För det rörliga priset av de elektriska drivlinorna har antalet livcykler tagits hänsyn till i kostnadsanalysen. Då den syftar på den mängd batterier eller bränsleceller som krävs under en 10 års period, eftersom de måste bytas ut på grund av slitage.

3.3 Beräkning av utsläpp

Emissioner inom de störst klimatpåverkande processerna inkluderades i rapporten, dvs. förbränning av drivmedel samt batteri- och elproduktion för att få en överblick av färjornas miljöpåverkan. I studien utgår beräkningarna från utgångsläget idag, vilket innebär att miljöpåverkan från produktionen av den konventionella motorn m.m inte beaktas i miljöanalysen. Utsläppen som beräknades var endast med avseende på framdriften av respektive färja.

Beräkningen av den större och mindre färjans klimatpåverkan utfördes med hjälp av så kallade emissionsfaktorer vilket är en generell metod som används för att beräkna utsläppen av olika fordon. Emissionsfaktorer anger vikten av utsläppet med avseende på antingen avstånd, energi- eller bränsleförbrukning, vilket innebär att om färjans energi- eller bränsleförbrukning finns tillgänglig kan de totala emissionerna från ett transportfordon med fördel estimeras. I studien beräknades utsläppen från de mest förekommande utsläppen inom transportsektorn, CO_2 , NO_x och SO_x , per år för respektive färja.

Emissionsfaktorerna för konventionell drift är tagna från källor på internationell och regional nivå, dvs. European Monitoring and Evaluation Programme och European Environment Agency (EMEP/EEA), International Maritime Organization (IMO) och Naturvårdsverket, för att få en mer omfattande analys. Emissionsfaktorerna från internationell nivå är från två organisationer som arbetar för att minska utsläppen och undersöka hur stora de faktiskt är, medan

Naturvårdsverket är en statlig myndighet som arbetar med miljöfrågor i Sverige.

Utsläppen från den helelektriska driften beräknades följaktligen för två parametrar. Den första var elproduktion, vars emissionsfaktorer var specifika för nordisk och svensk elproduktion eftersom det är elektriciteten som batterierna kommer laddas med. Emissionsfaktorerna samlades in från olika källor, dvs. en utsläppsstudie av Stockholms stad, en rapport av Naturvårdsverket och Svenska MiljöEmissionsData (SMED), årsstatistik från Energiföretagen och en studie av Institutet för Vatten- och Luftvårdsforskning (IVL). Den andra parametern var batteriproduktionen vars emissionsfaktorer är baserade på batterier från fordonsindustrin eftersom emissionsfaktorer för batterier inom sjöfartssektorn inte kunde hittas. Dessa emissionsfaktorer samlades in från en studie av IVL och från ytterligare två rapporter från utgivaren Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MPDI) och Argonne national laboratory (ANL).

I slutet sker en grafisk jämförelse av tre utsläppen från konventionell och helelektrisk drift för respektive färja under en tio-årsperiod. För den helelektriska driften ingick utsläppen från batteriproduktionen vid året som helelektrisk drift implementerades. Utsläppen till följd av komponenter i den konventionella drivlinan bortsågs från eftersom drivlinan redan är installerad, dvs. inga utsläpp år 0. Vilket innebär att utsläppen adderas varje år för den konventionella driften. För den helelektriska driften adderas därefter utsläppen från elproduktionen varje år. Utsläppen till följd av batteribytten delas upp jämnt under alla år framöver, dvs. som ett årlig bidrag.

Nedan presenteras metodiken som användes för att beräkna utsläpp som sker till följd av hotellaster på den stora färjan, detta bortses från i den mindre färjan på grund av dess energibehov i förhållande till dess storlek, som subtraheras från den totala bränsleförbrukningen. Däremot måste hotellasternas energiförbrukning för den större färjan inkluderas. Detta sker med hjälp av energiförbrukningen som hotellasten kräver per resa och antalet resor färjan gör per år för att få den årliga energiförbrukningen, som hotellaster kräver, enligt

$$\text{Energiförbrukning [kWh/år]} = H \cdot \text{Energiförbrukning [kWh/resa]} \cdot \text{Antal resor [st/år]} \quad (16)$$

där $H \cdot \text{Energiförbrukning}$ representerar energiförbrukningen för hotellaster. Därefter beräknades bränsleförbrukning till följd av hotellaster med hjälp av förbränningsmotorns verkningsgrad (η_{fbm}) enligt

$$\text{Bränsleförbrukning [kg]} = \frac{\text{Energiförbrukning [kWh/år]}}{(1 - \eta_{fbm}) \cdot \text{Energiinnehåll [kWh/kg]}} \quad (17)$$

där energiinnehållet i [kWh/kg] används för att få bränsleförbrukningen i viktenhet. Så med hjälp av ekvation (16) och (17) beräknades bränsleförbrukningen i [ton/år] som krävs för framdrivningen och hotellaster av den stora färjan.

3.3.1 Konventionell drivlina

Utsläppen av färjorna med konventionell drivlina baserades på värden funna på de verkliga fartygens årliga bränsleförbrukning, per bränslemassa för ”Stena Danica” och per bränslevolym för ”Älvsnabben 4”.

Beräkningarna på utsläppen med emissionsfaktorerna från EMEP/EEA och IMO utfördes med hjälp av färjans bränsleförbrukning enligt

$$Utsläpp \text{ [kg]} = EF \text{ [kg/ton]} \cdot Bränsleförbrukning \text{ [ton]} \quad (18)$$

där EF står för emissionsfaktor. För den stora färjan är bränsleförbrukningen funnen i en vikt-enhet medan den för den mindre färjan är funnen i en volymenhet. För att kunna använda ekvation (18) för den mindre färjan omvandlades bränsleförbrukningen enligt

$$Bränsleförbrukning \text{ [kg/år]} = Bränsleförbrukning \text{ [L/år]} \cdot \delta \text{ [kg/L]} \quad (19)$$

där δ står för densitet. Därefter kan även utsläppen för den mindre färjan med ekvation (18) användas.

Beräkningarna av utsläppen med emissionsfaktorer från Naturvårdsverkets utfördes enligt [46]

$$Utsläpp \text{ [kg]} = EF \text{ [kg/GJ]} \cdot Bränsleförbrukning \text{ [m}^3\text{]} \cdot Värmevärde \text{ [GJ/m}^3\text{]} \quad (20)$$

där ett värmevärde även används. Värmevärdet beräknades via bränslets densitet och energiinnehåll enligt

$$Värmevärde \text{ [GJ/m}^3\text{]} = \frac{\delta \text{ [kg/m}^3\text{]} \cdot Energiinnehåll \text{ [kJ/kg]}}{1000} \quad (21)$$

där en enhetsomvandling till liter samtidigt utförs, därav faktorn 1000.

En omvandling av årlig bränsleförbrukning uttryckt i massa till att vara uttryckt i volym $[\text{m}^3]$ utfördes enligt

$$Bränsleförbrukning \text{ [m}^3\text{/år]} = \frac{Bränsleförbrukning \text{ [kg/år]}}{\delta \text{ [kg/m}^3\text{]}} \quad (22)$$

3.3.2 Helelektrisk drivlina

Nedan presenteras metoden för att beräkna utsläppen från den helelektriska drivlinan för den större och mindre färjan. Utsläppen som en helelektrisk drivlina bidrar med delades upp i två parametrar, dvs. utsläppen som sker till följd av elkonsumention som krävs för att ladda batterierna och tillverkningsprocessen av batterierna. De två metoderna för el- och batteriproduktionen presenteras nedan.

Elproduktion

Utsläppen från elproduktionen beräknades med hjälp av den totala energiförbrukningen som krävdes för framdrivning för respektive färja. Utgångspunkten för dessa beräkningar var färjornas verkliga bränsleförbrukningarna av fossilt bränsle med konventionell drivlina. Det första steget var att beräkna den mekaniska energin som kommer från förbränningsmotorn till propelleraxeln via produkten av bränsleförbrukning och förbränningsmotorns verkningsgrad (η_{fbm}). När fartyget istället utrustas med en elektrisk drivlina, måste därefter samma mekaniska energi komma till propelleraxeln som i fallet med den konventionella drivlinan. I detta fall beräknades därefter den elektriska energi som dras från batteriet under samma driftsfall, dividerades denna mekaniska energi med produkten av motorns (η_{em}), omriktarens (η_o) och batteriets (η_b) verkningsgrader, enligt

$$Energiförbrukning \text{ [kWh/år]} = \frac{\text{Bränsleförbrukning [kg]} \cdot \eta_{fbm}}{\eta_{em} \cdot \eta_b \cdot \eta_o \cdot \text{Energiinnehåll [kWh/kg]}} \quad (23)$$

där omvandlingen till energi utfördes med hjälp av energiinnehållet. Därefter utfördes själva utsläppsberäkningen enligt

$$Utsläpp \text{ [kg]} = EF \text{ [kg/kWh]} \cdot \text{Energiförbrukning [kWh/år]} \quad (24)$$

där utsläppen till följd av elproduktion för de två färjorna erhöles.

Batteriproduktion

Beräkningen av utsläpp vid batteriproduktionen utfördes med avseende på den totala installerade batterikapaciteten, dvs. batteridimensioneringen, på färjorna enligt

$$Utsläpp \text{ [kg]} = EF \text{ [kg/kWh]} \cdot \text{Installerad energikapacitet [kWh]} \quad (25)$$

där emissionsfaktorerna var specifika för batteriproduktion.

3.4 Hantering av etiska frågor

Vid en dimensionering av en helelektrisk färja där energilagring ska används ombord kommer det att uppstå etiska frågeställningar att ta ställning till. Inom gruppen diskuterades olika aspekter och det slutade med att mest fokus angående etiska dilemman hamnade på energilagringssalternativen, dvs. batteri- och vätgasproduktionen. Däremot hanterades inte etiska aspekter angående bränsleceller eftersom studien har baserats på att vätgas produktionen sker via elektrolys och därmed inte ur fossila bränslen. Batteriproduktionen har under de senaste åren fått mycket uppmärksamheten angående utvinningsprocessen av råvaror. Däremot låg inte denna etiska aspekt att till grund för valet av energilagring i projektet på grund av att batterier är en välanvänd teknik som förekommer i flera produkter som används dagligen. Däremot kan man tänka sig att ett åtagande kan ske vid inköpet av batterier t.ex. genom att kontrollera under vilka villkor som brytningsprocessen genomfördes. Det innebar att etiska dilemman inte låg till grund för att valet av batterityp i slutändan utan det hamnar istället hos respektive rederi vid planerings- och inköptillfället.

4 Genomförande och resultat

I detta kapitlet avhandlas projektets genomförande och resultaten presenteras. Här behandlas alla projektets delar såsom dimensionering av den elektriska drivlinan, kostandsestimering, beräkning av utsläpp och etiska frågor. Resultaten presenteras i kronologisk ordning eftersom flera resultat är beroende av varandra. Det förekommer diskussioner under resultat rörande beslut som tas under projektets utförande.

4.1 Dimensionering av elektrisk drivlina

I Tabell 3 ses verkningsgrader för förbränningsmotor, elmotor, omriktare, litiumjonbatterier, växellåda, propeller och bränsleceller. Dessa verkningsgrader har använts till bl.a. utföra konverteringarna från bruttoeffekt till motoreffekt, utsläppsberäkningar och kostnadsanalysen för de olika energilagringalternativen. De flesta verkningsgrader varierar beroende på belastning men har för att minska projektets komplexitet uppskattats till ett fixt värde.

Verkningsgraden för båda färjornas förbränningsmotorer har satts till ett fast uppskattat värde som antas representera förbränningsmotorernas medelverkningsgrad. Elmotorers verkningsgrad har tagits från en asynkronmotors produktblad [47]. Även om synkronmotorer har en något högre verkningsgrad har samma verkningsgrad använts för båda för att undvika att underdimensionera motoreffekten. Verkningsgraden för omriktaren har uppskattats med hjälp av produkter som används för framdrivning av båtar med växelspanning ombord. Detta blir givetvis inte helt korrekt eftersom sådana produkter använder sig av transformatorer för att transformera spänningen vilket inte är möjligt för båtar med ett DC-nät. Omriktarens verkningsgrad har därför angetts som 95% istället för 94% som står angivna i produktbladet [12]. Detta är troligtvis en något låg verkningsgrad för en omriktare bestående helt av kraftelektronik men eftersom osäkerheten är stor gjordes bedömningen att det är bättre att räkna med en något för låg verkningsgrad än en något för hög. Gällande litiumjonbatteriets verkningsgrad så är den tagen ur det typiska intervallet tidigare presenterat i Tabell 1. Samt verkningsgraden för bränsleceller har hämtats från tillverkare [48]. Växellådan har antagits ha en fast växel och verkningsgraden har approximerats med erfarenhet från projektgruppen. Propellern har antagits operera under optimala förhållanden under hela turen och approximerats som det nedåt avrundade maxvärdet på medianpropellern ur graf 12 i [49] eftersom det finns stora osäkerheter vilka propellrar som finns installerade och vid vilka verkningsgrader dessa opererar.

Tabell 3: Verkningsgrader som ligger till grund för flera beräkningar i studien.

Komponent	Verkningsgrad
Förbränningsmotor	0,35
Elmotor	0,95
Omriktare	0,95
Litiumjonbatterier	0,90
Växellåda	0,99
Propeller	0,60
Bränslecell	0,56

4.1.1 Fakta om färjorna

I avsnittet nedan redovisas information som samlats in om färjorna, som ligger till grund för flera olika delmoment i studien. Först presenteras information om den stora färjan och därefter om den lilla färjan. Informationen presenteras bland annat i form av trafikerade sträckor, bränsle, motorer och storlekar från färjorna som den stora och lilla färjan är inspirerade av. Avslutningsvis i båda styckena presenteras använda färjespecifikationer för respektive färja.

Stora färjan

Den större färjan i studien är inspirerad av M/S Stena Danica som trafikerar sträckan mellan Göteborg och Fredrikshamn på cirka 3,5 timmar. Stena Danica är ett Ro-Pax fartyg, det innebär att färjan transporterar bilar likväl som passagerare [50]. Färjan sjösattes 1980 har plats för 2 274 passagerare och 550 bilar [50]. Fartyget drivs i nuläget av fyra 12ZV40 dieselmotorer byggda av Sulzer som har en sammanlagd effekt på 25 743 kW och kan driva Stena Danica i en marschfart på 20 knop [51]. Enligt projektledaren på Stena Rederi, Per Wimby, drivs färjan med det traditionella fartygsbränslet marin gasolja (MGO) eller low sulphur heavy fuel oil (LSHFO) [52].

I Tabell 4 ses färjespecifikationerna för den större färjan med benämningar enligt Holtorp & Mennens metod som beskrivs i bilaga A. Flertalet värden är uppskattade utifrån bilder och jämförelser med liknande färjor.

Tabell 4: Färjespecifikationer för den större färjan.

Specifikation	Benämning	Storlek	Enhet
Längd [53]	L	154,9	m
Bredd [53]	B	28	m
Djupgående [53]	T	6,5	m
Höjd över havet (Uppskattad från [54])	–	27,5	m
Displacement [53]	∇	28 727	m ³
Mittspantarea (Hämtat från liknande fartyg)	A_M	178	m ²
Vattenlinjearea (Hämtat från liknande fartyg)	A_W	3146	m ²
Bihang			
Axlar (Uppskattad från [54])	–	35,7	m ²
Roder (Uppskattad från [54])	–	60	m ²
Bihangens total yta (Uppskattad från [54])	S_{APP}	95,7	m ²
Bulbens tvärsnittsarea (Uppskattad från [54])	A_{BT}	18,8	m ²
Höjd från köl till bulbens centrum (Uppskattad från [54])	h_b	3,6	m
Akterspegelns nedsänkta yta (Uppskattad från [54])	A_T	1046,6	m ²
Bogproppellernas diameter (Uppskattad från [54])	d_{bp}	3	m

Lilla färjan

Den mindre färjan i studien är inspirerad av Älvsnabben 4 som sedan 1994 trafikerar Göta Älv mellan Hisingen och Göteborgs fastland [55]. Färjan avgår från Lilla Bommen till Stenpiren och vidare till Lindholmen, Slottsberget, Eriksbergs färjeläge och sen till Klippan. Vid Klippan vänder färjan och åker tillbaka samma väg. Från Lilla Bommen till Klippan tar det cirka 33 minuter. Färjan drivs av två dieselmotorer, Volvo Penta D12 MH, på totalt 662 kW [56] med diesel miljöklass 1 [57]. Dieselmotorerna är två stycken fyrtaktsmotorer som följer kraven på NO_x-utsläpp enligt tier 2 [58]. Älvsnabben får ta ombord som allra mest 448 passagerare. Älvsnabben 4 har en marschfart på 12,5 knop [56].

I Tabell 5 ses färjespecifikationerna för den mindre färjan med benämningar enligt Holtorp & Mennens metod som beskrivs i bilaga A. Flertalet värden är uppskattade utifrån bilder och jämförelser med liknande färjor.

Tabell 5: Färjespecifikationer för den mindre färjan.

Specifikation	Benämning	Storlek	Enhet
Längd [59]	L	31,6	m
Längd mellan perpendicklarna [59]	L_{pp}	30	m
Bredd [59]	B	8	m
Djupgående [59]	T	1,5	m
Höjd över havet (Uppskattad från [59])	–	8	m
Displacement [59]	∇	141	m ³
Mittspantarea (Uppskattad från [59])	A_M	16,5	m ²
Vattenlinjearea (Uppskattad från [59])	A_W	233,7	m ²
Bihang			
Fenor (Uppskattad från [59])	–	4,7	m ²
Roder (Uppskattad från [59])	–	3,7	m ²
Bihangens total yta (Uppskattad från [59])	S_{APP}	8,5	m ²
Akterspegelns nedsänkta yta (Uppskattad från [59])	A_T	16,5	m ²
Bogproppellerns diameter (Uppskattad från [59])	d_{bp}	0,7	m

4.1.2 Driftkrav

Studien är baserad på att de helelektriska drivlinorna som dimensioneras ska klara färjornas nuvarande färdstätt. Det innebär att den dynamiska modellen utsätts för samma hastigheter färjorna har med den konventionella drivlinan, det vill säga att färjorna färdas i marschfart under hela resan. Marschfarten för den större färjan är 20 knop medan den mindre har en marschfart på 12,5 knop.

4.1.3 Motstånd som funktion av hastighet

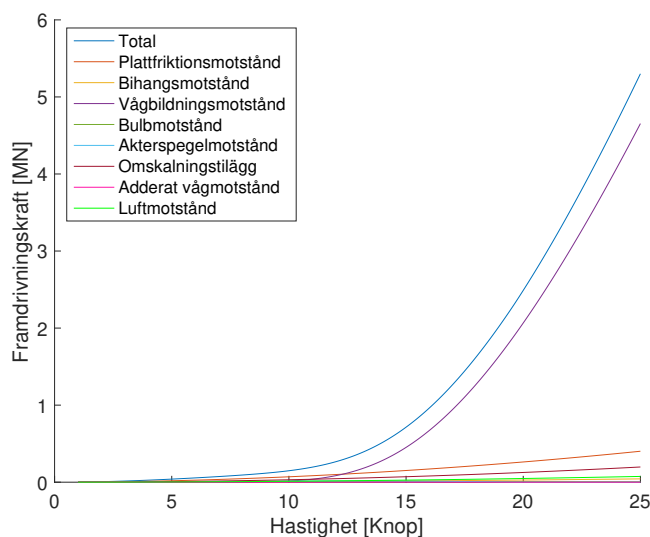
I detta kapitel presenteras färjornas motståndsberäkningar som funktion av hastighet. Med dessa kan man avgöra vilken effekt som kommer behöva genereras för att uppnå en specifik hastighet i olika väderlag. Först presenteras motståndsberäkningarna för den stora färjan, följt av motståndsberäkningarna för den lilla färjan.

Den större färjan

Här presenteras de beräkningar som gjorts av framdrivningskraften som funktion av hastighet för den stora färjan i de olika väderförhållanden. De fyra driftsfallen stilla, smul, grov och mycket svår sjö beskrivs i Tabell 2 i avsnitt 3.1.2.

Stilla sjö:

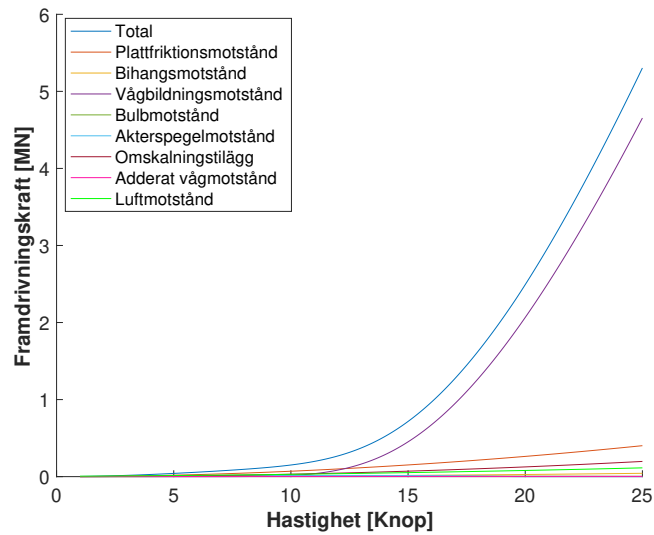
I Figur 3 visas fartygets hastighetskomponenter som funktion av fartygets hastighet i Stilla sjö. I dessa förhållanden, dvs ingen vind och inga vågor, skulle den stora färjan behöva generera 25 MW för att nå en marschfart på 20 knop. Detta stämmer mycket väl överens med dagens prestanda för Stena Danica som har 25,7 MW installerad effekt vilket konfirmerar att felmarginalen i resultaten utan tillagda motstånd är liten.



Figur 3: Stora färjans hydrodynamiska motståndskomponenter som funktion av hastighet i Stilla sjö.

Smul sjö:

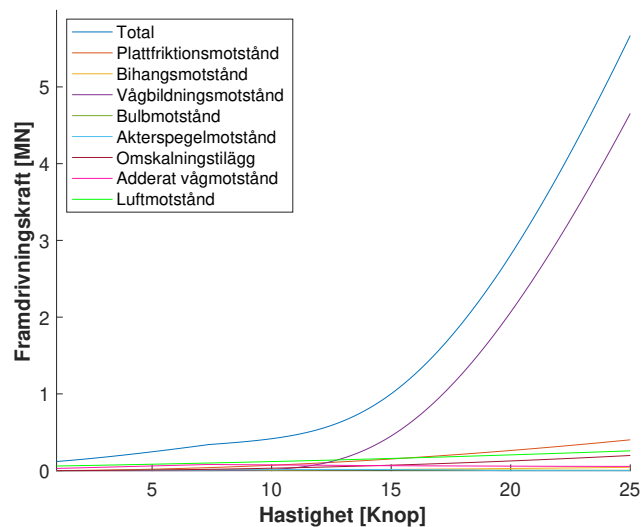
I Figur 4 visas det stora fartygets hastighetskomponenter som funktion av fartygets hastighet i smul sjö. Skillnaden i motstånd för att nå samma hastighet i motvind på 3 m/s och en signifikant våghöjd på 0,5 m är mycket liten, vilket kan observeras i Figur 4. Effekten den stora färjan hade behövt generera för att nå en marschfart på 20 knop i detta förhållandet ökar med ungefär 0,5 MW till 25,5 MW.



Figur 4: Stora färjans hydrodynamiska motståndskomponenter som funktion av hastighet i smul sjö.

Grov sjö:

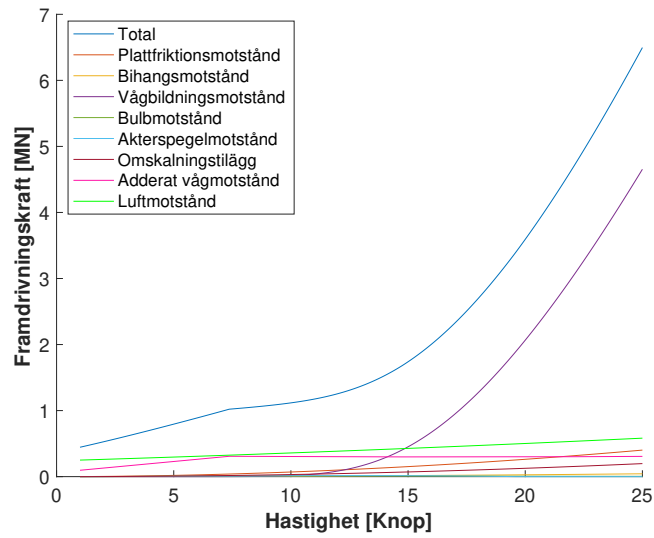
I Figur 5 visas det större fartygets hastighetskomponenter som funktion av fartygets hastighet i grov sjö. I dessa väderförhållanden ökar motståndet drastiskt jämfört med smul sjö. Om den stora färjan skulle försöka nå en marschfart på 20 knop i en medelmotvind på 11 m/s och en signifikant våghöjd på 2 m skulle det enligt dessa beräkningar krävas 28,5 MW.



Figur 5: Stora färjans hydrodynamiska motståndskomponenter som funktion av hastighet i grov sjö.

Mycket svår sjö:

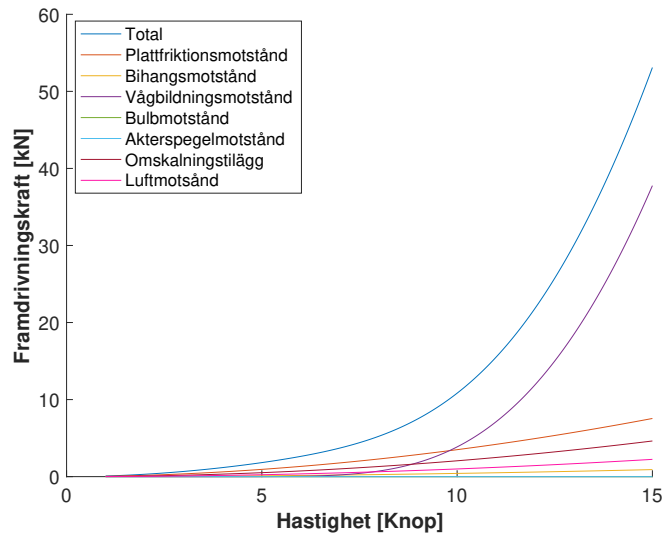
I Figur 6 visas fartygets hastighetskomponenter som funktion av fartygets hastighet i grov sjö. En medelmotvind på 23 m/s och en signifikant våghöjd på 4,5 m är svåra förhållanden i sjöfart och att skulle ge sig ut i dessa förhållanden är på en sträcka som mellan Göteborg och Fredrikshamn orealistiskt. Dock skulle den stora färjan behöva kunna ta sig i hamn även i sådan väderlek, vilket man kan göra vid lägre hastigheter då motståndet är mindre. För att den större färjan skulle kunna uppnå en marschfart på 20 knop i dessa förhållanden beräknades motoreffekt till 36,5 MW.



Figur 6: Stora färjans hydrodynamiska motståndskomponenter som funktion av hastighet i mycket svår sjö.

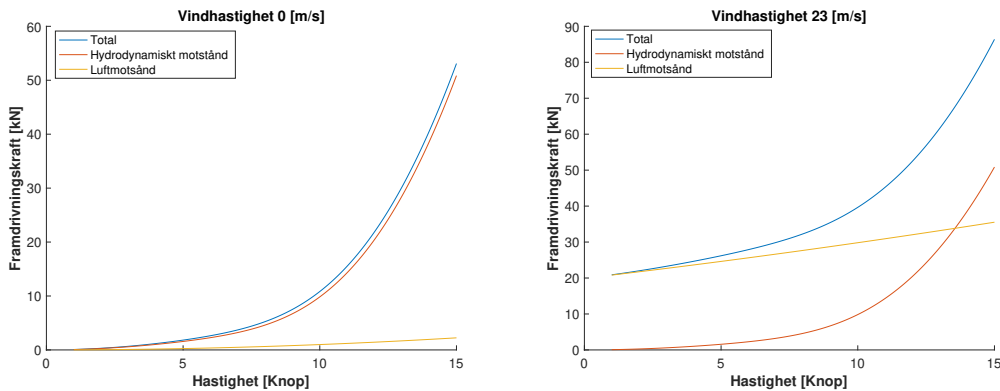
Lilla färjan

Figur 7 visar att vågbildningsmotståndet blir dominerande när den lilla färjan når en hastighet omkring 10 knop. Älvsrabben har en marschfart på 12,5 knop, men genom att sänka hastigheten från 12 till 8 knop skulle motståndet från vattnet kunna halveras vilket hade tillåtit lägre motoreffekt och ett mindre batteri.



Figur 7: Älvsnaabbens hydrodynamiska motståndskomponenter som funktion av hastighet i vindstilla förhållanden.

Som visas i Figur 8 nedan har luftmotståndet som en funktion av den lilla färjans hastighet en försumbar effekt på det totala motståndet. Detta är dock inte fallet när motvinden ökar. I Figur 8 visas även luftmotståndet i relation till det hydrodynamiska motståndet när medelmotvinden är 23 m/s. Då utgör luftmotståndet en betydande del av det totala motståndet.



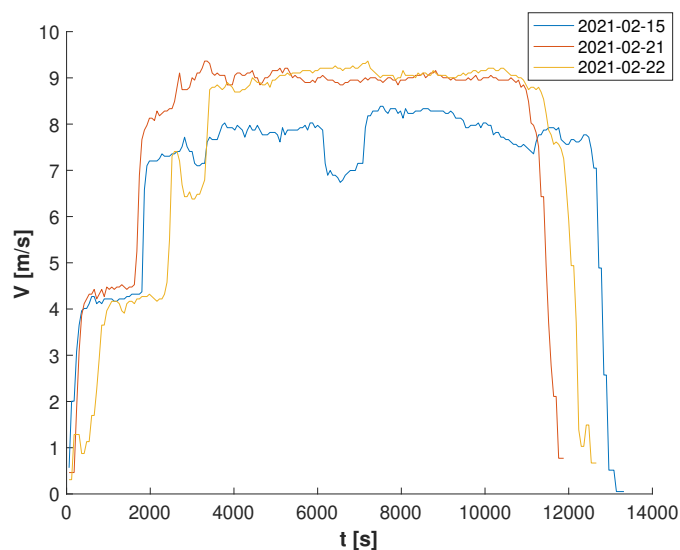
Figur 8: Den lilla färjans flödesdynamiska motstånd som funktion av fartygets hastighet. Där bilden till vänster representerar vindstilla förhållanden och bilden till höger en medelvind på 23 m/s.

Luftmotståndet beror på färjans hastighet relativt vindens i kvadrat, därav ger en halvering i relativ hastighet enbart en fjärdedel av det totala luftmotståndet. Realistiskt sett håller färjan inte samma kurs hela färden utan utsätts för både med- och motvind under delar av hela färden

gång. Eftersom vågorna i älven inte har tillräckligt signifikant våghöjd kommer det adderade vågmotståndet inte att göra någon betydande skillnad för det totala motståndet. Inte ens i det värsta scenariot av vågor som förekommer i älven är det adderade vågmotståndet tillräckligt för att göra en skillnad på mer än 0,4 % ökning vid en hastighet på 12 knop.

4.1.4 Loggad drift

I figur 9 och 10 presenteras hastighetsloggarna som samlats in under projektets gång. Denna data har varit viktigt underlag för att kalkylera största motoreffekten och nettoenergiförbrukningen under en loggad tur.

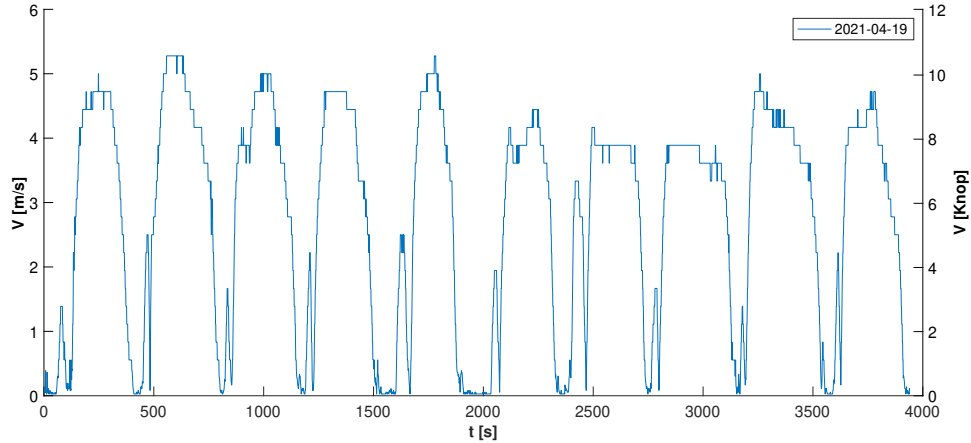


Figur 9: Stena Danicas hastighet vid tre olika turer.

Hastigheterna loggade för Stena Danica representeras av två dagsturer mellan Göteborg och Fredrikshamn och en nattur (2021-02-15) mellan Göteborg och Fredrikshamn. Dessa antas ge en god överblick över hur färjan framförs på daglig basis. I Tabell 6 nedan ses data så som tid, sträcka och medelhastighet ses från de tre loggningarna med Stena Danica.

Tabell 6: Data från loggning av Stena Danica

Datum	Tid [min]	Sträcka [km]	Medelhastighet [Knop]
2021-02-15	222	89	13,4365
2021-02-21	198	91	15,3045
2021-02-22	211	90	14,2213



Figur 10: Älvsnabbens hastighet vid den loggade turen mha GPS.

Hastigheten loggad för Älvsnabben är uppmätt under en dag med låga vindhastigheter och lugn trafik på älven. Denna mätning antas vidare representera hastigheten för den mindre färjan. I Tabell 7 nedan hittas data så som tid, sträcka och medelhastighet från loggningen med Älvsnabben.

Tabell 7: Data från loggning av Älvsnabben

Datum	Tid [min]	Sträcka [km]	Medelhastighet [Knop]
2021-04-19	66	11	5,4877

4.1.5 Effekt och energiförbrukning till följd av loggad data

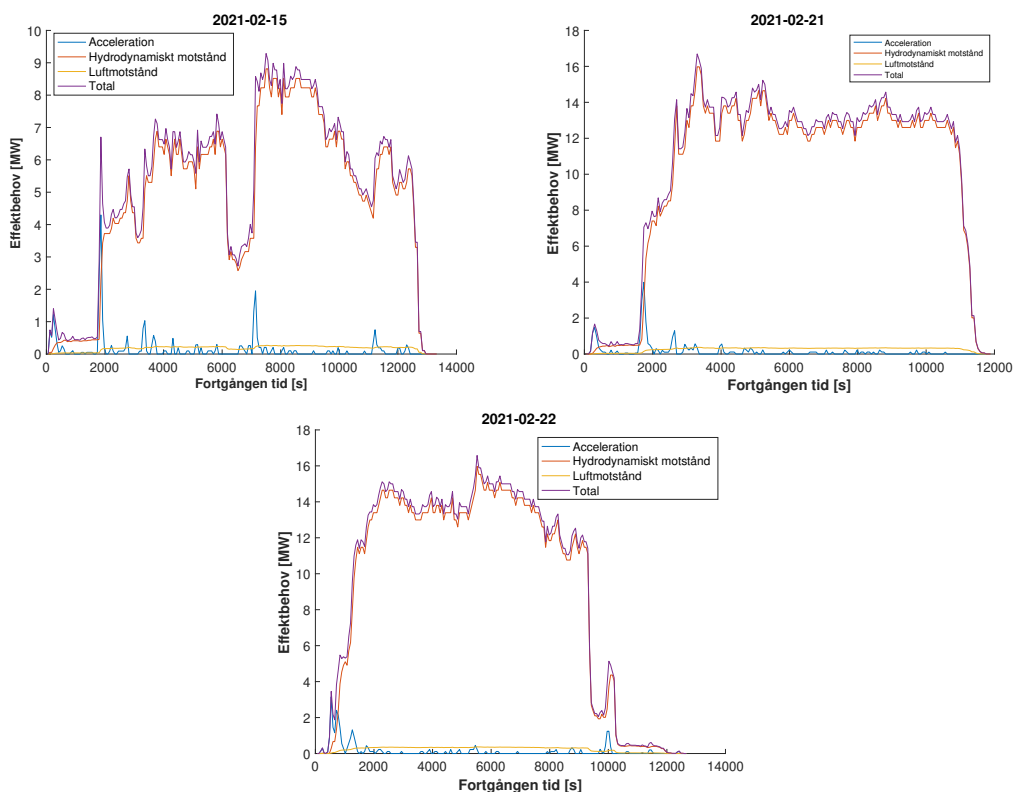
Här presenteras beräkningar utav maximal motoreffekt och nettoenergiförbrukning med avseende på de loggade turerna för respektive färja. De beräkningar som sedan använts i dimensionering av drivlinorna har i tabellerna markerats i fetstil. Först presenteras beräkningarna från de fyra olika väderlekarna för den stora färjan, följt av beräkningarna från fyra olika motvindsförhållanden för den lilla färjan.

Den större färjan

Här presenteras de beräkningar angående effekt och energiförbrukning som gjorts för den stora färjan i de olika väderförhållanden. De olika driftfallen beskrivs som tidigare nämnt i Tabell 2 i avsnitt 3.1.2.

Stilla sjö:

I Figur 11 visas de olika turerna beräknade i stilla sjö där bruttoeffekten är uttryckt som funktion av tid.



Figur 11: Stora färjans beräknade bruttoeffekt som funktion av tid vid de tre loggade turerna i optimala väderförhållanden, dvs. stilla sjö.

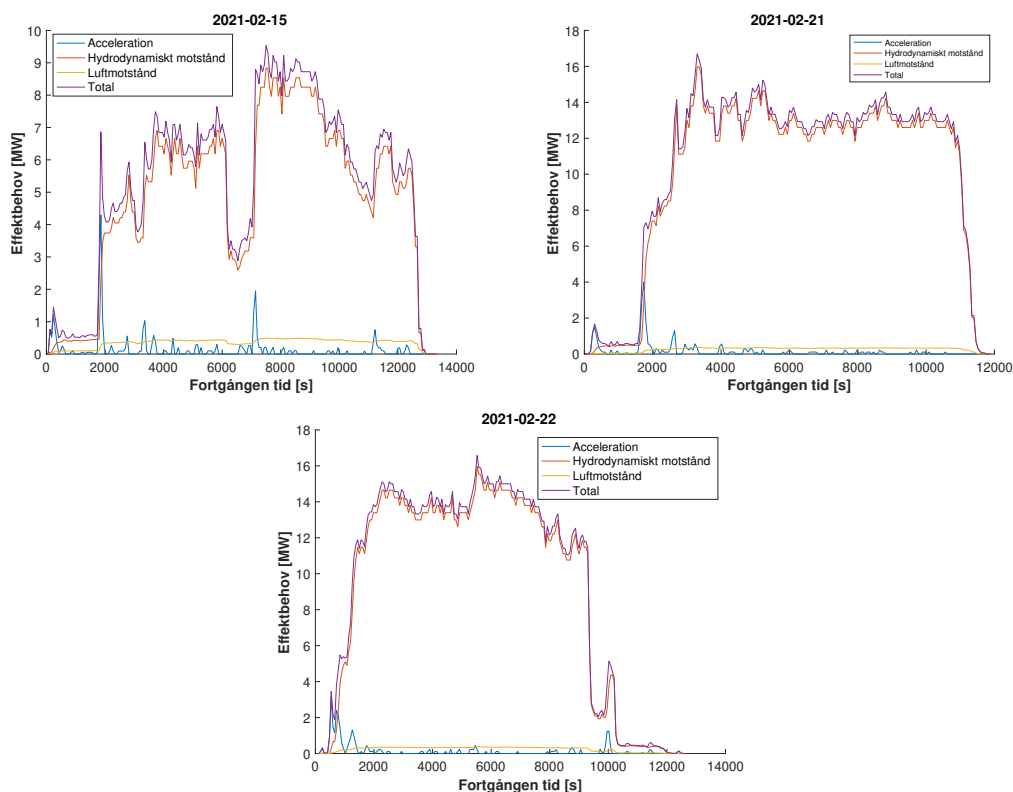
I Tabell 8 visas de beräknade maximala motoreffekterna och totala energiförbrukningarna som krävs av batteriet under de loggade färderna för vindstilla och våglösa förhållanden. Beräkningarna genomfördes med de fixa verkningsgraderna specificerade i Tabell 3 i avsnitt 4.1.

Tabell 8: Resultat ifrån tre loggade turer av den större färjan vid stilla sjö och vind.

Tur	Högsta beräknade motoreffekt [MW]	Nettoenergiförbrukning [MWh]
2021-02-15	10	23
2021-02-21	21	46
2021-02-22	21	44

Smul sjö:

I Figur 12 visas de olika turerna beräknade i smul sjö där bruttoeffekten är uttryckt som funktion av tid.



Figur 12: Stora färjans beräknade bruttoeffekt som funktion av tid vid de tre loggade turerna i smul sjö.

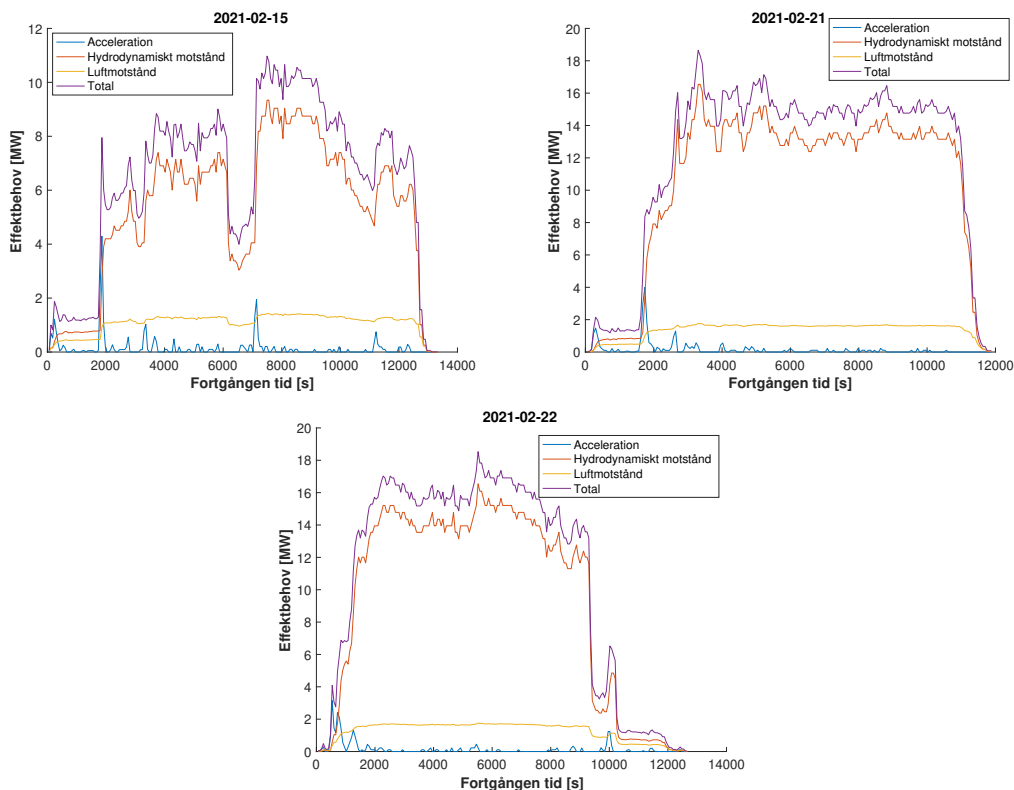
I Tabell 9 visas de beräknade maximala motoreffekterna och totala energiförbrukningarna som krävs av batteriet under de loggade färderna vid smul sjö. Beräkningarna genomfördes med de fixa verkningsgraderna specificerade i Tabell 3 i avsnitt 4.1.

Tabell 9: Resultat ifrån tre loggade turer av den större färjan vid smul sjö.

Tur	Högsta beräknade motoreffekt [MW]	Nettoenergiförbrukning [MWh]
2021-02-15	11	23
2021-02-21	21	46
2021-02-22	21	44

Grov sjö:

I Figur 13 visas de olika turerna beräknade i grov sjö där bruttoeffekten är uttryckt som funktion av tid.



Figur 13: Stora färjans beräknade bruttoeffekt som funktion av tid vid de tre loggade turerna i grov sjö.

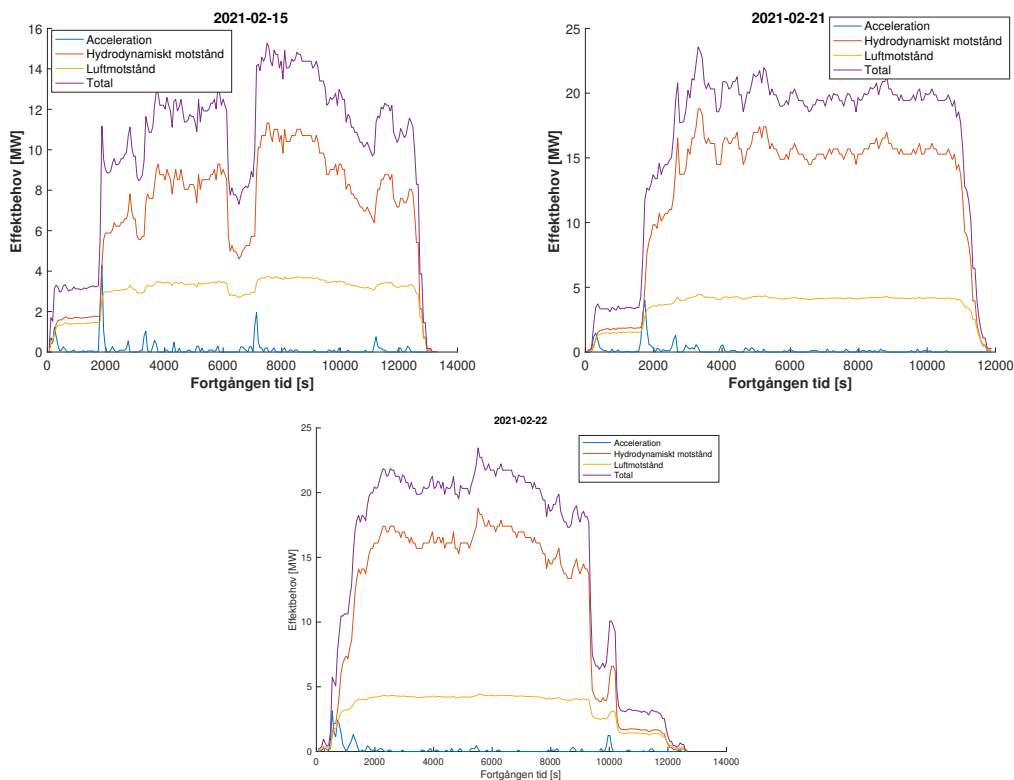
I Tabell 10 visas de beräknade motoreffekterna och totala energiförbrukningarna som krävs av batteriet under de loggade färderna genom grov sjö. Beräkningarna genomfördes med de fixa verkningsgraderna specificerade i Tabell 3 i avsnitt 4.1.

Tabell 10: Resultat ifrån tre loggade turer av den större färjan vid grov sjö.

Tur	Högsta beräknade motoreffekt [MW]	Nettoenergiförbrukning [MWh]
2021-02-15	12	29
2021-02-21	23	51
2021-02-22	22	50

Mycket svår sjö:

I Figur 14 visas de olika turerna beräknade i mycket svår sjö där bruttoeffekten är uttryckt som funktion av tid.



Figur 14: Stora färjans beräknade bruttoeffekt som funktion av tid vid de tre loggade turerna i mycket svår sjö.

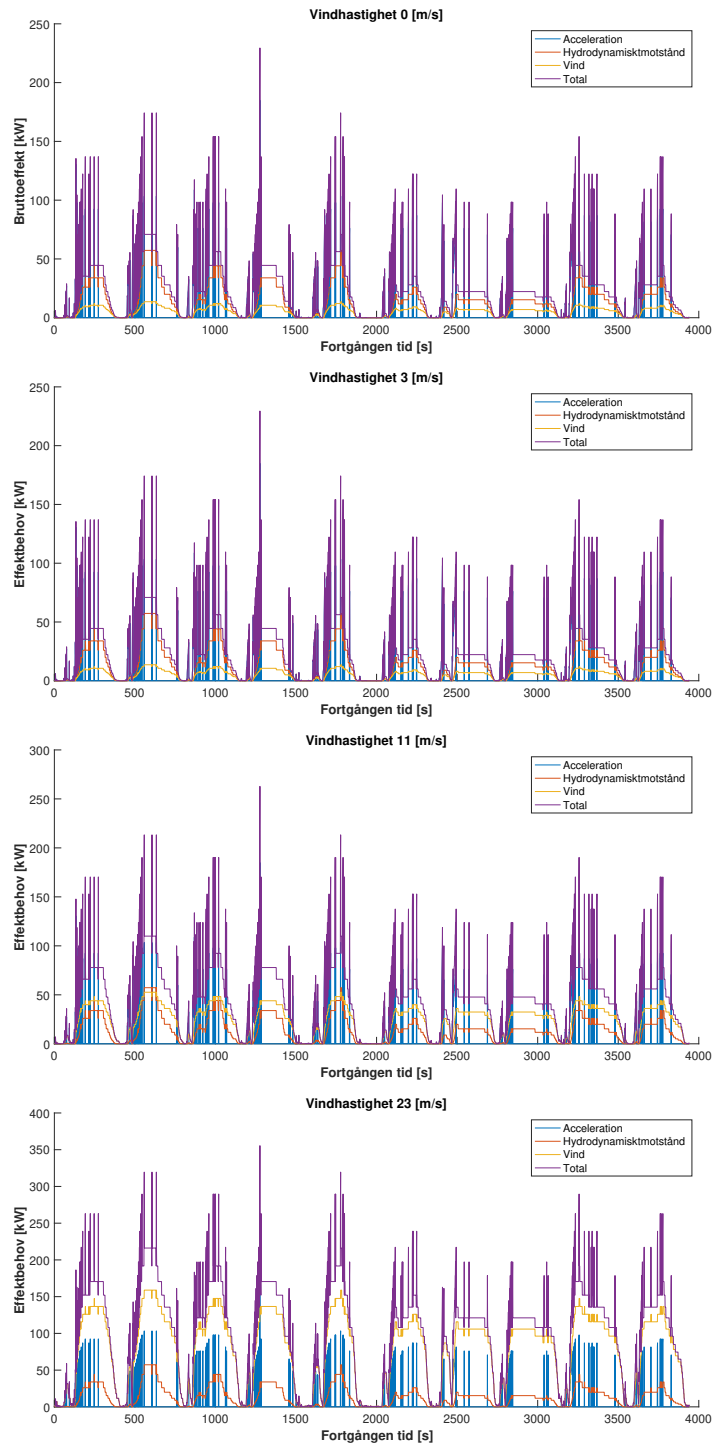
I Tabell 11 visas de beräknade motoreffekterna och totala energiförbrukningarna under de loggade färderna under mycket svår sjö. Beräkningarna genomfördes med de fixa verkningsgraderna specificerade i Tabell 3 i avsnitt 4.1.

Tabell 11: Resultat ifrån tre loggade turer av den stora färjan vid mycket svår sjö.

Tur	Högsta beräknade motoreffekt [MW]	Nettoenergiförbrukning [MWh]
2021-02-15	17	47
2021-02-21	27	66
2021-02-22	27	65

Lilla färjan

Eftersom Älvsnabben enbart kör stundtals rakt emot flödesriktningen är det ökade motståndet som konsekvens av strömmar i älven svårt att approximera. Projektgruppen har därför valt att inkludera strömmen i säkerhetsfaktorn för dimensionering då den relativa hastigheten är liten och färjan stundtals också kör medströms. I Figur 15 visas beräknad bruttoeffekten under en tur med den lilla färjan i de olika väderförhållandena.



Figur 15: Beräknad bruttoeffekt som funktion av tid under en tur med den mindre färjan i de olika väderförhållandena.

I Tabell 12 återfinns den beräknade maximala motoreffekten och energiförbrukningen i de olika beräknade väderförhållandena. Beräkningarna för nettoenergiförbrukning genomfördes med de fixa verkningsgraderna specificerade i Tabell 3 i avsnitt 4.1.

Tabell 12: Resultat ifrån loggad tur med mindre färjan.

2021-04-19	Högsta beräknade motoreffekt [kW]	Nettoenergiförbrukning [kWh]
Motvind 0 [m/s]	373	43
Motvind 3 [m/s]	382	50
Motvind 11 [m/s]	438	88
Motvind 23 [m/s]	592	196

4.2 Dimensionering av energilagringssystem, motor och omriktare

Bränsleceller och litiumjonbatterier är två mycket omtalade energilagringssystem inom fordonsmarknaden som ansågs vara lämpliga alternativ att anpassa till driften av färjorna. Dessa två energilagringssystem har jämförts med varandra med avseende på volym och vikt under projektets gång. Vilket utfördes för att ta reda på vilken som är lämpligast som energilagringssystem för den stora och den mindre färjan.

Under dimensioneringen av batteriet och bränslecellerna har data från Ballard power systems, en tillverkare av bränsleceller för maritimt bruk [48], och Teslas Panasonic 2170 celler [40] använts. Energidensiteten redovisas i Tabell 13. Då bränsleceller kräver både en vätgastank och själva cellerna har deras volym och massa räknats ut separat och sedan adderats, med värden i Tabell 14.

För att få en mer konkret bild av de dimensionerade batteriernas storlek presenteras även batterikapaciteten i antal Tesla Model S batteripaket, som har en kapacitet på 100 kWh [60]. För att dessutom få en insyn i hur många batterier som faktiskt kan produceras under en given tid kommer antalet Tesla batteripaket för den större och mindre färjan att jämföras med antalet bilar som Tesla kan producera, under en viss tid. Tesla visade sig kunna producera totalt 180 338 bilar första kvartalet 2021, dvs. cirka 60 112 bilar per månad [61]. Detta utförs för att få en överblick av vad som kan anses vara en rimlig mängd batterier produktionsmässigt.

Tabell 13: Energidensitet för Panasonic 2170 celler och vätgas.

	Energidensitet [Wh/liter]	Energidensitet [Wh/kg]
Lithiumjonbatterier [40]	711	246
Vätgas [62]	1 400	33 300

Tabell 14: Bränslecellens massa och volym.

Komponent	Massa [kg]	Volym [m ³]
Bränslecell [48]	875	1,98

Stora färjan

För den större färjan blev det maximala bruttoeffektbehovet under drift enligt simulering ungefär 27 MW, märkeffekten bör därför sättas något högre, till 30 MW för att få en säkerhetsmarginal. Denna effekt bör fördelas på två synkronmaskiner som genererar 15 MW var så att färjan kan klara sig till hamnen även om någon del av den ena drivlinan slutar fungera under resan. En synkronmaskin av den storleken som är byggd för varvtalsstyrning brukar ha en spänning mellan 4-6 kV [11].

Om en 15 MWs motor med en spänning på 4 kV används kommer således den största strömmen bli 1250 A/fas. Alltså måste man använda sig av kraftelektronik som klarar den spänningen och strömmen. Sådan kraftelektronik finns i form av moduler med IGBTs och säljs av ett flertal olika tillverkare.

Energiförbrukningen för den stora färjan som beräknats med den dynamiska modellen för olika driftsfall redovisats tidigare i Tabell 10. Därefter utförs dimensioneringen enligt aspekterna som presenterades i avsnitt 3.1.8. Energiförbrukningen i Tabell 10 ses vara 51 MWh per resa. I detta stadiet avrundades inte siffran uppåt, utan avrundningen blev i slutet av dimensioneringen. När energilagringen dimensioneras har energiförbrukningen från grov sjö använts, då det anses vara väderförhållanden färjan kommer utsättas för upprepade gånger under ett år. Efter att överdimensionering för batteri även räknats med, fås den slutliga dimensioneringen av batteriet för den stora färjan som ses i Tabell 15. Detta värde var initialt 108,6 MWh men har avrundats till 110 MWh där även 1 MWh för hotellaster har adderats.

Tabell 15: Vald energikapacitet för stora färjan. För att få en konkret bild av dimensioneringarna presenteras kapaciteten även i form av antal Tesla batteripaket.

Energilagring	Energikapacitet [MWh]	Antal Tesla batteripaket [st]
Lithiumjonbatterier	110	1 100
Bränsleceller	105	-

Massan och volymen för energilagringen blir då enligt resultatet presenterat nedan i Tabell 16. I tabellen ses att för den stora färjan är litiumjonbatterivikten på 447,1 ton. Det blir en viktökning för den större färjan på 1,55 % när man tar den stora färjans vikt från Tabell 4, dvs. displacement som omvandlas till viktenhet.

Tabell 16: Massa och volym av energilager för den stora färjan.

Energilagring	Massa [ton]	Volym [m³]
Bränsleceller (700 bar)	122,9	342,2
Litiumjonbatteri	447,1	154,7

Lilla färjan

Den mindre färjans maximala effektbehov vid drift uppgår enligt simulering till ungefär 600 kW. Effektbehovet skrivs dock upp till 700 kW så att det finns en säkerhetsmarginal om simuleringarna inte stämmer överens helt med verkligheten och större effekt behövs. Dessutom rekommenderas att dela upp effektbehovet på två 350 kW motorer så att färjan klarar att slutföra resan om en drivlina fallerar. För fartyg med effektbehov av denna storlek brukar man enligt praxis använda sig av asynkronmotorer. Asynkronmotorer som utvecklar den effekten finns att köpa med en spänning på 690 V [63]. Då fås en största ström på 507 A/fas. Även för denna ström finns det många olika tillverkare som säljer lämpliga IGBTs för omriktning.

Energiförbrukningen för den lilla färjan som beräknats med den dynamiska modellen för olika driftsfall redovisas i Tabell 12. Därefter utförs dimensioneringen enligt aspekterna som presenterades i avsnitt 3.1.8. Det värdet i Tabell 12 ses vara 88 kWh per resa, denna siffra avrundades till 100 kWh per resa. När energilagringen sedan dimensioneras har energiförbrukningen från grov sjö, dvs. 11 m/s, använts eftersom 23 m/s motvind under hela sträckan anses orealistiskt. Energilagringen ges dock marginal för att klara korta perioder under svårare omständigheter. Efter att överdimensionering för batteri även räknats med, fås den slutliga dimensioneringen av batteriet för den lilla färjan som ses i Tabell 17.

Tabell 17: Energikapacitet för den lilla färjan. För att få en konkret bild av dimensioneringarna presenteras kapaciteten även i form av antal Tesla batteripaket.

Energilagring	Energikapacitet [kWh]	Antal Tesla batteripaket [st]
Litiumjonbatterier	1 704	17,04
Bränsleceller	1 642	-

Resultatet av beräkningarna för massa och volym för energilagringen kan observeras i Tabell 18 för den mindre färjan. I tabellen ses att för den mindre färjan är litiumjonbatterivikten på 6,92 ton. Det blir en viktökning för den mindre färjan på 4,9 % när man tar den lilla färjans vikt från Tabell 5, dvs. displacement som omvandlas till viktenhet.

Tabell 18: Massa och volym av energilager för den lilla färjan.

Energilagring	Massa [ton]	Volym [m ³]
Bränsleceller	3,65	7,04
Litiumjonbatteri	6,92	2,40

4.3 Kostnadsestimering

För att genomföra en grundläggande kostnadsanalys har den fasta kostnaden för inköp av energilagringalternativen uppskattats och sedan jämförts med den rörliga kostnaden av en dieseldriven drivlina. Detta är inte menat att vara någon exakt data på priset utan ett sätt att kunna uppskatta om det är ekonomiskt rimligt att installera drivlinorna. Då syftet endast är att få en överblick har den fasta kostnaden räknats enligt ekvation (10) och (11), efter att dessa har dimensionerats utefter kraven. Övriga installationskostnader har bortsetts från, då data på dessa inte fanns tillgängligt. Batteripriset beräknas med hjälp av Bloombergs uppskattning av priset per kWh på litiumjonbatterier [64] och en studie av Inter-American Development Bank [41], redovisat i Tabell 19, tillsammans med motsvarande pris på de dimensionerade batterierna för färjorna. Priset för bränsleceller redovisas i Tabell 20, med det motsvarande priset för dimensioneringen av bränsleceller för färjorna. Priset har uppskattats med hjälp av en tidigare studie på bränsleceller [42]. Priserna har konverterats till SEK med dagens växelkurs vid uträkning, 8.59 SEK/USD och 10.19 SEK/Euro.

Tabell 19: Pris för litiumjonbatterier.

Källa	Pris per kWh [SEK]	Lilla färjans batteri [mSEK]	Stora färjans batteri [mSEK]
Batteripackspris [64]	1 176	2,01	130,8
Pris från studie [41]	5 257	8,96	579,7

Tabell 20: Pris på bränsleceller.

Pris per kW [SEK]	Effekt per enhet	Pris per enhet [SEK]	B_l [mSEK]	B_s [mSEK]
438,17 [42]	200 kW [48]	87 634 SEK	0,274	11,83

Där B_l står för bränsleceller för lilla färjan, och B_s står för bränsleceller för den stora färjan.

Den rörliga kostnaden räknas ut med ekvation (13) och (14), med verkningsgraderna från Tabell 3. Priserna som används finns i Tabell 23. Minimumpriset på vätgas var det billigaste

priset i Europa som studien av ICCT uppskattade. Medianpriset är medianen av alla deras uppskattade priser i Europa [44]. Priset på diesel kommer direkt från marknadspriset [45]. Men då elpriser varierar mycket beroende på mängden el som konsumeras består det av tre delar; marknadspriset, elskatten, och elnätsavgiften. Marknadspriset har tagits från Nordpool, den ledande börsmarknaden för el i Europa [43], skatten är den nuvarande energiskatten år 2021 [65]. Den rörliga elnätsavgiften har uppskattats med värdena i Tabell 21. Dessa värden skickades till Göteborgs energi som uppskattade vad avgiften hade blivit för de två färjorna. Summeringen av delpriser redovisas i Tabell 22.

Tabell 21: Värden vid uppskattning av elnätsavgift

Färja	Effekt [MW]	Energiförbrukning [GWh]
Lilla	0,111	0,280
Stora	37,7	53

Tabell 22: Delpriser på el

Delpris	SEK per kWh
Bruttoprisk [43]	0,46
Skatt [65]	0,441
Elnätsavgift lilla färjan [66]	0,07
Elnätsavgift stora färjan [66]	0,032
Nettopris lilla färjan	0,971
Nettopris stora färjan	0,933

Tabell 23: Priser på bränsle, taget från marknadspriser och konverterat till SEK/kWh för mekanisk effekt.

Energityp	Enhet	Pris
El lilla färjan	SEK/kWh	0,971
El stora färjan	SEK/kWh	0,933
Diesel [45]	SEK/kWh	1,68
H2 median [44]	SEK/kWh	4,10
H2 minimum [44]	SEK/kWh	1,91

Den totala kostnaden summeras sedan som den fasta kostnaden, adderat med den rörliga kostnaden. Den rörliga kostnaden är priset av den uppskattade årskonsumtionen av energi och en avskrivning av kostaden för nya batterier och bränsleceller då de når slutet av sin livstid. Detta är uträknat med ekvationerna (7) och (8). Årskonsumtionen av energi uppskattas med resultaten från dimensioneringen i Tabell 15 och Tabell 17, multiplicerat med det uppskattade antalet laddningscykler per år för färjorna, redovisat i Tabell 24. För bränslecellernas livstid har

de timmar som tillverkaren Ballard påstår att deras produkt klarar [67] använts och batterierna från en tidigare studie på litiumjonbatteriers livstid [38], och redovisas i Tabell (25). Den motsvarande mängden byten per år redovisas i 26. I uträkningarna antas batteriet hålla sig inom ett laddningstillstånd mellan 20 % och 80 %.

Tabell 24: Uppskattade laddningscykler per år

Färja	Laddningscykler per år
Stora	1 040
Lilla	350

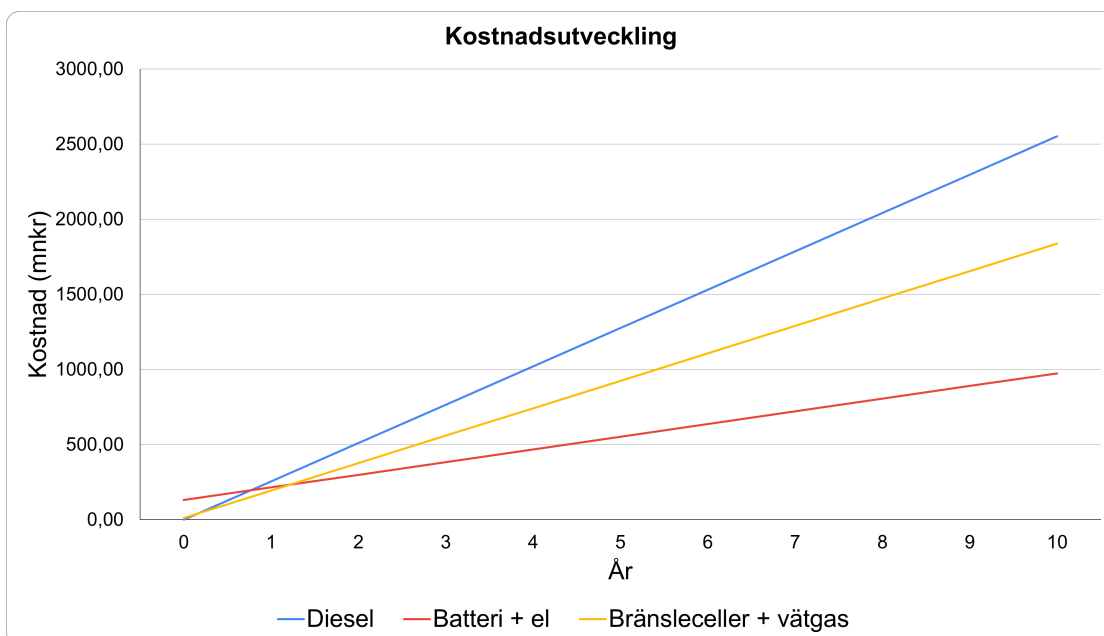
Tabell 25: Livstider för energialternativen

Energilagring	Livstid	Stora färjan	Lilla färjan
Litiumjonbatterier [38]	5 000 laddningscykler	4,81 år	14,28 år
Bränsleceller [67]	30 000 timmar	8,24 år	9,74 år

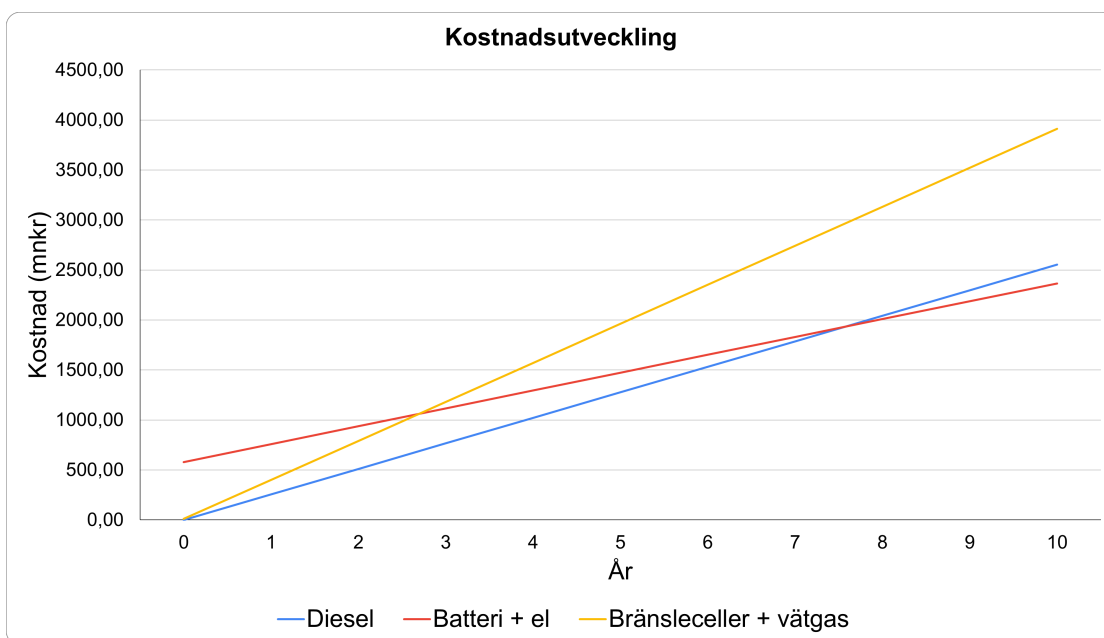
Tabell 26: Motsvarande byten per år

Energilagring	Stora Färjan [byte/år]	Lilla Färjan [byte/år]
Lithiumjonbatterier	0,21	0,07
Bränsleceller	0,12	0,1

Gällande kostnaden på energilagringalternativen finns ett flertal variabler som har stor inverkan. De siffror som har hittats på elpriser och bränsleceller har varit konstanta, men priset på litiumjonbatterier och vätgas kan variera stort, som sett i Tabell 19 och Tabell 23. Detta illustreras i Figur 16-19 nedan, där vätgaspriset har varierats mellan minimipriset och medianpriset i från det studien har baserats på. Batteripriset har varierats mellan ett billigare pris på marknaden för batteripack och det uppskattade priset för litiumjonbatterier i maritimt bruk från studien.



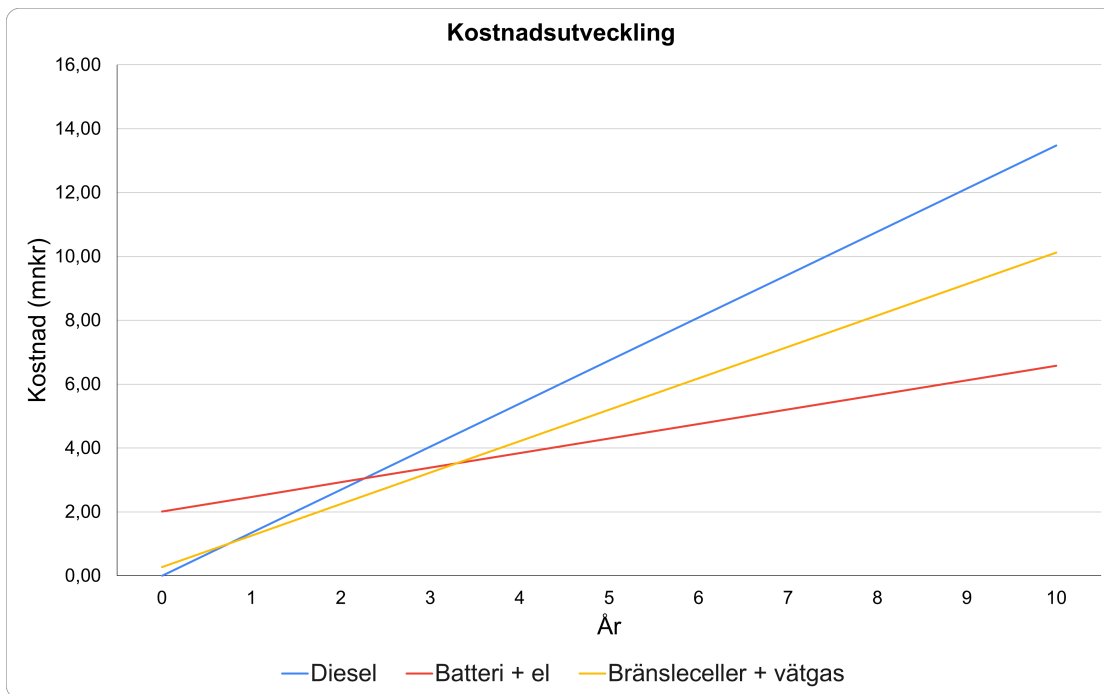
Figur 16: Kostnadsanalys för den större färjan med hänsyn till det billigare priset för batteripack(1176 kr/kWh i lagringskapacitet) och vätgas(1,91 kr/kWh energi).



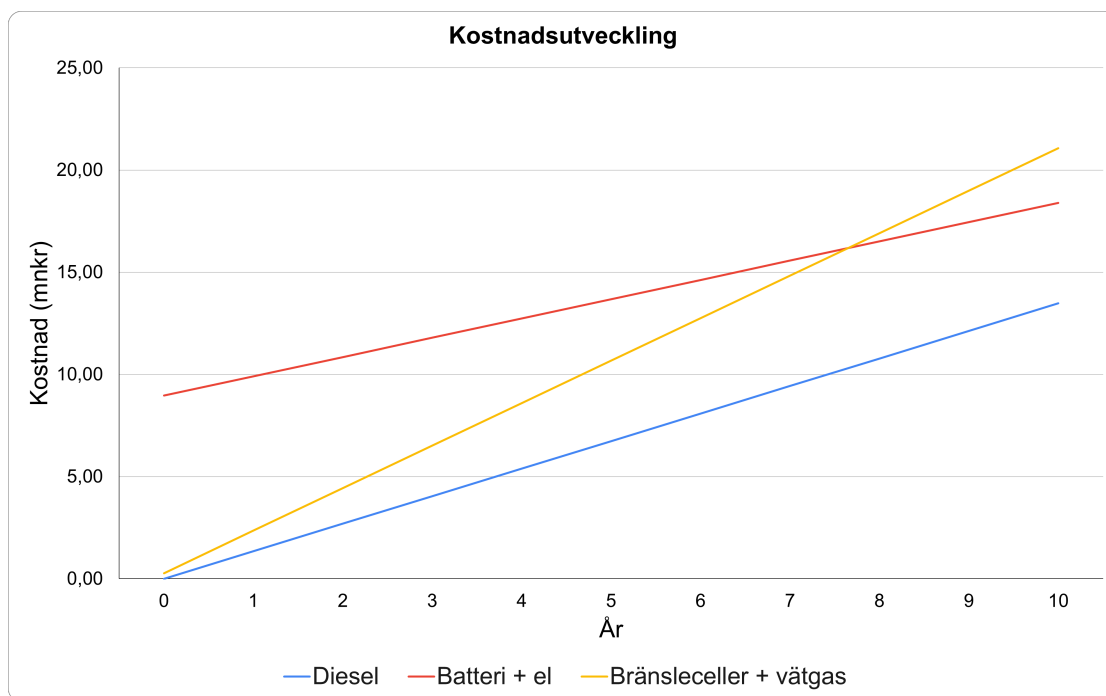
Figur 17: Kostnadsanalys för den större färjan med hänsyn till det dyrare priset (5257 kr/kWh i lagringskapacitet) för batteripack och vätgas (4,10 kr/kWh i energi).

Från Figur 16 och 17 ser man att batterier förväntas bli lönsamt efter 1-7 år. Intervallet blir stort, då priset för litiumjonbatterier dominerar den fasta kostnaden, och har inverkan på den

rörliga pga. batteribyten. Bränsleceller förväntas bli lönsamt efter ett halvt år i det billigare fallet, men blir aldrig lönsamt i fallet av ett högre pris.



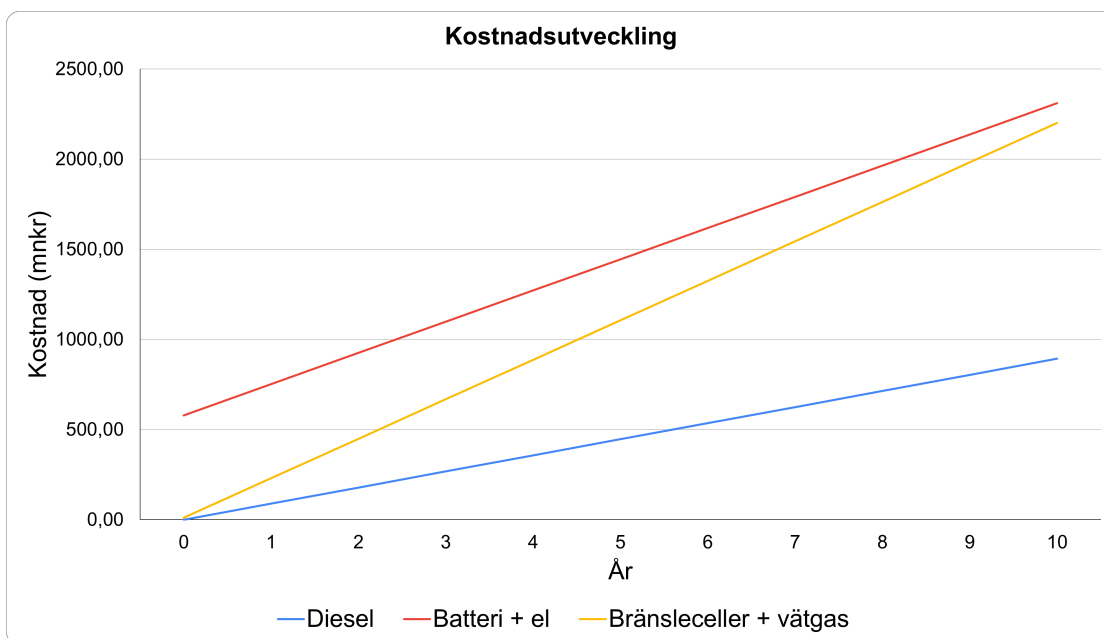
Figur 18: Kostnadsanalys för den mindre färjan med hänsyn till det billigare priset (1176 kr/kWh i lagringskapacitet) batteripack och vätgas (1,91 kr/kWh i energi).



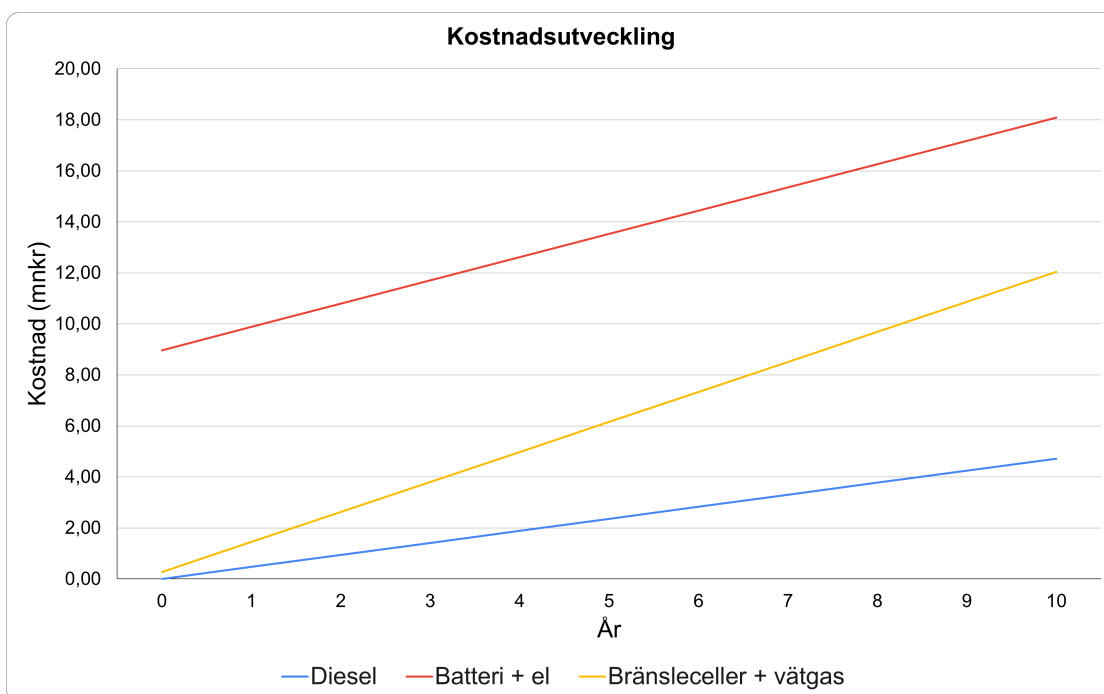
Figur 19: Kostnadsanalys för den mindre färjan med hänsyn till det dyrare priset för batteripack (5257 kr/kWh i lagringskapacitet) och vätgas (4,10 kr/kWh i energi).

Från Figur 18 och 19 ser man att batterier förväntas bli lönsamt efter 2-21 år. För det dyrare priset syns detta ej i grafen men om lutningar jämförs så korsar de efter ungefär 21 år. Även här blir intervallet stort, då priset för litiumjonbatterier dominerar den fasta kostnaden, och har inverkan på den rörliga pga. batteribyten. Eftersom den lilla färjan konsumerar mindre bränsle blir intervallet större än för den stora färjan då batteriet utgör en större andel av den totala kostnaden. Bränsleceller förväntas bli lönsamt efter ett år i det billigare fallet, men blir aldrig lönsamt i fallet av ett högre pris.

I Figur 20 och 21 presenteras kostnaden om man inte skulle ta hänsyn till de olika energilagringensalternativens egna verkningsgrad. Detta illustrerar enkelt hur viktigt verkningsgraden är för energilagringensalternativen, då resultat hade blivit helt annorlunda om alternativen delade verkningsgrad. Dessa figurer använder priserna från Figur 17 och Figur 19.



Figur 20: Kostnadsanalys för den större färjan utan hänsyn till energilagringens verkningsgrad vid drift.



Figur 21: Kostnadsanalys för den mindre färjan utan hänsyn till energilagringens verkningsgrad vid drift.

4.4 Val av komponenttyper och energilager

Utifrån kostnadsresultatet för den stora och lilla färjan konstaterades att det är litiumjonbatterier som har lägst kostnad över tid jämfört med bränsleceller. Det är även det mest energieffektiva alternativet, som redovisas i Tabell 3. För den stora färjan ses i Tabell 16, och för den mindre färjan i Tabell 18, att litiumjonbatterier tar upp mindre utrymme ombord, även om den väger mer än bränslecellerna. Vikten anses däremot inte vara ett problem eftersom det utgör en så liten del av färjornas totala vikt. Från detta resultat blir därmed den rekommenderade dimensioneringen för den stora och lilla färjan baserat på litiumjonbatterier som energilager framöver i studien.

4.4.1 Batteriuppsättning

När det kommer till batteriets uppsättning av celler följer här ett exempel på hur många celler som behövs och hur de behöver kopplas om man använder litiumjoncellen NCR21700A från Panasonic. En sådan cell har en spänning på 3,7 V och en energikapacitet på 18,5 Wh [40].

För den större färjans batteri vars kapacitet enligt Tabell 15 ska uppgå till 110 MWh behövs 5 945 946 st celler. För att uppnå den önskade spänningen på 1000 V behövs 270 st celler i serie vilket ger en exakt spänning på 999 V. Seriekopplar man 271 celler fås spänningen 1002,7 V vilket är en större avvikelse från det önskade värdet, varför 270 st celler används. Om man dividerar det totala antalet celler med antalet celler i serie får man att 22 022,022 sådana serier behövs parallellkopplade med varandra. Avrundar man ner det till 22 022 serier fås ett nytt totalt antal celler, 5 945 940, vilket ger en slutgiltig kapacitet på batteriet som uppgår till 109,999 MWh, alltså en försumbar skillnad gentemot den önskade kapaciteten 110 MWh.

För den mindre färjan är den önskade spänningen hos batteriet den samma eftersom dimensioneringen utgår ifrån att båda färjorna har ett DC-nät ombord med en systemspänning på 1000 V. 270 celler i serie kommer således användas även här. För att uppnå den efterfrågade kapaciteten på 1,7 MWh behövs totalt 91 892 st celler. Detta ger 340,34 serier med celler vilket bör justeras upp till 341 st serier. Då ges det slutgiltiga totala antalet vilket blir 92 070 st celler. Det resulterar i ett batteri med kapaciteten 1,703 MWh. Alternativt kan man välja att avrunda antalet serier ner till 340 vilket ger ett batteri med kapaciteten 1,698 MWh vilket bör vara acceptabelt eftersom batteriet redan är något överdimensionerat på grund av säkerhetsskäl.

4.4.2 Laddningseffekt

Batteriet för den större färjan är dimensionerad för att klara en tur från Göteborg till Fredrikshamn. Mellan varje sträcka ligger båten i hamnen i 1,5 timmar. Under denna tiden behöver man därmed ladda batteriet med den energimängd som går åt vid drift, dvs. energiförbrukningen för färjan under en tur vid grov sjö från Tabell 10, som blev 51 MWh där hotellasten på 1 MWh

adderas. Effekten som behöver laddas efter att man dividerat med verkningsgraden för batteriet, se Tabell 3, blev 57,8 MW. Dividerar man denna energiförbrukningen med tiden i hamnen (1,5 h) får man att effekten som behöver uppnås är 38,52 MW. Snabbladdare för fartyg av denna storleken är ovanliga men det finns en att jämföra med i Helsingborg som används för färjorna som trafikerar sträckan Helsingborg - Helsingör. Där används en effekt på 10 MW som alltså klarar att ladda den större färjan batteri på 5,1 h [68]. Om batteridrivna fartyg av denna storlek ska bli vanligt förekommande behövs därför ny infrastruktur som använder högre spänningar utvecklas för att minimera värmeutveckling och förluster till följd av väldigt stora strömmar.

För den mindre färjan är batteriet dimensionerat för att klara alla resor under en dag och antas ladda under natten, varav den antas laddas på 8 timmar. Under denna tiden behöver man därmed ladda batteriet med den energimängd som går åt vid drift, dvs. energibehövet för färjan vid grov sjö, från Tabell 12, som ses vara 88 kWh. Som det presenterades under avsnitt 4.2, så avrundades 88 kWh till 100 kWh, varav 100 kWh används i detta fall. Eftersom den lilla färjan under en dag som brukar färdas 8 turer, blev den totala energiförbrukningen innan laddning 800 kWh. Laddningseffekten som krävs blir därmed energiförbrukningen dividerat med batteriernas verkningsgrad från Tabell 3 och med de 8 timmarna färjan kan laddas på, vilket blev 111 kW. För elektrifierade båtar i denna storleksklass används ofta lågspänningsnätet. Fördelen med att kunna använda lågspänningsnätet direkt är att man inte behöver transformera spänningen eller dra nya kablar från en del av elnätet där spänningen är högre. Laddare för elektriska fordon med denna laddeffekt är redan vanligt förekommande bland annat för elbilar.

4.5 Beräkning av utsläpp

Nedan presenteras resultatet från miljöanalysen, där konventionell drift jämförs med helelektrisk drift för båda färjorna, där drift endast avser färjornas framdrift. Beräkningarna nedan utgår från färjornas officiella bränsleförbrukning. I den konventionella driften beräknas utsläppen som sker vid förbränningsprocessen av drivmedlet medan i den helelektriska driften beräknas utsläppen som sker till följd av el- och batteriproduktion. Slutligen sker en jämförelse av de konventionella och helelektriska utsläppen som sker under tio år för respektive färja.

4.5.1 Konventionell drivlina

Nedan presenteras resultatet för utsläppen av CO₂, NO_x och SO_x från den större och mindre färjan med avseende på konventionell drift under ett år. Eftersom utsläppsberäkningarna sker med avseende på färjornas framdrift beräknas bränsleförbrukningen som hotellaster på den stora färjan kräver. Denna beräkning utförs inte på den mindre färjan eftersom dess hotellaster som krävs av en färja av den storleken anses vara förhållandevis små.

Större färjan

För att beräkna utsläppen som den större färjan bidrar med vid konventionell drift samlades data in angående färjans årliga bränsleförbrukning, och relevanta bränsleparametrar vars värden presenteras med källor i Tabell 27. Där presenteras Stena Danicas årliga bränslekonsumtion från 2019, som presenterades av European Maritime Safety Agency (EMSA). Det är en organisation vars arbete, utöver att arbeta för en säker sjöfart, inom den Europeiska Unionen är att minska miljöpåverkan av den marina sektorn. Denna bränsleförbrukning ligger till grund för beräkningarna av utsläppen vid konventionell drift. EMSA presenterar även deras egna värde på Stena Danicas CO₂-utsläpp, som var 36 315,31 ton [69] under 2019, vilket har använts som rimlighetskontroll för de beräknade CO₂-utsläppen av den stora färjans vid konventionell drift i studien.

Emissionsfaktorerna EMEP/EEA och IMO utgår från ekvation (18). Innan den ekvationen kan användas för att beräkna utsläppen för den stora färjan måste bränsleförbrukningen till följd av hotellaster beräknas enligt ekvation (16) och ekvation (17). Värdet på energin som hotellaster kräver per resa hämtades från kapitel 3.1.8 och från Tabell 24 hämtades antal resor per år. Bränsleförbrukningen för hotellaster beräknades bli 134.9 ton. Därefter subtraherades den beräknade bränsleförbrukning för hotellaster från årsförbrukningen, det resulterande värdet ses i Tabell 27. Efter att bränsleförbrukningen med avseende på endast framdrift beräknats, används ekvation (18) med emissionsfaktorerna från EMEP/EEA och IMO enligt Tabell 28.

Tabell 27: Insamlad och beräknad data som används vid beräkningen av utsläpp vid konventionell drift för den större färjan. Den stora färjan antas drivas med MGO som parametrarna nedan representerar. Energiinnehållet i [kWh/kg] är omvandlat utifrån energiinnehållet i [kJ/kg].

Data	Värde	Enhet
Årlig bränslekonsumtion [69]	11 486	ton
Bränslets densitet [70]	860	kg/m ³
Bränslets energiinnehåll [71]	42 700	kJ/kg
Bränslets energiinnehåll	11,86	kWh/kg
Bränslets värmevärde	36,72	GJ/m ³
Årlig bränslekonsumtion utan hotellaster	11 351	ton
Årlig bränslekonsumtion i volym	13 199	m ³

Vid nästa steg utfördes beräkningarna med emissionsfaktorerna från Naturvårdsverket, vilka ska beräknas med ekvation (20). Denna metod inleddes med att beräkna värmevärdet enligt ekvation (21), värden hämtades från Tabell 27. Sedan omvandlades den totala bränsleförbrukningen, se Tabell 27, till volymenhet enligt ekvation (22). Slutligen beräknades utsläppen med ekvation (20) med Naturvårdsverkets emissionsfaktorer, se Tabell 28, bränslets volymenhet och värmevärde enligt Tabell 27.

I Tabell 29 presenteras beräknade utsläpp av CO_2 , NO_x och SO_x från den större färjan som sker under ett år. Där presenteras dessutom medelvärdet som används vid jämförelsen av konventionell och helelektrisk drift i kapitel 4.5.3.

Tabell 28: Emissionsfaktorer för den större färjan vid konventionell drift. Källan EMEP/EEA anger generella emissionsfaktorer. Värden från källan IMO är anpassade efter bl.a. grundläggande emissionsfaktorer och MDO (Marine Diesel Oil) samt tier 0 för långsamma fartyg medan emissionsfaktorn för svavel är beräknad utifrån SECA-krav. Det motsvarande för Naturvårdsverket är förbränningsolja klass 2, då MGO anses vara av den klassen [72], för inrikes sjöfart.

Källa	Enhet	Emissionsfaktor		
		CO_2	NO_x	SO_x
EMEP/EEA [73]	kg/ton bränsle	-	78,5	2
IMO [74]	kg/ton bränsle	3 206	87,25	1,955
Naturvårdsverket [75][76]	kg/GJ	77,61	1,18	0,046

Tabell 29: Utsläpp från den större färjan per år vid konventionell drift varav medelvärdet av utsläppen används i jämförelsen mellan konventionell och helelektrisk drift i kapitel 4.5.3.

Källa	Utsläpp [ton]		
	CO_2	NO_x	SO_x
EMEP/EEA	-	891,06	22,70
IMO	36 391,64	990,38	22,19
Naturvårdsverket	37 618,08	571,94	22,30
Medelvärde	37 004,86	817,79	22,40

Mindre färjan

För att beräkna utsläppen som den mindre färjan bidrar med vid konventionell drift samlades data in angående färjan, se värden med källor i Tabell 30. Där presenteras bl.a. Älvsnabbens bränsleförbrukning per år som erhöles från ett examensarbete som fått informationen från Styröbolaget. Denna årsförbrukning används som utgångspunkt vid beräkningarna av utsläpp till följd av konventionell drift. I den angivna bränsleförbrukningen för den mindre färjan antas den totala mängden drivmedel vara för framdrivning, dvs. ingen beräkning av bränsleförbrukning till följd av hotellaster sker jämfört med den stora färjan. Däremot angavs bränsleförbrukningen i en volymenhet, vilket innebar att den omvandlades till viktenhet enligt ekvation (19) med tillhörande värden från Tabell 30.

Utsläppen med emissionsfaktorerna från källorna EMEP/EEA och IMO beräknas med ekvation (18), med emissionsfaktorerna från Tabell 31 och med den årliga bränslekonsumtionen från Tabell 30.

Tabell 30: Insamlad data för beräkning av utsläpp för den mindre färjan. Den stora färjan antas drivas med diesel miljöklass 1 som parametrarna nedan representerar. Energiinnehållet i [kWh/kg] är omvandlat utifrån energiinnehållet i [kJ/kg].

Data	Värde	Enhet
Årlig bränslekonsumtion [77]	173 786	L
Bränslets densitet [58]	840	g/L
Bränslets energiinnehåll [58]	42 700	kJ/kg
Bränslets energiinnehåll	11,86	kWh/kg
Bränslets värmevärde	35,87	GJ/m ³
Årlig bränslekonsumtion	146,0	ton
Årlig bränslekonsumtion i volym	173,8	m ³

Vid nästa steg utfördes beräkningarna med emissionsfaktorerna från Naturvårdsverket, vilka ska beräknas med ekvation (20). Denna metod inleddes med att beräkna värmevärdet enligt ekvation (21), med tillhörande värden från Tabell (30). Sedan omvandlades den totala bränsleförbrukningen till volymenhet enligt ekvation (22), med tillhörande värden från Tabell 30. Slutligen beräknades utsläppen med ekvation (20) med Naturvårdsverkets emissionsfaktorer, från Tabell 31, och bränslets volymenhet, se Tabell 30.

Tabell 31: Emissionsfaktorer för den mindre färjan vid konventionell drift. Källan EMEP/EEA anger generella emissionsfaktorer. Värden från källan IMO anpassade efter är grundläggande emissionsfaktorer och MDO samt tier 2 för medelsnabba fartyg medan faktorn för svavel är beräknad utifrån SECA-krav. Medan det motsvarande för Naturvårdsverket är diesel för inrikes sjöfart.

Källa	Enhet	Emissionsfaktor		
		CO ₂	NO _x	SO _x
EMEP/EEA [73]	[kg/ton bränsle]	-	78,5	2
IMO [74]	[kg/ton bränsle]	3 206	48,96	1,955
Naturvårdsverket [75][76]	[kg/GJ]	72,01	0,83	0,036

I Tabell 32 presenteras beräknade utsläpp av CO₂, NO_x och SO_x från den mindre färjan som sker under ett år. Där presenteras dessutom medelvärdet som används vid jämförelsen av konventionell och helelektrisk drift i kapitel 4.5.3.

Tabell 32: Utsläpp från den mindre färjan per år vid konventionell drift varav medelvärdet av utsläppen används vid jämförelsen i jämförelsen mellan konventionell och helelektrisk drift i kapitel 4.5.3.

Källa	Emissioner [ton]		
	CO ₂	NO _x	SO _x
EMEP/EEA	-	11,46	0,292
IMO	468,0	7,15	0,291
Naturvårdsverket	448,9	5,17	0,224
Medelvärde	458,4	7,927	0,269

4.5.2 Helelektrisk drivlina

För att kunna jämföra den helelektriska med den konventionella drivlinan med avseende på utsläpp så har CO₂, SO_x och NO_x utsläpp beräknats med hänsyn till elproduktionen, som kan tänkas ladda färjorna, och även utsläppen relaterade till batteriproduktionen av litiumjonbatterier. Dessa beräkningar sker med avseende på färjornas framdrift under en tidsperiod på ett år. Resultatet presenteras nedan.

Utsläpp från elproduktion

För att beräkna utsläppen som färjorna bidrar med vid elproduktionen, som krävs för att ladda batterierna ombord färjan, omvandlas färjornas bränsleförbrukning till likvärdig energi med hjälp av ekvation (23) och parametrar angående verkningsgrader från Tabell 3, bränsleförbrukning samt energiinnehåll för den stora färjan, från Tabell 27, och motsvarande för lilla färjan, från Tabell 30. Detta resultat presenteras i Tabell 33, varav dessa värden ingår i ekvation (24) med emissionsfaktorer från Tabell 34 för att beräkna utsläppen som sker vid elproduktionen. I Tabell 34 presenteras fyra olika emissionsfaktorer eftersom vilken elektricitet som batterierna laddas med är osäker. Elproduktionen kan vara endast svensk eller även komma från de andra nordiska länderna. Vilket innebär att fler aspekter beaktas i studien för att få en mer övergripande bild. Resultatet från denna beräkning ses för den större färjan i Tabell 35 och för den mindre färjan i Tabell 36. I tabellerna beräknas dessutom ett medelvärde ut av respektive emission för färjorna som används vid jämförelsen av konventionell och helelektrisk drift i kapitel 4.5.3.

Tabell 33: Beräknad årlig energiförbrukning vid helelektrisk drift utifrån färjornas bränsleförbrukning med avseende på framdrift.

Färja	Energi [kWh/år]
Stora	58 015 208
Lilla	746 101

Tabell 34: Emissionsfaktorer för koldioxid, kväveoxider och svaveldioxid för nordisk samt svensk elproduktion

Källa	Elproduktion	Årtal	Enhet	Emissionsfaktor		
				CO ₂	NO _x	SO _x
Naturvårdsverket/SMED [78]	Nordisk	2016-2018	g/kWh	90,4		
Stockholms stad [79]	Nordisk	2018-2019	g/kWh	60		
IVL [80]	Svensk	2002	g/kWh	23	0,058	0,042
Energiföretagen [81]	Svensk	2016	g/kWh	14	0,026	0,011

Tabell 35: Utsläpp från elproduktion för den stora färjan. Medelvärdet används vid jämförelsen i kapitel 4.5.3.

Källa	Utsläpp [ton]		
	CO ₂	NO _x	SO _x
Naturvårdsverket/SMED	5 245		
Stockholms stad	3 481		
IVL	1 334	3,37	2,44
Energiföretagen	812	1,51	0,64
Medelvärde	2 718	2,44	1,54

Tabell 36: Utsläpp från elproduktion för den lilla färjan. Medelvärdet används vid jämförelsen i kapitel 4.5.3.

Källa	Utsläpp [ton]		
	CO ₂	NO _x	SO _x
Naturvårdsverket/SMED	67,5		
Stockholms stad	44,8		
IVL	17,2	0,0433	0,0313
Energiföretagen	10,5	0,0194	0,0082
Medelvärde	35,0	0,031	0,020

Utsläpp från batteriproduktion

Utsläppen till följd av batteriproduktionen för den större och mindre färjan beräknades enligt ekvation (25). Värden för energikapaciteten för den större färjan hämtades från Tabell 15 och för den mindre färjan från Tabell 17, medan emissionsfaktorer för batteriproduktion användes från Tabell 37 för båda färjorna. Resultatet från beräkningarna ses i Tabell 38.

I Tabell 37 noteras att emissionsfaktorerna för SO_x varierar inom ett större intervall. Detta kan bero på att olika källor grundar sig på olika batterikemi, där speciellt variation i andel nickel

kan ge stort utslag i SO_x -utsläppen [82].

Tabell 37: Emissionsfaktorerna från produktionslinjen av litiumjonbatterier till elektriska fordon presenteras i tabellen. Från källan IVL ses ett medelvärde av ett intervall på 61 - 106 kg/kWh. Argonne national laboratory är förkortat som ANL nedan.

Källa	Årtal	Enhet	Emissionsfaktorer		
			CO ₂	NO _x	SO _x
IVL [83]	2019	[kg/kWh]	83,5		
MPDI [84]	2020	[kg/kWh]		0,11	
MPDI/ANL [85] [84]	2010/2020	[kg/kWh]			0,2 - 1,2

Tabell 38: Utsläpp från produktionen av litiumjonbatterier som används vid jämförelsen i kapitel 4.5.3.

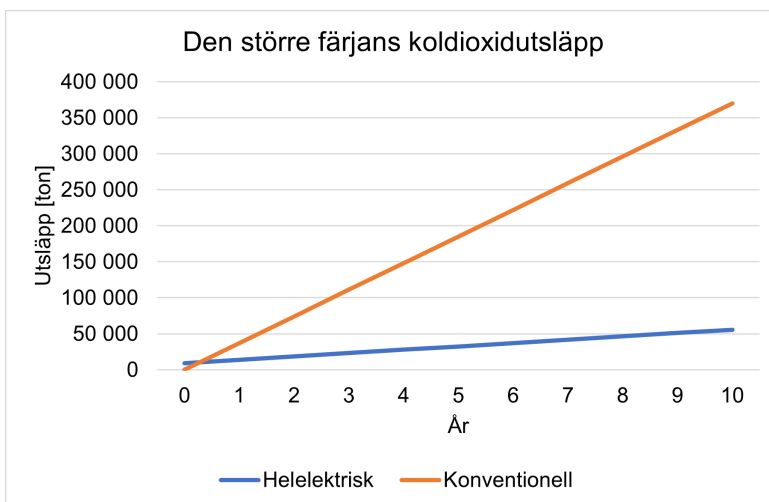
Färja	Utsläpp [ton]			
	CO ₂	NO _x	SO _{x,min}	SO _{x,max}
Stora	9 185,0	12,1	22,0	132,0
Lilla	142,0	0,187	0,34	2,04

4.5.3 Jämförelse av konventionell och helelektrisk drivlina

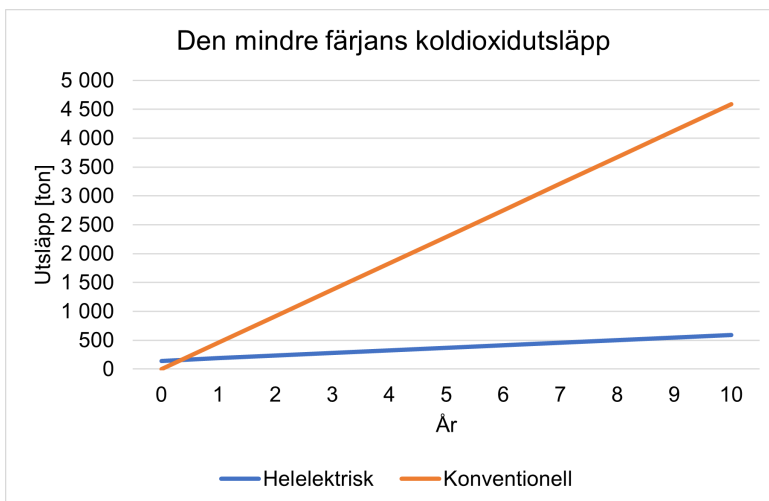
Nedan presenteras miljöanalysen av den större och mindre färjan med helelektrisk och konventionell drift under en tioårsperiod. Under år noll sker installationen av batteripaketet på den helelektriska drivlinan och därefter sker ett kontinuerligt utsläpp av elproduktionen samt en jämn fördelning av framtida batteribyten. Detta ingår i alla figurer, dvs. att utsläppen från framtida batteribyten delas upp och fördelas jämnt under åren framöver. Detta sker med hjälp av faktorerna för litiumjonbatterier i Tabell 26 som multipliceras med batteriproduktionen och adderas såsom elproduktionen varje år, utom år 0. Det innebär att Tabell 38 ger startpunkten för de tre emissionerna av den helelektriska driften som visas i Figur 22 till 27. Åren därpå adderas utsläppen från elproduktionen i form av ett medelvärde för den stora och mindre färjan från Tabell 35 och Tabell 36. Den konventionella drivlinan antas inte bidra till utsläpp under år 0 eftersom färjorna redan är i drift och startar därmed på 0 kg. Sedan bidrar den konventionella drivlinan kontinuerligt med utsläpp per år där värden för den större färjan tas från Tabell 29 och för den mindre från Tabell 32, dvs. medelvärdet från respektive emission.

I studien beräknas CO₂-utsläppen minska markant till följd av att en konventionell drivlina ersätts med en batteridriven helelektrisk drivlina. Inledningsvis bidrar dock batteriproduktionen till en större mängd CO₂, se Figur 22 och Figur 23. För den stora färjan minskar koldioxidutsläppet med 63 % och motsvarande för den mindre färjan är 59 % under år 1 när helelektrisk drift implementerats. Därefter fortsätter utsläppen vid konventionell drift öka mycket snabbare jämfört

med helelektrisk drift. Under en period på tio år minskar CO₂-utsläppen för den stora färjan med 85 % medans samma tidsintervall för den mindre färjan ger en minskning på 87 %.

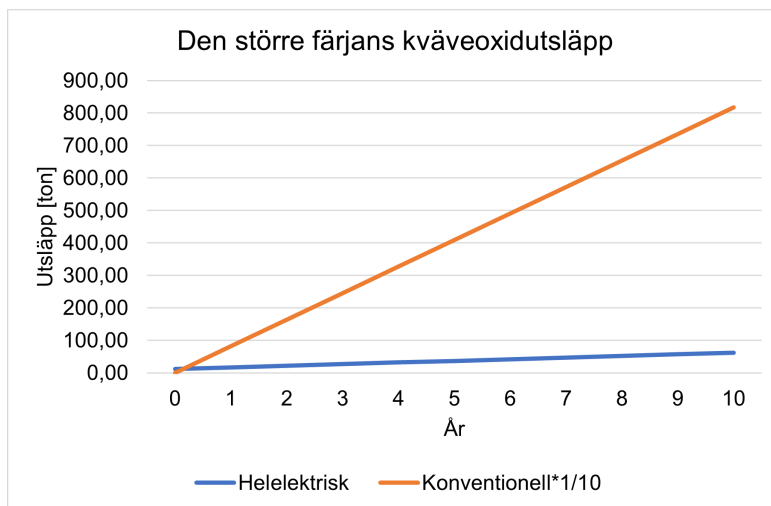


Figur 22: I figuren ses den totala mängden CO₂ som den större färjan släpper ut under tio år med avseende på helelektrisk och konventionell drift.

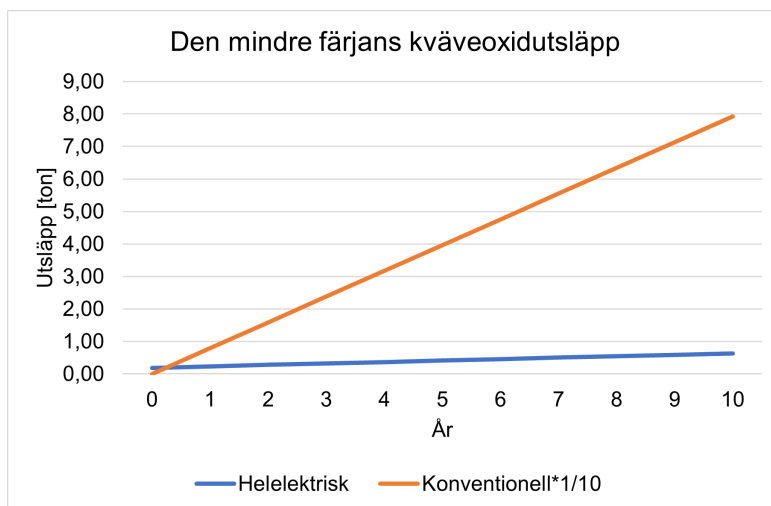


Figur 23: Den totala mängden CO₂ som den mindre färjan släpper ut under tio år med avseende på helelektrisk och konventionell drift.

Precis som CO₂-utsläppen beräknas även NO_x-utsläppen minska i studien, se Figur 24 och Figur 25. I båda figurerna har dessutom en nedskalning av utsläppen för den konventionella driften gjorts eftersom dess utsläpp är väldigt mycket större än för den helelektriska driften. Under en period på 10 år beräknas NO_x-utsläppen minska med 99 % för både den stora färjan den mindre färjan.



Figur 24: Den totala mängden NO_x som den större färjan släpper ut under tio år med avseende på helelektrisk och konventionell drift. Utsläppet av NO_x från den helelektriska driften är förhållandevis liten jämfört med den konventionella, därav har utsläppen vid konventionell drift skalats till att endast visa en tiondel av sitt riktiga värde i figuren.

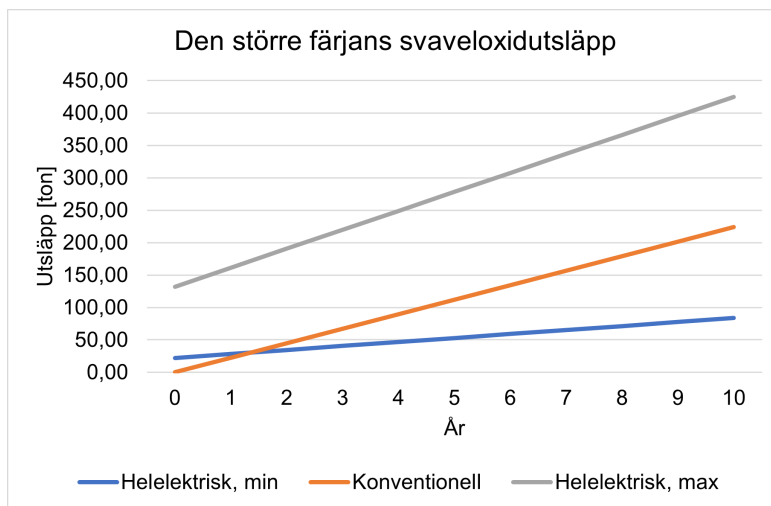


Figur 25: Den totala mängden NO_x som den mindre färjan släpper ut under tio år med avseende på helelektrisk och konventionell drift. Utsläppet av NO_x från den helelektriska driften är förhållandevis liten jämfört med den konventionella, därav har utsläppen vid konventionell drift skalats till att endast visa en tiondel av sitt riktiga värde i figuren.

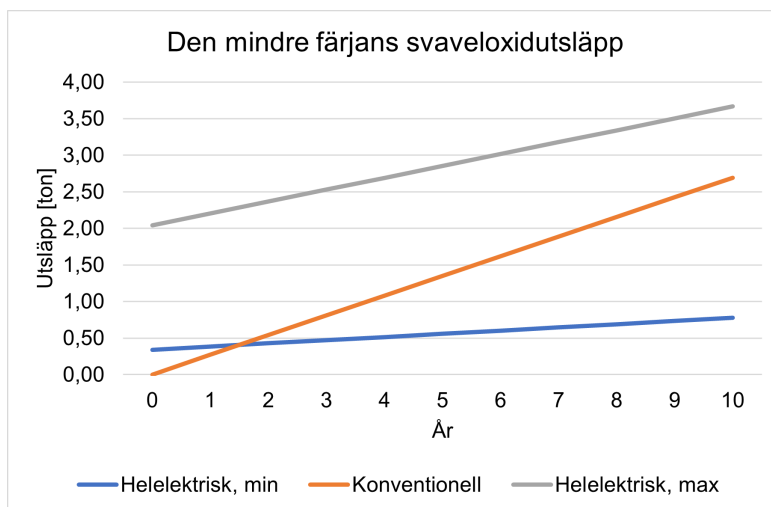
I Figur 26 och 27 ses de beräknade totala utsläppen för den stora och mindre färjan av svaveloxider under en period av tio år. På tio år beräknas SO_x -utsläppen för den stora färjan med den minsta emissionsfaktorn minska med 63 %. Med den största emissionsfaktorn ökar istället utsläppen med 90 %. För den större färjan ses det i fallet med den minsta emissionsfaktorn ta cirka ett och ett halvt år innan helelektrisk drift blir lönsam, medan för den högsta emissionsfak-

torn inte kommer kunna bli mer lönsamt, eftersom utsläppen med elektrisk drift ökar i snabbare takt än med konventionell drift.

På tio år beräknas SO_x -utsläppen för den lilla färjan med den minsta emissionsfaktorn minska med 71 %. Med den största emissionsfaktorn ökar utsläppet med 36 %. För den större färjan ses i fallet med den minsta emissionsfaktorn ta cirka ett och ett halvt år innan helelektrisk drift blir lönsam, medan för den högsta emissionsfaktorn inte syns i figuren men enligt beräkningar tar det runt 19 år.



Figur 26: Den totala mängden SO_x som den större färjan släpper ut under tio år med avseende på helelektrisk och konventionell drift, där minimum och maximum beror på emissionsfaktorn från batteriproduktionen.



Figur 27: Den totala mängden SO_x som den mindre färjan släpper ut under tio år med avseende på helelektrisk och konventionell drift, där minimum och maximum beror på emissionsfaktorn från batteriproduktionen.

4.6 Etiska frågor

I takt med att efterfrågan av litiumjonbatterier ökar kommer brytningen av metaller som batterier, bl.a. litium och kobolt, består av också att tillta. Utvinningen av dessa metaller sker i bl.a. Chile och Demokratiska Republiken Kongo [86]. Just Demokratiska Republiken Kongo anses vara den största leverantören av kobolt som därefter skickar metallen till Kina där den bearbetas ytterligare [87]. Det har i brytningsprocessen av bl.a. kobolt framkommit i uppmärksammade fall att barnarbete utförs. Det innebär att dessa barn inte alltid går till skolan utan arbetar utan skydd med att samla in, sortera och tvätta metallstenarna.

Stora delar av all metall samlas in egengrävda tunnlar där folk arbetar utan någon ordentlig skyddsutrustning [87]. Om brytningen av kobolt sker utan skyddsutrustning så andas arbetarna in koboltpartiklar och har direktkontakt med metallen mot huden som under en längre tid kan leda till att brytarbetarna drabbas av hud- och lungsjukdomar. Dessa tunnlar saknar ofta säkerhetsutrustning vilket innebär att tunnlarna saknar bl.a. ventilation och kan kollapsa utan förvarning. Det har under åren 2014 och 2015 rapporterats flera fall där det börjat brinna i tunnlar samt att de har kollapsat vilket lett till att flera personer förlorat livet [87].

5 Diskussion

I detta kapitel diskuteras rimligheten gällande resultatet av den dynamiska modellen. Här förs det även diskussion angående resultatet av dimensioneringarna, med tillhörande energiförbrukning och kostnad. Följt av presentation av miljöfrågor och etiska aspekter vid en omställning från konventionell till helelektrisk drift. Slutligen presenteras rekommendationer för framtida arbete och undersökningar som kan genomföras inom elektrifieringen av sjöfarten.

5.1 Rimlighetsbedömning av dynamisk modell

Att göra en klassisk känslighetsanalys där man ändrar en eller några parametrar i den dynamiska modellen är svårt eftersom de allra flesta parametrar beror med okända faktorer på andra parametrar. Ett exempel på detta är fartygens massa. Om massan ändras måste också parametrar som skrovets våtlagda yta, den undanträngda volymen vatten, djupgående med mera ändras. Dessa måste ändras i relation till varandra eftersom proportionerna måste vara rätt. Detta för att hålla sig inom modellens begränsningsintervall därför har gruppen valt att inte göra en känslighetsanalys.

Genom att jämföra de beräknade motoreffekterna med färjorna som inspirerat studien, och deras nuvarande körsätt, har rimligheten av studiens resultat kunnat uppskattas. Att motoreffekten för den stora färjan från den dynamiska modellen visar en motoreffekt som är ungefär lika stor som Stena Danicas installerade effekt vid 20 knop, en hastighet som är Stena Danicas marschfart, ökar resultatets trovärdighet. Det påvisar att felmarginalen på beräkningen för den stora färjan är liten.

För den lilla färjan gäller dock inte samma relation, eftersom färjan Älvsnabben har ett annorlunda arbetsmönster. Fartyget klarar antagligen högre hastigheter än hastighetsgränsen i älven som är på 12 knop. Däremot stämmer den maximala motoreffekten från beräkningen med mycket hård vind väldigt bra överens med den installerade effekten hos Älvsnabben 4.

Som det visas tydligt i Figur 3 och 8 har de motstånd där projektgruppen uppskattat parametrar, främst de olika bihangen, en näst intill försumbar effekt på det totala motståndet. Resultatens anses dock inte ha lika hög noggrannhet som skulle kunna uppnås med computational fluid dynamics eller med hydrodynamiska modelltester.

5.2 Resultat från dynamisk modell

Hastigheten har stor inverkan över hur stort motstånd som påverkar fartyget och således också hur stor motoreffekt och nettoenergiförbrukning som krävs. Detta leder till incitament att sänka

hastigheten vid en konvertering till eldrivna fartyg på bekostnad av restiden. Resultat från de simulerade turerna för den stora färjan visar att en sänkning i hastighet gör stor skillnad. En sänkning i medianhastighet på 15 % gör en skillnad på 30-50 % i nettoenergiförbrukning vid mycket svår respektive smul sjö. Även i dåligt väder ökar motståndet vilket leder till att man kommer få sänka hastigheten för att hålla energiförbrukningen låg. Detta är dock något som görs redan idag.

Generellt i sjöfarten så har rederierna länge varit på jakt efter mer effektiva skrovdesigner för att sänka bränsleförbrukningen. Detta är lönt att fortsätta med även när fartygen elektrifieras. Att konvertera ett äldre fartyg med ineffektivare skrov kommer kräva större batterier och större motorer än ett ekvivalent fartyg med effektivare skrov vilket får konsekvenser då kostnaden för drivlinans komponenter sannolikt kommer vara högre och färjan kommer ha en högre energiförbrukning under sin livstid. Detta skulle kunna vara motivation för rederierna att bygga helt nya elektrifierade fartyg istället för att konvertera äldre fartyg. Det finns ett talesätt inom sjöfarten som lyder: "Man ska inte måla en läckande båt". Även om talesättet låter drastiskt i detta sammanhanget så stämmer det till viss del i meningen om att konvertera äldre fartyg då detta skulle kunna vara mer komplicerat och dyrare i längden om man slår ut kostnaden på fartygets återstående livstid kontra byggnationen av ett nytt fartyg. Detta eftersom ett mindre effektivt fartyg kommer att förbruka mer energi. Till synes är detta ännu viktigare om man tänkt att köra fartygen i hastigheter där vågbildningsmotståndet ökar fort.

5.3 Dimensionering

Projektets större färja baseras på Stena Danica som har varit i drift i ungefär 40 år. Av den anledningen kan en elektrifiering anses vara en mindre lämplig lösning eftersom färjan kanske inte har en tillräckligt lång livstid kvar för att den kostsamma investeringen som en helelektrisk drivlina innebär ska tjänas in. Det är dock inget intrinsiskt med en färja av denna storlek som gör den olämplig för en helelektrisk drivlina förutsatt att båten kan vara i drift mer än 10 år.

Dimensioneringen presenterades även i form av antal Tesla batteripaket dvs. 1100 st för den stora färjan och 17 st för den mindre färjan. Som tidigare nämnt visade det sig att Tesla producerade upp emot 60 112 bilar i månaden. När man jämför antalet batterier som både den stora och lilla färjan kräver, med antalet batteripaket som Tesla producerar i månaden, så tyder på att det ses vara möjligt, rent produktionsmässigt, att helelektrifiera den stora och mindre färjan med litiumjonbatterier. Detta då antalet batterier som den större färjan, inte minst den lilla färjan, kräver endast är en bråkdel av hur många batteripaket som faktiskt kan produceras i månaden. Däremot finns det andra faktorer som kan hindra dimensioneringen av färjorna, t.ex. batteriernas tyngd i förhållande till färjan. Studien visade däremot att det inte blev en förhållandevis stor viktökning om en helelektrisk drivlina skulle implementeras för både den stora och lilla färjan, se avsnitt 4.2. Där presenteras det att det blir en viktökning för den större färjan på 1,55 % och den mindre färjan på 4,9 %. Vilket inte ses som ett problem då detta är förhållandevis liten

del jämfört med respektive färjas totala vikt, samt att de elektriska drivlinorna antas ersätta de nuvarande drivlinorna som därmed skulle frigöra den vikt de bidrar med i dagsläget när de monteras bort.

I framtiden när litiumjoncellerna som erbjuds har fått en högre energidensitet kommer antalet celler som behövs i batterierna minska vilket kommer sänka batteriernas vikt och därmed färjornas energiförbrukning. Då kan batteriernas kapacitet troligtvis minska. Eftersom batterierna redan i nuläget utgör en ganska liten del av färjornas vikt kommer lättare batterier inte påverka hur stor effekt som behövs för att föra båten framåt nämnvärt.

Att bibehålla Stena Danicas nuvarande körschema med dagens laddningsinfrastruktur är inte möjligt eftersom den levererade laddningseffekten ifrån dagens laddare är för liten och klarar därför inte att ladda tillräckligt mycket av batteriet tillräckligt snabbt. Om en färja av denna storleken ska helektrifieras måste man först utveckla nya laddare för fartyg. Detta kan troligtvis ses som en naturlig del av utvecklingen eftersom det kommer att vara svårt med en storskalig elektrifiering av sjöfarten annars. Dock har energiförbrukningen för den stora färjan i projektet gjorts med antagande om grov sjö under resan. Detta på grund av att svårare väderförhållanden än så inte är vanligt förekommande. Att dimensionera för mildare väderförhållanden än grov sjö är optimistiskt och riskerar att färjan inte klarar drift om det blåser upp. I verkligheten kommer energiförbrukningen variera beroende på väderförhållande, drift och last.

Valet av motorer baseras på praxis inom branschen och kan därför komma att ändras. Som ett exempel på detta kan man nämna att det inte är garanterat att större fartyg kommer att använda synkronmotorer eftersom motorer i pods blir vanligare och en sådan motorlösning använder sig endast av asynkronmotorer. En sådan lösning kan komma att bli mer attraktiv ur ett ekonomiskt perspektiv eftersom asynkrona motorer är billigare än synkrona. Detta bör vara extra intressant att tänka på om det fartyg man ämnar elektrifiera är ett äldre fartyg och därför inte har en lika lång tid kvar i drift. Pods ökar dessutom förmågan att styra fartyget i trånga utrymmen vilket skulle kunna vara användbart både för den stora och den lilla färjan med tanke på i vilka områden dessa färjor används.

5.4 Kostnad

Kostnadsanalysen i projektet fokuserar till största del på priserna för energilagringalternativen. Känsligheten på dessa priser är beroende på marknadspriserna och verkningsgrad hos energialternativen. Kostnadsanalysen som utförts i projektet är inte fullständig då den saknar aspekter såsom kostnader till följd av installation, underhåll, installation av laddningsstation och eventuella utgifter för hjälpsystem som exempelvis kylningssystem och datorer. Eftersom detta inte tagits med i uträkningarna är resultatet i studien lägre än det verkliga priset. Resultatet visar att en konvertering till helektrisk lösning med batterier kan ligga på ungefär samma kostnadsnivå som att behålla en dieseldriven lösning.

För att observera känsligheten beroende på marknadspriser för litiumjonbatterier användes två olika priser på batteripaket, där det billiga är 1176 SEK/KWh och det dyra är 5257 SEK/KWh. Även två olika priser för vätgas används gällande bränsleceller, det billiga är 1.91 SEK/KWh och det dyrare är 4.10 SEK/KWh. För litiumjonbatterier är den stora utmaningen priset. Då det är en mer effektiv lösning med billigare energi är det som håller det tillbaka priset på batteriet och kostnaden vid ett batteriutbyte. Något som talar för batterier är att utvecklingen sker i rask takt, och de redan verkar vara en lovande lösning i dagsläget, vilket betyder att batterier antagligen kommer att bli den dominerande lösningen för helelektriska fartyg i framtiden. För bränslecellerna är det inte priset som håller dem tillbaka, utan den låga verkningsgraden. I kostnadsresultaten blev bränsleceller det dyrare alternativet trots sin låga fasta kostnad, oavsett vilket av de två priserna på vätgas som används. Problemet ligger huvudsakligen i den låga verkningsgraden, vilket leder till att stora mängder bränsle måste köpas in. Även om utvecklingen går framåt för bränsleceller, kommer antagligen batterier att utvecklas snabbare och vara framtidens lösning.

5.5 Miljö

I denna studie visade jämförelsen av utsläpp vid helelektrisk och konventionell drift att en konvertering till eldrift skulle kunna minska miljöpåverkan för både den större och mindre färjan. För båda färjorna beräknas koldioxid- och kväveoxidutsläppet minska drastiskt, vilket tyder på att helelektrifiering av färjorna är ett klimatsmart val. Dock ses det i resultatet att svaveloxidutsläppen kunde vara antingen mindre eller större än vid konventionell drift.

Det intressantaste resultatet var hur mycket SO_x -utsläppet varierade beroende på vilken emissionsfaktor som användes, se Figur 26 och 27. Det innebär att SO_x -utsläppen från helelektrisk drift skulle kunna vara större än vid konventionell drift likväl som utsläppet skulle kunna vara mycket mindre. Det tycks möjligt att dessa resultat beror på vilken batterikemi, dvs. vilka element batteriet består av, som används. Eftersom batterier består av olika element kommer materialet med stor sannolikhet att utvinnas, processas och tillverkas på olika sätt. Vilket i sig innebär att materialen kräver olika mycket energi vid dessa delmoment. Dessutom sker både urvinningen och tillverkningen med olika energikällor, t.ex. fossila bränslen eller förnybar energi, vilket leder till varierade utsläpp. Detta resultat tyder på att valet av batterikemi har en viktig roll angående klimatpåverkan. Dessutom är svaveloxidutsläppen redan förhållandevis låga vid konventionell drift på grund av att färjorna färdas inom SECA, vilket ställer krav på användning av bränslen med låg svavelhalt. Sammantaget tyder detta på att valet av batterier för färjor inom området blir extra viktigt i och med dessa regleringar av just svaveloxider.

De absoluta värdena i resultatet från miljöanalysen måste tolkas med försiktighet eftersom det finns en felmarginal att ta hänsyn till. De verkliga utsläppsmängderna kommer att variera med avseende på flera faktorer och olika omständigheter. Utöver drivmedlet kan dessa påverkande faktorer vara antalet bilar, cyklar och passagerare som transporteras på färjorna. Men även motorernas ålder, effektivitet och energiförbrukning. Dessutom kan omständigheter som påverkar

utsläppen vara väderförhållanden, rengöringssystem av avgaser och skepparens körsätt. Det innebär att utsläppen från respektive färja som beräknades kan vara antingen större eller mindre i praktiken. Utöver ovannämnda faktorer påverkar även omvandlingsfaktorer och emissionsfaktorer resultaten eftersom de varierar beroende på vilka drivmedel, och dess innehåll, färjorna drivs av. Dessutom noteras att det är en relativt stor skillnad mellan emissionsfaktorer för svenska och nordiska elproduktion, vilket också tyder på att resultatet kommer att variera beroende på vilken el som används gällande de elektriska drivlinorna.

5.6 Etik

Studien visade som tidigare nämnt att batterier, specifikt litiumjonbatterier, var ett bättre alternativ jämfört med bränsleceller när det kom till energilagringalternativ för den större och mindre färjans elektriska drivlinor. Det innebär att flera konflikter uppstår när det kommer till etiska aspekter kring batteriproduktionen. Frågeställningar angående arbetsvillkor, barnarbete och säkerhet vid brytningen av råvarorna är av högsta vikt inom respektive företag, dvs. Stena Line och Västtrafik, om batterier ska användas som energilagring ombord färjorna. Som tidigare nämnt sker större delen av brytningen av kobolt i Demokratiska Republiken Kongo, där urvinningen sker utan varken säkerhetsanordningar eller skyddsutrustning. Vilket skapar viktiga diskussioner och etiska dilemman angående arbetsvillkor och mänskliga rättigheter när det kommer till batteriproduktion. Det innebär att det är svårt att undkomma det faktum att ett inköp av batterier som energilagring riskerar att bidra till denna verksamhet.

5.7 Framtida arbete

I studien undersöktes inte kostnad eller installeringsmöjligheter av laddningsinfrastruktur av respektive energilagringalternativ, dvs. batterier eller bränsleceller, i hamnarna. I nuläget är sådan information svåråtkomlig eftersom det finns en begränsad mängd laddare till helelektriska fartyg. I framtiden kommer denna teknik med största sannolikhet att bli vanligare och då är det troligen möjligt att även inkludera kostnaden för laddningsinfrastruktur vid kostnadsanalysen. Detta skulle innebära att en mer verklighetstrogen bild av kostnaden fås.

I och med att behovet samt tillväxten av förnyelsebara energikällor ökar så tilltar dessutom intresset på olika sätt att lagra denna energi. Vilket innebär att utvecklingen inom energilagringalternativ kommer att ske vilket kan presentera nya och mer effektiva sätt att lagra energi. Det betyder att man framöver återigen behöver undersöka lämpliga energilagringalternativ när ny teknik finns på marknaden.

För att få ett mer exakt resultat angående den större och mindre färjans effekt- och energiförbrukning kan man vid framtida undersökningar använda beräkningsströmningsdynamik eller tester med modellbåtar givna dynamisk similaritet.

6 Slutsats

Studien resulterade i att den större färjan dimensionerades med litiumjonbatterier som energilagring med en total energikapacitet på 110 MWh utifrån ett beräknat energibehov på 51 MWh per resa, dvs. 3,5 timmar. Två elektriska synkronmotorer dimensionerades utifrån det beräknade effektbehovet vid loggad drift till 30 MW, med 15 MW per motor. För omriktaren behövs IGBT-moduler som klarar att matas med 1000 V DC och generera en växelspanning på 4000 V rms, de måste också vara byggda för strömmar upp till 1250 A. För den mindre färjan resulterade studien i en dimensionering med litiumjonbatterier som energilagring med en total energikapacitet på 1,7 MWh utifrån ett beräknat energibehov på 88 kWh per loggad tur för att klara en hel dags drift, dvs. 8 turer. Färjans energibehovet har i studien avrundats till 100 kWh per tur av säkerhetsskäl. Två elektriska asynkronmotorer dimensionerades, utifrån det beräknade effektbehovet vid loggad drift till 700 kW, med 350 kW per motor. Även denna omriktare kan lämpligen använda IGBT-moduler som klarar att matas med 1000 V DC men här behöver man få ut en växelspanning på 690 V rms och en ström på 507 A.

Det är högst sannolikt att både den stora och lilla färjan skulle kunna sänka sina motstånd från vattnet med nyare och effektivare skrov, vilket i sin tur hade lett till mindre behövd maximal motoreffekt och nettoenergiförbrukning. Då hade fartygen kunnat dimensioneras med mindre komponenter, såsom motorer, omriktare och energilagring. De två fartygen som användes som inspiration i studien är båda över 25 år gamla. Med kostnadsresultatet i åtanke måste man ta hänsyn till hur många år färjorna kan tänkas vara i fortsatt drift innan man rekommenderar en konvertering till helelektrisk drift. Planeras färjorna att sättas ur drift innan respektive återbetalningstid för de helelektriska drivlinorna har passerat så rekommenderas istället investering i nya fartyg med effektivare skrov och utrustning ur en effektivitets- och kostnadssynpunkt.

Utifrån kostnads- och miljöperspektivet anses en implementering av helelektrisk drivlina på både den stora och lilla färjan på de aktuella sträckorna vara lämplig att genomföra. Dessa baseras på resultatet från den övergripande kostnadsanalysen där en fast kostnad och en rörlig kostnad för energiförbrukningen jämfördes för konventionell och helelektrisk drift. För den stora färjan beräknades helelektrisk drift med litiumjonbatterier ha en återbetalningstid på 1 till 7 år. Återbetalningstiden för den mindre färjan beräknades vara på 2 till 21 år. Den korta återbetalningstiden har en lägre fast kostnad och även ger en låg kostnad över tid, i förhållande till den längre återbetalningstiden. Då batteriet utgjorde en större del av den totala kostnaden för den mindre färjan har den stora variationen i batteripris en större effekt på intervallet. I kostnadsanalysen ingick däremot inte kostnader för bland annat installation av drivlinan eller laddningsstationen samt dess säkerhetssystem och underhåll. Slutsatsen baseras också på resultatet från miljöanalysen där koldioxidutsläppen för den stora färjan beräknades minska med 85% och med 87 % för den lilla färjan, under en tioårsperiod. Kväveoxidutsläppen minskar med 99 % för båda färjorna. Dessutom beräknades att svaveloxidutsläppen, under samma tidsperiod, vara inom ett intervall, vars nedre del resulterade i att utsläppen minskar med 63 % för den stora

färjan och 71 % för den lilla färjan, medan den andra sidan av intervallet ger en ökning av 90 % för den stora färjan och 36 % för den lilla färjan över en tioårsperiod. Detta stora intervall antogs bero på variation av batterikemi i underliggande data.

För den stora färjan är alla komponenter väldigt stora men inte tillräckligt för att hindra ett projekt av den storleken. Likt många andra stora fartyg kommer de flesta komponenter behöva byggas specifikt till ett sådant projekt men tekniken för att genomföra helelektrifieringen finns idag inom räckhåll.

Referenser

- [1] Miljödepartementet, "Fem år med Parisavtalet", 11 dec. 2020, [Online]. URL: <https://www.regeringen.se/artiklar/2020/12/fem-ar-med-parisavtalet/> (hämtad 2021-04-08).
- [2] Naturvårdsverket, *Transporterna och miljön*, [Online]. URL: <https://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhället/Miljoarbete-i-Sverige/Uppdelat-efter-omrade/Transporter-och-trafik/> (hämtad 2021-02-02).
- [3] N. Mikkola, L. Randall och A. Hagberg, utg., *Green growth in Nordic regions- 50 ways to make it happen*, Nordregio, 2016, s.90–91, ISBN: 978-91-87295-40-9. URL: <https://archive.nordregio.se/Global/Green%20growth%20in%20Nordic%20regions%2050/NordicGreenGrowth-pages.pdf> (hämtad 2021-02-03).
- [4] C. Fourneris och M. Copier, "Meet Ellen, the world's largest E-ferry, connecting two Danish islands without emitting any CO2", nov. 2019, euronews., [Online]. URL: <https://www.euronews.com/2019/11/25/meet-ellen-the-world-s-largest-e-ferry-connecting-two-danish-islands-without-emitting-any> (hämtad 2021-02-03).
- [5] ABB, "Världens största batterifärja laddar på sex minuter", [Online]. URL: <https://valjframtiden.se/abb.com/varldens-storsta-batterifarjor-tar-dig-till-danmark-pa-sex-minuters-laddning/> (hämtad 2021-04-16).
- [6] Stena Line, "ÅRSRAPPORT 2018 STENA AB", 2019, [Online]. URL: <https://www.stena.com/app/uploads/2020/05/ANNUAL-REPORT-STENA-AB-2018-SWEDISH.pdf> (hämtad 2021-03-05).
- [7] ElectricCity, "Elvy – Västtrafiks första elhybridsfärja", 29 okt. 2019, [Online]. URL: <https://www.electricitygoteborg.se/nyheter/elvy-vasttrafiks-forsta-elhybridsfarja> (hämtad 2021-03-03).
- [8] J. F. Hansen och F. Wendt, "History and State of the Art in Commercial Electric Ship Propulsion, Integrated Power Systems, and Future Trends", 2015. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7272043> (hämtad 2021-03-27).
- [9] autodoc blog, *Dieselmotor: grundläggande*, [Online]. URL: <https://www.autodoc.se/info/dieselmotor-grundlaggande> (hämtad 2021-05-09).
- [10] V. Smil, "Electric Container Ships Are Stuck on the Horizon", 27 febr. 2019. URL: <https://spectrum.ieee.org/transportation/marine/electric-container-ships-are-stuck-on-the-horizon> (hämtad 2021-03-27).
- [11] H. Berglund, *Privat kommunikation*, mars 2021.
- [12] ABB, *ACS1000 technical data*. URL: <https://new.abb.com/drives/medium-voltage-ac-drives/acs1000/acs1000-technical-data> (hämtad 2021-05-11).

- [13] Institutionen för energi och miljö, Chalmers tekniska högskola, ”Elteknik”, i. Chalmers tekniska högskola, mars 2012, s. 160–164, mars 2012. URL: <https://www.chalmersstore.se/kompender/elteknik.html> (hämtad 2021-04-23).
- [14] M. electric, *Mitsubishi electric, HVIGBT modules*, Mitsubishis hemsida. URL: <https://www.mitsubishielectric.com/semiconductors/products/powermod/hvigbtmod/index.html> (hämtad 2021-04-23).
- [15] F. D. Kanellos, G. J. Tsekouras och J. Prousalidis, ”Onboard DC grid employing smart grid technology: challenges, state of the art and future prospects”, 2014. URL: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-est.2013.0056> (hämtad 2021-05-02).
- [16] Ö. Larsson och B. Ståhl- Blue Institute, *Lösningar på lager - Energilagringstekniker och framtidens hållbara energiförsörjning*. Vinnova, s. 29–37, mars 2012, ISBN: 978-91-86517-62-5. URL: <https://www.vinnova.se/contentassets/5e1ae1a2b54f188526855550fe79bf/va-12-02.pdf> (hämtad 2021-03-27).
- [17] V. Santén m. fl., ”Elektrifiering av sjöfarten”, RISE Viktoria och SSPA, april 2018, Lighthouse, swedish maritime competence centre, [Online]. URL: https://www.lighthouse.nu/sites/www.lighthouse.nu/files/elektrifiering_webb.pdf (hämtad 2021-02-03).
- [18] A. Nordling, R. Englund, A. Hembjer och A. Mannberg, *Energilagring - Teknik för lagring av el*. Stockholm, Sverige: Kungl. Ingenjörsvetenskapsakademien (IVA), 2015, ISBN: 978-91-7082-901-7. URL: <https://www.iva.se/globalassets/info-trycksaker/vagval-el/vagval-el-lagring.pdf> (hämtad 2021-03-28).
- [19] J. Juhlin, *Guide: Bränsleceller och vätgasbilar - fakta och förhoppningar*, SVT Nyheter, 25 maj 2019. URL: <https://www.svt.se/nyheter/vetenskap/vatgas-och-bransleceller-fakta-och-forhoppningar> (hämtad 2021-04-01).
- [20] Jernkontoret, *Lagring av elektrisk energi*, Jernkontorets energihandbok. URL: <https://www.energihandbok.se/lagring-av-elektrisk-energi> (hämtad 2021-04-09).
- [21] P. Boberg, ”Effekter i världen”, 2020-06-09. URL: <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Klimat-och-luft/Klimat/Klimatet-i-framtiden/Effekter-i-varlden/> (hämtad 2021-03-04).
- [22] S. Latvala, ”Fakta om kväveoxider i luft”, 16 sept. 2020, [Online]. URL: <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Klimat-och-luft/Luftfororeningar/Kvaveoxider/> (hämtad 2021-02-20).
- [23] Å. Sjödin, G. Pihl-Karlsson, M. Johansson m. fl., ”Vägtrafikens utsläpp av kväveoxider - reglering, utsläpp och effekter”, okt. 2004, [Online]. URL: <https://www.iv1.se/download/18.34244ba71728fcb3f3f6ba/1591704427087/B1597.pdf> (hämtad 2021-03-04).
- [24] S. Latvala, ”Fakta om svaveldioxid i luft”, 1 juni 2020, [Online]. URL: <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Klimat-och-luft/Luftfororeningar/Svaveldioxid/> (hämtad 2021-02-20).

- [25] IMO, "Introduction to IMO", [Online]. URL: <https://www.imo.org/en/About/Pages/Default.aspx> (hämtad 2021-02-20).
- [26] IMO, "REPORT OF THE MARINE ENVIRONMENT PROTECTION COMMITTEE ON ITS FIFTY-EIGHTH SESSION", 17 okt. 2008. URL: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-09/documents/mepc58-23-annexes13-14.pdf> (hämtad 2021-03-04).
- [27] IMO, "Special Areas under MARPOL", [Online]. URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Special-Areas-Marpol.aspx> (hämtad 2021-02-07).
- [28] Transportstyrelsen, "Svavelkontrollområde (SECA)", 23 mars 2020, [Online]. URL: <https://www.transportstyrelsen.se/sv/Sjofart/Miljo-och-halsa/Luftforening/SOx---svaveloxider/Kommande-krav/> (hämtad 2021-02-20).
- [29] J. Johansson, "Fartygsprojektering", 1982. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:559967/FULLTEXT01.pdf> (hämtad 2021-04-11).
- [30] L. Larsson och H. C. Raven, *Ship Resistance and Flow*. 601 Pavonia Avenue Jersey City, New Jersey 0730: The Society of Naval Architects och Marine Engineers, 2010.
- [31] "Froude-tal", 2020. URL: https://sv.wikipedia.org/wiki/Froudes_tal (hämtad 2021-04-30).
- [32] M. A. Martinsen, *A Design Tool for Estimating Wave Added Resistance of Container Ships*. 2016.
- [33] B. Thomasson, "VÅGOR OCH VÅGSYSTEM", 4 juli 2019. URL: <https://www.thomassondesign.com/paddla/meteorologi/vagor> (hämtad 2021-04-22).
- [34] S. L. Sofia Åström Dan Eklund, "Hydrodynamisk modell för Göta älv", 2011-09-06. URL: https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/gota-alvutredningen/gau_delrapport_3.pdf.
- [35] B. Thomasson, "VÅGOR OCH VÅGSYSTEM", 2013-11-22. URL: <https://www.msb.se/siteassets/dokument/amnesomraden/skydd-mot-olyckor-och-farliga-amnen/naturolyckor-och-klimat/oversvammning/oversvammingskartering-vattendrag/gota-alv-nordre-alv-2013.pdf> (hämtad 2021-04-22).
- [36] J. Holtrop och G. Mennen, *An Approximate Power Prediction Method*. International Shipbuilding Progress, 1982, International Shipbuilding Progress, vol. 29, no. 335, pp. 166-170, 1982.
- [37] F. M. White, *Fluid Mechanics 8:th edition in SI units*. Mc Graw Hill Education.
- [38] J.-M. T. et al, "Batteries 2020 — Lithium-ion battery first and second life ageing, validated battery models, lifetime modelling and ageing assessment of thermal parameters", 2020-09-5. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7695698>.
- [39] Stena Line, *Privat kommunikation*, mars 2021.

- [40] G. Bower, "Tesla Model 3 2170 Energy Density Compared To Bolt, Model S P100D", 2019-02-07. URL: <https://insideevs.com/news/342679/tesla-model-3-2170-energy-density-compared-to-bolt-model-s-p100d/> (hämtad 2021-04-25).
- [41] M. Liebreich, M. Grabka och P. Pajda, "Opportunities for electric ferries in latin america", febr. 2021. URL: <https://publications.iadb.org/publications/english/document/Opportunities-for-Electric-Ferries-in-Latin-America.pdf>.
- [42] M. Handwerker, J. Wellnitz och H. Marzbani, "Comparison of Hydrogen Powertrains with the Battery Powered Electric Vehicle and Investigation of Small-Scale Local Hydrogen Production Using Renewable Energy", University of applied sciences ingolstadt, 2021-01-25. URL: <https://www.mdpi.com/2673-4141/2/1/5>.
- [43] Nordpool. URL: <https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/#/nordic/map> (hämtad 2021-04-04).
- [44] A. Christensen, "Assessment of Hydrogen Production Costs from Electrolysis: United States and Europe", 2020-06-01. URL: https://theicct.org/sites/default/files/icct2020_assessment_of_hydrogen_production_costs_v1.pdf.
- [45] OKQ8. URL: <https://www.okq8.se/foretag/priser/#/> (hämtad 2021-04-04).
- [46] A. Forsgren, "Beräkna dina utsläpp av luftföroreningar", 20 april 2021, [Online]. URL: <https://www.naturvardsverket.se/Stod-i-miljoarbetet/Vagledning/Luft-och-klimat/Berakna-dina-utslapp-av-luftfororeningar/> (hämtad 2021-05-11).
- [47] ABB, *Detailed information for: 3GBP403530-BDG*. URL: <https://new.abb.com/products/3GBP403530-BDG/m3bp-4001c-6> (hämtad 2021-05-10).
- [48] B. power systems, *Product Data sheet FCwaveTM*. URL: https://www.ballard.com/docs/default-source/spec-sheets/fcwavetm-specification-sheet.pdf?sfvrsn=6e44dd80_6 (hämtad 2021-04-23).
- [49] F. Söderling, "Motståndsbestämning med effektbehovsprediktering", 2015. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:853564/FULLTEXT01.pdf> (hämtad 2021-04-11).
- [50] Stena Line, *Stena Danica*, [Online]. URL: <https://www.stenaline.se/vara-fartyg/stena-danica> (hämtad 2021-02-28).
- [51] Wikipedia, *M/S Stena Danica*, [Online]. URL: https://sv.wikipedia.org/wiki/M/S_Stena_Danica (hämtad 2021-02-28).
- [52] P. Wimby, *privat kommunikation*, mars 2021.
- [53] faktaomfartyg, *M/S STENA DANICA*, 2012-07-30. URL: https://archive.is/20120730001509/http://www.faktaomfartyg.nu/stena_danica_1983.htm#selection-13.0-13.17 (hämtad 2021-05-05).
- [54] S. Anderson, "Roropassagerarfartyget STENA DANICA - SKFH - grundkänning", 2015-03-07. URL: <https://publications.iadb.org/publications/english/document/Opportunities-for-Electric-Ferries-in-Latin-America.pdf>.

- [55] Styrsöbolaget, *Vår historia*, [Online]. URL: <https://www.styrsobolaget.se/om-oss/var-historia> (hämtad 2021-02-19).
- [56] Styrsöbolaget, *Älv-Snabben 4*, [Online]. URL: <https://styrsobolaget.se/om-oss/fartyg/alv-snabben-4> (hämtad 2021-02-19).
- [57] Styrsöbolaget, *Miljöarbete*, [Online]. URL: <https://www.styrsobolaget.se/om-oss/miljoarbete> (hämtad 2021-03-01).
- [58] *VOLVO PENTA INBOARD DIESEL D12 MH*, AB Volvo Penta, SE-405 08 Göteborg, Sverige, okt. 2007. URL: <http://www.marine-engineering-looe.co.uk/pdf/engines/Commercial/D12-MH.pdf> (hämtad 2021-03-13).
- [59] C. Ahlström och L. Kilsmark, "Structural analysis of introducing high strength steel in light craft design", 2015. URL: <https://odr.chalmers.se/bitstream/20.500.12380/219626/1/219626.pdf>.
- [60] T. T. Team, "New Tesla Model S Now the Quickest Production Car in the World", 2016-08-23. URL: <https://www.tesla.com/blog/new-tesla-model-s-now-quickest-production-car-world> (hämtad 2021-05-12).
- [61] Tesla, *Tesla Q1 2021 Vehicle Production & Deliveries*, [Online], 2 april 2021. URL: <https://ir.tesla.com/press-release/tesla-q1-2021-vehicle-production-deliveries> (hämtad 2021-04-04).
- [62] Ideality, *Liquid Hydrogen Outline*. URL: https://www.ideality.eu/index.php?page=lh2_outline#:~:text=Pressurised%20hydrogen%20contains%20about%200.5,kWh%20litre%20at%20700%20bar.&text=The%20best%20way%20of%20transporting,the%20amount%20of%20energy%20involved (hämtad 2021-05-06).
- [63] ABB, *Low voltage General performance motors*. URL: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK105789&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch> (hämtad 2021-05-11).
- [64] I. Boudway, "Batteries For Electric Cars Speed Toward a Tipping Point", 2020-12-16. URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-12-16/electric-cars-are-about-to-be-as-cheap-as-gas-powered-models#:~:text=Tesla%2C%20the%20world's%20largest%20EV,cost%20the%20automaker%20about%20%249%2C250>. (hämtad 2021-04-04).
- [65] K. Energimarknadsbyrå, *Höjd energiskatt från 1 Januari 2021*, 2021-03-30. URL: <https://www.energimarknadsbyran.se/nyheter/nyhetsarkiv/2020/hojd-energiskatt-fran-1-januari-2021/#:~:text=Aktuella%20skatter%20p%C3%A5%20el%20fr%C3%A5n,f%C3%B6r%20konsumenter%20med%20reducerad%20energiskatt>. (hämtad 2021-05-06).
- [66] Göteborg Energi, Privat kommunikation, maj 2021.
- [67] D. Jensen, "Transition Your Ships to Zero-Emissions With Ballard's New FCwave™", 2020-09-10. URL: <https://blog.ballard.com/fcwave#:~:text=Product%20Durability&text=At%20the%20heart%20of%20FCwave,leads%20the%20industry%20in%20durability>.

- [68] DEIF, "HYBRID FERRY CASE STORY TYCHO BRAHE", juni 2019. URL: <https://www.deif.dk/media/subc3104/tycho-brahe-uk-lowres.pdf> (hämtad 2021-05-09).
- [69] European Maritime Safety Agency, "Ship", URL: <https://mrv.emsa.europa.eu/#> (hämtad 2021-03-03).
- [70] Marine Insight, "A Guide To Marine Gas Oil and LSFO Used On Ships", 8 jan. 2021. URL: <https://www.marineinsight.com/guidelines/a-guide-to-marine-gas-oil-and-lsfo-used-on-ships/> (hämtad 2021-03-24).
- [71] Dr.-Ing. och Y. Wild, "Determination of energy cost of electrical energy on board sea-going vessels", 2005-09-17. URL: http://www.effship.com/PartnerArea/MiscPresentations/Dr_Wild_Report.pdf (hämtad 2021-04-11).
- [72] M. Göthe och J. Leijon, "STUDY ON ELECTRICAL ENERGY STORAGE FOR SHIPS", 2015, [Online]. URL: <https://odr.chalmers.se/bitstream/20.500.12380/218841/1/218841.pdf> (hämtad 2021-04-12).
- [73] C. Trozzi m. fl., "EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019 – Update Oct. 2020", 2020. URL: https://www.eea.europa.eu/ds_resolveuid/2A1PV674XR (hämtad 2021-03-23).
- [74] IMO, "Third IMO Greenhouse Gas Study 2014", 2014, [Online]. URL: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Third%20Greenhouse%20Gas%20Study/GHG3%20Executive%20Summary%20and%20Report.pdf> (hämtad 2021-04-19).
- [75] Naturvårdsverket, "Emissionsfaktorer och värmevärden submission 2021", 2 dec. 2020, [Online]. URL: https://www.naturvardsverket.se/upload/stod-i-miljoarbetet/vagledning/Luft-klimat/emissionsfaktorer_luft_2021-04-19.xlsx (hämtad 2021-03-18).
- [76] SMED, "Emissionsfaktorer och värmevärden 2020", 2020, [Online]. URL: <https://www.naturvardsverket.se/upload/stod-i-miljoarbetet/vagledning/Luft-klimat/emissionsfaktorer-och-varmevarden-klimat-2020.xlsx> (hämtad 2021-02-26).
- [77] C. Alderblad och R. Sandberg, "Förstudie av en konvertering från diesel- till eldrift på Älvsnabben 4", examensarb., Chalmers tekniska högskola, Institutionen för Tillämpad mekanik, SE-412 96 Göteborg, Sverige, juni 2015. URL: <https://odr.chalmers.se/bitstream/20.500.12380/256085/1/256085.pdf> (hämtad 2021-03-15).
- [78] A. Sandgren och J. Nilsson, *Emissionsfaktor för nordisk elmix med hänsyn till import och export*, 2021-03-26. URL: <http://naturvardsverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1540012/FULLTEXT01.pdf> (hämtad 2021-03-29).
- [79] Miljöförvaltningen, "Rapportering av energianvändningen och växthusgasutsläppen 2018 och 2019", [Online]. URL: <https://insynsverige.se/documentHandler.ashx?did=1987044> (hämtad 2021-04-07).
- [80] Naturvårdsverket, *Energy Performance Contracting*, [Online], 2007. URL: <https://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/620-5776-3.pdf?pid=3380> (hämtad 2021-04-07).

- [81] Energiföretagen, *Energibranschens klimat- och miljöpåverkan*, 2018-09-04. URL: https://www.energiforetagen.se/globalassets/energiforetagen/statistik/energiaret/energiaret2017_miljo_vers180904.pdf (hämtad 2021-03-28).
- [82] A. Nordelöf, *Privat kommunikation*, april 2021.
- [83] E. Emilsson och L. Dahllöf, *Lithium-Ion Vehicle Battery Production*, [Online], 2019. URL: <https://www.ivl.se/download/18.34244ba71728fcb3f3faf9/1591706083170/C444.pdf> (hämtad 2021-04-15).
- [84] C. Aichberger och G. Jungmeier, "Environmental Life Cycle Impacts of Automotive Batteries Based on a Literature Review", 6 nov. 2020, [Online]. URL: <https://doi.org/10.3390/en13236345> (hämtad 2021-04-24).
- [85] J. Sullivan och L. Gaines, "A Review of Battery Life-Cycle Analysis: State of Knowledge and Critical Needs", 1 okt. 2010, [Online]. URL: <https://fddocuments.in/reader/full/batteries-anl-esd-10-7> (hämtad 2021-04-28).
- [86] E. Mattsson, E. Lindblom och E. Emilsson, *Miljöeffekter av elnät och energilagring*, 2021-01. URL: <https://www.ivl.se/download/18.2f05652c1775c6085c018c2/1613114321946/C573.pdf> (hämtad 2021-04-01).
- [87] Amnesty, "HUMAN RIGHTS ABUSES IN THE DEMOCRATIC REPUBLIC OF THE CONGO POWER THE GLOBAL TRADE IN COBALT", 2016, [Online]. URL: <https://www.amnesty.org/download/Documents/AFR6231832016ENGLISH.PDF> (hämtad 2021-05-01).

A Bilaga: Holtrop & Mennens metod

Holtrop & Mennens metod

Holtrop & Mennens metod är en allmänt vedertagen modell skriven av J. Holtrop och G.G.J Mennen för beräkning av motstånd hos deplacerande och halvdeplacerande fartyg [36]. Metoden använder sig utav ett fåtal parametrar baserade på fartygets dimensioner och skrovutformning. Eftersom Holtrop & Mennens metod bygger på regressionsanalys behöver fartygets parametrar överlappa med de parametrar som återfinns hos de fartygsmodeller som regressionsanalysen bygger på. Modellen projekterar fartygets provtursmotstånd vilket innebär att följande antaganden görs i modellen:

- Ingen vind
- Inga vågor eller svall
- Djupt vatten
- Vattnet har en densitet på 1025 kg/m^3 vid $15 \text{ }^\circ\text{C}$
- Skrovet är helt och utan beväxning

Modellen beskriver således idealiserade förhållanden på sjön. Tillägg till modellen har beräknats och uppskattats i 2.5 ovan för att projektera mer verkliga scenarion. Trots det är modellen inte tillräckligt potent för att ersätta en CFD-analys.

Totalt motstånd

Modellens totala motstånd, R_{total} [N], utgörs utav ett antal motståndskomponenter enligt följande:

$$R_{total} = R_F \cdot (1 + k_1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A \quad (26)$$

där R_F [N] är friktionsmotstånd, $(1 + k_1)$ [-] är en formfaktor, R_{APP} [N] bihangsmotstånd, R_W [N] är vågbildningsmotstånd, R_B [N] är bubbens negativa inverkan på motståndet, R_{TR} [N] är motstånd från akterspegeln och R_A [N] är ett omskalningstillägg.

R_F Friktionsmotstånd

Friktionsmotståndet beräknas enligt ITTC-57:

$$R_F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V \cdot S \cdot C_F \quad (27)$$

där ρ [kg/m³] är vattnets densitet, V [m/s] är fartygets hastighet, S [m²] är skrovets våtlagda yta. Friktionsmotståndskoefficienten, C_F [-], kan beräknas enligt:

$$C_F = \frac{0.075}{(\log_{10} \cdot (Re_l - 2))^2} \quad (28)$$

där Re_l är Reynoldstalet med hänsyn till fartygets längd, L [m]:

$$Re_l = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad (29)$$

där ν [mm²/s] är vattnets kinematiska viskositet. Skrovets våtlagda yta, S [m²], kan beräknas enligt:

$$S = L(2T+B)\sqrt{C_M}(0.453+0.4425C_B-0.2862C_M-0.003467\frac{B}{T}+0.3696C_{WP})+2.38\frac{A_{BT}}{C_B} \quad (30)$$

där B [m] är fartygets bredd, T [m] är fartygets djupgående, A_{BT} [m²] är bulbens transversella area och mittsektionskoefficienten C_M [-], blockkoefficienten, C_B [-] och vattenlinjekoeficienten, C_{WP} [-], kan beräknas enligt nedan. C_M beskriver hur stor andel mittpansarean, A_M [m²], tar upp av den totala rektangeln som utgörs av bredden gånger längden enligt

$$C_M = \frac{A_M}{B \cdot T} \quad (31)$$

På samma sätt beskriver C_B hur stor andel den undantryckta vattenvolymen, ∇ [m³], utgör utav det totala rätblocket som består av bredden, djupgåendet och längden mellan perpendicklarna, L_{PP} [m]:

$$C_B = \frac{\nabla}{B \cdot T \cdot L_{PP}} \quad (32)$$

C_{WP} beskriver hur följsamt skrovet är och beräknas enligt

$$C_{WP} = \frac{A_W}{L \cdot B} \quad (33)$$

där A_W [m²] är vattenlinjearean.

(1 + k_1) Formfaktorn

Friktionsmotståndet beräknas som om vattnet skulle strömma över en plan platta. Detta behöver således skalas om för att representera formen på fartygets skrov:

$$1 + k_1 = c_{13}(0.93 + c_{12}(\frac{B}{L_R})^{0.92497}(0.95 - C_P)^{-0.521448}(1 - C_P + 0.0225LCB)^{0.6906}) \quad (34)$$

där C_P [-] är den prismatiska koefficienten, L_R [m] är vattenlinjelängden utmed skrovets yta och LCB [m], longitudinal centre of buoyancy, definieras som den longitudinella positionen av flytkraftens angreppspunkt framför halva längden av fartyget i procent av längden. Den

prismatiska koefficienten definieras enligt:

$$C_P = \frac{\nabla}{L \cdot A_M} \quad (35)$$

och vattenlinjelängden enligt:

$$L_R = L \cdot \left(1 - C_P + \frac{0.06 \cdot C_P \cdot LCB}{4 \cdot C_P - 1}\right) \quad (36)$$

Koefficienten c_{12} definieras som:

$$\begin{cases} c_{12} = \left(\frac{T}{L}\right)^{0.2228446}, & \frac{T}{L} < 0.05 \\ c_{12} = 48.20\left(\frac{T}{L} - 0.02\right)^{2.078} + 0.479948, & 0.02 < \frac{T}{L} < 0.05 \\ c_{12} = 0.479948, & \frac{T}{L} < 0.02 \end{cases} \quad (37)$$

Koefficienten c_{13} korrigerar för akterns utformning:

$$c_{13} = 1 + 0.003 \cdot C_{stern} \quad (38)$$

där koefficienten C_{stern} bestäms utifrån akterns utformning:

$$\begin{cases} C_{stern} = -10, & \text{V-formad akter} \\ C_{stern} = 0, & \text{Normal akter} \\ C_{stern} = 10, & \text{U-formad akter} \end{cases} \quad (39)$$

R_{APP} Bihangsmotstånd

Bihangen utgörs av alla tillägg utanpå skrovet. Bihangsmotståndet beräknas enligt:

$$R_{APP} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot \sum S_{APP} \cdot (1 + k_2)_{eq} \cdot C_F \quad (40)$$

där S_{APP} [m²] är den våtlagda ytan hos respektive bihang. Den prismatiska koefficienten, C_F räknas ut enligt ekvation 35 ovan. Motståndsfaktorerna för respektive bihang, $1 + k_2$ [-], visas i Tabell 39:

Tabell 39: Uppskattade bihangsmotståndstillägg $1 + k_2$

Roder akter om skedda	1,5-2,0
Utanpåliggande roder	1,3-1,5
Balanserade roder för twin-screw	2,8
Axelfästen	3,0
Skedda	1,5-2,0
Axelbussning	3,0
Skrovbussning	2,0
Axlar	2,0-4,0
Stabiliseringsfenor	2,8
Dome	2,7
Slingerköl	1.4

och den sammanlagda motståndsfaktorn ges av:

$$(1 + k_2)_{eq} = \frac{\sum (1 + k_2) \cdot S_{APP}}{\sum S_{APP}} \quad (41)$$

Om det finns bogproppelar ska tillägg göras för dessa enligt

$$(1 + k_2)_{BTO} = \rho \cdot V^2 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot C_{BTO} \quad (42)$$

där d är diametern på tunneln och motståndskoefficienten är i intervallet $0.003 < C_{BTO} < 0.012$ [-] men generellt i låga siffror i intervallet.

R_W Vågbildningsmotsånd

Fartygets framfart ger upphov till vågor, dels den transversella vågen som fartyget puttar framför sig, vilket i sin tur ger upphov till ett motstånd. Detta kan motverkas något med hjälp av en bulb som med flit skapar en våg som skall interferera med den transversella vågen för att minska motståndet. Summan av dessa vågors motstånd utgör alltså vågmotståndet som beräknas enligt följande:

$$R_W = c_1 \cdot c_2 \cdot c_5 \cdot \nabla \cdot \rho \cdot g \cdot e^{m_1 \cdot F_n^{-0.9} + m_2 \cdot \cos(\lambda \cdot F_n^{-2})} \quad (43)$$

där F_n är Froudetalet baserat på längden och:

$$c_1 = 223105 \cdot c_7^{3.78613} \cdot \left(\frac{T}{B}\right)^{1.07961} \cdot (90 - i_E)^{-1.37565} \quad (44)$$

där i_E beskriver vattenlinjens angreppsvinkel i fören och beräknas enligt:

$$i_E = 1 + 89 \cdot e^{-\left(\frac{L}{B}\right)^{0.80856} \cdot (1 - C_{WP})^{0.30484} \cdot (1 - C_P - 0.0225 LCB)^{0.6367} \cdot \left(\frac{L_T}{B}\right)^{0.34574} \cdot \left(\frac{100 \cdot \nabla}{L^3}\right)^{0.16302}} \quad (45)$$

Vidare är:

$$\begin{cases} c_7 = \left(\frac{B}{L}\right)^{0.33333}, & \frac{B}{L} < 0.11 \\ c_7 = \frac{B}{L}, & 0.11 < \frac{B}{L} < 0.25 \\ c_7 = 0.5 - 0.0625\frac{L}{B}, & \frac{B}{L} > 0.25 \end{cases} \quad (46)$$

Koefficienten c_2 beskriver bulbens positiva inverkan på vågbildningsmotståndet:

$$c_2 = e^{-1.89\sqrt{c_3}} \quad (47)$$

På liknande sätt beskriver c_5 akterspegelns påverkan på vågbildningsmotståndet:

$$c_5 = 1 - \frac{0.8 \cdot A_T}{B \cdot T \cdot C_M} \quad (48)$$

där A_T [m²] är akterspegeln transversella och våtlagda area när fartyget ligger still.

$$\begin{cases} \lambda = 1.446 \cdot C_P - 0.03 \cdot \frac{L}{B}, & \frac{L}{B} < 12 \\ \lambda = 1.446 \cdot C_P - 0.36, & \frac{L}{B} > 12 \end{cases} \quad (49)$$

$$m_1 = 0.0140407 \cdot \frac{L}{T} - 1.75254 \cdot \frac{\nabla^{\frac{1}{3}}}{L} - 4.79323 \cdot \frac{B}{L} - c_{16} \quad (50)$$

där:

$$\begin{cases} c_{16} = 8.07981 \cdot C_P - 13.8673 \cdot C_P^2 + 6.984388 \cdot C_P^3, & C_P < 0.80 \\ c_{16} = 1.73014 - 0.7067 \cdot C_P, & C_P > 0.80 \end{cases} \quad (51)$$

$$m_2 = c_{15} \cdot C_P^2 \cdot e^{-0.1 \cdot F_n^{-2}} \quad (52)$$

där:

$$\begin{cases} c_{15} = -1.69385, & \frac{L^3}{\nabla} < 512 \\ c_{15} = -1.69385 + \frac{\frac{L}{T} - 8.0}{2.36}, & 512 < \frac{L^3}{\nabla} < 1727 \\ c_{15} = 0, & \frac{L^3}{\nabla} > 1727 \end{cases} \quad (53)$$

Koefficienten c_3 beskriver bulbens negativa inverkan på vågbildningsmotståndet:

$$c_3 = \frac{0.56 \cdot A_{BT}^{1.5}}{B \cdot T \cdot (0.31 \cdot \sqrt{A_{BT}} + T_F - h_B)} \quad (54)$$

där A_{BT} är bulbens transversella area, h_B är hur högt över köllinjen bulbens mitt är och T_F är frontens djupgående.

R_B Bulbmotstånd

Även om bulben totalt sett minskar motståndet genom att skapa en våg som interfererar med med den transversella vågen så bidrar alla saker utanpå skrovet med ett visst motstånd. Detta motstånd beräknas enligt:

$$R_B = \frac{0.11 \cdot e^{-3 \cdot P_B^{-2}} \cdot F_{ni}^{-2} \cdot A_{BT}^{1.5} \cdot \rho \cdot g}{1 + F_{ni}^2} \quad (55)$$

där P_B är beskriver hur mycket av bulben som är dränkt och hur långt under ytan den befinner sig. F_{ni} är Froudetalet baserat på strömningen runt bulben:

$$F_{ni} = \frac{V}{\sqrt{g \cdot (T_F - h_B - 0.25 \cdot \sqrt{A_{BT}}) + 0.15 \cdot V^2}} \quad (56)$$

R_{TR} Akterspegelmotstånd

Även akterspegeln utgör på samma sätt som bulben ett motstånd i vattnet som en konsekvens av tryckskillnader runt akterspegeln. Motståndet kan beskrivas som:

$$R_{TR} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_T \cdot c_6 \quad (57)$$

där:

$$\begin{cases} c_6 = 0.2 \cdot (1 - 0.2 \cdot F_{nT}), & F_{nT} < 5 \\ c_6 = 0, & F_{nT} > 5 \end{cases} \quad (58)$$

F_{nT} är Froudetalet med avseende på akterspegeln:

$$F_{nT} = \frac{V}{\sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot A_T}{B \cdot (1 + C_{WP})}}} \quad (59)$$

R_A Omskalning av skrovets ytfinhet

Holtrop & Mennen's metod bygger på en regressionsanalys av modelltester. Sedan skalas modelltesterna upp till full skala med hjälp av dynamisk similaritet. Detta kan dock med lätthet inte appliceras på ytfinheten och den behöver således skalas om.

$$R_A = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot C_A \quad (60)$$

där korrelationskoefficienten C_A är:

$$C_A = 0.006 \cdot (L + 100)^{-0.16} - 0.00205 + 0.003 \cdot \sqrt{\frac{L}{7.5}} \cdot C_B^4 \cdot c_2 \cdot (0.04 - c_4) \quad (61)$$

Koefficienten c_2 beräknas enligt ekvation 47 och koefficienten c_4 enligt:

$$\begin{cases} c_4 = \frac{T_F}{L}, & \frac{T_F}{L} < 0.04 \\ c_4 = 0.04, & \frac{T_F}{L} > 0.04 \end{cases} \quad (62)$$

Ovanstående formulering av C_A [-] kan användas om $C_A > 150\mu m$, om ytfiheten är finare än så skall formuleringen från ITTC-1978 användas:

$$C_A = \frac{0.105 \cdot k_s^{\frac{1}{3}} - 0.005579}{L^{\frac{1}{3}}} \quad (63)$$

Metodens giltighetsintervall

Tabell 40: Giltighetsområdet för Holtrop & Mennens metod

Fartygstyp	Max Froude-tal	C_P	L/B	B/T
Tankers, bulkfartyg	0,24	0,73-0,85	5,1-7,1	2,4-3,2
Trålare, bogserbåt och grunt gående transportfartyg	0,38	0,55-0,65	3,9-6,3	2,1-3,0
Containerfartyg och fartyg av klass jagare	0,45	0,55-0,67	6,0-9,5	3,0-4,0
Linjefartyg	0,30	0,56-0,75	5,3-8,0	2,4-4,0
RORO samt bilfärjor	0,35	0,55-0,67	5,3-8,0	3,2-4,0



CHALMERS