

Malene Nordal Ulvestad og Tilla Kristensen

Svinghjul som energilager i Geiranger

Bacheloroppgave i Fornybar energi

Veileder: Ann Rigmor Nerheim

Mai 2023

NTNU
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for havromoperasjoner og byggingsteknikk

Malene Nordal Ulvestad og Tilla Kristensen

Svinghjul som energilager i Geiranger

Bacheloroppgave i Fornybar energi
Veileder: Ann Rigmor Nerheim
Mai 2023

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for havromsoperasjoner og byggteknikk



Kunnskap for en bedre verden

Forord

Denne rapporten er skrevet av Malene Nordal Ulvestad og Tilla Kristensen, og vi studerer bachelor Ingeniør Fornybar Energi ved NTNU Ålesund. Rapporten beskriver en bacheloroppgave knyttet til den avsluttende delen av en treårig ingeniørutdanning, som fullføres våren 2023.

Vi har begge valgt energilagring som fordypning gjennom bacheloren. Denne studieretningen gir kompetanse for ulike former for energibærere som blant annet batteri, hydrogen og svinghjul, og tar for seg utfordringene som kommer med veksten av fornybare energikilder. Utfordringene er knyttet til sammenhengen mellom produksjon og forbruk av energi til en hver tid. På grunn av opparbeidet kompetanse og stor interesse rundt dette feltet, ser vi på energilagring som et relevant tema for våres bacheloroppgave.

Vi ønsker å gi en spesiell takk til vår veileder, førsteamanuensis Ann Rigmor Nerheim. Gjennom ukentlige møter og godt samarbeid har du kommet med gode innspill og vært godt tilgjengelig for faglig hjelp og diskusjoner til alle tider. Det rettes også en spesiell takk til ekstern mentor Arne Ove Rødstøl, Chief Executive Officer ved Spinning Energy, som har bidratt med mye kunnskap, data og erfaringer.

Vi ønsker også å takke Børge Hegge Johansen for veiledning av gjennomført bærekraftsanalyse, og Tor Hennem for god hjelp med strukturering av oppgaven og gode faglige diskusjoner. Takk for at dere har delt deres erfaringer med oss og brukt deres tid på å veilede oss.

Vi ønsker til slutt å takke familie og venner for deres tålmodighet og forståelse for den travle perioden vi har vært igjennom.

Sted: Ålesund

Dato for levering av oppgaven: 21. Mai 2023

Signaturer

Malene N. Ulvestad

Tilla Kristensen

Sammendrag

Med energikrise og økende fokus på klimapolitikk og bærekraft trenger næringen nye løsninger på hvordan behovet for energi kan dekkes på en bærekraftig måte. Denne rapporten har undersøkt bruken av svinghjul som energilager i Geiranger, samt muligheten for at et slikt energilager kan forsyne elektriske fartøy og bidra til transport av turister langs Geirangerfjorden.

Svinghjul som et system for energilagring har blitt undersøkt utfra ulike perspektiver. Ved å undersøke ulike scenarioer, med tilgjengelig lagret energimengde fra forskjellige kombinasjoner av energikilder, er det identifisert hvilke muligheter dette gir til å forsyne elektriske, utslippsfrie fartøy. Ved å gjøre en økonomisk analyse er lønnsomheten knyttet til en installasjon av en ladestasjon med et energilager av svinghjul beregnet. Ved å gjøre en bærekraftsanalyse er klimagassutslippene tilknyttet et energilager av svinghjul beregnet. Til slutt er resultatene fra svinghjul knyttet opp mot en annen energilagringsteknologi, et litium-ionbatteri. Dette gir mulighet for å tolke resultatene for en ladestasjon med et energilager av svinghjul fra et større perspektiv.

Utfra de foreløpige resultatene er det vist at ved å kombinere lokal grunnlast og spisslast i og rundt Geiranger muliggjør dette for større tilgjengelig energimengde i Geiranger. Ved å benytte et energilager gir dette muligheten til å dekke det kommende energibehovet til flere elektriske fartøyer. Svinghjul som energilagringssystem er passende for opplading av store elektriske fartøy, blant annet fordi de gjerne krever høy effektoverføring over en begrenset tidsperiode. De foreløpige økonomiske beregningene viser at investeringen for en ladestasjon med bruk av svinghjul som energilagringssystem, samt tilleggsystemer for energiforsyning fra spisslast, vil være mulig å tjene inn igjen iløpet av en tidsperiode på 20 år. De foreløpige resultatene for bærekraftdelen som kan knyttes til svinghjul som energilagringssystem viser at det er få klimagassutslipp knyttet til produksjon og drift av et slikt system.

For å oppsummere kan det konkluderes med at svinghjul som et system for energilagring i Geiranger kan være en god løsning for å sikre stabil tilgang til energi i fjorden. Rapporten kan bidra til å informere beslutningstakere om potensialet og hensiktsmessigheten av svinghjul som en bærekraftig løsning for energilagring og forsyning av elektriske transportmidler i Geiranger-området. Sett fra et større perspektiv kan slik stabil tilgang til energi være nøkkelen til å muliggjøre for drift av bærekraftig turisttransport i norske verdensarvfjorder.

Abstract

With an energy crisis and increasing focus on climate policy and sustainability, the industry needs new solutions for meeting energy needs in a sustainable manner. This report has investigated the use of flywheels as energy storage in Geiranger, as well as the possibility of such an energy storage system supplying electric vessels and contributing to tourist transportation along the Geirangerfjord.

Flywheels as a system for energy storage have been examined from various perspectives. By examining different scenarios, with the available stored energy from different combinations of energy sources, it has been identified what opportunities this provides for supplying electric, emission-free vessels. An economic analysis has been conducted to determine the profitability associated with the installation of a charging station with a flywheel energy storage system. A sustainability analysis has been performed to calculate the greenhouse gas emissions associated with a flywheel energy storage system. Finally, the results from flywheels have been compared to another energy storage technology, a lithium-ion battery, allowing for an interpretation of the results for a charging station with a flywheel energy storage system from a broader perspective.

Based on the preliminary results, it has been demonstrated that combining local base load and peak load in and around Geiranger enables a greater available energy supply in Geiranger. Utilizing an energy storage system provides the opportunity to meet the future energy demand for multiple electric vessels. Flywheels, as an energy storage system, are suitable for charging large electric vessels, partly because they often require high power transfer over a limited period of time. The preliminary economic calculations show that the investment for a charging station using a flywheel energy storage system, along with additional systems for peak load energy supply, can be recovered within a period of 20 years. The preliminary results for the sustainability aspect associated with flywheels as an energy storage system indicate that there are few greenhouse gas emissions associated with the production and operation of such a system.

In summary, it can be concluded that flywheels, as an energy storage system in Geiranger, can be a viable solution for ensuring a stable energy supply. The report can help inform decision-makers about the potential and feasibility of flywheels as a sustainable solution for energy storage and supply of electric transportation in the Geiranger area. From a broader perspective, such a stable energy supply can be the key to enabling sustainable tourist transportation in Norway's world heritage fjords.

Forklaringer

Symbolliste

Symbol	Forklaring	Enhet
η	Virkningsgrad	%
ρ	Massetetthet	kg/m ³
ω	Rotasjonshastighet	rad/s
a	Netto inntekt hvert år	kr
A	Antall	-
E	Energi	kWh
F	Forholdstall	kWh/kg
G	Investeringskostnad i år 0	kr
k	Kalkulasjonsrente	%
m	Masse	kg
M	Molar masse	g/mol
n	Stoffmengde	mol
N	Levetid	år
P	Effekt	kW
r	Radius	m
t	Tid	h
v	Hastighet	m/s

Begrepsliste

Begrep	Forklaring
AFC	Alkaline brenselcelle
AFE	Active Front End
CO	Karbonmonoksid
CO ₂	Karbondioksid
Cradle-to-cradle	Utvinning av råmateriale til resirkulering
DSB	Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap
Elbil	Elektrisk bil
EPD	Environmental product declaration
FC	Brenselcelle
FESS	Flywheel energy storage system
FWC	Flywheel controller
GHG	Globalhous gass
H ₂	Hydrogen
H ₂ O	Vann
HHH	Hellesytl hydrogen HUB
HHV	Øvre brennverdi
HSF	Høyhastighet svinghjul
LCA	Livsløpsvurdering
LCI	Livsløpsregnskap
LCIA	Livsløpseffektvurdering
LHV	Nedre brennverdi
LIB	Litium-ion batteri
LSF	Lavhastighet svinghjul
Mikro-HSF	Mikro-høyhastighet svinghjul
NM	Nautiske mil
NMK	Norsk maritim kompetansesenter
NNV	Netto nåverdi
PB	Powerbarge
PEM	Polymer electrolyte membrane
PEMFC	Polymer electrolyte membrane brenselcelle
PV	Solcellepanel
PVGIS	EU sitt solkartprogram
rpm	rotasjoner per minutt
SH	Svinghjulmodul
SN	Strømnettet
SoC	State of charge

Innhold

Forord	i
Sammendrag	ii
Abstract	iii
Forklaringer	iv
Symbolliste	iv
Begrepsliste	v
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemdefinering og resultatmål	2
1.3 Omfang	3
2 Kartlegging av elektriske fartøyer som kan benyttes i Geirangerfjorden	4
2.1 RIB-båter fra Bonseye AS	4
2.2 Elektriske fjordcruisebåter	4
2.3 Bilferge mellom Geiranger og Hellesylt	8
2.4 Ladestasjon for elektriske biler	9
3 Kartlegging av mulige energikilder	10
3.1 Strømnettet	10
3.2 Hydrogen	10
3.2.1 Hydrogen fra Hellesylt	10
3.2.2 Brenselceller	11
3.2.3 Vann som biprodukt	12
3.2.4 Sikkerhet og regelverk knyttet til anvendelse av hydrogen	12
3.3 Solceller	13
3.4 Powerbarge	13
4 Energilagring	15
4.1 Svinghjul som et system for energilagring	15
4.1.1 Design og komponenter tilknyttet et svinghjul som energilagringssystem	16
4.1.2 Ulike typer energilagringssystem av svinghjul	17
4.2 Svinghjul utviklet av Spinning Energy	18
4.3 Teoretisk sammenligning av svinghjul fra Spinning Energy og et typisk litium-ionbatteri	19
5 Økonomiske og miljømessige vurderinger av en teknologi	22
5.1 Økonomisk vurdering	22
5.2 Miljømessig vurdering	22
6 Metode	23
6.1 Presentasjon av scenarioer	23
6.2 Beregning av energibehov, effektbehov og ladetid for ulike lastprofiler	23

6.3	Prioritering av lastprofiler	25
6.4	Beregning av tilgjengelig energi	25
6.5	Dimensjonering og mulige lokasjoner for energistasjon	26
6.6	Analyse av økonomisk lønnsomhet	27
6.7	Bærekraftsanalyse	28
7	Resultat og diskusjon	32
7.1	Energibehov, effektbehov og ladetid for elektriske fartøy	32
7.2	Tilgjengelig energi	32
7.3	Effektstrøm og oppladingsperiode for energilageret	34
7.4	Muligheter for et energilager med ulike kombinasjoner av grunnlast og spisslast .	35
7.5	Utforming og lokasjon av energisystemet	38
7.5.1	Ladestasjon	38
7.5.2	Systemer for spisslast	39
7.5.3	Utenfor sesong	40
7.6	Økonomisk lønnsomhet for en ladestasjon med et energilager av svinghjul	41
7.7	Klimagass-utslipp tilknyttet svinghjul fra Spinning Energy	42
7.8	En ladestasjon av svinghjul sammenlignet med et litium-ionbatteri	44
8	Konklusjon	45
9	Videre arbeid	46
	Referanser	48
A	Vedlegg: Estimert solinnstråling i Geiranger	I
B	Vedlegg: Overisktt over prosesser brukt i livsløpsvurderingen	II
C	Vedlegg: Rutetabell for fergesambandet Geiranger–Hellesylt	III
D	Vedlegg: Strømpriser for Geiranger	IV
E	Vedlegg: Priser for lading av el-bil	V

1 Innledning

Denne bacheloroppgaven gjennomføres i samarbeid med bedriften Spinning Energy. Bedriften designer, utvikler og distribuerer avanserte energilagringssystemer ved hjelp av svinghjulteknologi, for kunder over hele verden, inkludert energiprodusenter, nettselskap og utviklere av fornybare energiprojekter. Dette med et formål om å sikre stabil og pålitelig energiforsyning og håndtere effekttoppene i strømmettet, for å bidra til overgangen av et mer elektrifisert samfunn og en sømløs integrering av fornybare energikilder på eksisterende strømmett rundt om i verden. Bedriften har kontor på Norsk Maritim Kompetansesenter (NMK) i Ålesund, og består av fem ansatte [75].

Med energikrise og økende fokus på klimapolitikk og bærekraft, trenger næringen nye løsninger på hvordan de kan dekke behovet for energi på en bærekraftig måte. I denne rapporten skal det undersøkes om svinghjul kan benyttes som et energilager i Geiranger, og om et slikt energilager kan forsyne elektriske fartøy for å bidra til frakting av turister.

1.1 Bakgrunn

For å forstå oppgavens kontekst og relevans er det viktig å betrakte den i en større sammenheng. Ved å undersøke nasjonale og internasjonale utviklingsmål for bærekraftig utvikling, relevante vedtak, situasjonen i Geirangerfjorden i dag, og relevante prosjekter, kan bakgrunnen til oppgaven bli dannet.

Nasjonale og internasjonale utviklingsmål for bærekraftig utvikling

Bærekraftig utvikling har blitt en viktig global agenda i det 21. århundre, med fokus på å imøtekomme våre samfunnsbehov uten å skade miljøet eller å undergrave mulighetene for fremtidige generasjoner. Nasjonale og internasjonale utviklingsmål for bærekraftig utvikling har blitt formulert for å fremme en mer bærekraftig fremtid for hele verden [25].

Parisavtalen ble vedtatt i desember 2015 under FNs klimakonferanse i Paris, Frankrike. Avtalen var resultatet av en årelang prosess med å etablere en felles global respons på den økende truselen om klimaendringer. Parisavtalen er den første klimaavtalen som er juridisk bindende og forpliktende for alle land, og den fastsetter mål om å begrense den globale oppvarmingen. For å oppnå dette målet, forplikter Parisavtalen alle medlemsland til å utvikle og implementere nasjonale klimastrategier, kjent som nasjonale klimaplaner, for å redusere sine klimagassutslipp [80].

I forbindelse med Parisavtalen har Det kongelige klima- og miljødepartementet kommet med en klimaplan for Norge fra år 2021 til 2030 [45]. Denne klimaplanen presenterer regjeringens politikk for å redusere klimagassutslippene. Et av målene er å redusere utslippene med minst 55 prosent innen 2030 sammenliknet med utslippene fra 1990 [47]. Dette er en ambisiøs, men viktig del av innsatsen for å oppnå bærekraftig utvikling, og har dannet grunnlaget for flere vedtak som regjeringen har kommet med.

I mai 2018 vedtok stortinget et krav om nullutslipp for cruiseskip og båttrafikk i norske fjorder som er inkludert på UNESCOs verdensarvliste, innen 2026 [55]. Vedtaket er gjort på bakgrunn av at verdensarvfjordene har særlig krav på beskyttelse og at det store antallet cruiseskip og annen skipstrafikk gir store utfordringer knyttet til miljøet. Miljøutfordringene kommer av at

en mye brukt drivstofftype på disse skipene er tungolje, som gir et høyt utslipp av blant annet svovel og andre miljøgifter [19].

Geirangerfjorden

Geirangerfjorden er en av fjordene som er inkludert på UNESCOs verdensarvliste, men også en av Norges viktigste cruiseattraksjoner. Det første skipet med turister seilte inn i fjorden i 1869 og siden den gang har antall turister økt. Årlig besøker rundt 800 000 turister Geiranger, og over 40 prosent av disse bruker sjøveien for å komme inn til fjorden [19]. Sjøveien er populær siden det gir mulighet til å oppleve kjente naturopplevelser, som fossefallene De Sju Søstre, Brudesløren og Friaren, og historiske fjellgårder langs fjorden. I 2018 tok Geiranger imot 188 cruiseskip [19]. Før Covid-19 utbruddet, økte turismen årlig med 4 % [65], og selv om pandemien dramatisk reduserte reiselivsaktivitet i 2020 og 2021, forventes det komme seg om noen år, fra to til fire, avhengig av land og destinasjon [33]. På grunn av nullutslippskravet i Geirangerfjorden [55], og for å opprettholde økende turisme for en stor og viktig cruise- og turistnæring [16], må det finnes løsninger for bærekraftig transport.

Per dags dato er det for dårlig strømkapasitet både i og rundt Geiranger for å kunne dekke det fremtidige energibehovet fra elektriske nullutslippsfartøy Dette kan gi betydelige konsekvenser for turistnæringen. I 2021 ble det lagt inn et representantforslag i stortinget, om hvordan fjorden kan få nok strøm innen 2026. Som bakgrunn for forslaget ble det vist til at det vil koste i overkant av 500 millioner kroner å gi Geiranger tilførsel av tilstrekkelig strømkapasitet, uansett hvilken teknisk løsning som velges [16]. Det ble videre argumentert for at dersom kommunen eller næringen rundt ikke klarer å finansiere for dette behovet vil nullutslippskravet [55] føre til *tom fjord* istedet for *grønn fjord* [16]. I forslaget bad stortingsrepresentanter stortinget om å blant annet, komme med en sak om hvordan det kan sørges for tilstrekkelig strømkapasitet til Geirangerfjordområdet innen 2026. Det ble også bedt om at Stortinget skulle komme med en plan som kunne bidra til å finansiere tilførsel av nødvendig strømkapasitet, i tillegg til at de skulle sørge for at Enova bidro til landstrømanlegg i de viktigste cruisehavnene [16]. Dette opphavelige forslaget ble ikke vedtatt, men det førte likevel til at regjeringen skal vurdere hvilke kraftbehov som trengs for næringsutvikling i verdensarvområdene Geiranger og Nærøyfjorden, uten klimagassutslipp, og komme tilbake med en sak om hvordan regjeringen kan bidra til at dette behovet blir dekt [16].

Prosjektet Grønn kai

Vedtaket om nullutslipp [55] samt dårlig strømkapasitet i Geiranger, har lagt grunnlag for prosjektet Grønn Kai [46, 81]. Dette prosjektet går ut på å undersøke muligheter for å utvikle kaisystem i Geiranger som skal ta imot elektriske, utslippsfrie båter inn i fjorden. En utfordring med nullutslippskravet [55] og prosjektet Grønn kai [46, 81] er at effektbehovet fra de elektriske fartøyene blir større enn det Geiranger har muligheten til å distribuere direkte fra nettet.

1.2 Problemdefinering og resultatmål

I forlengelse med prosjektet Grønn Kai [46, 81] og i samarbeid med Spinning Energy, skal det undersøkes om svinghjul kan benyttes som energilager for lading av elektriske fartøy som skal frakte turister i Geiranger og hva miljøpåvirkningen av denne teknologien vil være. Dette danner grunnlag for følgende problemstilling:

Undersøke om svinghjul kan benyttes som energilager for å sikre stabil tilgang til energi i Geiranger, og om denne energien kan brukes til lading av elektriske fartøy som skal transportere turister langs sjøveien inn i fjorden. Undersøke om svinghjul er en bærekraftig løsning for energilagring, ved å gjøre en livsløpsvurdering.

For å svare på problemstillingen er det definert noen resultatmål som skal besvares. Et resultatmål knyttes til prosjektets resultat, og beskriver hvilke løsninger som skal kommes frem til gjennom oppgaven [68]. Følgende resultatmål er definert:

1. Undersøke ladetid, effektbehov og energibehov for lading av elektriske fartøy til eventuell transport av turister.
2. Undersøke muligheter for tilgjengelig energi fra strømmettet og spisslast som kan lagres på svinghjul.
3. Fremstille ulike scenario:
 - (a) Undersøke ulike scenario av tilgjengelig energi og hva denne energien kan brukes til.
 - (b) Dimensjonering. Beregne antall svinghjul som trengs for de ulike scenarioene.
4. Lokalisering
 - (a) Undersøke muligheter for lokalisering av ladestasjon i og utenfor sesong.
5. Undersøke økonomisk lønnsomhet ved innføring av et energilager i form av svinghjul
6. Bærekraftsanalyse av svinghjul
 - (a) Undersøke produktets miljøvennlighet
 - (b) Kartlegge produktets miljøeffekt i alle faser av livsløpet
 - (c) Avdekke hvor i livsløpet det ligger størst potensial for miljøforbedringer.
7. Sammenligne et energilager av svinghjul med et litium-ionbatteri, for å kunne tolke resultatene fra et større perspektiv.

1.3 Omfang

Når nullutslippskravet [55] trer i kraft, vil ikke cruiseskipene med fremdriftssystem av tungolje, som ferdes der i dag, få tilgang til å kjøre inn i fjorden. I tillegg vil mulige cruiseskip med elektrisk fremdriftssystem ha for stort energibehov til at det vil være sannsynlig at dette behovet kan dekkes i Geiranger. Frakt av turister fra cruiseskipene utenfor verdensarvområdet inn til Geiranger ved hjelp av buss kan føre til en økning på mer enn 60 % av det totale veiutslippene [70]. Det må derfor undersøkes andre muligheter for mindre fartøy som kan transportere turister inn i fjorden. Frakt av turister ved hjelp av mindre elektriske fartøy via sjøveien, blir derfor hovedfokus i denne rapporten. En kartlegging av eventuelle elektriske fartøy som kan benyttes i Geiranger gjøres i kapittel 2. Prosjektet Grønn Kai [46, 81] blir brukt som inspirasjon til valg av forskjellige fartøy, samt at det blir undersøkt eksisterende fartøy som driftes i dag innad i fjorden.

For å finne ut om det er mulig å forsyne de elektriske fartøyene med energi, undersøkes flere aspekter. For å kunne dekke energibehovet til de mindre elektriske fartøyene, må det undersøkes forskjellige energikilder som er tilgjengelig i og rundt Geiranger. Ved bruk av energilager kan energien i tillegg lagres og brukes ved behov, og dermed gi sikret tilgang til energi. En kartlegging av mulige energikilder i og rundt Geiranger, samt beskrivelse av teknologier for energilagring, presenteres i kapittel 3 og 4. Teknologien for energilagring skal videre vurderes økonomisk og miljømessig. Kapittel 5 beskriver teorien knyttet til beregningene gjort for å vurdere det økonomiske og bærekraftige- aspektet. Fremgangsmåten og antagelser gjort i oppgaven blir presenter i kapittel 6, og resultater med tilhørende diskusjon presenteres i kapittel 7.

2 Kartlegging av elektriske fartøyer som kan benyttes i Geirangerfjorden

I dette kapitlet gjøres en kartlegging av hvilke muligheter for elektriske fartøyer som kan benyttes til turisttransport i Geirangerfjorden. Det fokuseres hovedsaklig på transport av turister gjennom sjøveien, men det skal likevel også undersøkes elektriske biler.

2.1 RIB-båter fra Bonseye AS

Helelektriske RIB-båter fra selskapet Bonseye AS [12] er illustrert i Figur 2.1. En RIB er en hurtiggående båt med fast skrog og tykke oppblåsbare slanger langs kanten [79]. RIB-båtene fra Bonseye AS brukes til guidede sightseeingturer gjennom Geirangerfjorden, med start- og slutt punkt ved kai i Geiranger sentrum. Sightseeingturen gjøres gjennom en times båtkjøring og historiefortellinger fra guider som drifter båtene.



Figur 2.1: Illustrasjon av én av to helelektriske RIB-båter fra Bonseye AS [84].

RIB-båtene har i utgangspunktet vært bensindrevne båter, men for å tilpasse seg nullutslippskravet [55] ble to av fire RIB-båter gjort helelektriske og utslippsfrie i 2021. Planen er likevel at alle 4 båtene skal gjøres helelektriske innen 2030 [11]. Noen tekniske data for de helelektriske RIB-båten er presentert i Tabell 2.1.

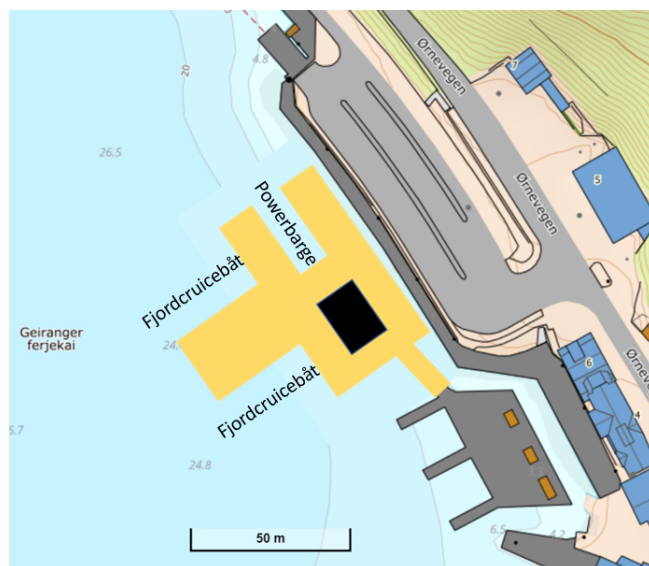
Tabell 2.1: Teknisk data for helelektrisk RIB-båt fra Bonseye AS [77].

Spesifikasjon	Verdi
Lengde [m]	8,5
Batterikapasitet [kWh]	70
Ladeeffekt [kW]	63
Passasjerkapasitet [stk]	12

2.2 Elektriske fjordcruisebåter

I sluttrapportene for prosjektet Grønn kai [46, 81] fremstilles alternativer for elektriske fjordcruisebåter for transport av turister inn til Geiranger. Bakgrunn for bruk av slike båter er at

det i prosjektene ble laget en plan om at de store cruiseskipene som seiler inn i fjorden skal ankre opp i Hellesylt og Stranda, som ligger i utkanten av Geirangerfjorden. Passasjerene kan deretter bli fraktet videre med elektriske skyssbåter videre inn til Geiranger [46]. Av dette ble det utviklet modeller av kaianlegg både i Stranda, Hellesylt og Geiranger [81]. Prosjektet Grønn kai 2022 [81] sitt forslag til utforming og plassering av kaianlegg for fjordcruisebåtene i Geiranger er illustrert med gult i Figur 2.2. Kaianlegget er dimensjonert til å få plass til to fjordcruisebåter og en såkalt powerbarge. Midt på kaianlegget, markert med svart, er planen at det skal ligge et næringsbygg.



Figur 2.2: Skisse av utforming og plassering av kaianlegg til prosjektet Grønn kai 2022 [81], markert i gult. Kartet uten skisse er hentet fra Norgeskart.no.

Alternativene til skyssbåter som fremstilles i rapportene er ikke fartøy som driftes i Geiranger idag, men forslag til fartøy som kan passe til frakting av turister når fjorden stenges for alt annet enn nullutslippsfartøy. Følgende underkapitler fremstiller fartøyene som det ble tatt utgangspunkt i for prosjektet Grønn kai i 2021 og 2022 [46, 81], samt prosjektets forslag til mulige driftsprofiler. Fartøyene som det ble tatt utgangspunkt i ble valgt på grunnlag av stor nok rekkevidde for den gitte strekningen, stor passasjerkapasitet og godt tilrettelagt for sightseeing på båten [46, 81]. Utfra strekningsmåling på google maps er strekningen *Geiranger – Stranda – Geiranger* omtrent 44 nautiske mil (NM) og strekningen *Geiranger – Hellesylt – Geiranger* omtrent 22 NM.

Grønn kai 2021

I prosjektet Grønn kai 2021 [46] ble det undersøkt ulike eksisterende fartøy som kunne passe til frakting av cruiseturister fra Stranda/Hellesylt inn til Geiranger og tilbake igjen. Det ble også laget en detaljert driftsprofil som skulle gjøre det mulig å transportere alle gjester fra cruiseskip inn til Geiranger og tilbake ved hjelp av mindre nullutslippsfartøy. Gjestene fra cruiseskipene tilsvarte 4800 cruiseturister fra Hellesylt og 2000 cruiseturister fra Stranda, hver dag. Det ble konkludert med at det mest passende nullutslippsfartøyet var Brødrene Aa sin *Future of the fjords*. Dette fartøyet er illustrert i Figur 2.3.



Figur 2.3: Fjordcruisebåten *Future of the Fjords*, som driftes i Nærøyfjorden [89].

Future of the Fjords er en type turistfartøy med helelektrisk energitilførsel, designet og utviklet av Brødrene Aa. Fartøyet driftes i Nærøyfjorden, en fjord i Aurland kommune, som også er en del av UNESCOs verdensarvliste. Hensikten med utviklingen av *Future of the Fjords* var å tilby et fartøy med null utslipp for å tilfredsstille et økende og mer miljømessig internasjonalt turistmarked [78]. Fartøyet er designet med panoramavinduer for å gi passasjerer best mulig utsikt fra alle posisjoner av båten, både på dekk og i de innvendige salongene. I tillegg til at fartøyet er helelektrisk er det også designet for fremtidige løsninger for å installere hydrogenbassert propulsjonssystem, for å eventuelt kunne utvide levetiden [78]. Dette gjør det svært passende for drift i Geirangerfjorden med tanke på lokal hydrogenproduksjon fra Hellesylt. Noen tekniske data for fartøyet er presentert i Tabell 2.2.

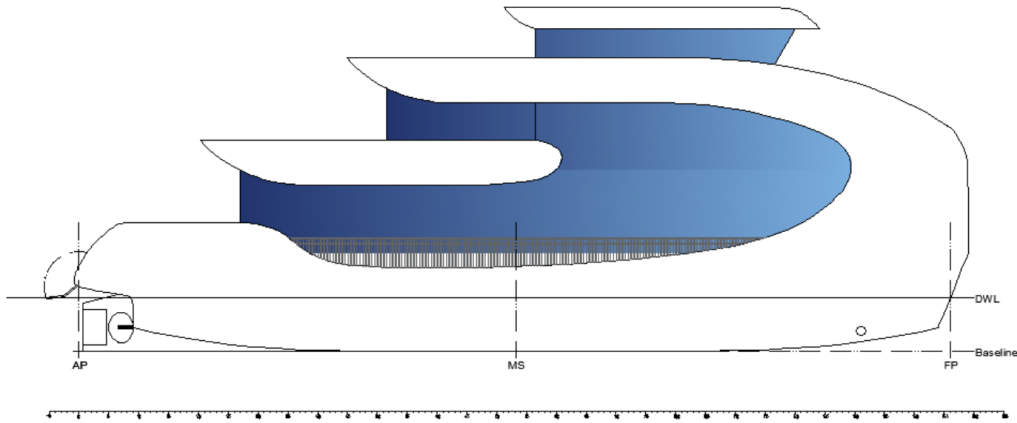
Tabell 2.2: Teknisk data for *Future of the Fjords* [78, 90].

Spesifikasjon	Verdi
Byggeår	2019
Lengde [m]	42,49
Bredde [m]	15,2
El-motor [kW]	2x450
Batterikapasitet [kWh]	2x900
Passasjerkapasitet [stk]	400
Fart [knop]	15
Rekkevidde (i 15 knop) [NM]	40

For dagens drift i Nærøyfjorden brukes en såkalt PowerDock som ladestasjon for dette fartøyet. Teknologien gir mulighet for rask effektloading til elektriske fartøy der nettkapasiteten er en utfordring [20]. Når lading skjer overfører powerdocken en effekt på 2,4 MW, ved hjelp av to ladekabler med 1,2 MW effekt hver. Det antas dermed at 2,4 MW er mulig ladeeffekt for *Future of the Fjords*.

Grønn kai 2022

I prosjektet Grønn kai 2022 [81] ble det tatt utgangspunkt i et nullutslipp sightseeing-fartøy designet av studenter fra NTNU Ålesund, i sammenheng med deres bacheloroppgave. Nullutslippsfartøyet ble designet med formål om stor rekkevidde, stor passasjerkapasitet, gode muligheter for sightseeing gjennom fjorden og at det skulle være god passasjerkomfort. En modell av nullutslippsfartøyet er illustrert i Figur 2.4.



Figur 2.4: GA-tegning av fasaden til Nullutslipp sightseeing-fartøy brukt i prosjektet Grønn kai 2022 [6].

Noen tekniske data for *Nullutslipp sightseeing-fartøy* er presentert i Tabell 2.3.

Tabell 2.3: Teknisk data for *Nullutslipp sightseeing-fartøy* brukt i prosjektet Grønn kai 2022 [6].

Spesifikasjon	Verdi
Byggeår	ikke bygget
Lengde [m]	30
Bredde [m]	12
Batterikapasitet [kWh]	4366
Passasjerkapasitet [stk]	250
Fart [knop]	16
Rekkevidde (i 16 knop og 60% av batterikapasitet) [NM]	22

For prosjektet Grønn kai 2022 [81] ble det gått vekk fra forslaget fra prosjektet Grønn kai 2021 [46], om at alle cruiseturistene skulle fraktes inn i Geiranger i løpet av en dag. Det ble rettet mer fokus mot at kun deler av cruiseturistene skulle fraktes fra Stranda og Hellesylt og inn til Geiranger. Dette ville gi muligheten til lengre tid for hver enkelt passasjer for å utforske Geirangerområdet. Fartøyet ble designet utfra en planlagt løsning om at cruiseturister melder seg på en tur til Geiranger med 4 eller 6 timers varighet. Utfra dette ble det laget en rutetabell med faste avganger fra Hellesylt og Geiranger, som vist i Figur 2.4 [6]. Denne rutetabellen gir mulighet til å frakte 1 000 cruiseturister frem og tilbake hver dag, ved hjelp av *Nullutslipp sightseeing-fartøy*.

Tabell 2.4: Rutetabell for frakt av 1000 personer fordelt på 2 Nullutslipp sightseeing-fartøy fra prosjektet Grønn kai [6, 81].

(a) strekning Hellesylt–Geiranger					(b) Strekning Geiranger–Hellesylt				
Båt	Avgang	Ankomst	Antall passasjer [stk]	Tur-varighet [h]	Båt	Avgang	Ankomst	Antall passasjer [stk]	Tur-varighet [h]
1	08:00:00	08:50:00	250	6	1	09:30:00	10:20:00	0	
2	09:00:00	09:50:00	250	4	2	10:30:00	11:20:00	0	
1	11:00:00	11:50:00	250	6	1	13:50:00	14:40:00	250	4
2	12:00:00	12:50:00	250	4	2	14:50:00	15:40:00	250	6
1	15:30:00	16:20:00	0		1	16:50:00	17:40:00	250	4
2	16:30:00	17:20:00	0		2	17:50:00	18:40:00	250	6

2.3 Bilferge mellom Geiranger og Hellesylt

Fergesambandet Hellesylt-Geiranger frakter personer og kjøretøy langs Geirangerfjorden, mellom Hellesylt og Geiranger, en strekning på 11 NM. Turen er populær da det gir mulighet for andre enn cruiseturister, med og uten bil, å ankomme Geiranger gjennom sjøveien, og dermed få mulighet til å oppleve naturen som fjorden har å by på [83]. Det er idag tre bilferger som trafikkeres på sambandet; MF Veøy og MF Bolsøy på sommerhalvåret og MF Aukra på vinterhalvåret. MF Veøy er illustrert i Figur 2.5.



Figur 2.5: Bilfergen MF Veøy. Denne er 1 av 3 bilferger som driftes på sambandet Geiranger–Hellesylt [85].

For å innfri kravene til nullutslipp i fjorden [55] må fergene ombygges slik at de får et utslippsfritt fremdriftssystem. Det er funnet lite til ingen informasjon om hva som vil skje med fergene og fergedriften på dette sambandet når fjorden stenges for alt annet enn nullutslippfartøy, men utfra kommunikasjon med fergeselskapet Fjord 1 [18] er det foreløpig ingen planer om elektrisk drift på dette sambandet. Et eventuelt energibehov for en overfart på fergesambandet Geiranger–Hellesylt er likevell blitt estimert i en rapport fra 2015, skrevet av DNV og Energi Norge [59]. I rapporten er det blant annet gjort beregninger på energibehov på en rekke fergestrekninger rundt om i Norge, utfra en standard 120 PBE ferge med driftsfart på 12 knop. En oversikt over funn for strekningen Geiranger–Hellesylt er fremstilt i Tabell 2.5.

Tabell 2.5: Parametre for fergestrekningen Geiranger - Hellesylt. Parametrene er hentet fra en rapport skrevet av DNV og Energi Norge [59].

Ferjestrekning	Antall ferjer	Antall overfarter per dag	Distanse [km]	Energibehov per overfart [kWh]	ladeeffekt ved 5 min ladetid [kW]	Årlig dieselforbruk [tonn/år]	Årlig CO ₂ utslipp [tonn/år]
Geiranger - Hellesylt	2	16	19,9	860	10 322	5,0	3 202

2.4 Ladestasjon for elektriske biler

En mulig løsning er å benytte svinghjul som ladestasjon for elektriske biler (elbiler). For å finne et omtrentlig estimat på ladetid og effektbehov er det tatt utgangspunkt i elbilen *Tesla Model Y Performance*. Denne modellen er illustrert i Figur 2.6.



Figur 2.6: Elbilen Tesla Model Y Performance [64].

Ut fra Norsk elbilforening har modellen 75 kWh netto batterikapasitet og støtter hurtiglading opptil 250 kW. De påstår også at omtrentlig ladetid for å lade batteriet fra 10-80 % er 22 minutter gitt at det er ideelle forhold [64].

3 Kartlegging av mulige energikilder

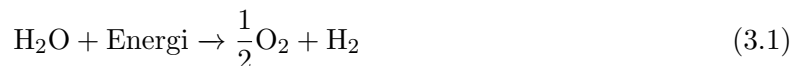
I dette kapittelet gjøres en kartlegging av forskjellige mulige energikilder i geirangerområdet, som kan lagres på et energilager. Det kartlegges mulig energi tilgjengelig fra strømmettet, hydrogen fra Hellesylt, et eventuelt solcelleanlegg og en powerbarge.

3.1 Strømmettet

Anngående disponibel energi som kan lagres fra strømmettet er selskapet Tindranett kontaktet. Tindranett har det samlede ansvaret for planlegging, bygging, drift og vedlikehold av strømmettet i Stranda kommune, som omfatter Stranda, Liabygda, Hellesylt og Geiranger [3]. Frem til det eventuelt blir bygd ut et tilstrekkelig strømmett i Geiranger er det en begrenset mengde tilgjengelig overskuddsenergi i området. Avtalen som er blitt gjort med Tindranett er derfor hovedsaklig en såkalt *tilknytning på vilkår*. Med dette menes at forbruket fra svinghjulene kan kobles ut når det ikke er kapasitet på strømmettet. Basert på de vurderingene de har gjort hittil, kan det tas utgangspunkt i at det vil være tilgjengelig 100–200 kW mellom kl. 00:00 og kl. 06:00 på natten [8]. Det er derimot lagt vekt på at nærmere avtale om hvilke konkrete vilkår som vil gjelde må gjøres på et senere tidspunkt.

3.2 Hydrogen

Hydrogen er en energibærer som lagrer elektrisk energi i form av kjemisk energi. Noen metoder for å produsere hydrogen er raffinering av råolje, dampreforming av naturgass, pyrolytisk spalting av naturgass, produksjon fra biomasse, og produksjon ved elektrolyse av vann. Hydrogen produsert ved hjelp av elektrolyse er den eneste produksjonsformen som kan kategoriseres som grønn. Med grønt hydrogen menes hydrogen produsert uten utslipp av giftige klimagasser. Elektrolyse av vann er en kjemisk reaksjon som har energi som drivkraft. Energien blir brukt til å spalte hydrogen og oksygen [88]. Dette er vist i Rekasjonsligning 3.1 [9].



Det er vanlig å skille på nedre brennverdi (LHV) og øvre brennverdi (HHV) i sammenheng med energiinnhold i brensel. Forskjellen mellom disse to er om H_2O er i væskeform eller gassform. HHV angir den totale varmeenergien som frigis, inkludert kondensasjonsvarme. LHV angir den totale varmeenergien som frigis, uten kondensasjonsvarme. Energiinnholdet til hydrogen i forhold til HHV vil ligge på 39 kWh/kg [35].

3.2.1 Hydrogen fra Hellesylt

Bedriften Norwegian Hydrogen skal starte opp produksjon av grønt hydrogen i Hellesylt. Målet til bedriften er å være med på den grønne omstillingen gjennom utvikling og infrastruktur for grønt hydrogen. Norwegian Hydrogen fokuserer på å bygge et nettverk og drifte produksjonssteder og distribusjonssystemer, der dette nettverket vil være med på å møte fremtidige behov for nullutslipp-drivstoff [42]. Hellesylt Hydrogen HUB (HHH) vil utvikle og demonstrere en komplett leveringskjede for grønt hydrogen. Hydrogenet blir produsert igjennom PEM-elektrolyse av vann, og energien vil bli hentet fra et av de nærliggende vannkraftverkene [42].

Anngående tilgjengelig hydrogen fra Hellesylt er selskapet Norwegian Hydrogen kontaktet. Norwegian Hydrogen informerte om at det vil kreve 55,6 kWh for å produsere 1 kg H_2 på anlegget

ved Hellesylt [86]. Energiinnholdet i hydrogen er på rundt 39 kWh/kg. Det betyr at 16,6 kWh, omtrent 30 % av energien, blir borte i løpet av prosessen. Det er oppgitt at HHH vil produsere max 1 300 kg H₂ hver dag, men at produksjonen vil variere utfra tilgjengelig energi [86]. I perioder med lite energi er bedriften lovet at de alltid vil kunne produsere 780 kg H₂ [61]. Norwegian Hydrogen har som mål å kunne levere hydrogen til et kommende fartøy i Hellesylt. Det vil derfor bli prioritert å levere hydrogen til dette fartøyet når det settes i drift. Utfra samtaler med Norwegian Hydrogen er det likevel antatt at HHH vil kunne gi 100 kg H₂ til energiproduksjon i Geiranger etter at fartøyet kommer i drift [61]. Utfra denne informasjonen er det tenkt at maksimalt tilgjengelig hydrogen er 780 kg og minimalt tilgjengelig hydrogen er 100 kg.

3.2.2 Brenselceller

For å kunne bruke hydrogen til strømproduksjon må hydrogenet omformes til elektrisk energi, ved hjelp av en brenselcelle. Dette gjøres via en brenselcelle. Hovedforskjellen mellom en elektrolysecelle og en brenselcelle, er at elektrolysecellen krever elektrisk energi mens brenselcellen avgir elektrisk energi. Reaksjonen utført av en brenselcelle er vist i Reaksjonsligning 3.2 [9].



I en brenselcelle blir hydrogen pumpet inn mot den ene elektroden, der den ioniseres ved å avgi elektroner. De positive hydrogenionene driver over mot den andre elektroden, der de møter de negativt ladde oksygenioner som de slår seg sammen med, slik at det dannes vann [13, 40]. Det finnes flere ulike typer brenselceller, og de navngis etter hvilken type elektrolytt som benyttes. Når brenselet til brenselcellen er rent hydrogen vil en AFC eller en PEMFC være aktuell [1, 13]. En oversikt tilknyttet de to brenselcellene er vist i Tabell 3.1.

Tabell 3.1: Oversikt over spesifikasjoner, samt fordeler og ulemper til PEMFC og AFC [13].

Brenselcelle	Elektrolytt	Ladningsbærende ion	Virkningsgrad [%]	Driftstemperatur [C]	Fordeler	Ulemper
AFC	KOH	OH-	50-60	<100	Billige materialer CO tolerant anode Høy effektivitet	Korrosiv flytende elektrolytt CO2 intolerant Lav energitetthet
PEMFC	Sulfonert Polymer	H+	45-50	60-120	Høy energitetthet Lang levetid Lav temperatur Rask oppstart	CO intolerant Dyre materialer Komplisert vannbalanse

AFC er en av de mest utviklede teknologiene og har blitt brukt siden midten av 1960-tallet av NASA i Apollo- og romfergeprogrammene. AFC er enkle å håndtere, har svært høy virkningsgrad og egner seg godt for dynamiske driftsmoduser. De kan bygges inn i små kompakte systemer så vel som i store kraftverk. Brenselcellen har en korrosiv flytende elektrolytt. Flytende elektrolytter er brennbart, noe som kan være et problem dersom en situasjon med ukontrollert oppvarming av celler oppstår. En annen ulempe med AFC er at den har lav toleranse for CO₂ både i luft- og brenselstrøm, dette kan føre til utfelling av karbonatsalt [1, 13].

Nesten alle hydrogenbiler produsert i dag lages basert på PEMFC. Dette gjør at brenselcellen har kommet langt i utviklingen mot kommersielle fartøy. Som følge av dette har fremvekst av AFC avtatt de siste årene. En stor fordel med PEMFC er at de gir høy energitetthet, noe som betyr at de kan være små og kompakte. PEMFC kan tåle relativt høyt trykk over membranen og har en lang levetid. Den største ulempen med PEMFC er at edelmetallkatalysatoren er følsom

for CO-forgiftning. For å løse dette problemet tilsettes litt oksygen til anodegassen slik at CO oksideres til CO₂. Dette gir imidlertid lavere strømutflytning. En annen ulempe er de høye materialkostnadene på grunn av platina som brukes som katalysator [1, 13].

Det finnes flere forskjellige typer PEMFC og markedet for disse er stort. Tabell 3.2 viser et utvalg av PEMFC. Kostnadene til PEMFC er antatt å ligge på 1 875 dollar for en FC på 5kW [4] som gir en pris på 3 930 kr/kW. Levetiden til en PEMFC er antatt å ligge på 15 år [44].

Tabell 3.2: Oversikt over noen utvalgte PEMFC som finnes på markedet.

Produsent	Produktnavn	$L \cdot B \cdot H$ [mm]	Effekt [kW]	Virkningsgrad [%]	Kilde
Hydrogenics	HyPM XR	813 · 446 · 301	4,5–12,5	51–53	[43]
Ballard	FCgen-1020ACS	143 · 41 · 138	0,45–3,6	55	[22]
Ballard	FCgen-1300	L = 233–473	2,4–10,5	54–64	[23]
Ballard	FCvelocity-9SSL	92\302 · 760 · 60	3,8–21,2	52	[24]

3.2.3 Vann som biprodukt

En mulig utfordring med å produsere energi med en brenselcelle, er vannmengden som biprodukt fra reaksjonen. Det er derfor viktig å vite hvor mye vann som potensielt kan bli produsert, og deretter finne mulige løsninger for hva som kan bli gjort med dette vannet. For å beregne mengden vann som blir produsert av en viss mengde H₂, brukes forholdet mellom massen m [g], den molare massen M [g/mol] og stoffmengden n [mol], som vist i Ligning 3.3 [9].

$$m = M \cdot n \quad (3.3)$$

Oversikt over molar massen til H₂ og H₂O, og massen av H₂ presenteres i Tabell 3.3. Den molare massen er hentet fra formelboken *SI chemical data* [9].

Tabell 3.3: Oversikt over den molar massen til H₂O og H₂ og massen til H₂.

Stoff	Masse, m [kg]	Molar masse, M [g/mol]
H ₂	780	2,02
H ₂ O	-	18,02

3.2.4 Sikkerhet og regelverk knyttet til anvendelse av hydrogen

Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) er Norges fagmyndighet for brannfarlige, reaksjonsfarlige, trykksatte og eksplosjonsfarlige stoff, inkludert hydrogen. DSB er også forvaltningsmyndighet for elektrisk sikkerhet, som omfatter kravene til sikker utførelse og bruk av forsyningsnett og elektriske installasjoner. Dette inkluderer produksjonsanlegg for hydrogen, batterilager og ladestasjoner for elektriske kjøretøy.

Reguleringer og krav knyttet til håndtering av hydrogen er regulert i forskriften om håndtering av farlig stoff [27]. Denne forskriften krever at det utføres en risikovurdering for hydrogenanlegg, og at anleggene må bygges og kontrolleres etter anerkjent norm for å sikre tilstrekkelig sikkerhet for tredjeperson. Videre pålegger forskriften virksomheter å dokumentere om det er behov for arealmessige begrensninger rundt anlegg for håndtering av hydrogen. Sikker plassering må tas i betraktning ved etablering av hydrogenanlegg. DSB har utarbeidet en temaveiledning som

inkluderer sikkerhetsavstander for blant annet fyllestasjoner for hydrogen til personbiler [17]. Sikkerhetsavstandene til fyllestasjonen skal ha en indre sone med diameter på 65 m, midtre sone med diameter på 85 m og ytre sone med diameter på 100 m [15]. Indre sone skal bare inneholde anlegget, midtre sone kan inneholde veier og kontorbygg, mens ytre sone kan inneholde boligområder og butikker [17]. Dette er krav som gjelder hydrogenanlegg og fyllestasjon. Siden anlegget som undersøkes i denne rapporten vil bestå av en stillestående brenselcelle, fylling av cellen og lagring av hydrogen ansees denne forskriften som aktuell.

Under driftsfasen av hydrogenanlegg er det viktig å følge forskrift om helse og sikkerhet i eksplosjonsfarlige atmosfærer [26]. Stasjonært utstyr som brukes til håndtering av hydrogen må oppfylle kravene i forskrift om trykkpåkjent utstyr [29], og transport av hydrogen må følge kravene i forskrift om landtransport av farlig gods [28]. Virksomheter som oppbevarer 5 tonn hydrogen eller mer, må også følge storulykkeforskriften [76]. Disse fire forskriftene er direktivbaserte, som betyr at kravene i disse forskriftene tilsvarer regelverket i andre EU/EØS-land. Forskrift om håndtering av farlig stoff er en nasjonal forskrift [27].

3.3 Solceller

Solcelle er en teknologi som omdanner energi fra sollys til nyttig elektrisk energi. En typisk solcelle består av to silisiumhalvledere mellom to elektroder. Den ene halvlederen er n-type og består av negativ ladning, mens den andre er p-type og består av positiv ladning. De to halvlederne er plassert ved siden av hverandre, slik at de danner en p-n-overgang. Ved denne overgangen dannes et elektrisk felt. Når lys treffer denne overgangen, vil noen av fotonene kaste ut elektroner fra atomene i halvlederen. De kastede elektronene vil så bli fanget av det elektriske feltet ved p-n-overgangen og føres til elektrodene, der det genereres en elektrisk strøm. Solcellene må kobles sammen for å danne større solcellepanel som kan levere større effekt [63].

Når det gjelder tilgjengeligheten av slik energi er sol en av de raskest voksende energikildene i verden, og NVE forventer en vekst i produksjon fra solceller i Norge på om lag 6,8 TWh frem mot 2040 [54]. Kostnadene for solceller har gått kraftig ned, og fra 2010 til 2020 gikk totalkostnaden per produserte Watt ned med 85% [54]. Den store nedgangen i prisen skyldes de lave materialkostnadene og stabile byggekostnadene.

Solkart.no gir estimater av kostnader for å plassere solceller på et valgt tak i Norge, samt årlig energiproduksjon for gitt plassering. Norkart AS står for analyse av takvinkel, mål og himmelretning av eiendommene, og gir en vurdering på hvor godt taket er egnet for solceller. Det tas også høyde for skygger fra fjell. Dataen som brukes for å gi en antydning på hvor mye solinnstråling som gitt lokasjon vil gi er hentet fra PVGIS, som er EU sitt solkartprogram. PVGIS bruker solstrålingsdata av høy kvalitet hentet fra satellittbilder, samt omgivelsestemperatur og vindhastighet fra klimareanalysemodeller. Disse dataene blir igjen behandlet i forhold til faktiske målinger som er gjort hos deres kunder de siste 10 årene. Lokale skyggeforhold er ikke tatt hensyn til når årlig produksjon blir estimert [74].

3.4 Powerbarge

I prosjektet Grønn Kai 2022 [81] ble det undersøkt hvordan en *powerbarge* kan lade sightseeing nullutslipp-fartøyet, beskrevet i kapittel 6, i Geiranger [81]. En powerbarge er en type flytende energilager som kan brukes til å transportere overskuddsenergi fra energikilder langs kysten

med høy energiproduksjon og frakte denne energien langs sjøveiene til steder med høy energietterspørsel. Powerbargen kan dermed utnytte sjøveien for å frakte energi til Geiranger.

I prosjektet ble alternativene batteri og svinghjul undersøkt som energilager på powerbargen [81], men det ble konkludert med at svinghjul var det beste alternativet. Powerbargen med svinghjul som energilagringssystem undersøkes derfor som en mulighet i denne rapporten. Powerbargen er designet for å lagre en energimengde på totalt 13 988 kWh. Powerbargen skal både forsyne energi til sightseeing nullutslipp-fartøyet 4 ganger, forsyne seg selv med energi for å reise tur-retur fra Hellesylt til Geiranger i tillegg til å ha en sikkerhetsmargin på 10 % [81]. Energien som er tilgjengelig fra powerbargen vil derfor være energiforbruket til nullutslipp- sightseeingfartøyet tur-retur mellom Geiranger og Hellesylt multiplisert med fire. Videre i oppgaven blir powerbargen sett på som et energilager av svinghjul det kan kjøpes energi fra direkte.

4 Energilagring

Elektrisk energi kan defineres som elektrisk arbeid, og skyldes elektriske krefter fra elektroner i bevegelse gjennom en leder. Ligning 4.1 viser forholdet mellom elektrisk energi E , effekt P og tid t [36].

$$E = P \cdot t \quad (4.1)$$

Elektrisk energi kan ansees som ferskvare. Med dette menes at energien må forbrukes på samme tidspunkt som den produseres. I takt med større elektrifisering av samfunnet i tillegg til utviding av fornybar energiproduksjon, kan slik ferskvare av elektrisk energi føre med seg store problemer. Elektrifisering av samfunnet bidrar til at effektbehovet blir større og mer varierende. Implementering av fornybare energikilder gir samtidig uforutsigbar, variabel og ikke-regulerbar energiproduksjon, siden det er væravhengig [13]. Dårlig samsvar mellom forbruk og produksjon av energi fører til at det i tilfeller er for lite energi i forhold til det som trengs, mens det i andre tilfeller er overskuddsenergi som ikke vil bli brukt. Ved hjelp av energilagring kan overskuddsenergi heller lagres når det er lite behov, og dermed forbrukes når etterspørselen av energi er høy [69]. Energilagring kan altså ansees som en viktig teknologi i overgangen til et mer robust, fleksibelt og fornybart energisystem.

Begrepet energilagring tar utgangspunkt i loven om bevaring av energi. Denne sier at energi kan verken oppstå eller forsvinne, den kan bare gå over fra én form til en annen [14]. Når det er snakk om lagring av elektrisk energi, skjer dette altså ved å omforme den elektriske energien til andre energiformer [37]. Eksempler på slike energiformer er elektrokjemisk energi i batteri, kjemisk energi i hydrogen og mekanisk energi i et svinghjul.

Forskjellige teknologier for energilagring gir forskjellige fordeler, avhengig av bruksområde. I denne rapporten skal det undersøkes hvordan svinghjul kan benyttes som et energilager i en hurtigladestasjon for elektriske fartøyer. For slike hurtigladestasjoner er litium-ionbatterier (LIB) en moden og allerede godt etablert teknologi. Teoretisk sett har likevell et svinghjul energilagringssystem (FESS) en rekke fordeler i forhold til et LIB. Videre i kapitlet beskrives grunnleggende teori om FESS, før det gåes nærmere inn på typen FESS utviklet av bedriften Spinning Energy. Til slutt gjøres en teoretisk sammenligning av FESS utviklet av bedriften Spinning Energy og et typisk LIB, ved å presenteres generelle fordeler og ulemper knyttet til begge teknologiene.

4.1 Svinghjul som et system for energilagring

FESS lagrer elektrisk energi i form av kinetisk energi. Kinetisk energi kan beskrives som bevegelsesenergi, og er i dette tilfellet bevegelsen til en roterende masse, kalt en rotor. Når energi skal tilføres svinghjulet blir rotoren akselerert ved hjelp av en integrert motorgenerator som konverterer elektrisk energi til kinetisk energi. Når energi må frigjøres fungerer motorgeneratoren som en generator og konverterer kinetisk energi til elektrisk energi [87].

Kinetisk energi E_k er proporsjonal med kvadratet av hastigheten v og massen m , som vist i Ligning 4.2 [31].

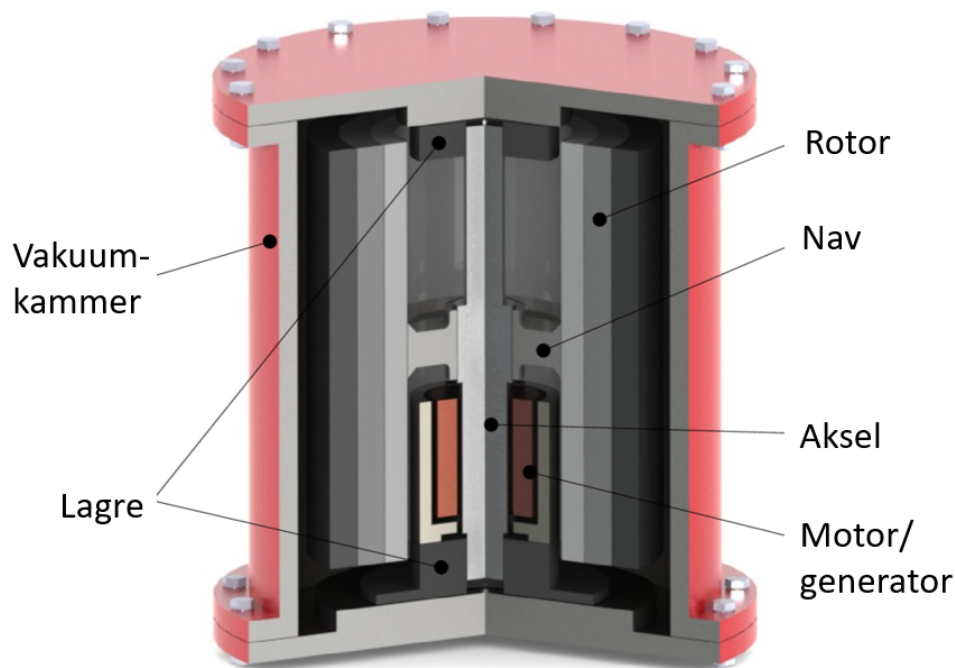
$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (4.2)$$

Dersom en masse roterer rundt sitt eget sentrum har den en roterende kinetisk energi, kalt rotasjonsenergi E_r . Rotasjonsenergien er summen av kinetisk energi fra all roterende masse. Den maksimale mengden rotasjonsenergi som kan lagres i svinghjulet er gitt av Ligning 4.3, der ρ er massetettheten til materialet, ω er rotasjonshastigheten til rotoren og r er radiusen [13].

$$E_r = \int dE_k \cdot dr = \frac{\pi^3 \cdot \rho \cdot \omega^2}{60^2} \cdot r^4 \quad (4.3)$$

4.1.1 Design og komponenter tilknyttet et svinghjul som energilagringssystem

Figur 4.1 illustrerer de viktigste komponentene i et typisk FESS.



Figur 4.1: Modell av en typisk FESS-modul, tilhørende plassering av komponenter [5].

Hovedkomponentene består av en rotor, en aksel, et nav, en duofunksjonell motor/generator, lagre og et lukket vakuumkanmer. Rotoren er komponenten som hovedsaklig lagrer rotasjonsenergi. Denne roterer i et nesten friksjonsfritt vakuumkanmer. Vakuumkanmeret vil først og fremst hindre friksjonstap i rotoren som følge av luftmotstand, men det gir også økt sikkerhet siden det hindrer eventuelle løse gjenstander i høy rotasjonshastighet å treffe omgivelsene. Videre brukes lagre til å holde rotoren i posisjon. Avhengig av bruksområdet til svinghjulet er det to typer lagre som brukes til dette formålet, kulelagre og magnetiske lagre. Magnetiske lagre muliggjør for at rotoren holdes i kontaktfri posisjon, og hindrer dermed friksjonstap som følge av berøring [39]. kulelagre er enklere, vanligere og billigere enn magnetiske lagre, men gir større energitap som følge av friksjon. Til slutt er rotoren koblet til en motorgenerator ved hjelp av en aksel og et nav. Motorgeneratoren brukes til opplading og utlading av FESS [39].

Ytelsen til svinghjulet avhenger av materialegenskapene til rotoren. Som vist i Ligning 4.3 er mengde energi som kan lagres i FESS avhengig av rotorens massetetthet, radius og rotasjonshas-

tighet. Likevel begrenser disse variablene også hverandre. Grunnen til dette er at et roterende objekt i både stor hastighet og høy massetetthet påfører objektet store sentrifugalkrefter. Hvor store sentrifugalkrefter rotoren tåler avhenger av strekkstyrken til materialet. Med strekkstyrke menes den maksimale spenningen som kan påføres materialet før det går i oppløsning og sprekker [41]. Derfor er det viktig å velge et rotormateriale med høy strekkfasthet, slik at rotoren kan rotere med høy hastighet, men likevel stå i mot de store sentrifugalkreftene.

Sentrifugalkreftene som følge av rotasjon, fører også til strekking av materialet. At materialet strekker seg gjør ingen skade så lenge strekkkreftene er mindre enn elastisitetsmodulen, altså E -modulen til materialet [13]. E -modulen beskriver et materials motstand mot elastisk deformasjon. Elastisk deformasjon er deformasjon som er fullstendig gjenvunnet når strekkkreftene fjernes og beskriver stivheten til materialet [13]. Når et FESS roterer med maksimal rotasjonshastighet lagres omtrent 10 % av lagret energimengde som strekking av materialet.

4.1.2 Ulike typer energilagringssystem av svinghjul

Et FESS kan deles inn i 3 forskjellige typer: Lavhastighet FESS (LSF), høyhastighet FESS (HSF) og mikro-høyhastighet FESS (mikro-HSF). Tabell 4.1 viser egenskaper tilnyttet de tre typene.

Tabell 4.1: Egenskaper tilknyttet LSF, HSF og mikro-HSF [87].

Egenskaper	Lavhastighets FESS (LSF)	Høyhastighets FESS (HSF)	Mikro-høyhastighets FESS (micro-HSF)
Rotasjonshastighet ω [rpm]	<10 000	>10 000	>10 000
Rotormateriale	Stål	Karbon- eller glassfiber kompositt	Karbon- eller glassfiber kompositt
Lager type	kulelagre	Magnetiske lagre	kulelagre
Spesifikk energi, e [Wh/kg]	Ca. 5	>100	Ca. 10
Vekt, m [kg]	Varies	Varies	15 – 60
Antatt antall ladesykluser [stk]	$10^5 - 10^7$	$10^5 - 10^7$	$10^5 - 10^7$
Antatt levetid [år]	Ca. 20	Ca. 20	Ca. 20

LFS er en nokså moden teknologi når det gjelder FESS, med en eksistens på over 30 år. Rotoren består av isentropiske materialer, vanligvis stål, holdes på plass av kulelagre og roterer med en rotasjonshastighet på mellom 1000 og 10 000 rpm. Denne typen basserer seg på stor radius og lav rotasjonshastighet. Dette gir ulempen med at den har et relativt høyt volum i forhold til mengde energi som kan lagres, og dermed tar opp mye plass. Det er derimot lave kostnader knyttet til produksjon, og LFS kan dermed være et greit alternativ dersom prisen er den begrensede faktoren.

HSF er en teknologi som er relativt ny. Derfor eksisterer det generelt lite informasjon og få rapporter om HSF. Rotoren består av komposittmaterialer som karbon- og glassfiber og holdes på plass av magnetlagre. Slike komposittmaterialer har høyere strekkstyrke en stål og rotoren kan dermed rotere med mye høyere rotasjonshastighet for samme radius og massetetthet. At rotoren holdes i posisjon av magnetlagre gir også høy virkningsgrad og lenger mulig lagringstid. Denne typen FESS kan altså lagre større mengde energi på et mindre volum og over lenger tid, men har ulempen med høye kostander i forhold til produksjon.

Mikro-HSF er lette og kompakte, og lagrer dermed relativt lite energi. De er ganske like HSF, men siden rotoren holdes på plass av kulelagre er de mindre effektive, men mer stabile [87].

4.2 Svinghjul utviklet av Spinning Energy

FESS som utvikles av bedriften Spinning Energy er av typen HSF. Spesifikasjonene til denne typen FESS presenteres i Tabell 4.2.

Tabell 4.2: Spesifikasjoner til FESS utviklet av Spinning Energy [11].

Spesifikasjoner	Verdi
Vekt per FESS + fundament [kg]	1 253
Vekt fundament [kg]	53
C-rate [C]	10
Volumetrisk densitet [Wh/L]	250
Virkningsgrad [%]	98
Tap inn i systemet [%]	4
Tap ut av systemet [%]	4
Systemet virkningsgrad [%]	92
Standby tap [% per døgn]	1
Levetid [år]	20
Effekt per FESS [kW]	1 000
Energi per FESS [kWh]	250
Rotasjonshastighet [rpm]	37 500
Vekt per ermanent magnet motor [kg]	500
Vekt per rotor [kg]	63
Vekt for motor + rotor [kg]	563
Systemkostnader [USD/kWh]	500

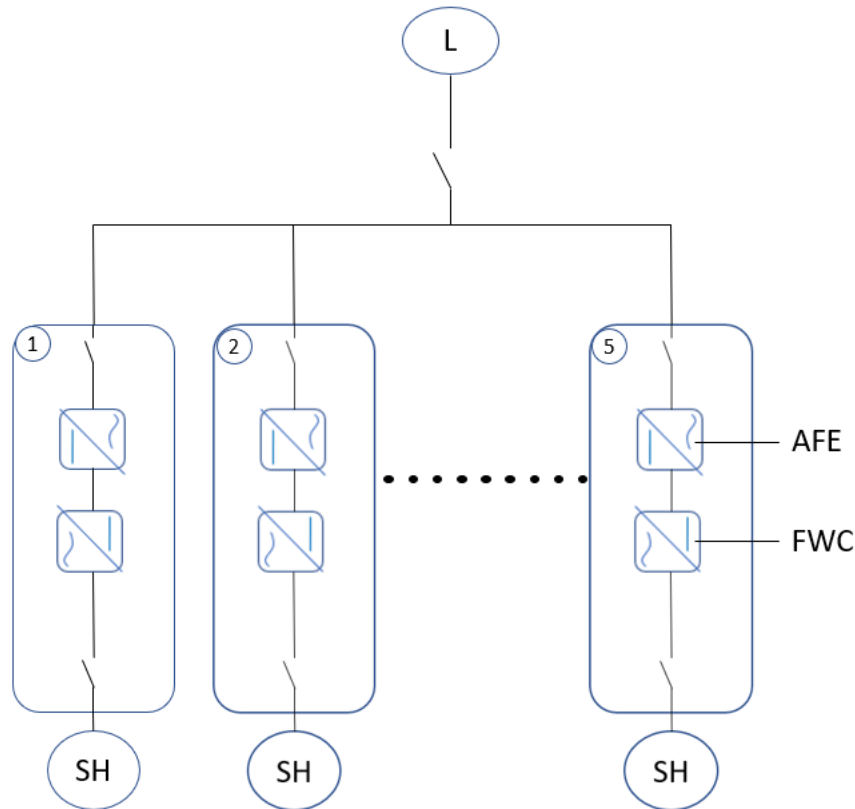
Status på teknologien i dag

FESS utviklet av Spinning Energy er en relativt ny teknologi med lite tilknyttet, dokumentert informasjon. Moden teknologi på lavhastighets FESS har blitt bevist at har såpass store energitap tilknyttet den roterende massen, til at de skal fungere godt nok som system for å lagre store energimengder over lengre tid. Høyhastighets FESS utviklet av Spinning energy har derimot en systemvirkningsgrad på 92 % og videre 1 % standby tap per døgn. Dette betyr at en FESS-modul fra Spinning Energy kan lagre energi over en lengre periode enn for lavhastighets FESS, før den roterende massen vil bremse opp og tape all rotasjonsenergien. Spinning Energy er i oppstartfasen med produksjon av høyhastighets FESS og har derfor ingen ferdigstilte prosjekter ennå [62].

Med tanke på bruksområder for høyhastighets FESS utviklet av Spinning Energy er de best egnet i landbaserte anlegg, der grunnen er stødig og ikke bidrar til ytterligere påvirkning av bevegelsen til den roterende massen. Spinning Energy driver derimot med testing for å kunne plassere FESS på en suppleringsbåt som skal hekte seg fast i større elektriske båter og forsyne de med energi fra FESS. På denne måten slipper de store fartøyene å seile inn igjen til land for å fylle. De driver også med forskning på hvordan FESS kan benyttes som energisystem, istedet for LIB, om bord i en elektrisk båt, for å redusere ladetid og bidra til bedre utnyttelse av tilført energi [62].

Svinghjul fra Spinning Energy som ladestasjon

En ladestasjon av FESS vil fungere ved at energilageret samler opp energi fra ulike energikilder, som kan brukes til å forsyne elektriske fartøy. Energilageret består av separate containermoduler på 20 fot. En slik 20 fots container vil ha plass til 5 stk FESS med tilhørende tilleggsystemer [62], som illustrert i Figur 4.2.



Figur 4.2: Prinsippkisse for et containerbasert FESS [5].

I Figur 4.2 er det oppgitt flere forkortelser som skal beskrive den enkelte komponenten. SH står for svinghjul og beskriver en egen svinghjulmodul uten tilleggsystemer. SH pluss tilleggsystemer, inkludert AFE og FWC, beskriver en enkelt FESS. L står for last og inkluderer strømmen som blir sendt inn fra grunnlast og spisslast, og strømmen som blir sendt ut til forskjellige energibehovene. FWC står for Flywheel Controller og kontrollerer og overvåker statusen til kritiske driftsparametre for FESS [5]. AFE står for Active Front End og fungerer som en kontrollert like-rettet [5]. Her blir strømmen styrt til å være sinusformet og i fase til nettspenningen. En fordel med AFE er deres evne til å håndtere regenerativ kraft. Dette betyr at motoren kan operere som en generator og frakte energi inn eller ut av FESS-modulen [38]. Dette eliminerer behovet for store motstandsbanker for å spre den regenererte energien og reduserer kostnadene.

4.3 Teoretisk sammenligning av svinghjul fra Spinning Energy og et typisk litium-ionbatteri

I motsetning til FESS som lagrer elektrisk energi i form av rotasjonsenergi, lagrer LIB elektrisk energi i form av elektrokjemisk energi. Kort forklart består et LIB hovedsaklig av en positiv elektrode kalt katode, en negativ elektrode kalt anode og en organisk elektrolytt som transporterer ioner mellom elektrodene. Anoden består vanligvis av grafitt og katoden av litiumoksid.

Når batteriet lades ut overføres positive litium-ion fra anode til katode gjennom elektrolytten. Dette skaper ubalanse i cellen, som gjør at negative elektroner blir overført fra anode til katode gjennom en ytre krets, og avgir elektrisk strøm. Når batteriet lades opp blir elektrisk strøm tilført batteriet slik at reaksjonen reverseres [13]. Fordeler og ulemper knyttet til et typisk LIB og FESS fra Spinning Energy er presentert i Tabell 4.3. De fleste av spesifikasjoner for LIB i tabellen er hentet fra *Engineering Energy Storage* skrevet av Odne Burheim [13], mens kostnadene til et LIB er hentet fra *BloombergNEF* [10]. Spesifikasjoner for FESS er innhentet gjennom kommunikasjon med bedriften Spinning Energy [62].

Tabell 4.3: Sammenligning av ulike spesifikasjoner for FESS fra Spinning Energy og et typisk LIB.

Spesifikasjoner	FESS	LIB
Virkningsgrad [%]	98	90 – 98
Standby tap [%/døgn]	1	; 0,2
Energitetthet [Wh/kg]	250	150 – 250
Levetid [år]	+20	10
Levetid [1000 sykluser]	>1 000	1 – 20
C-rate [C]	10	3
Temperaturspenn [°C]	-40 – 80	-20 – 50
Anbefalt SoC-spenn [%]	0 – 100	20 – 80
Giftige materialer	Ingen	Flere
Brannsikringssystem nødvendig	Nei	Ja
Tilpasningsdyktig design og form	Nei	Ja
Kostnad [NOK/kWh]	5 295	1 581

Både FESS fra Spinning Energy og et typisk LIB har relativt høy virkningsgrad [13, 62]. En forskjell kan derimot knyttes til at FESS har høy selvutlading på grunn av standby tap i systemet. Standby tap er energitap av lagret energi i systemet når denne ikke genereres, altså når energien i systemet ikke brukes. Et FESS har et relativt høyt standby tap, på 1 % per 24 timer [62]. Et typisk LIB har et omtrentlig standby tap på mindre enn 0,2 % i døgnet, som tilsvarer at mindre enn 5 % av energien går tapt i løpet av en måned [60]. En utfordring med LIB er derimot at virkningsgraden synker i takt med antal ladesykluser, på grunn av tap av litiumbeholdning og av aktivt materiale [21]. Slikt tap kalles degradering av batteriet. Sett bort fra standby tap har FESS en stabil virkningsgrad gjennom hele levetiden [62].

FESS fra Spinning Energy har en levetid på over 20 år og kan utføre mer enn 1 000 000 opplading- og utladingssykluser i løpet av sin levetid. Det er også lave kostnader knyttet til vedlikehold og levetid [62]. For en LIB er levetiden satt til 10 år med mellom 1 000–20 000 opplading- og utladingssykluser, og krever regelmessig vedlikehold [13].

FESS og LIB har relativt lik energitetthet, men et nokså ulikt State of Charge (SoC)-spenn. SoC beskriver oppladingsnivået i forhold til energikapasiteten, og handler om hvor mange prosent oppladet energilageret er [13]. Et LIB er ofte anbefalt å holdes innenfor 20–80 % SoC [13]. Dette på grunn av at batteriet er sensitivt for fullstendig utlading og opplading gjentatte ganger. Et slikt lademønster vil degradere batteriet over tid [13], og redusere virkningsgraden. FESS vil derimot ikke påvirkes av fullstendig utlading og opplading og kan ha et SoC-spenn på mellom 0 og 100 % SoC. På denne måten trengs det ikke å overdimensjoneres for lagringskapasiteten. Til tross for lik energitetthet vil derfor et LIB kreve større energimengde enn et FESS for å kunne forsyne samme energimengde.

Med stor C-rate har FESS evnen til å overføre store energimengder over en kort tidsperiode, noe som kan være gunstig i situasjoner der rask energioverføring er nødvendig. Dette gjør FESS spesielt egnet for applikasjoner som krever høy effekt. LIB har derimot generelt en lavere C-rate sammenlignet med FESS, noe som begrenser deres evne til å håndtere høy energioverføring på kort tid.

LIB er sensitive mot temperaturforandringer. Et generelt temperaturspenn ligger omtrentlig på mellom -20°C og 50°C [13]. Annerledes temperaturforhold resulterer i forskjellige uheldige effekter. Et eksempel er at ved for lav temperatur vil batterikapasiteten reduseres betydelig på grunn av at kjemiske reaksjoner inne i batteriet vil bremse ned [72]. Et annet eksempel er at LIB kan begynne å brenne og frigjøre giftige gasser. LIB inneholder blant annet en organisk løsningsvæske som er svært brennbar dersom den antennes. Dersom den organiske løsningsvæsken begynner å brenne dannes det giftig røykgass inne i batteriet. Røykgassen er svært eksplosiv og vanskelig å slukke. Generelt sett er det liten sannsynlighet for at et LIB begynner å brenne, men dersom en brann skulle oppstå er konsekvensene så store at det stilles strenge krav til installasjon av batteriet og ekstra brannsikringssystemer tilknyttet batteriet [66]. FESS er ikke like sensitive for temperaturforandringer og kan operere rundt en videre temperaturrate, men har heller risiko tilknyttet at deler kan løsne fra den raskt roterende massen [30].

LIB har en fordel når det gjelder fleksibilitet på grunn av tilpasningsdyktig form og design. De kan tilpasses ulike former og størrelser, avhengig av bruksområdet og tilgjengelig plass [52]. Dette gjør dem godt egnet for applikasjoner der det er begrenset plass tilgjengelig. FESS er derimot begrenset av sin faste form, som er avhengig av faktorer som massetetthet, rotasjonshastighet og rotorradius for å oppnå optimal energitetthet [13]. Imidlertid kan FESS plasseres på steder der det kan være sikkerhetsmessige bekymringer knyttet til LIB, for eksempel brannfare.

Et LIB har en kostnad på omtrent 1 581 NOK per kWh [10], mens FESS fra Spinning Energy har en kostnad på rundt 5 295 NOK per kWh [62]. Dette betyr at et FESS er over tre ganger dyrere enn et LIB. Det kan tenkes at kostnadene til en FESS-modul vil minske når teknologien blir mer utbredt og produksjonen mer industriell.

5 Økonomiske og miljømessige vurderinger av en teknologi

For å ta beslutninger tilknyttet om en ladestasjon av FESS vil være en god løsning, er det viktig å gjøre økonomiske og miljømessige vurderinger.

5.1 Økonomisk vurdering

Er det ikke økonomisk lønnsomt å innføre en ladestasjon av FESS kan det bli vanskelig å få støtte og derav få det gjennomført. Økonomisk lønnsomhet kan beregnes utfra sammenhengen mellom inntekt fra teknologien og kostnader tilknyttet investering av teknologien. En metode for å finne ut om en investering vil lønne seg er å undersøke netto nåverdi (NNV). NNV viser verdien av en investering i nåværende verdi utfra en bedriftøkonomisk beregning [32]. Når NNV settes som null, gir det en investering som går i null i løpet av en gitt levetid. Lønnsomhet beregnes dermed ved å undersøke om NNV kan være større enn null. Likning 5.1 viser sammenhengen mellom NNV , investeringskostnaden G i år nr. 0, netto inntekt a per år, kalkulasjonsrenten k per år og levetiden N til teknologien [82].

$$NNV = -G + a \cdot \frac{1 - (1 + k)^N}{k} \quad (5.1)$$

Kalkulasjonsrente er den avkastningen som kreves for å få gjennomført en investering. Kalkulasjonsrenten vil påvirkes av flere faktorer eksempelvis hvilken bank som brukes, økonomiske situasjonen i verden og landet, risiko for prosjektet og inflasjon [73]. Den vil også påvirkes utfra om det fastrente eller en flytende rente. Begrepet fastrente brukes for renter som er bindene for en gitt tid, mens flytende rente brukes for renter som følger styringsrenten [2]. Ved å velge en fastrente trengs det ikke å bekymre seg for en eventuell rentestigning i styringsrenten. På den andre siden kan det også skje at renten faller. Hvis det er valgt en flytende rente vil det da resultere i en lavere rente.

5.2 Miljømessig vurdering

Livsløpsvurdering (LCA) er en vurdering av et livsløp der miljøaspekt og ressurspåvirkninger gjennom et livsløp til et produkt eller produktsystem kartlegges og vurderes. Ved hjelp av en bærekraftsanalyse dokumenteres de totale miljøbelastningene knyttet til produktet. I tillegg kartlegges de viktigste miljøproblemene for systemet, hvor i livsløpet miljøproblemene oppstår og hvor det er størst potensial for produktforbedring. ISO 14040 viser rammeverket [57] og ISO 14044 viser krav og retningslinjer for en LCA analyse [56].

Standaren ISO 14040 og ISO 14044 har delt opp LCA-studie i fire faser; hensikten og omfang, livsløpsinventar (LCI), livsløpseffektvurdering (LCIA) og livsløpstolkning. Den første fasen setter systemgrensene til analysen utfra hva målet med analysen er. LCI-fasen er innsamling og prosessering av data i henhold til hensikten og omfanget. LCIA-fasen gir resultater for påvirkende kategorier som beregnes bassert på dataene samlet inn i LCI-fasen. Den siste delen er tolkningsfasen som konkluderer resultatene fra LCI og/eller LCIA fasen, gir anbefalinger til forbedringer og andre kommentarer. Detaljnivået varierer og er avhengig av formålet med studien, men målet er likevell alltid å gi en helhetlig vurdering av produktets miljøpåvirkning [56, 57].

Systemgrensen til et system varierer utfra hensikten med analysen. Ofte brukt systemgrense er *cradle-to-cradle*. Denne systemgrensen dekker alt i fra utvinning av råmateriale til resirkulering av produktet, det blir da gjort en vurdering av hele livsløpet til produktet.

6 Metode

I dette kapittelet blir fremgangsmåte og antagelser til oppgaven presentert. Programmene MATLAB og Microsoft Excel er brukt for beregninger, og programmet OpenLCA er brukt for gjennomføring av livsløpsvurderingen. Teorien som er tatt i bruk for gjennomføring av oppgaven er hentet fra faglitteratur, pensumbøker og fagrapporter, samt informasjon fra mentorbedriften Spinning Energy, prosjektet Grønn Kai [46, 81] og andre aktører. Informasjon om innhenting av ulike data og usikkerheter knyttet til metoden blir presentert underveis.

6.1 Presentasjon av scenarier

Tabell 6.1 fremstiller fire ulike scenarier for tilgjengelige kilder til energi som kan lagres på en ladestasjon med FESS. Fordeling av spisslast og grunnlast i ulike scenarier er gjort på bakgrunn av hva som vil være enklest og mest sannsynlig å få til.

Tabell 6.1: Fremstilling av scenarier med ulike kombinasjoner av grunnlast og spisslast.

	Strømnettet (SN)	Solceller (PV)	Hydrogen (H ₂)	Powerbarge (PB)
Scenario 1	x			
Scenario 2	x	x		
Scenario 3	x	x	x	
Scenario 4	x	x	x	x

Energi fra strømmettet blir satt som grunnlast, siden dette er den eneste av energikildene som faktisk er tilgjengelig i Geiranger i dag. Dersom grunnlasten ikke er nok til å dekke energibehovet som trengs, må det suppleres med eventuell spisslast. Spisslast er i denne rapporten energi fra solceller, hydrogen og powerbarge. Solceller er en teknologi som er enkelt å installere og lett tilgjengelig. For en bygd som har lite overskuddsenergi kan installering av solceller antas som en lettvinnt metode for å øke energimengden, og solceller anses derfor som en aktuell løsning. Energiproduksjon fra hydrogen er en krevende prosess som inkluderer fylling og drift av brenselcelle og lagring av hydrogen. Dette innebærer mye sikkerhet og regelverk, som gjør teknologien mer kostbar og dermed mindre tilgjengelig. På grunn av produksjonen av hydrogen på Hellesylt ansees likevel denne teknologien som mer tilgjengelig enn powerbargen. Powerbargen fra Grønn Kai 2022 [81] er kun et konsept, og er ikke realisert til bruk i Geiranger enda. Powerbargen ansees derfor som minst aktuell, men fortsatt verd å undersøke i forhold til hva et slikt fartøy vil gjøre for Geiranger.

6.2 Beregning av energibehov, effektbehov og ladetid for ulike lastprofiler

Energibehovet til lastprofilene beregnes utfra mengde informasjon som er gitt for hvert enkelt fartøy. Ladetid og effektbehov beregnes ved hjelp av sammenhengden mellom energi, effekt og tid, i Ligning 4.1. Avhengig av om det er begrenset tidsrom for lading eller om det er begrenset mulig effekt som kan overføres til fartøyet, må formelen snus om slik at de begrensede faktorene står på høyre side.

Etter at energibehov, effektbehov og ladetid er undersøkt utvikles en såkalt prioriteringsliste av fartøyene. Dette gjøres utfra antagelser om sannsynlighet for fartøyets eksistens i Geirangerfjorden.

RIB-båter fra Bonseye AS til sightseeing gjennom Geirangerfjorden

Det er allerede laget en konkret plan for drift av de to elektriske RIB-båtene fra Bonseye AS. Når det undersøkes mulighetene for drift av de elektriske RIB-båtene tas det likevel utgangspunkt i målet om at alle 4 båtene skal gjøres helelektriske innenn 2030. Beregninger på totalt energibehov gjøres dermed for drift av fire elektriske RIB-båter.

Utfra dialog med eier av selskapet Bondseye AS, Frank Ole Bonsaksen, er det meningen at de to elektriske RIB-båtene skal lades annenhver gang, totalt syv ganger til sammen per dag [11]. Hvor mange oppladninger som vil forekomme dersom det blir mulighet for at fire elektriske båter skal lades opp, foreligger det ikke informasjon om. Det er da gjort antagelse om at antall oppladninger vil dobles, altså at det vil forekomme totalt 14 oppladninger til sammen hver dag. Ytteligere driftsprofil er ikke oppgitt, og det antas dermed at båtene kjører så langt energimengden i batteriet klarer å forsyne. Total energimengde i batteriet antas å være 60% av batterikapasiteten, som er anbefalt opplading for et LIB. Fullstendig utlading og opplading vil medføre degradering over tid. Mulig ladeeffekt som kan overføres til RIB-båtene ansees som den begrensede faktoren, siden ytterligere driftsprofil og dermed maksimal ladetid ikke er oppgitt.

Elektriske fjordcruisebåter til frakting av cruiseturister mellom Hellesylt og Geiranger

For drift av elektriske fjordcruisebåter tas det utgangspunkt i driftsprofilen fra sluttrapporten for Grønn Kai 2022 [81], siden dette er nyeste planlagt driftsprofil. Driftsprofilen i Figur 2.4 viser planlagt drift av to stk elektriske båter, på strekningen mellom Geiranger og Hellesylt. Dermed kan både *Future of the Fjords* og *Nullutslipp sightseeing-fartøy* brukes til dette formålet. Det gjøres en antagelse om at ladestasjonen med FESS kan forsyne en nokså stor mengde energi, og at all opplading dermed kan skje i Geiranger sentrum.

For *Nullutslipp sightseeing-fartøy* er det oppgitt et konkret energibehov for strekningen Geiranger–Hellesylt–Geiranger (22 NM), i Tabell 2.3. Energiforbruket er 60% av batterikapasiteten. For *Future of the Fjords* er det ikke oppgitt energibehov på denne strekningen. Det er derimot oppgitt total rekkevidde på 40 NM for et fulladet batteri. Energiforbruket for 22 NM kan beregnes ved hjelp av enhetsberegning. Angitt strekning dividert med rekkevidde per fulladet batteri gir dermed energibehovet for den angitte strekningen.

Bilferge

For drift av en eventuell hel-elektrisk bilferge tas det utgangspunkt i rutetabellen for fergesambandet Geiranger–Hellesylt i Vedlegg C. Rutetidene viser at det er størst trykk med flest avganger i sommermånedene i perioden 09.06–31.08. For å kunne dimensjonere for maksimalt energibehov tas det derfor utgangspunkt i denne perioden. To bilferger kjører om hverandre fra hvert sitt startpunkt.

Ved elektriske fergesamband er det vanlig å benytte ladestasjon på begge sider av sambandet. Det antas dermed at mengde energi som trengs fra Geiranger per dag er summen av energibehov for overfarter med startpunkt i Geiranger. For overfarter andre veien benyttes ladestasjon i Hellesylt. Energiforbruket per overfart er gitt i Tabell 2.5. Utfra Vedlegg C er det 8 avganger totalt fra fergekaia i Geiranger sentrum med 25 minutter liggeperiode til kai før neste avgang. Det antas derfor en mulig ladetid på 20 minutter. Ladetid blir den begrensede faktoren siden fergen

har en fast rute for til-kailigging. Det er derfor viktig at både energilageret som forsyner med energi klarer å gi ut stor nok effekt og at et eventuelt energisystem på fergen klarer å ta opp stor nok effekt for gitt ladetid.

Elektrisk bil

Elbiler vil ikke ha noen spesifikk driftsprofil siden dette er personlige fartøy som driftes etter eget behov. Det velges dermed å gå ut fra å kunne lade opp flest mulig enheter av elbiler per dag. Da er det gått ut fra at en opplading av en Tesla Model Y Performance tilsvarer at batteriet lades fra 10 % SoC til 80 % SoC. Ladeeffekten vil være den begrensede faktoren for dette alternativet, siden den elektriske bilen allerede er dimensjonert for en maksimal ladeeffekt.

6.3 Prioritering av lastprofiler

Utfra kartlegging av eventuelle nullutslippsfartøy som kan driftes i Geiranger, er disse lastprofilene prioritert fra 1-5 i punktlisten under. 1 har høyest prioritering og 5 lavest. Formålet med en slik prioritering er å lettere kunne fordele energi utfra tilgjengelig energimengde.

1. RIB-båter
2. Future of the fjords
3. Nullutslipps-sightseeingfartøy
4. Bilferge
5. Elbil

RIB-båtene er plassert øverst på listen siden disse er de eneste som har en konkret plan for drift i Geiranger. Siden oppgaven skrives i samarbeid med prosjektet Grønn Kai [46, 81] er det videre naturlig å videreføre planene for turisttransport som neste punkt på listen. Av de to fjordcruisebåtene har *Future of the Fjords* minst energiforbruk, bedre rekkevidde og større passasjerkapasitet, i tillegg til at båten faktisk er i drift et annet sted i dag. På grunn av dette blir *Future of the Fjords* plassert som nr. 2 på listen og nullutslipp-sightseeingfartøyet som nr. 3 på listen. Neste på listen er bilfergen. At den prioriteres som nr. 4 er på grunn av at det ikke er noen konkrete planer om å bygge om bilfergen til elektrisk drift. Sist på listen er lading av elbil. Tanken er å supplere restenergien til lading av elbiler, slik at det fungerer som en sluttlast.

6.4 Beregning av tilgjengelig energi

Tilgjengelig energi beregnes ved å undersøke hvor mye energi som er mulig å hente fra grunnlast og spisslast. Det blir undersøkt både minimal og maksimal energimengde, fordi ved å ta hensyn til ytterpunktene kan det dannes et større bilde av begrensninger og muligheter med energien. Energien fra strømmettet betegnes som grunnlast og det er allerede oppgitt en konkret tilgjengelig energimengde som er mulig å hente ut fra strømmettet [8]. I dette kapitlet undersøkes tilgjengelig energimengde for de forskjellige spisslastene.

Utfra tilgjengelig energi fra forskjellig grunnlast og spisslast skal det også gjøres et estimat for effektstrøm og oppladingsperiode for energilageret. Estimaten er gjort utfra egne antagelser om energistrømmen inn i energilageret. Energien fra strømmettet vil lades opp på nattetid mellom 00:00 og 06:00 [8], og det er dermed tenkt en konstant effektstrøm gjennom disse timene. Energien fra solcellene vil derimot ha en mer varierende effektstrøm gjennom dagen på grunn av varierende solinnstråling. Når det gjelder hydrogen trengs et tidsrom på et helt døgn for

å få gjort omgjort alt hydrogen til energi, på grunn av mengden brenselceller som er valgt. Hydrogenet vil dermed gi en konstant effektstrøm inn på energilageret. Powerbargen antas å være et eget separat energilager som ankommer Geiranger et tidspunkt hver dag, og gir dermed ingen oppladingsperiode. Det tas derfor ikke hensyn til powerbargen når oppladingsperiode undersøkes.

Hydrogen

For å kunne utnytte energien fra hydrogenet som er tilgjengelig fra HHH trengs en brenselcelle. Valget av brenselcelle står mellom AFC og PEMFC, siden begge disse bruker ren hydrogen som brensel. Utfra Tabell 3.1 er det fordeler og ulemper knyttet til begge brenselcellene, og det vil være vanskelig å velge ut det mest passende alternativet til bruk av energiproduksjon. Valget baserer seg derfor på tilgjengelighet og utbredelse av teknologien, der PEMFC virker som det bedre alternativet.

Utfra Tabell 3.2 blir FCvelocity-9SSL valgt som modul for prosjektet. Avgjørelsen begrunnes med at brenselcellen gir ut mest mulig effekt, og har en gjennomsnittlig god virkningsgrad. Ved å multiplisere massen av hydrogen med energiinnholdet på 39 kWh/kg og virkningsgraden på 52 %, fra Tabell 3.2, kan energien produsert fra brenselcellen beregnes. Ved å legge sammen virkningsgrad for elektrolysen og brenselcellen blir systemets virkningsgrad 36 %.

For å beregne mengde vann som produseres som biprodukt gjøres diverse mellomberegninger. Stoffmengden for H_2 beregnes ved hjelp av Likning 3.3 og verdiene oppgitt i Tabell 3.3. Siden H_2 og H_2O har samme antall koeffisienter, som vist i Reaksjonslikning 3.2, vil stoffmengden for H_2 være lik for H_2O . Til slutt kan Likning 3.3 benyttes på nytt for beregnes massen til H_2O , ved hjelp av verdiene for den molare massen og stoffmengden til H_2O .

Solceller

Ved plassering av solcellepanel på eksisterende bygg eller for å lage skygge på parkeringsplasser, kan det produseres fornybar energi uten å beslaglegge arealer. Nettsiden solkart.no brukes for å få en antydning på hvor mye solenergi som kan produseres i Geiranger. Estimerer fra nettsiden viser at 8 solcellepanel kan produsere 2196 kWh i året på et velegnet tak i Geiranger sentrum. Dette er vist i Vedlegg A. Det blir da antatt at ett enkelt solcellepanel vil produsere 275 kWh i året. Det blir også antatt at et panel vil være 1,7 m langt og 1 m bredt [71] og ha en levetid på 30 år [53]. Det velges å plassere solceller på taket på Geiranger brannstasjon og som parkeringsskygge for bilparkeringsplassen som ligger ved kaianlegget. Taket for brannstasjonen antas å ha et areal på $29 \times 14 \text{ m}^2$ mens parkeringsplassen antas å ha et areal på $114 \times 7 \text{ m}^2$. Samlet gir dette mulighet for 693 stk solcellepanel.

For å finne hvor mye energi solcellene kan gi per dag tas det utgangspunkt i grafen gitt i Vedlegg A. Her vises det at den estimerte produksjonen i juni måned er 18,2 % av totalproduksjonen. Ved å dele produksjonen i juni måned på antall dager i juni kan et estimat på dagsproduksjonen finnes.

6.5 Dimensjonering og mulige lokasjoner for energistasjon

Ladestasjonen består grovt sett av et container-basert FESS, egne ladebokser plassert ved hver enkelt lastprofil og kabler som overfører effekt mellom energilageret og ladeboksene. For enkelt-

hetens skyld er det valgt å plassere container-modulene på et samlet sted.

Energilageret dimensjoneres etter størst mulig tilgjengelig energimengde for hvert av scenariene. Dette gjøres for å sikre uønsket tap av energi ved eventuell manglende kapasitet på ladestasjonen. Antall FESS som trengs er beregnet ved å dividere maksimal energimengde fra hvert scenario med maksimal energimengde som kan lagres på en enkelt FESS. Maksimal mengde energi per FESS er vist i Tabell 4.2. Totalt areal for et container-basert FESS er deretter beregnet utfra at det er plass til 5 stk FESS i en container-modul på 20 fot [62]. 20 fot tilsvarer et areal på $5,9 \text{ m} \cdot 2,35 \text{ m}$, altså 14 m^2 .

For lokalisering av ladestasjon er det tenkt at det containerbaserte FESS må plasseres slik at det ikke går utover nåværende ferdsel og eksisterende bygg. Det bør også stå forholdsvis nærme de forskjellige lastprofilene, slik at kablene kan være så korte som mulig. Dette vil forhindre unødvendig energitap som følge av linjeresistans i kablene. Derfor bør også lastprofilene være plassert innenfor et mindre område. Både Bilfergen og fjordcruisebåtene har allerede tilhørende eksisterende/planlagt kaianlegg. På fergekaien er det også en eksisterende parkeringsplass for biler, som vil være passende lokasjon for en ladeboks for elbiler. Når det gjelder RIB-båtene er det antatt at disse kan gå til kai på et eksisterende kaianlegg for småbåter, ved siden av fergekaien. Disse lokasjonene vil alle være plassert innenfor tilstrekkelig avstand.

Anlegget som skal produsere energi fra hydrogen vil bestå av drift og fylling av brenselcelle og lagring av hydrogen. Det er knyttet stor risiko til både fylling og lagring av hydrogen, og dette vil påvirke lokasjonsmulighetene. For å finne mulige lokasjoner tas det hensyn til sikkerhetsavstandene til indre, midtre og ytre sone.

6.6 Analyse av økonomisk lønnsomhet

For å undersøke lønnsomheten til ladestasjonen med FESS beregnes netto inntekt når NNV settes til null, ved hjelp av Ligning 5.1. Ved å sette NNV lik null kan det undersøkes grensen mellom hvilken netto inntekt som er lønnsom og ikke. Videre vurderes det om netto inntekten vil være mulig å tjene inn, ved å undersøke hva den solgte energien fra ladestasjonen må koste og om det vil være mulig å selge den for gitt salgspris.

For å beregne netto inntekt per år gjøres en rekke antagelser, rundt verdiene i Ligning 5.1. Det antas blant annet en tilbakebetalingstid på 20 år og en fastrente på 5 %. En antagelse om tilbakebetalingstid på 20 år gjøres på grunnlag av at dette er fastslått minimumslevetid til en FESS. Når det gjelder investeringskostnadene undersøkes disse kun utfra maksimal tilgjengelig energi for hvert av scenarioene, siden energilageret dimensjoneres etter størst mulig tilgjengelig energimengde. For å kunne anta en investeringskostnad for maksimal tilgjengelig energi for hvert av scenariene undersøkes kostnadene knyttet til teknologien av FESS, solcellene, brenselcellen og powerbargen. Det vil også være kostnader knyttet til drift, vedlikehold av FESS, og kostnader knyttet til bygging av kaianlegg og tomten brenselcellen skal stå, men disse er ikke tatt hensyn til i bergeningene.

For energi fra brenselcellen er det, som nevnt tidligere, antatt en pris på 3 930 kr/kW for en brenselcelle [4]. Siden den valgte brenselcellen har en effekt på 21,2 kW vil det trengs 32 stk av denne for å kunne levere ønsket maksimal energimengde per døgn. Dette gir en pris på 2 666 112 kr. Siden brenselcellen har en antatt levetid på 15år [44], antas det at det må kjøpes nye

brenselceller etter gitt levetid. Totalkostnaden for brenselcelleanlegget for en levetid på 20 år blir da 5 332 224 kr.

For energi fra solcellepanel kom nettsiden solkart.no med en prisantydning på at 8 solcellepanel vil gi en totalpris på 186 640 kr. Ytterligere informasjon er vist i Vedlegg A. Det blir dermed antatt at ett enkelt solcellepanel vil koste 5420 kr og at installasjonen vil koste 143 280 kr. Utfra antall solcellepanel og antatte verdier på kostnader er solcellepanel plassert på brannstasjonen estimert til å koste 1 357 360kr, og solcellepanel plassert som parkeringskygge estimert til å koste 2 831 600 kr. Dette gir en totalkostnad for hele solcelleanlegget på 4 188 960 for en levetid på 30 år.

For energi fra powerbargen antas det å kunne kjøpe denne energien for en pris som er lik den gjennomsnittlige strømprisen det siste året. Strømprisen er vist i Vedlegg D, og gir en gjennomsnittlig pris på 7 049,9 kr/dag for energi fra powerbargen. Totalpris blir dermed 51 464 270 kr dersom powerbargen har en levetid på 20 år.

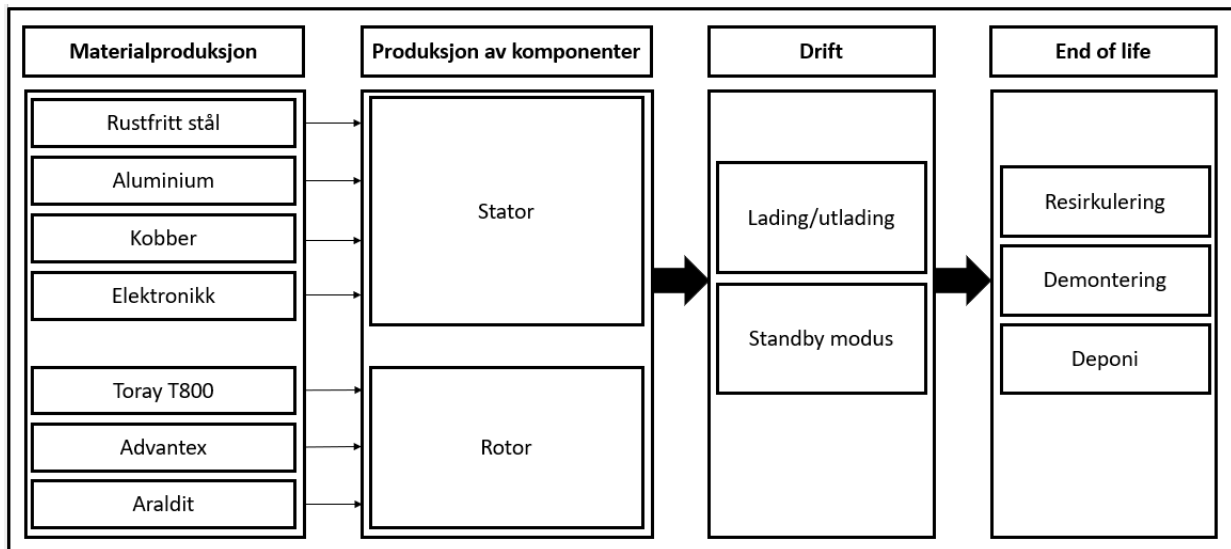
FESS fra Spinning Energy har en pris på 5 295 kr/kWh. For å finne totalkostnaden for FESS for hvert av scenariene må prisen på 5 295 kr/kWh multipliseres med antall FESS og lagringskapasiteten.

6.7 Bærekraftsanalyse

Systemet som det skal gjøres en livsløpsvurdering på er FESS fra Spinning Energy med driftslokasjon i Geiranger. FESS deles opp i stator og rotor. I statoren inngår komponenten: permanent magnetmotor. Det er oppgitt fra Spinning Energy at FESS vil bli produsert i Egersund før de fraktes med tungtransport til drifts-lokasjonen, og at levetiden for FESS er 20 år [62].

Ut fra gitte spesifikasjonene i Tabell 4.2 skal det gjøres undersøkelser rundt produktets miljøvennlighet, kartlegge produktets miljøeffekt i alle faser av livsløpet og avdekke hvor i livsløpet det ligger størst potensial for miljøforbedringer. Livsløpsvurderingen blir gjort i programmet OpenLCA i databasen ECOinvent. ECOinvent databasen er en kompatibel datakilde for studier og vurderinger basert på ISO 14040 og 14044. Prosessene som brukes i denne databasen er ferdige standard prosesser. Hvis det er gitt mer detaljert informasjon, eksempelvis forming av materiale, kan dette bli endret på inne i disse prosessene for å få de mest mulig riktig. Hvis det ikke er gitt denne type informasjon vil de standard prosessene brukes uten endringer.

I livsløpsvurderingen av FESS er det valgt å bruke systemgrensen cradle-to-cradle. Det vil derfor bli sett på utslipp knyttet til materialproduksjon, produksjon av komponentene, driften og til slutt end of life. Systemgrensen presenteres i Figur 6.1.



Figur 6.1: Systemgrensen til livsløpsevurderingen av FESS fra Spinning Energy.

I denne vurderingen er det sett på utslipp knyttet til statoren og rotoren. Det er altså ikke tatt med komponenter som fundament, container, vakuumpumpe og kammer, transformator og aksel.

Material- og komponentproduksjon

I dette kapitlet inngår alle antagelser, beregninger og spesifikasjoner knyttet til utslippet av material og komponent produksjon. Materialfordelingen til statoren og rotoren er oppgitt fra Spinning Energy. Fordelingen presenteres i Tabell 6.2.

Tabell 6.2: Materialfordelingen til stator og rotor i FESS fra Spinning Energy [62].

Materiale	Stator [kg]	Rotor [kg]
Rustfritt stål	250	-
Aluminium	150	-
Kobber	50	-
Elektronikk	50	-
Araldit	-	19,69
Advantex	-	43,45

Det er også oppgitt noen av leverandørene til bedriften, og hvordan de transporterer produktene sine til produksjonslokalene i Egersund. Dette vises i Tabell 6.3. Jo dypere det blir gått bakover i leveringskjeden og underleverandører, jo bedre blir analysen, men dette er tidkrevende arbeid og krever god kommunikasjon med bedriftene. Det er derfor kun valgt å ta med transport som er oppgitt i Tabell 6.3, og se bort fra den andre transporten knyttet til material- og komponentproduksjon.

Tabell 6.3: Transport og leverandører for de ulike materialene oppgitt fra Spinning Energy, [62].

Materiale	Leverandør	Sted	Transportmiddel	Strekning [km]
Rustfritt stål	Aarbakke	Jæren, Norge	Lastebil	50
Aluminium	-	-	-	-
Kobber	-	-	-	-
Elektronikk	-	-	-	-
Araldit	Huntsman	Osnabrück, Tyskland	Lastebil	1 044
Advantex	-	-	-	-

Selv om noen av leverandørene er oppgitt er det utfordrene å få tak i informasjon om hvor mye energi som trengs for å produsere de forskjellige komponentene. Det er derfor gjort enkle beregninger for å anta hvor mye energi som trengs for å produsere én rotor og én stator. Utfra Tabell 2 og Tabell 3 i artikkelen *Energy and environmental footprints of flywheels for utility-scale energy storage applications* [67] er det beregnet et forholdstall for å finne ut hvor mye energi som trengs for å produsere én rotor og én stator. Forholdstallet F er beregnet ved å ta energi for produksjon av komponentene som inngår i statoren/rotoren E_{komp} dividert på vekten av de m_{komp} . Dette er vist i Ligning 6.1.

$$F = \frac{E_{komp}}{m_{komp}} \quad (6.1)$$

Forholdstallet F er multiplisert med total vekten av statoren/rotoren til Spinning energy m_{SP} for å finne energien som trengs for å produsere en stator/rotor E_{prod} . Dette vises i Ligning 6.2. Totalvekten til statoren og rotoren vises i Tabell 4.2.

$$E_{prod} = F \cdot m_{SP} \quad (6.2)$$

Ved bruk av Ligning 6.1 og Ligning 6.2 er forholdstallet og energien for å produsere statoren og rotoren beregnet. Forholdstallet og energibehovet kan leses av i Tabell 6.4

Tabell 6.4: Forholdstall og energi for produksjon av stator og rotor.

Komponent	Forholdstall, F [kWh/kg]	Produksjonsenergi, E_{prod} [kWh]
Stator	1,27	633,33
Rotor	4,06	256,63

Utfra disse antagelsene, beregningene og spesifikasjonene er prosessene for material- og komponentproduksjon, vist i Vedlegg B, brukt.

Produksjon

I dette kapittelet inngår alle antagelser, beregninger og spesifikasjoner knyttet til utslippet av produksjonen av FESS i Egersund. Det er oppgitt at det trengs 20 kWh per FESS for å sette sammen et FESS i produksjonslokalene i Egersund. Denne energien blir kjøpt med vindgaranti [62]. Etter produksjonen vil FESS-modulene fraktes med lastebil fra Egersund til driftslokasjonen i Geiranger [62], dette er en strekning på 640 km. Utfra denne informasjonen er prosessene som vist i Vedlegg B brukt.

Drift

I dette kapittelet inngår alle antagelser, beregninger og spesifikasjoner knyttet til driften av FESS i Geiranger. For å få med utslippet knyttet til driftsfasen er energi som trengs fra FESS-modulen i løpet av levetiden beregnet. For å gjøre dette blir det tatt utgangspunkt i at FESS vil lade opp hver natt og lade ut hver dag. Det vil da bli 365 ladinger fra 0 % til 100 % i løpet av ett år, og $365 \cdot N$ ladinger for hele levetiden N . Energien som kan lagres på FESS, E_{FESS} , kan leses av i Tabell 4.2 til å være 250 kWh.

$$E_{tot.levetid} = E_{FESS} \cdot (365 \cdot N_{FESS}) \quad (6.3)$$

Ved å bruke Likning 6.3 blir energien som FESS-modulen kan levere i løpet av levetiden på 1 825 000 kWh/levetid. Det er deretter beregnet antall FESS som trengs for å produsere 1kWh, siden dette er den funksjonelle enheten.

$$A_{FESS} = \frac{1 \text{ FESS}}{E_{tot.levetid}} \quad (6.4)$$

Ved å bruke Likning 6.4 er det beregnet at det trengs $5,479 \cdot 10^{-10}$ FESS/kWh. For at FESS skal gi ut 1kWh kan virkningsgraden og standby tap brukes for å finne energien som går inn i FESS. Virkningsgraden og standby tapet kan leses av i Tabell 4.2 til å være 92 % og 1 %.

$$E_{inn.FESS} = \frac{1 \text{ kWh}}{\eta_{FESS} - \eta_{standby}} \quad (6.5)$$

Ved å bruke Likning 6.5 er det beregnet at det trengs 1,10 kWh inn i FESS-modulen for å kunne gi ut 1 kWh. Siden destinasjonen til avfallshåndteringen er ukjent, er det valgt å ikke ta med transporten fra driftsted til avfallshåndteringen. Utfra disse antagelsene, beregningene og spesifikasjonene er prosessene som vist i Vedlegg B for drift brukt.

End of life

I dette kapittelet inngår alle antagelser, beregninger og spesifikasjoner knyttet til avfallsbehandling av FESS. Det er oppgitt at alt av materialer skal resirkuleres når FESS-modulens brukstid er over [62]. På grunn av manglende prosesser i OpenLCA og for å unngå feil i sluttresultat ved å velge andre lignende prosesser, er ikke resirkulering av araldit og advantex tatt med. Utfra denne informasjonen er prosessene som vist i Vedlegg B brukt.

7 Resultat og diskusjon

Gjennom oppgaven er det gjort beregninger på tilgjengelig energi, ladetid og effektbehov for ulike bruksområder, og økonomiske beregninger for å vise lønnsomheten av å installere en ladestasjon av FESS i Geiranger. Det er også gjort en analyse på utslipp knyttet til FESS. Dette kapittelet tar for seg resultat og diskusjon for beregningene som er gjennomført.

7.1 Energibehov, effektbehov og ladetid for elektriske fartøy

Tabell 7.1 viser resultater for energibehov, effektbehov og ladetid for ulike lastprofiler som kan brukes til frakt av turister inn og ut av Geiranger.

Tabell 7.1: Energibehov, effektbehov og ladetid for forskjellige utvalgte fartøy.

Type fartøy	Prioriteringsnr.	Antall oppladninger per døgn	Energibehov [kWh]		Ladeeffekt [kW]		Ladetid[min]
			per opplading	per døgn	per opplading	per opplading	per opplading
RIB-båter	1	14	42	588	63	40	
Future of the fjords	2	4	1000	4000	1500	40	
Nullutslipps sightseeing-fartøy	3	4	2620	10480	3930	40	
Bilferge	4	8	860	6880	2580	20	
Tesla Model Y Performance	5	ikke definert	53	ikke definert	145	22	

Når det gjelder ladetid og ladeeffekt beregnet fra et gitt energibehov er dette teoretisk beregnede verdier. Faktisk ladetid og ladeeffekt vil påvirkes av flere faktorer, blant annet SoC i fartøyets batteri, temperatur i batteriet og omgivelsene og energitap i ladeprosessen. Ladetid avhenger av mulig ladeeffekt som kan tilføres batteriet, og på generelt grunnlag tar batteriet opp mindre effekt når det er kaldt eller når det nærmer seg fullt. Ladeeffekten vil også variere mye gjennom en gitt ladeøkt [50]. Teoretisk ladetid vil derfor ikke gi korrekt verdi, men være et godt estimat for en omtrentlig verdi.

7.2 Tilgjengelig energi

Tabell 7.2 viser resultater for tilgjengelig energimengde fra mulig grunnlast og spisslast. Grunnlast er energi fra strømmettet og spisslast er energi fra solceller, hydrogen og powerbarge. Av de ulike energikildene er det kun energien fra strømmettet som gir eksisterende energimengde i Geiranger i dag. Skal de ulike spisslastene være reelle alternativer må sannsynligheten for tilgjengeligheten vurderes.

Tabell 7.2: Tilgjengelig energi fra grunnlast og spisslast.

Energi [kWh/døgn]	
Strømmett	600–1200
Hydrogen	2 028–15 818
Solceller	1 154
Powerbarge	10 478

Hydrogen

For hydrogen vil energiproduksjon være kostbart og prosessen være energikrevende. Siden brenselcellen inneholder farlige gasser og kjemikalier er det flere lover knyttet til sikkerhet av fylling og lagring av hydrogen, samt regelmessig vedlikehold. Det er også mye tap knyttet til energiproduksjon av hydrogen. I løpet av hele prosessen fra energien blir sendt inn i elektrolysen til

energien gis ut av brenselcellen er det funnet en virkningsgrad på 36 %, som gir et tap på 64 %. Som nevnt tidligere vil et tidsrom på 20 år kreve en kostnad på 5 332 224 kr for brenselcellen. Det vil i tillegg være kostnader knyttet til innkjøp av hydrogen, bygging av tomt, regelmessig vedlikehold av anlegget inkludert rengjøring av elektroder og erstatning av katalysator og andre sikkerhetstiltak. At hydrogen er en kostbar teknologi med mange sikkerhetstiltak og mye tap kan gjøre hydrogen som energikilde til et usikkert alternativ. Siden produksjonen av hydrogen på Hellesylt gir mulighet for kortreist energi, ansees likevel teknologien som et aktuelt, miljøvennlig konsept for en bygd med stor etterspørsel av energi.

Noe som er viktig å tenke på ved energiproduksjon fra hydrogen er den store mengden vann som blir produsert som biprodukt. Med 780 kg H₂ vil det bli produsert 6 971 kg H₂O. Dette tilsvarer 6 971 liter vann. Ved å utnytte vannet som biprodukt kan dette bidra til å gjøre brenselcellesystemet mer effektivt og bærekraftig. Vannet kan eksempelvis brukes som kjølevæske for brenselcellen selv. Brenselceller produserer varme, og denne varmen må fjernes for at brenselcellen skal fungere optimalt. Ved å bruke vann som kjølevæske vil det også produseres varmtvann som kan brukes til fjernvarme. En annen mulighet er å bruke det produserte vannet som drikkevann hvis det renses ordentlig. I enkelte tilfeller kan vannet som produseres av brenselceller være renere enn det lokale vannforsyningsystemet, fordi det ikke inneholder forurensninger som finnes i naturlige kilder. Dette krever derimot et rense-anlegg. En tredje mulighet vil være å produsere mer hydrogen igjennom elektrolyse av vannet. Denne muligheten kan derimot tenkes å ikke være særlig relevant for Geiranger som har lite energi i utgangspunktet.

Solceller

Når det gjelder solceller vil denne teknologien være enkelt å installere, kreve minimalt med vedlikehold og ha en levetid på 30 år. For hele solcelleanlegget er det forventet en total kostnad på 4 188 960 kr. Teknologien ansees som mye billigere enn energiproduksjon fra brenselcelle med tanke på mindre total kostnad for installasjon av anlegget, minimalt med vedlikeholdskostnader og lengre levetid. En investering av solceller ansees dermed å være økonomisk gunstig for å kunne øke energimengden i Geiranger.

En ulempe med solenergi er at det gir uregelmessig produksjon per dag, på grunn av at det er væravhengig. For Geiranger, der høye fjelltopper omringer bygda, vil mengde solinnstråling også begrenses som følge av skygger fra fjellene. Solkart.no kan antas som et godt estimat på mengde energi som produseres, for et gitt tak. Dette på grunn av nøyaktig satellittmålinger av takvinkel, takretning og hvordan sola beveger seg på himmelen over gitt plassering, i tillegg til at disse blir sammenlignet med faktiske målinger fra nærliggende tak. En usikkerhet knyttet til satellittbilder er derimot at de ofte ikke tar godt nok hensyn til lokal smuss, snø og skydekke [48]. Det er også viktig å være klar over at mengde solenergi som kan produseres vil være uavhengig av tidligere målinger, og det vil sjeldent være mulig å gi et 100 % nøyaktig estimat.

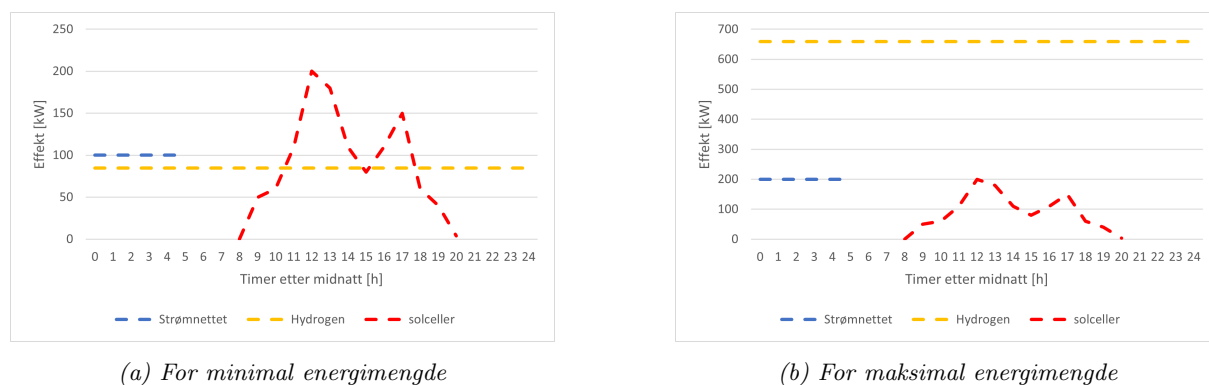
Det er gjort flere antagelser for solinnstråling, dimensjoner av tak og antall solcellepanel som det var plass til på takene. Dette gjør at det er knyttet usikkerhet til hvor nøyaktig målene er og om det faktisk vil være plass til gitt antall solceller. For å få mer nøyaktige tall på antall solcellepanel som det er mulig å få plass til på taket og parkeringsplassen, og derav hvor mye energi som kan produseres, må dimensjonene undersøkes nærmere.

Powerbarge

Når det gjelder powerbargen med FESS er denne bare et konsept utviklet av Grønn kai 2022 [81], og det er usikkert om den faktisk vil bli produsert og eventuelt hvor lang tid det vil ta før den er i drift. Om den settes i drift vil en slik energibærer likevel være en sikker og stabil kilde til energi i Geiranger, med tanke på at den tar med seg en fast mengde energi hver dag.

7.3 Effektstrøm og oppladingsperiode for energilageret

Ut fra resultatene i Tabell 7.2 er det produsert et omtrentlig estimat for effektstrøm inn i energilageret og oppladingsperiode for energien fra strømmettet, hydrogen og solceller. Effektstrøm og oppladingsperiode for energilageret er illustrert i Figur 7.1. Total effektstrøm er ikke vist, men vil være samlet energimengde fra strømmettet, solceller og hydrogen.



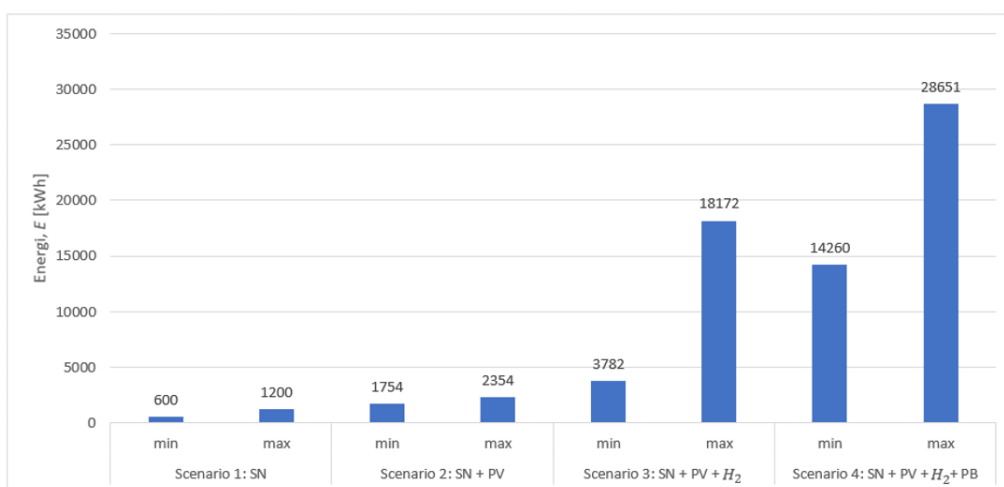
Figur 7.1: Effektstrøm og oppladingsperiode for energilageret.

Ved å sammenligne resultatene i Tabell 7.2 og Figur 7.1 vises at selv om det er en gitt energimengde lagret per døgn, er det ikke nødvendigvis slik at den er tilgjengelig når som helst på døgnet. Dette betyr at selv om tilgjengelig energimengde per døgn samsvarer med energibehov per døgn for en lastprofil, vil ikke energilageret nødvendigvis kunne forsyne med lastprofilens effektbehov, for alle tidsrom. Det vil dermed være viktig å fordele ladetid for ulike lastprofiler utover dagen for å forsikre at alle får det effektbehovet som trengs for den gitte ladetiden. Estimaterne som er gjort er derimot bare antatte tidsrom, og effekter og vil nok avvike fra virkelige målinger. Det er også stor forskjell mellom minimal og maksimal energimengde, og i praksis vil nok energimengden i energilageret ligge på et sted imellom disse, og være mer varierende. I denne rapporten undersøkes *mulighetene* for bruk av FESS som ladestasjon i Geiranger, istedet for konkrete planer. Det viktigste er dermed at resultatene viser et godt estimat for hva energien tilsvarer, heller enn hvordan energibehovet må fordeles utover dagen. Fordeling av ladetid for ulike laster gjøres derfor ikke i denne rapporten.

Når det gjelder effektstrøm fra hydrogen, er dette bestemt ut fra at det bare er gjort innkjøp av en stk brenselcelle. Hvis behovet er å få mye energi over et kort tidsrom, kan løsningen være å gå til innkjøp av flere brenselceller. Dette vil øke mengde forbrenningsreaksjoner som kan skje, som vil føre til større effektstrøm fra hydrogen over en kortere periode, og at energilageret lader seg opp enda raskere.

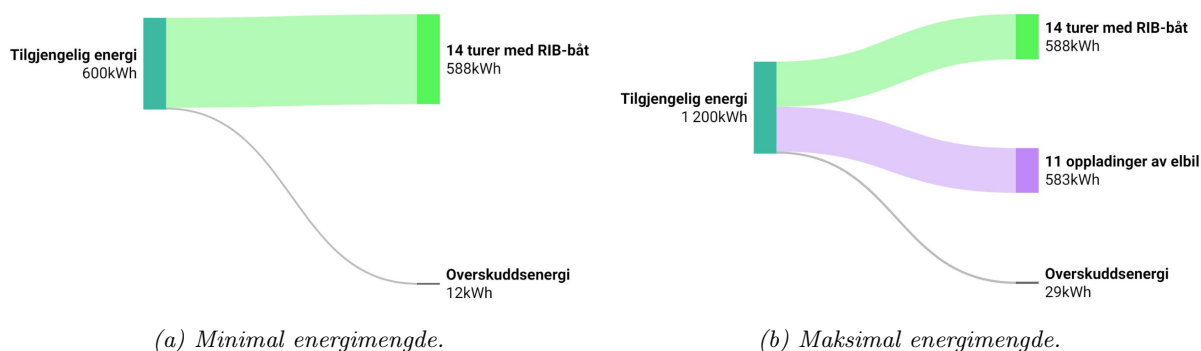
7.4 Muligheter for et energilager med ulike kombinasjoner av grunnlast og spisslast

Tabell 7.2 danner grunnlag for total energimengde fra ulike kombinasjoner av grunnlast og spisslast, som illustrert i Figur 7.2. Hvert scenario er delt opp i minimal og maksimal energimengde.



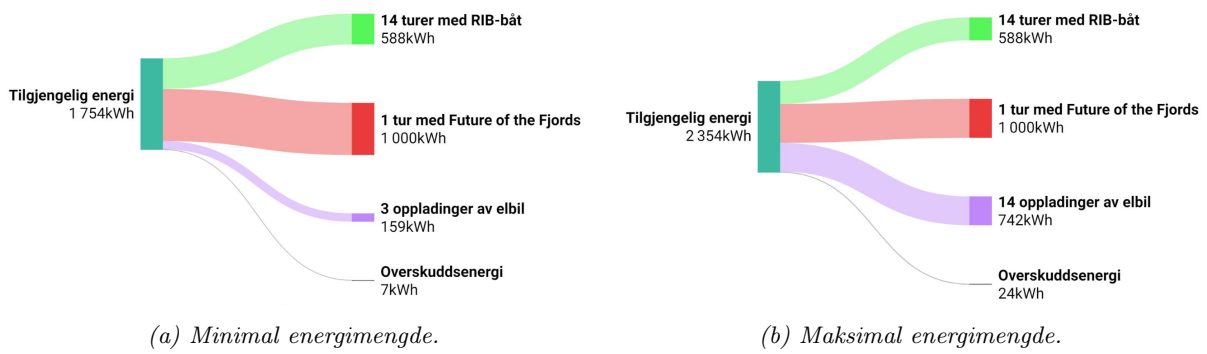
Figur 7.2: Presentasjon av tilgjengelig maksimal og minimal energi i de forskjellige scenarioene.

Ut fra tilgjengelig energimengde i energilageret for ulike scenarioer er det videre undersøkt hvilke muligheter disse gir for å dekke energibehovet til de ulike lastprofilene. Dette er illustrert i Figur 7.3, Figur 7.4, Figur 7.5 og Figur 7.6.



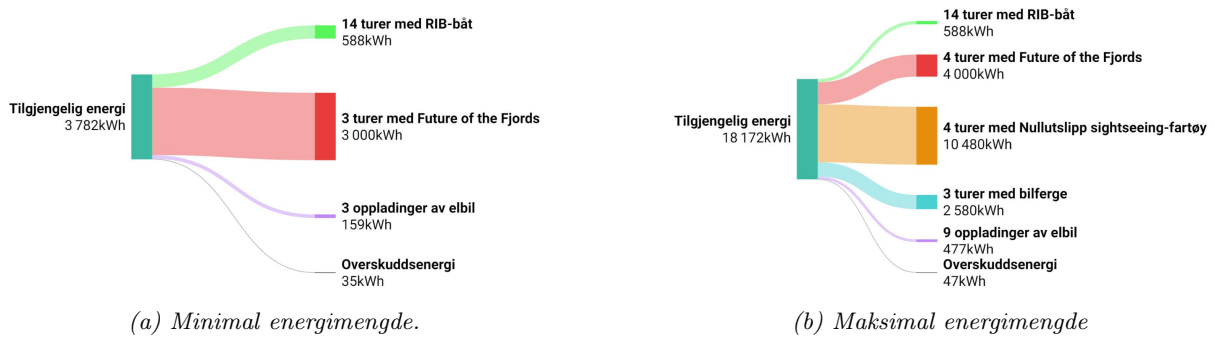
Figur 7.3: Sankey diagram som viser hvilke lastprofiler energimengden fra Scenario 1 gir muligheten til å dekke.

Ut fra Figur 7.3 vil grunnlasten fra strømmettet minimalt dekke 14 guidede RIB-turer, og maksimalt dekke 14 guidede RIB-turer i tillegg til 11 oppladinger av elbiler og en overskuddsenergi på 12 kWh. Maksimalt vil det dekke 14 guidede RIB-turer i tillegg til 11 oppladinger av elbil og gi en overskuddsenergi på 29 kWh.



Figur 7.4: Sankey diagram som viser hvilke lastprofiler energimengden fra Scenario 2 gir muligheten til å dekke.

Ufra Figur 7.4 kan samlet energi fra strømmettet og solceller dekke minimalt kan det dekke 4 turer med RIB-båt, 1 tur med *Future of the Fjords* og 3 oppladninger av elbil, i tillegg til å gi en overskuddsenergi på 7 kWh. Maksimalt kan det dekke 14 turer med RIB-båt, 1 tur med *Future of the Fjords* og 14 oppladninger av elbil, i tillegg til å gi en overskuddsenergi på 24 kWh.



Figur 7.5: Sankey diagram som viser hvilke lastprofiler energimengden fra Scenario 3 gir muligheten til å dekke.

Ufra Figur 7.5 kan samlet energi fra strømmettet, solceller og hydrogen minimalt dekke 14 turer med RIB-båt, 3 turer med *Future of the Fjords* og 3 oppladninger av elbil, i tillegg til å gi en overskuddsenergi på 35 kWh. Maksimalt kan det dekke 14 turer med RIB-båt, 4 tur med *Future of the Fjords*, 4 turer med *Nullutslipp sightseeing-fartøy*, 3 turer med bilferge og 9 oppladninger av elbil, i tillegg til å gi en overskuddsenergi på 47 kWh.



Figur 7.6: Sankey diagram som viser hvilke lastprofiler energimengden fra Scenario 4 gir muligheten til å dekke.

Ut fra Figur 7.6 kan samlet energi fra strømmettet, solceller, hydrogen og powerbarge minimalt dekke 14 turer med RIB-båt, 4 turer med *Future of the Fjords*, 3 turer med *Nullutslipp sightseeing-fartøy*, 2 turer med bilferge og 1 opplading av elbil, i tillegg til å gi en overskuddsenergi på 39 kWh. Maksimalt kan det dekke 14 turer med RIB-båt, 4 tur med *Future of the Fjords*, 4 turer med *Nullutslipp sightseeing-fartøy*, 8 turer med bilferge og 126 oppladinger av elbil, i tillegg til å gi en overskuddsenergi på 25 kWh

Mulighetene for hvert scenario er undersøkt ut fra prioritert rekkefølge av lastprofiler. Prioritert rekkefølge er gjort med hensyn på sannsynligheten for at drift av fartøyet vil skje. Det kunne også vært naturlig å prioritere lastprofilene ut fra andre formål, eksempelvis dersom behovet var å frakte mest mulig passasjerer, bruke minst mulig energi eller ha lengst mulig rekkevidde.

Etter at energibehov for frakting av passasjerer langs sjøveien i Geirangerfjorden er dekt, vil det, som vist i Figur 7.3–Figur 7.6, være forskjellig mengde restenergi igjen. Denne restenergien er illustrert som opplading av elbil og overskuddsenergi. Det kan derimot ansees som svært usannsynlig at det er behov for 126 oppladinger av elbil, som vist i Figur 7.6b. Det er derfor viktig å påpeke at denne restenergien kan brukes til andre sluttlaste. Blant annet kan total restenergi fungere som en buffer i forhold til tap i ledninger eller system, eller den kan transporteres ut på strømmettet igjen. Den kan også ligge lagret til neste dag som et sikkerhetsnett i tilfelle det produseres mindre energi fra grunnlast og spisslast enn det som er tenkt.

Det som er viktig å bemerke seg er at uten bruk av energilagringssystemer, eksempelvis FESS, ville tilgjengelig energi fra strømmettet og installerte solceller vært svært usikre energikilder. Varierende tilgang på energi fra strømmettet, samt ustabil effektproduksjon fra solceller gir svært ustabile effektkurver. Dette kan føre til at det i tilfeller er for lite energi i forhold til det som trengs, mens det i andre tilfeller er overskuddsenergi som ikke blir brukt. Ved hjelp av FESS, kan overskuddsenergien korttidslagres og brukes ved behov, og dermed gi sikret tilgang til mer stabil energi hver dag. Sikret tilgang på energi kan være nøkkelen til å gjøre drift av elektriske fartøy tilgjengelig i Geiranger.

Sett fra et større perspektiv kan bruk av energilagringssystemer bidra til å jevne ut gapet mellom tilgang til og behov for energi også andre steder en Geiranger. Den omfattende elektrifiseringen av veitransporten, sjøfarten og industrien innebærer et stort effekt- og energibehov fra strømmettet. Med energikrise og økende fokus på klimapolitikk og bærekraft, trenger næringen nye løsninger på hvordan de kan dekke behovet for effekt og energi på en bærekraftig måte. Dette gjør at et

slikt energilager kan være gunstig både i andre verdensarvfjorder der det stilles strenge krav til nullutslipp og som derfor har et stort effekt- og energibehov, men også i samfunn med et generelt behov for å balansere ut strømmettet og å avlaste store effekttopper.

7.5 Utforming og lokasjon av energisystemet

Ladestasjonen vil bestå av lagret tilgjengelig energimengde fra ulike kombinasjoner av grunnlast og spisslast, som kan fordeles til ulike lastprofiler. En systemskisse av et slikt energisystem er vist i Figur 7.7, der FESS illustreres i sentrum og markerer knutepunktet mellom produksjon og forbruk av energi.



Figur 7.7: Systemskisse av ladestasjonen.

Energi fra strømmettet, solceller og hydrogen står til venstre for energilageret, og illustrerer tilgjengelig energi som kan lagres på FESS. Energi fra powerbargen er illustrert som en båt med tilhørende FESS fra Spinning Energy. Siden energien fra powerbargen er lagret på egne FESS trengs den ikke mellomlagres i energilageret. Lastprofiler fra elektriske fartøy er illustrert helt til høyre.

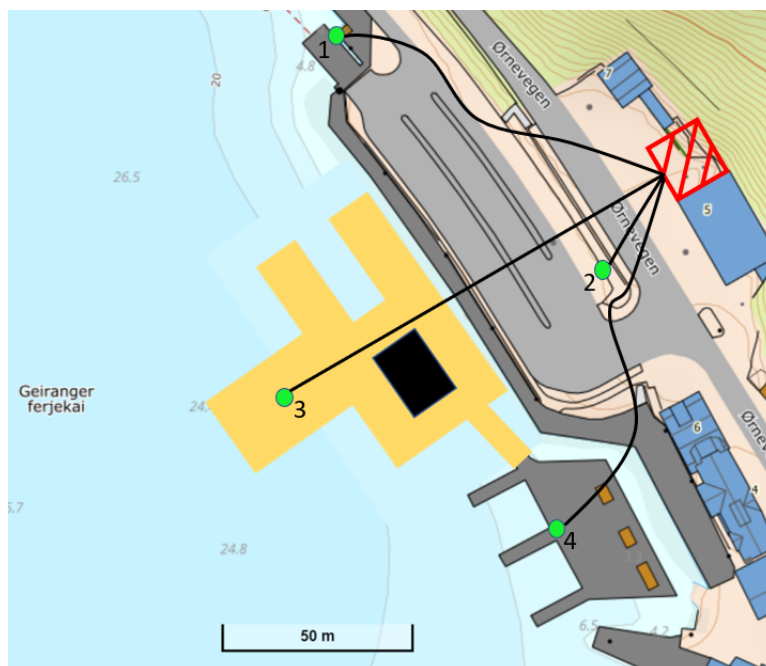
7.5.1 Ladestasjon

Tabell 7.3 viser antall FESSmoduler og areal som kreves for å lagre energi fra hvert scenario. Scenario 3 og Scenario 4 har likt antall FESS og areal, på grunn av at powerbargen benytter egne FESS-moduler og ikke tar opp av plassen på ladestasjonen.

Tabell 7.3: Resultat for dimensjonering av anlegg. Tabellen viser antall FESS og areal som kreves for å lagre energi fra forskjellige kombinasjoner av grunnlast og spisslast.

Scenarioer	Antall FESS	Areal [m ²]
Scenario 1: SN	5	14
Scenario 2: SN + PV	10	28
Scenario 3: SN + PV + H ₂	73	208
Scenario 4: SN + PV + H ₂ + PB	73	208

Figur 7.8 viser en skisse av utforming og lokasjon for selve ladestasjonen. Rød firkant markerer plassering av energilager. Grønn sirkel markerer plassering av ladebokser til hver enkelt lastprofil. Ladeboks nr. 1 er plassert ved kaienlegget til bilfergen, ladeboks nr. 2 er plassert ved parkeringsplassen for biler, ladeboks nr. 3 er plassert ved kaienlegg til fjordcruisebåtene og ladeboks nr. 4 er plassert ved mulig kaienlegg for RIB-båtene. Svarte linjer markerer kabler som overfører energi mellom energilageret og ladebokser.

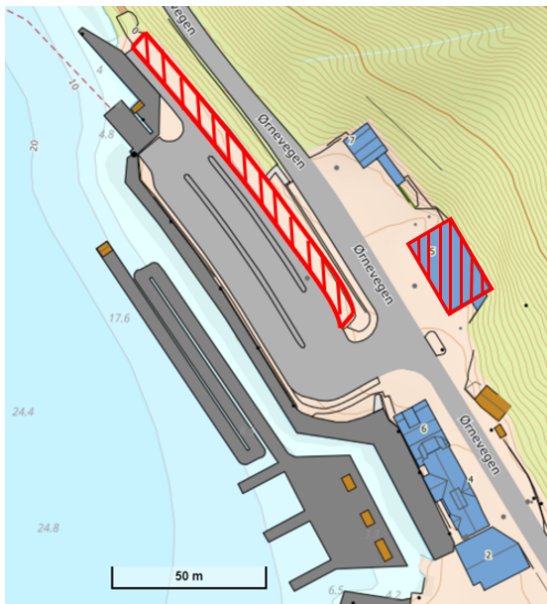


Figur 7.8: Grov skisse av lokasjon av ladestasjon på et kart hentet fra Norgeskart.no. Kaianlegg til prosjektet Grønn kai 2022 [81] er markert i gult. Område for container-moduler med FESS er markert med rød firkant, ladebokser er markert med grønn sirkel og ladekabler er markert med svart linje.

Figur 7.8 er derimot bare et forslag, og det kan være flere alternativer for lokalisering av en slik ladestasjon. Eksempelvis vil et container-basert energilager åpne for at energilageret kan deles opp i flere separate container-moduler og fordeler utover flere uavhengige lokasjoner.

7.5.2 Systemer for spisslast

Figur 7.9 viser en skisse av utforming og plassering av tilleggsystemer knyttet til spisslast. Figur 7.9a viser plassering av solcelleanlegg mens Figur 7.9b viser plassering av brenselcellen. Når det gjelder powerbargen er forslaget til kaianlegg fra prosjektet Grønn kai i 2022 [81] allerede dimensjonert for å ta imot denne, som vist i Figur 2.2.



(a) Lokasjon av solcelleanlegg, på taket til ett av de nærliggende byggene og som parkeringskygge.



(b) Lokasjon av brenselcelleanlegg, med tilhørende sikkerhetssoner.

Figur 7.9: Grov skisse av plassering av solcelleanlegg og brenselcelleanlegg skissert på kart fra Norgeskart.no.

Ut fra forskjellige typer spisslast må det tas ulike hensyn for lokasjon. Ved plassering av solcellepanel på eksisterende bygg eller for å lage skygge på parkeringsplasser, kan det produseres fornybar energi uten å beslaglegge arealer. Når det gjelder brenselcelleanlegget må dette plasseres på et eget område for å sikre tilstrekkelig sikkerhet for tredjeperson. På grunn av sikkerhetssonene er brenselcelleanlegget plassert i fjellskråningen bak kaianlegget. Rød firkant beskriver lokasjon og areal for plassering av brenselcellen, mens de svarte stiplede linjene beskriver sikkerhetssonene tilknyttet denne. Indre sone har en diameter på 65 m, midtre sone har en diameter på 85 m og ytre sone har en diameter på 100 m.

7.5.3 Utenfor sesong

Utenfor turistsesong er behovet for turisttransport fra fjordcruisebåter gjennom Geirangerfjorden lite eller ikke-eksisterende. Denne antagelsen gjøres ut fra innsyn i planlagte ankerplaner for cruisebåter i Geiranger. Fra mai til september vil det være jevn trafikk av cruiseskip inn i fjorden, mens trafikken vil redusere ut i vinterhalvåret [49]. Det kan derfor tenkes at lokale og eventuelle turister ankommer fjorden ved hjelp av landlige fartøy.

Per dags dato er det en vinter-bilferge på fergesambandet Geiranger–Hellesylt. Det kan likevel forventes store sannsynligheter for at vinter-bilfergen kan gå ut av drift etter at fjorden stenger for alt annet enn nullustslippfartøy. Denne forventningen gjøres på bakgrunn av at behovet for frakting av passasjerer reduseres kraftig fra sommersesong til vintersesong og at en investering av elektrisk ferge på vintersesong kan være lite lønnsomt.

Siden lastprofiler knyttet til transport av turister langs sjøveien reduseres vil det ikke være nødvendig å mate anlegget med ulike typer spisslast, for denne perioden. Energilageret kan likevel være til god nytte for bruk av effektavlasting eller som hurtig frekvensrespons, for å bidra til mer stabil energi på strømmettet i Geiranger. Det kan også vurderes om energilageret, med

lagret overskuddsenergi fra strømmettet, kan fortsette til bruk av ladestasjon for elbiler. Utfra tilgjengelig energi på strømmettet, som vist i Scenario 1, tilsvarer dette opplading av mellom 11–22 elbiler daglig.

Et container-basert energilager vil være tilpasningsdyktig i forhold til variasjon i bruk, behov og lokasjon, for sommer- og vinterhalvåret. Ved å plassere FESS med tilhørende tilleggsystemer i separate container-moduler er det enkelt å skalere opp systemet, ved å koble sammen flere container-moduler, dersom det skulle være behov for større lagringskapasitet. For motsatt behov vil slike container-moduler enkelt kunne deles opp i separate anlegg og transporteres utover til forskjellige lokasjoner.

7.6 Økonomisk lønnsomhet for en ladestasjon med et energilager av svinghjul

Tabell 7.4 viser investeringskostnad, netto inntekt og salgspris tilknyttet ladestasjonen. Investeringskostnaden beskriver hvor mye som må investeres i år null for energilageret dimensjonert for maksimal energimengde. Netto inntekt viser hva inntekten til ladestasjonen må være per år for å kunne gå i null 20 år etter investeringen. Salgsprisen beskriver hva energien fra ladestasjonen må selges for slik at det skal samsvare med at investeringen går i null. Salgsprisen er undersøkt utfra både minimal og maksimal energimengde lagret på ladestasjonen.

Tabell 7.4: Resultater for investeringskostnad, netto inntekt og salgspris for at scenarioene skal gå i null 20 år etter investeringen.

Scenarioer	Investeringskostnad, G [millioner kr]	Netto inntekt, a [tusen kr/år]	Salgspris [kr/kWh]
Scenario 1: SN	6,6	531	2,43–1,21
Scenario 2: SN + PV	17,4	1 398	2,18–1,63
Scenario 3: SN + PV + H ₂	106,2	8 518	6,17–1,28
Scenario 4: SN + PV + H ₂ + PB	157,6	12 648	2,43–0,12

Investeringskostnadene i Tabell 7.4 baserer seg på kostnader tilknyttet selve energisystemet. Med dette menes pris for brenselcellen, solcellepanel og FESS moduler og strøm kjøpt fra powerbar-gen. Investeringskostnaden viser en estimert verdi, men virkelige verdier vil påvirkes av flere faktorer som; utbygging, drift og vedlikehold av anlegget, samt andre nødvendige tilleggsystemer som eksempelvis kabler og ladebokser. Det vil også være usikkerhet knyttet til de ulike økonomiske elementene, som hvordan prisen for FESS, brenselcelle og solceller vil utvikle seg.

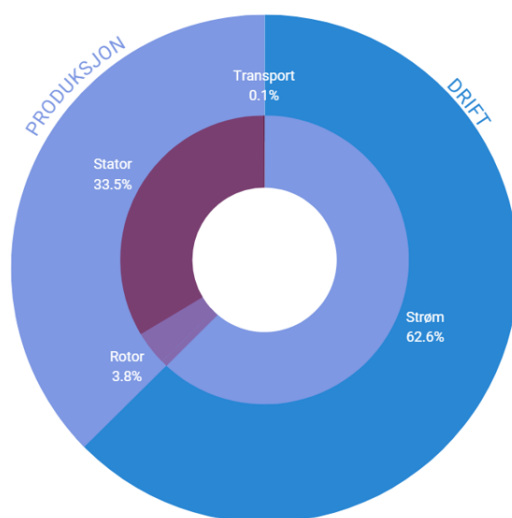
En annen usikkerhet kan knyttes til at en fastrente på 5 % i 20 år for å investere i ladestasjon av FESS i Geiranger er en antatt verdi som vil påvirkes av flere faktorer. Det kan tenkes at fastrenten vil variere utfra hvilken bank som brukes, økonomiske situasjonen i verden, risiko for prosjektet og inflasjon. Om fastrenten vil ligge på 5 % er usikkert, men det er en god verdi å forholde seg til for å kunne få et større innblikk i mulig inntekt for energilageret.

Tabell 7.4 viser at salgsprisen for at investeringskostnadene skal gå i null etter 20 år, må være en verdi mellom 0,12 og 6,17 kr/kWh, avhengig av lagringskapasiteten i energilageret samt hvor mye av lagringskapasiteten som utnyttes. Jo større lagret energimengde, jo lavere vil slagsprisen være. Det kan derimot antas at det vil være mulig å selge energien fra ladestasjonen dyrere enn oppgitt salgspris fra Tabell 7.4. Denne antagelsen gjøres på bakgrunn av målinger for strømpris på ulike ladestasjoner rundt om i midtnorge, som vist i Vedlegg E. Utfra Vedlegg E kan salgsprisen ligge

på opptil 9 kr/kWh, som er mye høyere enn beregnet maksimal salgpris for at investeringen skal gå i null etter 20 år. Det ansees derfor som svært sannsynlig at ladestasjonen vil klare å tjene inn lånet på under levetiden til FESS-modulene, som er 20 år. Dette betyr at en investering av en ladestasjon med FESS i Geiranger vil være lønnsomt.

7.7 Klimagass-utslipp tilknyttet svinghjul fra Spinning Energy

Utfra livsløpsvurderingen som er gjort vil 1 kWh fra et FESS fra Spinning Energy ha et klimagassutslipp på 0,00613 kg CO₂-ekvivalenter. I denne analysen presenteres CO₂-ekvivalenter etter som det er en kjent måte å presentere utslipp på, og dermed er en enkel målenhet å sammenligne med. Figur 7.10 viser en prosentvis fordeling av klimagassutslippet. 62,6 % av utslippene er knyttet til strøm. Dette inkluderer utslipp knyttet til strømmen som er brukt og utslipp knyttet til strømbruk i standby, lading og utlading. 37,4 % av utslippene er knyttet til produksjon av FESS, der produksjon av statoren står for hele 33,5 % av utslippene.



Figur 7.10: Sektordiagram som illustrerer resultater for prosentvis fordeling av utslippet knyttet til stator og rotor av FESS.

Figur 7.10 viser at strømmen som blir sendt inn for lagring i FESS er den største bidragsyteren til utslippet. En mulig forklaring til dette kan handle om tap av energi til standby, lading og utlading av FESS-modulen. En annen mulig forklaring er utslipp knyttet til strømmen som er brukt. 3,8 % av utslippet er knyttet til produksjon av rotoren. Dette kan begrunnes med at rotoren utgjør en liten del av totalvekten, og at utslippet knyttet til rotoren dermed utgjør en liten del av totalutslippet. Transporten utgjør 0,1 % av utslippet. Dette kan begrunnes med at det er oppgitt lite transport fra leverandør til produksjonssted og transport fra underleverandør til leverandør. Det kan også tenkes at utslippet knyttet til transporten generelt har lite å si for totalutslippet.

Det er viktig å bemerke seg er at i livsløpsvurderingen er det ikke tatt med komponenter som fundament, container, vakuumpumpe og vakuumkanne, transformator og aksel. Det er kun gjort en analyse på permanent magnetmotor og rotoren. Dette gjør at utslippet som presenteres ikke gir et helhetlig bilde på totalutslippet som kan knyttes til produksjon av FESS, men heller en indikasjon på utslippet knyttet til hoveddelen av et FESS.

Feilkilder

Det er flere mulige feilkilder knyttet til informasjon fra leverandører og underleverandører. Manglende informasjon fra disse gjør at blant annet at det er brukt standardprosesser i databasen for uthenting, bearbeiding og forming av materialer. Det er knyttet en viss usikkerhet til om disse standardprosessene da er de mest riktig å bruke. Det er også gitt lite informasjon om transport fra leverandører og underleverandører. Det er ikke tatt hensyn til utslipp knyttet til transport mellom underleverandør og leverandør. Fra leverandør til produksjonssted er det kun tatt hensyn til utslipp knyttet til den transporten som er oppgitt. Disse ulike faktorene gir usikkerheter knyttet til faktisk CO₂-utslipp.

Det er også feilkilder knyttet til manglende informasjon for mengde energi som trengs til produksjon av stator og rotor. På grunn av manglende informasjon om dette, er det gjort enkle beregninger basert på en annen LCA analyse av FESS. Disse beregningene ansees som en feilkilde, siden dette er usikre verdier som ikke kommer fra leverandørene til Spinning Energy.

Anngående resirkulering ble det oppgitt fra Spinning Energy at hele FESS-modulen skal resirkuleres. Det er derimot ikke oppgitt informasjon om hvor FESS-modulen skal resirkuleres, slik at utslipp knyttet til transport av FESS fra driftslokasjon til resirkulering er ikke tatt med i beregningene. Det er også manglende prosesser for resirkulering av rotoren, og for å unngå feil i sluttresultatet ved å velge lignende prosesser, ble ikke resirkulering av rotoren tatt med. Siden transport og resirkulering ville påvirket totalutslippet, regnes disse som feilkilder.

Det er også knyttet usikkerhet til utslipp i forhold til vedlikehold og nytteverdien av FESS-modulen. FESS vil trenge vedlikehold i løpet av levetiden. Dette er det ikke tatt hensyn til i denne rapporten. Hvor mye slike vedlikeholdsutslipp utgjør på sluttresultatet, vil avhenge på hvor ofte vedlikehold må gjennomføres og hvilken type vedlikehold som gjøres. Med tanke på usikkerhet tilknyttet nytteverdien er CO₂-utslipp per kWh gjort med hensyn på antagelsen om at FESS-modulen vil lade fra 0–100 % hver natt og bruke all energien hver dag, i 20 år. I praksis vil lading og utlading av FESS variere utfra variasjonen i tilgjengelig energimengde og energiforbruk, slik at antall kWh vil avvike noe fra antatt verdi.

Sammenlikning

I rapporten *Energy and environmental footprints of flywheels for utility-scale energy storage applications* presenteres utslipp knyttet til FESS med stålrotor og komposittrotor [67]. Her vises det til at et FESS med stålrotor kan ha et utslipp på 75,2–121,4 kg CO₂-ekvivalenter per MWh og komposittrotor kan ha et utslipp på 48,9–95 kg CO₂-ekvivalenter per MWh [67]. Utslipppet vil variere utfra hvilken energi som blir sendt inn for lagring på FESS-modulen.

Ut fra bærekraftanalysen vil et FESS fra Spinning Energy gi ut 6,13 kg CO₂-ekvivalenter per MWh. Dette er en mye lavere verdi enn det som er oppgitt i rapporten. En mulig forklaring er at rapporten har sett på alle komponenter knyttet til FESS i tillegg til vedlikehold og utskifting av forskjellige komponenter. Ved å sammenligne utslipp beregnet i egen bærekraftsanalyse med utslipp gjort i rapporten *Energy and environmental footprints of flywheels for utility-scale energy storage applications* [67], antas det at resultatet er en god indikasjon på utslipp knyttet til hoveddelen av FESS-modulen utviklet av Spinning Energy.

7.8 En ladestasjon av svinghjul sammenlignet med et litium-ionbatteri

Når det gjelder FESS til bruk av energiforsyning av elektriske fartøy har denne teknologien en betydelig fordel i forhold til et LIB, på grunn av større C-rate. Med C-rate på 10 C har FESS evnen til å gå fra fulladet til utladet, og omvendt, på bare 6 minutter. Dette vil være gunstig i situasjoner der rask energioverføring er nødvendig. Eksempelvis har bilfergen på fergesambandet Geiranger–Hellesylt et stort energibehov per strekning i tillegg til en stram tidsplan for perioder den skal ligge kai. Skal fergen klare å få overført hele energibehovet på denne tiden kreves et energilager som kan overføre stor nok effekt. Derimot krever det også at energilagringssystemet om bord i fergen klarer å ta opp samme mengde effekt. Mulig overført effekt er altså avhengig både av energilagringssystemet om bord i fartøyet og av energilagringssystemet som tilfører energi til fartøyet. Poenget er likevel at for mulig overført effekt vil FESS aldri være den begrensede faktoren, så lenge det har nok energi tilgjengelig.

FESS har også en betydelig fordel som ladestasjon med tanke på levetid og robusthet mot hyppige ladesykluser. Med et LIB som ladestasjon vil slik hyppig opplading og utlading forkorte levetiden, siden teknologien vil degraderes i takt med utførte ladesykluser. Dette gjør det nødvendig å bytte dem ut fra tid til annen. Vanligvis må LIB erstattes etter 1 000–20 000 ladesykluser, som ved bruk som ladestasjon kan bety bare noen få år. For FESS derimot er det ingen konkret grense for antall ladesykluser det kan gjennomgå, og de vil minimum tåle 1 000 000 ladesykluser før eventuelt vedlikehold må gjennomføres.

En ulempe ved FESS i forhold til LIB er likevel at høy selvutlading gjør FESS lite passende for lagring over lengre tid. Et standby tap på 1 % per døgn fører til at lagret energimengde halveres allerede etter 2 måneder. Slik selvutlading vil derimot ikke være et problem for bruken i dette tilfellet, siden energien lagret i FESS blir brukt opp i løpet av et døgn uansett.

Fra et økonomisk perspektiv er installasjon av FESS mer enn tre ganger så dyrt som LIB. En grunn til dette kan være at FESS er en relativt ny teknologi, og dermed ikke like industrialisert og utbredt. Det kan derimot antas at kostnadene tilknyttet FESS vil minske i takt med større utbredelse og modenhet. På grunn av hyppigere vedlikehold og utskifting av et LIB er også kostnader tilknyttet driftsfasen mindre for et FESS enn for et LIB. Likevel er det, per dags dato, større total kostnader for et FESS enn for et LIB.

Klimagassutslippet knyttet til LIB ligger på rundt 759 kg CO₂-ekvivalenter per MWh [58]. Dette utslippet er knyttet til produksjon og drift av batteriet, og inkluderer ikke resirkulering. Utfra bærekraftanalysen vil et FESS fra Spinning Energy gi et klimagassutslipp på 6,13 kg CO₂-ekvivalenter per MWh. Siden bærekraftsanalyser kun inkluderer stator og rotor, velges det heller å sammenligne klimagassutslippet til batteri med klimagassutslippet presentert i rapporten *Energy and environmental footprints of flywheels for utility-scale energy storage applications* [67]. I rapporten vises det at et FESS med rotor av karbonfiber har et utslipp fra produksjon og drift på omtrent 45–90 kg CO₂-ekvivalenter per MWh [67]. Utfra disse resultatene har altså FESS et mindre klimagassutslipp enn et LIB, knyttet til produksjon og drift. En av årsaken til at FESS har mindre CO₂-utslipp enn LIB, kan være den korte levetiden til batteriet i forhold til et FESS. En annen mulig årsak er at FESS hovedsaklig består av metall- og komposittmaterialer, mens LIB består av flere CO₂-intensive kjemikalier [67].

8 Konklusjon

Gjennom rapporten er det undersøkt om svinghjul som et system for energilagring kan være et godt alternativ til å sikre stabil tilgang til energi i Geiranger, for å muliggjøre drift av elektriske fartøy for frakt av turister. For å svare på problemstillingen er bruk av svinghjul som energilager undersøkt utfra flere perspektiver.

De foreløpige resultatene viser at ved å kombinere energi fra grunnlast med kortreist energi fra forskjellig spisslast, vil dette gi *mulighet* for at ulike energibehov for frakt av turister langs Geirangerfjorden kan dekkes. Mengde energibehov som kan dekkes vil være avhengig av mengde energi som kan gjøres tilgjengelig i Geiranger. Et energilager kan bidra til å *sikre* tilgang på energi fra grunnlast og spisslast hver dag. Produksjon og drift av elektriske fartøy vil ikke være mulig uten sikker tilgang på energi i Geiranger. Derfor kan et energilager åpne for å gjøre drift av elektriske fartøy for frakting av turister, tilgjengelig.

Vurdering for mulig lokasjon av ladestasjon er gjort med hensyn på at det skal være nærme de ulike lastprofilene uten at det går utover nåværende ferdsel og eksisterende konstruksjoner. Utfra tilgjengelig energimengder fra ulike kombinasjoner av grunnlast og spisslast, er det beregnet at det trengs 5–73 svinghjulmoduler fra Spinning Energy. Når det gjelder lokasjon er dette valgt utfra at det skal være nok plass til maksimalt antall svinghjulmoduler. Lokasjonsalternativer kan derimot variere utfra forskjellige energibehov ved forskjellige sesonger. Et containerbasert energilager vil åpne for at anlegget enkelt kan deles opp og forflyttes etter behov. Det kan derfor konkluderes med at et slikt energilagringssystem kan være gunstig for Geiranger, med sesongbasert energibehov.

Er det ikke økonomisk lønnsomt å innføre energilager i form av svinghjul, kan det bli vanskelig å få støtte og å få det gjennomført. Teoretisk sett har svinghjul som et system for energilagring større totalcostander og er derfor mindre lønnsomt. Utfra egne beregninger og antagelser rundt salgspris for energi og mengde energi som kan lagres, viser derimot de foreløpige resultatene at det vil være mulig å tjene inn igjen investeringen i løpet av 20 års levetid. Til tross for at svinghjul som et energilagringssystem er mindre lønnsomt enn et litium-ionbatteri vil det likevel være lønnsomt.

Utfra bærekraftsanalysen som er gjort har rotoren og statoren til et svinghjul utviklet av Spinning Energy, et samlet CO₂-utslipp på 6,13 kg CO₂-ekvivalenter per MWh. Bærekraftsanalysen viser at mest utslipp er knyttet til strømmen som lagres på energilageret, altså i driftsfasen. Ved å sammenligne utslippet med et typisk litium-ionbatteri har derimot svinghjul som et system for energilagring et betydelig mindre CO₂-utslipp.

For å oppsummere kan det konkluderes med at svinghjul som et system for energilagring i Geiranger kan være en god løsning for å sikre stabil tilgang til energi i fjorden. Sett fra et større perspektiv kan slik stabil tilgang til energi, samt lokal fornybar energiproduksjon, være nøkkelen til å muliggjøre drift av bærekraftig turisttransport i norske verdensarvfjorder.

9 Videre arbeid

Dette kapittelet tar for seg forslag til ulike tema det kan jobbes videre med. Gjennom arbeidet med problemstillingen er det funnet forskjellige tema som kan bidra til at et slikt prosjekt kan bli lettere å utføre.

Utforming av ladestasjon

Med tanke på utforming av ladestasjon viser Figur 7.8 kun en grov skisse. Det må videre utarbeides mer detaljerte planer for utforming og komponenter som trengs i anlegget. I tillegg må det settes opp en skallerbar testpilot av anlegget for å bevise driftssikkerhet og ladekapasitet. Testpiloten kan senere skalleres etter energi- og effektbehovet. Detaljerte planer og bevis for at det vil fungere er nødvendig for at det skal være mulig å gjennomføre utbygging av en slik ladestasjon i Geiranger.

Lokasjon av ladestasjon

Når det gjelder lokasjon av ladestasjon er det ikke tatt hensyn til eventuelle lover og regelverk. Lokasjon er kun undersøkt i forhold til hvor det vil være fysisk plass, uten å gå utover nåværende ferdsel og eksisterende bygg. Lokasjon vil derimot påvirkes av flere faktorer, eksempelvis reguleringsplan, tillatelse, trafikk, eiendomsgrenser, eier, vernestatus og økonomi. Skal utbygging av ladestasjon i Geiranger skje må det gjøres ytteligere undersøkelser rundt de nevnte faktorene.

Utforming av kaianlegg

For å muliggjøre frakt av turister ved hjelp av elektriske fartøy er det nødvendig med et kaianlegg som kan ta i mot alle de elektriske fartøyene. Med tanke på kaianlegg er det kun tatt utgangspunkt i en skisse utarbeidet av prosjektet Grønn kai 2022 [81], samt den eksisterende kaien til bilfergen og småbåter. Utforming av kaianlegg er ulikt for ulike typer fartøy. For større fartøyer er det eksempelvis nødvendig å stabilisere fartøyene mens de skal lade, helst ved hjelp av fortøyning fra kaianlegget. Om det skal bruke egne propeller til å stabilisere seg selv vil dette være svært energikrevende og mye energi går tapt. Mer detaljert utforming av kaianlegget og fortøyningskomponenter er viktig å undersøke for at det skal være mulig å frakte turister ved hjelp av de nevnte elektriske fartøyene.

Utforming av brenselcelle-anlegget

Med tanke på utforming av brenselcelle-anlegget gjøres ytteligere vurderinger. Blant annet må det gjøres nærmere undersøkelser rund hvordan selve anlegget for fylling og drift av brenselcelle og lagring av hydrogen vil se ut, samt hvordan hydrogen kan lagres på eiendommen. Det må også gjøres nærmere undersøkelser rundt sikkerhet og regelverk, med tanke på å utføre en risikovurdering og at anlegget må bygges og kontrolleres etter anerkjent norm for å sikre tilstrekkelig sikkerhet. Dette er viktige faktorer å ta hensyn til skal forbrenning av hydrogen ved hjelp av en brenselcelle være en mulig og trygg løsning.

Det vil også være mulighet for å bruke andre hydrogenbærere enn ren hydrogen. Dette kan forenkle krav og regler som stilles til sikkerhet og lagring. En mulig hydrogenbærer kan eksempel være biometanol eller ammoniakk. Hvis det skal undersøkes mulighet for andre hydrogenbærere er det også viktig å tenke på at det vil være behov for andre typer brenselceller.

Drift av ladestasjon

For å muliggjøre drift av elektriske fartøy til frakting av turister må det være sikkert at lagret energimengde alltid samsvarer med energi- og effektbehov fra forskjellige lastprofiler. For at dette skal gå an vil det være nødvendig med faktiske data for effektstrøm inn i energilagringssystemet per dag, i tillegg til mer konkrete planer for driftsprofil og derav ladebehov for hver enkelt lastprofil. Per dags dato, er det kun elektriske RIB-båter som faktisk har eksisterende driftsplaner for bruk i Geiranger. Et videre arbeid vil dermed være å undersøke nærmere planer for drift av elektriske fartøy, samt utføre praktiske målinger for effektstrøm inn i FESS.

Økonomi

Ved hjelp av økonomiske beregninger har det blitt undersøkt hva inntekten til et FESS må være for å kunne gå i null, 20 år etter investeringen er gjort. Beregningene er derimot basert på en del antagelser, i tillegg til at det ikke er tatt hensyn til kostnader knyttet til drift av ladestasjon, vedlikehold av de ulike komponentene og utbygging av kaianlegg og brenselcelle-tomt. For mer detaljerte beregninger for hva inntekten til ladestasjonen må være for at investeringen skal gå i null, må det gjøres videre undersøkelser for hva disse kostnadene vil være.

LCA

Livsløpsvurderingen er basert på stator og rotor, altså kun deler av en FESS-modul fra Spinning Energy. For en mer fullstendig analyse må det videre beregnes utslipp knyttet til de andre komponentene som finnes i et FESS, som fundament, vakuumpumpe og vakuumkammer, transformator og aksel. Siden FESS som ladestasjon er tenkt å plasseres i større containere hadde det også vært interessant å undersøke utslipp knyttet til disse. På grunn av manglende informasjon var det derimot ikke mulig å undersøke disse faktorene i denne omgang.

Referanser

- [1] S. A. Kalogirou. *Industrial Process Heat, Chemistry Applications, and Solar Dryers*. Elsevier, 2014. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397270-5.00007-8> (sjekket 29.03.2023).
- [2] Arne Hugo Hansen. *Risikopremier i norske renter*. Mastergradsoppgave. Universitetet i Tromsø, 2010. URL: <https://hdl.handle.net/10037/3268> (sjekket 19.05.2023).
- [3] T. AS. *Firmainformasjon*. Tindranett AS. 2023. URL: <https://www.tindranett.no:443/om-oss/firmainformasjon/> (sjekket 03.03.2023).
- [4] Battelle Memorial Institute og U.S. Department of Energy. *Manufacturing Cost Analysis of PEM Fuel Cell Systems for 5- and 10-kW Backup Power Applications*. Okt. 2016. URL: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/articles/manufacturing-cost-analysis-pem-fuel-cell-systems-5-and-10-kw-backup-power> (sjekket 18.04.2023).
- [5] Beacon Power. *Beacon Power*. URL: <https://beaconpower.com/> (sjekket 19.05.2023).
- [6] H. Bergan-Skar og J. Viddal. *Prosjektering av nullutslippssightseeingfartøy*. Bacheloroppgave i Skipsdesign. Ålesund: NTNU, mai 2022. URL: <https://hdl.handle.net/11250/3003249> (sjekket 28.03.2023).
- [7] N. best. *Discover the Geirangerfjord*. Norways best. URL: <https://www.norwaysbest.com/globalassets/pdf/rutetider/rutetider-2023/fjord-cruise-geirangerfjord-2023.pdf> (sjekket 20.05.2023).
- [8] S. Bjelland. *Informasjon om tilgjengelig energi på strømmettet*. E-mail. 28. feb. 2023.
- [9] A. Blackman og L. Gahan. *Aylward and Findlay's SI Chemical Data*. John Wiley & Sons Inc, 2013. ISBN: 978-0-7303-0246-9.
- [10] BloombergNEF. *Lithium-ion Battery Pack Prices Rise for First Time to an Average of \$151/kWh*. BloombergNEF. Section: Press Release. 6. des. 2022. URL: <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-rise-for-first-time-to-an-average-of-151-kwh/> (sjekket 08.05.2023).
- [11] F. O. Bonsaksen. *Informasjon om RIB-båter*. E-mail. 2023.
- [12] Bonseye AS. *Bonseye AS — Guidet RIB-tur i Geirangerfjorden*. URL: <https://bonseye.org/> (sjekket 03.02.2023).
- [13] O. S. Burheim. *Engneering Energy Storage*. Academic Press Inc, 2017.
- [14] M. V. Bøe. *bevaringslovene*. I: *Store norske leksikon*. 12. jan. 2023. URL: <https://snl.no/bevaringslovene> (sjekket 08.05.2023).
- [15] Celin R. Tonheim. *Regelverk for håndtering av hydrogen*. DSB, des. 2019. URL: <https://www.sintef.no/globalassets/sintef-industri/arrangement/sh2ift/gjeldende-regelverk-for-handtering-av-hydrogen-dsb.pdf> (sjekket 19.04.2023).
- [16] Dokument 8:30 S. *Representantforslag om straussituasjonen i Geirangerfjorden etter vedtak om nullutslipp for cruiseskip*. 2021. URL: <https://www.stortinget.no/no/Saker-og-publikasjoner/Publikasjoner/Representantforslag/2021-2022/dok8-202122-030s/?all=true> (sjekket 19.05.2023).
- [17] DSB. *Sikkerhet rundt anlegg som håndterer brannfarlige, reaksjonsfarlige, trykksatte og eksplosjonsfarlige stoffer*. DSB, 2012. URL: https://www.dsb.no/globalassets/dokumenter/rapporter/sikkerheten_rundt_anlegg_som_handterer_brannfarlige_reaksjonsfarlige_trykksatte_eksplosjonsfarlige_stoffer.pdf (sjekket 20.04.2023).
- [18] J. Eide. *Ombygging av fergen MF Veøy*. E-mail. 26. apr. 2023.
- [19] L. Engerengen. *Geirangerfjorden*. I: *Store norske leksikon*. 22. nov. 2022. URL: <http://snl.no/Geirangerfjorden> (sjekket 12.01.2023).

- [20] Enova. *Powerdock – Lading av elektriske fartøy — Støttet prosjekt*. Enova. URL: <https://www.enova.no/om-enova/om-organisasjonen/teknologiportefoljen/powerdock/> (sjekket 21.04.2023).
- [21] Fangfang Yang mfl. *A study of the relationship between coulombic efficiency and capacity degradation of commercial lithium-ion batteries*. 2018. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.144> (sjekket 08.05.2023).
- [22] *FCgen-1020ACS*. Datablad. Ballard. URL: https://www.ballard.com/docs/default-source/spec-sheets/fcgen-1020-acs-v2.pdf?sfvrsn=c3ebc380_4 (sjekket 05.05.2023).
- [23] *FCgen-1300*. Datablad. Ballard. URL: <https://pdf.directindustry.com/pdf/ballard/fcgen-1300/22779-383681.html> (sjekket 05.05.2023).
- [24] *FCvelocity-9SSL*. Datablad. Ballard. URL: https://www.ballard.com/docs/default-source/spec-sheets/fcvelocity9ssl.pdf?sfvrsn=4aebc380_4 (sjekket 05.05.2023).
- [25] FN. *Bærekraftig utvikling*. 28. okt. 2021. URL: <https://www.fn.no/tema/fattigdom/baerekraftig-utvikling> (sjekket 03.02.2023).
- [26] *Forskrift om helse og sikkerhet i eksplosjonsfarlige atmosfærer*. FOR-2003-06-30-911. Lovdata, 2003. URL: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2003-06-30-911> (sjekket 19.04.2023).
- [27] *Forskrift om håndtering av farlig stoff. Forskrift om håndtering av brannfarlig, reaksjonsfarlig og trykksatt stoff samt utstyr og anlegg som benyttes ved håndteringen*. FOR-2009-06-08-602. Lovdata, 2009. URL: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2009-06-08-602> (sjekket 19.04.2023).
- [28] *Forskrift om landtransport av farlig gods*. FOR-2009-04-01-384. Lovdata, 3. apr. 2009. URL: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2009-04-01-384> (sjekket 19.04.2023).
- [29] *Forskrift om trykkpåkjent utstyr*. FOR-2017-10-10-1631. Lovdata, 19. okt. 2017. URL: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2017-10-10-1631> (sjekket 19.04.2023).
- [30] Frida Berglund, James Lam og Kjersti Aarrestad. *Lagringsteknologier for fleksibilitet i energisystemet*. 2020-0919. DNV, 2020.
- [31] Ø. Grøn. *kinetisk energi*. I: *Store norske leksikon*. 9. jul. 2021. URL: https://snl.no/kinetisk_energi (sjekket 19.05.2023).
- [32] L. Gårseth-Nesbakk. *netto nåverdi*. I: *Store norske leksikon*. 6. jan. 2021. URL: https://snl.no/netto_n%C3%A5verdi (sjekket 26.04.2023).
- [33] Hanyuan Zhang mfl. *Forecasting tourism recovery amid COVID-19*. *Annals of Tourism Research*, 2021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.annals.2021.103149> (sjekket 06.05.2023).
- [34] P. Haugneland. *Dette koster hurtiglading*. Norsk elbilforening. 2. des. 2022. URL: <https://elbil.no/dette-koster-hurtiglading/> (sjekket 15.05.2023).
- [35] K. Hofstad. *brennverdi*. I: *Store norske leksikon*. 12. jan. 2023. URL: <https://snl.no/brennverdi> (sjekket 16.05.2023).
- [36] K. Hofstad. *elektrisk energi*. I: *Store norske leksikon*. 30. apr. 2023. URL: https://snl.no/elektrisk_energi (sjekket 19.05.2023).
- [37] K. Hofstad. *elektrisk energi*. I: *Store norske leksikon*. 30. apr. 2023. URL: https://snl.no/elektrisk_energi (sjekket 01.05.2023).
- [38] K. Hofstad. *regenerativ bremsing*. I: *Store norske leksikon*. 4. mar. 2020. URL: https://snl.no/regenerativ_bremsing (sjekket 13.05.2023).
- [39] K. Hofstad. *svinghjul – energilager*. I: *Store norske leksikon*. 26. jan. 2023. URL: http://snl.no/svinghjul_-_energilager (sjekket 27.01.2023).

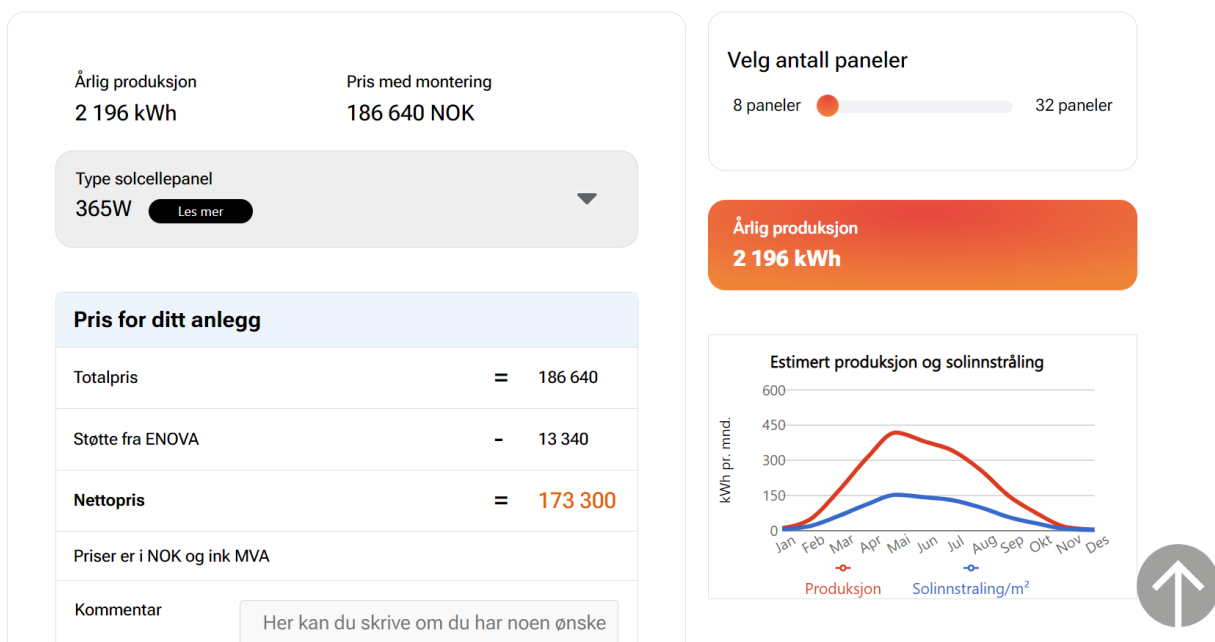
- [40] T. Holtebekk, B. Pedersen og G. M. Haarberg. *brenselcelle*. I: *Store norske leksikon*. 12. jan. 2023. URL: <https://snl.no/brenselcelle> (sjekket 16.05.2023).
- [41] Ø. Husø. *strekfasthet*. I: *Store norske leksikon*. 29. okt. 2022. URL: <https://snl.no/strekfasthet> (sjekket 29.03.2023).
- [42] N. Hydrogen. *Norwegian Hydrogen*. 23. feb. 2023. URL: <https://www.norwegianhydrogen.com/> (sjekket 23.02.2023).
- [43] *HyPM-XR POWER MODULES*. Datablad. Hydrogenics. URL: <https://pdf.directindustry.com/pdf/hydrogenics/hypm-xr-power-modules/33492-427505.html> (sjekket 05.05.2023).
- [44] K. Mahadevan mfl. *Identification and characterization near term direct hydrogen proton exchange membrane fuel cell markets*. Battelle, apr. 2007. URL: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/articles/identification-and-characterization-near-term-direct-hydrogen-proton> (sjekket 18.04.2023).
- [45] Klima-og miljødepartementet. *Meld. St. 13 (2020–2021)*. Regjeringa.no. Publisher: regjeringen.no. 8. jan. 2021. URL: <https://www.regjeringen.no/nn/dokumenter/meld.-st.-13-20202021/id2827405/> (sjekket 30.01.2023).
- [46] B. Kohja mfl. *Sluttrapport for prosjektet Grønn Kai 2021*. Ålesund: NTNU, Institutt for havromsoperasjoner, 2021.
- [47] S. kontor. *Nytt norsk klimamål på minst 55 prosent*. Regjeringen.no. Publisher: regjeringen.no. 3. nov. 2022. URL: <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/nytt-norsk-klimamal-pa-minst-55-prosent/id2944876/> (sjekket 03.02.2023).
- [48] Kristin Rove Bentsen. *Sammenligning av reell energiproduksjon fra PV-anlegg og estimer fra PVsyst, samt lønnsomhetsvurdering av PV-anlegg i Norge*. Ås: NMBU, 15. mai 2014. URL: <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/bitstream/handle/11250/221671/Bentsen%5C%2C%5C%20Kristin%5C%20Rove%5C%202014.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (sjekket 03.05.2023).
- [49] Kystverket. *Ankerplaner og havneinformasjon for Geiranger og Hellesylt cruisesesongen 2023*. Kystverket - tar ansvar for sjøveien. 24. apr. 2023. URL: <https://www.kystverket.no/menyoversikt-for-los-og-farledsbevis/los/lokale-begrensninger/ankerplan-geiranger/> (sjekket 12.05.2023).
- [50] E. Lorentzen. *Ladetid og ladeeffekt elbil*. E-mail. 2023.
- [51] LYSE. *Strømpris i dag time for time*. Lyse.no. URL: <https://www.lyse.no/strom/strompriser> (sjekket 26.04.2023).
- [52] M.F.R. Zwicker mfl. *Automotive battery pack manufacturing – a review of battery to tab joining*. Journal of Advanced Joining Processes, 2020. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2020.100017> (sjekket 09.05.2023).
- [53] Manbir Sodhi mfl. *Economic Lifetimes of Solar Panels*. USA, 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.130> (sjekket 25.04.2023).
- [54] A. Mekki mfl. *Verdiskapning og ringvirkninger av solkraftutbygging i Norge mot 2040*. 2021-07. Oslo: THEMA Consulting Group, aug. 2021, s. 33. URL: <https://www.solenergiklyngen.no/wp-content/uploads/2021/08/TE-21-07-Verdiskapning-og-ringvirkninger-av-solkraftutbygging-i-Norge-mot-2040.pdf> (sjekket 29.03.2023).
- [55] Meld. St. 41 (2016-2017), Innst. 253 S (2017-2018), Vedtak 672. *Klimastrategi for 2030 - norsk omstilling i europeisk samarbeid*. 2018. URL: <https://www.stortinget.no/no/Saker-og-publikasjoner/Saker/Sak/?p=69170>.

- [56] *Miljøstyring Livsløpsvurdering Krav og retningslinjer (ISO 14044:2006)*. 2006. URL: <http://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=236803>.
- [57] *Miljøstyring Livsløpsvurdering Prinsipper og rammeverk (ISO 14040:2006)*. 2006. URL: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=236802>.
- [58] Mitavachan Hiremath, Karen Derendorf og Thomas Vogt. *Comparative Life Cycle Assessment of Battery Storage Systems for Stationary Applications*. Environmental Science & Technology, 2015. URL: <https://doi.org/10.1021/es504572q> (sjekket 08.05.2023).
- [59] A. Mjelde, K. Martinsen og M. S. Eide. *Elektrifisering av bilferjer i Norge - kartlegging av investeringsbehov i strømnettet*. Norway: Maritime Advisory, 18. mai 2015. URL: <https://www.fornybarnorge.no/contentassets/0ae3a2b651ae4e83a0487ad493c3270c/elektrifisering-av-bilferger-i-norge.pdf> (sjekket 27.04.2023).
- [60] W. Mo Seong mfl. "Abnormal self-discharge in lithium-ion batteries". I: *Energy & Environmental Science* 11.4 (2018). Publisher: Royal Society of Chemistry, s. 970–978. DOI: 10.1039/C8EE00186C. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2018/ee/c8ee00186c> (sjekket 19.05.2023).
- [61] *Muntlig informasjon*. I samarbeid med K. Nerem. 2023.
- [62] *Muntlig informasjon*. I samarbeid med A. O. Rødstøl. 2023.
- [63] L. Mæhlum og K. A. Rosvold. *solceller*. I: *Store norske leksikon*. 24. jan. 2023. URL: <https://snl.no/solceller> (sjekket 16.05.2023).
- [64] Norsk elbilforening. *Tesla Model Y*. Elbil.no. URL: <https://elbil.no/elbiler/tesla-model-y-2/> (sjekket 24.04.2023).
- [65] OECD. *OECD Tourism Trends and Policies 2020*. Paris: OECD Publishing, 2020. URL: <https://doi.org/10.1787/6b47b985-en> (sjekket 06.05.2023).
- [66] Qingsong Wang mfl. *Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery*. Journal of Power Sources, 2018. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.02.038> (sjekket 09.05.2023).
- [67] M. M. Rahman mfl. *Energy and environmental footprints of flywheels for utility-scale energy storage applications — Elsevier Enhanced Reader*. Alberta, Canada: Faculty of Engineering, 2021. DOI: 10.1016/j.prime.2021.100020. URL: <https://doi.org/10.1016/j.prime.2021.100020> (sjekket 06.02.2023).
- [68] A. Rolstadås. *mål – prosjektledelse*. I: *Store norske leksikon*. 26. jan. 2023. URL: https://snl.no/m%C3%A5l_-_prosjektledelse (sjekket 19.01.2023).
- [69] K. A. Rosvold og K. Hofstad. *energilagring*. I: *Store norske leksikon*. 25. jan. 2023. URL: <https://snl.no/energilagring> (sjekket 06.05.2023).
- [70] Sahar Babri mfl. *A simulation model to assess emission reduction policies in tourism transport: Case study of the Geiranger fjord UNESCO world heritage site in Norway*. International Journal of Sustainable Transportation, 2022. URL: <https://doi.org/10.1080/15568318.2022.2137712>.
- [71] *SERAPHIM Shingle Cell PERC MONO 365W Solcellepanel 1623x1066x35mm - Sort - Kundesider*. Skanbatt. URL: <https://skanbatt.no/product/5918431/seraphim-shingle-cell-perc-mono-365w-solcellepanel-1623x1066x35mm-sort> (sjekket 25.04.2023).
- [72] Shuai Ma mfl. *Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review*. Progress in Natural Science: Materials International, 2018. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2018.11.002> (sjekket 09.05.2023).

- [73] E. Sirnes. *rente*. I: *Store norske leksikon*. 24. jan. 2023. URL: <https://snl.no/rente> (sjekket 01.05.2023).
- [74] Solcellespesialisten. *Solceller til bolig*. Solkart. URL: <https://www.solcellespesialisten.no/solceller-til-bolig> (sjekket 29.03.2023).
- [75] Spinning Energy. *Spinning Energy*. URL: <https://www.spinningenergy.com/#contact> (sjekket 02.02.2023).
- [76] Storulykeforskriften. *Forskrift om tiltak for å forebygge og begrense konsekvensene av storulykker i virksomheter der farlige kjemikalier forekommer*. FOR-2016-06-03-569. Lovdata, 6. jun. 2016. URL: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2016-06-03-569> (sjekket 19.04.2023).
- [77] T. Strømgren. *Spesifikasjoner for batteri og motor til RIB-båtene*. E-mail. 2. mar. 2023.
- [78] T. Strømgren. *Brødrene Aa and The Fjords pioneering with Future of The Fjords offering zero emission fjord cruise*. Hyen, 4. apr. 2019, s. 18. URL: <https://mozees.no/wp-content/uploads/2019/05/Article-Future-of-The-Fjords-med-tittelside.pdf> (sjekket 21.03.2023).
- [79] T. O. Svendsen. *RIB*. I: *Store norske leksikon*. 24. jan. 2023. URL: <https://snl.no/RIB> (sjekket 26.04.2023).
- [80] *The Paris Agreement — UNFCCC*. URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement> (sjekket 03.02.2023).
- [81] Torjus Levisen Johansen mfl. *Sluttrapport for prosjektet Grønn Kai 2022*. Ålesund: NTNU, 2022.
- [82] T. Torvatn, M. Rolfsen og T. A. Heggernes. *Teknologiledelse - for ingeniørstudenter*. 1. utg. Fagbokforlaget, 2016. ISBN: 978-82-450-2020-5.
- [83] F. Tours. *Bilferge: Geiranger - Hellesylt*. Fjord Tours. URL: <https://www.fjordtours.com/no/ting-aa-gjoere-i-norge/bilferger/geiranger-hellesylt/> (sjekket 24.04.2023).
- [84] O. R. Valmot. *Etter et langt liv på havet pensjonerte Frank Ole seg – og ble elbat-gründer*. Tu.no. 16. mai 2021. URL: <https://www.tu.no/artikler/etter-et-langt-liv-pa-havet-pensjonerte-han-seg-og-ble-elbat-grunder/510058> (sjekket 08.03.2023).
- [85] *VÅRE FARTØY*. The Fjords. URL: <https://www.thefjords.no/no/fartoy/> (sjekket 28.04.2023).
- [86] A. Wenaas Østigård. *Hellesylt Hydrogen HUB*. E-mail. 2022.
- [87] S. Wicki og E. G. Hansen. “Clean energy storage technology in the making: An innovation systems perspective on flywheel energy storage”. I: *Journal of Cleaner Production* 162 (sep. 2017), s. 1118–1134. ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.05.132. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652617310764> (sjekket 27.01.2023).
- [88] A. F. Zobaa. *Energy Storage - Technologies and Applications*. Croatia: IN TECH d.o.o., 2013. ISBN: 978-953-51-0951-8 978-953-51-6296-4. URL: <https://directory.doabooks.org/handle/20.500.12854/66382>.
- [89] B. Aa. *The Fjords takes delivery of groundbreaking Future of The Fjords*. Brodrene Aa. 20. apr. 2018. URL: <https://www.braa.no/news/future-of-the-fjords> (sjekket 25.04.2023).
- [90] T. Ø. Aa. *Spesifikasjoner til Rygerelektra og Future of the fjords*. E-mail. 20. apr. 2023.

A Vedlegg: Estimert solinnstråling i Geiranger

Figur A.1 viser et estimat over pris og energiproduksjon til åtte solcellepaneler monterert i Geiranger. Figuren er hentet fra solcellespesialisten[74].



Figur A.1: Solenergi i Geiranger [74]

B Vedlegg: Overikt over prosesser brukt i livsløpsvurderingen

Tabell B.1, Tabell B.2, Tabell 6.2 og Tabell B.4 presenterer prosessene som er brukt for å gjennomføre livsløpsvurderingen. Prosessene kommer fra OpenLCA i databasen ECOinvent. Resterende informasjon er gitt fra Spinning Energy [62].

Tabell B.1: Oversikt over prosesser for material og komponentproduksjon.

Material og komponentproduksjon				
Stator				
Materiale:	Parameter:	Enhet:	Prosess i OpenLCA	Notat
Stainless steel	Produksjon:	250	kg	2410: steel, chromium steel 18/8 259: metal working, average for chromium steel product manufacturing 4923: market for transport, freight, lorry 16-32 metric Fra Jæren til Egersund, lastebil
		250	kg	
	Transport	50	km	
Aluminium	Produksjon:	150	kg	2420: aluminium production, primary, ingot, EU27 2420: section bar extrusion, aluminium 2591: impact extrusion of aluminium, cold, tempering
		150	kg	
	Transport	150	km	
Kobber	Produksjon:	50	kg	2420: copper production, cathode 259: metal working, average for copper product manufacturing
		50	kg	
	Transport	50	km	
Elektronikk	Produksjon:	50	kg	2732: cable production, unspecified
	Transport		km	
Stator	Energi	492,92	kWh	3510: electricity production
Rotor				
Materiale:	Parameter:	Enhet:	Prosess i OpenLCA:	Notat:
Araldit	Produksjon:	19,69	kg	2011: epoxy resin production, liquid 4923: market for transport, freight, lorry 16-32 metric Fra Osnabrück til Egersund, lastebil
	Transport	1044	km	
Advantex	Produksjon:	43,45	kg	2220: glass fibre reinforced plastic production, polyester resin, hand lay-up
	Transport		km	
Rotor	Energi	256,63	kWh	3510: electricity production

Tabell B.2: Oversikt over prosesser for produksjon av svinghjul.

Produksjon av svinghjul				
Antall	Parameter:	Enhet:	Prosess i OpenLCA	Notat
Ett svinghjul	Energi	20	kWh	3510: electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore Rotor Stator 4923: market for transport, freight, lorry 16-32 metric All energi er kjøpt med vindgaranti. Laget egen prosess for utslipp knyttet til rotor Laget egen prosess for utslipp knyttet til stator Fra Egersund til Geiranger
		1	Antall	
	Transport	640	km	

Tabell B.3: Oversikt over prosesser for drift av svinghjul.


Drift				
Antall	Parameter:	Enhet:	Prosess i OpenLCA:	Notat:
ett svinghjul	Energi	1,1	kWh	3510: electricity production, hydro, reservoir, alpine region Produksjon
	Transport	1/1825000	Antall svinghjul per kWh	
				Inn til svinghjul Laget egen prosess for utslipp knyttet til produksjon av 1 svinghjul Fra Geiranger til resirkulering

Tabell B.4: Oversikt over prosesser for resirkulering av svinghjul.

End of life				
Stator				
Materiale:	Parameter:	Enhet:	Prosess i OpenLCA	
Stainless steel	Resirkulering	250	kg	3821: treatment of scrap steel, municipal incineration
Aluminium	Resirkulering	150	kg	3830: treatment of aluminium scrap, post-consumer, by collecting, sorting, cleaning, pressing
Kobber	Resirkulering	50	kg	3821: treatment of scrap copper, municipal incineration
Elektronikk	Resirkulering	50	kg	3830: treatment of used industrial electronic device, manual dismantling
Rotor				
Materiale:	Parameter:	Enhet:	Prosess i OpenLCA:	
Araldit	Resirkulering	19,69	kg	
Advantex	Resirkulering	43,45	kg	

C Vedlegg: Rutetabell for fergesambandet Geiranger–Hellesylt

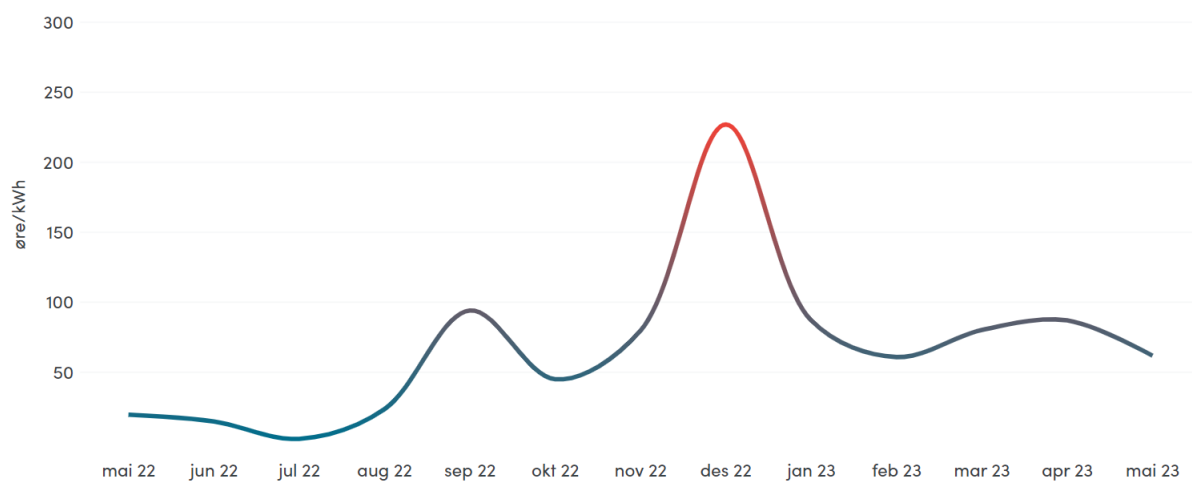
Figur C.1 presenterer rutetider for fergesambandet Geiranger–Hellesylt i perioden april 2023 - oktober 2023.

FJORD CRUISE - VALID PERIOD APRIL 2023 - OCTOBER 2023								
GEIRANGERFJORD								
 THE FJORDS								
Period	01.04-30.04.23			01.05 - 08.06				
Dep. Geiranger	09:30	13:00	16:00	08:00	11:00	14:00	17:00	
Arr. Hellesylt	10:35	14:05	17:05	09:05	12:05	15:05	18:05	
Dep. Hellesylt	11:30	14:30	17:30	09:30	12:30	15:30	18:30	
Arr. Geiranger	12:35	15:35	18:35	10:35	13:35	16:35	19:35	
Period	09.06-31.08.23							
Dep. Geiranger	08:00	09:30	11:00	12:30	14:00	15:30	17:00	18:30
Arr. Hellesylt	09:05	10:35	12:05	13:35	15:05	16:35	18:05	19:35
Dep. Hellesylt	08:00	09:30	11:00	12:30	14:00	15:30	17:00	18:30
Arr. Geiranger	09:05	10:35	12:05	13:35	15:05	16:35	18:05	19:35
Period	01.09-30.09.23				01.10-31.10.23			
Dep. Geiranger	08:00	11:00	14:00 ^{***}	17:00	09:30	13:00	16:00	
Arr. Hellesylt	09:05	12:05	15:05	18:05	10:35	14:05	17:05	
Dep. Hellesylt	09:30	12:30	15:30	18:30	11:00	14:30	17:30	
Arr. Geiranger	10:35	13:35	16:35	19:35	12:05	15:35	18:35	

Figur C.1: Rutetider for fergesambandet Geiranger-Hellesylt i perioden april 2023 - oktober 2023 [7]. Rutetidene er forskjellige for forskjellige sesonger, på grunn av ulikt behov for frakting av passasjerer.

D Vedlegg: Strømpriser for Geiranger

Figur D.1 presenterer strømprisene for Geiranger fra mai 2022 til mai 2023, og er hentet fra Lyse.no [51]. Figuren viser at den høyeste prisen det siste året var på 226,9 øre/kWh, gjennomsnittsprisen lå på 67,3 øre/kWh og den laveste var på 2,4 øre/kWh [51].



Figur D.1: Strømpriser for Geiranger fra april 2022 til april 2023 [51]

E Vedlegg: Priser for lading av el-bil

Tabell E.1 presenterer priser for drop-in lading for el-bil i Midt- og Nord-Norge. Tabellen er hentet fra elbil.no og er sist oppdatert 25. april 2023 [34].

Tabell E.1: Priser for drop-in lading for el-bil i Midt- og Nord-Norge. Sist oppdatert 25. april 2023 [34].

Operatør	Lyn (150 kW+)	Hurtig (50 kW+)	Normal (<50 kW)
Circle K	8,39	7,99	6,49
Eviny*	6,39	6,39	3,99
E.ON	9,00	4,40	2,75
Ionity	8,40	8,40	-
Ishavsveien	4,25	4,25	2,50
Kople*	7,49	7,29	5,65
Mer	7,39	7,39	4,99
Recharge	7,49	6,99	5,49
Supercharge	7,55	7,55	-
LAD OPP*	7,49	7,29	2,5
Tesla	3,30 til 5,20		

