



# Sjøkrigsskolen

## Bacheloroppgave

– Parisavtalen og Marinen – en casestudie –

av

Ole-Andreas Nistad Jørs

Levert som en del av kravet til graden:

BACHELOR I MILITÆRE STUDIER MED FORDYPNING I MASKINFAG

Innlevert: Juni 2020

**Godkjent for offentlig publisering**

## Publiseringsavtale

### En avtale om elektronisk publisering av bachelor/prosjektoppgave

Kadetten(ene) har opphavsrett til oppgaven, inkludert rettighetene til å publisere den.

Alle oppgaver som oppfyller kravene til publisering vil bli registrert og publisert i Bibsys Brage når kadetten(ene) har godkjent publisering.

Oppgaver som er graderte eller begrenset av en inngått avtale vil ikke bli publisert.

Jeg gir herved Sjøkrigsskolen rett til å gjøre denne oppgaven tilgjengelig elektronisk, gratis og uten kostnader	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	Nei
Finnes det en avtale om forsinket eller kun intern publisering? (Utfyllende opplysninger må fylles ut)  Hvis ja: kan oppgaven publiseres elektronisk når embargoperioden utløper?	Ja	Nei <input checked="" type="checkbox"/>

**Dato:** 22. juni 2020

**Kadett navn**

Ole Jørs

**Kadett, signatur**



## Forord

Bacheloroppgaven er et krav for bachelor i militære studier med fordypning i maskinfag ved Sjøkrigsskolen. Oppgaven har gitt meg muligheten til å ta i bruk et stort spekter av fagfeltet mitt. Jeg har tilegnet meg ytterligere kompetanse innenfor miljøgassutslipp, alternative fremdriftssystemer og fartøyene i Marinen. Arbeidet startet i januar og ble avsluttet i juni 2020.

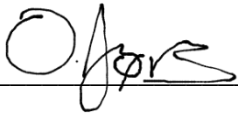
Takk til Gisle Strand for god veiledning og konstruktive innspill.

Takk til Linn-K. G. Gaupholm for god veiledning og profesjonell korrekturlesning.

Bergen, Sjøkrigsskolen

22.juni 2020

Signatur



A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Ole Jørs', is written over a horizontal line.



## Oppgaveformulering:

Bacheloroppgave ved Sjøkrigsskolen  
Marineingeniør Maskinlinjen, vår 2019

for

*Ole-Andreas Nistad Jørs*

Parisavtalen og Marinen – en case studie

Veiledere: Gisle Strand & Linn-K. G. Gaupholm

### **Problemstilling**

Hvordan kan Forsvaret redusere klimagassutslippene til Marinens fregatter, uten å tape kampkraft?

### **Oppgave**

Problemstillingen analyseres for mulige tekniske løsninger for en aktuell fartøystørrelse. Disse diskuteres i lys av Marinens krav og behov. Den løsningen kadetten mener er best egnet studeres videre for å se på praktisk anvendelse og hva som må til for at den skal fungere. Arbeidet konkluderes med en begrunnet anbefaling til Forsvarsmateriell/Markap og Sjøforsvarsstaben.

### **Bakgrunnsmateriell**

Generell og spesialisert propellitteratur og studier

Sivile studier

## Sammendrag

Da 55 nasjoner ratifiserte Parisavtalen i november 2016, var det med et felles mål; temperaturen på kloden skal ikke stige mer enn to grader før århundret er over. Norske myndigheter anerkjenner sitt ansvar, spesielt da Norge sitt utslipp har økt siden 1990. Forsvaret er intet unntak, og hele 85% av forsvarssektorens totale utslipp kommer fra fartøy og fly, hvor Marinens fartøy står for halvparten av det direkte utslippet og Nansen-klassen har den største andelen. Bacheloroppgaven søker med dette å besvare spørsmålet om hvordan Forsvaret kan redusere klimagassutslippene til Marinens fregatter, uten å tape kampkraft.

Opgaven har nyttet en metodisk fremgangsmåte, og er delt inn i tre faser. I første omgang ser den på et teoretisk rammeverk, før alternativer for å erstatte dagens løsninger fullstendig belyses og drøftes. Avslutningsvis presenteres en hybrid dieselelektrisk løsning. Det teoretiske rammeverket legger i hovedsak vekt på å beskrive og forklare begrepene CO<sub>2</sub>-ekvivalenter, direkte og indirekte utslipp, NO<sub>x</sub>, samt avgifter for utslipp. I tillegg belyses relevansen av Parisavtalen og kapittelet avsluttes med en status på utslipp i Norge, Forsvaret, Marinen og fregattvåpenet.

Dagens drivstoffsystem på et fartøy lignende Nansen-klassen presenteres med en beskrivelse av generelle krav, en dieselmotor for sammenligning, utregning av drivstoffbeholdning, samt seks parametere for drøftingen av de alternative fremdriftssystemene. Parameterne som nyttes er energitetthet, modenhet, utslipp, tilgjengelighet, sikkerhet og kampkraft. Videre drøfter oppgaven bruk av brenselceller, LNG, ammoniakk og en helektrisk batteriløsning. En oppsummering og avveining av alternativene gjør at oppgaven konkluderer med at et hybrid dieselelektrisk fremdriftssystem er løsningen som er best egnet for krigsskip.

Avslutningsvis ser oppgaven på marint bruk av batterier i en hybrid dieselelektriske løsninger, før et simulert fremdriftssystem, som baserer seg på Nansen-klassen, blir satt opp. Valg av batteri baserer seg på batteriteknologi, og faller på litium-ion batteri. Det presenterte fremdriftssystemet undersøker motoreffekten under aktivitet, ser på simulert aktivitetsdata, samt vurderer drivstofforbruk ved ulike driftsmoduser og fra generatordrift. I tillegg vurderes batterier og installasjon, før det totale utslipp med et nytt oppsett presenteres. Oppgaven konkluderer med at selv ved lav oppnådd reduksjon, vil et hybrid dieselelektrisk fremdriftssystem redusere miljøgassutslipp, gi fregatten større operasjonell fleksibilitet og øke kampkraften til fartøyet.

# Innholdsfortegnelse

Tabelloversikt .....	8
Figuroversikt.....	8
Forkortelser.....	9
1. Innledning.....	11
1.1 Bakgrunn.....	11
1.2 Mål.....	12
1.3 Avgrensninger .....	12
1.4 Metode .....	13
1.5 Struktur.....	14
2. Teoretisk rammeverk .....	15
2.1 Begreper og forklaringer.....	15
2.1.1 CO <sub>2</sub> -ekvivalenter.....	15
2.1.2 Direkte og indirekte utslipp .....	15
2.1.3 NO <sub>x</sub> .....	15
2.1.4 Avgifter for utslipp.....	16
2.2 Parisavtalen og utslipp .....	16
2.2.1 Utslipp i Norge.....	17
2.2.2 Utslipp i Forsvaret og Marinen .....	18
2.2.3 Utslipp i Fregattvåpenet.....	18
3. Alternativene.....	19
3.1 Brenselceller .....	22
3.2 LNG .....	25
3.3 Ammoniakk.....	26
3.4 Elektrisk .....	27
3.5 Oppsummering av alternativene.....	30
3.6 Hybride løsninger .....	31

3.7 Hybrid løsning for videre undersøkelse .....	32
4 Hybrid dielelektrisk løsning .....	33
4.1 Marint bruk av batterier i en hybrid dielelektrisk løsning .....	33
4.2 Valg av batteri .....	34
4.3 Fremdriftssystemet .....	35
4.3.1 Motoreffekt under aktivitet.....	36
4.3.2 Simulert aktivitetsdata .....	37
4.3.3 Drivstofforbruk ved ulike driftsmoduser .....	38
4.3.4 Drivstofforbruk fra generatordrift .....	39
4.3.5 Totalt forbruk og utslipp.....	40
4.4 Batterier og installasjon .....	41
4.4.1 Implementering av det hybrid dielelektriske fremdriftssystemet .....	41
4.4.2 Valg og bruk av batteri .....	44
4.4.3 Utslipp fra batteriet i dets levetid, livssyklusanalyse .....	46
4.5 Forventet reduksjon av utslipp og forbruk ved implementering .....	46
4.6 Total utslipp opprinnelig oppsett.....	47
4.7 Totale utslipp nytt oppsett.....	48
5. Konklusjon med anbefaling .....	49
5.1 Forslag til videre forskning .....	50
5.1.1 Forbedring av et dieselfremdriftssystem .....	50
5.1.2 Det økonomiske aspektet.....	50
5.1.3 Andre oppsett.....	50
6. Bibliografi.....	51
7. Vedlegg.....	54

## Tabelloversikt

Tabell 1: Presentasjon av spesifikasjoner for Fritjof Nansen-klassen	19
Tabell 2: Kravene til et generelt fartøy, lignende Nansen-klassen	19
Tabell 3: Oversikt over alternativene sine fordeler og ulemper	30
Tabell 4: Oversikt over alternativenes tilstand ved ulike parametere	31
Tabell 5: Motoreffekt under aktivitet.	36
Tabell 6: Estimert antall timer brukt pr hastighet ut fra operasjonsprofil (vedlegg 7)	37
Tabell 7: Drivstofforbruk ved ulike driftsmoduser av fartøyet	38
Tabell 8: Forbruk generatorsett	40
Tabell 9: Totalt estimert forbruk og utslipp fra generatorsett og framdriftsmaskineriet i løpet av et år	40
Tabell 10: Utregning av parametere knyttet til batteriets kapasitet/størrelse.	44
Tabell 11: Utregning av livstidsutslipp for batteriet alene	46
Tabell 12: Utregning for totalt estimert 10-årlig CO <sub>2</sub> -utslipp ved dagens fremdriftssystem på fregatter i 5000-tonnsklassen	47
Tabell 13: Utregning for totalt estimer 10-årlig CO <sub>2</sub> -utslipp ved nytt hybridelektrisk fremdriftssystem på Nansen-klassens fregatter	48

## Figuroversikt

Figur 1: Utslipp av klimagasser i Norge (Miljødirektoratet, 2019)	17
Figur 2: Prinsippet bak peak shaving	34
Figur 3: Installert effekt / propellertall vs skipets hastighet	36
Figur 4: Årlig prosentfordeling av tid brukt i ulike driftsmoduser	38
Figur 5: Drivstofforbruk ved ulike driftsmoduser pr år	39
Figur 6: Fremdriftssystemet til Nansenklassen (Region, 2016)	41
Figur 7: Forenklet bilde av dagens fremdriftssystem på Nansen-klassen (min tegning)	41
Figur 8: Illustrering av et hybrid dielelektrisk fremdriftssystem (min tegning)	42



## Forkortelser

### Forkortelse    Betydning

CO	Karbonmonoksid
CO <sub>2</sub>	Karbondioksid
DNV GL	Det norske veritas Germanischer Lloyd
DWP	Double-walled Piping
FFI	Forsvarets Forskningsinstitutt
FMA	Forsvarets Materiellavdeling
GTE	Gas Tight Enclosures
GWP	Global Warming Potential
HFK	Hydrofluorkarboner
IGF	International Code of Safety for Ships using Gases or Low-flashpoint Fuels
IMO	International Maritime Organization
kg	Kilogram
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatttime
LIB	Litium-ion batteri
LNG	Liquified Natural Gas
MARKAP	Maritime kapasiteter
MGO	Marine Gas Oil
MJ	Megajoule
m <sup>3</sup>	Kubikkmeter

NCE	Norwegian Center of Expertise
NG	Natural Gas
NM	Natutiske mil
NO	Nitrogenmonoksid
NO <sub>2</sub>	Nitrogendioksid
NO <sub>3</sub>	Nitrogentrioksid
NO <sub>x</sub>	Blanding av gasser som inneholder nitrogen
N <sub>2</sub> O	Dinitrogenoksid / lystgass
N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Dinitrogentrioksid
N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Dinitrogenpentoksid
OSV	Offshore Service Vessels
P <sub>e</sub>	Installert effekt
PFK	Perfluorkarboner
PSV	Platform Supply Vessel
RPM	Omdreininger per minutt
SF <sub>6</sub>	Svovelheksafluorid
SO <sub>x</sub>	Svoveloksider
SOLAS	Safety of Life at Sea
PEMBC	Polymer brenselcelle
V <sub>s</sub>	Fremgangshastigheten til propellen
Wh	Watttime

## 1. Innledning

Den 4. november 2016 trådte Parisavtalen i kraft, da 55 nasjoner - som står for over 55 % av de totale klimagassutslippene på globalt nivå - ratifiserte avtalen. Norge ser at klimautfordringene en står overfor er signifikante, og at vi må iverksette tiltak for «at temperaturen på kloden ikke skal stige mer enn 2 grader før århundret er over» (FN, 2020, s. 1). Resterende europeiske land har redusert utslippene sine med 23% siden 1990, samtidig som Norge sitt utslipp har økt. Norge har derfor lagt fram en rekke forslag og planer for å redusere utslippet i Norge med 2/3 innen 2050. Forsvaret blir ikke nevnt spesifikt i hverken Parisavtalen eller i tiltakene Norge har foreslått, men blir heller ikke ekskludert fra de foreslått planene.

Oppmerksomheten rundt utslippene øker i takt med konsekvensene utslippet har på miljøet. Det blir mer og mer viktig å redusere utslippene der det er mulig. Forsvaret argumenterer for et sterkt miljøfokus, og problematikken belyses i nyeste langtidsplan for forsvarssektoren (Forsvarsdepartementet, 2020, s. 109). Forsvarssektoren prognostiserer en økning i Forsvarets aktiviteter de kommende fem årene og utslippet vil ligge over 300 000 tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter i årene frem mot 2030 (*ibid*, 2020). Fartøy og fly står for 85% av forsvarssektorens totale utslipp, Marinens fartøy for halvparten av det direkte utslippet, hvor Nansen-klassen har størst andel av utslipp. Basert på den overnevnte problematikken, vil oppgaven søke å besvare følgende problemstilling:

*Hvordan kan Forsvaret redusere klimagassutslippene til Marinens fregatter, uten å tape kampkraft?*

For å svare på problemstillingen vil oppgaven undersøke ulike alternative fremdriftssystem som kan erstatte dagens fremdriftssystem. Bakgrunnen for, og måten oppgaven vil søke å besvare problemstillingen på, vil presenteres i de kommende delkaptitlene.

### 1.1 Bakgrunn

Gjennom utdanningen ved Sjøkrigsskolen lærer maskinkadetter generelt om maskineri, og fysikken og kjemien bak hvordan system er satt sammen. Klimagassutslipp er en viktig del av pensum og fokus rundt utslipp fra fremdriftssystem er i dag svært aktuelt. I kjølvannet av Greta Thunberg sitt engasjement og fredagskampanjer i 2019, har oppmerksomheten og fokuset rundt klima og miljø økt betraktelig i 2020. Relevansen og interessen av å finne nye metoder å transportere seg på, blir viktigere for hver dag som går.

For sivil skipsfart blir det billig å velge miljøvennlig, men Forsvaret kan ikke velge en billig løsning dersom det går på bekostning av for eksempel kampkraft. Det blir dermed relevant å se til alternative muligheter der Forsvaret faktisk har anledning til å redusere sine utslipp.

## 1.2 Mål

Med utgangspunkt i Fritjof Nansen-klassen har oppgaven som mål å først belyse utfordringene Marinen står overfor dersom miljøgassutslipp skal reduseres. Videre vil målet for oppgaven være å komme fram til en løsning som vil gjøre fregattene mer miljøvennlig uten at vi taper kampkraft. For å komme fram til en løsning vil det i oppgaven presenteres og vurderes ulike fremdriftssystem som kan være aktuelle, med et mål om å ekskludere alternativene som Forsvaret ikke er moden for. Avslutningsvis vil oppgaven søke å levere en løsning og anbefaling til Forsvarsmateriell/Markap og Sjøforsvarsstaben.

## 1.3 Avgrensninger

Oppgaven er i tid avgrenset innenfor et tidsrom på fem måneder og er skrevet i løpet av siste semester på maskinfaglinjen ved Sjøkrigsskolen. På grunn av oppgavens størrelse vil hovedtyngden i oppgaven være å drøfte ulike alternative fremdriftssystem for å finne et alternativ som oppgaven kan gå i dybden på og undersøke videre for å svare på problemstillingen.

For å kunne oppnå målene oppgaven har satt seg på best mulig måte er oppgaven nødt til å sette noen avgrensninger:

- 1) Oppgaven vil ta for seg en generisk fregattstørrelse, og ta utgangspunkt i Nansen-klassen for å gjøre analysen og vil ikke se på andre marinefartøy.
- 2) Oppgaven vil ikke diskutere alternativene som nevnes i kapittel 5.1 i lys av reduksjon av utslipp, men heller fokusere på alternative drivstoff som brennstoffkilder og alternative drivstoffsystem.
- 3) Oppgaven vil ikke ta for seg det økonomiske perspektivet ved endring av drivstoffsystem.
- 4) Oppgaven vil ikke hensynte de indirekte utslippene.
- 5) Oppgaven vil i noen grad bli avgrenset ved at den forblir UGRADERT.
- 6) Oppgaven vil skissere et mulig hybrid dieselelektrisk fremdriftssystem, men ikke gå detaljert inn på hver enkelt komponent i systemet.

## 1.4 Metode

Oppgaven er delt inn i tre faser:

- Fase 1: Teoretisk rammeverk
- Fase 2: Alternativer for å erstatte dagens løsninger helt
- Fase 3: Hybridelektrisk løsning

Første fase av oppgaven har til hensikt å introdusere leseren for teorien som blir lagt til grunn for oppgaven. Det teoretiske rammeverket belyser også problematikken rundt klimagassutslippet og hvordan Norge, Forsvaret og Marinen forholder seg til det. Teorien er viktig for egen læring og for å avklare begreper i oppgaven. I denne fasen samler oppgaven inn kvantitative utslippsdata og informasjon generelt. På denne måten leverer oppgaven tall som legger grunnlaget videre i oppgaven.

Fase 2 tar utgangspunkt i data- og informasjonsinnsamlingen gjort i første fase og danner videre et tenkt, men realistisk, scenario for krav til fartøyets nødvendige kapasiteter. Scenariet er nødvendig da tekniske data for Nansen-klassen ikke kan brukes i en offentlig oppgave. For å komme fram til de ulike alternative fremdriftssystemene som oppgaven vil se på videre, er det gjennomført et litteratursøk. Litteratursøket gjør det mulig å redusere antall potensielle alternativ ned til de aktuelle. Videre presenteres en studie av de aktuelle fremdriftssystemene for å avdekke fordeler og ulemper ved hvert enkelt. Denne fasen ser overordnet på de alternative fremdriftssystemene og går ikke i detalj rundt muligheten for installering eller potensiell reduksjon av miljøgassutslipp.

I fase 3 tar oppgaven for seg et alternativ valgt ut blant de aktuelle for å se på installering og reduksjon av miljøgassutslipp. I denne fasen går oppgaven mer i detalj i det konstruerte scenarioet basert på Nansen-klassen. Detaljanalysen går mer i dybden i den innsamlede dataen, og regner på hvor stor reduksjon av klimagass den valgte løsningen potensielt kan gi. De tre overnevnte fasene kan betraktes som en idéfase, som en ser igjen i PRINSIX-modellen<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Forsvarssektoren sin valgte gjennomføringsmetode for investeringer

## 1.5 Struktur

Strukturen gjenspeiles i metoden som er forklart i delkapittelet over.

### Fase 1: Teoretisk rammeverk

Den første fasen har til hensikt å utdype enkle teorier som vil bli brukt igjennom oppgaven. Videre i første fasen går oppgaven dypere inn i Parisavtalen for å underbygge klimautfordringene vi står overfor, samt hva som inngår i avtalen. Avslutningsvis belyses miljøgassutslippet i Norge, Forsvaret og Marinen for å gi leseren inngangsverdier for neste fase av oppgaven.

### Fase 2: Alternativer for å erstatte dagens løsninger helt

Andre fase starter med å informere om hvilket fremdriftssystem Nansen-klassen benytter i dag og viser til parametere som oppgaven vil bruke videre for å drøfte de ulike nye framdriftsalternativene. Oppgaven tar for seg fire ulike alternative fremdriftssystem, diskuterer dem og sammenligner dem med det eksisterende fremdriftssystemet. Alternativene blir oppsummert og oppgaven vurderer fordelene og ulempene ved hvert enkelt alternativ. Avslutningsvis ser oppgaven på hybride løsninger av de diskuterte alternativene før den best egnede løsningen velges. Den valgte løsningen tas med videre i tredje fase av oppgaven for ytterligere undersøkelse. I både første og andre fase er oppgaven i større grad en litteraturstudie. Alternativene studeres og drøftes på bakgrunn av tidligere studier, men går ikke inn på detaljerte utregninger.

### Fase 3: Hybridelektrisk løsning

Den tredje fasen tar for seg alternativet som peker seg ut som det mest lovende for ytterligere undersøkelse. I denne fasen er det større fokus på det tekniske aspektet og muligheten for å implementere alternativet for å, om mulig, oppnå en reduksjon av miljøgasser uten tap av kampkraft. Fasen starter med å gå grundigere igjennom marint bruk av batteri i fremdriftssystem. Videre lager oppgaven et tenkt, men realistisk scenario av fremdriftssystemet som blir brukt i dag og operasjonsprofilen til fartøyet. Scenariet blir brukt for å gjøre utregninger på størrelsen av komponenter til fremdriftssystemet. Avslutningsvis vurderer oppgaven om det valgte alternativet er mulig å installere på dagens fregatter og om det er vil redusere klimagassutslippet uten å gå på bekostning av kampkraften.

## 2. Teoretisk rammeverk

### 2.1 Begreper og forklaringer

De kommende delkapitlene vil presentere og forklare relevante begrep for oppgaven. For å sikre validitet og reliabilitet i oppgaven, baserer forklaringene seg på publiserte rapporter og forskning. Jacobsen (2015) beskriver det som en grunnleggende, kvalitativ forskningsmetode og kaller metoden dokumentanalyse. Slike analyser betegnes som en tilgjengelig metode for innholdsanalyser, da en samler data gjennom valgte dokumenter og analyserer disse for å identifisere viktige aspekter eller forhold (Grønmo, 2004). Begrepsforklaringene vil sørge for felles forståelse mellom oppgaveforfatteren og leseren.

#### 2.1.1 CO<sub>2</sub>-ekvivalenter

Utslipp av klimagasser er som regel målt i CO<sub>2</sub>-ekvivalenter. Dette inkluderer klimagassene; karbondioksid (CO<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>), lystgass (N<sub>2</sub>O), hydrofluorkarboner (HFK), perfluorkarboner (PFK) og svovelheksafluorid (SF<sub>6</sub>) (Øvrebø, 2020). Samtlige gasser bidrar til klimaendringer, men de har forskjellig effekt på oppvarmingen av atmosfæren. For å kunne sammenligne gassene regnes det om til CO<sub>2</sub>-ekvivalenter (Olerud & Lahn, 2020). For å regne om klimagassene brukes global warming potential (GWP). GWP gir et mål på hvor stor oppvarmingseffekt de ulike drivhusgassene har (Miljødirektoratet, 2020).

#### 2.1.2 Direkte og indirekte utslipp

Direkte utslipp er definert som utslipp av klimagasser som kommer fra egen produksjon og eget forbruk, og er spesifisert innenfor et område. Det kan være så stort som Norge og så lite som en bil. For en bil vil det direkte utslippet være eksosen som kommer ut fra bilen. Det indirekte utslippet til bilen vil være produksjonen av bilen og produksjonen av drivstoffet den bruker (Randers, 2006).

#### 2.1.3 NO<sub>x</sub>

NO<sub>x</sub> er et uttrykk som brukes om molekyler som består av nitrogen og én eller flere oksygenmolekyler som NO, NO<sub>2</sub> og N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. NO<sub>x</sub> regnes om til CO<sub>2</sub>-ekvivalenter i klimaregnskapet, men blir ekstra lagt merke til ettersom det i tillegg har en så sterk luftforurensende effekt. NO<sub>x</sub> dannes i prosesser hvor luft reagerer med brennbare stoffer ved høy temperatur. Bensin- og dieselmotorer er spesielt store på dannelsen av NO<sub>x</sub>. NO<sub>x</sub> er også beskrevet som den avgjørende kilden for sur nedbør (Pedersen, 2018). Det betyr at

forurensningen ikke bare utgjør en atmosfærisk forurensning, men kan bidra til generell forurensning av jord og vann (Benjaminsen, 2016).

### 2.1.4 Avgifter for utslipp

I 2007 ble det besluttet at «fremdriftsmaskineri med samlet installert motoreffekt på mer enn 750 kW» (Miljøverndepartementet, 2006, s. 1) skal betale avgift per kilo utslipp av NO<sub>x</sub>. I 2020 er satsen på 22,69 kroner per kilo (Skatteetaten, 2020). Avgiftene per liter brennstoff for marine gas oil (MGO) er 1,45 kr/liter (Finansdepartementet, 2019). Regjeringen fastslår også at avgifter for utslipp av CO<sub>2</sub> og NO<sub>x</sub>, sammen med utslippskvoter, er myndighetenes viktigste virkemidler for å sikre lavere utslipp av klimagasser.

## 2.2 Parisavtalen og utslipp

Parisavtalen er en internasjonal avtale som skal sørge for at verdens land evner å begrense klimaendringene (FN<sub>a</sub>, 2020). Avtalen har som oppgave å gjøre nasjoner oppmerksom på klimaproblemene vi har i dag, og som blir enda større dersom det ikke gjøres tiltak. Avtalen åpner i større grad for samarbeid på internasjonalt nivå, finansiell hjelp, og deling av teknologisk utvikling. I 2016 trådte Parisavtalen i kraft da 55 nasjoner som står for over 55% av totalt klimagassutslipp på globalt nivå, ratifiserte<sup>2</sup> avtalen. I dag er det 171 nasjoner som har ratifisert avtalen av 197 som er en del av konvensjonen (FN, 2020). De 171 landene som er en del av avtalen erkjenner at klimaendringene kommer som et resultat av klimagassutslippene på globalt nivå, og står sammen for å redusere utslippene.

Utenom de tidligere nevnte hensiktene til avtalen, er det flere aspekter ved avtalen som er viktig å avdekke for oppgaven. I artikkel 2 av Parisavtalen beskrives det hvordan land som har innført konvensjonen skal hjelpe med “å holde økningen i den globale gjennomsnittstemperaturen godt under 2°C sammenliknet med førindustrielt nivå, og tilstrebe å begrense temperaturøkningen til 1,5°C” (FN<sub>a</sub>, 2020). I artikkel 4 står det at det langsiktige målet for temperatur som angitt i artikkel 2, tar sikte på at de globale klimagassutslippene skal nå toppunktet snarest mulig.

Parisavtalen er tydelig på hva hver enkelt nasjon skal gjøre, og hvilke tiltak som forventes for å redusere utslippene (United Nations, 2015). Det er likevel ikke lagt miljøbestemmelser for forsvaret til nasjoner i Parisavtalen. Forsvaret til deltagende nasjoner

---

<sup>2</sup> Ratifikasjon viser til når en stat forplikter seg til å følge, og dermed blir part til, en folkerettslig (mellomstatlig) avtale (Strand, 2019)

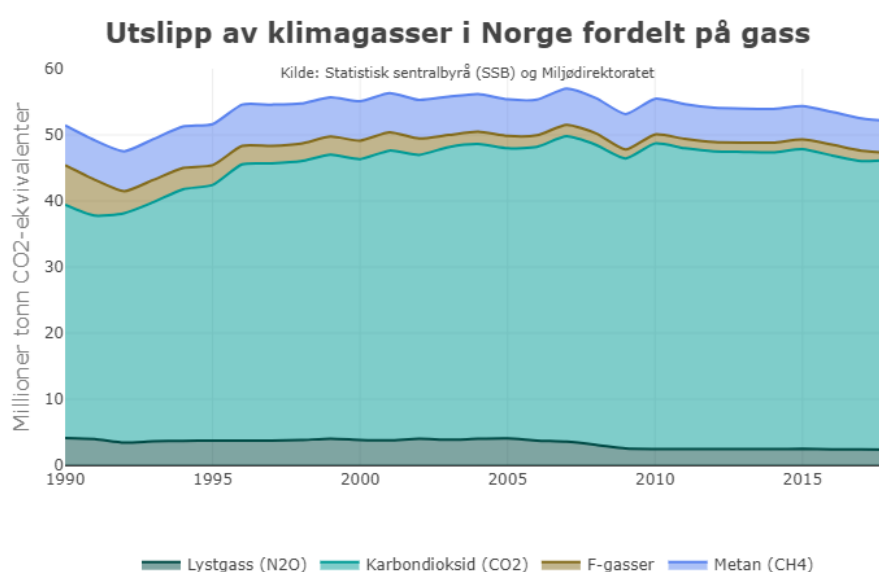


av Parisavtalen er derfor verken inkludert eller ekskludert av konvensjonen. Det betyr at det vil være opp til hver enkelt nasjon å avgjøre hvordan dens væpnede styrker skal overholde miljøbestemmelsene.

## 2.2.1 Utslipp i Norge

Norge slapp ut 52 millioner tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter i 2018 (Statistisk Sentralbyrå, 2020). Det er en økning på 1,1% i generelt klimagassutslipp siden 1990. Utslippsøkningen er mye grunnet innovasjon innen olje- og gassutviklingen i dette tidsrommet, og utslipp av CO<sub>2</sub>-ekvivalenter har ligget stabilt rundt 52 millioner tonn per år siden 1995 (Miljødirektoratet, 2019). Figur 1 viser en gradvis nedgang av fluorgasser og N<sub>2</sub>O-forurensning. Samtidig økte utslippene av CO<sub>2</sub> med 24% fra 1990 til 2018.

Til sammenligning har Sverige redusert sitt klimautslipp til 53,1 millioner tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter i 2018, en nedgang på 25,5% fra 1990 (Øvrebø, 2020). Klimagassutslippene i EU samlet var i 2018 23,2 % lavere enn i 1990 (*ibid*, 2019). Etter at Norge gikk inn i Parisavtalen ble det dannet et utvalg som så på mulighetene for å kutte klimautslippene våre med to tredjedeler innen 2050. Utvalget konkluderte med at tiltakene er nødvendige, gjørbare og ikke umulig dyre (Miljøverndepartementet, 2006, s. 11). Sittende regjering har også besluttet at “Norges ikke-kvotepliktige utslipp skal reduseres med minst 45% sammenlignet med 2005” (Regjeringen, 2019). Av de 52 millioner tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter som Norge slipper ut direkte hvert år, er det kun 3,2 millioner tonn som kommer fra fiske- og innenrikssjøfart. Det er 1,664% av hele Norges direkte utslipp (Statistisk Sentralbyrå, 2020).



Figur 1: Utslipp av klimagasser i Norge (Miljødirektoratet, 2019).

## 2.2.2 Utslipp i Forsvaret og Marinen

Ifølge FFI (Utstøl, Gohli, Karsrud, & Prydz, 2019) slapp Forsvaret i sin helhet ut 250 717 tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter i direkte utslipp i 2018. Forsvarets utslipp utgjør 0,23% av Norges totale utslipp. Fartøy i Forsvaret slapp ut 119 873,52 CO<sub>2</sub>-ekvivalenter (Utstøl, Gohli, Karsrud, & Prydz, 2019, s. 40). Marinens utslipp utgjør dermed 47,8% av Forsvarets totale utslipp. Utslipet er regnet ut fra det totale forbruket av MGO til alle fartøyene i Marinen.

## 2.2.3 Utslipp i Fregattvåpenet

På et år med normal seiling vil en fregatt forbruke 4,325 millioner liter MGO (Vetaas, 2020). For MGO kan man regne med 3,2 kg CO<sub>2</sub> per kg drivstoff (Statistisk Sentralbyrå, 2020).

$$4\,325\,000 \text{ liter MGO} * 0,832 \frac{\text{kg}}{\text{liter}} = 3598400 \text{ kg MGO}$$

$$3598400 \text{ kg MGO} * 3,2 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg MGO}} = 11514 \text{ tonn CO}_2$$

Fregattvåpenet består i dag av fire fartøy. Fregattene er på en vedlikeholds- og rulleringsplan, som betyr at ikke alle fartøyene seiler samtidig. I denne oppgaven regnes det likevel på utslipp fra fire aktive fregatter for å få et konkret resultat og fordi det ikke er mulig å forutse nøyaktig vedlikeholds- og rulleringsplan. Det betyr at fregattene i Marinen vil slippe ut omtrent 46,056 tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter på et år. Det er totalt 38% av hele Marinen, 18% av det totale direkte utslippet til hele Forsvaret og 0,087% av Norges totale utslipp. I dag er det fregattvåpenet som har de største utslippstallene i Forsvaret. Videre vil oppgaven se på ulike alternative fremdriftssystem og drøfte hvorvidt det vil være mulig å innføre fremdriftssystemene på en fremtidig fregatt for å redusere utslippene uten å tape kampkraft.

### 3. Alternativene

Før oppgaven ser på de ulike alternativene, vil drivstoffsystemet som benyttes i dag presenteres. Videre vil oppgaven gjøre nødvendige utregninger og sette krav til et alternativt fremdriftssystem basert på spesifikasjonene til Nansen-klassen og estimerte data. Fritjof Nansen-klassen har følgende spesifikasjoner (Forsvaret, 2019):

Tabell 1: Presentasjon av spesifikasjoner for Fritjof Nansen-klassen.

<b>Deplasement</b>	5290 tonn
<b>Lengde</b>	134 meter
<b>Toppfart</b>	26 knop
<b>Rekkevidde</b>	4500 nautiske mil v/ 16 knop
<b>Dieselmotor x 2</b>	BAZAN BRAVO 12V 4,5 MW
<b>Gassturbin</b>	GE LM2500 21,5 MW
<b>Diselgeneratorer x 4</b>	MTU 396 Serie 12V 1250 KVA

Mer detaljert data om kapasitetene til Fritjof Nansen-klassen lar seg ikke gjengi i en ugradert oppgave. Derfor vil oppgaven gjøre estimerte beregninger på data fra fartøy av tilsvarende størrelse og en motor med tilsvarende ytelse for å kunne gjøre et tilfredsstillende estimat. Følgende krav og data legger oppgaven til grunn for fartøyet ved undersøkelsen av de aktuelle alternativene:

#### Generelle krav

Tabell 2: Kravene til et generelt fartøy, lignende Nansen-klassen.

<b>Deplasement</b>	ca 5500 tonn
<b>Lengde</b>	134 meter
<b>Toppfart</b>	26 knop
<b>Rekkevidde</b>	5000 nautiske mil v/ 16 knop med 20% av drivstoffbeholdning tilgode
<b>Fremdriftssystem / Levert kraft</b>	Totalt 30,5 MW eller tilsvarende som dekker overnevnte krav.

## Dieselmotor

Oppgaven vil ta utgangspunkt i en 2016 MTU 12V 1163 TB93 (RedBook, 2020). Denne motoren har tolv sylindere, og leverer 5954 hestekrefter, som tilsvarer 4474 kW. Motoren selges fortsatt og er svært lik motorene som driver Nansen-klassen i dag. MTU 1163 veier 15,8 tonn. Det gir motoren en spesifikk kraft på 0,2848 kW/kg. Motoren bruker diesel som har en energitetthet på 10,1 kWh/liter (Hofstad, 2019). Motoren har et volum på 18,63 m<sup>3</sup>. Den spesifikke kraften, energitettheten og størrelsen på motoren er data som oppgaven vil bruke som referanse i drøftelsen av aktuelle alternative fremdriftssystem.

## Utrekning av drivstoffbeholdning

Utrekningen av nødvendig drivstoffbeholdningen er en grovutregning som blir gjort for å lage en referanseverdi som brukes til sammenligning videre i oppgaven. Kravet til fartøyet satt av oppgaven er 16 knop i 5000 nautiske med 20% drivstoff til overs. Nødvendig effekt for å drive en fregatt tilsvarende Nansen-klassen i 16 knop vil ligge rundt 5000-5500 kW (Strand, 2020). Oppgaven vil ta utgangspunkt i et effektbehov på 5250 kW. Oppgaven tar også utgangspunkt i at en dieselgenerator må drives kontinuerlig for drift av hotell, den vil dra omtrent 750 kW. Det utgjør totalt 6000 kW. Forbrukstall ved nødvendig effekt vil være omtrent 200 g/kWh (*ibid*, 2020) for både motorene og dieselgeneratoren. 5000 NM er 9060 kilometer, og 16 NM/t er 29,63 km/t.

$$\frac{9060\text{km}}{29,63 \text{ km/t}} = 305,77 \text{ timer}$$

$$305,77 \text{ timer} * 0,200 \text{ kg/kWh} * 6000\text{kW} = 367 \text{ tonn MGO}$$

$$335276 \text{ kg MGO} * 1,20 \text{ til gode} = 440 \text{ tonn MGO}$$

Utrekningene betyr at en fregatt vil trenge lagringskapasitet på 440 tonn MGO for å oppfylle kravet om 5000 nautiske mil ved 16 knop, med 20% av drivstoffbeholdning til gode. Vanligvis vil tettheten til MGO ligge rundt 890 kg/m<sup>3</sup> (Vedlegg 1), men Marinen bruker en litt lettere blanding som ligger rundt 850 kg/m<sup>3</sup> (Strand, 2020). Tankene blir heller aldri fylt til mer enn 95% kapasitet (*ibid*, 2020). Det betyr at fregatten må ha en drivstofflagringskapasitet på 544 m<sup>3</sup>, rundet opp til 550 m<sup>3</sup> av oppgaven. Utrekningen av

estimert drivstoffbeholdning som er nødvendig for å tilfredsstille kravene satt i oppgaven vil bli brukt som referanse under videre analyse av de ulike alternative fremdriftssystemene.

Med generelle krav, og nødvendige utregninger for analyse vil oppgaven videre drøfte ulike alternative fremdriftssystem for å fremheve aktuelle løsninger, og til slutt ekskludere alternativer ikke egnet for marinefartøy. Oppgaven vil ta for seg følgende parametere i drøftelsen av de alternative fremdriftssystemene:

- **Energitetthet**

Energitetthet regnes ut ved å dividere energiinnholdet av en energivare på volumet. MGO har en energitetthet på 38 000 MJ/m<sup>3</sup> og flytende hydrogen har 8500 MJ/m<sup>3</sup> (Vedlegg 1). Energitettheten beskriver den kjemiske bundne energien som kan utnyttes i energivaren. Vedlegg 1 gir en oversikt over energibærere brukt i drøftelsen av alternativene.

- **Modenhet**

Modent: komponenter og system er etablert, velprøvd med mange anlegg og godt støtteapparat.

Umodent: nye og uprøvde system, få enheter og lite støtteapparat.

- **Utslipp**

Undersøkelser av utslipp ved de ulike alternative fremdriftssystemene blir sammenlignet med utslippet til dagens dieselfremdriftssystem og oppgitt i CO<sub>2</sub>-ekvivalenter.

- **Tilgjengelighet**

Tilgjengelighet blir vurdert ut fra tilgang på komponenter, drivstoff og støtteapparat for Marinen.

- **Sikkerhet**

Marinens krigsfartøy stiller høyere krav til sikkerhet om bord på fartøyene sine enn sivile fartøy gjør. Sikkerhet blir derfor et viktig moment i undersøkelsen av de alternative fremdriftssystemene.

- **Kampkraft**

Kampkraft er svært viktig for Marinen og er momentet som vil være avgjørende i drøftelsen av de alternative fremdriftssystemene. Kampkraft er et begrep bruk daglig i Forsvaret uten en klar definisjon. Kampkraften til et krigsfartøy vil ofte beregnes ut fra rekkevidde, fart og våpen, men det er svært mye mer som utgjør kampkraften til et

fartøy. Oppgaven vil ta utgangspunkt i at kravene som er satt til fartøyene av Marinen gjenspeiler ønsket kampkraft og operativ evne. Endringer som gjør at Marinens krav til et fartøy ikke lenger kan tilfredsstilles kan dermed tolkes som en fremdriftsløsning som vil hemme kampkraften til fartøyet.

### 3.1 Brenselceller

I dag er det vanlig at skip bruker dieselgeneratorer for å produsere elektrisitet, hvor kjemisk energi er konvertert til elektrisitet gjennom termisk og mekanisk energi. Ved å fjerne forbrenningsmotoren fjernes  $\text{NO}_x$ - og  $\text{CO}_2$ -utslippet og lyd og vibrasjoner i skipet blir drastisk redusert (van Biert, Godjevac, Visser, & Aravind, 2016). Hydrogen kan brukes til å konvertere sin kjemiske energi til elektrisitet i en kjemisk prosess uten forbrenning. Dette gjøres i en brenselcelle. Brenselcelleteknologien kan i dag oppnå energieffektivitet på 35-70% (Miljødirektoratet, 2020, s. 111). Årsaken til at energieffektiviteten har så stor variasjon er fordi det finnes mange forskjellige brenselceller som bruker forskjellige drivstoff.

Reformering er den mest anvendte metoden for å omdanne hydrokarbonbrensel til en blanding av hydrogen og CO (van Biert *et al.*, 2016). Reformering er mulig å gjøre med diesel, ammoniakk, metanol og andre hydrogenholdige væsker. Oppgaven vil se på fremstilt hydrogen laget på land og brukt som drivstoff i brenselceller, et nullutslippsalternativ med vann som eneste avfallsstoff.

Hydrogen kan lagres komprimert eller flytende. Komprimert hydrogen lagres i gassform og jo høyere trykk, desto mer hydrogen kan oppbevares i en tank. For eksempel kan man ha en lagringstetthet på  $20 \text{ kg/m}^3$  ved 300 bars trykk eller  $40 \text{ kg/m}^3$  ved 700 bars trykk. Ved høyere trykk krever lagringen mer energi, sterkere konstruksjoner av tanker og hjelpesystem, som igjen vil koste mer penger. Det er få studier som ser på lagringstettheten til hydrogen i gassform, da bruken av flytende hydrogen som drivstoff har vist seg å tilby det mest kompakte systemet i sin helhet.

Det har blitt gjennomført en studie som sammenligner vekt og volum på dieselgenerator med flere forskjellige brenselceller, og konkluderer med at brenselceller tar mer plass enn dieselgeneratorer, dersom de skal levere lik effekt (Adams, 1989). Hvis man skal implementere brenselcelle som fremdriftssystem på en fregatt vil det bety at vi har behov

for et skrog med større volum. Samtidig er det viktig å påpeke at brenselcelleteknologien er mer modulbasert og at det er gjort store framskritt siden 1989. De modulbaserte brenselcellekomponentene gjør at plasseringen av komponentene kan gjøres effektivt for skipsvolumet.

Brenselceller drevet av flytende hydrogen forventes å tilby et kompakt overordnet systeme for flest antall driftstimer når det handler om driftskomponenter. Likevel resulterer den begrensede volumetriske lagringstettheten av flytende hydrogen som drivstoff i store systemvolumer. Van Biert *et al.* (2016, s. 355) påstår at ved driftstimer over 1000 timer, vil det høye volumet av flytende hydrogen resultere i totalt systemvolum som er fire til fem ganger større sammenlignet med MGO-drevet dieselgeneratorsett. Det betyr at vi trenger veldig mye mer lagringsplass.

For å lage et klart bilde på hvor mye flytende hydrogen en fregatt må ha med seg er det nødvendig å se på energitettheten. Norwegian Center of Expertise (NCE Maritime CleanTech, 2019) laget en rapport som omhandler hydrogen og Norge i nær framtid. Rapporten sammenligner diesel og hydrogen som drivstoff og mener at i snitt vil man klare å dra ut 33 kWh per kilo hydrogen. MGO har nesten så lite som en tredjedel av dette med kun 12-14 kWh per kilo. Det er likevel slik at hverken MGO eller flytende hydrogen lagres basert på vekt. Vi må derfor se på hvor mange kubikkmeter det tilsvarer.

Med bakgrunn i det overnevnte tar oppgaven fortsatt utgangspunkt i flytende hydrogen med en tetthet på  $71 \text{ kg/m}^3$  (Vedlegg 1). MGO har en tetthet på  $0,85 \text{ kg/m}^3$ . Energitettheten blir videre beregnet som  $\text{MJ/m}^3$  eller  $\text{MJ/kg}$ , som beskriver hvor mye energi som er lagret i drivstoffet per kubikk. Energitettheten til hydrogen er på  $8500 \text{ MJ/m}^3$ , som er 4,47 ganger lavere enn energitettheten til MGO. Ut fra kravene oppgaven har satt til en fregatt ser vi at det hadde vært behov for en tankbeholdning med flytende hydrogen på  $2458 \text{ m}^3$  for å tilfredsstille de satte kravene.

Det er interessant å se på tilgjengeligheten og modenheten av brenselcellesystemet med flytende hydrogen som drivstoff. Kystverket i Norge (2020) har laget et kart som viser tilgjengelige alternative drivstoff man kan fylle langs kysten. Det er per i dag ingen påfyllssteder for hydrogen av noe slag langs hele Norge sin kyst. Det er flere grunner til dette.

Først og fremst er det fordi etterspørselen er lav, og hydrogenmarkedet er fortsatt under utvikling.

NCE Maritime CleanTech (2016) anslår at innen 2030 vil det være 18 skip drevet av hydrogen i Norge, hovedsakelig testferger og «offshore service vessels». De 18 skipene vil ha et årlig forbruk på 18 tonn flytende hydrogen. Foreløpig produseres det ikke flytende hydrogen i Norge som gjør logistikken og den operative tilgjengeligheten til et problem. Prisen er 15 Euro/kg (NCE Maritime CleanTech, 2016) som er mer enn åtte ganger dyrere enn MGO når man ser på kWh levert til propellen.

Sikkerheten til drivstoffet vil spille en stor rolle om bord et skip, og enda større rolle for en fregatt. Van Biert *et al.* (2016, s. 357) mener at “it is expected that a redundant fuel cell system design, equipped with adequate ventilation, fire suppression, monitoring and control systems, will meet all classification requirements”. Dette betyr at med standarden som er satt av IMO, er det mulig å installere et brenselcellesystem som møter sikkerhetskravene for fartøy. Likevel er sikkerhetskravene strengere for krigsfartøy, spesielt rundt eksplosjonsfare og lettantennelige stoffer.

For å installere et brenselcellesystem sikkert, er det krav om «double-walled piping» og/eller «gas tight enclosures» (Vogler & Würsig, 2011, s. 3). Årsaken til dette er den høye sikkerhetsrisikoen det flytende hydrogenet har på skipet og personellet om bord. Kryogenisk<sup>3</sup> oppbevaring av hydrogenet er også nødvendig for at det ikke skal omformes til gass og lekke ut. Vekten av hydrogenet i seg selv er ikke et problem for deplasementet, men volumet av tanken som skal holde på hydrogenet, oppbevaringssystemet og sikkerhetstiltakene gjør at vekten til drivstoffsystemet i sin helhet blir for stor. Det økte deplasementet gjør at kravene satt innledningsvis ikke blir oppfylt.

International Code of Safety for Ships using Gases or other Low-flashpoint Fuels (IGF Code) regulerer sikkerheten rundt lettantennelige gasser og er underlagt SOLAS. Ettersom flytende hydrogen er svært lettantennelig og fare for eksplosjoner er stor, er sikkerhetskravene deretter. Hydrogen i gassform er helt harmløs for mennesker å puste inn,

---

<sup>3</sup> En gass er kryogenisk hvis den går fra gassform til flytende ved -150°C eller under



men ved lekkasje eller ved en plutselig tilført høy energikilde i form av for eksempel et missil, vil eksplosjonsfaren ved bruk av flytende hydrogen gjøre en fregatt sårbar.

### 3.2 LNG

Naturgass i form av Liquefied Natural Gas (LNG) har de siste 15 årene vokst frem som et godt alternativt drivstoff for skip. Produktet er i bruk, teknologien eksisterer og det er gode brukererfaringer. Likevel er LNG fremdeles ikke etablert i markedet på samme måte som tungolje og MGO. Dette delkapittelet vil vurdere hvorvidt en fregatt drevet på LNG er et reelt alternativ for å bidra til å senke utslippene til fregattvåpenet og Marinen, uten at det skal gå på bekostning av kampkraften.

LNG er et av de mest utbredte alternative drivstoffene i dag. LNG kan bidra til reduksjon av CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> og partikler. Reduksjonen kommer som en følge av at naturgass er det letteste hydrokarbonet. Ved forbrenning av LNG vil utslippet av CO<sub>2</sub> reduseres med 25%, NO<sub>x</sub> med inntil 90% og SO<sub>x</sub> og partikler nær elimineres til sammenligning med MGO (Barents NaturGass, 2019). Når naturgass kjøles ned til -162 °C går den fra gassfase til væskefase. Det er nødvendig å ha LNG i væskeform for at energitettheten skal være lav nok til at det er gunstig å benytte seg av den.

Tettheten til LNG er 440 kg/m<sup>3</sup> og har en nedre brennverdi på 50 MJ/kg. Det resulterer i en energitetthet på 22 000 MJ/m<sup>3</sup> (Vedlegg 1). For å oppfylle ønsket effektbehov vil det være nødvendig med en drivstoffslagringskapasitet som er 1,72 ganger større enn ved bruk av MGO. Dette resulterer i tanker med et totalvolum på rett over 720 m<sup>3</sup>. Tettheten til LNG er halvparten av MGO som gjør at deplasementet vil reduseres med 58,76 tonn når man ser utelukkende på vekten av drivstoffet. I likhet med hydrogen klassifiseres også LNG som kryogenisk ettersom den må oppbevares ved lav temperatur for og holdes flytende. Som for hydrogenet vil oppbevaringssystemet og vekten av sikkerhetstiltakene gjøre at deplasementet øker.

En dansk studie som ser på modenheten for alternative drivstoff presenterer en oversikt over utslippstallene for LNG (McGill, Remley, & Winther, 2013, s. 41). Sammenlignet med et drivstoffsystem drevet av MGO, vil CO<sub>2</sub>-utslippet reduseres med 25%. Videre vil NO<sub>x</sub> og SO<sub>x</sub> reduseres med nesten 100% og 85%. Reduksjonen av utslipp ved bruk

av LNG er ikke enormt dersom en betrakter CO<sub>2</sub> alene, men blir relevant når reduksjonen av NO<sub>x</sub> og SO<sub>x</sub> er bemerkelsesverdig stor.

Videre argumenterer McGill *et al.* (2013) for at det er vanskelig å implementere LNG på grunn av det lite utviklede nettverket for påfylling av LNG. Nyere rapporter fra Kystverket (2020) viser at Norge har et av de mest utviklede nettverkene for LNG i verden, og at dette vil være et satsingsområde i årene fram mot 2030. Selv om LNG er et tilgjengelig system som er godt utbygget i Norge, vil det være problematisk for en fregatt å bli etterforsynt med drivstoff på oppdrag utenfor Norge. McGill *et al.* (2013) viser også hvordan løsninger for rask påfylling av LNG til skip ikke eksisterer. Vanskelighetene ved påfylling kommer av mange sikkerhetstiltak som må være til stede for å behandle LNG.

Videre vil sikkerheten ha stor påvirkning ved implementering av LNG som drivstoff på en fregatt. På lik linje med hydrogen er også LNG klassifisert som ekstremt lettantennelig og eksplosivt. Oppbevaringen skjer ved -162°C og det er krav om gasstette pakninger og doble rør i hele systemet. Dersom skipet får en lekkasje og det kommer en gnist er metangassen eksplosiv sammen med luft (van Biert *et al.*, 2016). Metan, som opptar omtrent hele innholdet av naturgassen, er ikke direkte giftig i seg selv, men ved et stort utslipp av gassen vil oksygenet fortrennes. LNG som drivstoff på et frakteskip er i dag svært realistisk, og det er mulig å innføre sikkerhetstiltak som gjør det trygt å oppbevare LNG om bord. På lik linje med flytende hydrogen vil også LNG skape sikkerhetsutfordringer for et krigsskip på grunn av den høye eksplosjonsfaren.

### **3.3 Ammoniakk**

Ammoniakk er en gass ved normale temperaturer og atmosfærisk trykk, men blir flytende ved 10 bar. Ammoniakk kan brukes som drivstoff, men kan også ha funksjon som hydrogenbærer, i stedet for å lagre hydrogen. Som drivstoff kan det brukes i flytende form i en forbrenningsmotor, eller det kan benyttes i en brenselcelle som lager strøm til en elektromotor (Miljødirektoratet, 2020). Dette delkapittelet vil fokusere på flytende ammoniakk som drivstoff i en forbrenningsmotor. Ammoniakk som hydrogenbærer brukt i en brenselcelle er i dag på forskningsstadiet, og det eksisterer heller ingen forbrenningsmotorer som benytter seg av ammoniakk. Dette gjør at systemet er klassifisert som lite modent (DNV GL, 2019), men er antatt å være mer brukt i fremtiden.

Ammoniakk har en tetthet på  $631 \text{ kg/m}^3$  og en energitetthet på  $14100 \text{ MJ/m}^3$  (vedlegg 1). Energitettheten til ammoniakk er 2,7 ganger større enn MGO. For å oppfylle kravene satt av oppgaven innledningsvis i kapittel 3 hadde det vært behov for en tank på  $1218 \text{ m}^3$ . Vekten på ammoniakken ville vært 768 tonn, som er nesten det dobbelte av MGO. Ved dagens energiutvinning fra ammoniakk sammen med energitettheten ville volumet og deplasementet til en fregatt drevet på ammoniakk økt betraktelig.

I motsetning til LNG og hydrogen har ammoniakk en lagringstemperatur på bare  $-33^\circ\text{C}$  ved 10 bar. Dette gjør lagring og frakt av ammoniakk enklere og mindre kostbart enn de to overnevnte. Likevel vil ammoniakken ha større utfordringer utover lagring. Til tross for at det er gjort få studier på ammoniakk som drivstoff i en forbrenningsmotor, har DNV GL (2019) gjort noen antagelser. Organisasjonen mener de største ulempene vil være høy selvantennelsetemperatur, samt hvor giftig ammoniakk er for mennesker (DNV GL, 2019). Konsentrasjonen av ammoniakk i flytende form er så høy at den kan være dødelig for mennesker ved utslipp om bord på et skip (DNV GL, 2019). Store tanker med ammoniakk vil dermed gjøre en fregatt svært sårbar. I tillegg til at ammoniakk er svært giftig, er den også etsende på enkelte materialer. Dette gjør at ammoniakken må holdes unna kobber, plastikk og nikkel i og rundt motoren (*ibid*, 2019).

Til tross for ulempene ved ammoniakk skal det også nevnes at både MGO og bensin er brannfarlige og giftige drivstoff. DNV GL (2019) skriver i rapporten «A global and regional forecast to 2050» at sammen med hydrogen er ammoniakk det eneste nullutslippalternativet på markedet i dag, og at i 2050 forventer de at opp mot 25 % av skipsfart vil benytte seg av ammoniakk. Nullutslippstilfellet være når ammoniakk blir brukt i brenselceller. Når ammoniakk blir brukt i en forbrenningsmotor avgis  $\text{NO}_x$ -gasser i større mengder, sammenlignet med forbrenning av MGO (DNV GL, 2019, s. 22). Et  $\text{NO}_x$ -reduksjonssystem blir derfor nødvendig ved bruk av ammoniakk i en forbrenningsmotor.

### 3.4 Elektrisk

I de kommende avsnittene vil oppgaven diskutere muligheten for å erstatte motorene med batteripakker som hovedenergikilde for fremdrift. Det alternativet innebærer at skipet vil driftes utelukkende på elektrisitet fra batterier, og lades ved havner. Det fullstendige

elektriske alternativet tar utgangspunkt i at batteriene som blir brukt er litium-ionbatteri (LIB). LIB er det beste alternativet på markedet for øyeblikket (Aa, 2019) .

Det første og mest interessante å se på når det gjelder batterikapasitet er energitettheten og hvor mye volum og vekt det innebærer. Regnestykket vil være annerledes enn det de andre alternativene presenterte, da det ikke dreier seg om et drivstoff med tetthet, men batteripakker med en maksimal tilgjengelig energimengde. Det beste litumbatteriet i dag vil være i stand til å levere opptil 200 Wh/kg (vedlegg 2). Batterier med større kapasitet kan spesialbestilles, men oppgaven tar utgangspunkt i 200 Wh/kg. Som nevnt i utregningene innledningsvis er det nødvendig med en kraft på 5144 kW for å seile fartøyet i 16 knop. Denne farten skal fartøyet være i stand til å holde i 5000 nautiske mil, eller 306,77 timer, også nevnt i kravene innledningsvis i kappittel 3.

$$5144 \text{ kW} * 306,77 \text{ h} = 1578024,9 \text{ kWh}$$

$$\frac{1578024,9 \text{ kWh}}{0,200 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}} = 7890,124 \text{ tonn}$$

Selv med de best oppnåelige batteripakkene, vil skipet måtte tåle en last på nesten 8000 tonn. For at en fregatt skal kunne driftes på batterier utelukkende, hadde den vært nødt til å slepe med seg et batteri større enn seg selv. Det direkte utslippet på en fregatt drevet av elektrisitet ville være tilnærmet null. Det indirekte utslippet ville derimot vært et problem. Det totale utslippet for livsløpet til et batteri vil ligge på omtrent 195 kg CO<sub>2</sub>-ekvivalenter/kWh (Vedlegg 3). For et batteri på størrelsen med det fregattene ville behøvd for og driftes utelukkende på batterikraft, hadde det totale utslippet vært 307 714 tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter. Det er mer enn hele Forsvaret slipper ut årlig. Selv fordelt ut på batteriets levetid ville ikke et fullstendig elektrisk alternativ vært mer miljøvennlig.

Til tross for at et fullstendig elektrisk system ikke vil være gunstig, er det fortsatt noen momenter som veier det helelektriske systemet opp. Batterisystem er i dag utbredt over hele verden og er svært modent. Batteristørrelsen som behøves er ikke oppnåelig med dagens batteriteknologi, men ved å skalere ned er det mulig å få til mer effektive løsninger. Norge var første land i verden som produserte en 100% elektrisk ferge, og som har

høykapasitetsladere som er i stand til å hurtiglade batterier (Svendsen, 2014). Tilgang på strøm vil heller ikke være et problem verken i eller utenfor Norge, men likevel vil nødvendigheten av å måtte dra til uthavn for å lade opp et batteri på den størrelsen som en fregatt trenger gjøre fartøyet svært sårbart.

Energitettheten som selv de beste batteriene kan tilby er ikke et godt nok alternativ for fartøy som må kunne seile lange distanser uten forsyning. Det er likevel mulig å trekke fram flere sider som kan gjøre kampkraften til et batteridrevet fartøy sterkere. Støyreduksjonen til en fullelektrisk fregatt vil gi muligheten til å snike seg gjennom farvann. Avanserte søkesystem vil ha større problemer med å fange opp fregatter drevet av batteri grunnet reduksjonen av støy, sammenlignet med en dieseldrevet fregatt. En fregatt vil på denne måten ha mulighet for å gå uten lyd og uten utslipp som vil gi en taktisk fordel (Geertsma, Negenborn, Visser, & Hopman, 2017 ).

### 3.5 Oppsummering av alternativene

Tabell 3: Oversikt over alternativene sine fordeler og ulemper.

System/Drivstoff	Fordeler	Ulemper
Forbrenningsmotor/ MGO	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lavt utslipp ved optimal motorlast</li> <li>- Modent og tilgjengelig system</li> <li>- Høy energitetthet</li> <li>- Lett å frakte</li> <li>- Hemmer ikke kampkraft</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Høyt utslipp av NOx og CO<sub>2</sub></li> </ul>
Brenselcelle/Hydrogen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Null utslipp av klimagasser</li> <li>- Reduserer lyd og vibrasjoner</li> <li>- Modulbasert og fleksibelt designmessig</li> <li>- Genererer vann som avfallsstoff</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Svært lav energitetthet</li> <li>- Lettantennelig og høy eksplosjonsfare</li> <li>- Redusert kampkraft</li> <li>- Svært lite tilgjengelig og umodent system</li> <li>- Høye krav til sikkerhet, vedlikehold og oppfølging av systemet</li> </ul>
Forbrenningsmotor/LNG	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tilgjengelig og modent system</li> <li>- Stor reduksjon av NOx og SOx</li> <li>- 25% reduksjon av CO<sub>2</sub></li> <li>- Regler og direktiver er implementert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lav energitetthet</li> <li>- Lettantennelig og høy eksplosjonsfare</li> <li>- Redusert kampkraft</li> <li>- Høye krav til sikkerhet, vedlikehold og oppfølging av systemet</li> <li>- Lav reduksjon av drivhusgasser</li> </ul>
Batteri/Elektrisk	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Muligheter for gode taktiske løsninger</li> <li>- Tilgjengelig system</li> <li>- Null direkte utslipp</li> <li>- Ikke lettantennelig eller giftig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ekstremt lav energitetthet</li> <li>- Lav modenhet på grunn av den lave energitettheten</li> <li>- Store indirekte utslipp</li> </ul>

Tabell 4: Oversikt over alternativenes tilstand ved ulike parametere.

Drivstoff	MGO	Hydrogen	LNG	Ammoniakk	Elektrisk
Driftssystem	Forbrenningsmotor	Brenselcelle	Forbrenningsmotor	Forbrenningsmotor	Batteri
Energitetthet	Grønn	Rød	Gul	Gul	Rød
Modenhet	Grønn	Rød	Gul	Rød	Grønn
Utslipp	Rød	Grønn	Gul	Grønn	Grønn
Tilgjengelighet	Grønn	Rød	Gul	Rød	Grønn
Sikkerhet	Gul	Rød	Rød	Rød	Grønn
Kampkraft	Grønn	Rød	Rød	Rød	Rød

Målet med undersøkelsen av alternativene er å finne et fremdriftssystem for en fregattklasse lik Nansen-klassen som vil kunne redusere utslippet av miljøgasser uten at det går på bekostning av kampkraften. En forenklet oversikt over de viktigste momentene rundt de vurderte fremdriftssystemene vises i tabell 3. Den mest avgjørende delen av tabell 3 for valg av alternativt fremdriftssystem vil være kampkraften. Drøftelsen av alternativene sammen med tabell 3 og 4 viser utfordringene rundt sikkerhet for hydrogen, LNG og ammoniakk. Videre er også energitettheten et problem for alle alternativene som går hardt utover kampkraften. Oppgaven konkluderer med at ingen alternative drivstoffsystem er i stand til å erstatte drivstoffsystemet Nansen-klassen har i dag uten å tape kampkraft. Videre vil oppgaven se på ulike alternativ for en hybridløsning.

### 3.6 Hybride løsninger

Med kampkraften som viktigste krav vil oppgaven se videre på en hybridløsning sammen med dagens fremdriftssystem. Oppgaven vil ta utgangspunkt i alternativene vurdert i kapittel 3.1-3-5, fordi de er de mest aktuelle i dag for reduksjon av utslipp frem mot 2050 også som hybride løsninger. For å komme med en anbefaling på et konkret alternativt fremdriftssystem vil oppgaven videre fordypes i den mest lovende hybride løsningen. For å finne det best egnede hybride alternativet vil oppgaven se på muligheter for å redusere den tapte kampkraften vist i tabell 3 og 4.

#### Hydrogen

Til tross for at energitettheten ikke vil være et problem ved mindre lagringsbehov vil modenheten, tilgjengeligheten og sikkerheten fortsatt være hemmende for kampkraften til fartøyet.

## LNG

Energitettheten er mulig å finne løsninger på ved mindre beholdninger, og med satsingen på LNG i årene fremover vil modenheten og tilgjengeligheten også gjøre alternativet mulig. Likevel vil det kreve at fartøyet har to separate forbrenningsmotorer fordi LNG ikke kan brukes i en vanlig dieselforbrenningsmotor. Denne utfordringen sammen med sikkerhetsutfordringene rundt LNG gjør det vanskelig å finne en løsning som ikke hemmer kampkraften.

## Ammoniakk

Til tross for at ammoniakk er en bedre energibærer enn hydrogen er fortsatt modenheten og tilgjengeligheten så lav at det ikke vil være gunstig å undersøke alternativet grundigere. Sikkerheten er også et aspekt som vil være utfordrende å løse for et krigsskip på lik linje med både LNG- og hydrogenalternativet.

## Elektrisk

Selv ved installasjoner av et mindre batteri vil det skape utfordringer for fartøyets deplasement. Et hybridelektrisk alternativ vil, ulikt de andre alternativene, ikke ha tilsvarende problemer med tilgjengeligheten eller sikkerheten.

### 3.7 Hybrid løsning for videre undersøkelse

På bakgrunn av undersøkelsen og drøftingen av de overnevnte alternativene for et hybrid fremdriftssystem vil oppgaven videre undersøke et hybrid dieselelektrisk fremdriftssystem. Dette fordi de øvrige alternativene ikke imøtekommer kravene (illustrert i tabell 4), selv ved en hybrid løsning. Alternativet oppgaven vil undersøke videre for komme med en anbefaling vil basere seg på Geertsma *et al.* (2017) sin rapport om design og kontroll av hybride fremdriftssystem. Geertsma *et al.* (2017, s. 49) sin analyse av hybridelektriske fremdriftssystem konkluderer med at med dagens batteriteknologi vil et hybrid dieselelektrisk fremdriftssystem være den eneste løsningen som er egnet for krigsskip.



## 4 Hybrid dieselektrisk løsning

For å undersøke om denne løsningen vil være gunstig for reduksjon av utslipp uten at det går på bekostning av kampkraften, vil oppgaven først se på marint bruk av hybride batteriløsninger. Deretter vil oppgaven sette opp et fremdriftssystem basert på fremdriftssystemet som blir benyttet av Nansen-klassen i dag. Det scenariobaserte fremdriftssystemet er nødvendig for å finne mulige besparelsesområder ut fra en operasjonsprofil. Videre vil oppgaven grafisk se på fremdriftssystemet vi har i dag og sammeligne det med et hybrid dieselektrisk fremdriftssystem. Til slutt vil oppgaven se på forventet reduksjon av miljøgassutslipp ved implementeringen av det hybridelektriske fremdriftssystemet.

### 4.1 Marint bruk av batterier i en hybrid dieselektrisk løsning

Batterier for fartøy kan bidra til kraftforsyning og lagring av energi på en unik måte i forhold til andre tradisjonelle fremdriftssystem. Et installert batteri som en del av et hybrid dieselektrisk fremdriftssystem vil ha mulighet for oppladning fra landstrømstilkobling, generatorer, hovedmotorene og fra propellene når fartøyet reduserer hastigheten. Batteriet vil også ha mulighet for å gi eller ta kraft fra generatorer og dieselfremdriftssystemet som vil optimalisere drift av motorer og generatorer, samt reduksjon av drivstoffbruk (Wärtsilä, 2018). Wärtsilä (2018) viser til flere fordeler ved implementering av batteri til et dieselfremdriftssystem.

Én av fordelene ved drift av fartøyet på kraft fra kun batteri er zero-modus. Denne modusen vil gjøre at fregatten kan driftes av batteri utelukkende på lav hastighet uten noe utslipp. Fremdrift uten at motor er i drift vil også redusere støynivået. En slik modus vil som tidligere nevnt i oppgaven gjøre et krigsfartøy bedre egnet for ubåtjakt ved lave hastigheter, samt patruljering i lav hastighet. Dette vil øke fartøyets muligheter i operasjoner, og bidra til økt kampkraft. Wärtsilä har gjort suksessfulle installasjoner av hybridelektriske fremdriftssystem på fartøy i alle størrelser. Et slikt system er derfor svært modent. De viser videre til fordeler som kald oppstart av fartøy ved hjelp av batteridrift, peak shaving<sup>4</sup> (se figur 2) og mindre vedlikehold av fremdriftssystemet ettersom det driftes mer optimalt.

---

<sup>4</sup> “Load fluctuations are absorbed by the energy storage system, allowing stable operation of the machinery” (Wärtsilä, Wärtsilä HY Hybrid Solutions, 2018).



Figur 2: Prinsippet bak peak shaving.

Grafen i figur 2 viser hvordan batteriet optimaliserer driften av maskineriet ved å lade og utlade seg. P er levert kraft og t er tid (Karmiris & Tengnér, 2012).

## 4.2 Valg av batteri

Litium-ion batteri er som nevnt tidligere i oppgaven batterialternativet som gir best ytelse i forhold til vekt (Battery University, 2010). Oppgaven vil videre ta utgangspunkt i implementering av litium-ion batteri som er i stand til å levere 200 Wh/kg (Vedlegg 2).

Oppsummert vil et hybridelektrisk fremdriftssystem redusere drivstoffbruk og utslipp, medføre mindre vedlikehold, redusert lyd og vibrasjonsnivå og gi muligheter for zero-mode operasjoner og dermed større operasjonell fleksibilitet (Wärtsilä, Wärtsilä HY Hybrid Solutions, 2018). Fordelene ved systemet er svært gode og vil være med å forsterke mulighetene for oppdragsløsning hos en fregatt. Batteriteknologien er svært moden, og muligheten for implementering av systemet er mulig.

Til tross for fordelene og modenheten er energitettheten til et batteri svært lav og kan by på utfordringer for en fregatt som nevnt i det fullstendige elektriske alternativet. En fregatt vil ha et ulikt operasjonsmønster sammenlignet med andre kommersielle fartøy. Oppgaven vil videre gjøre en simulert analyse for å undersøke om implementeringen av systemet vil gi like store fordeler for en fregatt lik Nansen-klassen. Simuleringen er nødvendig for å undersøke hvor kraftig batteriet som skal implementeres må være for at det skal være gunstig, og for å tydeliggjøre den eventuelle reduksjonen av utslipp som implementeringen av systemet vil gi.

### 4.3 Fremdriftssystemet

I dag er Nansen-klassen drevet av:

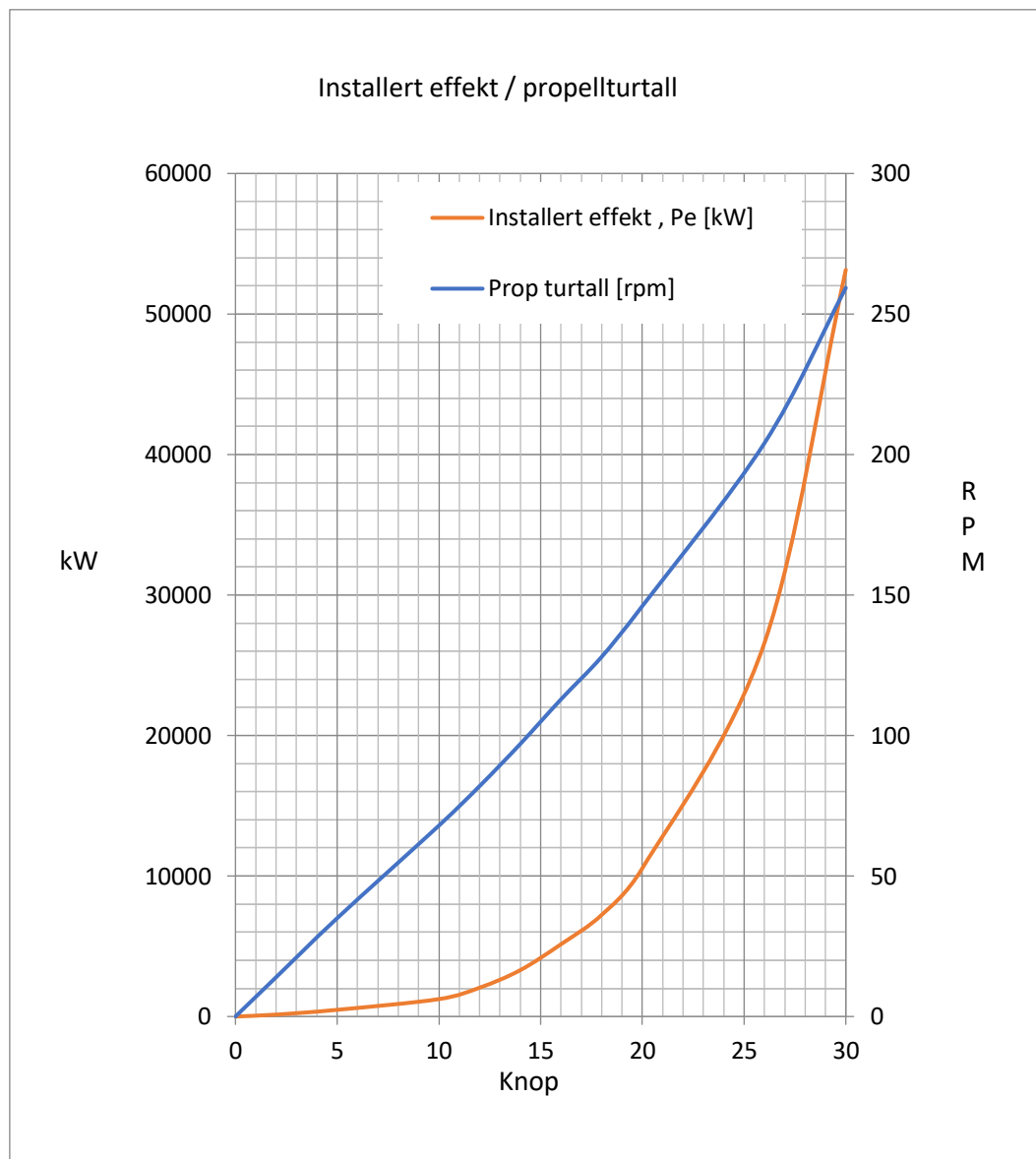
2 × BAZAN BRAVO 12V 4,5 MW dieselmotorer

1 × GE LM2500 21,5 MW gassturbin

I tillegg er fartøyet også utstyrt med fire dieselgeneratorsett som leverer 1000 kW hver. Oppgaven vil benytte seg av et scenario likt det som er beskrevet i drøftelsen av alternativene over. Som nevnt tidligere har ikke oppgaven status som begrenset og må derfor benytte seg av data som for de overnevnte motorene. For motor vil oppgaven benytte seg av data fra en 2016 MTU 12V 1163 TB93 som nevnt i delkapittel 2.4.1. Denne motoren leverer tilsvarende effekt og er av lik størrelse.

### 4.3.1 Motoreffekt under aktivitet

For å undersøke motoreffekt under aktivitet har oppgaven tatt utgangspunkt i et skip på tilsvarende størrelse som Nansen-klassen. Figur 3 viser installert effekt som er nødvendig for å regne ut utslipp ved ulike driftsmoduser.



Figur 3: Installert effekt / Figur 4: Installert effekt / propellerturtall vs skipets hastighet.

Grafen i figur 3 tar utgangspunkt i en fregatt med lik størrelse og motstand som Nansen-klassen. Forholdene grafen er beregnet i er stille sjø. Grafen er hentet fra faget skips- og motorlære ved Sjøkrigsskolen (Strand, 2020).

Tabell 5: Motoreffekt under aktivitet.

<b>V<sub>s</sub> (knop)</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>12</b>	<b>14</b>	<b>16</b>	<b>18</b>	<b>20</b>	<b>26</b>	<b>30</b>
<b>P<sub>e</sub> (kW) fremdrift</b>	50	136	476	1236	2050	3301	5144	7232	10554	26587	53142
<b>Turtall aksling (rpm)</b>	0	14	35	68	82	97	113	128	146	204	260
<b>Forbruk i g/kWh</b>	211	211	208	205	200	195	195	195	300	240	240

Tabell 5 beskriver hvor høy effekt skipet trenger for å flytte seg en gitt hastighet. Tabellen er laget av verdier fra grafene i figur 3. Forbruksdata opp til 20 knop er hentet fra vedlegg 5. Forbruksdataen er typiske for en dieselmotor på denne størrelsen. De viser at det optimale driftsområdet for fartøyet vil ligge rundt 16 knop. Forbrukstallene som kommer fram ved 20 knop og over er beregnet ut ifra vedlegg 6. Vedlegg 6 gir oss typiske forbrukstall for gassturbiner som en funksjon av levert kraft. Forbrukstallene er beregnet fra en 20,1 MW GE LM 2500 gassturbin som vil gi verdier estimert til å være tilsvarende gassturbinen på Nansen-klassen.

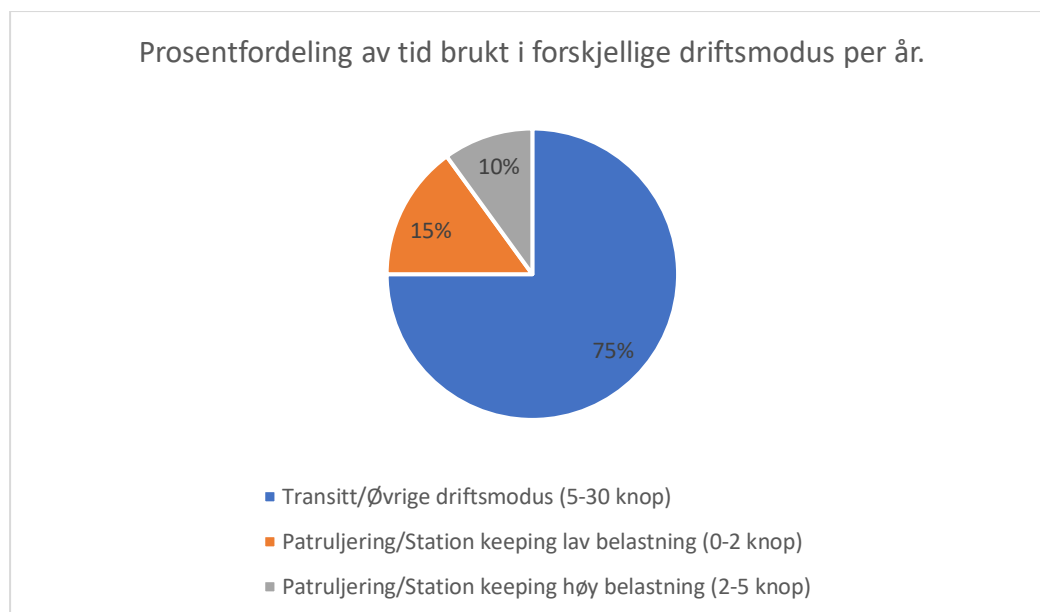
### 4.3.2 Simulert aktivitetsdata

Videre er det nødvendig å se på hvor mye tid en fregatt bruker i forskjellige driftsmoduser i løpet av et år. Opplysninger om det er begrenset for Nansen-klassen, men det er likevel mulig å gjøre gode estimater basert på operasjonsprofilen til andre krigsfartøy i tilsvarende størrelse. I et designprosjekt for en Arleigh Burke-klasse destroyer ble det konstruert en operasjonsprofil for å se på mulig reduksjon av drivstoff (Dimou, Menard, E.Sarris, & Urrutia, 2010) (Vedlegg 7). Fartøyets operasjonsprofil er sammenlignbart med en fregatt i Nansen-klasse og er det oppgaven vil ta utgangspunkt i ved videre beregning av drivstofforbruk.

Videre vil oppgaven gå ut fra at en fregatt vil ha 180 seilingsdøgn per år. Fordelingen av disse, basert på operasjonsprofilen, er presentert i tabell 6 og figur 4.

Tabell 6: Estimert antall timer brukt pr hastighet ut fra operasjonsprofil (vedlegg 7).

<b>V<sub>s</sub> (knop)</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>12</b>	<b>14</b>	<b>16</b>	<b>18</b>	<b>20</b>	<b>26</b>	<b>30</b>
<b>Prosent pr hastighet</b>	6.0	9.0	10.0	9.0	11.0	15.0	21.2	15.5	2.2	0.8	0.3
<b>Timer pr hastighet</b>	259.2	388.8	432	388.8	475.2	648	915.84	670	95	35	13



Figur 5: Årlig prosentfordeling av tid brukt i ulike driftsmoduser.

Ut ifra fordelingen av antall timer per hastighet kan det videre deles inn i ulike driftsmoduser fartøyet opererer i. I tabell 6 vil antall timer brukt i 0 knop tilsvare patruljering/station keeping<sup>5</sup> fra 0-2 knop og lav belastning. Tilsvarende vil patruljering/station keeping ved høy belastning omfatte timer i 2-5 knop. Resterende av tiden blir sett på som transitt og øvrig driftsmodus.

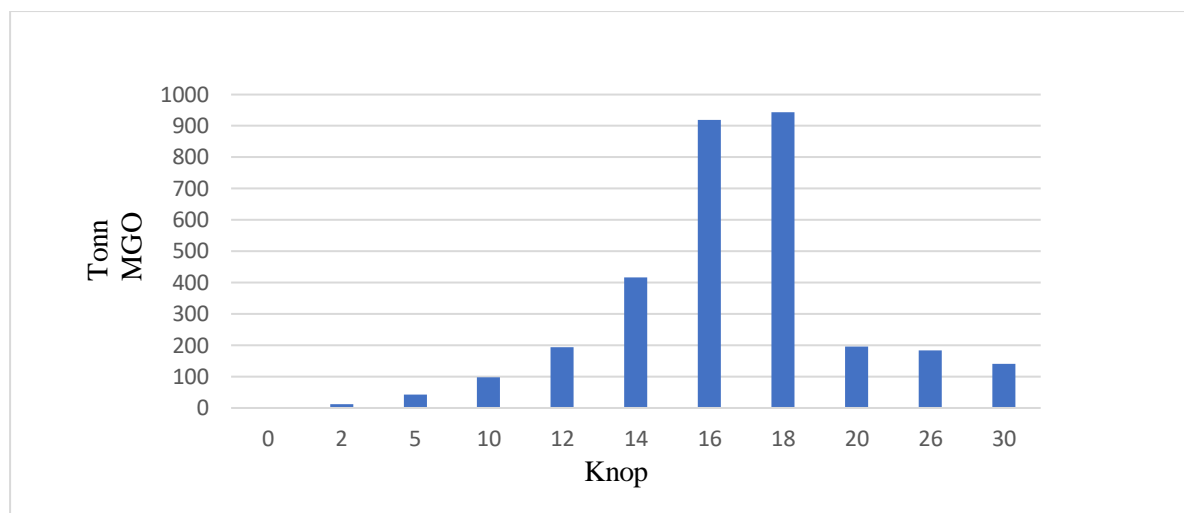
### 4.3.3 Drivstofforbruk ved ulike driftsmoduser

Den simulerte aktivitetsdataen brukes videre for å regne ut drivstofforbruket ved ulike driftsmoduser. Driftsmoduser, presentert i tabell 7 og figur 5.

Tabell 7: Drivstofforbruk ved ulike driftsmoduser av fartøyet.

V <sub>s</sub> (knop)	0	2	5	10	12	14	16	18	20	26	30
<b>P<sub>e</sub> (kW) fremdrift</b>	50	136	476	1236	2050	3301	5144	7232	10554	26587	53142
<b>Turtall aksling (rpm)</b>	0	14	35	68	82	97	113	128	146	204	260
<b>Forbruk i g/kWh</b>	211	211	208	205	200	195	195	195	195	200	205
<b>Forbruk i tonn MGO</b>	2735	11157	42771	98514	194832	417114	918661	944297	300916	220523	165293

<sup>5</sup> Opprettholde et sjøgående fartøy i en posisjon i forhold til andre fartøy eller et fast punkt.



Figur 6: Drivstofforbruk ved ulike driftsmoduser pr år.

Det totale drivstofforbruket ved de ulike driftsmodusene per år er 3151 tonn MGO.

#### 4.3.4 Drivstofforbruk fra generatordrift

Fregatter i Nansen-klassen er utstyrt med fire dieselgeneratorsett som kan levere 1000 kW hver. Operasjonsprofilen for dieselgeneratorene er også klassifisert som begrenset informasjon. Oppgaven vil anta at en generator vil være i drift konstant under de 180 seilingsdøgnene til fregatten. Antagelsen tar oppgaven på bakgrunn av at en generator må være i drift til enhver tid for drift av hotell og de essensielle systemene som har behov for strøm. Fremdriftssystemet kan ikke levere strøm til skipet. Videre antas det at for drift av hotell og de essensielle systemene krever 750 kW som tilsvarer 75% drift av en dieselgenerator.

Wärtsilä produserer generatorer som leverer tilsvarende effekt. En Wärtsilä 20DF dieselgeneratorsett som leverer 1110 kW har et drivstofforbruk på 208 g/kWh ved 75% kapasitet (Wärtsilä, 2020). Generatoren veier 16,7 tonn med et volum på 28,62m<sup>3</sup> (ibid, 2020). Det produseres generatorsett som leverer tilsvarende effekt, men veier mindre. Det talgte dieselgeneratorsettet vil likevel være nærstående det som brukes om bord på Nansen-klassen, og vil bli brukt videre i oppgaven for beregninger. Tabell 8 viser utregningen for dieselgeneratorene sitt årlige forbruket av MGO.

Tabell 8: Forbruk generatorsett.

<b>Forbruk g/kWh</b>	208
<b>Driftstimer årlig</b>	4320
<b>kW levert ved 75% ytelse</b>	750
<b>Forbruk årlig i tonn MGO</b>	673.92

### 4.3.5 Totalt forbruk og utslipp

Tabell 9: Totalt estimert forbruk og utslipp fra generatorsett og framdriftsmaskineriet i løpet av et år.

<b>Totalt forbruk i ulike driftsmoduser</b>	3150.63	tonn MGO
<b>Totalt forbruk dieselgeneratorsett</b>	673.92	tonn MGO
<b>Totalt forbruk</b>	3824.55	tonn MGO
<b>Utslipp per kg MGO</b>	3.2	CO <sub>2</sub>
<b>Totalt utslipp</b>	12238.56	CO <sub>2</sub>

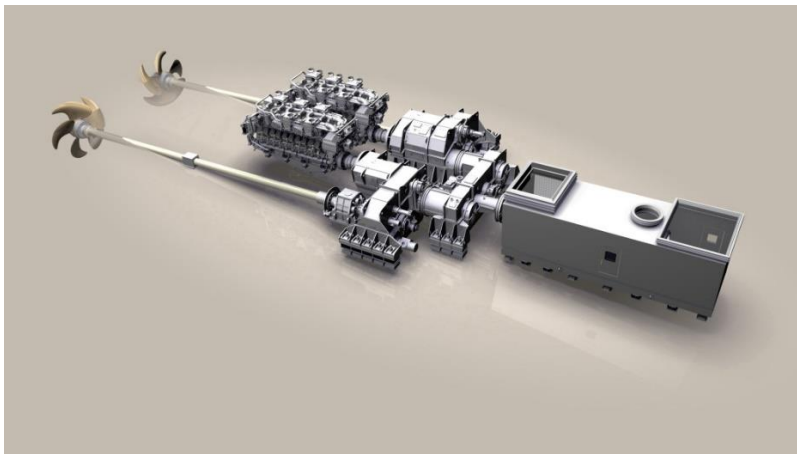
Utrekningene for det totale utslippet for generatorsett og framdriftsmaskineriet ved ulike driftsmoduser i løpet av et år er presentert i tabell 9. Alle utregninger er oppgitt i tonn. Som tidligere nevnt har ikke oppgaven tilgang på de eksakte dataene fra Nansen-klassen. Det eneste oppgaven har av data fra Nansen-klassen er et årlig utslipp fra en aktiv fregatt på 11514 tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter. De estimerte dataene som er brukt for å komme fram utslippet i oppgaven virker derfor realistiske. Videre vil oppgaven bruke data fra det scenariobaserte fremdriftssystemet til å først se på implementering av det hybrid dieselelektriske fremdriftssystemet og valg av batteristørrelse.



## 4.4 Batterier og installasjon

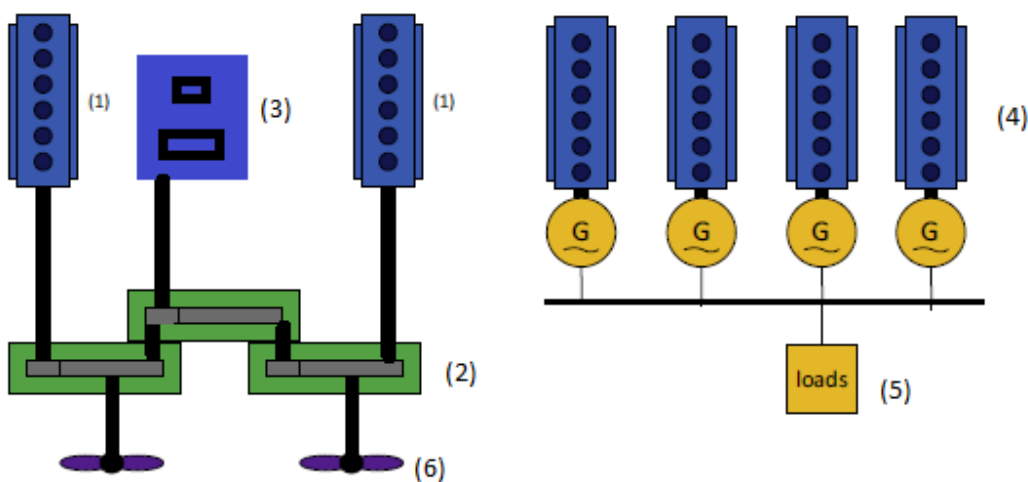
Dette delkapittelet vil se på forskjellen mellom dagens fremdriftssystem og et hybrid dieselelektrisk fremdriftssystem. Videre vil det bli gjort et valg av batteristørrelse for å til slutt se på utslippsforskjellene ved dagens fremdriftssystem sammenlignet med et hybrid dieselelektrisk fremdriftssystem.

### 4.4.1 Implementering av det hybrid dieselelektriske fremdriftssystemet



Figur 7: Fremdriftssystemet til Nansenklassen (Region, 2016).

Figur 7 viser fremdriftssystemet som blir brukt på Nansen-klassen i dag. Figuren viser to pitch-propeller drevet av to hovedmotorer og én gassturbin. Girsystemet består av flere reduksjonsgir som er slått sammet til et girsystem som gjør det mulig for gassturbinen og hovedmotorene å drive begge propellene samtidig. Med to reduksjonsgir fra gassturbin til propell vil det være et stort effekttap.

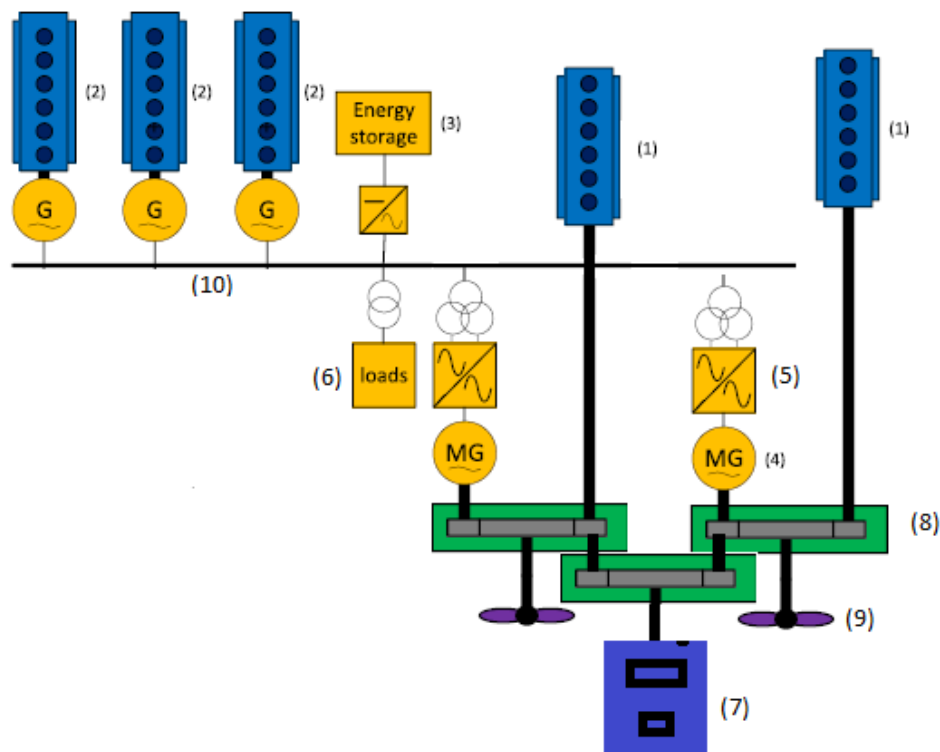


Figur 8: Forenklet bilde av dagens fremdriftssystem på Nansen-klassen (min tegning).

Figur 8 er laget for å illustrere fremdriftssystemet, og tallene representerer følgende:

- |                    |                       |
|--------------------|-----------------------|
| (1) Hovedmotor     | (4) Dieselgeneratorer |
| (2) Gir med clutch | (5) Elektrisk last    |
| (3) Gassturbin     | (6) Propell           |

I figur 7 og 8 synliggjøres det hvordan fremdriftssystemet og dieselgeneratorene driftes helt separat på Nansen-klassen.



Figur 9: Illustrering av et hybrid dieselelektrisk fremdriftssystem (min tegning).

Figur 9 er laget for å illustrere et mulig hybrid dieselelektrisk fremdriftssystem for en fregatt, og tallene representerer følgende:

- |                            |                               |
|----------------------------|-------------------------------|
| (1) Hovedmotor             | (6) Elektrisk last            |
| (2) Dieselgenerator        | (7) Gassturbin                |
| (3) Batteri                | (8) Gir med clutch            |
| (4) Elektromotor/generator | (9) Propell                   |
| (5) Transformator          | (10) Energy management system |

Figur 9 viser hvordan et mulig hybrid dieselektrisk fremdriftssystem for en fregatt vil se ut. Forskjellen fra fremdriftssystemet som blir brukt i dag er at hele det hybride systemet er koblet sammen med tilskudd av et batteri og to elektromotorer som også kan drives som generatorer. Tilsvarende dagens fremdriftssystem vil også det hybrid dieselektriske systemet ha effekttap i girsystemet. I tillegg vil det også være tap i transformatorer, elektromotorer/generatorer. Den største fordelene med et hybrid dieselektrisk system er at det er drevet av et energiforvaltningssystem som vil optimalisere energibruken til generatorer, batteri, hovedmotorer og gassturbin (Wärtsilä, 2018).

Energiforvaltningssystemet gir ønsket kraftbehov for fremdrift. For drift av fartøyet ved ulike hastigheter vil energiforvaltningssystemet ta kraftbehovet fra driftskomponentene som er mest hensiktsmessig med fokus på optimal drift av motorene og reduksjon av miljøgassutslipp. En fregatt sitt operasjonsmønster vil være svært variert sammenlignet med kommersielle fartøy. Likevel vil en fregatt i fredstid ha mulighet til å velge driftsmodus ut ifra operasjoner. I fredstidsoperasjoner hvor fartøyet patruljerer eller er i transitt har energiforvaltningssystemet mulighet til å drive fartøyet optimalt med fokus på minst mulig utslipp (Geertsma *et al.*, 2017), uten at det går utover operasjonen. I krig kan fartøyet driftes som ønskelig med fokus utelukkende på oppdrag, da med økt operasjonell fleksibilitet som tidligere nevnt i fordelene i starten av kapittel 4.

Forslaget til et hybrid dieselektrisk fremdriftssystem vil ikke være aktuelt å implementere på Nansen-klassen på grunn av det avanserte girsystemet og kostnader ved ombygging. Det vil derimot være et realistisk alternativ for et fremdriftssystem ved innkjøp av nye fregatter. Videre vil oppgaven se på valg av batteristørrelse og hvordan systemet i sin helhet vil påvirke deplasementet til en fregatt.

#### 4.4.2 Valg og bruk av batteri

For valg av batteristørrelse er det interessant å se hvor stort batteriet må være for at fartøyet skal få benyttet seg av fordelene det har mulighet til å gi. Oppgaven legger til grunn at fartøyet må være i stand til å driftes utelukkende på batterikraft i opptil en time i fem knop. Data om batteri og kapasiteten til batterier av slik størrelse er hentet fra Henningsgård (2016) sin rapport om livssyklusen til batterier i maritim sektor. For drift av fartøyet på batterikraft utelukkende vil det være tap i systemet. Fra batteriet vil det være tap fra batteri til den elektriske motoren, tap i den elektriske motoren og i gir. Oppgaven regner derfor med at ved drift av fartøyet på batterikraft klarer systemet å utnytte 60% av et fullstendig oppladet batteri.

Tabell 10: Utregning av parametere knyttet til batteriets kapasitet/størrelse.

<b>Batteristørrelse</b>	1000	kWh
<b>Batterivekt</b>	5000	kg
<b>Batterivolum</b>	25	m <sup>3</sup>
<b>Seiling på batterikraft i fem knop</b>	1.26	timer
<b>Seiling på batterikraft i to knop</b>	4.4	timer

I tabell 10 ser vi parametere knyttet til batteriet som er valgt ut for nærmere studie/analyse i et hybrid dieselektrisk fremdriftssystem. For utregningen av hvor mange timer fartøyet klarer på de ulike hastighetene er det tatt utgangspunkt i motoreffekten under ulike moduser av aktivitet og trukket ifra 40% som nevnt innledningsvis i delkapittelet. Utregningen har også tatt utgangspunkt i et fullopladet batteri som driver fartøyet til det er helt tomt. Slik bruk av batteriet vil redusere levetiden til cellene i batteriet fordi batteriet optimalt bør holdes mellom 40-75% (Henningsgård, 2016). Et batteri på 1000 kWh kan ha mulighet til å drive skipet i opptil 1,26 timer i fem knop og 4,4 timer i to knop. Muligheten for å drifte fartøyet på batterikraft kan øke den operative evnen til en fregatt under ubåtjaktoperasjoner som nevnt i kapittel 4.1.

Bruken av batteriet sammen med drift av generatorer vil i stor grad påvirke utslippet av miljøgasser og oppladning av batteriet. Eksempelvis dersom fregatten går fra havn i lav hastighet, med fullt batteri og bruker batterikraft for å drifte fartøyet, vil batteriet raskt tømmes. Ved å først bruke generatorer for å lade batteriet opp igjen, for deretter å bruke batterikraft for å drifte fartøyet, vil tapene i overføringene føre til et større utslipp. I et tilfelle hvor batteriet er tomt og fartøyet skal seile med lav hastighet, vil det være bedre å drifte

fartøyet ved hjelp av generatorene. Ved bruk av generatorene til framdrift unngår man effekttapet man får ved å gå innom batteriet. Dermed vil det være mulig å drifte en generator optimalt og bruke overskuddet til oppladning av batteriet. Å bruke overskuddet fra optimal drift av generatorene og hovedmotorene, sammen med rekuperasjon fra propellene når hastigheten senkes, er det som hovedsakelig vil lade batteriet til sjøs. Som nevnt i kapittel 4.4.1 er dette noe som energiforvaltningssystemet vil jobbe med konstant.

Batteriet har en vekt på fem tonn og rommer 25 m<sup>3</sup> (Henningsgård, 2016). Oppgaven tar utgangspunkt i deplasementet vi har i dag og erstatter en av dieselgeneratorene med batteriet. Dieselgeneratorene brukt for sammenligning er 16,7 tonn med et volum på 28,62m<sup>3</sup>. Batteriet er 11,7 tonn lettere enn generatoren og frigir nesten fire kubikkmeter med plass. Likevel ved installasjonen av batteriet er det også behov for elektromotorer, transformatorer samt installering nye kabler som vil veie noe. Oppgaven vil ikke gå i dybden på nødvendige elektromotorer/generatorer, men vil videre anta at ved installasjon av batteri og resten av systemet vil deplasementet være tilnærmet uendret og ikke påvirke kapabilitetene eller kampkraften negativt.

#### 4.4.3 Utslipp fra batteriet i dets levetid, livssyklusanalyse

Batteri av denne størrelsen er antatt å ha en levetid på 10 år (Romare & Dahllöf, 2017). Oppgaven benytter seg av vedlegg 7 for antatt utslipp per kWh for batteri. Oppgaven vil ta utgangspunkt i 200 kg CO<sub>2</sub>-ekvivalenter/kWh batteri som ligger i øvre del av antatt livstidsutslipp for lithium-ion batteri av denne størrelsen (Romare & Dahllöf, 2017). Dataene er sammenfattet i tabell 11.

Tabell 11: Utrekning av livstidsutslipp for batteriet alene.

<b>Batteristørrelse</b>	1000	kWh
<b>CO<sub>2</sub>-ekvivalenter pr kWh</b>	200	kg
<b>Totalt livstidsutslipp</b>	200000	kg CO <sub>2</sub> -ekvivalenter

#### 4.5 Forventet reduksjon av utslipp og forbruk ved implementering

Oppgaven har tatt utgangspunkt i et realistisk scenario for å se hvor mye et krigsfartøy bruker av drivstoff i ulike driftsmoduser. Utrekningene basert på scenario er svært sammenlignbare med de ugraderte opplysningene gitt om Nansen-klassen. Det vil likevel være for store usikkerheter rundt hvor stor reduksjon av drivstoff det vil være ved implementering av det hybrid dieselelektriske fremdriftssystemet.

For å gjøre et estimat vil oppgaven ta utgangspunkt i lignende prosjekter som har gått fra et dieselfremdriftssystem til et hybrid dieselelektrisk fremdriftssystem. Henningsgård (2016) publiserte en studie rundt livssyklusanalyse av batterier i maritim sektor. Ved implementering av et tilsvarende hybridelektrisk system på et PSV (Platform Supply Vessel) skip så de en reduksjon på 28% ved patruljering på lav hastighet, 34% ved patruljering ved høy hastighet, opptil 5% ved peak shaving i transitt og 100% reduksjon ved havn (Henningsgård, 2016).

Reduksjonen ved patruljering på høy og lav hastighet kommer fra at skipet kan driftes delvis eller helt på batteri. Videre vil reduksjonen i transitt komme av optimalisert drift av motorene. Til slutt vil batteriet kunne fungere som backup når fartøyet ligger til havn som gjør at generatorene slipper å gå kontinuerlig. Den totale forbruksreduksjonen av drivstoff ble regnet til totalt 12% ved implementering av et hybrid dieselelektrisk fremdriftssystemet på en PSV. Equinor (2020) rapporterte om reduksjon på totalt 16-17% ved å gjøre oljetankere om

til batterihybrider, og Wärtsilä (2018) rapporterer reduksjon av drivstoff på opptil 20% ved implementering av deres hybrid dieselelektrisk fremdriftssystem på lignende fartøystørrelser. Så lenge den faktiske dataen fra fregattene ikke blir benyttet for undersøkelse av reduksjon vil estimatet være preget av stor usikkerhet.

Til tross for usikkerheten er det vist at et hybrid dieselelektrisk fremdriftssystem er mulig å implementere på en fregatt. Videre for å eksemplifisere et resultat, vil oppgaven ta utgangspunkt i 12% reduksjon av MGO etter installasjon av det hybridelektriske systemet med batteri. Estimaten har tatt utgangspunkt i nedre grense fra andre fartøy som har installert tilsvarende system. I tillegg til å legge estimatet ved nedre grense av den forventede reduksjonen på 12% drivstoff vil oppgaven også se på 6% og 18 % for å ta høyde for usikkerhetsmomentene knyttet til scenarioriet. Reduksjonsnivåene vil bli kategorisert videre i oppgaven som lav reduksjon, middels reduksjon og høy reduksjon.

## 4.6 Total utslipp opprinnelig oppsett

Tabell 12: Utrekning for totalt estimert 10-årlig CO<sub>2</sub>-utslipp ved dagens fremdriftssystem på fregatter i 5000-tonnklassen.

<b>Dagens fremdriftssystem</b>		
Totalt årlig forbruk per fregatt	3826	MGO
Totalt 10-årlig forbruk per fregatt	38256	MGO
Totalt 10-årlig forbruk for fire aktive fregatter	153022	MGO
Totalt årlig CO <sub>2</sub> -utslipp per fregatt	12242	CO <sub>2</sub>
Totalt 10-årlig CO <sub>2</sub> -utslipp per fregatt	122418	CO <sub>2</sub>
Totalt 10-årlig CO <sub>2</sub> -utslipp for fire aktive fregatter	489670	CO <sub>2</sub>

Tabell 12 viser et estimert forbruk og utslipp over en tiårsperiode for fire aktive fregatter. Alle utregninger oppgitt i tonn. Utrekningene er gjort med utgangspunkt i tabell 9.

## 4.7 Totale utslipp nytt oppsett

Tabell 13: Utregning for totalt estimer 10-årlig CO<sub>2</sub>-utslipp ved nytt hybridelektrisk fremdriftssystem på Nansen-klassens fregatter.

Hybridelektrisk fremdriftssystem	Lav reduksjon 6%	Middel reduksjon 12%	Høy reduksjon 18%	
Totalt årlig forbruk per fregatt	3596	3366	3137	MGO
Reduksjon av forbruk årlig per fregatt	230	459	689	MGO
Totalt årlig utslipp per fregatt	11507	10773	10038	CO <sub>2</sub>
Reduksjon av utslipp årlig per fregatt	735	1469	2204	CO <sub>2</sub>
Totalt 10-årlig forbruk per fregatt	35960	33665	31370	MGO
Reduksjon av forbruk 10-årlig per fregatt	2295	4591	6886	MGO
Totalt 10-årlig utslipp per fregatt	115073	107727	100382	CO <sub>2</sub>
Totalt utslipp 10-årlig 1000kWh batteripakke	200	200	200	CO <sub>2</sub>
Total reduksjon av utslipp 10-årlig en fregatt	7245	14490	21835	CO <sub>2</sub>
Totalt 10-årlig reduksjon av utslipp for fire fregatter	28980	57960	87341	CO <sub>2</sub>

Alle utregninger oppgitt i tonn.

Tabell 13 viser at selv med lav reduksjon på kun 6% av årlig forbruk vil fire aktive fregatter redusere sitt totale utslipp med 28 980 tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter på ti år. Til sammenligning er det to tredjedeler av hva fire fregatter slipper ut årlig. Videre vil Marinen med en realistisk middels reduksjon av utslipp, redusere CO<sub>2</sub>-ekvivalenter med 57 960 tonn. Det tilsvarer halvparten av det årlige utslippet til samtlige fartøy i Marinen. Det er også interessant å se på hvor raskt fartøyet sparer inn utslippene forbundet med det 10-årlige utslippet til batteriet.

Det installerte batteriet på 1000 kWh har en levetid på 10 år og dermed et 10-årlig utslipp på 200 tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter. Ved oppnåelse av lav reduksjon etter installering av det hybridelektriske fremdriftssystemet vil fartøyet ha redusert utslippet sitt med 200 tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter etter tre måneder og en uke. Det betyr at etter batteriet er installert vil det ta et aktivt fartøy tre måneder og en uke før utslippet for hele batteriets levetid er tilbakebetalt. Ved middels oppnåelse av reduksjon vil miljøtilbakebetalingstiden halveres.



## 5. Konklusjon med anbefaling

Med bakgrunn i Parisavtalen og Forsvarets langtidspan om å redusere utslipp av miljøgasser, har oppgaven undersøkt ulike alternative fremdriftssystem som kan implementeres på en generisk fregattstørrelse. Utslppsreduksjon betraktes som nødvendig for at Norge skal evne å bidra til at temperaturen på kloden ikke skal stige mer enn to grader før århundret er over. Fritjof Nansen-klassen står for den største andelen av Marinens utslipp, som allerede er halvparten av det direkte utslippet.

Oppgaven har vurdert alternativene brenselceller, LNG, ammoniakk og en fullstendig batterielektrisk løsning som potensielle fremdriftssystem. På bakgrunn av sikkerhetsaspekter og kampkrafthemmende parametere, konkluderer oppgaven med at det er ingen av de undersøkte alternative fremdriftssystemene som i dag alene kan erstatte dagens fremdriftssystem. På bakgrunn av dette utfallet, har oppgaven sett på hybride løsninger og kommet frem til at en hybrid dieselelektrisk løsning er den mest formålstjenlige løsningen.

For å vurdere om løsningen er gunstig for reduksjon av utslipp uten at det går på bekostning av kampkraften, så oppgaven initielt på marint bruk av hybride batteriløsninger. Oppgaven nyttet et scenariobasert fremdriftssystem likt Nansen-klassen, for å identifisere mulige besvarelsesområder ut i fra en tenkt, men realistisk, operasjonsprofil. Scenarioet ble nyttet for å velge størrelse på batteriet, samt undersøke om implementeringen av systemet er mulig og vil gi fordeler som nevnt i kapittel 4.1. Oppgaven konkluderer med at implementeringen av det hybrid dieselelektriske fremdriftssystemet er mulig for en 5000-tonns fregatt.

Grunnet det scenariobaserte fremdriftssystemet, vil resultatene bære preg av høy grad av usikkerhet. Oppgaven eksemplifiserte et resultat, ut fra fartøy som har installert tilsvarende system. Videre så oppgaven på en forventet reduksjon på 6%, 12% og 18% .Dette for å ta høyde for usikkerhetene. Den prosentvise reduksjonen viser til henholdvis lav, middels og høy reduksjon av miljøgassutslipp ved implementering av det hybrid dieselelektriske fremdriftssystemet.

Oppgaven konkluderer med at selv ved lav oppnådd reduksjon av miljøgassutslipp, vil fire aktive fregatter kunne redusere mengde CO<sub>2</sub>-ekvivalenter med 28980 tonn over en

10-årsperiode. Samtidig vil en lav reduksjon tilbakebetale miljøavtrykket til batteriet på tre måneder og én uke. Videre vil Marinen, med en realistisk middels reduksjon av utslipp, redusere CO<sub>2</sub>-ekvivalenter med 57 960 tonn i løpet av ti år. Dette tilsvarer halvparten av det årlige utslippet til samtlige fartøy i Marinen.

Oppgaven konkluderer videre med at selv ved lav oppnådd reduksjon, vil det hybrid dieselelektriske fremdriftssystemet gi fregatten større operasjonell fleksibilitet og øke kampkraften til fartøyet. På bakgrunn av de overnevnte delkonklusjonene, vil oppgaven anbefale et hybrid dieselelektrisk fremdriftssystem for fremtidens fregatter. Implementeringen vil kunne resultere i redusert miljøgassutslipp, og samtidig øke kampkraften til fregattene. Dette kan betraktes som en tilfredsstillende løsning på oppgavens problemstilling.

## **5.1 Forslag til videre forskning**

Hensikten med utredningen har vært å finne ut hvordan Forsvaret kan redusere klimagassutslippene til Marinen uten at det skal gå på bekostning av kampkraften. I denne prosessen er det avdekket flere momenter som hadde vært interessant å se på for videre arbeid.

### **5.1.1 Forbedring av et dieselfremdriftssystem**

Det er flere måter å redusere utslippsnivået fra skipsfart på. Disse inkluderer: motorforbedringer, for eksempel resirkulering av avgasser, to-trinns turboladning, smarte forbrenningskammerutforminger og avanserte drivstoffinnsprøytningssystem, etterbehandling av avgasser, som skrubbere eller selektiv katalytisk reduksjon.

### **5.1.2 Det økonomiske aspektet**

Ved videre arbeid hadde det vært interessant å se på det økonomiske aspektet ved implementeringen av det hybrid dieselelektriske fremdriftssystemet.

### **5.1.3 Andre oppsett**

En undersøkelse av en optimal implementering av systemet, samt en ytterligere detaljgrad av hver nødvendige komponent., krever en BEGRENSET gradering, og ville tilført oppgaven konkrete data fra fregattoppsettet.

## 6. Bibliografi

- Barents NaturGass . (2019). *Barents NaturGass*. Retrieved from <https://barentsnaturgass.no/miljofordeler/>.
- Aa, A. (2019). Future of the fjords.
- Adams, V. (1989, September 18-21). Possible fuel cell applications for ships and submarines. *Journal of Power Sources*, pp. 181-192.
- Battery University. (2010). *Battery University*. Retrieved from The High-power Lithium-ion: [https://batteryuniversity.com/learn/archive/the\\_high\\_power\\_lithium\\_ion](https://batteryuniversity.com/learn/archive/the_high_power_lithium_ion)
- Benjaminsen, C. (2016, April 26). *Forskning.no*. Retrieved from Hva er det med denne NOX-en?: <https://forskning.no/klima-bakgrunn-forurensning/bakgrunn-hva-er-det-med-denne-nox-en/423812>
- Dimou, I., Menard, P., E.Sarris, & Urrutia, R. (2010). PROJECTS IN NAVAL SHIP CONVERSION DESIGN. *DDG-51 FLIGHT IIA MODIFIED REPEAT PROJECT AREA AIR DEFENCE DESTROYER*.
- DNV GL. (2019). *Comparison of Alternative Marine Fuels*. Høvik: DNV GL.
- Equinor. (2020). *Equinor*. Retrieved from <https://www.equinor.com/en/magazine/battery-hybrid-supply-ship.html>.
- Finansdepartementet. (2019, Oktober 7). *regjeringen.no*. Retrieved from Avgiftssatser 2020: <https://www.regjeringen.no/no/tema/okonomi-og-budsjett/skatter-og-avgifter/avgiftssatser-2020/id2671008/>
- FN. (2020, Februar 20). *fn.no*. Retrieved from Parisavtalen: <https://www.fn.no/Om-FN/Avtaler/Miljoe-og-klima/Parisavtalen>
- FN. (2020). *unfccc.int*. Retrieved from Paris Agreement - Status of Ratification: <https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/status-of-ratification>
- Forsvaret. (2019, Oktober 21). *Forsvaret.no*. Retrieved from Fregatt - Nansenklassen: <https://forsvaret.no/fakta/utstyr/Sjoe/Nansen-klasse-fregatt>
- Forsvarsdepartementet. (2020). *Vilje til beredskap - evne til forsvar*. Det Kongelige Forsvarsdepartement.
- Geertsma, R., Negenborn, R., Visser, K., & Hopman, H. (. (2017 ). Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments. 26.
- Grønmo, S. (2004). *Samfunnsvitenskapelige metoder*. Bergen: Fagbokforlag.
- Hebner, R. &. (2015). Dynamic Load and Storage Integration.

- Henningsgård, S. (2016). *Live cycle assessment of batteries in marine sector*. DNV GL og ABB.
- Hofstad, K. (2019, August 28). *Store norske Leksikon*. Retrieved from Energitetthet: <https://snl.no/energitetthet>
- Jacobsen, D. I. (2015). *Hvordan gjennomføre undersøkelser? Innføring i samfunnsvitenskapelig metode. 2. utg.* Kristiansand: Høyskoleforlaget.
- Karmiris, G., & Tengné, T. (2012). *PEAK SHAVING CONTROL METHOD FOR ENERGY STORAGE*. ABB AB.
- Kystverket. (2020). *kystverket.no*. Retrieved from Kart over alternative drivstoff for sjøfarten: <https://lavutslipp.kystverket.no>
- Maskinoffiser. (2020).
- McGill, R., Remley, W., & Winther, K. (2013). *Alternative Fuels for Marine Applications*. the IEA Advanced Motor Fuels Implementing Agreement.
- Miljødirektoratet. (2019, November 15). *miljodirektoratet.no*. Retrieved from Norske utslipp av klimagasser: <https://miljostatus.miljodirektoratet.no/tema/klima/norske-utslipp-av-klimagasser/>
- Miljødirektoratet. (2020, Januar 31). *Miljødirektoratet*. Retrieved from Klimakur 2030: <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/m1625/m1625.pdf#page=135>
- Miljøverndepartementet. (2006, Mai 14). *Regjeringen.no*. Retrieved from Miljøavtale om reduksjon av NOx-utslipp: [https://www.regjeringen.no/globalassets/upload/md/vedlegg/forurensing/luft/nox\\_avtalen\\_undertegnet.pdf](https://www.regjeringen.no/globalassets/upload/md/vedlegg/forurensing/luft/nox_avtalen_undertegnet.pdf)
- NCE Maritime CleanTech . (2019). *Norwegian future value chains for liquid hydrogen*. NCE.
- NCE Maritime CleanTech. (2016). *Norwegian future value chains for liquid hydrogen*. Norge: NCE Maritime CleanTech.
- Olerud, K., & Lahn, B. (2020, Januar 9). *Store norske Leksikon*. Retrieved from CO2 Ekvivalenter: <https://snl.no/CO2-ekvivalenter>
- Øvrebø, O. (2020, Mars 12). *Norges utslipp*. Retrieved from Energi og Klima: <https://energiogklima.no/klimavakten/norges-utslipp/>
- Pedersen, B. (2018, August 29). *Store norske Leksikon*. Retrieved from NOx: <https://snl.no/NOx>

- Randers, J. (2006, Oktober 4). *Regjeringen*. Retrieved from Et klimavennlig Norge:  
<https://www.regjeringen.no/contentassets/56ae831eec35484881c6b237c2e817ac/no/pdfs/nou200620060018000dddpdfs.pdf>
- RedBook. (2020). *Redbook.com.au*. Retrieved from 2016 MTU 12V 1163 TB93:  
<https://www.redbook.com.au/boats/details/2016-mtu-12v-1163-tb93-5954/SPOT-ITM-444711/>
- Region, T. M. (2016). Retrieved from  
<https://thaimilitaryandasianregion.wordpress.com/2016/03/13/nansen-class-anti-submarine-warfare-frigates-norway/>.
- Regjeringen. (2019). *Granavolden-plattformen*. regjeringen.no: Statsministerens kontor. Retrieved from <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/politisk-plattform/id2626036/#klima>
- Romare, M., & Dahllöf, L. (2017). *The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse*. ivl.
- Skatteetaten. (2020, Mai 4). *Skatteetaten.no*. Retrieved from NOx-avgift:  
<https://www.skatteetaten.no/bedrift-og-organisasjon/avgifter/saravgifter/om/nox/>
- Statistisk Sentralbyrå. (2020, Januar 17). *SSB*. Retrieved from Utslipp til luft:  
<https://www.ssb.no/klimagassn>
- Strand, G. (2020). *Skips og motorlære*. Bergen: Sjøkrigsskolen.
- Strand, V. B. (2019, Juli 31). *Store norske leksikon*. Retrieved from ratifikasjon:  
<https://snl.no/ratifikasjon>
- Svendsen, R. H. (2014). *NRK*. Retrieved from <https://www.nrk.no/vestland/her-er-verdens-forste-elektriske-bil--og-passasjerferge-1.12002868>.
- United Nations. (2015, Desember 12). *treaties.un.org*. Retrieved from Paris Agreement:  
<https://treaties.un.org/doc/Publication/CN/2016/CN.735.2016-Eng.pdf>
- Utstøl, S., Gohli, J., Karsrud, T. E., & Prydz, P. (2019). *Forsvarssektorens miljø- og klimaregnskap fra 2018*. Forsvarets Forskningsinstitutt.
- van Biert, L., Godjevac, M., Visser, K., & Aravind, P. (2016, September 30). A review of fuel cell systems for maritime applications. *Journal of Power Sources*, pp. 345-364.
- Vetaas, Å. (2020, Februar). Bachelorintervju, Åge Vetaas. (O. Jørs, Interviewer)
- Vogler, F., & Würsig, G. (2011). *Challenges, chances and experiences*. Hamburg.
- Wärtsilä. (2018). *Wärtsilä HY Hybrid Solutions*.
- Wärtsilä. (2020). *Wärtsilä generating sets*. Retrieved from  
<https://www.wartsila.com/marine/build/engines-and-generating-sets/generating-sets/wartsila-gensets>.

## 7. Vedlegg

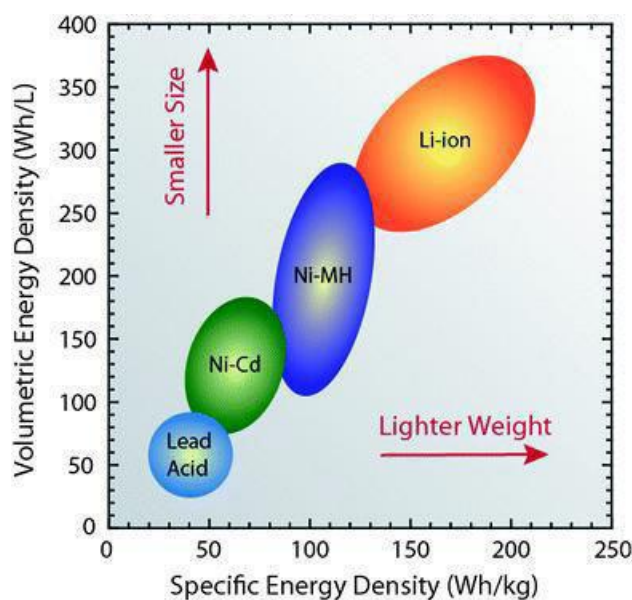
Vedlegg 1:	Egenskaper til hydrogen og andre energibærere	s. 54
Vedlegg 2:	Sammenligning av oppladbar batteriteknologi som en funksjon av volumetrisk energitetthet og spesifikk energitetthet	s. 54
Vedlegg 3:	Livstidssyklus LIB	s. 55
Vedlegg 4:	Forbruksdata ved ulike driftsmoduser	s. 56
Vedlegg 5:	Typiske forbrukstall for gassturbin som en funksjon av levert kraft	s. 57
Vedlegg 6:	Operasjonsprofil Arleigh Burke-klassen	s. 57

## Vedlegg 1: Egenskaper til hydrogen og andre energibærere

	<i>Boiling point (°C 1 bar)</i>	<i>Density (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Specific energy LHV (MJ/kg)</i>	<i>Specific energy LHV (kWh/kg)</i>	<i>Energy density (MJ/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Storage temp/pressure</i>	<i>Chemical comp.</i>
<i>Hydrogen</i>	-253	0,089	120	33,3	10,8		H <sub>2</sub>
<i>Hydrogen compressed</i>		23 (350 bar)	120	33,3	5 040	Ambient 200-1000 bar	
<i>Hydrogen liquid</i>		71	120	33,3	8 500	Cryogenic Atm./Low pressure	
<i>MGO</i>	175-650	890	42,7	11,97	38 000	Ambient atmospheric	Hydro-carbon
<i>LNG</i>	-162	440	50	12,50	22 000	Cryogenic Atm./Low pressure	Mainly CH <sub>4</sub>
<i>LPG</i>	-42	490	46,4	12,90	22 740	Amb. or Cryogenic/ Atm.	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
<i>Liquid ammonia</i>	-33,3	653,1	18,6	5,17	14 100	Ambient High/Atm. pressure	NH <sub>3</sub>
<i>Methanol</i>	65	780	20	5,56	36 700	Ambient Atm.	CH <sub>3</sub> OH
<i>Biodiesel</i>	>130	875	37,27	11,80	32 375	Ambient Atm.	

Kilde: (NCE Maritime CleanTech, 2016)

Vedlegg 2: Sammenligning av oppladbar batteriteknologi som en funksjon av volumetrisk energitetthet og spesifikk energitetthet



Kilde: (Aa, 2019)

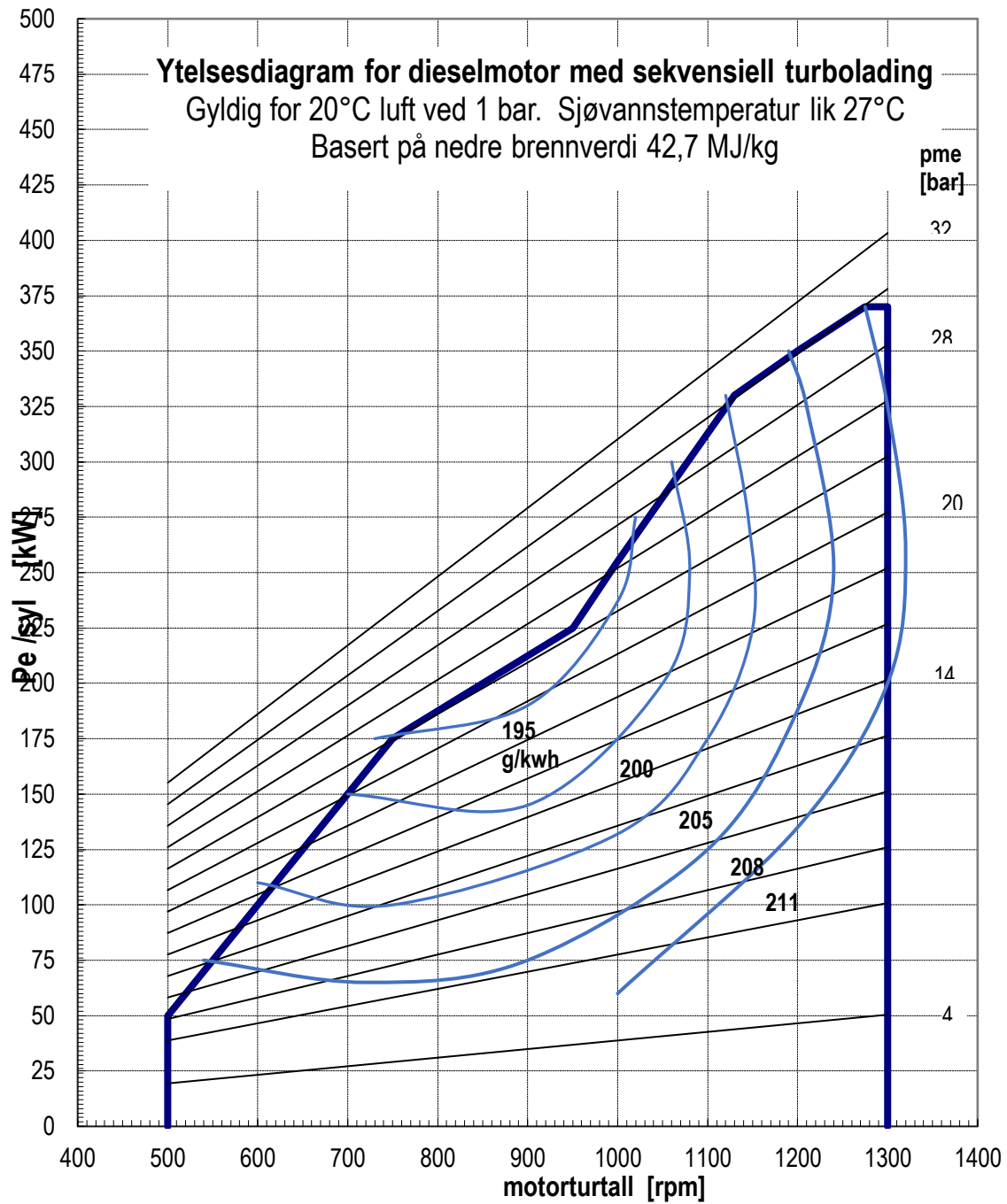
## Vedlegg 3: Livstidssyklus LIB

Component	kg CO <sub>2</sub> -eq/kWh battery			
	Raw material mining and refining <sup>a)</sup>	Battery grade material production (including mining and refining) <sup>b)</sup>	Manufacturing (component and cell + battery assembly)	Recycling
Anode	2-11	7-25		
Cathode	7-18	13-20 (90%)		
Electrolyte	4,00	4-13		
Separator	<0,5	Approx. 1		
Cell case	<0,1	Approx. 1		
Battery case	4-13	10-25		
Cooling	0-3	2-6		
Battery management system (est)	<1	4-30		
<b>Total</b>	<b>18-50</b>	<b>48-121 (216)</b>	<b>20-110</b>	<b>Pyro: 15 Hydro: -12</b>
<b>Most likely value</b> <i>(Based on the assessment of transparency and scientific method done in the report)</i>		<b>60-70</b>	<b>70-110</b>	<b>15</b>

Kilde: (Romare & Dahllöf, 2017)

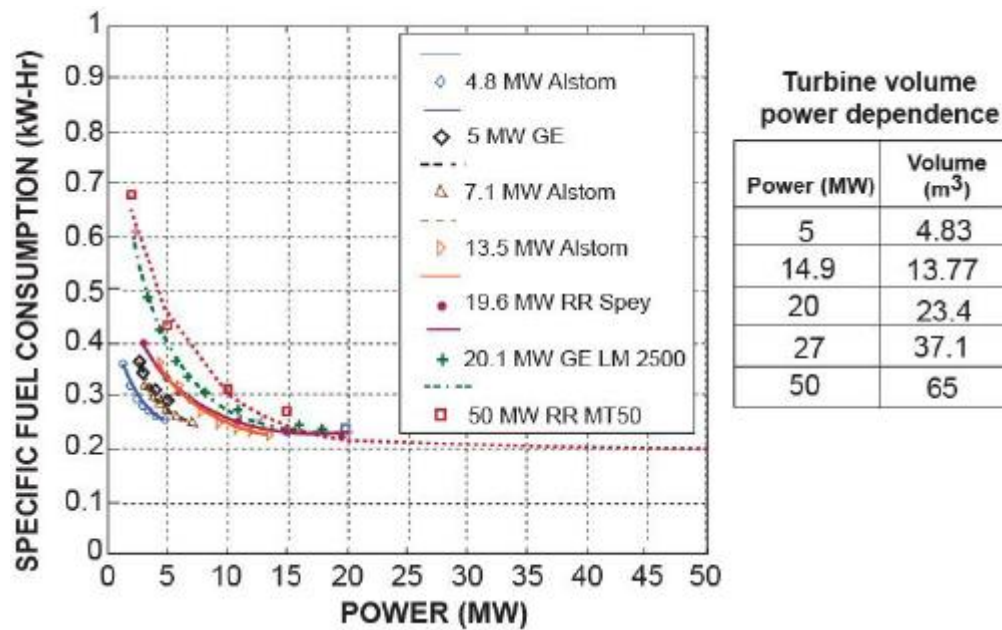


## Vedlegg 4: Forbruksdata ved ulike driftsmoduser



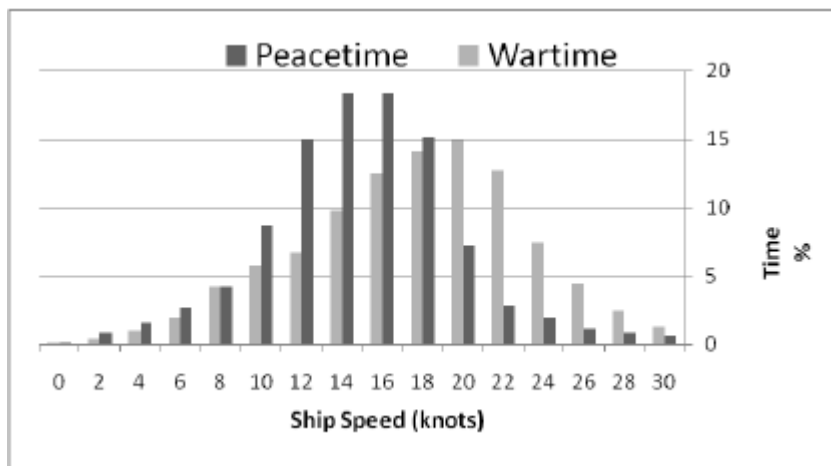
Kilde: (Strand, 2020)

Vedlegg 5: Typiske forbrukstall for gassturbin som en funksjon av levert kraft



Kilde: (Hebner, 2015)

Vedlegg 6: Operasjonsprofil Arleigh Burke-klassen



Kilde: (Dimou, Menard, E.Sarris, & Urrutia, 2010, p. 31)