



Høgskulen  
på Vestlandet

## BACHELOROPPGAVE

# Livsløpsanalyse av hydrogen-elektrisk ferje

Life cycle assessment of hydrogen-electric ferry

Anna Miriam Jokela

Ingrid Grøteide Polden

Oskar Sørbø Tanum

Vebjørn Seim

Fornybar Energi

Fakultet for ingeniør- og naturvitenskap

Veileder: Dr. Geoffrey Sean Gilpin

28.05.2018

Jeg bekrefter at arbeidet er selvstendig utarbeidet, og at referanser/kildehenvisninger til alle kilder som er brukt i arbeidet er oppgitt, jf. Forskrift om studium og eksamen ved Høgskulen på Vestlandet, § 10.

# Forord

Denne bacheloroppgaven representerer avslutningen på bachelorgraden vår i Fornybar Energi ved Institutt for miljø- og naturvitenskap ved Høgskulen på Vestlandet. Oppgaven er skrevet våren 2018 av fire studenter og omhandler miljøpåvirkningen til ulike framdriftsteknologier i ferjesektoren.

I denne bachelorperioden har vi lært oss hvordan en gjennomfører livsløpsanalyser (LCA) og hvordan dataprogrammet SimaPro fungerer. Vi startet med et mini-kurs i LCA med førsteamanuensis og veileder Dr. Geoffrey Sean Gilpin som foreleser. I dette kurset fikk vi innføring i både den kvalitative og kvantitative delen av en LCA. Vi var også i Florø i oppstartsfasen av prosjektet og hadde møte med Fjord1 hvor vi diskuterte og formet oppgaven sammen. Underveis fikk vi en forståelse av hvor tidkrevende og omfattende en LCA er. Med en senere tidsfrist kunne vi utvidet oppgavens omfang og dermed økt nøyaktigheten av resultatene.

Vi vil rette en stor takk til veilederen vår Dr. Geoffrey Sean Gilpin for å ha introdusert oss til metodikken knyttet til LCA og for hans bidrag med engasjement og kunnskap rundt dette emnet. Han har gjennom bachelorprosjektet drevet aktivt med opplæring og veiledning, noe vi setter stor pris på. Vi ønsker også å gi en ekstra takk til Steinar Frøyen Kostøl fra Fjord1 for et godt samarbeid. Han har kommet med gode forslag til utformingen av oppgaven og vært svært hjelpsom med å gi oss den informasjon som var nødvendig for å gjennomføre oppgaven.

Videre ønsker vi Fjord1 lykke til med hydrogenprosjektet sitt.

Sogndal

28.05.2018

Anna Miriam Jokela

Ingrid Grøteide Polden

Vebjørn Seim

Oskar Tanum

# Sammendrag

Den økende andelen klimagasser har fått verdens ledere til å samles og iverksette ulike klimatiltak. I 2015 ble Paris-avtalen vedtatt og sammen med EU, skal Norge redusere egne utslipp med 40 % innen 2030. Norge har utarbeidet en rekke klimatiltak, og da spesielt rettet mot transportsektoren som i 2017 sto for 37 % av karbondioksidutslippet fra Norge. Et av disse tiltakene er krav om at alle nye riksvei-ferjer skal ha lav- eller nullutslippsteknologi. Statens Vegvesen har derfor utlyst en utviklingskontrakt for en hydrogen-elektrisk ferje på sambandet Hjelmeland-Nesvik-Skipavik.

Et av selskapene som er aktuell til å vinne denne kontrakten er Fjord1. Vi har i samarbeid med Fjord1 utviklet en produksjon til propell livsløpsanalyse (LCA) for å kartlegge energibehov (CED) og globalt oppvarmingspotensial (GWP) for en hydrogen-elektrisk drevet ferje og sammenligne det opp mot dieseldrevet ferje. Studiet analyserer også hvordan CED og GWP endrer seg dersom den hydrogen-elektriske ferjen blir endret til en helhydrogen-ferje eller en helelektrisk-ferje. Vi har utarbeidet en LCA med attribusjonell modellering, og er gjennomført med dataprogrammet SimaPro 8.5 og databasene Ecoinvent v3 og Agri-Footprint.

Resultatet viser at hydrogen-elektrisk ferje har 79 % lavere nivå av GWP enn dieselferjen. Dieselferjen har derimot 52 % lavere energibehov enn den hydrogen-elektriske ferjen. Ulempen til dieselferjen er at 99 % av energien kommer fra fossile kilder, mens 89 % av energien til den hydrogen-elektriske ferjen kommer fra elektrisitet fra vannkraft.

Sensitivitetsanalysen viser at hydrogen-elektrisk drift kommer dårligere ut i både GWP og CED i forhold til helelektrisk drift. Hydrogendrift gjør det dårligst i denne sammenligningen på grunn av ekstra elektrisitet, som må tilføres systemet. Denne ekstra elektrisiteten er nødvendig på grunn av lave virkningsgrader i elektrolysen og brenselcellene, i forhold til de høyere virkningsgradene i helelektrisk drift.

# Abstract

The increasing amount of greenhouse gases has made the world leaders stand together and implement various climate measures. In 2015, the Paris agreement was adopted and together with the EU, Norway has committed to reducing its own emissions by 40 % by 2030. Norway has devised a number of climate measures, specifically aimed at the transport sector, which in 2017 accounted for 37 % of carbon dioxide emissions from Norway. One of these measures is that all new primary road-ferrys must have low- or zero emission technology. The Norwegian Public Roads Administration has therefore announced a development contract for a hydrogen-electric ferry at Hjelmeland-Nesvik-Skipavik.

One of the potential companies to win this contract is Fjord1. We have, in cooperation with Fjord1, developed a production to propeller life cycle assessment (LCA) to map energy demand (CED) and global warming potential (GWP) for a hydrogen-electric powered ferry and compare it to the diesel-powered ferry. The study also analyses changes in CED and GWP if the ferry is changed to a full-hydrogen ferry or a full-electric ferry. The LCA has an attributional approach and was carried out with the computer program SimaPro 8.5 and the databases Ecoinvent v3 and Agri-Footprint.

The result shows that the hydrogen-electric ferry has a 79 % lower GWP-level than the diesel ferry. The diesel ferry, on the other hand, has 52 % lower energy requirements than the hydrogen-electric ferry. The downside to the diesel ferry is that 99 % of the energy comes from fossil sources, while 89 % of the energy of the hydrogen-electric ferry comes from electricity from hydropower.

Although hydrogen-electric operation is better than diesel operation for some measurements, it is poorer in both GWP and CED in relation to full-electric operation. Hydrogen operation is the worst in this comparison due to additional electricity supplied to the system. This extra electricity is required due to low efficiency in the electrolysis and fuel cell, in relation to the higher efficiency of full-electric operation.

# Innholdsfortegnelse

Forord.....	ii
Sammendrag.....	iii
Abstract.....	iv
Figurliste.....	vii
Tabell.....	viii
Ordforklaringer .....	x
1 Introduksjon.....	11
1.1 Klimautfordringen, nasjonalt samarbeid og tiltak .....	11
1.2 Ferjesektoren i dag.....	13
1.3 Marin diesel.....	14
1.4 Alternativer til fossilt drivstoff .....	17
1.5 Hydrogen som bærekraftig løsning.....	20
1.6 Lignende prosjekter.....	26
1.7 Prosjektbeskrivelse.....	27
1.8 Andre studier innen maritim skipsfart .....	29
2 Metode.....	32
2.1 Metode.....	33
2.2 Beregningsmetode .....	38
2.3 Begrensninger .....	42
2.4 SimaPro og Ecoinvent.....	42
3 Hensikt og omfang .....	44
3.1 Hensikt.....	44
3.2 Omfang.....	45
4 Livsløpsregnskap .....	51

4.1	Driftsprofil .....	51
4.2	Hydrogen-elektrisk ferje.....	53
4.3	Dieselferje .....	62
5	Resultat .....	67
5.1	Konsekvensanalyse .....	67
5.2	Globalt oppvarmingspotensial .....	69
5.3	Kumulativt energibehov .....	73
5.4	Sensitivitetsanalyse .....	79
6	Diskusjon .....	84
6.1	Diskusjon av resultater .....	84
6.2	Vårt resultat sammenlignet med litteratur.....	89
6.3	Datagrunnlag .....	92
6.4	Hydrogen sin rolle i norsk ferjesektor .....	96
6.5	Kritisk gjennomgang.....	99
7	Konklusjon.....	101
8	Kilder .....	103
9	Vedlegg .....	107

# Figurliste

<i>Figur 1 fremtidens fordeling av drivstoff på ferjer, (Berger, 2016)</i> .....	14
<i>Figur 2 Illustrasjon av totaktsmotor (Sarsten &amp; Fiskaa, 2009) .....</i>	15
<i>Figur 3 Illustrasjon av firetaktsmotor (Sarsten &amp; Fiskaa, 2009) .....</i>	16
<i>Figur 4 Viser typisk celle som er brukt til elektrolyse av vann .....</i>	21
<i>Figur 5 Diagram av PEMFC (Wikipedia, 2018b).....</i>	23
<i>Figur 6 Lokalisjon av sambandet i Rogaland .....</i>	28
<i>Figur 7 Ferjesambandet Hjelmeland-Skipavik-Nesvik i Rogaland .....</i>	28
<i>Figur 8 De fire trinnene i en LCA (ISO, 2006)......</i>	34
<i>Figur 9 Flytdiagram av prosessene som er analysert. ....</i>	45
<i>Figur 10 Ferjestrekningen Hjelmeland-Nesvik som funksjonsheten er basert på.....</i>	46
<i>Figur 11 En forenklet versjon av skroget med avgrensningen av maskinrommet.....</i>	47
<i>Figur 12 Illustrasjon av systemene studiet.....</i>	48
<i>Figur 13 Driftsprofilen viser hvor stor prosent av maks effekt som trengs ved å kjøre båten en kryssing .....</i>	51
<i>Figur 14 De analyserte prosessene i den hydrogen-elektriske ferjen .....</i>	53
<i>Figur 15 Hovedkomponentene i et elektrolyseanlegg .....</i>	55
<i>Figur 16 Simplifisert flytdiagram av elektrolyse .....</i>	58
<i>Figur 17 De ulike andelene av energikilder i den norske kraftmiksen .....</i>	58
<i>Figur 18 simplifisert flytdiagram av brenselcelle .....</i>	59
<i>Figur 19 De analyserte prosessene i dieselferjen .....</i>	62
<i>Figur 20 Oversikt over fremdriftsmaskineriet i dieselsystemet .....</i>	63
<i>Figur 21 Prosentvis bidrag mellom de to ferjealternativene i de ulike effektkategoriene .....</i>	68
<i>Figur 22 Grafen viser utslippsbidragene til den hydrogen-elektriske ferjen i prosent.....</i>	70
<i>Figur 23 Grafen viser utslippsbidraget til elektrisitet på det totale utslippet i prosent.....</i>	70
<i>Figur 24 Grafen viser hvor utslippene i GWP kommer fra og deres andel i prosent .....</i>	71
<i>Figur 25 Grafisk fremvisning av totalutslippet fra hydrogen-elektrisk og diesel.....</i>	72
<i>Figur 26 Prosentfordeling av CED for hydrogen-elektrisk ferje .....</i>	74
<i>Figur 27 Prosentfordeling av CED for dieselferjen .....</i>	76
<i>Figur 28 Sammenligning CED Hydrogen-elektrisk ferje og dieselferje.....</i>	78

<i>Figur 29 Grafen viser GWP for helelektrisk, helhydrogen, og hydrogen-elektrisk ferje</i> .....	80
<i>Figur 30 Grafen viser CED for helelektrisk, helhydrogen, og hydrogenelektrisk ferje</i> .....	81
<i>Figur 31 Denne grafen viser GWP etter endringer ved skalering av batteri</i> .....	82
<i>Figur 32 Grafen viser kumulativt energibehov etter endringer ved skalering av batteri.</i> .....	83
<i>Figur 33 Viser potensielt årlig globalt oppvarmingspotensial av ulike ferjer</i> .....	97
<i>Figur 34 Viser potensielt årlig energibehov av ulike ferjer</i> .....	98

## Tabell

<i>Tabell 1 De ulike typene av brenselceller (Hubert, 2015)</i> .....	24
<i>Tabell 2 Publiserte livsløpsanalyser, som kan sammenlignes opp mot vår studie</i> .....	29
<i>Tabell 3 Eksempler på klimagasser og deres påvirkningsgrad på global oppvarming (IPCC, 2014)</i> .....	49
<i>Tabell 4 Viser energien som trengs for å kunne kjøre båten en kryssing</i> .....	52
<i>Tabell 5 Oppsummering av inngangsdata valgt for produksjonen av drivstoffet til den hydrogen-elektriske ferjen</i> .....	54
<i>Tabell 6 Material og mengdene som inngår i de forskjellige komponentene sammen med kilde for valgt LCI database</i> .....	55
<i>Tabell 7 Parametere for elektrolyseanlegg , fra NEEDS (2008)</i> .....	57
<i>Tabell 8 De ulike materialene og mengden som kreves i produksjonen av en brenselcellene med en effekt på 746 kW. I tillegg er det lagt med hvilke LCI datasett som er brukt</i> .....	60
<i>Tabell 9 Viser batteri og overdimensjonert batteri</i> .....	61
<i>Tabell 10 Viser innhold i lagringstank med en kapasitet på 23,88 m<sup>3</sup></i> .....	61
<i>Tabell 11 Diesel komponenter</i> .....	64
<i>Tabell 12 Motordata ut i fra driftsprofil</i> .....	66
<i>Tabell 13 Resultatet av konsekvensanalysen for de to fargealternativene vist i ekvivalenter</i>	67
<i>Tabell 14 Hydrogen-elektrisk ferje sitt GWP utslipp</i> .....	69
<i>Tabell 15 GWP for de ulike komponentene i dieselferjen</i> .....	71
<i>Tabell 16 Drivstoffalternativ</i> .....	72
<i>Tabell 17 Energikilder og energimengde som kreves i prosessene hos den hydrogen-elektriske ferjen</i> .....	73



<i>Tabell 18 viser energibehovet til de forskjellige delene i dieselferjen .....</i>	<i>75</i>
<i>Tabell 19 Energikilder og mengde energi som kreves i dieselferjen .....</i>	<i>75</i>
<i>Tabell 20 Sammenligning CED mellom hydrogen-elektrisk ferje og dieselferjen .....</i>	<i>77</i>
<i>Tabell 21 Sammenligning av GWP for en helelektrisk ferje og helhydrogen ferje .....</i>	<i>79</i>
<i>Tabell 22 Sammenligning av CED for en helelektrisk ferje og helhydrogen ferje .....</i>	<i>80</i>
<i>Tabell 23 Sammenligning av GWP for batteri på 1000, 1250 og 1500 kWt.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabell 24 Sammenligning av CED for batteri på 1000, 1250 og 1500 kWt .....</i>	<i>82</i>
<i>Tabell 25 Virkningsgraden for de ulike ferjene og deres komponenter fra produksjon til propell .....</i>	<i>86</i>
<i>Tabell 26 Vår studie sammenlignet med litteratur .....</i>	<i>89</i>
<i>Tabell 27 Viser årlig GWP-100 fra de forskjellige ferjene målt i kg CO<sub>2</sub> ekv.....</i>	<i>96</i>
<i>Tabell 28 Tabellen viser årlig kumulativt energibehov fra de forskjellige ferjene målt MJ .....</i>	<i>97</i>

# Ordforklaringer

- AFC - Alkaliske brenselcelle
- Base load – grunnlast i det elektriske behovet
- CED – *Cumulative Energy Demand* – Kumulativt energibehov
- CH<sub>4</sub> – Metan
- CO<sub>2</sub> – Karbondioksid
- DMFC – *Direct methanol fuel cell* - Direkte metanol brenselcelle
- EØS- Europeiske økonomiske samarbeidsområde
- GLO – Global
- GWP- *Global Warming Potential*- Globalt oppvarmingspotensial
- H<sub>2</sub> – Hydrogen
- H<sub>2</sub>O – Vann
- ISO – Den internasjonale standardiseringsorganisasjonen
- ILCD – International Reference Life Cycle Data System
- KOH – *Potassium hydroxide*- Kaliumhydroksid
- kW – Kilowatt
- kWt – Kilowatttime
- LCA- *Life cycle analysis*- Livsløpsanalyse
- LCI – *Life cycle inventory*- Livsløpsregnskap
- LCIA- *Life cycle impact assessment*- Livsløpseffektvurdering
- LNG – *Liquefied natural gas* – Flytende naturgass
- MCFC – *Molten carbonate fuel cell* - Flytende karbonat brenselcelle
- MDO – Marin diesel(olje)
- Nm<sup>3</sup> – Normalkubikkmeter. Hydrogen volum ved 0 °C og 1 atm trykk.
- NO<sub>x</sub> – Nitrogenoksid
- N<sub>2</sub>O- lystgass
- O<sub>2</sub> – Oksygen
- PAFC - *Phosphoric acid fuel cells* - Fosforsyre brenselcelle
- PEMFC - *Proton exchange membrane fuel cell* - Protonutvekslingsmembran brenselcelle
- RER – Europa
- ROW – *Rest of the World* – Resten av verden
- SOFC – *Solid oxide fuel cell* - Fastoksid brenselcelle
- TTP – *Tank To Propell* – Tank til propell
- WTT – *Well To Tank* – Brønn til tank

# 1 Introduksjon

## 1.1 Klimautfordringen, nasjonalt samarbeid og tiltak

Klimagasser, også kalt drivhusgasser, er gasser som danner et nødvendig og beskyttende gasslag i atmosfæren. De klimagassene det fokuseres mest på er karbondioksid (CO<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>), lystgass (N<sub>2</sub>O) og fluorholdige gasser (f-gasser). For at planeten skal ha en levelig temperatur er den avhengig av å være omgitt av disse gassene. Grunnen til dette er at gassene forårsaker *drivhuseffekten*. Stråling fra solen går gjennom gasslaget og treffer jordoverflaten for å deretter bli reflektert tilbake mot atmosfæren. Strålene vil derimot ikke trenge like lett gjennom gasslaget på vei tilbake og vil reflekteres tilbake til jordoverflaten. Det er denne «innesperringen» av strålene som varmer opp planeten. Dersom mengden av klimagasser endres, vil også strålingsbalansen bli påvirket og dette vil igjen skape konsekvenser for det globale klimaet.

Menneskelig aktivitet som avskoging og forbrenning av fossile brensler øker mengden av klimagasser i atmosfæren. Denne økningen bidrar så til den globale oppvarming. Den gassen som bidrar mest til oppvarmingen er CO<sub>2</sub>, og siden førindustriell tid har mengden CO<sub>2</sub> i atmosfæren økt med 40 % (Miljødirektoratet, 2017). For å unngå en kritisk økning av temperaturen på jorden, må CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen stabilisere seg på et nivå under 400 milliondeler (ppm) (Miljødirektoratet, 2017). I dag er CO<sub>2</sub> nivået på 407 ppm (NASA, 2018).

Den vedvarende økningen av menneskeskapte klimagasser skaper store globale problemer. Ekstremvær, ismassetap, havnivåstigning og det tiltagende antall klimaflyktninger er noen av de mest sentrale problemområdene som preger verden. Blant verdens ledere har problematikken knyttet til dette i stor grad blitt anerkjent, og det er iverksatt utslippsreducerende tiltak. Dette har resultert i et globalt samarbeid med resultater som Kyoto- og Parisavtalen (Olerud, 2018). I Parisavtalen ble lederne enige om *togradersmålet*. Togradersmålet er et mål om at den globale oppvarmingen skal holdes under to grader. Gjennom det europeiske økonomiske samarbeidsområde (EØS) har Norge et tett samarbeid med den europeiske union (EU). Norge er derfor pliktet til å oppfylle 2030-målet fra

Parisavtalen om en nasjonal utslippsreduksjon på 40 % sammenlignet med 2005, for å nå togradersmålet (Klima- og miljødepartementet, 2017).

Midlene som Norge har opptjent fra fossil utvinning siden 1970-tallet, kan brukes til teknologiutvikling som har en positiv effekt for miljøet. Denne kapasiteten som Norge disponerer setter nasjonen i en ansvarsstilling som pådriver og forbilde. Ny miljøteknologi og en overgang til fornybare energikilder er blant tiltakene som kreves for å nå FNs mål om å stoppe klimaendringene. Her kan Norge spille en viktig rolle. Regjeringen har utarbeidet en rekke klimatiltak som skal ligge til grunn i de kommende årene for å oppnå 2030-målet. Tiltakene er spesielt rettet mot en av de store utslippssektorene, transport.

Transportsektoren innebærer alle mobile kilder. De mobile kildene omfatter veitrafikk, jernbane, luftfart, skip og båter og motorredskaper. Til sammen stod disse for 37 % av CO<sub>2</sub>-utslippet i 2016 (Fedoryshyn, 2017b).

I følge Statistisk sentralbyrå (SSB) utgjorde veitrafikk hele 62 % av utslippene fra mobile kilder, og er dermed den tredje høyeste utslippskilden i Norge etter industri og olje- og gassvirksomheten. Utslippene fra veitrafikken ble redusert med 4 % fra 2015 til 2016, hovedsakelig som følge av implementering av biodrivstoff i dieselen. Det ble i løpet av dette året tatt i bruk 140 % mer biodrivstoff, noe som ga en innblanding i diesel på 10 % og en fra 1,5 TWt per år til 3,9 TWt (Fedoryshyn, 2017a). For 2017 har vi en enda høyere økning på innblandingsprosent, med hele 16 % (Henriksen, 2018). Ettersom kravet var på kun 8 %, kan dette kan sees på som et klart signal mot en grønnere transportsektor.

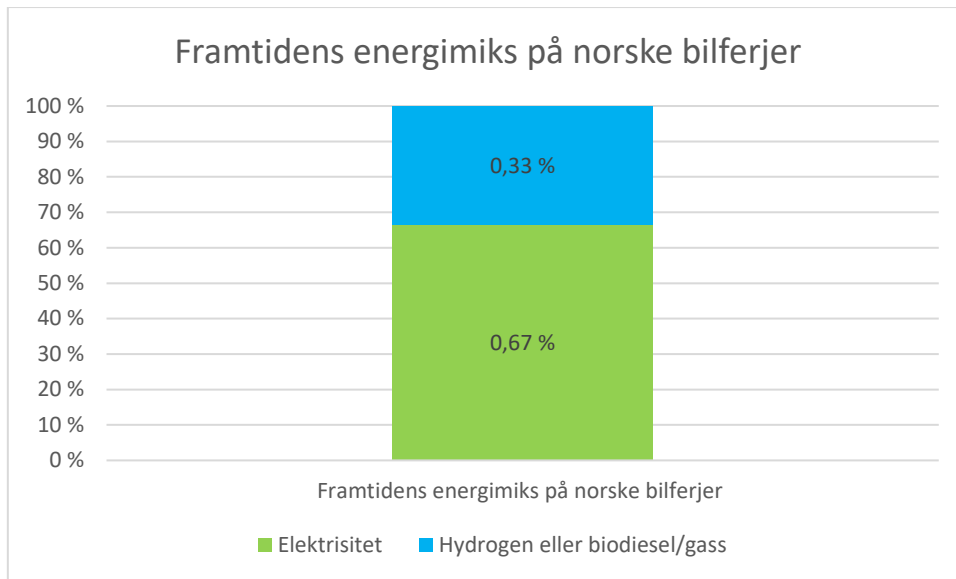
Etter veitrafikken er det skipsfart som står for den høyeste andelen av klimagassutslipp fra mobile kilder, med 17 %. Skipsfart har også hatt reduksjon i utslipp. Dette er trolig grunnet en effektivisering av skipsflåten, og ettersom en del skip bunkrer i utlandet (Klima- og miljødepartementet, 2017). Til tross for reduksjonen i utslipp øker skipstrafikken, og den er forventet å øke betraktelig de neste årene. Beregninger fremskaffet av Kystverket viser at mengde utseilt distanse i innenriks skipsfart vil øke med 41 % frem mot 2040 (DNV GL, 2016a).

For å unngå at utslippene stiger parallelt med den økende skipstrafikken, er det nødvendig med betydelige tiltak. Grønn skipsfart er dermed blitt en av regjeringens prioriterte innsatsområder. Regjeringen ønsker at 40 % av alle skip skal benytte metoder med lavt- eller

nullutslippsteknologi innen utgangen av 2030 (Klima- og miljødepartementet, 2017). Denne teknologien som skal bidra til en overgang fra fossile drivstoff baserer seg på blant annet batteri-, LNG-, biodrivstoff-, hydrogen- eller hybridteknologi (Haarstad & Rusten, 2018). For å stimulere til denne utviklingen har regjeringen bidratt med en rekke støtteordninger. Tilskuddsordninger til anbudsprosesser, støtteordning for godsoverføring fra vei til sjø, miljøavtaler om reduksjon av helseskadelige gasser (NO<sub>x</sub>) og prising av utslipp er noen av virkemidlene regjeringen har tatt i bruk (Klima- og miljødepartementet, 2017).

## 1.2 Ferjesektoren i dag

Passasjerskip, offshoreskip og fiskefartøy er de tre kategoriene som dominerer utslippene i innenriks skipsfart. Kategorien passasjerskip består av blant annet ferjer og hurtigbåter (DNV GL, 2016b). Norge er en kystnasjon, og store deler av befolkningen er avhengig av ferjesambandet som per i dag består av 130 forskjellige ferjesamband som igjen har opptil flere ferjer på hver strekning (Statens Vegvesen, 2017b). Passasjerskip er en så stor utslippskilde ettersom de fleste fartøyene går på marine diesel (MDO) eller tungolje (HFO) (Haarstad & Rusten, 2018). Dette er en del av transportsektoren som har potensial som testarena for ny teknologi. Statens vegvesen har blant annet satt mål for fremtidens kraftmiks på norske bilferjer som vist i figuren under (*Figur 1*). Kompetansen som finnes i den norske maritime sektoren skal brukes til å finne løsninger som på lang sikt kan videreføres globalt og bidra til reduksjonen av klimagassutslipp (Samferdselsdepartementet, 2017b).



Figur 1 fremtidens fordeling av drivstoff på ferjer, (Berger, 2016)

Norge er ledende på utviklingen av renere ferjetransport. I 2000 ble verdens første gassdrevne ferje produsert i Møre og Romsdal og videre i 2014 ble den første helelektriske ferjen, MF Ampere, sjøsatt i Sogn og Fjordane. En annen aktuell, men ikke like moden teknologi, er hydrogen. Norge har i denne sammenhengen blitt sett på som en foregangsnaasjon med sin rolle i denne teknologien (Klima- og miljødepartementet, 2017). Et av de spesifikke tiltakene regjeringen har satt i gang er ulike miljø- og klimaforbedrende anbudsprosesser. Et av anbudene som er lyst ut av var om å bygge og drifte en hydrogen-elektrisk ferje fra 2021 (Klima- og miljødepartementet, 2017).

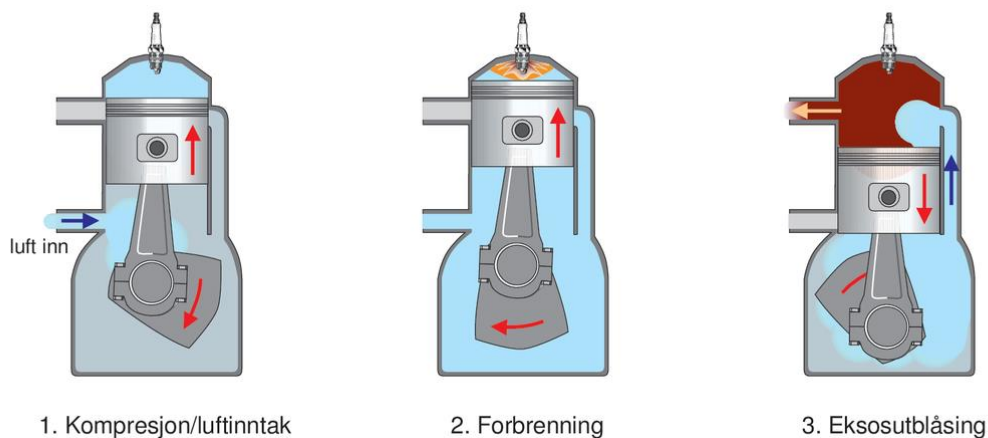
### 1.3 Marin diesel

Som tidligere nevnt driftes de fleste passasjerskip i dag på fossilt drivstoff. Nærmere bestemt en dieselmotor hvor drivstoffet som oftest er marine diesel (MDO). MDO skiller seg fra vanlig diesel med at den er tyngre og har et høyere svovelinnhold (Wikipedia, 2018a).

Forbrenningen av MDO har påvirkninger på både et lokalt og globalt nivå. Lokale påvirkninger kan være lydforurensing, utslipp i vann og luft, og globalt med CO<sub>2</sub>-utslipp. Dersom det skulle oppstå en lekkasje, vil oljeutslippet forårsake store problemer for miljøet. MDO er den mindre raffinert enn diesel og bensin, dette gjør det også til det billigere

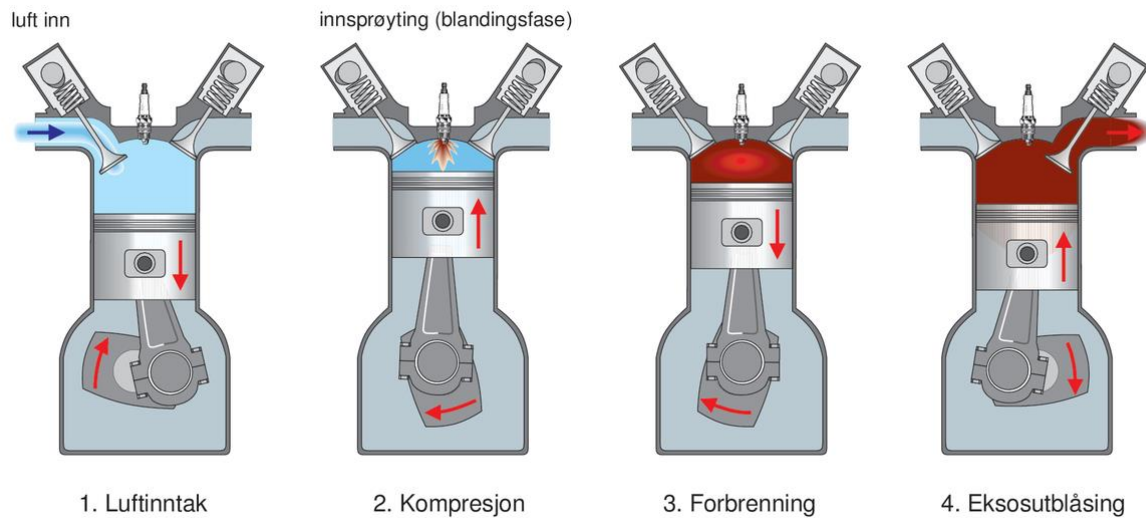
alternativet (Hubert, 2015). Videre er en annen positiv egenskap hos MDO at det er lett å fylle på ettersom infrastrukturen allerede er bygget ut. I tillegg er det enkelt å lagre ettersom det er flytende (Hubert, 2015).

Dieselmotoren som MDO forbrennes i er en selv-tennende forbrenningsmotor som drives av et stempel i kontinuerlig bevegelse. Forbrenningsmotoren kan enten være en totaktsmotor (Figur 2) eller firetaktsmotor (Figur 3). Felles for både totakts- og firetaktsmotor er at stempelet komprimerer luft og diesel som antennes under høyt trykk.



Figur 2 Illustrasjon av totaktsmotor (Sarsten & Fiskaa, 2009)

Totaktsmotoren brukes hovedsakelig i store skip med lave turtall, mens firetaktsmotoren brukes i skip med høyere turtall og i mindre båter (Sarsten & Fiskaa, 2009). Det er totaktsmotoren som har høyest virkningsgrad fra 47- 53 %, mens firetaktsmotoren har 38- 50 % (Lundby & Æsøy, 2014).



Figur 3 Illustrasjon av firetaktsmotor (Sarsten & Fiskaa, 2009)

### 1.3.1 Naturgass

Et annet alternativ er gassferjer. Disse ferjene går på flytende naturgass (LNG). LNG er en fossil gass, men er et mer miljøvennlig alternativ da den kan ha en utslippsreduksjon på 25 % i forhold til dieseldrift, tillegg til en 90 % reduksjon i NO<sub>x</sub>-utslipp (DNV GL, 2016b) . LNG regnes som en moden teknologi, men til tross for dette er den ikke særlig implementert i skipsfarten. Dette skyldes en mangel på både infrastruktur og produksjon av LNG (Haarstad & Rusten, 2018).



## 1.4 Alternativer til fossilt drivstoff

Utvikling, nyvinninger og optimaliseringer har bidratt til en forsterking av fossile fremdriftssystemer da disse har vært dominerende i lang tid (Haarstad & Rusten, 2018). Samtidig som dette er en moden og stabil teknologi, ser man et økende fokus på ulempene som følger med. For å gjennomføre overgangen fra fossilt drivstoff til lavutslipps- og nullutslippsteknologi er det flere alternativer som er aktuelle. Noe av teknologien er velutviklet mens andre er mer i startfasen.

### 1.4.1 Biodrivstoff

Et drivstoff som har et håpefullt utgangspunkt grunnet sin likhet til fossilt drivstoff, er biodrivstoff. Biodrivstoff er drivstoff som er dannet fra organisk materiale (sukkerrør, mais, kompost, avfall fra jord- og skogbruk osv.) og regnes som en fornybar energikilde da CO<sub>2</sub>-utslippet fra forbruket går inn i en naturlig karbonsyklus. Dermed, i motsetning til fossilt drivstoff, vil ikke forbrenning av biodrivstoff føre til en økning av CO<sub>2</sub> i atmosfæren (Haarstad & Rusten, 2018).

For båter er det tre typer biodrivstoff som er aktuelle: biodiesel, vegetabilsk olje og biogass. Ettersom biodrivstoff er relativt likt som de tilsvarende typene av fossile drivstoff (diesel og LNG), kan det brukes i det samme maskineriet uten kreve store endringer (DNV GL, 2016b). Biomasse blir for det meste dyrket på areal til essensielle mat-avlinger og krever i snitt mye areal. Til tross for at en regner bioenergi som en fornybar kilde, vil denne kilden ikke kunne ha en kontinuerlig energi i det uendelige, da problematikken med landareal og matproduksjon kommer inn. Bruken av landareal er en av de største motargumentene når det kommer til produksjon av biodrivstoff. For båtindustrien er utfordringen med biodrivstoff den manglende tilgangen. Ettersom det produseres for lite av drivstoffet, er det ikke tilstrekkelig mengde tilgjengelig til å drifte skipsfarten (Haarstad & Rusten, 2018).

### 1.4.2 Elektrisitet

En helelektrisk ferje driftes på batterier som lades mens skipet ligger til kai. Bruk av batteriteknologi i skip er fortsatt i en tidlig fase, men det som gjør teknologien attraktiv for videreutvikling er blant annet at det er en nullutslippsteknologi og at elektromotorene er veldig energieffektive (Haarstad & Rusten, 2018).

I en utredning frembragt av klima- og miljødepartementet er det to hoved-ulempersom gjelder ved elektrisk fremdrift (DNV GL, 2016b). For det første er det begrenset hvilke ferjer som er egnet for fullelektrifisering. Elektrifisering vil være egnet til ferjer på korte strekninger som kan lade ofte, ettersom batteriene ikke har kapasitet til å drifte ferjer over lange strekninger. Den andre ulempen er behovet for landbasert infrastruktur som følger med batteriene. Batteriene vil kreve at forsyningsnettene må bygges ut for å tilstrekkelig kunne supplere den effektkrevende ladeprosessen (DNV GL, 2015b).

I stedet for dieselmotoren i en dieselferje, vil en helelektriske ferje bli driftet av store batterier. Eksempelvis har ferjen Ampere 10 tonn batterier på 100 kWt (Stensvold, 2015). Erstatning av dieselmotor med batterimotor er, i motsetning til hybridløsninger (beskrevet nedfor), veldig kostnadskrevende. Dermed er elektromotorer beregnet for helt nye skrog som er spesifikt utviklet for batteri (Haarstad & Rusten, 2018). Derfor er bruk av batteriteknologi fortsatt kostnadskrevende både med tanke på selve båten, men også utbyggelsen av infrastruktur.

### 1.4.3 Hybrid

Hybridelektriske ferjer vil si ferjer som har en blanding av fremdriftsløsninger (DNV GL, 2015b). I et *plug-in hybrid electric ship* (PHES) kombinerer man teknologi fra helelektrisk og teknologi fra dieselferjer. I tillegg til en dieselmotor blir ferjen utstyrt med et batteri som kan lades opp når fartøyet ligger til kai. Et hybridskip (HES) har også batterier, men disse brukes til å optimalisere og forsterke motorkraften (DNV GL, 2015a).

Normalt er motorer optimalisert for en gitt mekanisk belastning. Dette vil sørge for en effektiv drift. Dersom en motor derimot ikke har muligheten til å gå på sin optimaliserte belastning, kan implementeringen av batterier likevel gjøre det mulig for motorene å gå på

sin optimale belastning. Her er det viktig at motoren som blir valgt passer bruken mesteparten av tiden. Dersom det kreves ekstra kraft kan batteriene dermed supplere nødvendig kraft. Slik unngår du å velge en ugunstig motor for å nå de høyere kraftbehovene. Når kraftbehovet derimot er lavt kan kraften brukes til å lade opp igjen batteriene. Dersom fartøyet krever en veldig lav belastning, kan fartøyet drives utelukkende på batterier (DNV GL, 2015).

#### 1.4.4 Hydrogen

Hydrogen er en energibærer. Det vil si at hydrogen fungerer som et lager for energi i likhet med for eksempel batteri, kull og olje (Haarstad & Rusten, 2018). Hydrogen er det vanligste grunnstoffet i universet, men på jorden er det tilnærmet ikke-eksisterende uten å være kombinert med et annet grunnstoff. Det er også det letteste grunnstoffet. Det meste av hydrogenet finnes sammen med H<sub>2</sub>O. Dermed, for å kunne bruke hydrogen som energibærer, må hydrogen fremstilles (Fornybar, 2016a). De ulike prosessene som brukes til å fremstille hydrogen blir forklart under kapittel 1.5

Som drivstoff kan hydrogen anvendes på to måter, enten som drivstoff i en brenselcelle sammen med en elektrisk motor eller som drivstoff i en dieselmotor (Simonsen, 2010). For å kunne ta i bruk hydrogen er det først nødvendig å komprimere hydrogenet før transport og forbruk. Komprimeringen gjør energitettheten høyere og gjør det mulig å transportere større mengder med gass. Hydrogen kan også omdannes til flytende form ved -253°C, men dette er svært energikrevende (Fornybar, 2016b). Hydrogen har lavere energiinnhold per volum enn de fossile drivstoffene. Bensin har et energiinnhold på 32900 MJ/m<sup>3</sup>, mens diesel har 36500 MJ/m<sup>3</sup>.

Hydrogen vil ha et energiinnhold på 1767 MJ/m<sup>3</sup> ved 165,5 bar og 20°C. Det er mulig å gjøre energiinnholdet høyere ved å gjøre om hydrogen til flytende form. Ved 1 bar og -253°C vil energiinnholdet være 8530 MJ/m<sup>3</sup>. Selv om hydrogen har lavere energiinnhold, har den høyere energitetthet per kg enn bensin og diesel, på grunn sin lave vekt. Hydrogengass har en energitetthet på 120,2 MJ/kg kontra bensin med 43,8 MJ/kg og diesel med 42,6 MJ/kg (Simonsen, 2010).

## 1.5 Hydrogen som bærekraftig løsning

Dampreforming og elektrolyse er de to dominerende metodene som brukes til produksjon av hydrogen.

### 1.5.1 Dampreforming

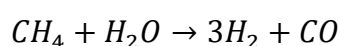
Dampreforming er den vanligste måten å fremstille hydrogen på. Hele 95 % av verdens produksjonen av hydrogen er et resultat av denne prosessen (Hubert, 2015).

Dampreforming er en velbrukt og billig prosess, med en virkningsgrad på 80-90 %.

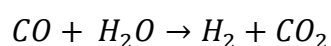
Ulempen med denne fremstillingen er utslippet av CO<sub>2</sub> (Fornybar, 2016c). Det er under fremstilling på denne måten vanlig å bruke metangass. Under en dampreforming føres metangass (CH<sub>4</sub>) og vannmolekyl (H<sub>2</sub>O) i høy temperatur inn i en katalysator. Under høyt trykk og høy temperatur blir gassene omgjort til hydrogen og CO. Deretter føres CO fra den første katalysatoren sammen med mer vann, inn i den andre katalysatoren hvor det dannes hydrogen og CO<sub>2</sub>. CO<sub>2</sub>-gassen kan enten slippes ut i atmosfæren eller fanges opp i et karbonfangstanlegg.

Reksjonslikningen er som følger:

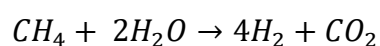
Første katalysator:



Andre katalysator:



Kombinert:

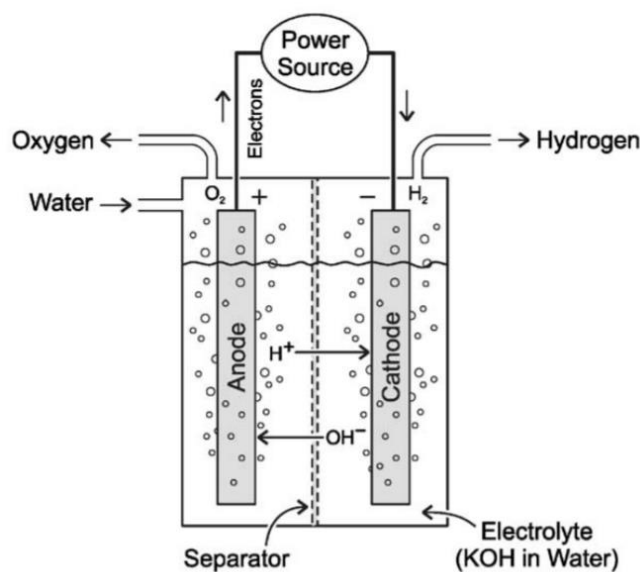


## 1.5.2 Elektrolyse

En elektrolyse er en kjemisk reaksjon som brukes til å skille grunnstoff fra hverandre. 4 % av hydrogenet som blir fremstilt kommer fra elektrolyse (Nielsen, Norby, & Karlsen, Ikke gitt).

Det finnes flere typer elektrolyse. De to vanligste typene i industrielle skala er alkalisk- og polymer elektrolytt membran elektrolyse (HyBalance, u.d.) Alkalisk elektrolyse har en virkningsgrad på 70 % (Stolten & Emonts, 2016).

I en elektrolyseprosess spaltes vannmolekyl til hydrogen- og oksygenatom ved hjelp av elektrisitet. Elektrolyse består av tre komponenter. Disse komponentene er to metallplater med ulik elektrisk ladning (anode og katode), som blir senket ned i en *elektrolytt* (Figur 4). Elektrolytt er et stoff som er i stand til å transportere ion.

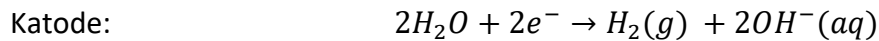
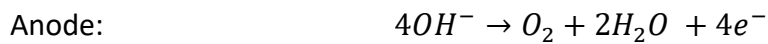


Figur 4 Viser typisk celle som er brukt til elektrolyse av vann

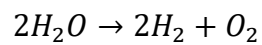
(Koroneos, Dompros, Roumbas & Moussiopoulos, 2004)

I anoden leveres det vekk elektroner (oksidasjon) og en får oksygenmolekyl i form av gass. Den motsatte prosessen foregår i katoden (reduksjon) hvor de positivt ladede ionene tar til seg elektroner. I katoden blir det hentet ut hydrogenmolekyl (Simonsen, 2010).

Reaksjonsligning for elektrolyse:



Samlet reaksjon:



### 1.5.3 Andre metoder

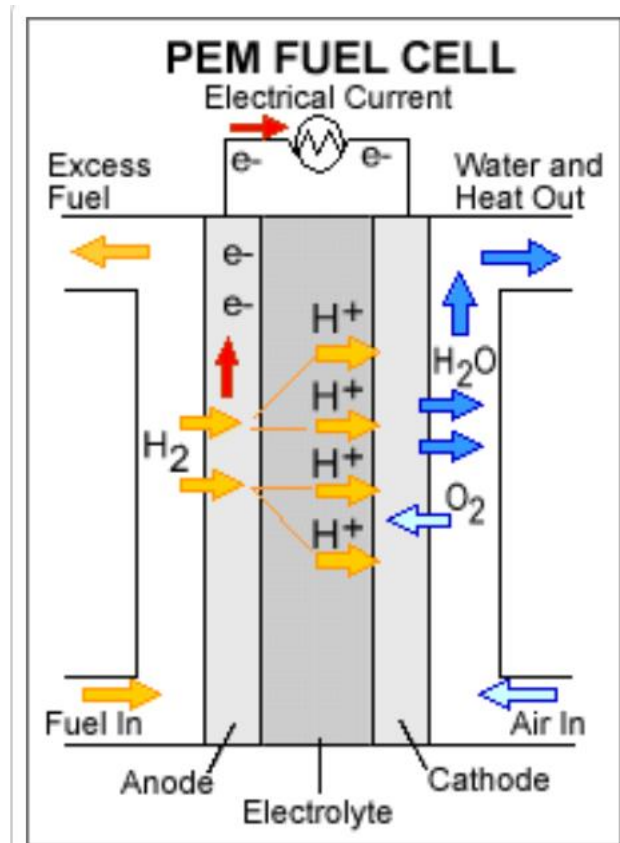
Selv om en kan fremstille hydrogen i egne prosesser er det også i dag mange industrielle prosesser som får hydrogen som biprodukt. Eksempler på dette kan være fra kjemisk- eller petrokjemisk industri, der hydrogenet kan lagres og utnyttes til senere bruk. Blant annet får HYOP sin stasjon på Herøya hydrogenet fra en nærliggende fabrikk hvor hydrogen er et biprodukt (Himle, 2014).

Det er også mulig å fremstille hydrogen av metan uten å få karbondioksid. Da må metangassen spaltes og dette blir gjort på veldig høy temperatur. Produktene blir da hydrogen og rent karbon. Ulempen med denne prosessen er at rent karbon har høyere energi enn CO<sub>2</sub>, som fører til at hydrogenet ikke får utnyttet all energien fra metanet (CH<sub>4</sub>). Til gjengjeld kan rent karbon brukes i nye produkter (Guddingsmo, Fløttre H., NKI forlaget, & Bøhle, 2009).

### 1.5.4 Brenselcelle

Etter at hydrogenet har blitt framstilt, kan det brukes som drivstoff i en brenselcelle. En brenselcelle lager energi fra hydrogen ved å la det reagere med oksygen i en elektrokjemisk

prosess (Simonsen, 2010). Brenselcelle det motsatte av prosessen som skjer i en elektrolyse. En av de vanlige brenselcellene er protonutvekslingsmembran brenselcelle (PEMFC). Komponentene til en brenselcelle er anode, katode og membran. Membranen er plassert mellom anoden og katoden som er to elektroder (Figur 5).

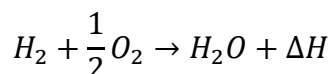


Figur 5 Diagram av PEMFC (Wikipedia, 2018b)

Forskjellige brenselcelletyper har forskjellige membraner og en PEMFC har en polymer elektrolytt membran. Membranen fungerer som en barriere som slipper i gjennom positivt ladde ioner. For en PEMFC er det avgjørende at membranen holdes fuktig, noe som igjen setter en naturlig grense for driftstemperatur på grunn av fordamping på høy temperatur. Kjernen i brenselcellen er membranen (Simonsen, 2010). Elektroner, som er elektrisk ladet vil passerer gjennom en krets, strømnettet, fra anode-siden til katode-siden. Det er disse elektronene som gir elektrisitet.

Anoden i en brenselcelle er negativt ladet og fungerer gjennom en katalysator i form av platinum. For å få positivt ladde ioner må det hos anoden foregå en oksidasjon hvor hydrogen mister elektroner og danner positivt ladde ioner. Videre vil disse til slutt nå

katoden, som er positivt ladd. Hos katoden skjer det en reduksjon av oksygen og OH-ioner reagerer så med de positive ionene fra anoden. Sammen skaper denne reaksjonen brenselcellens utslipp, som er vann. Den elektrokjemiske reaksjonen i en brenselcelle blir dermed som følgende:



Det finnes flere typer brenselceller som skiller seg fra hverandre på grunn av forskjellig drivstoff, membrantype og arbeidstemperatur (Tabell 1) (Hubert, 2015).

Tabell 1 De ulike typene av brenselceller (Hubert, 2015)

Brensel celler	Navn	Brensel	Elektrolyse	Temperatur(°C)	Oppstart tid	Bruksområde
AFC	Alkaliske brenselcelle	Ren H <sub>2</sub> og O <sub>2</sub>	30 % - 50 % KOH	60-90	Umiddelbar	Romskip, transport, undersjøisk
PEMFC	Protonutvekslingsmembran-brenselcelle	Ren H <sub>2</sub> : O <sub>2</sub> (gass)	Proton ledende membran	50 - 80	Umiddelbar	Transport, stasjonær, kraftvarme, undersjøisk, romskip
DMFC	Direkte metanol brenselcelle	MeOH : O <sub>2</sub> (gass)	Proton ledende membran	80 – 100	Umiddelbar	Transportabel, flyttbar
PAFC	Fosforsyre brenselcelle	H <sub>2</sub> ; O <sub>2</sub> (gass)	Konsentrert Fosforsyre syre	160-220	30 min	Stasjonær, kraftvarme, transport
MCFC	Smeltekarbonat brenselcelle	H <sub>2</sub> / CO/ CH <sub>4</sub> / Kull/ Biogas ; O <sub>2</sub> (gass)	Smeltendekarbonat	620-660	Flere timer	Stasjonær, kraftvarme
SOFC	Fastoksid brenselcelle	H <sub>2</sub> / CO/ CH <sub>4</sub> / Kull/ Biogas ; O <sub>2</sub> (gass)	Ion bindende keramisk	800-1000	Flere timer	Stasjonær, kraftvarme

Brenselceller kan i teorien nå en virkningsgrad på 100 %, men med dagens teknologi klarer vi å nå 50-60 % (Holtebekk & Pedersen, 2018) . Sammenlignet med en forbrenningsmotor på



rundt 35 % er dette høyt (Holtebekk & Pedersen, 2018). For at brenselceller skal kunne gi nok kraft videre i et system, må flere blir satt sammen i en *stack*, da en enkelt brenselcelle i seg selv ikke kan forsyne nok kraft. En stack kan vanligvis yte 100 kW, noe som tilsvarer 143 hestekrefter (Simonsen, 2010). Disse kan videre enten kobles parallelt eller i serie, alt etter hva som er ønsket egenskap. En parallelt koblet stack gir mer strøm, mens en seriekoblet vil gi mer spenning. En brenselcelle har etter Mori et al. (2014) en levetid på 10 år, men dette vil igjen variere etter bruk.

### 1.5.5 Ulemper med hydrogen

Per dags dato er hydrogenproduksjon og distribusjon begrenset. Dette ses på som sentrale utfordringer for hydrogen som energibærer (Haarstad & Rusten, 2018). Disse begrensingene gjør bruken av hydrogen kostfull fordi de krever store utbygginger og omlegginger. Eksempelvis har GM regnet ut at et tilfredsstillende distribusjonsnett for hydrogen for veitrafikk i USA vil koste 18 000 millioner dollar (Simonsen). En annen ulempe er transport og lagring av hydrogen. Etersom hydrogen har veldig lav energitetthet, må hydrogen lagres under trykk i egnede tanker (Hubert, 2015). Dette gjøres for å redusere plassen det tar. Hydrogen som energikilde tar av samme grunn også stor plass i tanker, både under lagring og i bruk. Dette tilsier at tankene vil måtte være større, og for en ferje med begrenset plass kan dette gi utfordringer.

Det er også viktig å unngå potensielle tenningskilder. Hydrogen har et lavere antenningspunkt enn diesel, noe som øker risikoen for utilsiktet forbrenning. Dersom hydrogen antennes brenner det med en nesten usynlig flamme. Dette gjør at en må ha egnet ventilasjon og prosedyrer for å fange opp eventuelle lekkasjer, samt egne brannvarslere (EERE, u.d.).

### 1.5.6 Fordeler med hydrogen

Elektrisitet produseres og forbrukes på samme tid og fornybar energi er ikke et unntak fra dette. For fornybar energi skjer produksjonen av elektrisitet når forholdene ligger til rette for det. Eksempelvis vil en vindturbin produsere elektrisitet når det blåser, og solceller

produsere elektrisitet når det er tilstrekkelig med sol. Dette betyr også at dersom energikilden, som vind og sol, ikke er tilstede i stor nok grad, vil dette påvirke produksjonen av elektrisitet. Fornybar energi vil være sårbar ovenfor varierende tilgang på energikilden. Dette gjør fornybar energi upålitelig, og det vil være vanskelig å bruke som *base load*. Dette vil si grunnlasten for det elektriske behovet.

Ved å bruke hydrogen som energibærer har man mulighet til å lagre den fornybare energien og bruke den som en pålitelig kilde til elektrisitet. Dette kan gjøres i blant annet fartøy. Hydrogen vil ikke under produksjon av elektrisitet gi noen direkte utslipp annet enn vann, men som alle energikilder vil det være utslipp i andre deler av prosessen. Om elektrolysen som fremstiller hydrogen skjer ved å bruke fornybar elektrisitet vil dette redusere det totale utslippet.

I motsetning til elektriske ferjer som har tilstrekkelig kapasitet på ferjesamband opp til 30 minutt (Adolfson & Breivik, 2015), vil hydrogendrevne ferjer ha en større kapasitet og dermed kunne brukes på lengre strekninger enn dette. For at hydrogen skal kunne fungere som en bærekraftig løsning er det viktig at teknologien allerede nå blir implementert. Ettersom brukstiden til ferjer er mellom 25-30 år (Haarstad & Rusten, 2018), vil dagens avgjørelser være viktige for om Norge skal nå klimamålene satt i Parisavtalen og Nasjonal Transportplans mål om lavt- eller nullutslippsteknologi på alle nye riksvegferjer (Klima- og miljødepartementet, 2017).

## 1.6 Lignende prosjekter

Den første hydrogendrevne båten som var godkjent til persontransport var elvebåten Hydra, sjøsatt i 2000, som kunne frakte opp til 21 passasjerer. Båten fraktet passasjerer i elven Rhinen i et år før den ble tatt ut av tjeneste (Netinform, u.d.-b). I ettertid har det blitt produsert flere elvebåter som blant annet har vært i drift i San Francisco, Hamburg og Bristol. I 2009 kom Frauscher med verdens første serieproduserte, hydrogendrevne fritidsbåt (Netinform, u.d.-a). I skrivende stund (mai 2018) har Frauscher bare diesel- og helelektriske båter i sortimentet.

Det er flere hydrogenprosjekter for ferjetransport i dag. Det er per dags dato ingen hydrogenferjer i drift, men det er flere aktører som er aktuelle til å være den første som sjøsetter en hydrogenferje. Barillec Marine fra Frankrike har offentliggjort at de vil være klar med en ferje som skal driftes med brenselceller i 2020 (VINCI Energies, u.d.). I Norge utvikler Fiskerstrand og Brødrene Aa hver sin hydrogendrevet hurtigbåt, som er ventet klar i slutten av 2020 og i 2021. Disse skal brukes til persontransport uten bildekk. Eksempelvis bygger Brødrene Aa en katamaran, som skal kunne frakte 145 passasjerer, 150 nautiske mil, i 25 knop. Den skal ha en stack på 12 brenselceller med 100 kW hver (Stensvold, 2017).

## 1.7 Prosjektbeskrivelse

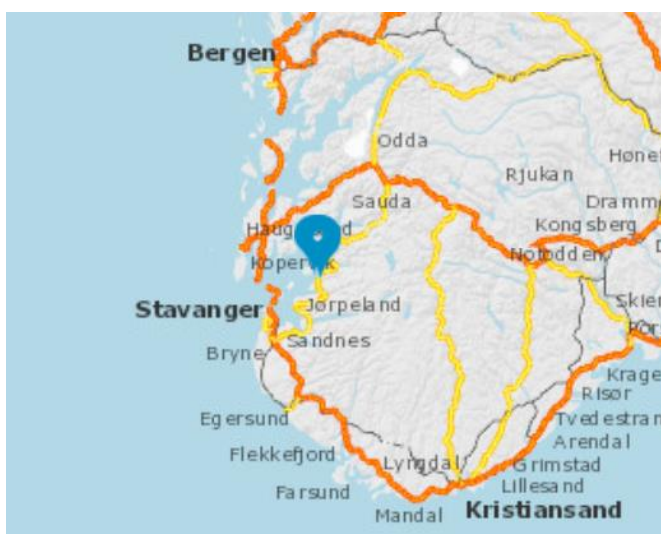
Etter å ha gjennomført et vellykket anbud med den helelektriske ferjen Ampere, utlyste Statens Vegvesen et nytt anbud i 2017. Det ble lyst ut en utviklingskontrakt for produksjonen av en hydrogen-elektrisk ferje. Ferjen skal dekke minimum 50 prosent av energibehovet ved bruk av hydrogen.

Etter anbudsprosessen er det tre aktuelle gjenværende aktører som er mulige kontraktvinner: Norled, Boreal og Fjord1. I september 2018 skal vinneren av anbudet være utnevnt, og i 2021 skal ferjen være i drift. Fra 2021 vil en ny kontrakt gjelde, som gjelder for en videre drift de neste 10 årene (Samferdselsdepartementet, 2017a).

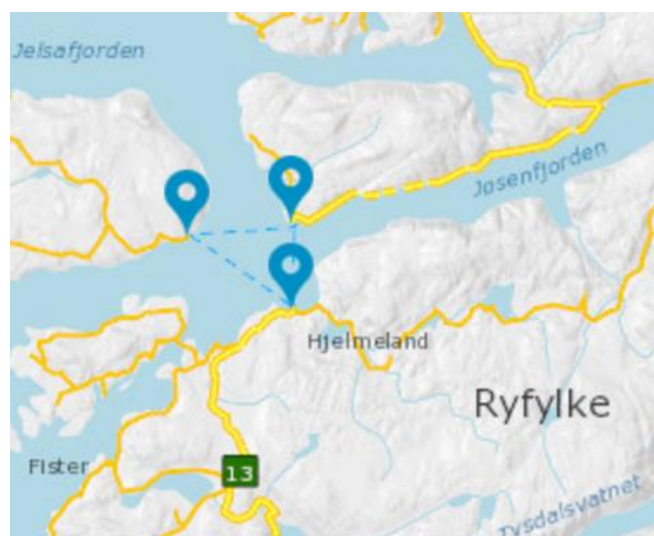
Ferjeselskapet Fjord1 er det største i Norge og har sitt hovedkontor i Florø. Hovedfeltet til selskapet er ferjer og hurtigbåter, men de er også aktive innenfor catering, reisebyrå, finans- og eiendomsforvaltning. Målet til selskapet er å være best på miljøvennlig transport, og ønsker å være ledende i det grønne skiftet innenfor ferjenæringen (Fjord1, 2017). Fjord1 har sagt seg villig til å dele detaljer knyttet til deler av deres prosjekt slik at bacheloroppgaven kan ta utgangspunkt i deres hydrogenferje.

Ferjen betjener sambandet Hjelmeland-Skipavik-Nesvik i Rogaland (*Figur 6 og Figur 7*). Dette sambandet ligger i et relativt rolig farvann, noe som gjør at det er et egnet område for sjøsettingen av hydrogenferjen (Samferdselsdepartementet, 2017a) Målet med anbudet er å fremme utviklingen for å skape nullutslippsteknologi som kan fungere på de lengre ferjestrekningene (Samferdselsdepartementet, 2017a). I tillegg, ettersom dette vil være

verdens første hydrogenferje, er et mer langsiktig mål at teknologien skal videreutvikles til å kunne brukes i et mer krevende samband og gjøre det lettere å realisere fremtidige hydrogenprosjekt. Ettersom Norge er fremst på miljøvennlig ferjeutvikling er det allerede rettet stor oppmerksomhet på prosjektet fra internasjonale aktører. Det er dermed også ønskelig at teknologien etter hvert også kan eksporteres utenlands (Statens Vegvesen, 2017c).



Figur 6 Lokalisjon av sambandet i Rogaland



Figur 7 Ferjesambandet Hjelmeland-Skipavik-Nesvik i Rogaland

## 1.8 Andre studier innen maritim skipsfart

Det er publisert flere livsløpsanalyser som er sammenlignbare med dette studiet. Disse analysene er blitt delt opp nedenfor etter hvorvidt de har hatt fokus på hydrogen, elektrisitet eller diesel (*Tabell 2*). Det er ingen av disse studiene som har sammenlignet alle disse drivstoffene opp mot hverandre. Felles for studiene derimot, er at de alle tar for seg diesel, da dette er det vanligste drivstoffet i maritim skipsfart i dag. Resultatene i disse blir sammenlignet med resultatet fra dette studiet i kapittel 6.2.

Tabell 2 Publiserte livsløpsanalyser, som kan sammenlignes opp mot vår studie

Kilder	Teknologi	Brensel	Funksjonsenhet	Bruksformål
<b>Hydrogen</b>				
(Alkaner & Zhou, 2005)	MCFC	Diesel	1 kWt elektrisitet generert	Hjelpemotor på passasjerferje
(Strazza, Del Borghi, Costamagna, Traverso, & Santin, 2009)	SOFC	Hydrogen fra elektrolyse	1 kWt elektrisitet generert	Hjelpemotor i kommersielt skip
<b>Batteri</b>				
(Maritime Battery Forum, 2016)	Helelektrisk motor	Elektrisitet fra norsk og europeisk kraftmiks	Ti års drift	2x elektrisk motor på ferje
(Einberger, 2017)	Ettermontert helelektrisk motor	Elektrisitet fra norsk kraftmiks	Hele livsløpet	2x elektrisk motor på ferje
(Kullmann, 2016)	Helelektrisk motor	Elektrisitet fra norsk kraftmiks	Per kryssing	2x elektrisk motor for ferje
<b>Diesel</b>				
(Øberg, 2013)	Dieselmotor	MDO/MGO	Et års drift i rute	2x motor på cruiseferje + 1 reservemotor
(Schmidt & Watson, 2013)	Dieselmotor	MDO	Et års drift i rute	Hovedmotor på cruiseferje

Det er to studier på brenselceller som er sammenlignbare med vår oppgave. Dette er Alkaner & Zhou (2005), som ser på en flytende karbonat brenselcelle (MCFC) drevet av diesel for veitransport, og Strazza et al. (2009), som ser på fastoksid brenselcelle (SOFC). Begge studiene baserer seg på bruk som hjelpemotor (APU) og sammenlignet dette opp mot MDO. Den funksjonelle enheten er satt til 1 kWt elektrisitet generert av systemet i begge studiene, men Alkaner & Zhou (2005) har en høyere utgangseffekt i brenselcellen. Spesielle

materialer i dette studiet har resultert i at produksjonsfasen med materiale, prosessenergi og de indirekte komponentene i en APU har en større miljøpåvirkning enn diesel. Diesel kommer også bedre ut i effektkategorien «global warming potential» (GWP) fordi MCFC må byttes hvert femte år.

I Strazza et al. (2009) blir metanol, norsk naturgass, biogass fra bioavfall og slam, samt hydrogen fra dampreforming, krakking og elektrolyse med europeisk kraftmiks undersøkt. Dette studiet konkluderer med at alternativene kommer relativt likt ut i produksjonsfasen. Hydrogen fra dampreforming kommer verst ut i testen over miljøpåvirkning, hele 5-10 ganger høyere påvirkning enn hydrogen fra krakking og elektrolyse. SO-brenselcelle i alle formene kommer bedre ut enn diesel.

Det er veldig få studier som baserer seg på at brenselceller kombinert med batteri er hovedmotor til å drifte fartøy. De fleste analyser omhandler skip, cruiseferjer eller hurtigbåter, mens denne oppgaven baserer seg på en bilferje med PEMFC som hovedmotor.

Maritime Battery Forum (2016) sammenligner en helelektrisk ferje med en dieselelektrisk ferje. Dette er en økonomisk studie, men ser også på miljømessig inntjening. Studiet har i tillegg sammenlignet elektrisitet fra norsk kraftmiks, europeisk kraftmiks og global kraftmiks. Den helelektriske ferjen har to EL-motorer, mens dieselferje har fire generatorer. En annen lignende studie er Kullmann (2016). Denne studien sammenligner miljøpåvirkning til en dieselferje og en elektrisk ferje. Det er i tillegg lagt til to teoretiske ferjer som går på marin diesel (MDO) med europeisk kraftmiks og flytende LNG. Den elektriske ferjen, samt de to teoretiske ferjene, er av typen katamaran med elmotor i hver azipull propell. Det siste studiet med fokus på elektrisk system er Einberger (2017). Dette studiet omhandler en diesel-elektrisk ferje av typen monohull, som er sammenlignet med et ettermontert helelektrisk maskineri. En helelektrisk ny katamaranferje er også analysert i dette studiet.

Funksjonsheten i Maritime Battery Forum (2016) er satt til ti års drift for å lett kunne gjøre en økonomisk analysing. I studiet ble det konkludert med at produksjon av battericeller slo verst ut miljømessig. Utslippene fra drift og produksjon viser først og fremst at elektrisk drift med norsk kraftmiks kommer best ut. Utslippene viser også at MDO gjør det bedre miljømessig enn elektrisk drift med europeisk og global kraftmiks.

Det samme vist delvis igjen i studien til Kullmann (2016). Her viste resultatene at endring i kraftmiksen ga store endringer på miljøpåvirkningen. Studiet resulterer også i at elektrisk ferje kommer ut med lavest GWP sammenlignet med marin gassolje (MGO) og LNG. Resultatet viser også at MDO har lavere GWP enn LNG, og at batteriene stod for 40 % av utslippet hos elektrisk ferje. Funksjonsenheten var satt som per kryssing på et ferjesamband på 5,6 km. I Einberger (2017) er funksjonsenheten drift i hele livsløpet (30 år), men en bør merke seg at den ettermonterte versjonen bare har to batteribytter, siden båten allerede er 10 år. Studiet konkluderer med at den ettermonterte ferjen har større påvirkning under produksjonen, men ved å kombinere produksjon og drift blir utslippet av drivhusgassene kuttet med 97 %.

Det er også to sammenlignbare studier som har fokus på diesel. Øberg (2013) sammenligner ulike typer marint drivstoff og deres driftsmønster. Utgangspunktet er en cruiseferje med 3 motorer, hvor en av motorene er en reservemotor. De undersøkte kildene er HFO, MDO/marin gassolje (MGO), LNG, metanol, dimetyleter (DME) og Fischer-Tropsch diesel (FT).

Mens Øberg (2013) ser på ulike drivstoff, ser Schmidt & Watson (2013) på skroget. I dette studiet blir en stålferje sammenlignet opp mot en ferje av karbonfiber-forsterket polymer. Begge cruiseferjene i studiet har en gassmotor på MDO/MGO fra år 2000. Her er det verdt å merke seg at denne teknologien blir sett på som gammel i dag (2018), og dermed vil ha høyere utslipp i forhold til nyere motorteknologi.

Den funksjonelle enheten for begge studiene er et års drift. For Øberg (2013) tilsvarer dette 3810 timer årlig mellom havnene og 1270 timer i havn. For (Schmidt & Watson, 2013) er det 700 kryssinger på en strekning, (19,4 nautiske mil). Resultatet i sistnevnte viser at det er størst utslipp av klimagasser i driftsperioden og at stålferjen har det høyeste totalutslippet i GWP. I Øberg (2013) kommer metanol, DME og FT best ut i den totale GWP. De har høyest utslipp i brønn til tank (WTT), men holder seg likevel til lave utslipp ettersom studiet går ut i fra at utslipp fra biomasse er klimanøytralt. Dette fører til at disse ikke slipper ut noen klimagasser under tank til propell (TTP). DME er lavest i den totale GWP siden DME har laveste utslipp i WTT. MDO/MGO gjør det verst i testen på grunn av sitt høye utslipp under TTP.

## 2 Metode

Denne historiske gjennomgangen er basert på «Life cycle assessment (LCA) - A guide to approaches, experiences and information sources» (Assessment, 1998).

På 1960-tallet ble det skapt bekymring grunnet de begrensede ressursene på jorda. Dette la grunnlaget for de første rapportene om ressurs- og energikrav for produksjon av produkter. Den første rapporten som inneholdt de samme metodene som brukes i dag, ble utviklet internt for The Coca-Cola Company i 1969. De ville vurdere forskjellige flasketyper for å finne den varianten som hadde minst miljøbelastning. I årene etter fulgte flere produsenter opp med å lage sine egne rapporter. I 1979 publiserte Ian Boustead en veileder med navn «*Handbook of Industrial Energy Analysis*». Denne håndboka omhandlet en metode for å kunne kalkulere den totale energien i produksjonen av forskjellige typer materiale

Fram til 1980 hadde livsløpsanalyse (LCA) hovedsakelig sett på produkter som gikk inn i prosessene. Dette endret seg på 80- og 90-tallet hvor det ble mer og mer vanlig å inkludere avfallet og sluttproduktene. I disse årene ble også «vugge til grav»-analyser populært i en rekke bedrifter og næringer. Spesielt ble livsløpsanalyse et godt verktøy for å studere miljøproblemer da fast avfall ble et problem i 1988 og det ble ulovlig å dumpe avfall i sjøen i USA. Under FN toppmøtet i 1992 ble metoder knyttet til livsløpsanalyse trukket fram som et av de mest lovende nye verktøyene for miljøledelse (Assessment, 1998).

Denne veksten i interesse førte også til uvettig bruk av analyser i blant annet markedsføring. Dette gjorde at det ble satt krav fra statsadvokater og press fra miljøorganisasjoner for å produsere en standardisert metode. Dette medførte til at en standard ble produsert av den internasjonale organisasjonen for standardisering (ISO) i 1997. FN's miljøprogram (UNEP) og Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) gikk i 2002 sammen for å danne et forum for diskusjon og formidling av analytiske konsept og metodeutvikling. Dette forumet heter «*Life Cycle Initiative*» og baserer seg hovedsakelig på tre program: livsløpsbasert miljøledelse (LCM), livsløpsregnskap (LCI) og effektvurdering (LCIA) (Corporation, 2006). Senere har ISO på ny utarbeidet en standard, ISO 14040:2006, som danner grunnlaget for den godt etablerte metodikken til livsløpsanalyse (Curran, 2015). I tillegg ble den internasjonale håndboken, *International Reference Life Cycle Data System*



(ILCD), utviklet i 2010 (Wolf et al., 2010).

## 2.1 Metode

I begynnelsen var en LCA noe som ble gjennomført for å utrede miljøbelastningene til emballasjeprodukt. I dag er det en standardisert metode som gir et solid vitenskapelig grunnlag for miljømessig bærekraft i industri og på statlig nivå (Curran, 2015). En LCA blir følgende beskrevet i den internasjonale håndboken til ILCD (Wolf et al., 2010).

Life Cycle Assessment (LCA) is a structured, comprehensive and internationally standardised method. It quantifies all relevant emissions and resources consumed and the related environmental and health impacts and resource depletion issues that are associated with any goods or services (“products”) (Wolf et al., 2010).

En livsløpsanalyse er altså en analyse som blir gjennomført med den hensikt å finne ut de ulike belastningene, på miljø, helse og ressursnivåer, et produkt forårsaker gjennom produksjon, bruk og avhending. En LCA kan brukes til å beskrive et enkelt system, men som oftest brukes analysen til å sammenligne to eller flere systemer (Curran, 2015).

En LCA gir en helhetlig og omfattende forståelse av hva som kreves i produksjon, bruk og resirkulering av produktet (vugge-til-grav prinsippet). Dette gjør at produsenten vet hvilke miljøpåvirkninger som tilhører det ferdige produktet og i hvilken del av livsløpet det mest betydelige utslippet forekommer.

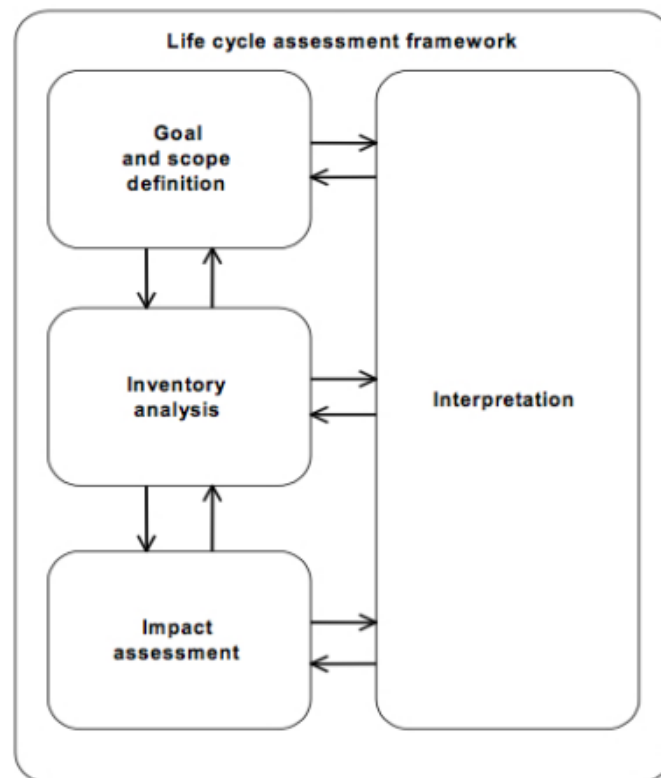
Akkurat hva som blir bruksområdet til hver enkelte LCA kan være forskjellig. Analysen kan blant annet gi svar på:

- I. Hvor ressursene bør legges til for å oppnå maksimal effekt
- II. Hvilken markedsprofil som er mest gunstig
- III. Hvordan endringer i selve systemet endrer nivået av miljøpåvirkningene
- IV. Hvilken teknologi eller prosess som medfører lavest mengde av diverse forurensinger
- V. Hvordan prosessen kan endres for å redusere en spesifikk miljøpåvirkning

Til tross for at analysen er av forskjellige aspekter, vil den som oftest være miljørettet (Assessment, 1998).

Fra ISO standarden har man fire trinn (Figur 8) som danner den grunnleggende oppskriften til en LCA (ISO, 2006):

- I. Hensikt og omfang
- II. Livsløpsregnskap (LCI)
- III. Livsløpseffektvurdering (LCIA)
- IV. Tolkning



Figur 8 De fire trinnene i en LCA (ISO, 2006).

Herunder er det verdt å nevne at en LCA er en iterativ prosess, som resulterer i at man ofte må gå frem og tilbake mellom disse fire fasene. En må gjerne gå tilbake fra LCI til hensikt og omfang, fra LCIA til LCI og eventuelt måtte se på tolkningsfasen allerede i begynnelsen.

Dette gjør at hensikt og omfang ofte må endres gjennom prosessen (Wolf et al., 2010). Hver av disse fire trinnene i en LCA beskrives kort under.

### 2.1.1 Hensikt og omfang

Første del av en LCA skal innledes med en klar definisjon av hensikten med studiet. Viktigheten av en klart definert hensikt understrekes i flere av guidene for LCA. Grunnen til dette er at en klar definert hensikt skal videre hjelpe til å definere omfanget og systemgrensene (Curran, 2015). Omfanget skal deretter også avklares tydelig slik at studiet vil være samsvarende med den fastsatte hensikten (ISO, 2006). Dette første punktet i LCA blir videre utdypt i kapittel 2.1.5.

### 2.1.2 Livløpsregnskap

ISO 14040:2016 forklarer livsløpsregnskap (LCI) på følgende måte: *Phase of the life cycle assessment involving the compilation and quantification of inputs and outputs for a product throughout its life cycle»* (ISO, 2006). Dette kan forklares som et regnskap, som inneholder input- og output data fra alle prosessene som blir undersøkt. Det er i dette andre steget av en LCA at du samler inn all data, som er nødvendig for å kunne definere systemet.

### 2.1.3 Livsløpseffektvurdering

ISO 14040:2006 sin definisjon på livsløpseffektvurdering (LCIA): *«Phase of life cycle assessment aimed at understanding and evaluating the magnitude and significance of the potential environmental impacts for a product system throughout the life cycle of the product»* (ISO, 2006). Nødvendigheten med en effektvurdering er for å se hvilken konsekvens systemene har på *impact categories* (Impact category blir heretter kalt effektkategori). I en effektvurdering vil det bli bestemt hvilke potensielle effektkategorier, som skal undersøkes og dette blir undersøkt opp mot dataen fra LCI for å finne hvor mye hver systemet bidrar per funksjonsenhet.

#### 2.1.4 Tolkning

Den siste fasen av en livsløpsanalyse består av å tolke resultatene fra livsløpseffektvurderingen. I følge ISO (2006) sin standard, ISO 14040:2006, skal følgende skje i tolkningsfasen: «[...] which the results of an LCI or an LCIA, or both, are summarized and discussed as a basis for conclusions, recommendations and decision-making in accordance with the goal and scope definition». Funnene som har blitt gjort skal bli evaluert med hensyn til hensikt og omfang for å deretter kunne konkludere og komme med anbefalinger.

Resultatene skal fremlegges på en leselig måte og man skal etterstrebe åpenhet med analysen. Det skal gjøres en evaluering hvor man sjekker om helheten av dataen er tilstrekkelig eller om det er noe informasjon som mangler. Videre skal en bekrefte at resultatene er i overensstemmelse med hensikt og omfang. I tillegg skal det utføres en sensitivitetsanalyse som kan kartlegge hvilke data som er viktigst og hvordan eventuelle endringer av input vil endre resultatene (Curran, 2015). I følge ISO (2006) skal man evaluere resultatenes sensitivitet og fullstendighet for å skape kredibilitet til resultatene. Sensitivitetsanalysen skal sjekke påliteligheten til resultatene og hvordan de henger sammen med systemgrensene, usikkerhet i dataen, antagelser og metodevalg.

#### 2.1.5 Utdypelse av innholdet i hensikt og omfang

I ILCD håndboken blir det beskrevet 6 ulike aspekter som skal inngå i hensiktdefinisjonen (Wolf et al., 2010):

- I. Studiets tenkte bruksområde(r)
- II. Begrensninger grunnet valg av metode, antakelser og begrenset dekningsområde
- III. Grunnen til at studiet utføres og beslutningskontekst
- IV. Studiets målgruppe
- V. Avklare om resultatene skal sammenlignes med andre studier og bli offentliggjort
- VI. Hvem som er analy
- VII. se på driveren og andre aktuelle aktører

En veldefinert hensikt vil heretter skape grunnbasen for prosessen videre når en rekke beslutninger må kartlegges under omfanget (systemdefinisjon). Under omfang skal følgende defineres:

- I. Systemets funksjon
- II. Den funksjonelle enheten
- III. Systemgrenser og effektkategorier
- IV. Løsning til multifunksjonalitet
- V. Valg av LCI-modell
- VI. Krav til data

Systemet blir definert av den funksjonen som det skaper. Denne funksjonen fastsetter omfanget til studiet som igjen setter systemgrensene og bestemmer hvilke prosesser som blir inkludert. Den funksjonelle enheten er en kvantifisert beskrivelse av produktet som leveres av produksjonssystemet. Denne enheten skaper en sammenheng mellom input og outputs. Som nevnt tidligere, brukes LCA til å sammenligne to eller flere system. For at dette skal være mulig, må systemenes ha den samme funksjonelle enheten (Curran, 2015).

Etter å ha fastsatt funksjonen og funksjonsenheten kan systemgrensene defineres. Systemgrensene definerer hvilke deler av livssyklusen og hvilke prosesser som skal være med i det analyserte systemet. Det er systemgrensene som fastsetter hvilke input og output som er relevant nok til å bli en del av studiet. Grensene setter rammene for hvor detaljert studiet skal være, for at detaljnivået ikke skal bli belastende stort. Grensene som må fastsettes er: geografiske grenser, tidsgrenser, livløpsgrenser og effektkategoriene (Curran, 2015).

Systemgrensene definerer hvilke prosesser som skal tas med i analysen. Noen av disse prosessene kan produsere flere nyttige outputs, som vil si at systemet er multifunksjonelt. Det finnes tre ulike metoder for å tildele disse nyttige outputene de ulike input, ressurser, utslipp og avfall som tilhører dem. Disse metodene er subdivision, utviding av systemgrenser og allokering. Allokering er den minst ønskede metoden, men dersom de to andre metodene ikke er egnet, brukes allokering til å reflektere fysiske forhold som masse og energi (Curran, 2015).

Dersom en ønsker å se hvordan ulike mengde av den funksjonelle enheten endrer systemet, brukes en konsekvens-LCA. Det finnes to måter å modellere en LCI på: konsekvensmodell eller attribusjonsmodell. I en konsekvens-LCA vil modellen vise hvordan andre prosesser og systemer endrer seg dersom man gjør endringer på systemet. En attribusjon-LCA beskriver systemet som det faktisk kan observeres. I en attribusjons-LCA er man sikre på den dataen som brukes og modellen har som mål å skildre virkeligheten av systemet (prosesser og steg i livsløpet) (Wolf et al., 2010). En konsekvensmodell viser ikke den spesifikke prosessen, slik som en attribusjonsmodell gjør, men modellerer de forventede konsekvensene av endringene i systemet (Wolf et al., 2010).

Kvaliteten på dataen som blir samlet inn i den valgte LCI-modellen, vil gjenspeile kvaliteten til analysen. Dersom dataen er utilstrekkelig kan dette gå utover studiet og sette spørsmål med gyldigheten til resultatene. Ved å gjennomføre en kritisk gjennomgang av analysen kan man forsikre seg om at metoden som er brukt er konsekvent og gyldig. For å oppnå dette er det viktig at analysen holdes transparent (Assessment, 1998).

## 2.2 Beregningsmetode

Teorien i denne er basert på boken til Reinout Heijungs og Sangwon Suh «A computational structure of life cycle assessment», som gir en komplett oversikt over beregningsmetoden i en livsløpsanalyse (LCA) (Heijungs & Suh, 2013).

I en LCA jobber man hovedsakelig med lineære system. Mer konkret, lineær algebra i form av matrise. Dersom vi setter hele prosessen av produksjonen av et produkt i et produksjonssystem som fremstiller hvordan det hele henger sammen, vil systemet ikke bare vise en hovedprosess, men flere indirekte og direkte prosesser som er nødvendige for å ferdigstille produktet. Alle disse ulike prosessene henger sammen i en samling av knutepunkt (noder). I produksjonssystemet kan man trekke piler som representerer transaksjonene mellom prosessene, og systemet viser at alle prosessene trekker komponenter fra hverandre.

Aktivitetene i prosessen kan deles inn i indirekte- og direkte aktivitet. Direkte aktivitet er den aktiviteten som faktisk kreves for å få produsert den funksjonelle enheten (tjenesten

eller produktet som skal leveres). Indirekte aktivitet er aktiviteten fra alle de andre prosessene som er resultater av behovet til den funksjonelle enheten. Legger man disse to sammen får man den totale aktiviteten.

Målet med en LCA er å kunne beskrive den totale miljøbelastningen som hører til levering av en funksjonell enhet. Første steg for å gjennomføre dette vil være å identifisere den totale aktiviteten som oppstår i alle de ulike prosessene. Deretter identifiseres utslippene fra hver prosess (per enhet produsert). Når all denne informasjonen (aktivitet og utslipp) er hentet, kan disse legges sammen og utslippene som genereres i hver node blir lokalisert. Her skilles det også mellom direkte-, indirekte- og totale utslipp. Direkte utslipp er utslipp som stammer fra prosessen som vi krever den funksjonelle enheten fra. Indirekte utslipp er utslipp generert i alle de andre prosessene som et resultat av behovet av den funksjonelle enheten. Det totale utslipp per enhet, er disse to sammenlagt.

Matematikken disse kalkulasjonene er basert på er:

- I. Leontief modellen
- II. Bidragsanalyse

### 2.2.1 Leontief modellen

Som sagt er LCA normalt modellert som et lineært system, men ikke all LCA-litteratur bruker den samme formuleringen. En velkjent og velbrukt formuleringstil bygger på arbeidet til Nobelprisvinner Wassily Leontief (Carnegie Mellon University, 2016).

Først ser man på en skjematisk illustrasjon av produksjonssystemet. For hver prosess må det samles informasjon om mengde input som kreves for å produsere den funksjonelle enheten. Den funksjonelle enheten, den faktiske mengden nettverket må levere, har en rekke prosesser som er en del av produksjonssystemet. Hver enkelt av disse prosessene krever egne komponenter for å til slutt bidra med deres del, slik at etterspørselen blir oppnådd. Disse prosessene har altså hver sin oppskrift. Oppskriften forteller hva som trengs og mengden av dette. Faguttrykket for denne oppskriften er *input vektor*. Oppskriftene blir samlet i en *A-matrise*. Denne matrisen er en krav-matrise. Den inneholder kravene for hver enkel vektor, og identifiserer aktiviteten i hver av nodene i produksjonssystemet.

Mengden som kreves av den funksjonelle enheten varierer etter etterspørsel. Output vil deretter variere etter etterspørselen. Etterspørselen deles inn i intern- og ekstern etterspørsel. Den interne etterspørselen vil si det behovet av produkter som er innad i prosessen. Den eksterne etterspørselen vil si det som faktisk er sluttproduktet, den funksjonelle enheten. Den interne etterspørselen vises i A-matrisen. Den eksterne etterspørselen er kalt  $Y$ . Formel og uttrykk er vist nedenfor og er hentet fra Carnegie Mellon University (2016).

Formelen for output:

$$X = Ax + Y$$

Videre fra denne formelen formuleres uttrykket:

$$L = (I - A)^{-1} \rightarrow x = Ly$$

Hvor:

$L = \text{Output per gitt enhet av ekstern etterspørsel}$

$Y = \text{Ekstern etterspørsel}$

$A = \text{Intern etterspørsel}$

$X = \text{Output}$

Dette uttrykket er kalt *Leontief Invers*. Med dette uttrykket kan det utarbeides en *L-matrise*.

Denne matrisen vil vise outputen fra hver prosess.



### 2.2.2 Bidragsanalyse

De sentrale elementene i *Leontief-modellen* danner grunnlaget for arbeidet mot målet: kalkulere det totale utslippet og miljøpåvirkningene for en gitt mengde funksjonell enhet. For å finne ut dette må det gjennomføres en bidragsanalyse.

Utslippet fra den eksterne etterspørselen vises i en *stressormatrise* (S-matrise). Stress brukes som betegnelse for å beskrive en mer helhetlig påvirkning. Uttrykket stresser brukes ikke bare om utslipp, men også om andre miljøpåvirkninger, som for eksempel arealbruk. Mengden av stressere varierer i de forskjellige LCA studiene. Det kan variere fra noen få titalls til flere hundre.

Videre utvikles en E-matrise for å finne ut hvor mye de forskjellige prosessene bidrar til den totale belastningen. E-matrisen vil gi et konkret resultat som kan formidles videre til beslutningstaker. Det er her en faktisk ser hvor og hva som er utslippet, altså hvor mye hver enkel prosess bidrar med i den totale påvirkningen. Her lokaliseres spesifikke påvirkninger, som for eksempel den prosessen med størst CO<sub>2</sub>-utslipp.

For å simplificere dataen med mengde stressere anvendes en konsekvensanalyse. Dette gjøres ved å bruke en karakteriserings-matrise hvor forskjellige utslipp med samme type miljøpåvirkning, blir konvertert til ekvivalenter. For eksempel, globalt oppvarmingspotensial (GWP) er målt i CO<sub>2</sub>-ekvivalenter. Dersom man kalkulerer CO<sub>2</sub>-ekvivalenter for en gitt mengde CH<sub>4</sub>, må en ha karakteriserings-faktoren for den mengden metan bidrar til den globale oppvarmingen og denne informasjonen til grunn beregnes både hvilke stressere som medvirker i de forskjellige effektkategoriene og den totale påvirkningen.

## 2.3 Begrensninger

Til tross for en velutviklet metode, er det flere ulike begrensninger en må ta til betraktning ved utførelsen av en LCA. En ulempe er at det ofte er begrenset med data som er direkte knyttet til det aktuelle prosjektet. Derfor blir det ofte brukt gjennomsnitt fra andre lignende prosesser. Dette vil kunne gi feilaktige tall. En utfordring som dukker opp i LCI er at enkelte prosesser eller system kan bli glemt eller utelatt. Dette kan spille inn på resultatet av det totale utslippet.

I tillegg kan det i enkelte tilfeller være vanskelig å skille påvirkningsgraden produksjonen av en inputkilde har, sammenlignet med andre produkt som blir produsert på samme fabrikk med like råvarer. Det er også utfordringer knyttet til LCIA. Et eksempel på dette kan være de forskjellige synspunktene ved kartlegging av CO<sub>2</sub> fra trær. Trær slipper CO<sub>2</sub> ut til atmosfæren ved hogst, men blir ansett som CO<sub>2</sub>-nøytral (Ross, Evans, & Webber, 2003). Dette har ført til en debatt om dette utslippet faktisk kan kalles nøytralt eller ikke. En slik forskjell vil få innvirkning på hvor stort utslippet av CO<sub>2</sub> blir og det er derfor vanskelig å trekke en slutning.

## 2.4 SimaPro og Ecoinvent

SimaPro er en programvare utviklet for å gjennomføre livsløpsanalyser (Goedkoop, De Schryver, Oele, Durksz, & de Roest, 2012). Programmet er utviklet i Nederland av PRÉ Consultants, og er i dag en av de mest brukte LCA-programvarene. Programmet bygger på prinsippet om *enhetsoperasjoner*. Enhetsoperasjoner vil si at programmet finner påvirkningen til et produkt ved å se på alle prosessene og råvarene som inngår i livsløpet til produktet. Programmet finner miljøbelastninger til et produkt fra alle sektorer.

Dette programmet gjør det enklere å utføre komplekse livsløpsanalyser, ettersom en kan modellere med hjelp av data fra databaser eller tidligere modelleringer. Det er også mye mer effektivt å endre innputtene ved gjennomføring av sensitivitetsanalyser. SimaPro er alene om å kunne estimere usikkerhet inn i utslipp og innsatsfaktorer (Bergsdal, u.d.).

En av databasene i Simapro er Ecoinvent (Wernet et al., 2016). Ecoinvent er et nullprofitt-selskap fra Sveits, som er innehaver av verdens største LCI database. Databasen inneholder

over 15 000 forskjellige datasett. Alle databasene er transparente og oppdateres dersom ny data blir tilgjengelig. (SimaPro, 2018)

# 3 Hensikt og omfang

## 3.1 Hensikt

Hensikten med dette studiet er å kartlegge kumulativt energibehov og globalt oppvarmingspotensial for en hydrogen-elektrisk drevet ferje og sammenligne det opp mot dieselferje. Hovedfokuset i oppgaven vil være påvirkning knyttet til hydrogen-elektrisk drift. Ut ifra hensikten med oppgaven har vi utviklet følgende tre forskningsspørsmål:

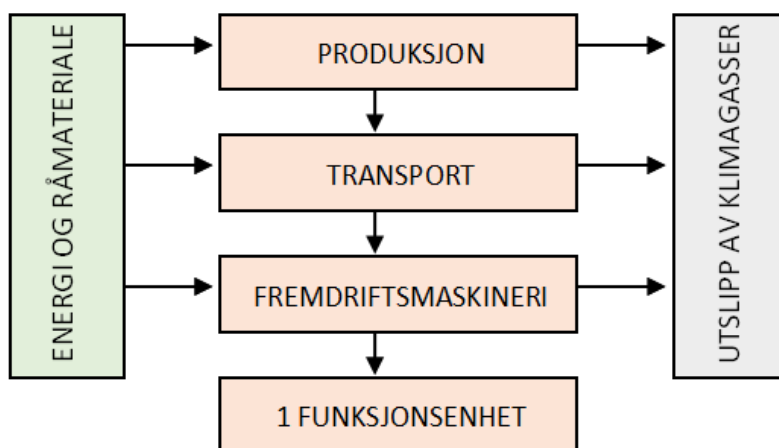
1. Hvor stor påvirkning vil en hydrogen-elektrisk ferje ha på globalt oppvarmingspotensial og kumulativt energibehov, sammenlignet med en dieselferje?
2. Hvordan vil globalt oppvarmingspotensial og kumulativt energibehov endre seg ved å gjøre en hydrogen-elektriske ferje om til en helelektrisk- eller helhydrogen ferje?
3. Hvor stort er potensialet til hydrogen i norsk ferjesektor med hensyn til globalt oppvarmingspotensial og kumulativt energibehov?

Studiet er en attribusjon-LCA, og vi ønsker etter beste evne å presentere et åpent og representativt resultat. Vår sammenligningsstudie er utført for Fjord1 til internt bruk og de har også bidratt med nødvendig informasjon. Resultatene fra denne analysen kan Fjord1 bruke som veiledning i avgjørelser knyttet til utslipp og energibehov for fremdriftsmaskineri i ferjer. Data vi bruker har utgangspunkt i informasjon fra Fjord1 om deres nåværende dieselferjer og fremtidige hydrogen-elektriske ferjer. Vi følger også på kravene i konkurransegrunnlaget «*drift av riksvegsambandet Hjelmeland-Skipavik-Nesvik*» (Statens Vegvesen, 2017a). Til veiledning i utarbeidelsen av denne analysen har vi brukt 14040 serien om LCA standard (ISO, 2006) fra ISO, og håndboken til ILCD (Wolf et al., 2010).

## 3.2 Omfang

Dette studiet består av en analyse som tar for seg to systemer. Det ene systemet har hydrogen-elektrisk maskineri, og det andre har dieselbasert maskineri. Begge systemene har som funksjon å drifte en ferje på sambandet Hjelmeland-Nesvik-Skipavik. I det hydrogen-elektriske systemet skal 50 % av fremdriften være fra elektrisitet produsert fra hydrogen og resterende 50 % skal være elektrisitet fra batteri. I konkurransegrunnlaget «drift av riksvegferjesambandet Hjelmeland – Skipavik – Nesvik» er det satt krav om at minimum 50 % av energibehovet skal komme fra hydrogen og dette er grunnen til at vi har valgt denne andelen hydrogen og elektrisitet.

Det har blitt gjennomført en sensitivitetsanalyse av studiet. Sensitivitetsanalysen tar for seg hvordan utslippet endrer seg dersom man endrer den hydrogen-elektriske ferjen til en helelektrisk ferje og en helhydrogenferje. Sensitivitetsanalysen ser også se på endringer i utslippene ved å skalere opp og ned batteristørrelsen. Til slutt ønsker vi å studere potensialet til hydrogenferjer i norsk ferjesektor. Prosessene vi har analysert i studiet er illustrert nedenfor (Figur 9).



Figur 9 Flyttdiagram av prosessene som er analysert.

Vi har valgt å bruke en kryssing som vår funksjonelle enhet. Med en kryssing mener vi at ferjen krysser fjorden en gang på ferjestrekningen Hjelmeland-Nesvik (Figur 10). Dette er den mest aktive ferjestrekningen på trekantsambandet. Strekningen er 3 km (Google Maps,

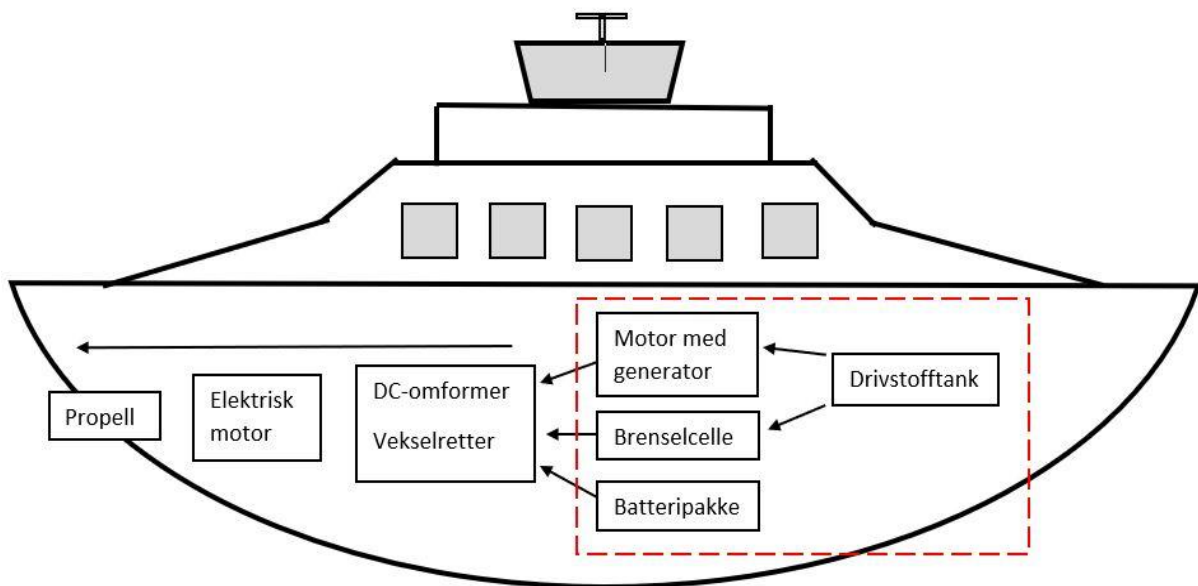
2018a). Overfarten tar 20 minutter, og regnes fra da ferjen reiser fra første kaien og til den har losset på nye biler ved neste kai. Ferjen er også innom Skipavik to ganger i løpet av en dag, men disse kryssingene er utelatt for å lettere kunne sette en forståelig funksjonsenhet.



Figur 10 Ferjestrekningen Hjelmeland-Nesvik som funksjonsenheten er basert på.

I dette studiet hvor vi sammenligner fremdriftsmaskineri har vi valgt å forenkle studiet ved å gå ut i fra prinsippet *ceteris paribus* (alt annet like). Det vil si at vi har utelukket alle komponentene i båten som er like, og har sammenlignet de komponentene i maskineriet som er ulike. Derfor utelukket vi produksjon av selve ferjen, samt transformatorer, elektriske motorer og propeller i maskineriet. Vi analyserte komponentene innenfor den

stiplede boksen som er vist over (*Figur 11***Figur 13**). En detaljert oppbygning av komponentene er beskrevet i kapittel 4.1.

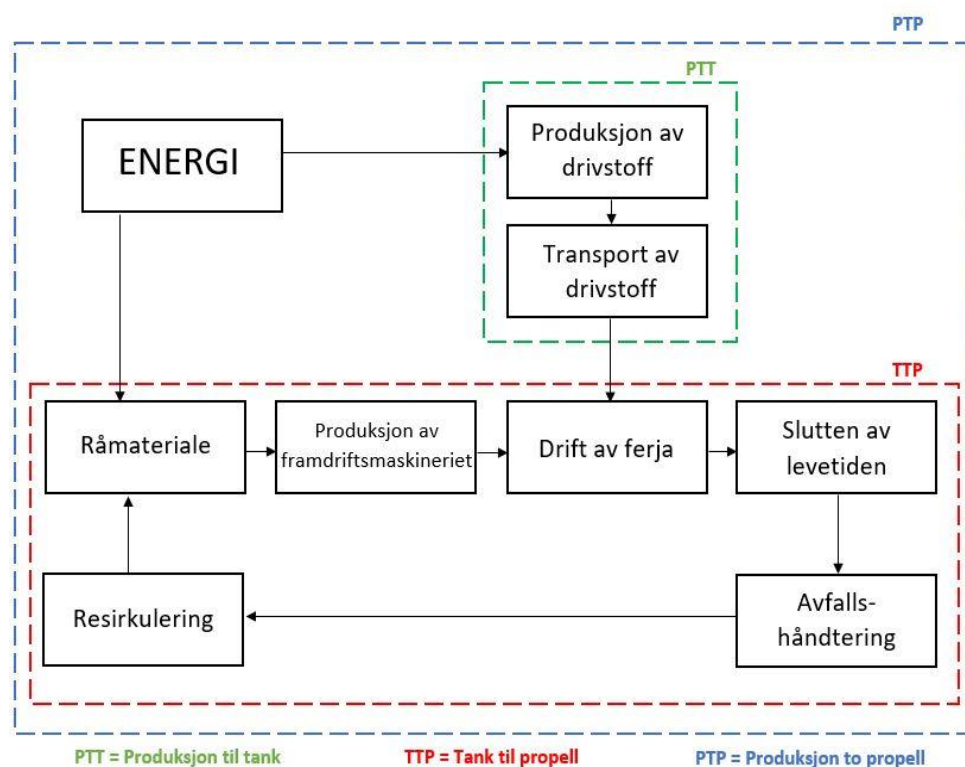


*Figur 11* En forenklet versjon av skroget med avgrensningen av maskinrommet

Vedlikehold som smøring og arbeidstimer, samt bunkringsanlegg for diesel og hydrogen, er ikke inkludert i dette studiet. I den elektriske driften blir det tilført elektrisitet fra strømmettet som lader en batteripakke på land. Deretter overføres elektrisiteten videre til batteriene på ferjen via et ladeanlegg. I hydrogensystemet blir det skapt et biprodukt i form av oksygen i elektrolyseprosessen. Oksygenet har vi valgt å vurdere som «avfall», som betyr at oksygenet blir sluppet ut i atmosfæren. Studiet er en produksjon-til-propell livsløpsanalyse (*Figur 12*). Systemene i analysen er delt opp i:

1. Produksjon til tank (PTT), bedre kjent som Well to tank (WTT). PTT ser på produksjon og transport av drivstoffet som blir brukt i ferjene. Det vil si produksjon og transport av elektrisitet, hydrogen og diesel.
2. Tank til propell (TTP), bedre kjent som Tank to wheel (TTW). TTP ser på produksjon av fremdriftsmaskineriet. I maskineriet analyserer studiet produksjon av diesel- og hydrogentank, batteri, dieselmotor med generator og brenselcelle. TTP analyserer også drift av ferjen, samt avfallshåndtering.

3. Produksjon til propell (PTP), bedre kjent som Well to wheel (WTW). PTP er summen av både PTT og TTP.



Figur 12 Illustrasjon av systemene studiet

Diesel som marint drivstoff innehar mye informasjon og data. Det har i nyere tid kommet en del informasjon om elektrisitet, mens det derimot finnes lite for hydrogen. Det lite. Dette har ført til at det har blitt gjort flere antakelser i studiet, som er presentert i kapittel 0.

Studiet er som tidligere nevnt en attribusjons-LCA, og LCIA er gjennomført ved bruk av programvaren SimaPro 8.5. Databasene som blir brukt i studiet er Ecoinvent versjon 3 med allokering ved substitusjon (APOS) og Agri-Footprint (Durlinger, Koukouna, Broekema, van Paassen, & Scholten, 2017).

De to effektkategoriene som er i fokus i dette studiet er:

1. Globalt oppvarmingspotensial (GWP). Dette er en måleenhet som beskriver mengden av varmen som blir samlet i atmosfæren grunnet drivhusgasser. Enheten til GWP er kg CO<sub>2</sub> ekvivalent og kan måles ut ifra forskjellige valgte tidsrom. Disse er som oftest 20, 100 eller 500 år, og i vår oppgave har vi valgt å bruke 100 år.



Drivhusgassene som er inkludert i GWP er karbondioksid, metan, lystgass, ulike hydrofluorkarboner og ulike perfluorkarboner. GWP avhenger av gassen sin evne til å kunne absorbere infrarød stråling og levetiden til gassen i atmosfæren (United States Environmental Protection Agency, 2017) og har derfor ulike verdier etter hvor skadelige de er (Tabell 3).

Tabell 3 Eksempler på klimagasser og deres påvirkningsgrad på global oppvarming (IPCC, 2014)

KLIMAGASSER	GWP-100 påvirkningsgrad
Karbondioksid (CO <sub>2</sub> )	1
Metan (CH <sub>4</sub> )	28
Lystgass (N <sub>2</sub> O)	265
Tetrafluormetan (CF <sub>4</sub> )	6630
Difluoretan (HFC-152a/R-152a/DFE)	138

2. Kumulativt energibehov (CED), også kalt *energibehov* i denne oppgaven. Denne brukes i LCA som en indikator for energibehov. CED ser på primærenergi bruk, både fornybar og ikke-fornybar, og energistrømmer for både energi og materielle formål. CED representerer direkte og indirekte energibruk til et produkt gjennom hele livssyklusen, inkludert energiforbruket under utvinning, produksjon og avhending av materialer (Arvidsson & Svanström, 2015). Vi har kalkulert CED-nivåer for den hydrogen-elektriske ferjen og diesel ferjen, og deretter sammenlignet disse.

For å vurdere effektkategoriene brukte vi metodene *CML IA baseline* (Pré, 2018) for å finne GWP og *cumulative energy demand* (Pré, 2018) for å finne CED. Endring av andelen hydrogen og elektrisitet, samt endring av batteristørrelse har blitt vurdert i en sensitivitetsanalyse.

CML-IA baseline er blitt brukt for å utrede de 10 effektkategorier i konsekvensutredningen. CML-IA baseline er en europeisk metode, som er utviklet av Center of Environmental Science (CML). Grunnen til at vi valgte CML-IA baseline er fordi effektkategorier i denne

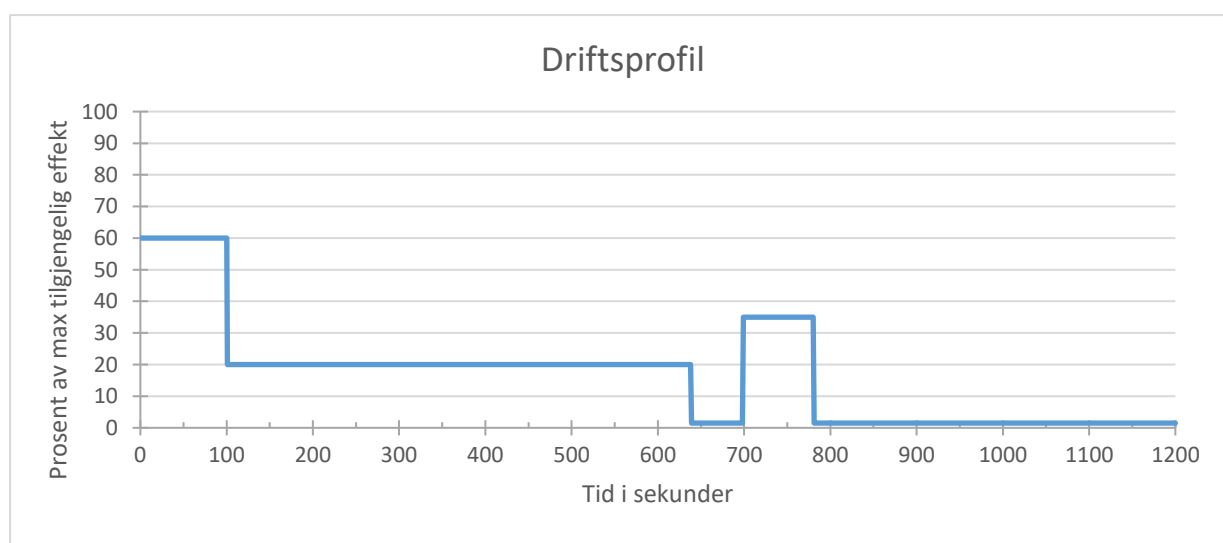
metoden er på midtpunktnivå og *baseline* indikatorer er å anbefale for forenklede studier. Effektkategorier på midtpunktnivå ser på hva påvirkningen er tidlige i kjeden, før *sluttpunktet* (Brilhuis-Meijer, 2014). Eksempelvis er en midtpunktkategori «menneskelig toksisitet», mens en påfølgende sluttpunktkategori vil være «kreft». Indikatorer på midtpunktnivå er indikatorer knyttet til miljøpåvirkning og de oppgis i ekvivalenter (PRé, 2018).

## 4 Livsløpsregnskap

I dette kapitlet vil vi forklare prosessene i systemene som vi undersøker. Prosessene er knyttet til produksjon, transport, og fremdriftsmaskineri. Det er inkludert flytdiagrammer for de ulike prosessene. I hver av prosessene har den mengden av materialene som blir resirkulert, blitt lagt til i kalkuleringene. Informasjon om datasettene valgt i LCI er lagt til som vedlegg.

### 4.1 Driftsprofil

Driftsprofil (*Figur 13*) og tallene fra motordata (*Tabell 4*) er innhentet fra Steinar Frøyen Kostøl (2018) ved Fjord1. Motordata er basert på to dieselmotorer med 100 % effekt på 746 kW per motor. For å ha et tilsvarende sammenligningsgrunnlag, går vi ut i fra at brenselcellen leverer 746 kW og batteripakken leverer 746 kW. Driftsprofilen er basert på 20 min drift. Dette betyr at det tar 20 minutter fra ferjen reiser fra første kai til ferjen har losset på nye biler ved neste kai. Av 20 minutter er 13 minutter mellom kaiene og 7 minutter ved kai. I følge Steinar Frøyen Kostøl (2018) er driftsprofilen representativ for ferjesambandet Hjelmeland-Nesvik. Ferjen vil også ha to avganger til Skipavik på en vanlig operativ dag, men denne strekningen har vi utelukket fra analysen.



Figur 13 Driftsprofilen viser hvor stor prosent av maks effekt som trengs ved å kjøre båten en kryssing

Motordataen som ble oversendt av Steinar Frøyen Kostøl (2018) hadde forskjellig effektprosent i forhold til driftsprofil, og prosentene i motordata måtte derfor interpoleres (Tabell 4). Økningen i effekten var lineær etter  $y = 7,46x$ .

Tabell 4 Viser energien som trengs for å kunne kjøre båten en kryssing

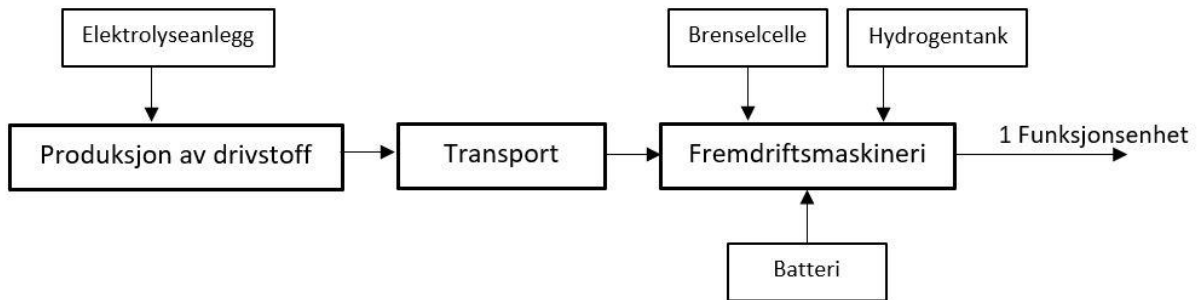
	Prosent (%) av tilgjengelig effekt	Effekt i kW	Tidsperspektiv i sekunder (s)	Nødvendig energi i kWh
Akselerasjon	60	895,2	100	24,9
Overfart	20	298,4	540	44,8
Deakselerasjon	1,25	17,9	60	0,3
Manøvrering til kai	35	522,2	80	11,6
Lasting og lossing	1,25	12,9	420	2,1
Total		875,8	1200	83,7

Ferjene må å levere 83,72 kWh elektrisitet levert til propell for en kryssing. Den nødvendige energien er regnet ut fra driftsprofil opp mot motordata til dieselferjen. Siden dieselferjen trenger 83,72 kWh for en kryssing, går vi ut i fra at den hydrogenelektriske ferjen trenger like mye energi per kryssing, siden begge ferjene er likt dimensjonert. Det vil si at den hydrogen-elektriske ferjen må levere 40,58 kWh fra hydrogensystemet og 40,58 kWh fra det elektriske systemet.

Studiet går ut i fra at ferjen vil ha 39 avganger per dag, etter avgangsmønsteret til ferjenr. 1 i rutetabell nr. 1027 *Hjelmeland-Nesvik-Skipavik*, hentet hos Norled (2018). Ferjen vil ha tanking av diesel og hydrogen en gang i uka, det vil si hver 273 kryssing. Disse opplysningene ble brukt for å dimensjonere drivstofftankene og livstiden for komponentene. Batteriene lades ved hver lasting/lossing. Nærmere beskrivelse av drivstofftanker og resten av maskineriet er beskrevet videre i livsløpsregnskapet.

## 4.2 Hydrogen-elektrisk ferje

Et av systemene vi har analysert i dette studiet er en hydrogen-elektrisk ferje. De analyserte prosessene i denne hydrogen-elektriske ferjen er illustrert under (Figur 14). Disse prosessene vil bli beskrevet i dette kapitlet.



Figur 14 De analyserte prosessene i den hydrogen-elektriske ferjen

### 4.2.1 Produksjon av drivstoff

Nedenfor er det lagt til en tabell som viser all inngangsdataen vi har valgt for elektrolyseanlegget (Tabell 5). Den viser også hvor stor mengde som må tilføres per kg hydrogengass produsert.

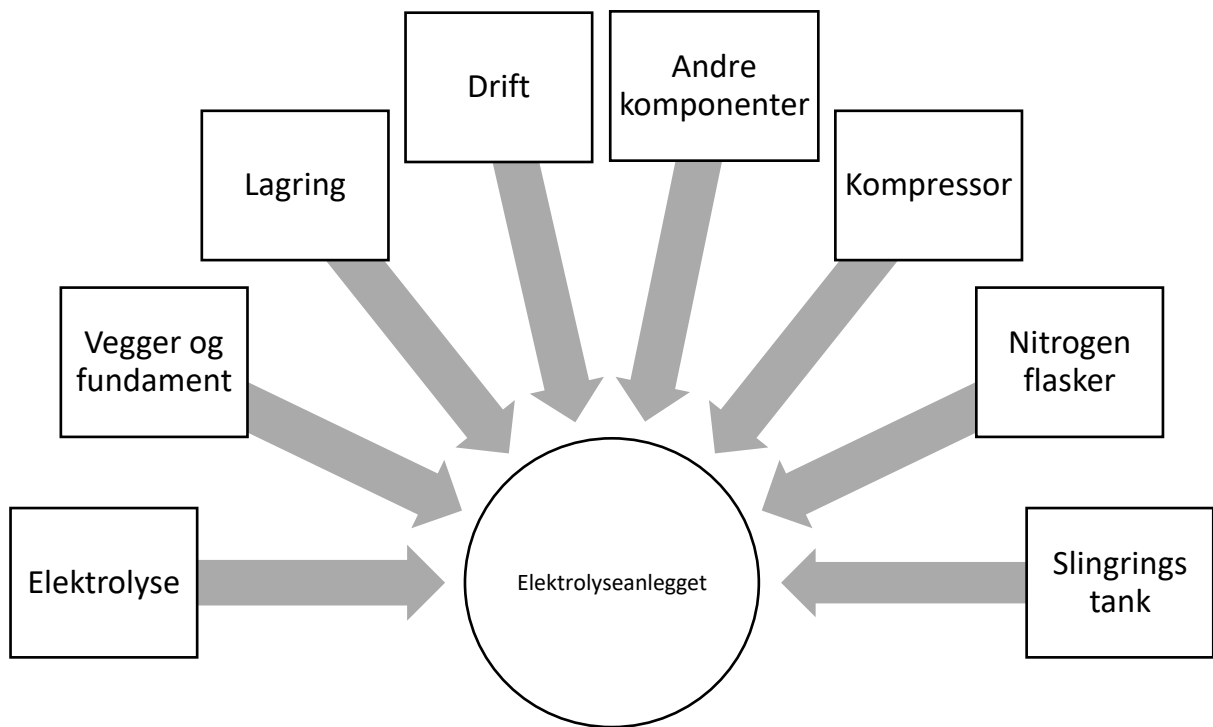
Tabell 5 Oppsummering av inngangsdata valgt for produksjonen av drivstoffet til den hydrogen-elektriske ferjen

Datainnsamling	Hentet fra	Enhet	Mengde
Hydrogen		kg	1
<b>Inngangsdata</b>			
Elektrisitet	(Needs, 2008)	kWt	62
Vann		kg	10
KOH	(Mori et al., 2014) kalkulert	kg	2,76E-03
Elektrolyse	(Needs, 2008)	stk	1
Kompressor		stk	1
Lagring		stk	1
Vegg og fundament		stk	1
Andre komponenter		stk	1
Drift		stk	1
<b>Tap</b>			
Hydrogen		kg	0,12
<b>Utslipp til atmosfære</b>			
Oksygen		kg	8,88

Fra Fjord1 har det blitt oppgitt at hydrogenet til ferjen skal produseres gjennom en elektrolyse og at produksjonen skal skje i Norge. Vi antar at hydrogenet vil bli produsert i et elektrolyseanlegg, eid av Norsk Hydro på Karmøy i Rogaland, og deretter transporteres 147 km til ferjeleiet Nesvik.

Dataen for elektrolyseanlegget er hentet fra studiet til New Energy Externalities Development for Sustainability (NEEDS, 2008). Dokumentet inneholder beskrivelse av produksjonsteknologien, en beskrivelse av LCA, kostnadsestimater, modell for elektrolyseanlegg og videre refleksjoner angående utviklingen av hydrogenproduksjon.

Modellen for elektrolyseanlegget viser alle komponentene som kreves i anlegget (Figur 15). Denne modellen er basert på informasjon hentet fra en hydrogen-fyllingsstasjon fra Norsk Hydro lokalisert i Reykjavik. Dataen kommer fra produsentene av hver komponent.



Figur 15 Hovedkomponentene i et elektrolyseanlegg

I følgende del blir de ulike komponentene med tilhørende mengde av materiale, som kreves i et elektrolyseanlegg per kg hydrogengass, vist i en tabell (Tabell 6). Hvilken database som er kilde til de ulike materialene er også med.

Tabell 6 Material og mengdene som inngår i de forskjellige komponentene sammen med kilde for valgt LCI database

Komponenter	Materiale	Enhet	Mengde per kg GH <sub>2</sub>	LCI data
<b>Elektrolyse</b>				
	Steel, chromium steel 18/8	kg	5,99E-03	Ecoinvent 3
	Nickel, 99.5 %	kg	7,05E-04	Ecoinvent 3
	Synthetic rubber	kg	3,53E-05	Ecoinvent 3
	Reinforcing steel	kg	1,87E-03	Ecoinvent 3
	Copper, cathode	kg	5,40E-04	Ecoinvent 3
	Tube insulation, elastomere	kg	2,40E-04	Ecoinvent 3
	Aluminium, primary, ingot	kg	1,55E-04	Ecoinvent 3
	Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer	kg	5,64E-05	Ecoinvent 3
	Polyethylene, low density, granulate	kg	1,41E-04	Ecoinvent 3
	Glassfibre	kg	1,41E-04	Ecoinvent 3
	Cast iron	kg	4,80E-05	Ecoinvent 3
	Nylon 6-6, glass-filled	kg	1,76E-05	Ecoinvent 3

	Transport, freight, lorry >32 metric ton	tkm	9,91E-04	Ecoinvent 3
	Potassium Hydroxide (KOH)	kg	2,76	Ecoinvent 3 Mori et al. (2014)
<b>Kompressor</b>				
	Reinforcing steel	kg	1,75E-03	Ecoinvent 3
	Steel, chromium steel 18/8	kg	1,34E-04	Ecoinvent 3
	Cast iron	kg	4,23E-04	Ecoinvent 3
	Ethylene glycol	kg	4,94E-06	Ecoinvent 3
	Lubricating oil	kg	1,27E-05	Ecoinvent 3
	Aluminium, primary, ingot	kg	4,23E-05	Ecoinvent 3
	Tube insulation, elastomere	kg	1,06E-05	Ecoinvent 3
	Copper	kg	3,17E-05	Ecoinvent 3
	Electricity, high voltage	kWt	7,05E-04	Ecoinvent 3
	Heat, district or industrial, natural gas	MJ	2,54E-03	Ecoinvent 3
	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6	tkm	3,62E-04	Ecoinvent 3
<b>Lagring</b>				
	Steel, chromium steel 18/8	kg	5,93E-02	Ecoinvent 3
	Electricity, high voltage	kWt	6,77E-04	Ecoinvent 3
	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6	tkm	5,93E-03	Ecoinvent 3
	Energy, from diesel burned in machinery/RER Energy	MJ	6,04E-04	Agri – Footprint
<b>Vegger og fundament</b>				
	Reinforcing steel	kg	6,35E-03	Ecoinvent 3
	Flat glass, coated	kg	2,29E-03	Ecoinvent 3
	Gypsum fibreboard	kg	7,05E-05	Ecoinvent 3
	Silica sand	kg	4,06E-02	Ecoinvent 3
	Concrete, normal	m3	7,05E-06	Ecoinvent 3
	Concrete, high exacting requirements	m3	9,17E-05	Ecoinvent 3
	Gravel, crushed	kg	1,27E+00	Ecoinvent 3
	Lubricating oil	kg	1,41E-05	Ecoinvent 3
	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6	tkm	1,56E-01	Ecoinvent 3
	Electricity, high voltage	kWt	3,53E-04	Ecoinvent 3
	Energy, from diesel burned in machinery/RER Energy	MJ	3,02E-02	Agri – Footprint
<b>Andre komponenter</b>				
	Reinforcing steel	kg	1,16E-03	Ecoinvent 3
	Nitrogen, liquid	kg	1,01E-04	Ecoinvent 3
	Steel, chromium steel 18/8	kg	2,85E-04	Ecoinvent 3
	Polypropylene, granulate	kg	7,05E-06	Ecoinvent 3
	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6	tkm	6,90E-02	Ecoinvent 3
<b>Drift</b>				
	Steel, chromium steel 18/8	kg	3,69E-02	Ecoinvent 3



	Nickel, 99.5 %	kg	2,82E-03	Ecoinvent 3
	Synthetic rubber	kg	1,41E-04	Ecoinvent 3
	Reinforcing steel	kg	5,50E-02	Ecoinvent 3
	Cast iron	kg	2,54E-02	Ecoinvent 3
	Ethylene glycol	kg	2,96E-04	Ecoinvent 3
	Lubricating oil	kg	7,62E-04	Ecoinvent 3
	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6	tkm	2,20E-01	Ecoinvent 3
	Heat, district or industrial, natural gas	MJ	1,52E-01	Ecoinvent 3
	Electricity, high voltage	kWt	4,23E-02	Ecoinvent 3

De viktigste tallene for elektrolyseanlegget presenteres under (*Tabell 7*). Målenheten som har blitt brukt her er gass hydrogen (GH<sub>2</sub>).

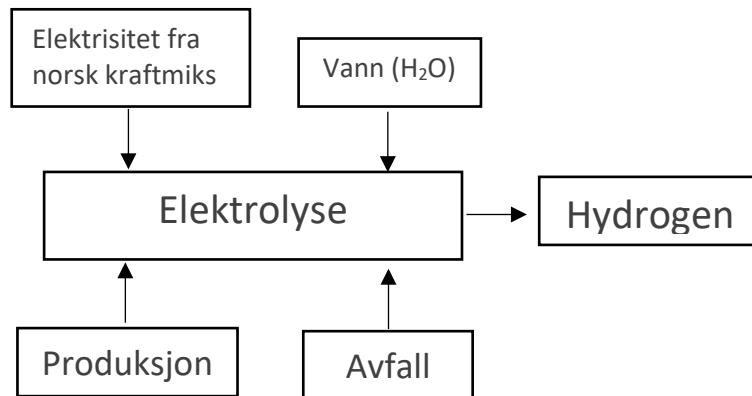
*Tabell 7 Parametere for elektrolyseanlegg , fra NEEDS (2008)*

Parameter	Enhet	Mengde
Elektrisitet til elektrolysen	kWt/kg GH <sub>2</sub>	53
Elektrisitet til kompressoren	kWt/kg GH <sub>2</sub>	8
Vann	Liter/kg GH <sub>2</sub>	10
Trykk i tank	Bar	440
Produksjons kapasitet	kg GH <sub>2</sub> /år	47250
Livstid	år	15
Areal	m <sup>2</sup>	300

Det maksimale output fra elektrolyseanlegget er 60 Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>/t på 15 bar eller 5,394 kg/t som tilsier 180 kW/t output i energi. Konverteringseffektiviteten er 80 til 85 % (NEEDS, 2008) .

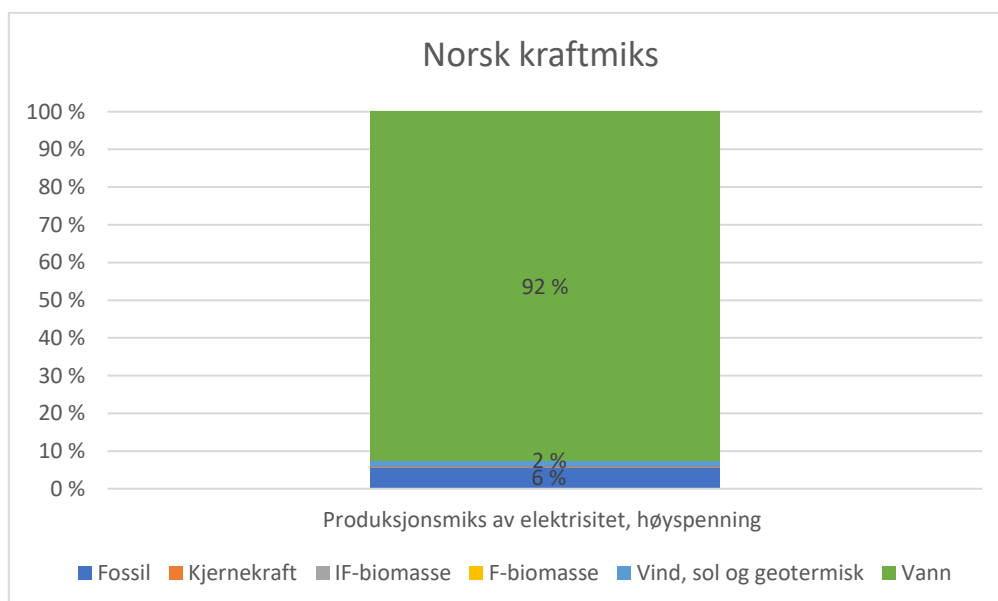
Elektrolyseanlegget bruker en alkalisk elektrolyse. Elektrolytten i en alkalisk elektrolyse er kaliumhydroksid (KOH). I NEEDS (2008) blir ikke KOH tatt med. Derfor har KOH verdier blitt hentet fra Mori et al. (2014), og blitt kalkulert til 2,76E-03 per kg hydrogen produsert.

Elektrolysecellen opererer med en temperatur på 70-90 grader celsius. Katoden og anoden består av nikkell og elektrolysen har en virkningsgrad på 66-69 %. Vi har derimot nedskalert denne til 50 %, basert på informasjon fra Fjord1. De største produsentene er Stuart, Hydro Electrolysers og Teledyne. Et forenklet diagram av elektrolyseprosessen vises under ( *Figur 16*).



Figur 16 Simplifisert flytdiagram av elektrolyse

I NEEDS (2008) er anlegget plassert i Sentral-Europa, mens vi i vårt studie har endret lokasjonen til Karmøy, Rogaland. I tillegg bruker NEEDS-modellen europeisk kraftmiks mens vi derimot har valgt norsk kraftmiks (Figur 17). Dette valget er basert på informasjon fra Fjord1. Dataen om elektrisitet er innhentet fra datasettet «Electricity, high voltage, production mix NO» i Ecoinvent 3. Dette datasettet har blitt kalkulert basert på statistikk fra 2014, med World Energy Statistics and Balances (IEA) som hovedkilde. Datasettet er modellert til en norsk kraftmiks og andelen av energikildene. De ulike kildene er fossil, kjernekraft, Ikke-fornybar biomasse (IF-biomasse), fornybar biomasse (F-biomasse), vind, sol, geotermisk og vannkraft



Figur 17 De ulike andelene av energikilder i den norske kraftmiksen

## 4.2.2 Transport

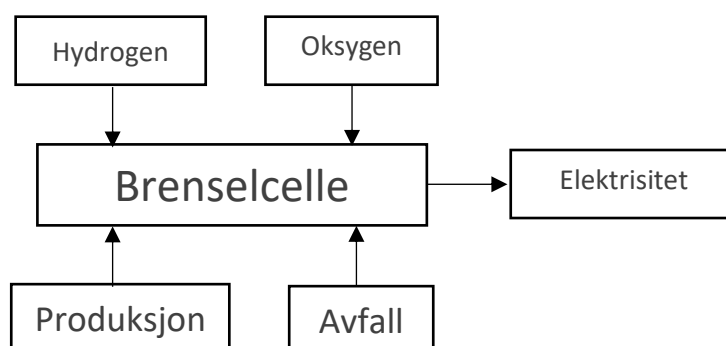
Hydrogenet blir transportert fra Karmøy. Dette utgjør en distanse på 147 km. Distansen er et estimat basert på korteste bilvei fra Karmøy til Nesvik i Google Maps (2018b).

Transporten vil utføres av lastebil på 32 tonn med EURO-6 teknologi. Datasettet brukt i Simapro er hentet fra Ecoinvent 3 «Transport, freight, lorry 32 metric ton», og er modellert for globalt. Bunkringsanlegg for mellomlagring av hydrogen på kaien er ikke inkludert.

## 4.2.3 Fremdriftsmaskineri

### 4.2.3.1 Brenselcelle

Dataen for brenselcelle som brukes i vår LCI er hentet fra livsløpsanalysen gjort av Mori et al. (2014). De ulike komponentene som kreves for at brenselcellen skal kunne produsere elektrisitet illustreres under i et flytdiagram ( *Figur 18*).



*Figur 18* simplifisert flytdiagram av brenselcelle

Mori et al. (2014) har tatt for seg en vugge til grav-analyse. I denne ble det tatt hensyn til råmaterialene, nødvendig energimengde for både produksjon og montering og 10 år med drift. Dataen i rapporten er hentet fra målinger, samtaler med produsenter og litteratur. Data om de ulike komponentene, elektrolyse, brenselcelle og lagringstank er hentet fra LCA-programmet GaBi.

Brenselcellene som blir brukt i ferjen er en PEMFC. Fremdriftsmaskineriet vi tar utgangspunkt i er basert i en forenklet tegning fra Fjord1. Vi antar at brenselcellen vil

komme fra firmaet i Connecticut USA. Videre herfra vil den bli transportert med sjøveien fra New Haven til Bergen. Fra Fjord1 vet vi at brenselcellene skal ha en virkningsgrad på 50 %.

Mori et al. (2014) bruker en tysk kraftmiks i analysen. Brenselcellen vil derimot bli produsert i USA, og dermed er kraftmiksen endret til amerikansk. Kraftmiksen brukt i produksjonen av brenselcellen vil da være 63 % fossilt brensel, 20 % fra kjernekraftverk og 17 % fra fornybar (EIA, 2018).

Tabellen under viser elektrisitet, transport og de ulike råmaterialene som går inn i produksjon av en brenselcellene (*Tabell 8*).

*Tabell 8 De ulike materialene og mengden som kreves i produksjonen av en brenselcellene med en effekt på 746 kW. I tillegg er det lagt med hvilke LCI datasett som er brukt*

Materiale	Enhet	Mengde	LCI data
Steel high grade	kg	23502,0	Ecoinvent 3
Steel low grade	kg	2598,5	Ecoinvent 3
Electrolyte copper	kg	8356,2	Ecoinvent 3
Aluminium	kg	223,8	Ecoinvent 3
Abs thermoset	kg	2506,5	Ecoinvent 3
Platinum	kg	447,6	Ecoinvent 3
Ruthenium	kg	111,9	Proxy til platinum, Ecoinvent 3
Graphite	kg	3356,9	Ecoinvent 3
Electricity—grid mix—US	kWt	2262806	Ecoinvent 3
Transport, freight, sea, transoceanic ship	tkm	5,59E-07	Ecoinvent 3

#### 4.2.3.2 Batteri

Beregninger gjort angående batteriet ferjen er basert på batteriet i ferjen Ampere (*Tabell 9*). Informasjonen om Ampere er hentet fra Wikipedia (Wikipedia, 2017) og Corvus Energys (Corvus Energy, 2017). MF Ampere har en batterikapasitet på 1040 kWt på båten, og 820 kWt for batterisystemet på land. Totalen er 1860 kWt. Et batteri med kapasitet på 1040 kWt veier 20 000 kg. Levetiden for batteriene er 10 år og har en virkningsgrad på 96 % (Kostøl, 2018). Ut i fra denne informasjonen har vi kalkulert vekten på det totale systemet (batteri på båt og batteri på land). Denne ble kalkulert til 178 kg kWt per leverte energi.

Tabell 9 Viser batteri og overdimensjonert batteri

Materiale	Batteri kapasitet	Enhet	Mengde	LCI data
Battery, Li-ion, rechargeable, prismatic	1040 kWt	g	1,3	Ecoinvent 3
Battery, Li-ion, rechargeable, prismatic	1000 kWt	g	6	Ecoinvent 3
Battery, Li-ion, rechargeable, prismatic	1500 kWt	g	9	Ecoinvent 3

Fra Fjord1 vet vi at de skal installere en batterieffekt på mellom 1000 til 1500 kWt. Dette er overdimensjonert, så en sensitivitetsanalyse har blitt gjennomført for å se hvordan GWP og CED endrer seg ved endring av batteristørrelse.

#### 4.2.3.3 Hydrogentank på båt

LCI-dataen som er brukt for tanken som lagrer hydrogenet på ferjen er fra Mori. et al (2014). Dataen tar for seg en tank på 20 m<sup>3</sup> med et trykk på 25 bar som kan holde 400 kg av H<sub>2</sub> gass (ca. 20 kg/m<sup>3</sup>). I følge dokumentet kan 1 kg av H<sub>2</sub> gass produsere 169,7 kWt med energi. Dette vil altså si at 400 kg kan produsere 67 996 kWt eller 1697 kryssinger på 50 % hydrogendrift. Dette er trolig overdimensjonert.

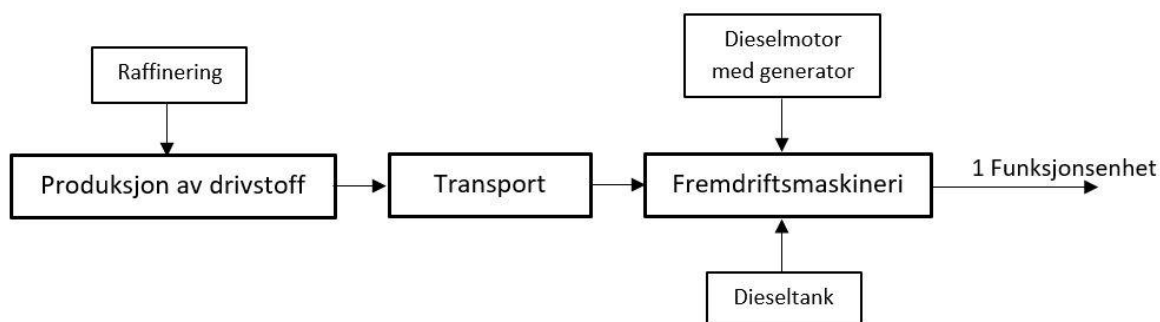
Videre beregninger er gjort basert på denne informasjonen For å tilpasse til oppgaven, har størrelsen på tanken blitt skalert til to tanker med en samlet kapasitet på 23,88 m<sup>3</sup> (Tabell 10). Levetiden på hydrogentanken er 10 år.

Tabell 10 Viser innhold i lagringstank med en kapasitet på 23,88 m<sup>3</sup>

Lagring	Enhet	Mengde	LCI data
Steel, low-alloyed	g	0,5	Ecoinvent 3
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6	tkm	9,61E-06	Ecoinvent 3
Kapasitet	m <sup>3</sup>	23,8	Egne kalkuleringer basert på Mori et al.(2014)
Maks operasjons trykk	bar	25	Mori et al. (2014)

## 4.3 Dieselferje

Det andre systemet vi analyserer er basert på en ferje med diesel som drivstoff, nærmere bestemt marin diesel (MDO). De analyserte prosessene i dieselferjen er illustrert under (Figur 19). Disse prosessene vil bli beskrevet i dette kapitlet.



Figur 19 De analyserte prosessene i dieselferjen

Data for denne LCI er skalert fra datasettet «*Diesel, burned in diesel-electric generating set*» i Ecoinvent versjon 3. Datasettet er basert på en dieselmotor med generator og involverer produksjon av motor og generator, raffinering av råolje til marin diesel, infrastruktur for dieselen og drift av motoren med generator.

### 4.3.1 Produksjon av drivstoff

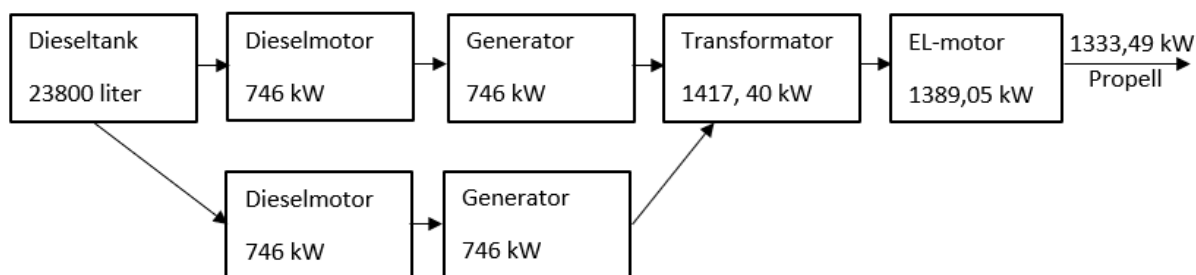
Diesel vil bli produsert med oljeraffinering fra råolje til MDO. MDO er ganske lik vanlig diesel til veitransport. Forskjellen er at MDO har høyere innhold av svoveldioksid og høyere viskositet, men likevel lettflytende nok til at en slipper å varme den opp før bruk slik en må med HFO (Marquard & Bahls AG, 2015). I datasettet vi bruker er diesel raffinert i Europa (Sveits er ikke tatt med). Originalt bestod datasettet av raffinering med nødvendig infrastruktur fra produksjon til bensinstasjon, altså forbruker. Denne delen av datasettet ble erstattet av raffinering med europeisk produksjon og transport direkte fra raffineriet til ferjen, som beskrevet i kapittel 4.1.

### 4.3.2 Transport

For å få en realistisk transportavstand går studiet ut i fra at dieselen blir produsert på Statoil Refining Norway AS ved Mongstad i Hordaland. Dette gjøres til tross for at det produseres diesel fra annen type råolje på dette raffineriet enn i den europeiske produksjonen i datasettet vårt. Ifølge Google Maps (2018c) er den korteste avstanden mellom Nesvik og Mongstad på 302 km og vi går derfor ut ifra denne avstanden. Transport fra raffineri til ferjen vil utføres av lastebiler på 32 tonn med EURO-6 teknologi. Bunkringsanlegget på kaien for mellomlagring av diesel til ferjen er ikke inkludert.

### 4.3.3 Fremdriftsmaskineri

Påfylling av diesel skal skje en gang i uka og ferjen har to dieseltanker på til sammen 23 800 liter. Disse tankene er produsert i stål. Informasjon om dieseltank og påfyllingsrutiner er basert på den eksisterende ferje «MF Vannes» med 1640 kW makseffekt på Hjelmeland-Nesvik sambandet (MF Vannes, 2018). Vår studie tar utgangspunkt i et framdriftsmaskineri med to dieselmotorer som driver hver sin generator. Elektrisiteten føres hver sin retning inn i transformatorer som videre sender rett spenning inn i en elektrisk motor på hver ende av båten. De elektriske motorene driver propellene (Figur 20).



Figur 20 Oversikt over fremdriftsmaskineriet i dieselsystemet

Motorene med generator er av typen Caterpillar C32 der hver av motorene har 746 kW ved 100 % effekt. Dette gir en total effekt på 1420 kW. Motoren er en stempelbasert firetaktsmotor med hurtig turtall (<1000 o/min). Virkningsgraden til en marin dieselmotor med hurtig turtall ligger vanligvis på rundt 38-44 % (Lundby & Æsøy, 2014). Levetiden for dieselmotoren er satt til 30 år. Dette er lik levetid som selve båten. Båten har to generatorer

med en samlet effekt på 1492 kW. Effektiviteten på disse er 96 %. Siden transformatoren og den elektriske motoren er utenfor systemgrensene for dette studiet vil en ikke gå detaljert inn i disse komponentene, men det er verdt å nevne at både den elektriske motoren og transformatoren har en virkningsgrad på 96 %.

Dieselmotoren med generator er produsert i Europa og er opprinnelig modellert for bruk som strømaggregat på 10 MW. Komponentene i dieselmotoren med generator er nedskalert fra 10 MW til 1492 kW (Tabell 11).

Tabell 11 Diesel komponenter

Materiale	Enhet	Mengde	LCI data
Copper	kg	2690	Ecoinvent 3
Steel, chromium steel 18/8	kg	1340	Ecoinvent 3
Steel, low-alloyed	kg	26900	Ecoinvent 3

Kraften som behøves i dieselmotoren varierer etter driftsprofilen til ferjen.

Drivstofforbruket i g/kWh er hentet fra motordata. Motordataen bestod av andre effektprosenten enn hva vi hadde i driftsprofilen, som nevnt i kapittel 4.1. For å finne det reelle drivstofforbruket brukte vi et tredjegradspolynom med funksjonen:

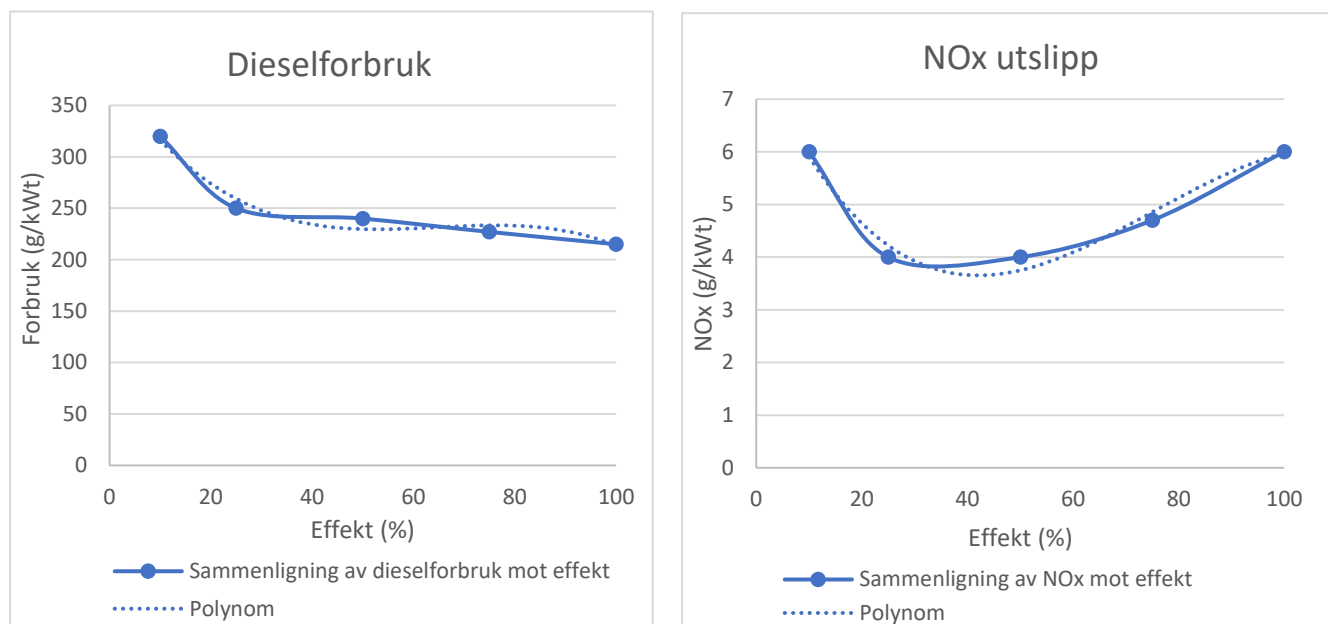
$$y = -0,0006x^3 + 0,1172x^2 - 7,3224x + 378,44$$

Det samme måtte vi gjøre for å finne NO<sub>x</sub>-utslippet og her var funksjonen til tredjegradspolynomet:

$$y = -2 * 10^{-5}x^3 + 0,0038x^2 - 0,2281x + 7,8328$$



Dieselforbruk og NO<sub>x</sub>-utslipp er vist grafisk i linjediagram (Figur 19 og Figur 20).



Figur 19 & r 20 Grafene viser trendlinjene for funksjonen til dieselforbruk og NO<sub>x</sub> utslipp.

Tabellen viser dieselforbruk og NO<sub>x</sub>-utslipp ved de forskjellige operasjonene i driftsprofilen (tabell 12). Dieselforbruk og NO<sub>x</sub>-utslipp i g/kWh er tall fra motordata, mens dieselforbruk i kg er utregnet ut ifra dieselforbruket fra motordata og multiplisert med energibehovet i kWh som trengs i driftsprofilen (Tabell 4). Samme prosedyre er fulgt for NO<sub>x</sub>.

Tabell 12 Motordata ut i fra driftsprofil

Dieselforbruk	Dieselforbruk (g/kWt)	Dieselforbruk i kilogram (kg)	NO <sub>x</sub> -utslipp (g/kWt)	NO <sub>x</sub> -utslipp i gram (g)
Akselerasjon	231,4	5,8	3,5	87,2
Overfart	274,1	12,3	4,6	207,3
Deakselerasjon	369,8	0,1	7,6	2,3
Manøvrering til kai	240,0	2,8	3,7	42,3
Lasting og lossing	369,8	0,8	7,6	15,8
Total	1485,1	21,7	26,9	354,9

Det høyeste drivstofforbruket skjer under overfarten og overfarten står for 56 % av det totale forbruket. Det laveste forbruket er ved deakselerasjon. Det totale dieselforbruket for en kryssing ved 1800 omdreininger per minutt er 21,69 kg. Dette tilsvarer 19,1 liter per kryssing, med en tetthet på 0,88 kg/l for diesel (Steaua Romana Refinery, 2006).

# 5 Resultat

I dette kapittelet vil resultatene fra livsløpsregnskapet (LCI) bli presentert i to ulike karakteriseringer. Først blir resultatene fra dieselferje og hydrogen-elektrisk ferje presentert i en konsekvensanalyse med 10 effektkategorier på midtpunktnivå. Metoden som har blitt brukt for å gjøre dette er *CML-IA baseline*. En av effektkategoriene i denne metoden er GWP og vår oppgave vil ha fokus på dette. Oppgaven vil også analysere energibehovet til de to nevnte ferjene og for å gjøre dette brukes metoden CED. Alle resultatene nedenfor er vist per funksjonsenhet. Funksjonsenheten er driften av ferjen for en kryssing, som forklart i omfang (kapittel 3.2).

## 5.1 Konsekvensanalyse

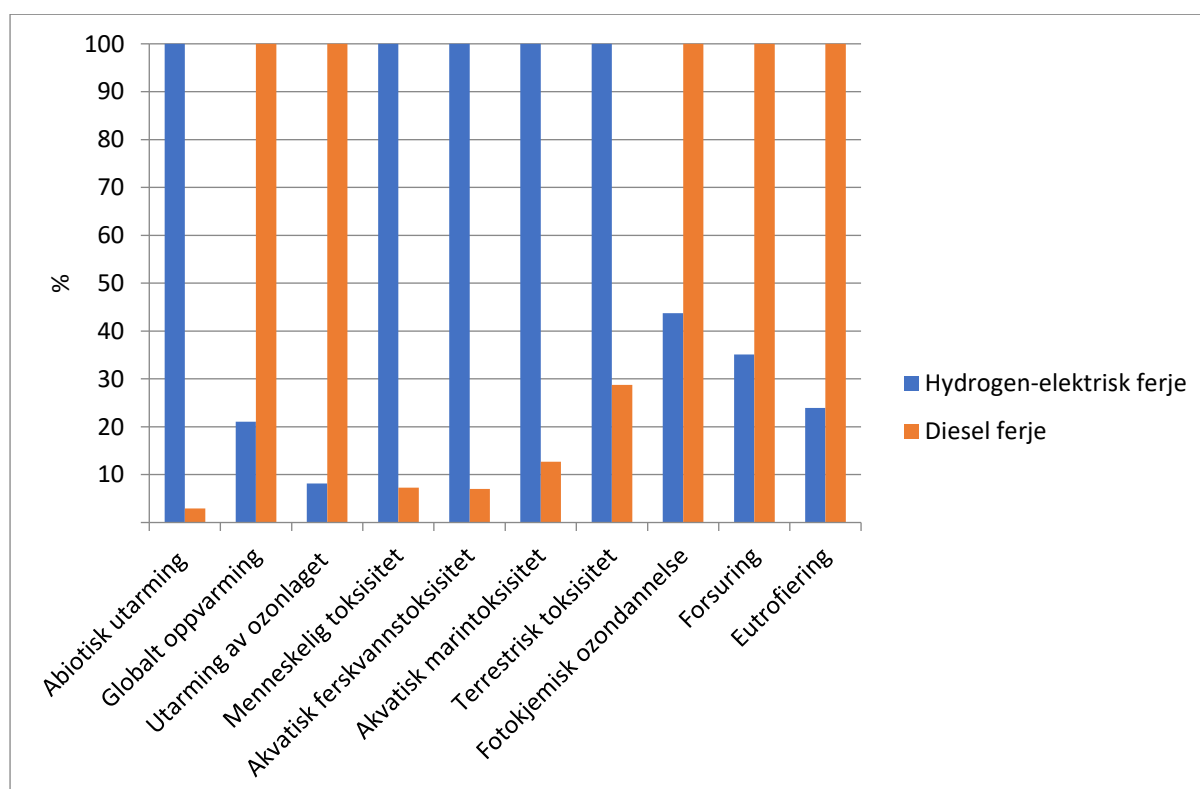
Tabellen under tar for seg ulike effektkategorier på midtpunktnivå for både hydrogen-elektrisk ferje og dieselferje (*Tabell 13*). Verdiene blir målt i egnede ekvivalenter og de baserer seg derfor ikke på samme enhet. Alle effektkategoriene er analysert på grunnlag av deres *potensial*.

Tabell 13 Resultatet av konsekvensanalysen for de to fargealternativene vist i ekvivalenter

Effektkategorier (potensial)	Enhet	Hydrogen-elektrisk ferje	Dieselferje
Abiotisk utarming	kg Sb ekv.	1,2E-04	3,6E-06
Global oppvarming (100 år)	kg CO <sub>2</sub> ekv.	5,2E+0	2,5E+1
Utarming av ozonlaget	kg CFC-11 ekv.	3,7E-07	4,59E-06
Menneskelig toksisitet	kg 1,4-DB ekv.	2,5E+1	1,8E+0
Akvatisk ferskvannstoksisitet	kg 1,4-DB ekv.	7,5E+0	5,3E-01
Akvatisk marintoksisitet	kg 1,4-DB ekv.	1,4E+4	1,8E+3
Terrestrisk toksisitet	kg 1,4-DB ekv.	3,6E-02	1,0E-02
Fotokjemisk ozondannelse	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ekv.	0,4E-02	0,8E-02
Forsuring	kg SO <sub>2</sub> ekv.	9,0E-02	25,5E-02
Eutrofiering	kg PO <sub>4</sub> ekv	1,4E-02	5,6E-02

Tabellen over viser kommer den hydrogen-elektriske ferjen dårligst ut på fem av ti effektkategorier (Tabell 13). Disse er terrestrisk toksisitet, akvatisk marintoksisitet, akvatisk ferskvannstoksisitet, menneskelig toksisitet og abiotisk utarming. Disse effektkategoriene er knyttet opp mot toksisitet på land og til havs, i tillegg til tapping av ressurser i det abiotiske miljøet.

Tabellen er grafisk fremstilt under (Figur 21). Figuren viser de to alternativenes bidrag til de ulike effektkategorier målt opp mot hverandre i prosent.



Figur 21 Prosentvis bidrag mellom de to ferjealternativene i de ulike effektkategoriene

Resultatene viser at der hvor dieselferjen kom verst ut, var ikke påvirkningen fra hydrogen-elektrisk ferje spesielt stor og vice versa. I alle kategoriene var påvirkningene fra den mest påvirkende ferjen over dobbelt så høy som den minst påvirkende ferjen. Hvorfor toksisitetene er så høye er diskutert i diskusjon.

## 5.2 Globalt oppvarmingspotensial

Dette kapittelet tar for seg påvirkningen fra den hydrogenelektriske ferjen og dieselferjen i globalt oppvarmingspotensial over 100 år (GWP-100).

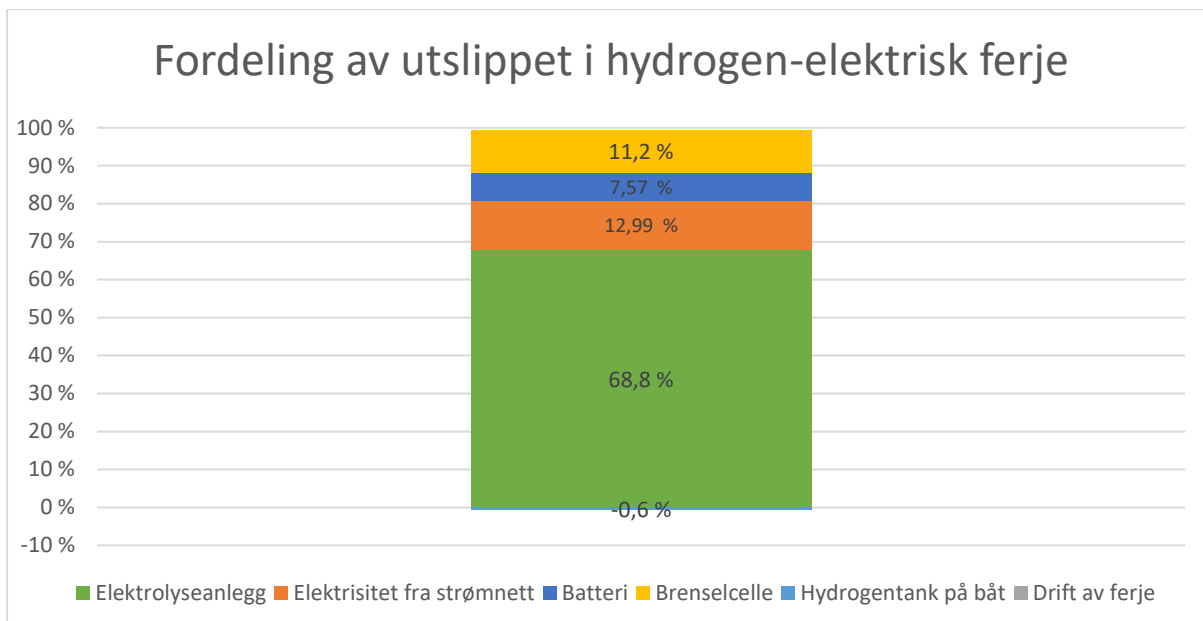
### 5.2.1 Globalt oppvarmingspotensial for hydrogen-elektrisk

En oversikt under viser GWP for de ulike prosessene for en hydrogen-elektrisk ferje (*Tabell 14*). Tabellen bruker kg CO<sub>2</sub> ekv. som enhet. Det høyeste utslippet i en hydrogen-elektrisk ferje kommer fra elektrolyseanlegget.

Tabell 14 Hydrogen-elektrisk ferje sitt GWP utslipp

Hydrogen-elektrisk ferje	Enhet	Mengde
Elektrolyseanlegg	kg CO <sub>2</sub> ekv.	3,6
Elektrisitet fra strømnett	kg CO <sub>2</sub> ekv.	0,7
Batteri	kg CO <sub>2</sub> ekv.	0,4
Brenselcellene	kg CO <sub>2</sub> ekv.	0,6
Hydrogentank på båt	kg CO <sub>2</sub> ekv.	0
Drift av ferje	kg CO <sub>2</sub> ekv.	0
Totalt	kg CO <sub>2</sub> ekv.	5,2

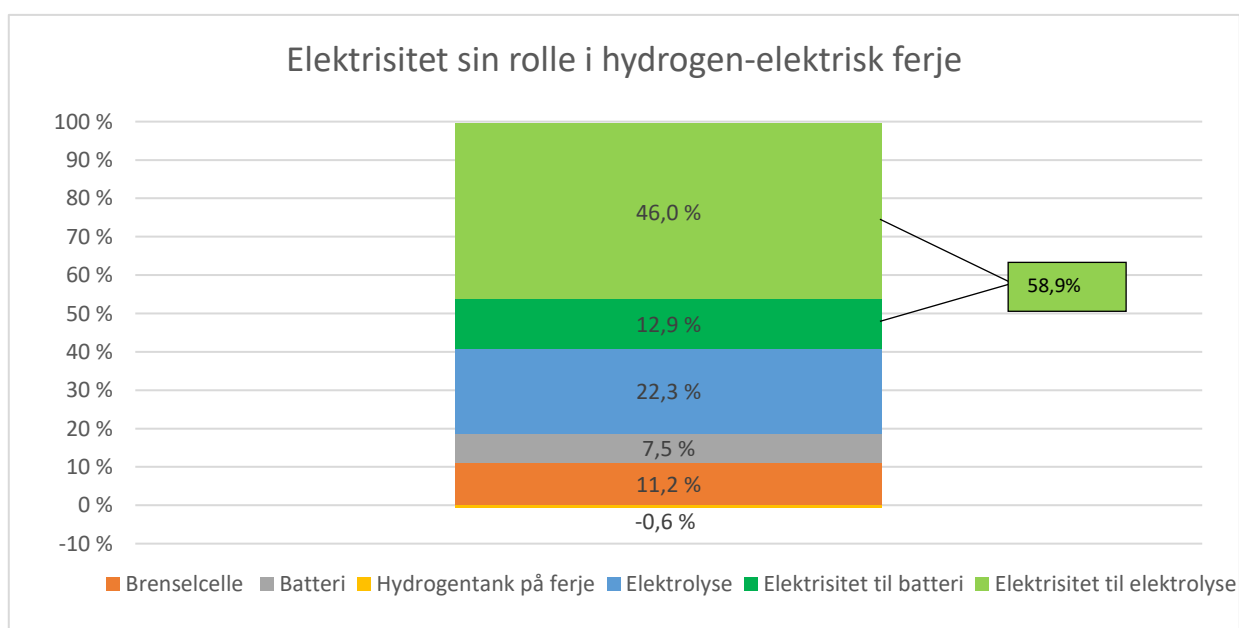
Resultatene fra hydrogen-elektrisk ferje viser at det totale utslippet er 5,24 kg CO<sub>2</sub> ekv. per kryssing. Det høyeste utslippet kommer fra elektrolyseanlegget. En kan se hvor stor prosentandel av utslippet de forskjellige komponentene har for det totale utslippet illustrert under (*Figur 22*) som er basert på tall fra tabellen over (*Tabell 14*). Under drift av ferje er det kun utslipp av vann i brenselcellenen. Derfor har «drift av ferje» ingen utslipp i GWP.



Figur 22 Grafen viser utslippsbidragene til den hydrogen-elektriske ferjen i prosent

Grunnen til det høye utslippet hos elektrolyse skyldes elektrisiteten som må tilføres til elektrolysen. 67 % av elektrolysen sitt totalutslipp er knyttet til elektrisitet, som blir tilført.

Det er illustrert grafisk under at 58,9 % av det totale GWP-utslippet for den hydrogen-elektriske ferjen kommer fra elektrisiteten som må tilføres i batteriene og elektrolysen. 12,9 % av denne andelen kommer fra elektrisiteten som tilføres i batteriet og 46 % kommer fra elektrisiteten som tilføres i elektrolysen (Figur 23).



Figur 23 Grafen viser utslippsbidraget til elektrisitet på det totale utslippet i prosent

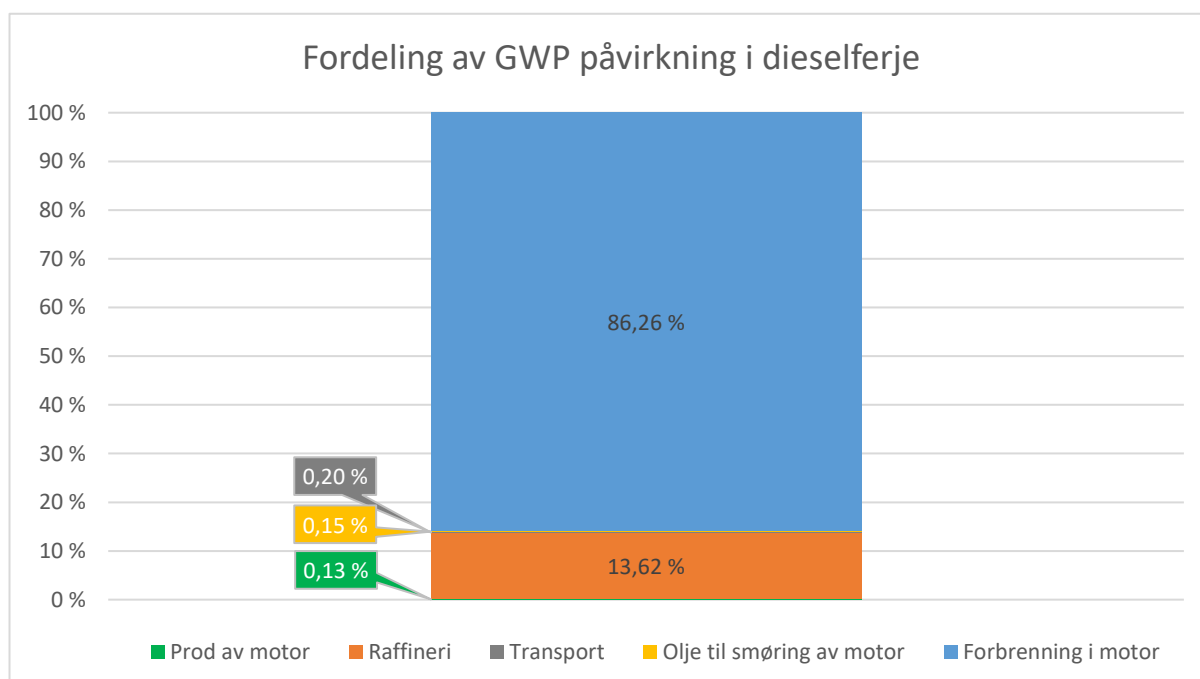
## 5.2.2 Globalt oppvarmingspotensial for diesel

Tabellen under viser GWP for de ulike prosessene for en dieselferje (Tabell 15). Tabellen bruker kg CO<sub>2</sub> ekv. som enhet.

Tabell 15 GWP for de ulike komponentene i dieselferjen

Dieselferjen	Enhet	Mengde
Produksjon av motor	kg CO <sub>2</sub> ekv.	0,3
Raffineri	kg CO <sub>2</sub> ekv	3,4
Transport	kg CO <sub>2</sub> ekv	0,1
Olje til smøring av motor	kg CO <sub>2</sub> ekv	0
Drift av ferje	kg CO <sub>2</sub> ekv	21,4
Total	kg CO <sub>2</sub> ekv	24,8

Det totale utslippet for dieselferjen er 24,8 kg CO<sub>2</sub> ekv. per kryssing. Det største andelen av utslippet kommer fra forbrenningen av diesel under drift og er 21,4 kg CO<sub>2</sub> ekv. Dette er også illustrert under, hvor de forskjellige andelene er vist i prosent (Figur 24).



Figur 24 Grafen viser hvor utslippene i GWP kommer fra og deres andel i prosent

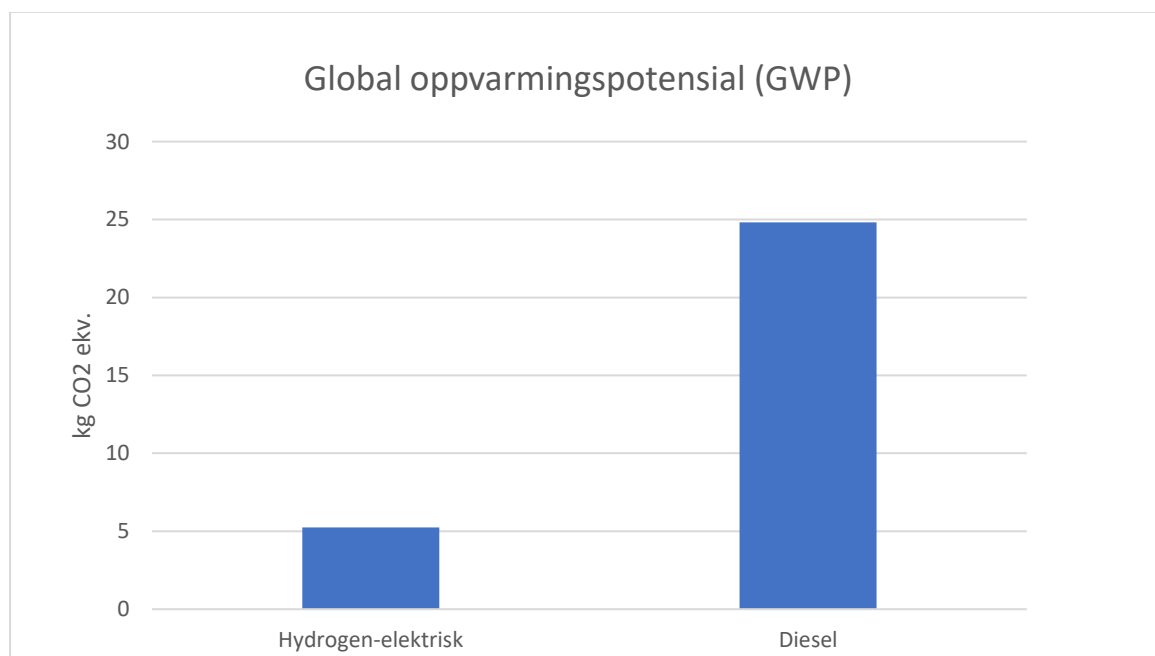
### 5.2.3 Sammenligning av globalt oppvarmingspotensial

Ved å sammenligne dieselferje og hydrogen-elektrisk ferje viser resultatet at hydrogen-elektrisk har laveste totalutslipp på 5,24 kg CO<sub>2</sub> ekv. mot diesel som har et totalutslipp på 24,8 kg CO<sub>2</sub> ekv. (Tabell 16).

Tabell 16 Drivstoffalternativ

Ferjealternativ	Enhet	Totalt
Hydrogen-elektrisk	kg CO <sub>2</sub> ekv.	5,2
Diesel	kg CO <sub>2</sub> ekv.	24,8

Dette betyr at den hydrogen-elektrisk ferjen har 79 % lavere totalutslipp enn dieselferjen per kryssing. Denne forskjellen er illustrert under (Figur 25).



Figur 25 Grafisk fremvisning av totalutslippet fra hydrogen-elektrisk og diesel



## 5.3 Kumulativt energibehov

Dette kapittelet tar for seg det kumulative energibehovet (CED) til den hydrogen-elektriske ferjen og dieselferjen.

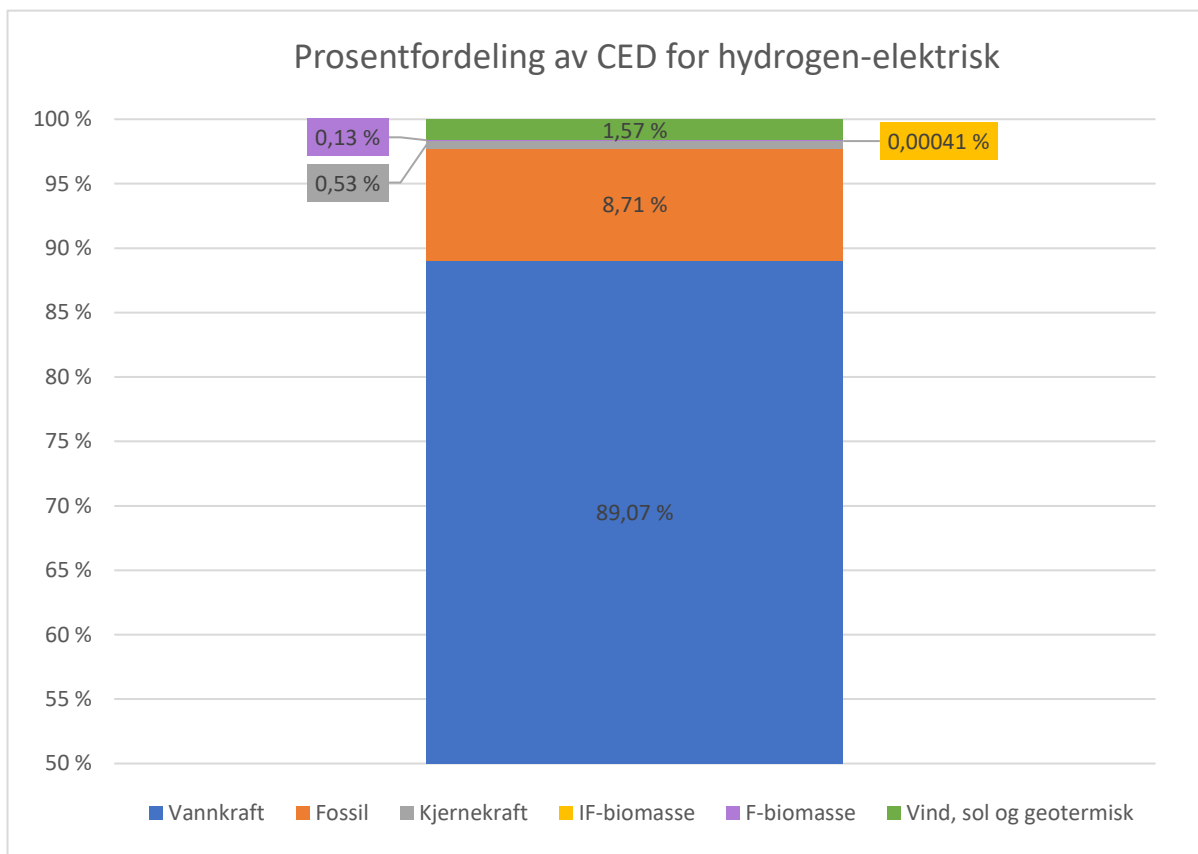
### 5.3.1 Kumulativt energibehov for hydrogen-elektrisk

Resultatene for hydrogen-elektrisk ferje viser det totale energibehovet per kryssing målt i MJ (Tabell 17).

Tabell 17 Energikilder og energimengde som kreves i prosessene hos den hydrogen-elektriske ferjen

Energikilder	Enhet	Total	Brenselcellene	Batteri	Hydrogentank	Elektrisitet til batteri	Elektrolyseanlegg
Fossil	MJ	69,2	6,8	4,7	-0,2	9,6	48,4
Kjernekraft	MJ	4,2	0,7	0,8	0	0,3	2,5
IF-Biomasse	MJ	0	0	0	0	0	0
F-Biomasse	MJ	1	0	0,2	0	0,1	0,7
Vind, sol og geotermisk	MJ	12,5	0	0	0	2,7	9,7
Vannkraft	MJ	708,3	0,2	0,5	0	156,7	550,9
Total	MJ	795,3	7,7	6,2	-0,1	169,3	612,2

Vannkraft står for 708,3 MJ av energibehovet. Dette er 89 % av energien. Den andre høyeste kilden med 69,2 MJ er fossil. Fordelingen er også vist grafisk under (Figur 26).



Figur 26 Prosentfordeling av CED for hydrogen-elektrisk ferje

Prosesen som er mest energikrevende er selve elektrolyseanlegget. Det som inngår i elektrolyseanlegget er produksjon av anlegget, elektrolyse, mengde KOH, kompressor, transport av hydrogen til ferjen, tank, vedlikehold og all elektrisitet som kreves i anlegget. Mengden energi som kreves i elektrolyseanlegget er 612,2 MJ. Grunnen til at denne prosessen er så energikrevende er som tidligere nevnt under kapittel 5.1, grunnet elektrisitetmengden som kreves i elektrolysen (53 kWt) og kompressoren (8 kWt).

### 5.3.2 Kumulativt energibehov for diesel

Det kumulative energibehovet for dieselferjen vises under (*Tabell 18*). Tabellen viser de ulike prosessene som er involvert med MJ som enhet.

*Tabell 18 viser energibehovet til de forskjellige delene i dieselferjen*

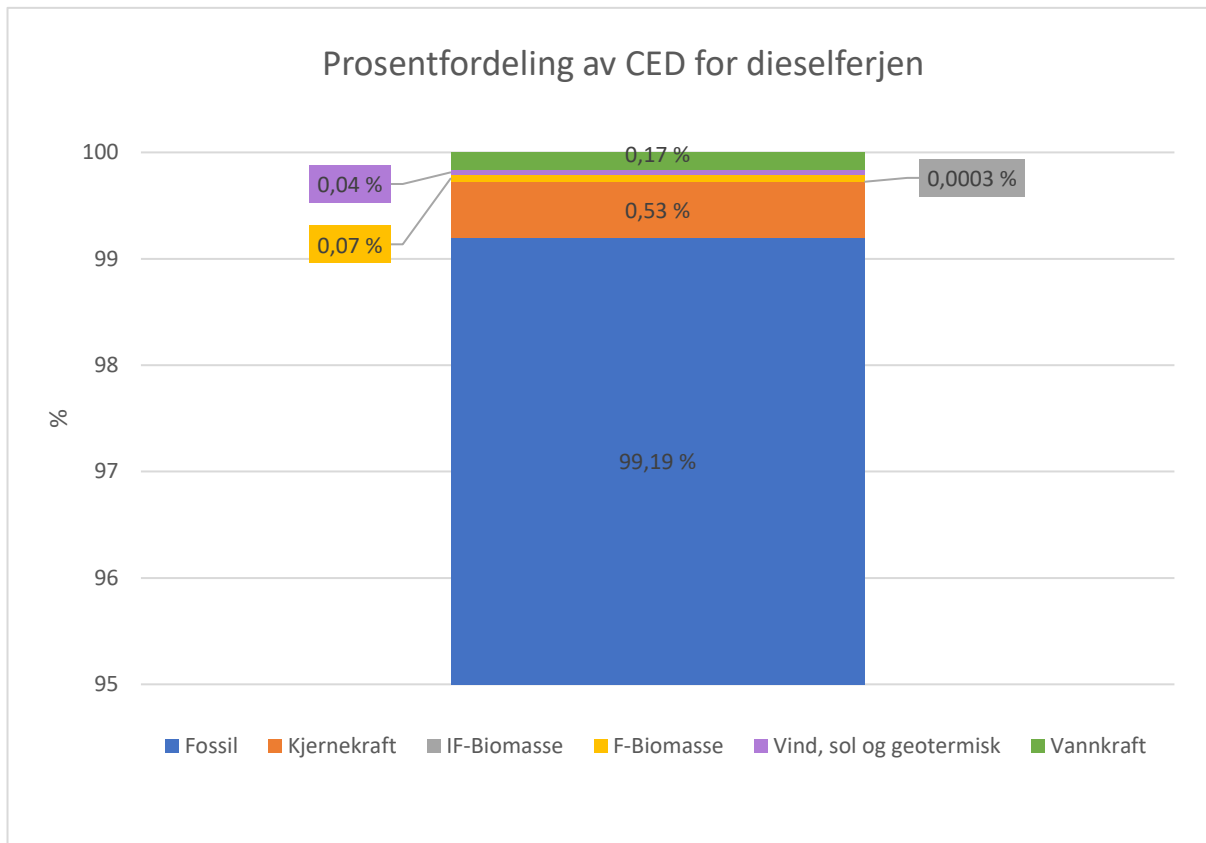
Dieselferje CED	Enhet	Energibehov
Produksjon av motor	MJ	0,4
Raffineri	MJ	379,3
Transport	MJ	0,8
Olje til smøring av motor	MJ	1,4
Forbrenning	MJ	0,2
Total	MJ	382,1

Prosesen hos dieselferjen som krever størst mengde energi er raffineri. Raffineri krever 379 MJ energi per kryssing og dette tilsvarer 99,3 % av det totale energibehovet. Under vises de ulike energikildene som inngår i prosessene (*Tabell 19*). Også her blir MJ brukt som enhet.

*Tabell 19 Energikilder og mengde energi som kreves i dieselferjen*

Energikilde	Enhet	Total	Drift og raffineri	Transport
Fossil	MJ	378,9	378,1	0,8
Kjernekraft	MJ	2	2	0
IF-biomasse	MJ	0	0	0
F-biomasse	MJ	0,3	0	0
Vind, sol og geotermisk	MJ	0,2	0	0
Vannkraft	MJ	0,6	0	0
Total	MJ	381,7	381,2	0,8

Dieselsystemet krever en energimengde på 382,075 MJ ( *Tabell 18*). 99 % av all energibehovet kommer fra fossile energikilder. Den fossile energikilden står for 378,881 MJ ( *Tabell 19*). Som vist under (*Figur 27*) står fossile kilder for 99 % av den totale energien i dieselferjen.



Figur 27 Prosentfordeling av CED for dieselferjen

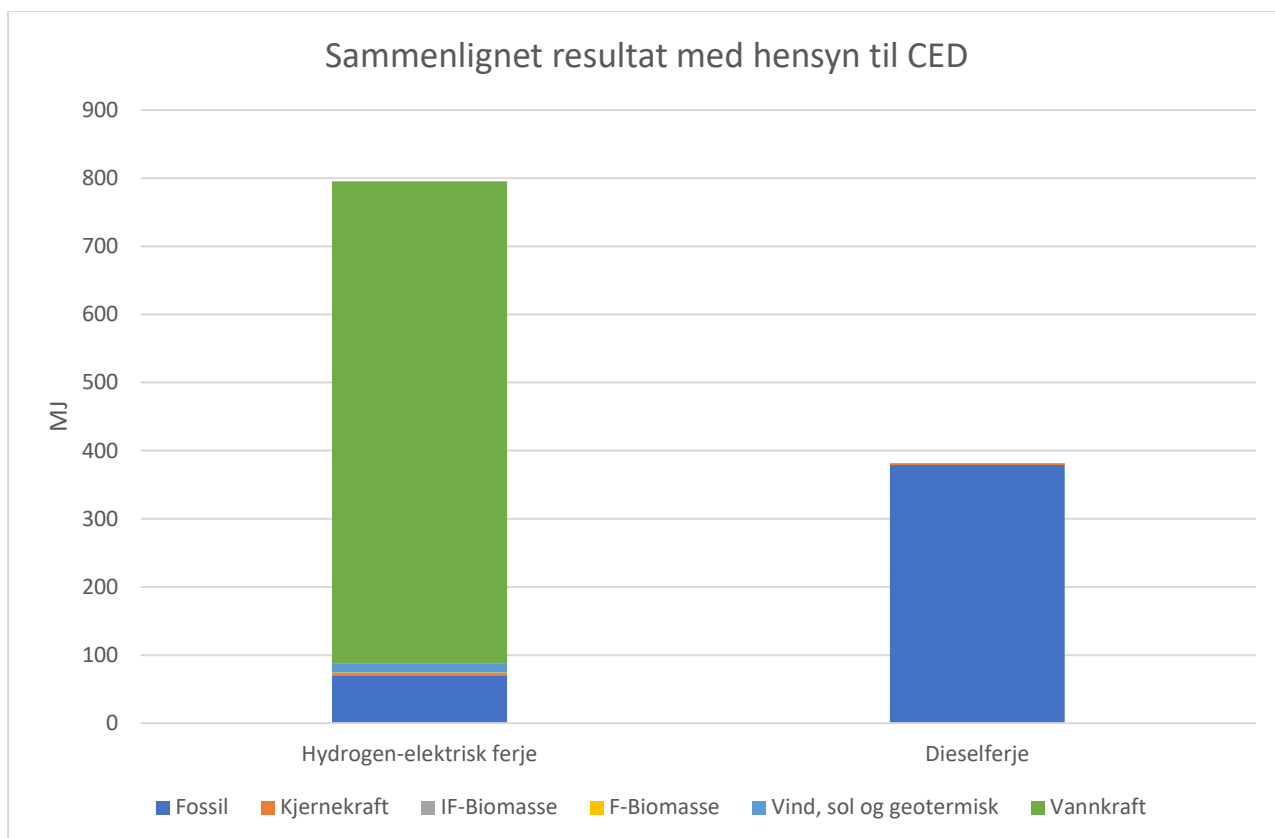
### 5.3.3 Sammenligning av kumulativt energibehov

I tabellen under ( *Tabell 20*) viser det kumulative energibehovet for de ulike energikildene for en hydrogen-elektrisk ferje sammenlignet med en dieselferje.

*Tabell 20 Sammenligning CED mellom hydrogen-elektrisk ferje og dieselferjen*

Energikilde	Enhet	Hydrogen-elektrisk ferje	Dieselferje
Fossil	MJ	69,2	378,9
Kjernerkeft	MJ	4,2	2,0
IF-Biomasse	MJ	0	0
F-Biomasse	MJ	1	0,3
Vind, sol og geotermisk	MJ	12,5	0,1
Vannkraft	MJ	708,3	0,6
Total	MJ	795,3	381,9

Totalt ser vi at en hydrogen-elektrisk ferje har langt høyere energibehov enn en dieselferje, 795 MJ per kryssing sammenlignet med 381 MJ per kryssing. Dette tilsier altså 413,3 MJ mer hos den hydrogen-elektriske ferjen enn dieselferjen. Med andre ord har dieselferjen 51,97 % lavere energibehov enn hydrogen-elektrisk. I tabellen (*Tabell 20*) vises det kumulative energibehovet for de ulike energikildene for en hydrogen-elektrisk ferje sammenlignet med en dieselferje.



Figur 28 Sammenligning CED Hydrogen-elektrisk ferje og dieselferje

Den grafiske framstillingen over viser forskjellene hos de ulike energikildene med hensyn til CED for begge alternativene (Figur 28). Totalt har hydrogen-elektrisk ferje 48 % høyere CED enn dieselferje. Her er det verdt å presisere at dieselferjen har 99 % av sin CED dekket av fossil energikilde, sammenlignet med den hydrogen-elektriske ferjen sine 8,7 %. Dette vil bli videre utdypet i diskusjonen (kapittel 6).

## 5.4 Sensitivitetsanalyse

Vi vet at det høyeste utslippet til den hydrogen-elektriske ferjen kommer fra elektrisiteten som kreves i produksjonen av hydrogenet. Vi gjennomfører derfor en sensitivitetsanalyse for å se hvordan GWP-100 og CED endrer seg ved en økning i andelen hydrogen og elektrisitet. Vi tar derfor utgangspunkt i en helelektrisk ferje og en helhydrogenferje. Disse ferjene vil vi sammenlignes opp mot den hydrogen-elektriske ferjen.

Vi har i tillegg gjennomført sensitivitetsanalyse på endring av kapasitet på batteriene. Fra Fjord1 fikk vi et estimat på batterikapasitet mellom 1000 og 1500 kWt. Vi ønsker derfor å se hvor stort utslag endringer i batterikapasiteten vil ha for utslippet.

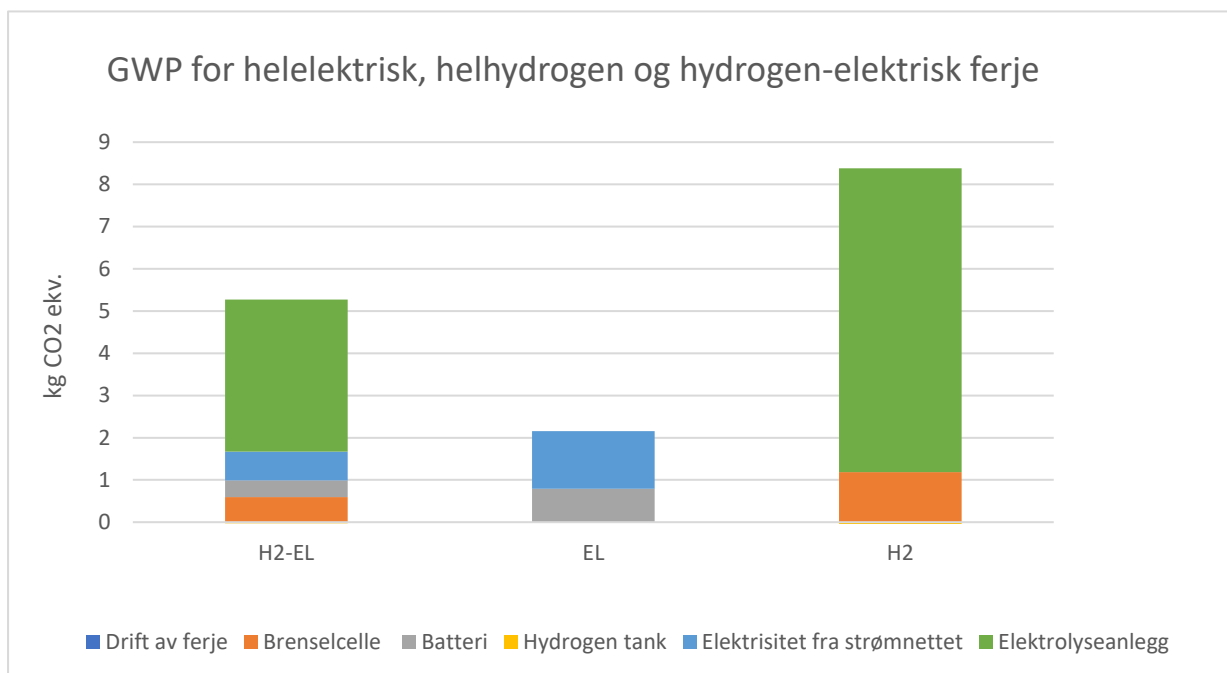
### 5.4.1 Globalt oppvarmingspotensial for helelektrisk og helhydrogen

Ved å sette helelektrisk ferje (EL), helhydrogen ferje (H<sub>2</sub>) og hydrogen-elektrisk ferje (H<sub>2</sub>-EL) opp mot hverandre som drivstoff viser resultatet at helhydrogen har mest utslipp med 8,315 kg CO<sub>2</sub> ekv. per kryssing. Det laveste utslippet har helelektrisk med 2,156 kg. Hydrogen-elektrisk havner derfor mellom hydrogen og elektrisk med 5,243 kg (*Tabell 21*).

Tabell 21 Sammenligning av GWP for en helelektrisk ferje og helhydrogen ferje

	Enhet	Total	Drift av ferje	Elektrolyse	Hydrogen tank	Brenselcellene	Batteri	Elektrisitet til lading av batteri
Hydrogen-elektrisk	kg CO <sub>2</sub> ekv.	5,2	0	3,6	0,0	0,6	0,4	0,7
Helelektrisk	kg CO <sub>2</sub> ekv.	2,2	0	-	-	-	0,8	1,4
Helhydrogen	kg CO <sub>2</sub> ekv.	8,3	0	7,2	0,0	1,2	-	-

De største utslippene hos både hydrogen og elektrisitet er elektrisiteten som trengs for å kunne drifte ferjen. For hver kilo komprimert hydrogen som blir skilt ut fra elektrolysen er utslippet 1,47 kg CO<sub>2</sub> ekv. og elektrisiteten som brukes i elektrolysen står alene for 0,989 kg av dette totale utslippet. Hydrogen har 74 % høyere utslipp enn elektrisitet. Forskjellen i utslipp mellom de tre driftsalternativene er vist under (*Figur 29*).



Figur 29 Grafen viser GWP for helelektrisk, helhydrogen, og hydrogen-elektrisk ferje

#### 5.4.2 Kumulativt energibehov for helelektrisk og helhydrogen

Helhydrogenferjen har det største energibehovet med 1239 MJ per kryssing og helelektrisk ferje har det laveste med 351 MJ. Hydrogen-elektrisk ferje havner mellom med 795 MJ.

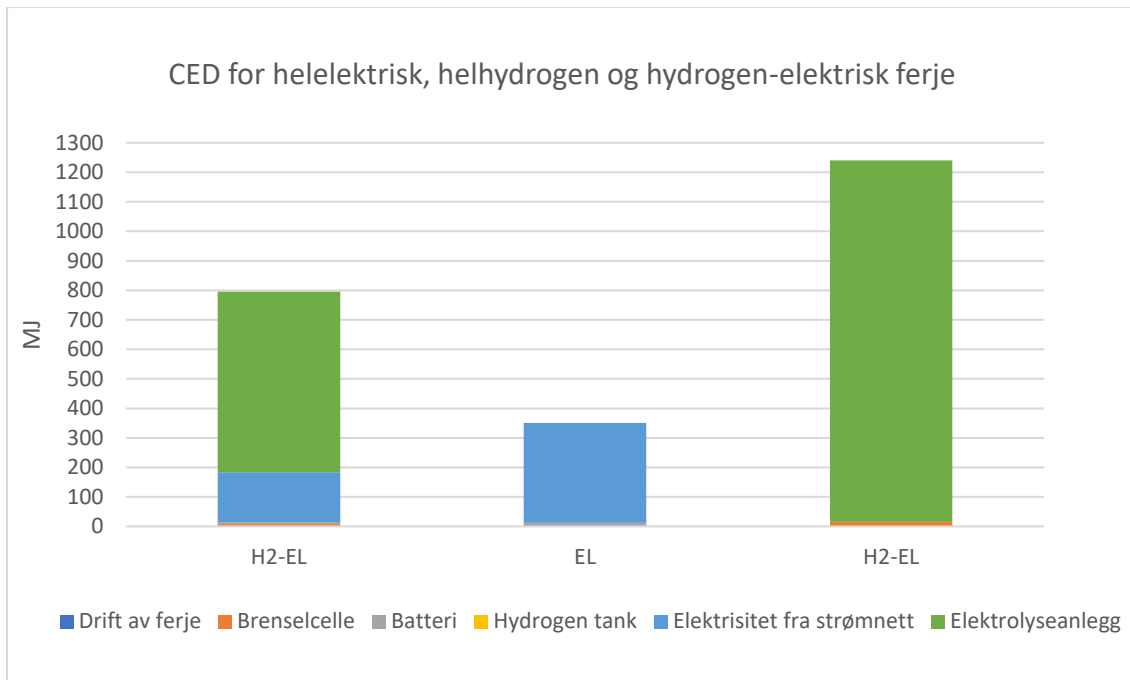
Under vises energibehovet for helelektrisk, helhydrogen og hydrogen-elektrisk (Tabell 22).

Tabell 22 Sammenligning av CED for en helelektrisk ferje og helhydrogen ferje

	Enhet	Total	Drift av ferje	Brenselcellene	Batteri	Hydrogen- tank	Elektrisitet fra strømmettet	Elektrolyse
Hydrogen-elektrisk	MJ	795,3	0	7,7	6,2	-0,1	169,3	612,2
Helelektrisk	MJ	351	0	-	12,4	-	338,6	-
Helhydrogen	MJ	1239,5	0	15,4	-	-0,2	-	1224,3

Det største energibehovet kommer fra elektrolyse for hydrogenferjen og den hydrogen-elektriske ferjen. Helhydrogenferjen har 71,7 % høyere energibehov enn den helelektriske ferjen. Figuren illustrerer forskjellen i energibehov mellom de tre alternativene (Figur 30).





Figur 30 Grafen viser CED for helelektrisk, helhydrogen, og hydrogenelektrisk ferje

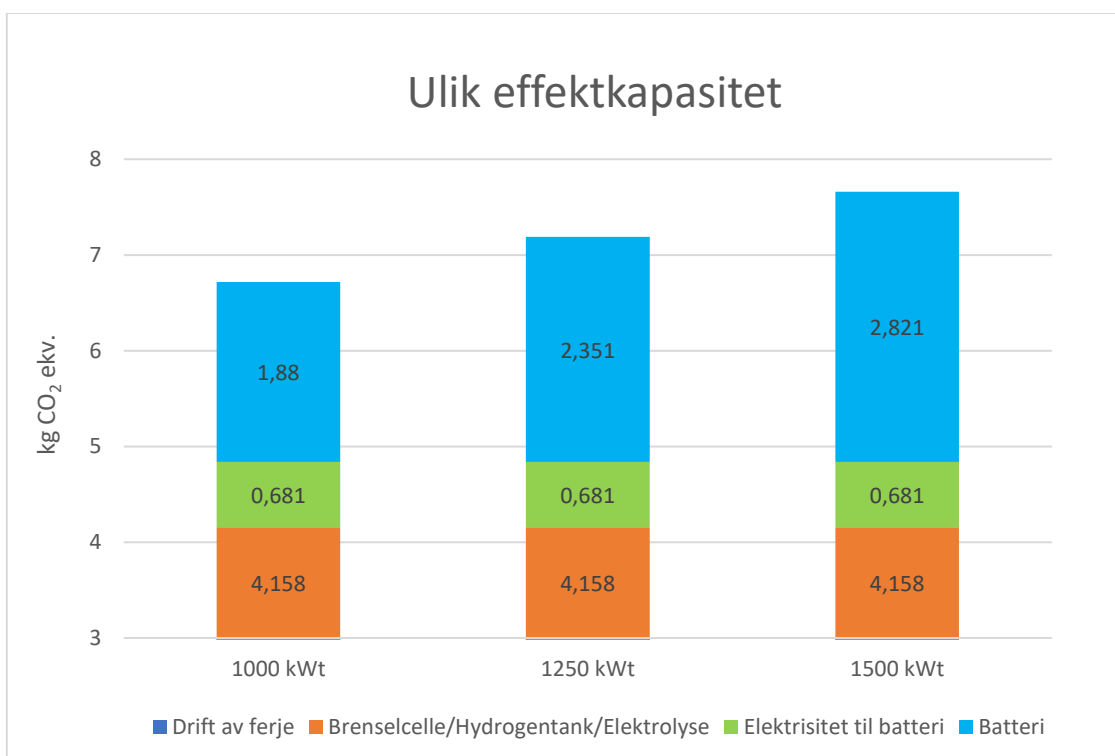
### 5.4.3 Globalt oppvarmingspotensial mellom batteri på 1000 kWt og 1500 kWt

Etter beskrivelse fra Steinar Frøyen Kostøl i Fjord1 om batteri i ferjen med størrelsesorden mellom 1000 kWt og 1500 kWt ble det gjennomført en sensitivitetsanalyse av hvor stor påvirkning en endring i effektkapasiteten og dermed en skalering av batteriene ville ha å si for påvirkning av GWP. Tabellen under (*Tabell 23*) viser GWP av batterikapasitetene 1000, 1250 og 1500 kWt.

Tabell 23 Sammenligning av GWP for batteri på 1000, 1250 og 1500 kWt

Størrelse batteri	Enhet	Total	Drift av ferje	Elektrolyseanlegget	Elektrisitet til batteridrift	Batteri
1000 kWt	kg CO <sub>2</sub> ekv.	6,7	0	4,2	0,7	1,9
1250 kWt	kg CO <sub>2</sub> ekv.	7,2	0	4,2	0,7	2,4
1500 kWt	kg CO <sub>2</sub> ekv.	7,7	0	4,2	0,7	2,8

Resultatet viser at det minste batteriet har minst påvirkning på GWP med 1,8 kg CO<sub>2</sub> ekv. per kryssing og det største batteriet har størst påvirkning med 2,8 kg CO<sub>2</sub> ekv. Det store spørsmålet under denne sammenligning er hvor stor forskjell det er mellom batteriene. Resultatet vårt viser at ved å skalere batteriene for 1500 kWt kontra 1000 kWt, stiger utslippet med 1 kg CO<sub>2</sub> ekv. Forskjellen i GWP er illustrert under (*Figur 31*).



Figur 31 Denne grafen viser GWP etter endringer ved skalering av batteri

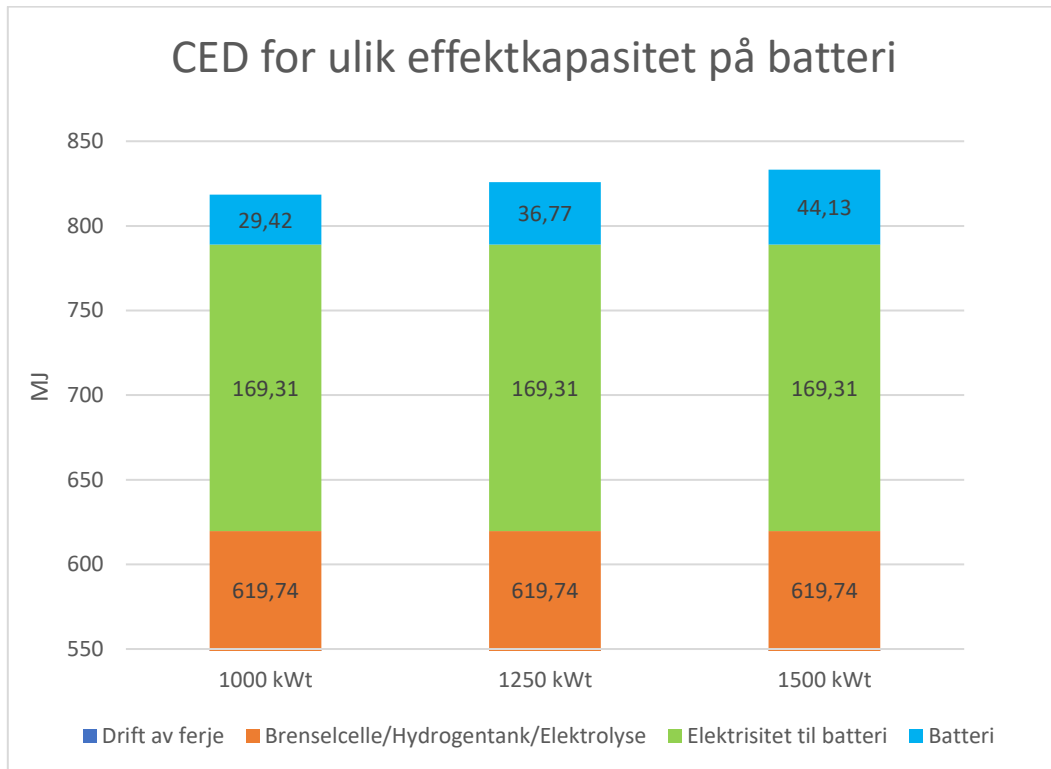
#### 5.4.4 Kumulativt energibehov mellom 1000 kWt batteri og 1500 kWt batteri

De ulike batteristørrelsene er også analysert for hvor mye energi de krever. Batteri med kapasitet på 1500 kWt har størst energibehov i batteriets levetid med 833 MJ og det minste batteriet på 1000 kWt har minst energibehov med 818 MJ (Tabell 24).

Tabell 24 Sammenligning av CED for batteri på 1000, 1250 og 1500 kWt

Størrelse batteri	Enhet	Total	Drift av ferje	Hydrogen-systemet	Elektrisitet til batteri	Batteri
1000 kWt	MJ	818,5	0	619,7	169,3	29,4
1250 kWt	MJ	825,8	0	619,7	169,3	36,8
1500 kWt	MJ	833,2	0	619,7	169,3	44,1

Forskjellen i energibehovet mellom batteriet på 1000 kWt og 1500 kWt er 15 MJ og dette er en forskjell på 1,8 %. Forskjellen i energibehovet er vist under (Figur 32).



Figur 32 Grafen viser kumulativt energibehov etter endringer ved skalering av batteri.

## 6 Diskusjon

I dette kapitlet vil vi oppsummere våre hovedresultat og diskutere disse. Deretter følger en sammenligning av resultatene med tidligere studier og en gjennomgang av data vi har brukt i dette studiet. Vi har også sett på hydrogen sitt potensial i norsk ferjesektor med utgangspunkt i GWP og CED. Til slutt følger en kritisk gjennomgang.

### 6.1 Diskusjon av resultater

I dette kapitlet diskuterer vi resultatene våre og besvarer forskningsspørsmålene.

I konsekvensanalysen tok vi for oss 10 effektkategorier ved midtpunktnivå. Resultatene viser at den hydrogen-elektriske ferjen kommer dårligst ut på fem av ti effektkategorier. De effektkategoriene som den hydrogen-elektriske ferjene kommer dårligst ut på er knyttet opp mot toksisitet, det vil si giftstoffer, på land og til havs. Den kommer også dårligst ut på abiotisk utarming. Dette er tapping av ressurser i det ikke-levende miljøet i økosystemet. Det er særlig akvatisk marintoksitet potensial og akvatisk ferskvannstoksitet potensial hvor den hydrogen-elektriske ferjen skiller seg ut med svært høye tall. Dette kan være på grunn av at hydrogensystemet og det elektriske systemet i den hydrogen-elektriske ferjen har flere komponenter som er laget av mineraler og råstoff, som har en stor toksisitetspåvirkning på miljøene i vann ved utvinning og avfallshåndtering. Dette studiet har basert seg på faktorene som påvirker GWP og CED, som gjør at de faktorene som påvirker toksisitet ikke har blitt fokusert på i dette studiet. Dette vil også kunne gi et feilresultat. En kunne prøvd å finne ut av hvorfor tallene var høye og brukt tid på å endre datasett for å justere disse, men siden studiet baserer seg på GWP og CED ble ikke dette prioritert.

**Forskningsspørsmål 1:** Hvor stor påvirkning vil en hydrogen-elektrisk ferje ha på globalt oppvarmingspotensial og kumulativt energibehov, sammenlignet med en dieselferje?

Resultatene for diesel viser et totalt utslipp på 24,8 kg CO<sub>2</sub> ekv. per kryssing. Utslipet tar for seg flere aspekter som produksjon av motor, raffinering av råolje, transport av diesel og drift av ferjen. Det største utslippet er forbrenning av diesel i motor. Dette utslippet står for 21,4 kg CO<sub>2</sub> ekv. og dette tilsvarer 83,3% av det totale utslippet.

GWP-utslippet til den hydrogen-elektriske ferjen er 78 % lavere enn dieselferjen med et utslipp på 5,2 kg CO<sub>2</sub> ekv. Resultatet er tydelig på at den største delen av utslippene til den hydrogen-elektriske ferjen kommer fra elektrolysen. Til tross for at elektrolysen skjer gjennom produksjon med norsk kraftmiks, utpeker utslippet seg med en andel som tilsvarer 68,3 % av det totale GWP utslippet. Dette kan forklares ved å sammenligne hydrogensystemet med det helelektriske systemet. I et elektrisk system har vi få komponenter med høye virkningsgrader, som til sammen sørger for at lite av energien går tapt til systemet. Eksempelvis har batteri en virkningsgrad på 96 % (Kostøl, 2018). I det hydrogenbaserte systemet er det derimot flere komponenter, som samlet bidrar til at systemet krever mer energi for å utføre samme oppgave, sammenlignet med det elektriske systemet. Vi får dermed et system som gjennom tap i flere komponenter får en lavere virkningsgrad totalt for systemet. Dette har vi prøvd å vise under (Tabell 25). Denne tabellen viser virkningsgraden for de forskjellige komponentene og summen av disse for en elektrisk ferje, en dieselferje og en hydrogenferje. Tabellen gir en forståelse for hvorfor det er så stor forskjell i virkningsgradene mellom systemene og hvor tapene skjer. Tallene er hentet fra dette studiets LCI foruten «produksjon og distribusjon» og «motor» i dieselferjen.

Tabell 25 Virkningsgraden for de ulike ferjene og deres komponenter fra produksjon til propell

Elektrisk ferje		Dieselferje		Hydrogenferje	
Batteri	95 %	Produksjon og distribusjon <sup>3</sup>	88 %	Elektrolyse	50 %
Likeretter	98 %	Motor <sup>4</sup>	40 %	Brenselcellene	50 %
Batteri	95 %	Generator	95 %	Frekvensomformer	98 %
Frekvensomformer	98 %	Frekvensomformer	98 %	Vekselretter	98 %
Vekselretter	98 %	Elektrisk motor	96 %	Elektrisk motor	96 %
Elektrisk motor	96 %	Total system	31 %	Total system <sup>2</sup>	23 %
Total system <sup>1</sup>	81 %				

<sup>1</sup> Tar ikke hensyn til effektivitet av kraftverk og strømnett.

<sup>2</sup> Tar ikke hensyn til distribusjon og tap til atmosfæren.

<sup>3</sup> Basert på en undersøkelse av (Ahlvik & Brandberg, 2001)

<sup>4</sup> Basert på tall for marin dieselmotor fra (Lundby & Æsøy, 2014)

Denne tabellen ser på energien som går inn i produksjon og ut i propell (Tabell 25).

Hydrogenferjen med en virkningsgrad på 23 % har et stort tap i energien i forhold til den elektriske ferjen, som har en virkningsgrad på rundt 81 %. Sammenlignet med dieselferjen er forskjellen derimot mindre betydelig, med en forskjell på 31 %. I hydrogenferjen skjer de største tapene hos elektrolyse og brenselcelle, mens i dieselferjen skjer det største tapen i motoren under drift.

Det kan virke som norsk kraftmiks har et høyt utslipp på grunn av sin høye prosentandel i GWP-utslippene til den hydrogen-elektriske ferjen. Denne andelen er høy på grunn av at hydrogen-elektriske ferje totalt har et lavt utslipp i GWP. Dette vil føre til at komponenter, som ellers har lave utslipp, vil bli merkbare i det totale systemet.

I sammenligningen mellom CED for diesel og hydrogen-elektrisk ser vi at til tross for et mye lavere utslipp, krever likevel et hydrogen-elektrisk alternativ mye mer energi enn et dieselalternativ. Hydrogen-elektrisk ferje har et energibehov på hele 795,3 MJ og dieselferje har 385,7 MJ. Det høye energibehovet hos hydrogen-elektrisk ferje skyldes hovedsakelig en energikrevende produksjon av hydrogen gjennom elektrolyse. Selv om dieselferjen ikke er like energikrevende sammenlignet med hydrogen-elektrisk ferje, kommer 99,3 % av

energien fra fossil. Dette er også grunnen til at dieselmotor har høyt GWP-utslipp. For den hydrogen-elektriske ferjen kommer 89 % av energien fra elektrisitet fra vannkraft.

**Forskningsspørsmål 2:** Hvordan vil globalt oppvarmingspotensial og kumulativt energibehov endre seg ved å gjøre en hydrogen-elektriske ferje om til en helelektrisk- eller helhydrogen ferje?

I sensitivitetsanalysen så vi på hvordan globalt oppvarmingspotensial og kumulativt energibehov endret seg ved å endre den hydrogen-elektriske ferjen om til helelektrisk eller helhydrogen. I kapittel 5.3 viste resultatene at 79,4 % av utslippet i den hydrogen-elektriske ferjen kommer fra hydrogensystemet og resten fra det helelektriske systemet. Det samme vises igjen i sensitivitetsanalysen hvor det høyeste utslippet med 8,3 kg CO<sub>2</sub> ekv. kommer fra helhydrogenferjen og det laveste utslippet kommer fra den helelektriske ferjen med 2,2 kg CO<sub>2</sub> ekv. Den hydrogen-elektriske ferjen har som tidligere nevnt et utslipp på 5,2 kg CO<sub>2</sub> ekv., som havner mellom helhydrogen og helelektrisitet.

Grunnen til disse resultatene er at helhydrogenferjen har flere komponenter som har påvirker GWP og helhydrogenferjen har lavere total virkningsgrad i systemet enn den helelektriske ferjen og krever derfor også mer elektrisitet. Dette gir videre en påvirkning på GWP. I CED viser resultatene at elektrolyse har det største energibehovet for helhydrogenferje, mens elektrisitet til batteriet har det største energibehovet hos helelektrisk ferje. Helhydrogenferje har 71,7 % høyere energibehov enn helelektrisk ferje. Årsaken til dette er også her at hydrogensystemet har flere direkte og indirekte komponenter som krever mye energi i produksjonen og i tillegg har lavere virkningsgrader, sammenlignet med det helelektriske systemet. Som nevnt tidligere i kapittelet er virkningsgraden på det totale hydrogensystemet rundt 23 % til propellen, og for det helelektriske systemet er virkningsgraden rundt 81 %.

For den siste sensitivitetsanalysen skalerte vi batteriene til 1000 kWt, 1250 kWt og 1500 kWt. Resultatene viste at det minste batteriet på 1000 kWt hadde den minste påvirkning på GWP med 2,821 kg CO<sub>2</sub> ekv. og det største batteriet på 1500 kWt med 1,88 kg CO<sub>2</sub> ekv. Utslippene kommer fra produksjon og avfallshåndtering. Foruten batteriet vil alle komponentene og elektrisitet som tilføres ikke påvirkes av en endring i batteristørrelsen.

Grunnen til dette er at Fjord1 skal bruke samme fremdriftsmaskineri og kravene fra Statens Vegvesen om 50 % drift av hydrogen står ved like. Dette betyr at funksjonen til batteriet vil være å ha ekstra kapasitet tilgjengelig. Resultatene viser at ved å skalere opp batteriet for å få mer kapasitet vil en få en økning i GWP på 0,94 kg GWP ekv. per kryssing.

I CED ser en samme trend som i GWP. Det minste batteriet på 1000 kWt trenger mindre energi med et behov på 29,42 MJ, kontra 1500kWt på 44,13 kWt. Denne energien er fra produksjonsdelen og avfallshåndteringen av batteriene. Denne økningen i kapasitet vil også føre til en økning på 14,7 MJ per kryssing.



## 6.2 Vårt resultat sammenlignet med litteratur

Vi har sammenlignet vårt studie i globalt oppvarmingspotensial over 100 år, opp mot litteraturen (*Tabell 26*). Dette er viktig for å sikre at det ikke er blitt gjort feil i analyseringen og det gir et mer robust resultat.

Tabell 26 Vår studie sammenlignet med litteratur

	Funksjonsenhet (FU)	GWP-100 per FU kg CO <sub>2</sub> ekv.	GWP-100 per kWh kg CO <sub>2</sub> ekv.
<b>Hydrogenelektrisk</b>			
Vår studie	Per kryssing (6 km)	5,243	0,063
<b>Hydrogen</b>			
Vår studie	Per kryssing (6 km)	8,315	0,099
(Alkaner & Zhou, 2005)	Per kWt	1,063	1,063
(Strazza et al., 2009)	Per kWt	0,0795	0,076
<b>Elektrisk</b>			
Vår studie	Per kryssing (6 km)	2,156 <sup>a</sup>	0,026
(Maritime Battery Forum, 2016)	Per kWt	0,03 <sup>a</sup>	0,03
(Maritime Battery Forum, 2016)	Per kWt	0,47 <sup>b</sup>	0,47
(Einberger, 2017)	Livsløp (30 år)	2260000 <sup>a</sup>	0,024
(Kullmann, 2016)	Per kryssing (5,6 km)	6,58 <sup>a</sup>	0,026
<b>Diesel</b>			
Vår studie	Per kryssing (6 km)	25,177	0,30
(Einberger, 2017)	Livsløp (30 år)	79100000 <sup>c</sup>	0,85
(Kullmann, 2016)	Per kryssing (5,6 km)	258 <sup>c</sup>	1,00
(Kullmann, 2016)	Per kryssing (5,6 km)	157 <sup>d</sup>	0,65
(Øberg, 2013)	Et års drift	15100000 <sup>c</sup>	0,68
(Schmidt & Watson, 2013)	Et års drift	546305 <sup>c</sup>	0,39

<sup>a</sup> Norsk kraftmiks

<sup>b</sup> Europeisk kraftmiks

<sup>c</sup> Monohullferje i stål

<sup>d</sup> Katamaranferje i aluminium

I vår studie har ferjen behov for 83,618 kWt for å utføre en driftsprofil på 20 min. Ved å gjøre om funksjonsenheten til 1 kWt, blir derfor utslippet 0,099 kg CO<sub>2</sub> ekv. for vår ferje med helhydrogen. Resultatet vårt har bare en forskjell på 0,023 kg fra Strazza et al. (2009), som har 0,076 kg CO<sub>2</sub> ekv. som resultat. Selv om brenselcelletypen og dens bruksformål er forskjellige, har begge studiene utgangspunkt i hydrogen fra elektrolyse. Gjennom vårt resultat har vi sett at det er fra elektrolyse at de største utslippet kommer fra og dette kan forklare hvorfor resultatene mellom vår studie og Strazza et al. (2009) er så like.

Alkaner & Zhou (2005) skiller seg ut med høyest GWP på 1,063 kg CO<sub>2</sub> ekv. Dette er mest sannsynlig på grunn av at dette studiet bruker MCFC med diesel som input i brenselcellen. Det hadde vært ønskelig å sammenligne flere studier som bygde på livsløpsanalyse av båter med drift fra PEMFC, men antall studier som bygger på dette er begrenset. Vi har ikke funnet studier som analyserer livsløpet til ferjer med hydrogen-elektrisk drift og dette kan gi en indikasjon på at et slikt driftsoppsett er analysert i meget få tidligere studier.

I alle studiene som omhandler elektriske ferjer med norsk kraftmiks, skilles det maks 0,01 kg CO<sub>2</sub> ekv. mellom resultatene i GWP. Denne forskjellen er minimal og grunnen til dette er sannsynligvis at alle ferjene baserer seg på maskineriet til den første elektriske ferjen MF Ampere. Ved å gjøre om resultatet vårt fra den helelektriske ferjen fra en kryssing til kWt, blir vårt resultat 0,258 kg CO<sub>2</sub> ekv.

Kullmann (2016) og Einberger (2017) har brukt samme maskineri fra MF Ampere og samme samband mellom Lavik og Oppedal i Høyanger Kommune. For å konvertere deres resultat i kWt, måtte vi bruke informasjon fra Kullmann (2016) om antall turer per dag og Einberger (2017) sin informasjon om nødvendig energi per overfart for MF Oppedal sitt skrog med MF Ampere sitt maskineri. Kullmann (2016) har funnet ut at ferjen kjører normalt 32,9 turer per dag og Einberger (2017) har funnet ut at hver overfart krever 257 kWt. Med dette i betraktning får Kullmann (2016) 0,026 kg CO<sub>2</sub> ekv. per kWt og Einberger (2017) får 0,024 kg. Disse tallene er selvsagt et resultat fra omregning og ikke deres egne tall, men det gir en forståelse for at resultatene er tilnærmet like som vårt resultat på 0,26 kg CO<sub>2</sub> ekv., selv med slingring.

Av dieselstudiene er det Kullmann (2016) og Einberger (2017) som er mest lik vår studie. Disse studiene tar utgangspunkt i bilferjer, mens Øberg (2013) og Schmidt & Watson (2013)

ser på større cruiseferjer (Ro-pax). Ved å gjøre om til kWt kommer Kullmann (2016) ut med 0,611 kg CO<sub>2</sub> ekv. for aluminiumferje og 1 kg CO<sub>2</sub> ekv. for stålferje, mens Einberger (2017) kommer ut med 0,854 kg CO<sub>2</sub> ekv. Vår studie har en GWP på 0,297 kg per kWt. Dette er over halvparten (0,314 kg) så lite som utslippene fra Kullmann (2016) og Einberger (2017). Grunnen til dette er at vårt motorsett er 2 x 746 kW med et dieselforbruk på 21,69 kg per kryssing, mens Kullmann (2016) og Einberger (2017) har et motorsett med 2 x 1100 kW + 2 x 640 kW og et dieselforbruk på 45,5 kg per kryssing. Alle studiene i sammenligningen, inkludert oss, er enige om at det største utslippet skjer ved forbrenning av diesel under drift. Dette bygger opp på forklaringen om at forskjellen på 23,81 kg i dieselforbruket per kryssing kan resultere i en dobling i utslippene.

Det er viktig at det er en forståelse for at studiene har forskjellige systemgrenser for material og energi for ferjen. Vår studie, Alkaner & Zhou (2005), Strazza et al. (2009), Øberg (2013) og Maritime Battery Forum (2016), ser bare på maskineriet eller deler av maskineriet. Andre studier, som Kullmann (2016) ser på materiale og energi i skroget og Schmidt & Watson (2013) ser på hele ferjen. Einberger (2017) ser ikke på materialene i skroget, men tar hensyn til skrogets dimensjoner og egenskaper for å kunne regne ut motstand.

Denne ulikheten i systemgrensene svekker sammenligningen mellom enkelte studier ettersom CO<sub>2</sub> ekvivalentene vil kunne bli mindre når utslippet fra skroget ikke blir undersøkt. I Schmidt & Watson (2013) er det gjort en grundig LCI for produksjon av båten med alt fra skrog til el-nett, maling, tekstiler, plastikk og tjenester. Likevel står bare produksjon for 6,9 % av det totale utslippet. Når studiene som blir sammenlignet har et så samlet resultat, vil ikke 6,9 % endring i utslippene utgjøre et betydelig avvik. En kan derfor konkludere med at resultatene i vår oppgave samstemmer med litteraturen.

## 6.3 Datagrunnlag

Vi har gjennom dette studiet hatt jevn kontakt med Steinar Frøyen Kostøl i Fjord1. Dataen fra Steinar har hovedsakelig gått på dimensjonering av ferjen, virkningsgrader, motordata og skisser av komponentene i maskineriet, samt driftsprofil. Vi har også tatt hensyn til kravene i konkurransegrunnlaget til Statens Vegvesen for *Drift av riksvegferjesambandet Hjelmeland – Skipavik – Nesvik*. Gjennom analysearbeidet har vi hatt som mål å gjennomføre analysen med et så likt bilde av realiteten som mulig. Vi har derfor etter beste evne prøvd å få framdriftsmaskineriet så likt som Fjord1 har planlagt og hva konkurransegrunnlaget har satt krav om.

Datainnsamling og valg av LCI ble først og fremst styrt av informasjonen fra Fjord1, men utover i datainnsamlingsfasen ble fremgangsmåten også påvirket av andelen og kvaliteten av data i litteraturen. Deler av datatilgangen har vært begrenset og derfor har flere beslutninger blitt tatt basert på antagelser.

Vi fikk tilgang til representativ driftsprofil og motordata, men siden disse inneholdt ulike effektprosenten i forhold til hverandre, måtte vi interpolere effektprosentene i motordata og driftsprofilen. Driftsprofilen og motordata kom rett fra Fjord1 og var av god kvalitet. Denne interpolerte dataen ble brukt til å estimere nødvendig energi og drivstofforbruk.

I dette studiet har vi analysert produksjon av maskineri og drivstoff, transport av maskineri og drivstoff, drift av ferjen med forbruk av drivstoff og resirkulering av maskineriet. Alle komponentene er resirkulerte. I ferjen analyserte vi bare de komponentene som ikke var felles mellom alle ferjene (*Ceteris paribus*). Derfor så vi ikke på selve skroget og inventaret i ferjen. Vi analyserte komponentene i maskineriet, men har ikke tatt med omformere, elektriske motorer og propeller. Ved å sette skroget og inventaret utenfor systemgrensa vil det føre til en mindre klimapåvirkning, spesielt i produksjonen, og dermed et større avvik fra den virkelige påvirkningen. Her er det verdt å nevne at når vi endrer maskineriet vil det bli endringer i eksempelvis dimensjonen på motorrommet. Dette er noe som vi har valgt å ikke ta hensyn til i dette studiet, men som vil påvirke utslippet i produksjonsfasen. Vedlikehold er ikke inkludert for noen av ferjene og kan ha en effekt på miljøpåvirkningen.

For å produsere et best mulig resultat var det nødvendig å gjøre endringer i LCI-dataen. Vi har endret kraftmiksen til norsk kraftmiks for å etterfølge kravet fra anbudet om elektrisitet fra nordisk kraftmiks eller strøm som har dokumentert å ha lik eller mindre CO<sub>2</sub> utslipp. Videre tilpasset vi transportdistansen til vår studie. For brenselcellene har vi regnet med transport via sjø fra New Haven til Bergen, en distanse på 5500 km. For frakt av hydrogen antar vi en distanse på 147 km fra Karmøy til Nesvik. Videre har vi endret virkningsgradene for å være bedre egnet for vårt. En brenselcellen har vi, etter informasjon fra Steinar Frøyen Kostøl, satt til å ha en virkningsgrad på 50 %.

Dataen om elektrolyse ble fremskaffet fra studiet til NEEDS (2008) og omtalt i kapittelet 4.2. Dette studiet er fra 2008, og modellen som det er basert på er fra 2003 (Mailänder, 2003). Dermed kan dette studiet tenkes å være utdatert. Det som gjorde dokumentet representativt for vår oppgave er at anlegget som inventaret er basert på er eid av Norsk Hydro. I tillegg er anlegget lokalisert i Europa. Vi gjorde enkelte endringer i inventaret for å tilpasse vår oppgave. Disse endringene er tidligere forklart i kapittel 4.2. En av disse endringene var å bruke platina istedenfor rhodium i brenselcellen. Det ble ikke funnet noen data for rhodium og siden platina også var i brenselcellen og begge er et platinametall, gikk vi ut i fra at disse hadde en omtrentlig lik miljøpåvirkning. Vi måtte gjort endringer dersom platina hadde en høy andel av utslippene, men siden påvirkningen fra platina hadde lav påvirkning i GWP og CED valgte vi å bruke denne endringen. Dette kan føre til et avvik i resultatene. En annen endring var å endre kraftmiksen. Vi endret kraftmiksen fra europeisk til norsk. Resultatet viste at elektrisiteten som kreves i produksjonen av hydrogen, var den største kilden til GWP-utslipp. Vi valgte å ikke lage en sensitivitetsanalyse av kraftmiksen, på grunn av Statens Vegvesen sitt anbudskrav om elektrisitet fra nordisk kraftmiks.

I LCI data for *vegg og fundament* i *elektrolyseanlegget* hadde *grus* en stor mengde (1,27 kg per 1kg hydrogen), sammenlignet med de andre råstoffene. Etter å ha undersøkt elektrolyseanlegget er vi kommet frem til at dette skyldes grunnarbeidet.

Elektrolyseanlegget er 300 kvadratmeter og ligger på komprimert grus. Hvor mye grus det er behov for rundt fundamentet, avhenger av grunnforholdene. Dette blir bestemt av blant annet bæredyktigheten til jorda, mengde grunnvann og hvordan fjellet er på området der elektrolyseanlegget er bygget. Derfor er det god grunn til å tro at grunnarbeidet kan være årsaken til at elektrolyseanlegget vil ha et behov for en stor mengde grus.

LCA utført av Mori et al. (2014) ble brukt som kilde for å finne LCI-data for brenselcellene, KOH-verdi for elektrolyse og hydrogentank. Dette studiet er fra 2013 og baseres på data fra softwaren GaBi, on-site målinger, prosjektdokumentasjon, informasjon fra produsenter og litteratur. Dette studiet regnes som gyldig og sikkert.

Nesten all dataen vi behøvde til elektrolysen kom fra NEEDS (2008). I tillegg ble studiet til Mori et al. (2014) brukt som kilde for KOH for noen komponenter. I Mori et al. (2014) finnes det også et inventar for elektrolyse. Dette er dog ikke like detaljert som i NEEDS (2008). Grunnen til at denne elektrolysedataen ikke ble valgt som LCI input er en overdimensjonering av elektrolysecellen. Mori et al. (2014) ser på alternativer som kan bidra med jevn strøm av elektrisitet når fornybare energikilder som vind og sol, ikke bidrar med tilstrekkelig produksjon. Elektrolysen har derfor en større kapasitet enn brenselcellene, sånn at det kan produseres hydrogen i perioder med høy produksjon av fornybar elektrisitet. Denne overdimensjoneringen var ikke relevant for vår oppgave, og dermed valgte vi å bruke inventaret fra NEEDS (2008).

I oppgaven er det estimert transport av blant annet brenselceller, komprimert hydrogen og diesel. Vi går ut i fra at produksjonen av hydrogen vil være hos Norsk Hydro på Karmøy. Dette ser vi på som et realistisk alternativ da anlegget er nærliggende og de har mulighet til å produsere hydrogen fra alkalisk elektrolyse. Brenselcellene antar vi blir produsert i Connecticut i USA og dette vil påvirke kraftmiksen i forhold til en produksjon i Europa. I dieselferjen antar vi at dieselen blir produsert på Mongstad. Utslippene fra transporten vil endre seg dersom Fjord1 velger å produsere brenselcellene eller drivstoffet andre steder. Avstandene er estimert etter veibeskrivelse fra Google Maps og vil derfor kunne ha et avvik, selv om transport ikke står for de store utslippene i resultatene. Et annet avvik i utslippene er at hydrogen og diesel ikke har bunkringsanlegg på kaien til mellomlagring og påfylling av diesel. Denne tanken ville hatt en påvirkning under produksjon.

LCI for diesel er forenklet. Dataen i denne LCI er hentet fra ecoinvent 3 og basert på «*Diesel, burned in diesel-electric generating set*». Datasettet er laget for 10 MW strømaggregat, men den er nedskalert til en marin motor på til sammen 1492 kW. Datasettet bestod av produksjon av motor og generator, forbrenning av dieselen i motoren og raffinering med nødvendig infrastruktur for å få diesel til forbruker via en bensinstasjon. Raffineringen med infrastruktur valgte vi å fjerne til fordel for en raffinering med europeisk produksjon og

transport fra raffineriet til ferjen. Grunnen til at dette ble gjort er at vi går ut i fra at dieselen blir fraktet direkte til ferjen etter raffinering og det blir derfor overflødig å inkludere bensinstasjoner. Den mest relevante raffineringen vi fant var med europeisk produksjon, selv om vi tok utgangspunkt i et norsk raffineri for å finne avstand i transport.

Raffineriteknologien og råoljen kan ha en forskjell mellom Norge og Europa. Transporten går som nevnt fra det norske raffineriet *Statoil Refining Norway AS* ved Mongstad.

Det var ikke ønskelig å bruke en forenklet LCI for diesel. Forenklet vil i denne sammenheng si at dataen for diesel er hentet fra et datasett og endret i liten grad. Vi gikk for denne datapakken etter vi fikk bekreftet at diesel hadde like resultat i GWP, sammenlignet med andre studier.

Batteridataen er kalkulert fra den elektriske ferjen MF Ampere. MF Ampere ble bygget i 2014 og det er fortsatt en av veldig få helelektriske ferjer. Det er mange studier som baserer seg på denne ferjen og det finnes derfor mye data om den. Dette gjør MF Ampere til et godt grunnlag for vår kalkulering av batteri. Denne datakilden regnes som sikker.

Dataen vi har brukt er hentet fra Ecoinvent versjon 3.3 og Agri-Footprint gjennom SimaPro. Ecoinvent 3.3 bidrar med nesten all dataen utenom «*Energy, from diesel burned in machinery*», som er en proxy hentet fra Agri-Footprint. I tillegg er noe av dataen hentet fra Ecoinvent 2.2, som Ecoinvent 3.3 bygger på.

I datasettet tok vi utgangspunkt i allokering ved substitusjon (APOS). I APOS utvider en systemgrensene i produktsystemer, for å unngå allokering innenfor behandlingssystem (*treatment systems*). Det kan være vanskelig å finne riktige allokeringfaktorer for individuelle trinn, som for eksempel inntekten som stammer fra innsamling og levering av avfall. APOS gjør at man unngår allokering i behandlingssystemene. I stedet allokeres de verdifulle bi-produktene fra behandlingssystemene sammen med aktiviteten. Et produktsystem kan inneholde mange datasett for bi-produktene. APOS slår sammen disse til et datasett. Dette reduserer kompleksiteten og gir den gjennomsnittlige verdien fra bi-produktene.

Det var ikke med hensikt å bruke to databaser, men det ble gjort da vi ikke fant noen gode data for «*Energy, from diesel burned in machinery*» i Ecoinvent. For vår studie hvor vi bruker Ecoinvent 3 kan det være uheldig at Agri-Footprint har en tilnærming mot landbruk, noe

som kan påvirke vektleggingen i kalkuleringen. Denne dataen er en proxy og derfor tilnærmet til den dataen som trengtes. I tillegg har den en minimal påvirkning på miljøet og vi føler oss derfor trygge på at denne dataen er sikker å bruke.

## 6.4 Hydrogen sin rolle i norsk ferjesektor

**Forskningsspørsmål 3:** Hvor stort er potensialet til hydrogen i norsk ferjesektor med hensyn til globalt oppvarmingspotensial og kumulativt energibehov?

Vi utgangspunkt i virkningsgradene til maskineriet fra dette studiet, samt driftsprofilen til ferjesambandet Hjelmeland-Nesvik og skalerer det opp til komplett ferjetrafikk i Norge.

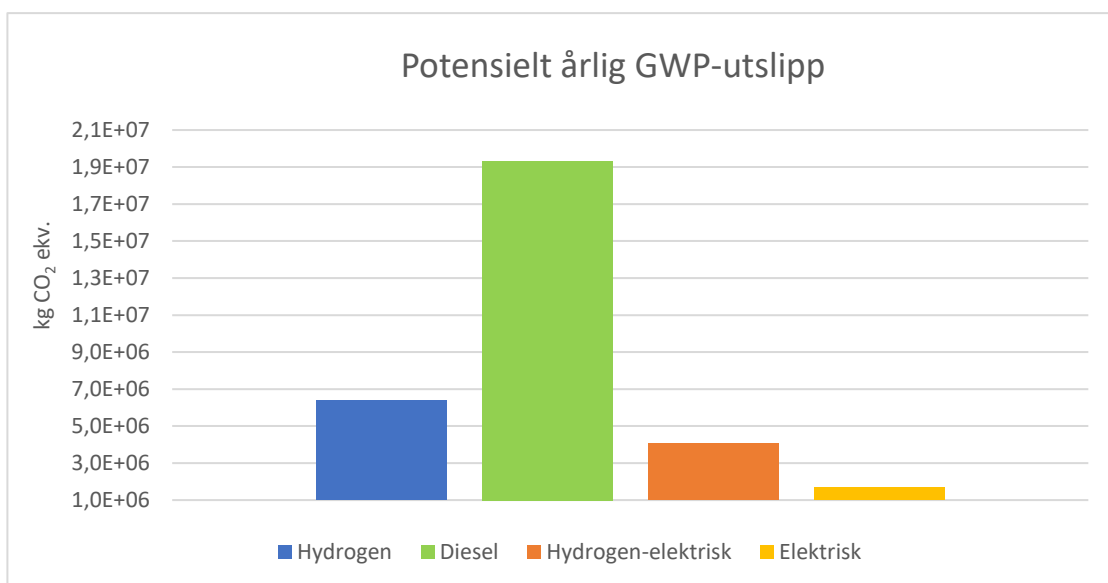
På et år forbrenner ferjesektoren i Norge 19 000 000 liter marin olje (Klausen, 2017). Dette forbruket gjelder bare ferjer og ikke hurtigbåter. Tettheten til MDO er 880 gram per liter (Steaua Romana Refinery, 2006). Ved å ta utgangspunkt i driftsprofil og motordata i dette studiet trenger ferjen 21 725,83 gram for å levere 83,72 kWt elektrisitet til propell. Vi antar lignende virkningsgrader og driftsprofiler for resten av den norske ferjesektoren for å kunne regne ut at ferjesektoren har et årlig behov på 64,4 GWt. Dette betyr at ferjesektoren årlig har et forbruk på 64,4 GWt levert til propell. Tabell 27 viser vi GWP-100 utslipp per kWt og multipliserer dette med det årlige behovet for energi levert til propell. Da får vi hvor stor den årlige påvirkning er på GWP.

Tabell 27 Viser årlig GWP-100 fra de forskjellige ferjene målt i kg CO<sub>2</sub> ekv.

	GWP-100 fra 1 kWt	Behov i kWt per år	Årlig utslipp
Diesel	3,00E-01	6,44E+07	1,93E+07
Hydrogen-elektrisk	6,30E-02	6,44E+07	4,06E+06
Hydrogen	9,90E-02	6,44E+07	6,38E+06
Elektrisk	2,60E-02	6,44E+07	1,68E+06



Ved å legge over til rene hydrogenferjer vil det føre til en nedgang i GWP-utslipp på 67 %, i forhold til dagens dieselforbruk fra dieselferjer i Norge. Dette er en besparelse på cirka 13 000 tonn CO<sub>2</sub> ekv. Ved å kombinere både hydrogen- og elektrisk maskineri i ferjen, vil det være en besparelse på 15 000 tonn CO<sub>2</sub> ekv. Diagrammet viser forskjellen i årlig utslipp fra ferjesektoren ved å legge hele sektoren om til enten dieselferjer, hydrogen-elektriske ferjer, hydrogenferjer eller elektriske ferjer (Figur 33).



Figur 33 Viser potensielt årlig globalt oppvarmingspotensial av ulike ferjer

For å regne ut CED fulgte vi tilsvarende framgangsmåte, som ble gjort for å finne GWP-100. Ved å se på kumulativt energibehov er det tydelig at ved å legge om alle ferjene til hydrogen vil det skape et større energibehov. Under viser forskjellene i årlig energibehov mellom ferjene (Tabell 28).

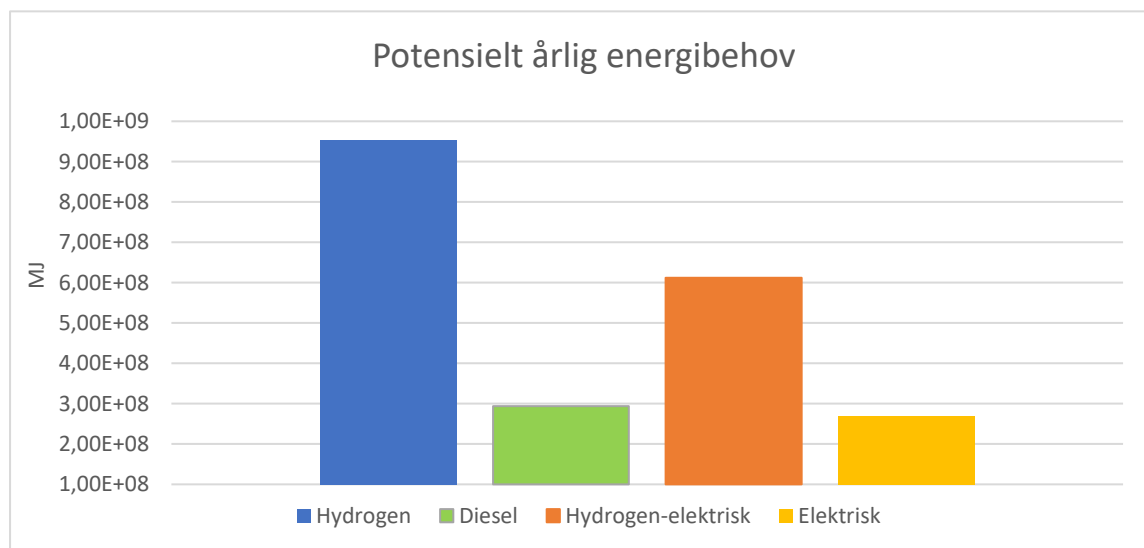
Tabell 28 Tabellen viser årlig kumulativt energibehov fra de forskjellige ferjene målt MJ

	CED for 1 kWt	Behov i kWt per år	Årlig behov
Hydrogen	1,48E+01	6,44E+07	9,54E+08
Diesel	4,56E+00	6,44E+07	2,94E+08
Hydrogen-elektrisk	9,50E+00	6,44E+07	6,12E+08
Elektrisk	4,19E+00	6,44E+07	2,70E+08

Hydrogenferje har cirka 660 terajoule (TJ) høyere energibehov enn energien fra dagens dieselferjer. Dette betyr at diesel har 69 % mindre energibehov enn hydrogen. Denne

forskjellen blir mindre ved å kombinere hydrogen og elektrisitet. Den hydrogenelektriske ferjen har cirka 318 TJ høyere energibehov enn dieselferja, men er til gjengjeld 342 TJ lavere enn hydrogenferjen. Det er viktig å huske på at selv om diesel har lavere energibehov enn hydrogen, så kommer utslippene fra fossil energi. Dette gir en mye høyere miljøpåvirkning enn ved å bruke energien fra hydrogen som kommer fra vannkraft. De ulike energikildene som blir brukt for diesel og hydrogen, samt deres påvirkning, er vist i kapittel 5.3.

Diagrammet viser forskjellen i årlig energibehov fra ferjesektoren ved å legge hele sektoren om til enten hydrogen-elektriske ferjer, dieselferjer, hydrogenferjer eller elektriske ferjer (Figur 34).



Figur 34 Viser potensielt årlig energibehov av ulike ferjer

Etter resultatene kan det virke som om at ferjesektoren burde satse på helelektrisk foran hydrogen med tanke på utslipp og energibehov. Det er derfor viktig å skille mellom egenskapene til de ulike energikildene, som eksempelvis rekkevidde, effektivitet og infrastruktur.

For at en elektrisk ferje skal være hensiktsmessig må kryssingen være under 30 min eller 200 kWt (Adolfson & Breivik, 2015). Dette betyr dermed at elektrisitet vil være et godt alternativ på korte strekninger, mens på strekninger over 30 min eller 200 kWt vil hydrogen være et bedre alternativ enn diesel. Hydrogen kan fylles på like ofte som diesel. Dette kombinert med hydrogens lave vekt gjør at det er en energibærer som egner seg på lengre strekninger.

Som resultatene viser kan hydrogenferjer alene føre til reduksjon i globalt oppvarmingsbehov, men ved å kombinere hydrogen og elektrisitet kan det redusere påvirkningen i enda større grad. Dette har vært en svært enkel utregning av potensialet til hydrogen i norsk ferjesektor med bruk av grove tall, men det gir et bilde av at hydrogen har potensiale og spesielt med tanke på redusering av GWP.

## 6.5 Kritisk gjennomgang

Vi har en sammenligningsstudie. Dette betyr at resultatene er ment å brukes til å sammenligne hydrogen-elektrisk ferje og dieselferje. Resultatet skal også trekke fram de største utslippspostene, fordelene og ulempene mellom framdriftsmaskineriene. Omfanget til oppgaven viste seg å være veldig omfattende og tidkrevende. Gjennom prosessen måtte vi gjøre flere endringer (iterativ prosess), for å få et mest mulig realistisk resultat. Vi møtte også på andre utfordringer, som for eksempel lite tilgang på god data. Disse prosessene tok tid og fikk vi en tydelig forståelse av hvor omfattende en LCA er.

I vårt forsøk på å redusere omfanget har vi satt inn flere systemgrenser. En av systemgrensene er som tidligere nevnt at studiet bare analyserer de komponentene som forandrer seg (*Ceteris Paribus*). Det førte til at vi ikke inkluderte skroget og inventaret i båten, men bare de komponentene i maskineriet som var ulike. Dette er nærmere beskrevet i kapittelet om omfang (3.2). En annen ulempe med studiet var at det ble begrenset med tid under innsamlingen av LCI for diesel og dermed ble ikke denne LCI like detaljert som LCI for hydrogen-elektrisk ferje.

Ved å sette inn systemgrenser har analysens nøyaktighet blitt redusert. Det er viktig å få fram at studiet ikke sier noe om totalutslippet av de ulike ferjene, men sier noe om maskineriene satt opp mot hverandre. Selv om det var et bevisst valg å sette de felles komponentene utenfor systemgrensene er det viktig å presisere at de ulike komponentene som er valgt bort, ville ha bidratt med utslipp til analysen og at det derfor vil være en feilmargin fra det totale utslippet av hele ferjen.

Noe av grunnen til at studiet fikk en del antagelser var fordi Fjord1 var i en tidlig fase av hydrogenprosjektet sitt. For dette studiet hadde det betydning i den grad at Fjord1 ikke hadde bestemt seg for teknologi eller produsent for komponentene i ferjen og vi måtte

derfor måtte finne andre alternativer som var så realistisk som mulig. Det ble derfor foretatt flere antagelser enn det nødvendigvis ville blitt dersom Fjord1 hadde kommet lengre i prosessen.

Deler av analysen handler om relativ ny og lite brukt teknologi innen maritim sektor. I vårt arbeid med LCI var det derfor flere ganger problematisk å finne tilstrekkelig med data. Vi måtte derfor bruke data fra NEEDS (2008), som er basert på studier fra 2003. Datasettet i NEEDS (2008) er nærmere diskutert i kapittel 6.3.

Selv om vår studie sammenligner hydrogenferjer og elektriske ferjer er det viktig å huske på hydrogen og elektrisitet ikke bør konkurrere mot hverandre på grunn av deres forskjellige egenskaper og fordeler, som forklart i kapittel 6.4. Som nevnt tidligere i teksten kan helelektrisk ferje egne seg på ferjesamband under 30 min eller 200 kWt. Dette betyr at strekningen i vår oppgave med forbruk på 83 kWt per kryssing også ville fungert som et helelektrisk alternativ.

Med hensyn til ulike egenskaper og rekkevidder mellom helelektriske ferjer og hydrogenferjer, som tidligere nevnt, burde framtidig forskning og teknologiutvikling på hydrogenferjer fokusere på de strekningene hvor helelektrisk ferjedrift ikke er aktuelt.

## 7 Konklusjon

I dette sammenligningsstudiet har vi utført en livsløpsanalyse mellom maskineriet hos en hydrogen-elektrisk ferje og en dieselferje. Studiet har hatt som hensikt å se på påvirkningene knyttet til GWP og CED for de to ferjene og da spesielt den hydrogen-elektriske ferjen. Vi har tre forskningsspørsmål vi har besvart i dette studiet.

Det første forskningsspørsmålet er «Hvor stor påvirkning vil en hydrogen-elektrisk ferje ha på globalt oppvarmingspotensial og kumulativt energibehov, sammenlignet med en dieselferje?». Resultatene på utslipp av GWP viser at hydrogen-elektrisk ferje kommer bedre ut enn diesel, men til gjengjeld har diesel mindre energibehov enn hydrogen-elektrisk ferje. Av den hydrogen- elektriske ferjen, dieselferjen, hydrogenferjen og elektriske ferjen er det dieselferjen som har høyest GWP av alle ferjene og det er hydrogenferjen som har høyest CED. Den elektriske ferjen kommer ut med både lavest GWP og CED. Selv om energibehovet hos hydrogen er høyt, er viktig å huske på at 99 % av energien til diesel stammer fra fossil energi, mens 89 % av energien til hydrogen-elektrisk stammer fra vannkraft.

Det andre forskningsspørsmålet er «Hvordan vil utslippet endre seg ved å gjøre den hydrogen-elektriske ferjedriften om til helelektrisk eller helhydrogen?». I sensitivitetsanalysen viser resultatene at helelektrisk ferje har laveste energibehov og globalt oppvarmingspotensial, sammenlignet med helhydrogenferje og hydrogen-elektrisk ferje. Helhydrogenferjen kom dårligst ut av disse alternativene. Dette skyldes i stor grad at komponentene i hydrogensystemet har lavere virkningsgrader enn det helelektriske systemet. Dette gjør at hydrogensystemet må tilføre mer elektrisitet enn det helelektriske systemet med sine høye virkningsgrader for samme funksjonsenhet.

Det tredje og siste forskningsspørsmålet er «Hvor stort er potensiale til hydrogen i norsk ferjesektor med hensyn til globalt oppvarmingspotensial og kumulativt energibruk?». Ferjesektoren står årlig for 19 000 000 liter MDO. Ved å gå over til hydrogenferjer vil det føre til en stor besparelse i GWP i forhold til dagens situasjon. En kan også kombinere hydrogen og elektrisk maskineri, som ble analysert i dette studiet. Dette vil føre til en enda større besparelse. Hydrogendrift er svært energikrevende og dieselferjen kommer bedre ut i

forhold til hydrogenferjen i CED. Ved å kombinere hydrogen og elektrisitet vil det føre til en reduksjon av energibehovet i forhold til hydrogenferjen, men vil fortsatt være høyere enn dieselferje. Selv om diesel har lavere energibehov enn hydrogen, så er det viktig å huske på at energien fra dieselferjen er fra fossil energi, som nevnt tidligere i konklusjonen. Hydrogenferje og elektrisk ferje bør ikke sammenlignes hver for seg da de har ulike egenskaper, men som resultatene viser kan en kombinasjon av disse føre til store reduksjoner i GWP.

## 8 Kilder

- Adolfson, K., & Breivik, S. (2015, 19. januar). World's first battery-driven car ferry. Retrieved from <https://issuu.com/skipsrevyen/docs/soty2014>
- Ahlvik, P., & Brandberg, Å. (2001). Systemeffektivitet for alternative drivmedel. *Olika drivmedel och drivsystem/motorer i ett livscykelperspektiv. Ecotrafic R&D AB. Vägverkets publikationsnr*, 39.
- Alkaner, S., & Zhou, P. (2005). A comparative study on life cycle analysis of molten carbon fuel cells and diesel engines for marine application. *Journal of power sources*, 158(1),
- Arvidsson, R., & Svanström, M. (2015). A framework for energy use indicators and their reporting in life cycle assessment. *Integrated environmental assessment and management*, 12(3),
- Assessment, L. C. (1998). A guide to approaches, experiences and information sources. *European Environmental Agency, Copenhagen*.
- Berger, M. (2016). To av tre ferger blir drevet av strøm innen 2030. Retrieved from <https://vegnett.no/2016/10/dette-kakestykket-er-en-skikkelig-miljo-godbit/>
- Bergsdal, H. (u.d.). Simapro. Retrieved from <https://www.asplanviak.no/simapro/>
- Brilhuis-Meijer, E. (2014, 24. mars). Consider Your Audience When Doing Impact Assessment. Retrieved from <https://www.pre-sustainability.com/news/consider-your-audience-when-doing-lca>
- Carnegie Mellon University. (2016). Economic Input-Output Life Cycle Assessment. Retrieved from <http://www.eiolca.net/Method/eio-lca-method.html>
- Corporation, S. A. I. (2006, mai). A Brief History of Life-Cycle Assessment. Retrieved from <https://www.e-education.psu.edu/egee401/sites/www.e-education.psu.edu/egee401/files/A%20Brief%20History%20of%20Life-Cycle%20Assessment.pdf>
- Corvus Energy. (2017). Ampere, Ferry. Retrieved from <http://corvusenergy.com/marine-project/mf-ampere-ferry/>
- Curran, M. A. (2015). *Life Cycle Assessment Student Handbook* (1 ed.). New Jersey og Massachusetts: John Wiley & sons og Scrivener Publishing LLC.
- DNV GL. (2015a). *In focus - the future is hybrid*. Retrieved from
- DNV GL. (2015b). *Vurdering av tiltak og virkemidler for mer miljøvennlige drivstoff i skipsfartsnæringen* (2015-0086, Rev. 0). Retrieved from [https://www.regjeringen.no/contentassets/cffd547b30564dd9a2ae616042c22f26/vurdering\\_av\\_tiltak\\_og\\_virkemidler\\_for\\_mer\\_miljovennlige\\_drivstoff\\_i\\_skipfartnaringen.pdf](https://www.regjeringen.no/contentassets/cffd547b30564dd9a2ae616042c22f26/vurdering_av_tiltak_og_virkemidler_for_mer_miljovennlige_drivstoff_i_skipfartnaringen.pdf)
- DNV GL. (2016a). Prognoser for skipstrafikken mot 2040. Retrieved from [http://www.kystverket.no/globalassets/nyheter/2015/november/prognoser\\_for-skipstrafikken-2040.pdf](http://www.kystverket.no/globalassets/nyheter/2015/november/prognoser_for-skipstrafikken-2040.pdf)
- DNV GL. (2016b). *Reduksjon av klimagassutslipp fra norsk innenriks skipsfart* (2016-0150, Rev. 0). Retrieved from
- DNV GL. (2015). *In focus - the future is hybrid*. Retrieved from
- Durlinger, B., Koukouna, E., Broekema, R., van Paassen, M., & Scholten, J. (2017). Agri-footprint 3.0. In. Gouda: Agri-Footprint.
- EERE. (u.d.). Safe Use of Hydrogen. Retrieved from <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/safe-use-hydrogen>
- EIA. (2018, 7. mars). What is U.S. electricity generation by energy source? Retrieved from <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=427&t=3>
- Einberger, T. (2017). Comparative LCA of drive train systems for car and passenger ferries to determine environmental impacts.

- Fedoryshyn, N. (2017a, 9. august). Bruk av biodrivstoff i transport. Retrieved from <https://www.ssb.no/natur-og-miljo/artikler-og-publikasjoner/bruk-av-biodrivstoff-i-transport>
- Fedoryshyn, N. (2017b, 14. august). Klimagassutslipp fra samferdsel. Retrieved from <https://www.ssb.no/natur-og-miljo/artikler-og-publikasjoner/klimagassutslipp-fra-samferdsel>
- Fjord1. (2017, 14. juli). Fjord1 årsrapport 2016. Retrieved from [https://issuu.com/e.natvikprenteverkas/docs/fjord1\\_a\\_rsmelding\\_2016](https://issuu.com/e.natvikprenteverkas/docs/fjord1_a_rsmelding_2016)
- Fornybar. (2016a, mai, 2016). Hydrogen. Retrieved from <http://www.fornybar.no/andre-teknologier/hydrogen>
- Fornybar. (2016b, mai, 2016). Lagring. Retrieved from <http://www.fornybar.no/andre-teknologier/hydrogen/lagring>
- Fornybar. (2016c, 2016, mai). Produksjon. Retrieved from <http://www.fornybar.no/andre-teknologier/hydrogen/produksjon>
- Goedkoop, M., De Schryver, A., Oele, M., Durksz, S., & de Roest, D. (2012). Introduction to LCA with SimaPro 7. *PRé Consultants, The Netherlands*.
- Google Maps. (2018a). Kartdata for Hjelmeland-Nesvik. Retrieved from <https://www.google.com/maps/dir/59.2341334,6.1654389/59.2616861,6.1591548/@59.2495755,6.1164959,13z/am=t/data=!4m2!4m1!3e0>
- Google Maps. (2018b). Kartdata for Karmøy-Nesvik. Retrieved from <https://www.google.no/maps/dir/Karm%C3%B8y/Nesvik/@59.238395,5.6287653,9z/am=t/data=!4m14!4m13!1m5!1m1!1s0x463b0f2b894fc315:0xa1d491c4185cb1c2!2m2!1d5.3071112!2d59.2801018!1m5!1m1!1s0x463bdc3ca541bb8b:0xf27fab2f943c462e!2m2!1d6.160849!2d59.262552!3e0>
- Google Maps. (2018c). Kartdata for Mongstad-Nesvik. Retrieved from <https://www.google.com/maps/dir/60.7981357,5.0118481/59.2629866,6.1700854/@60.2489985,4.0136421,6.92z/am=t/data=!4m3!4m2!3e0!5i1>
- Guddingsmo, Å., Fløttre H., N., NKI forlaget, & Bøhle, K. (2009, 03. mars 2017). Tre metoder for framstilling av hydrogen. Retrieved from <https://ndla.no/nb/node/4830?fag=7>
- Haarstad, H., & Rusten, G. (2018). *Grønn omstilling : norske veivalg*. Oslo: Universitetsforl.
- Heijungs, R., & Suh, S. (2013). *The computational structure of life cycle assessment* (Vol. 11): Springer Science & Business Media.
- Henriksen, G. (2018, 12. april). Biodrivstoff-krav meir enn innfridd. Retrieved from <https://www.ssb.no/energi-og-industri/artikler-og-publikasjoner/biodrivstoff-krav-meir-enn-innfridd>
- Himle, Å. (2014, 28. april). Oppgradert hydrogenstasjon på Herøya klar for å ta imot nye kunder. Retrieved from <https://www.heroya-industripark.no/aktuelt/Oppgradert-hydrogenstasjon-paa-Heroeya-klar-for-aa-ta-imot-nye-kunder>
- Holtebekk, T., & Pedersen, B. (2018, 16. mai). Brenselcelle. Retrieved from <https://snl.no/brenselcelle>
- Hubert, K. L. (2015). *Economic and technical assessment of hydrogen and fuel cells opportunities in the Norwegian transport sector*. NTNU,
- HyBalance. (u.d.). PEM electrolysis. Retrieved from <http://hybalance.eu/hybalance/short-presentation/about-pem-electrolysis/>
- IPCC. (2014). *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC.
- ISO, E. (2006). Environmental Management–Life Cycle Assessment–Principles and Framework (ISO 14040: 2006).
- Klausen, B. (2017). *Null- og lavutslippsteknologi for ferjer og hurtigbåter i Nordland.*: Nordland Fylkeskommune Retrieved from



- <https://www.regjeringen.no/contentassets/6008bc052fdb4f57b77b76dce9dd71b5/nordland-fylkeskommune---soknad.pdf>
- Klima- og miljødepartementet. (2017). *Klimastrategi for 2030 - norsk omstilling i europeisk samarbeid*. (Meld. St. 41). Oslo: Klima- og miljødepartementet
- Kullmann, A. B. (2016). *A Comparative Life Cycle Assessment of Conventional and All-Electric Car Ferries*. NTNU,
- Lundby, L., & Æsøy, V. (2014). Produksjon av mekanisk og elektrisk energi til havs. In *Havromsteknologi*: NTNU Institutt for Marin teknikk.
- Mailänder, E. (2003). *Life cycle analysis of hydrogen infrastructure for fuel cell driven buses in the public transport of Reykjavik*. Retrieved from Univeristetet i Stuttgart:
- Maritime Battery Forum. (2016). *Life cycle assessment of batteries in maritime sector*.
- Marquard & Bahls AG. (2015). Marine Diesel Oil (MDO) & Intermediate Fuel Oil (IFO). Retrieved from <https://www.marquard-bahls.com/en/news-info/glossary/detail/term/marine-diesel-oil-mdo.html>
- Miljødirektoratet. (2017, 21. desember). Klimagasser. Retrieved from <http://www.miljostatus.no/Tema/Klima/Klimagasser/>
- Mori, M., Jensterle, M., Mržljak, T., & Drobnič, B. (2014). Life-cycle assessment of a hydrogen-based uninterruptible power supply system using renewable energy. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(11),
- NASA. (2018, april 2018). Carbon Dioxide. Retrieved from <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>
- NEEDS. (2008). Generation, of the energy carrier HYDROGEN-In context with electricity buffering generation through fuel cells. *Publicerad inom New Energy Externalities Developments for Sustainability (NEEDS)*.
- Netinform. (u.d.-a). Frauscher 600 Riviera HP (2009). Retrieved from <https://www.netinform.net/h2/H2Mobility/Detail.aspx?ID=410>
- Netinform. (u.d.-b). HYDRA (2000). Retrieved from <https://www.netinform.net/h2/H2Mobility/Detail.aspx?ID=371>
- Norled. (2018). Rutetabell Hjelmeland-Nesvik-Skipavik 2018-2019. In.
- Olerud, K. (2018). Klimakonvensjonen. Retrieved from <https://snl.no/Klimakonvensjonen>
- PRé. (2018). SimaPro Database Manual. Retrieved from <https://www.pre-sustainability.com/download/manuals/DatabaseManualMethods.pdf>
- PRé. (2018). SimaPro Database Manual Methods Library. 4.1,
- Ross, S., Evans, D., & Webber, M. (2003). Using LCA to examine greenhouse gas abatement policy. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(1), doi:http://dx.doi.org/10.1065/lca2002.11.100
- Samferdselsdepartementet. (2017a, 13. august). Anbudsutlysning av første hydrogen-elektriske ferje på riksveinettet. Retrieved from <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/anbudsutlysning-av-forste-hydrogen-elektriske-ferje-pa-riksveinettet2/id2564613/>
- Samferdselsdepartementet. (2017b). *Nasjonal transportplan 2018–2029*. (Meld. St. 33 (2016-2017)). Oslo: Samferdselsdepartementet
- Sarsten, A., & Fiskaa, G. O. (2009, 14. februar). Forbrenningsmotor. Retrieved from <https://snl.no/forbrenningsmotor>
- Schmidt, J., & Watson, J. (2013). Eco island ferry: comparative LCA of island ferry with carbon fibre composite based and steel based structures.
- SimaPro. (2018). ecoinvent LCI database. Retrieved from <https://simapro.com/databases/ecoinvent/>
- Simonsen, M. (2010) Hydrogen. Retrieved from <http://sip1.vestforsk.no/pdf/Felles/Hydrogen.pdf>
- Statens Vegvesen. (2017a). Konkurransgrunnlag. In *Drift av riksvegferjesambandet Hjelmeland – Skipavik – Nesvik* (17/22364 ed.).

- Statens Vegvesen. (2017b). Sambandsregister. Retrieved from <http://fdb.triona.no/maintainConnections.xhtml>
- Statens Vegvesen. (2017c, 08. februar). Vil utvikle første hydrogen-elektriske ferje. Retrieved from <https://www.vegvesen.no/Riksveg/rv13hydrogenelektriskferje/nyhetsarkiv/vil-utvikle-f%C3%B8rste-hydrogen-elektriske-ferje> )
- Steaua Romana Refinery. (2006). MARINE FUEL OIL type DMB. Retrieved from [http://www.omnimpex.ro/texte/petroliere/engleza\\_07/MARINE%20%20DIESEL%20OIL%20\(MDO\).pdf](http://www.omnimpex.ro/texte/petroliere/engleza_07/MARINE%20%20DIESEL%20OIL%20(MDO).pdf)
- Stensvold, T. (2015, 20. mars). Denne fergen er revolusjonerende. Men passasjerene merker det knapt. Retrieved from <https://www.tu.no/artikler/denne-fergen-er-revolusjonerende-men-passasjerene-merker-det-knapt/222522>
- Stensvold, T. (2017, 12. desember). Denne båten kan bli en «game changer». Retrieved from <https://www.tu.no/artikler/denne-baten-kan-bli-en-game-changer/414047>
- Stolten, D., & Emonts, B. (2016). *Hydrogen Science and Engineering: Materials, Processes, Systems and Technology, 2 Volume Set* (Vol. 1): John Wiley & Sons.
- Strazza, C., Del Borghi, A., Costamagna, P., Traverso, A., & Santin, M. (2009). Comparative LCA of methanol-fuelled SOFCs as auxiliary power systems on-board ships. *Applied Energy*, 87(5),
- United States Environmental Protection Agency. (2017). Understanding Global Warming Potentials. <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>
- VINCI Energies. (u.d.). Renewable Energies and a Hydrogen Fuel Cell to Power a Ferry. Retrieved from <http://www.vinci-energies.com/en/our-news/newscenter/renewable-energies-and-a-hydrogen-fuel-cell-to-power-a-ferry/>
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9)
- Wikipedia. (2017, 6.november). MF Ampere. Retrieved from [https://no.wikipedia.org/wiki/MF\\_%C2%ABAmpere%C2%BB](https://no.wikipedia.org/wiki/MF_%C2%ABAmpere%C2%BB)
- Wikipedia. (2018a, 8. mars). Diesel. Retrieved from <https://no.wikipedia.org/wiki/Diesel>
- Wikipedia. (2018b, 19. april). Proton-exchange membrane fuel cell. Retrieved from [https://en.wikipedia.org/wiki/Proton-exchange\\_membrane\\_fuel\\_cell](https://en.wikipedia.org/wiki/Proton-exchange_membrane_fuel_cell)
- Wolf, M.-A., Chomkham Sri, K., Brandao, M., Pant, R., Ardente, F., Pennington, D. W., . . . Goralczyk, M. (2010). ILCD Handbook-General Guide for Life Cycle Assessment-Detailed Guidance.
- Øberg, M. M. (2013). *Life Cycle Assessment of Fuel Choices for Marine Vessels*. NTNU,

#### Personlig kommunikasjon:

Steinar Frøyen Kostøl, kommunikasjon over mail, april-mai 2018

Kaptein ved MF Vannes, kommunikasjon over telefon, 3. mai 2018

## 9 Vedlegg

Videre utover i tabellene vil LCI data være kommentert med forkortninger som beskriver hvilket geografisk område de er basert på. Forkortingene og forklaringene på disse er:

1. RER: Data med gjennomsnittsverdi for Europa
2. GLO: Data med gjennomsnittsverdi for hele verden
3. ROW: Data fra resten av verden. Land som ikke har egne representative datasett for deres geografiske område.

De første tabellene kommer fra NEEDS (2008). Disse tabellen er:

- 9.1.1 Elektrolyse
- 9.1.2 Kompressor
- 9.1.3 Lagring
- 9.1.4 Vegger og fundament
- 9.1.5 Andre komponenter
- 9.1.6 Drift

Tabellene videre kommer fra Mori et al. (2014). Disse tabellene er:

- 9.1.7 Brenselcelle
- 9.1.8 Lagring

## 9.1.1 Elektrolyse

Tabell 29 Materiale som går inn i elektrolysen sammen med valgt LCI datasett

Materiale	Mengde	Enhet	LCI data
Steel, chromium steel 18/8	5,99E-03	kg	At plant. Navn på dataset er «steel production, converter, chromium steel 18/8 RER» fra databasen ecoinvent 3. Her må det nevnes at dette datasettet fantes allerede i ecoinvent versjon 2, og settet har mulig gjennomgått endringer ved overgangen til ecoinvent versjon 3. Geografisk er dataen modellert for Europa. (Ecoinvent 3 APOS, U). Denne prosessen produserer primær stål. Scrap er kun brukt for å kjøle ned the liquid steel.
Nickel, 99.5%	7,05E-04	kg	At plant. Navn på dataset er «Market for nickel, 99.5% GLO». Dataen er modellert for globalt.
Synthetic rubber	3,53E-05	Kg	At plant. Navn på dataset er «Synthetic rubber GLO». Dataen er modellert for globalt.
Reinforcing steel	1,87E-03	kg	At plant. Navn på dataset er «reinforcing steel production RER». Dataen er modellert for Europa. Det representerer gjennomsnittet for verdens og europeisk produksjonsmiks. Dette antas og samsvare med forbruksmiks i Europa. Datasettet har blitt ekstrapolert fra 2002 til 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter. Innsamlings metode er fra litteratur og statistikk.
Copper	5,40E-04	kg	At regional storage. Navn på datasettet er «Market for copper». Dataen er modellert for globalt. Datasettet har blitt ekstrapolert fra år 2011 til 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter.
Tube insulation, elastomere	2,40E-04	kg	At plant. Navn på datasettet er «Market for tube insulation, elastomere». Dataen er modellert for globalt. Her ble det brukt ekspert vurderinger for å estimere spesifikk transportdistanse for produktet. Datasettet har blitt ekstrapolert fra år 2011 til 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter.
Aluminium, primary, ingot	1,55E-04	kg	At plant. Navn på datasettet er «Market for aluminium, primary, ingot RoW». Dataen er modellert for Rest-of-World.
Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer	5,64E-05	kg	At plant. Hentet fra datasettet «market for acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer GLO. Geografisk er dataen modellert for globalt. Datasettet har blitt ekstrapolert fra år 2011 til 2017. Usikkerhete har blitt justert deretter.
Polyethylene, low density, granulate	1,41E-04	kg	At plant. Hentet fra datasettet «market for polyethylene, low density, granulate GLO». Dataen er modellert for globalt. Dette datasettet har blitt ekstrapolert fra år 2011 til året det ble kalkulert, 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter.
Glassfibre	1,41E-04	kg	At plant. Navn på dataset er «Market for glass fibre GLO». Dataen er modellert for globalt. Dette datasettet har blitt ekstrapolert fra år 2011 til året det ble kalkulert, 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter.
Cast iron	4,80E-05	kg	At plant. Navn på dataset er «Market for cast iron GLO». Dataen er modellert for globalt. Her har det blitt brukt ekspertvurderinger for estimere produktets transportdistanse. Dette datasettet har blitt ekstrapolert fra år 2011 til året det ble kalkulert, 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter.
Nylon 6-6, glass-filled	1,76E-05	kg	At plant. «Market for nylon 6-6 glass-filled GLO».
Transport, freight, lorry >32 metric ton	9,91E-04	tkm	Navn på dataset er «Market for transport, freight, lorry > 32 metric ton, EURO6 GLO». Dataen er modellert for globalt. Dette datasettet har blitt ekstrapolert fra år 2013 til året det ble kalkulert, 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter.

## 9.1.2 Kompressor

Tabell 30 Materiale som går inn i kompressoren sammen med valgt LCI datasett

Materiale	Mengde	Enhet	LCI data
Reinforcing steel	1,75E-03	kg	At plant. Navn på dataset er «reinforcing steel production RER». Dataen er modellert for Europa. Det representerer gjennomsnittet for verdens og europeisk produksjonsmiks. Dette antas og samsvare med forbruksmiksen i Europa. Datasettet har blitt ekstrapolert fra 2002 til 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter. Innsamlings metode er fra litteratur og statistikk.
Steel, chromium steel 18/8	1,34E-04	kg	At plant. Navn på dataset er «steel production, converter, chromium steel 18/8 RER» fra databasen ecoinvent 3. Her må det nevnes at dette datasettet fantes allerede i ecoinvent versjon 2, og settet har mulig gjennomgått endringer ved overgangen til ecoinvent versjon 3. Geografisk er dataen modellert for Europa. (Ecoinvent 3 APOS, U). Denne prosessen produserer primær stål. Scrap er kun brukt for å kjøle ned the liquid steel. Innsamlings metode er basert på literatur.
Cast iron	4,23E-04	kg	At plant. Navn på dataset er «Market for cast iron GLO». Dataen er modellert for globalt. Her har det blitt brukt ekspertvurderinger for estimere produktets transportdistanse. Dette datasettet har blitt ekstrapolert fra år 2011 til året det ble kalkulert, 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter.
Ethylene glycol	4,94E-06	kg	At plant. Navn på datasettet «market for ethylene glycol GLO». Dataen er modellert for globalt. Datasettet har blitt ekstrapolert fra år 2011 til 2017. Usikkerhete har blitt justert deretter.
Lubricating oil	1,27E-05	kg	At plant. Navn på «Market for lubricating oil GLO». Dataen er modellert for globalt. Datasettet har blitt ekstraplert fra år 2011 til 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter.
Aluminium, primary, ingot	4,23E-05	kg	Navn på datasettet er «Market for aluminium, primary, ingot RoW». Dataen er modellert for Rest-of-World.
Tube insulation, elastomere	1,06E-05	kg	Navn på datasettet er «Market for tube insulation, elastomere». Dataen er modellert for globalt. Her ble det brukt ekspert vurderinger for å estimere spesifikk transportdistanse for produktet. Datasettet har blitt ekstrapolert fra år 2011 til 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter.
Copper	3,17E-05	kg	Navn på datasttet er «Market for copper». Datan er modellert for globalt. Datasettet har blitt ekstrapolert fra år 2011 til 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter.
Electricity, high voltage	7,05E-04	kWt	Modellert for Norge
Heat, district or industrial, natural gas	2,54E-03	MJ	Navn på datasettet er «Heat production, natural gas, at industrial furnace > 100 kW Europe without Switzerland». NOx- og CO utslipp er derived fra malinger under kontrollerte forhold. Datasettet har blitt ekstrapolert fra år 2000 til 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter. Innsamlings metode er litteratur og fabrikkasjon.
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6	3,62E-04	tkm	Navn på dataset er «Market for transport, freight, lorry > 32 metric ton, EURO6». Dataen er modellert for globalt. Dette datasettet har blitt ekstrapolert fra år 2013 til året det ble kalkulert, 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter.

### 9.1.3 Lagring

Tabell 31 Materiale som går inn i lagrings modulen sammen med valgt LCI datasett

Material	Mengde	Enhet	LCI data
Steel, chromium steel 18/8	5,93E-02	kg	At plant. Navn på dataset er «steel production, converter, chromium steel 18/8 RER» fra databasen ecoinvent 3. Her må det nevnes at dette datasettet fantes allerede i ecoinvent versjon 2, og settet har mulig gjennomgått endringer ved overgangen til ecoinvent versjon 3. Geografisk er dataen modellert for Europa. (Ecoinvent 3 APOS, U). Denne prosessen produserer primær stål. Scrap er kun brukt for å kjøle ned the liquid steel. Innsamlings metode er basert på litteratur.
Electricity, high voltage	6,77E-04	kWt	Modellert for Norge
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6	5,93E-03	tkm	Navn på dataset er «Market for transport, freight, lorry > 32 metric ton, EURO6». Dataen er modellert for globalt. Dette datasettet har blitt ekstrapolert fra år 2013 til året det ble kalkulert, 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter.
Energy, from diesel burned in machinery/RER Energy	6,04E-04	MJ	Navn på datasettet er «Heat production, natural gas, at industrial furnace > 100 kW Europe without Switzerland». NOx- og CO utslipp er derived fra malinger under kontrollerte forhold. Datasettet har blitt ekstrapolert fra år 2000 til 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter. Innsamlings metode er litteratur og fabrikkasjon.

## 9.1.4 Vegger og fundament

Tabell 32 Materiale som går inn i vegger og fundament sammen med valgt LCI datasett

Materiale	Mengde	Enhet	LCI data
Reinforcing steel	6,35E-03	kg	At plant. Navn på dataset er «reinforcing steel production RER». Dataen er modellert for Europa. Det representerer gjennomsnittet for verdens og europeisk produksjonsmik. Dette antas og samsvare med forbruksmiksen i Europa. Datasettet har blitt ekstrapolert fra 2002 til 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter. Innsamlings metode er fra litteratur og statistikk.
Flat glass, coated	2,29E-03	kg	At plant. Navnet på datasettet er «market for flat glass, coated GLO». Dataen er modellert globalt. Datasettet har blitt ekstrapolert fra 2011 til 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter.
Gypsum fibreboard	7,05E-05	kg	At plant. Navnet på datasettet er «market for gypsum fibreboard GLO». Dataen er modellert globalt. Datasettet har blitt ekstrapolert fra 2011 til 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter.
Silica sand	4,06E-02	kg	At plant. Navnet på datasettet er «market for silica sand GLO». Dataen er modellert globalt. Datasettet har blitt ekstrapolert fra 2011 til 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter.
Concrete, normal	7,05E-06	m <sup>3</sup>	At plant. Navnet på datasettet er «market for concrete, normal RoW». Dataen er modellert Rest-of-World. Det ble gjort ekspert vurderinger av spesifikke transport deistanse i utregningene.
Concrete, high exacting requirements	9,17E-05	m <sup>3</sup>	At plant. Navnet på datasettet er «market for concrete, high exacting requirements RoW». Dataen er modellert Rest-of-World. Det ble gjort ekspert vurderinger av spesifikke transport deistanse i utregningene
Gravel, crushed	1,27E+00	kg	Gruve. Navnet på datasettet er «gravel production, crushed CH». Datasettet er modelert i Sveits. Dette datasettet representerer produksjon av 1 kg «crushed gravle».
Lubricating oil	1,41E-05	kg	At plant. Navn på «Market for lubricating oil GLO». Dataen er modellert for globalt. Datasettet har blitt ekstrapolert fra år 2011 til 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter.
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6	1,56E-01	tkm	Navn på dataset er «Market for transport, freight, lorry > 32 metric ton, EURO6». Dataen er modellert for globalt. Dette datasettet har blitt ekstrapolert fra år 2013 til året det ble kalkulert, 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter.
Electricity, high voltage	3,53E-04	kWt	Modellert for Norge
Energy, from diesel burned in machinery/RER Energy	3,02E-02	MJ	Navn på datasettet er «Heat production, natural gas, at industrial furnace > 100 kW Europe without Switzerland». NOx- og CO utslipp er derived fra malinger under kontrollerte forhold. Datasettet har blitt ekstrapolert fra år 2000 til 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter. Innsamlings metode er litteratur og fabrikkasjon.

## 9.1.5 Andre komponenter

Tabell 33 Materiale som går inn i andre komponenter sammen med valgt LCI datasett

Materiale	Mengde	Enhet	LCI data
Reinforcing steel	1,16E-03	kg	At plant. Navn på dataset er «reinforcing steel production RER». Dataen er modellert for Europa. Det representerer gjennomsnittet for verdens og europeisk produksjonsmiks. Dette antas og samsvare med forbruksmiks i Europa. Datasettet har blitt ekstrapolert fra 2002 til 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter. Innsamlings metode er fra litteratur og statistikk.
Nitrogen, liquid	1,01E-04	kg	At plant. Navn på dataset er «market for nitrogen, liquid RoW». Dataen er modellert Rest-of-World.
Steel, chromium steel 18/8	2,85E-04	kg	At plant. Navn på dataset er «steel production, converter, chromium steel 18/8 RER» fra databasen ecoinvent 3. Her må det nevnes at dette datasettet fantes allerede i ecoinvent versjon 2, og settet har mulig gjennomgått endringer ved overgangen til ecoinvent versjon 3. Geografisk er dataen modellert for Europa. (Ecoinvent 3 APOS, U). Denne prosessen produserer primær stål. Scrap er kun brukt for å kjøle ned the liquid steel. Innsamlings metode er basert på literatur.
Polypropylene, granulate	7,05E-06	kg	At plant. Navn på dataset er «market for polypropylene, granulate GLO». Dataen er modellert for globalt. Dette datasettet har blitt ekstrapolert fra år 2011 til året det ble kalkulert, 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter.
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6	6,90E-02	tkm	Navn på dataset er «Market for transport, freight, lorry > 32 metric ton, EURO6». Dataen er modellert for globalt. Dette datasettet har blitt ekstrapolert fra år 2013 til året det ble kalkulert, 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter.



## 9.1.6 Drift

Tabell 34 Materiale som går inn i drift sammen med valgt LCI datasett

Materiale	Mengde	Enhet	LCI data
Steel, chromium steel 18/8	3,69E-02	kg	At plant. Navn på dataset er «steel production, converter, chromium steel 18/8 RER» fra databasen ecoinvent 3. Her må det nevnes at dette datasettet fantes allerede i ecoinvent versjon 2, og settet har mulig gjennomgått endringer ved overgangen til ecoinvent versjon 3. Geografisk er dataen modellert for Europa. (Ecoinvent 3 APOS, U). Denne prosessen produserer primær stål. Scrap er kun brukt for å kjøle ned the liquid steel. Innsamlings metode er basert på litteratur.
Nickel, 99.5 %	2,82E-03	kg	At plant. Navn på dataset er «Market for nickel, 99.5%». Dataen er modellert for globalt.
Synthetic rubber	1,41E-04	kg	At plant. Navn på dataset er «Synthetic rubber». Dataen er modellert for globalt.
Reinforcing steel	5,50E-02	kg	At plant. Navn på dataset er «reinforcing steel production». Dataen er modellert for Europa. Det representerer gjennomsnittet for verdens og europeisk produksjonsmiks. Dette antas og samsvare med forbruksmiksen i Europa. Datasettet har blitt ekstrapolert fra 2002 til 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter. Innsamlings metode er fra litteratur og statistikk.
Cast iron	2,54E-02	kg	At plant. Navn på dataset er «Market for cast iron». Dataen er modellert for globalt. Her har det blitt brukt ekspertvurderinger for estimere produktets transportdistanse. Dette datasettet har blitt ekstrapolert fra år 2011 til året det ble kalkulert, 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter.
Ethylene glycol	2,96E-04	kg	At plant. Navn på datasettet «market for ethylene glycol». Dataen er modellert for globalt. Datasettet har blitt ekstrapolert fra år 2011 til 2017. Usikkerhete har blitt justert deretter.
Lubricating oil	7,62E-04	kg	At plant. Navnet på datasettet «market for Lubricating oil». Dataen er modellert for globalt. Datasettet har blitt ekstrapolert fra år 2011 til 2017. Usikkerhete har blitt justert deretter.
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6	2,20E-01	tkm	Navn på dataset er «Market for transport, freight, lorry > 32 metric ton, EURO6». Dataen er modellert for globalt. Dette datasettet har blitt ekstrapolert fra år 2013 til året det ble kalkulert, 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter.
Heat, district or industrial, natural gas	1,52E-01	MJ	Navn på datasettet er «Heat production, natural gas, at industrial furnace > 100 kW Europe without Switzerland». NOx- og CO utslipp er derived fra malinger under kontrollerte forhold. Datasettet har blitt ekstrapolert fra år 2000 til 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter. Innsamlings metode er litteratur og fabrikkasjon.
Electricity, high voltage	4,23E-02	kWt	Modellert for Norge.

## 9.1.7 Brenselcelle

Tabell 35 De ulike materialene og mengden som kreves i produksjonen av en brenselcellene. I tillegg er det lagt med hvilke LCI datasett som er brukt og informasjon om disse

Materiale	Mengde	Enhet	LCI data
Steel, unalloyed	189,0	kg	Hentet fra datasettet «steel production, converter, unalloyed RoW». Ecoinvent 3. Dette datasettet fantes allerede i ecoinvent versjon 2, og settet har mulig gjennomgått endringer. Geografisk er dataen modellert for Rest-of-World. Usikkerheten har blitt justert deretter.
Steel low-alloyed	20,9	kg	Hentet fra datasettet «steel production, converter, low-alloyed, RoW». Ecoinvent 3. Dette datasettet fantes allerede i ecoinvent versjon 2, og settet har mulig gjennomgått endringer. Geografisk er dataen modellert for Rest-of-World. Usikkerheten har blitt justert deretter.
Copper, catode	67,2	kg	Hentet fra datasettet «market for copper, cathode GLO». Geografisk er dataen modellert for globalt. Dette datasettet har blitt ekstrapolert fra år 2011 til året det ble kalkulert, 2017.
Aluminium	1,8	kg	Hentet fra datasettet «anode production, prebake, for aluminium electrolysis RoW». Geografisk er dataen modellert for Rest-of-World.
Abs thermoset	20,1	kg	Hentet fra datasettet «market for acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer GLO». Geografisk er dataen modellert for globalt. Datasettet har blitt ekstrapolert fra år 2011 til 2017. Usikkerhete har blitt justert deretter.
Platinum	3,6	kg	Hentet fra datasettet «market for platinum GLO». Geografisk er dataen modellert for globalt. Dette datasettet har blitt ekstrapolert fra år 2012 til året det ble kalkulert, 2017.
Ruthenium	0,9	kg	Relevant datasett ble ikke funnet, og det ble et proxy med platinum. Dette ga en totalsum totalsum på 4,5 kg.
Graphite	27	kg	Hentet fra datasettet «graphite production RoW». Geografisk er dataen modellert for Rest-of-World»
Electricity—grid mix—US	1,82E+04	kWt	Hentet fra datasettet «market group for electricity, high voltage US». Datasettet er modellert for USA. Dette datasettet er ekstrapolert fra 2015 til året det ble kalkulert, 2017.
Transport	0,55	tkm	Hentet fra datasettet «market for transport, freight, sa, transoceanic ship GLO». Geografisk er dataen modellert for globalt. Dette datasettet har blitt ekstrapolert fra år 2012 til året det ble kalkulert, 2017.

## 9.1.8 Lagring

Tabell 36 De ulike materialene som går inn i lagring, tank på båt.

Lagring	Mengde	Enhet	LCI data
Steel, low-alloyed	4,8E-04	kg	Navn på dataset er «steel production, electric, low-alloyed RER». Dataen er modellert for Europa. Denne prosessen produserer dekundær stål. Datasettet har blitt ekstrapolert fra år 2000 til 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter.
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6	9,61E-06	tkm	Navn på dataset er «Market for transport, freight, lorry > 32 metric ton, EURO6». Dataen er modellert for globalt. Dette datasettet har blitt ekstrapolert fra år 2013 til året det ble kalkulert, 2017. Usikkerheten har blitt justert deretter.