



# Sjøkrigsskolen

## Bacheloroppgave

*Modifisere Jan Mayen klasse kystvakt til standardklassefartøy  
med anti ubåt krigføring som primæroppgave*

av

Haakon Nerland & Martin Larsen

Levert som en del av kravet til graden:

BACHELOR I MILITÆRE STUDIER - FORDYPNING LEDELSE OG  
MARINEINGENIØR MASKIN

Antall ord: 19181

Innlevert: 3. Desember 2023

**Godkjent for offentlig publisering**

## Publiseringsavtale

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

Kadettene 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 kadettene har godkjent publisering.

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

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

## Plagiaterklæring

Vi erklærer herved at oppgaven er vårt arbeid og med bruk av riktig kildehenvisning.

Vi har ikke nyttet annen hjelp enn det som er beskrevet i oppgaven.

Vi er klar over at brudd på dette vil føre til avvisning av oppgaven.

**Dato: 03-12-2023**

*Martin Larsen*

---

Martin Larsen

*Haakon Nerland*

---

Haakon Nerland

## Forord

Denne oppgaven er skrevet av Martin Larsen & Haakon Nerland fra oktober til desember 2023 som en del av studiet «Bachelor i militære studier – fordypning ledelse og marineingeniør maskin» ved Forsvarets Høyskole Sjøkrigsskolen.

Opgaven omhandler en konseptstudie for en alternativ fremdriftslinje på Jan Mayen-klasse Kystvakt, mer egnet Anti-ubåtkrigføring enn med nåværende fremdriftslinje.

Vi benytter anledningen til å takke våre veiledere gjennom denne oppgaven. Flaggkommandør (P) Geir Kilhus har bidratt med drøfting av problemstilling samt retningsgivende råd gjennom oppgaveperioden. I tillegg vil vi takke Geir Rise og Per-Martin Martinussen ved LMG Marine for veiledning og informasjon angående fartøyskarakteristikk på Jan Mayen-klasse Kystvakt.

I tillegg vil vi takke linjeleder for maskin høyskolelektor Gisle Strand som har dannet et nødvendig kunnskapsgrunnlag for å kunne løse oppgaven på en god måte.

Bergen, Sjøkrigsskolen, 03-12-2023

*Martin Larsen*

---

Martin Larsen

*Haakon Nerland*

---

Haakon Nerland

## Sammendrag

Oppgaven er en konseptstudie for modifisering av fremdriftslinjen på Jan Mayen-klasse Kystvakt i den hensikt å tilpasse driften til anti-ubåt-krigføring. Vi har anvendt en forenklet versjon PRINSIX-modellen til FMA. Oppgaven inneholder forenklete versjoner av konseptfasen og forprosjektfasen til PRINSIX-modellen.

Oppgaven har blitt utarbeidet fra forutsetningen om en allerede konkludert idefase. Idefasen konkluderer med at Sjøforsvaret ønsker en mer kostnadseffektiv plattform for å drive anti-ubåt-krigføring. Dermed ble planen å utføre konseptfasen og forprosjektfasen med Jan Mayen-klasse Kystvakt som plattform. Hovedmålene er å erstatte nåværende fremdriftsarrangement med et mer støysvakt alternativ, beskrive korrektive tiltak for å redusere støy, samt levere hastigheter mer egnet for en anti-ubåt-fregatt.

Konseptfasen omhandlet hovedsakelig analyse av potensielle konfigurasjoner for fremdriftsmaskineri, altså hva som skulle produsere kraften for å skape fremdrift. Det lå til grunne forutsetninger som at man skulle gjøre om propellerarrangementet og rorene til to separerte akselledninger med hvert sitt ror, og erstatte støyproduserende trøstere med støysvake propellere. Videre i konseptfasen ble utvalget for konfigurasjoner snevret ned kombinert dieselelektrisk og gass (CODLAG) og integrert elektrisk fremdrift (IEP). Konseptfasen konkluderte med at en videre løsning skulle gå ut ifra IEP på grunn av potensialet for høy fleksibilitet og lav hydroakustisk støy.

Forprosjektfasen innledet med å etablere krav for konseptet. Grunnet oppgavens fokus på offentlige kilder ble kravene utarbeidet gjennom teori og begrensende faktorer. Korrektive tiltak blir senere presentert som løsninger på kravene. Videre ble det designet oppsett for generatorsett, frekvensomformer, elektromotorer, akselarrangement, trøstlager, propellere og ror. For generatorsett og elektromotorer ble det valgt ut modeller som alternativer for fremdrift. Deretter ble det gjort et kostnadsestimat av det utledete designet. Avslutningsvis ble det foretatt en anbefaling om å videreutvikle designet, ettersom vi vurderer JM-kystvakt som AU-fartøy som en potensiell løsning for en kosteffektiv AU-plattform. For videre arbeid er det essensielt å gå dypere i detaljer for å se om fartøyet har egenskapene til å være en plattform for anti-ubåt-krigføring.

## Innholdsfortegnelse

<b>Referanser .....</b>	<b>1</b>
<b>Figurer .....</b>	<b>6</b>
<b>Tabeller .....</b>	<b>7</b>
<b>Nomenklatur / Forkortelser / Symboler .....</b>	<b>8</b>
Forkortelser .....	8
Symboler .....	10
<b>1 Innledning / Introduksjon .....</b>	<b>11</b>
1.1 Bakgrunn .....	11
1.2 Oppgaveanalyse .....	13
1.3 Metode .....	14
1.3.1 Kvalitativ tilnærming og litteraturstudie som metode .....	14
1.3.2 PRINSIX-modellen .....	15
1.4 Avgrensninger .....	16
1.5 Oppgavens oppbygning .....	17
<b>2 Konseptfase .....</b>	<b>18</b>
2.1 Krav .....	18
2.1.1 Hydroakustisk støy og signatur .....	19
2.1.2 Hastighet og operasjonsprofil .....	20
2.1.3 Overlevelsessevne og sårbarhet .....	22
2.2 Fremdriftsmotorer .....	23
2.2.1 Dieselmotor .....	23
2.2.2 Gassturbin .....	26
2.2.3 Elektrisk .....	27
2.3 Valg av konsepter til utdypning – alternativanalyse .....	30
2.3.1 CODAD – Kombinert diesel og diesel .....	30
2.3.2 CODOD – Kombinert diesel eller diesel .....	31
2.3.3 CODAG – Kombinert diesel og gass .....	32
2.3.4 COGAG – Kombinert gass og gass .....	33
2.3.5 COGOG – Kombinert gass eller gass .....	34
2.3.6 CODLAG – Kombinert diesel elektrisk og gass .....	34
2.3.7 IEP – Integrert elektrisk fremdriftsmaskineri .....	35
2.3.8 Valg til avveiningsanalyse .....	37
2.4 Avveiningsanalyse .....	41
2.4.1 Konsept 1 – IEP – Integrert Elektrisk Propulsjon .....	41
2.4.2 Konsept 2 - CODLAG – Kombinert diesel-elektrisk og gass .....	46

2.5	Valg av konsept.....	49
<b>3</b>	<b>Forprosjektfasen .....</b>	<b>55</b>
3.1	Konklusjon fra konseptfase.....	55
3.2	Innledende krav og behov .....	55
3.3	Utredelse av design .....	56
3.3.1	Effektbehov .....	57
3.3.2	Fartøysmodifikasjoner .....	60
3.3.3	Signatur .....	66
3.3.4	Utholdenhet.....	71
3.4	Fremmet løsning .....	72
3.4.1	Generatorer.....	73
3.4.2	Elektromotorer .....	74
3.4.3	Propell .....	75
3.4.4	Hvorfor passer denne løsningen?.....	77
3.5	Konklusjon.....	79
<b>4</b>	<b>Konklusjon med anbefaling .....</b>	<b>80</b>
<b>5</b>	<b>Videre arbeid med å modifisere Jan Mayen Klassen .....</b>	<b>83</b>
	<b>Vedlegg .....</b>	<b>84</b>

## Referanser

- Anderson, T. J. (2013, mai 10). Operational Profiling and Statistical Analysis of Arleigh Burke-Class Destroyers. Cambridge, Massachusetts, USA: Department of Mechanical Engineering.
- Børrsen, J. (2023, Oktober 23). *Forsvaret*. Hentet November 15, 2023 fra SNL:  
<https://snl.no/Forsvaret>
- Congressional research service. (2023, November 14). *Navy Constellation (FFG-62) Class Frigate Program: Background an issues for Congress*. Hentet November 21, 2023 fra Congressional research service: <https://sgp.fas.org/crs/weapons/R44972.pdf>
- Departementets sikkerhets og seviceorganisasjon. (2023, Mai 3). *Forsvarskommisjonen av 2021*. Hentet fra Regjeringen:  
<https://www.regjeringen.no/contentassets/8b8a7fc642f44ef5b27a1465301492ff/no/pdfs/nou202320230014000dddpdfs.pdf>
- Det franske senatet. (2014, november 20). *Det franske senatet*. Hentet november 29, 2023 fra Projet de loi de finances pour 2015 : Défense : équipement des forces:  
<https://www.senat.fr/rap/a14-110-8/a14-110-819.html#toc308>
- Donaldson, K. (2022, november 14). *BNNbloomberg*. Hentet november 29, 2023 fra UK Awards BAE £4.2 Billion Contract for Royal Navy Frigates:  
<https://www.bnnbloomberg.ca/uk-awards-bae-4-2-billion-contract-for-royal-navy-frigates-1.1846295>
- Federation of American Scientists. (u.d.). *FAS*. Hentet november 21, 2023 fra Information Sheet Ship's Silencing Program: [https://man.fas.org/dod-101/navy/docs/swos/stu2/NEWIS9\\_7.html](https://man.fas.org/dod-101/navy/docs/swos/stu2/NEWIS9_7.html)
- Fincantieri. (2023, November 21). *Bergamini Class*. Hentet fra Fincantieri :  
<https://www.fincantieri.com/en/products-and-services/naval-vessels/bergamini-class/>
- FMA. (2022, november 16). *FMA*. Hentet november 29, 2023 fra Nye kystvaktfartøy:  
<https://www.fma.no/anskaffelser/nye-kystvaktfartoy>

FMA. (u.d.). *PRINSIX*. Hentet november 23, 2003 fra Forprosjektfase:

<https://www.fma.no/prinsix/prosjektfaser/forprosjektfase>

Forsvarsdepartementet. (2020). *Langtidsplan for forsvarssektoren (2021-2024)*. 16: Oktober.

Forsvaret. (2023, November 7). *Marinen*. Hentet November 7, 2023 fra Forsvaret:

<https://www.forsvaret.no/om-forsvaret/organisasjon/sjoforsvaret/marinen>

Forsvaret. (2023, Oktober 23). *Om kystvakten*. Hentet November 7, 2023 fra Forsvaret:

<https://www.forsvaret.no/om-forsvaret/organisasjon/sjoforsvaret/kystvakten/om-kv>

Forsvaret. (2023, Juni 5). *Sjøforsvaret*. Hentet November 7, 2023 fra Forsvaret:

<https://www.forsvaret.no/om-forsvaret/organisasjon/sjoforsvaret>

Forsvaret. (u.d.). *Fridtjof Nansen*. Hentet 11 14, 2023 fra Webområde for Forsvaret:

<https://kultur.forsvaret.no/fartoydatabse/fridtjof-nansen>

Forsvarsmateriell. (2023, November 8). *Nye Kystvaktfartøy*. Hentet November 8, 2023 fra

Forsvarsmateriell: <https://www.fma.no/anskaffelser/nye-kystvaktfartoy>

Forsvarsmateriell. (u.d.). *PRINSIX konseptfase*. Hentet Oktober 06, 2023 fra

<https://www.fma.no/prinsix/prosjektfaser/konseptfase>

Forsvarsstaben. (2015, Desember 15). *Forsvarets doktrine for maritime operasjoner*. Hentet

fra FHS.brage.unit.no: <https://fhs.brage.unit.no/fhs-xmlui/bitstream/handle/11250/2407101/Forsvarets%20doktrine%20for%20maritime%20operasjoner%202015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Franske Senatet. (u.d.). *Projet de loi de finances pour 2015*.

GE Gas Power. (2023). *General Electric*. Hentet november 20, 2023 fra LM2500

aeroderivative gas turbine: <https://www.ge.com/gas-power/products/gas-turbines/lm2500>

GE power conversion . (2023, November 20). *(CIM) compact induction motor*. Hentet fra GE

power conversion : <https://www.gepowerconversion.com/product-solutions/induction-motors/Compact-Induction-Motor-CIM>

GE power conversion. (2020, Juni 11). *GE Powers US Navy's 1st Full-Electric Power and Propulsion Ship*. Hentet November 23, 2023 fra GE power conversion:



<https://www.gepowerconversion.com/news/ge-powers-us-navys-1st-full-electric-power-and-propulsion-ship>

GE power conversion. (2021). *Large power induction motor up to 40MW*. Hentet November 29, 2023 fra GE power conversion:

[https://www.gepowerconversion.com/sites/default/files/2022-01/GEA34832\\_FS\\_Large%20power%20induction%20motors%20up%20to%2040%20MW\\_EN\\_20210504.pdf](https://www.gepowerconversion.com/sites/default/files/2022-01/GEA34832_FS_Large%20power%20induction%20motors%20up%20to%2040%20MW_EN_20210504.pdf)

GE power conversion. (2022, Januar 14). *Queen Elizabeth Class (QEC) aircraft carriers : providing the Ship's Electric Grid for the world's largest electric propulsion ships*.

Hentet fra Ge power conversion: <https://www.gepowerconversion.com/case-study/queen-elizabeth-class-aircraft-carriers>

GE power conversion. (2023, August 1). *Solutions for world navies*. Hentet November 20, 2023 fra Ge power conversion:

[https://www.gepowerconversion.com/sites/default/files/2023-08/GEA35120A\\_MARINE\\_BCH\\_GE%20Power%20Conversion%20Solutions%20for%20World%20Navies\\_EN\\_2023Aug\\_REV2\\_HR.pdf](https://www.gepowerconversion.com/sites/default/files/2023-08/GEA35120A_MARINE_BCH_GE%20Power%20Conversion%20Solutions%20for%20World%20Navies_EN_2023Aug_REV2_HR.pdf)

Gjestland, T. (2021, November 4). *Akustikk*. Hentet fra SNL.

Grønmo, S. (2023, januar 16). *Store Norske Leksikon*. Hentet november 29, 2023 fra kvalitativ metode: [https://snl.no/kvalitativ\\_metode](https://snl.no/kvalitativ_metode)

Hansheinrich, P.-M., & Bernhardt, F. (2009). *Compendium Marine Engineering*. Hamburg: Seehafen Verlag.

Helseth, L. E. (2021, Juli 2). *Kavitasjon*. Hentet November 13, 2023 fra SNL:

<https://snl.no/kavitasjon>

Høyte, F. (2020, November 21). *SNL*. Hentet fra Asynkronmotor:

<https://snl.no/asynkronmotor>

Kongsberg Maritime. (2023, November 25). *Cavitation inception speed - CIS*. Hentet fra

Kongsberg: <https://www.kongsberg.com/maritime/services/hydrodynamics--collaboration--references/propeller-design--cavitation/cavitation-inception-speed--cis/>

- MAN Energy Solution. (2018, Oktober). *Basic principles of ship propulsion*. Hentet November 25, 2023 fra MAN Energy Solution: [https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync-archive/basic-principles-of-ship-propulsion-eng.pdf?sfvrsn=48fc05b5\\_7](https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync-archive/basic-principles-of-ship-propulsion-eng.pdf?sfvrsn=48fc05b5_7)
- NAOB. (2023, November 29). *Overlevelsessevne*. Hentet fra Det norske akademis ordbok: <https://naob.no/ordbok/overlevelsessevne>
- Nordbø, B. (2020, November 10). *Marsjart*. Hentet November 22, 2023 fra SNL: <https://snl.no/marsjart>
- Pettersen, J. (1967). *Prinsipper for støybekjempelse*. Sandefjord: Det Norske Veritas Forskningsavdeling.
- Pike, J. (1999, Mars 8). *Prairie/masker*. Hentet November 27, 2023 fra FAS: <https://man.fas.org/dod-101/sys/ship/weaps/prairie.htm>
- Riviera Newsletters. (2008, September 26). *FREMM frigates feature CODLAG gearsets*. Hentet November 21, 2023 fra Riviera: <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/fremm-frigates-featurecodlag-gearsets-51796>
- Rolls Royce. (2022). *Type 26 hybrid propulsion system*. Hentet November 30, 2023 fra Rolls Royce: [https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/defence/VCOMB3425\\_Providing\\_Power\\_and\\_Propulsion.pdf](https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/defence/VCOMB3425_Providing_Power_and_Propulsion.pdf)
- Rolls Royce. (2023, November 20). *MT30*. Hentet fra Rolls Royce: <https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/defence-aerospace/VCOMB3258-MT30-Marine-Gas-Turbine-Brochure.pdf>
- Royal Navy. (2023, November 23). *City Class frigate*. Hentet fra Royal Navy: <https://www.royalnavy.mod.uk/equipment/ships/city-class>
- SHIP & BUNKER. (2023, Oktober 18). *Ship&Bunker*. Hentet Oktober 18, 2023 fra Global Average Bunker Price: <https://shipandbunker.com/prices/av/global/av-glb-global-average-bunker-price>
- Sivertsen, L. (2019). *Elektiske Maskiner*. Bergen: Fagbokforlaget.
- Sjøforsvarsstaben. (2015, Desember 15). Forsvarets doktrine for maritime operasjoner. Bergen, Norge.

Skilbrei, M. (2019). *Kvalitative metoder: Planlegging, gjennomføring og etisk refleksjon* (1. Utgave. utg.). Bergen: Fagbokforlaget .

Woud, H. K., & Stapersna, D. (2013). *Design of Propulsion and Electric Power Generation Systems* (1. utg.). London: The Institute of Marine Engineering, Science and Technology.

## Figurer

Figur 1 Illustrasjon fra US Navy silencing program .....	20
Figur 2 Utklipp fra GE Power Conversion.....	42
Figur 3 Eksempel IEP-system .....	43
Figur 4 Eksempel 1 CODLAG-system .....	47
Figur 5 Eksempel 2 CODLAG-system benyttet av Type-26 fregatten til Royal Navy (Rolls Royce, 2022).....	47
Figur 6 Oppsett av propellerakslinger fra LMG Marin.....	61
Figur 7 Illustrasjon av V-braketter .....	62
Figur 8 Eksempelskisse for rør- og propellerplassering.....	62
Figur 9 Viser prinsippet med boundary layer og wake faktor.....	63
Figur 10 Wakeprofil for sentrert (venstre) og sidestilt (høyre) propellaksling for JM- kystvakt.....	64
Figur 11 Eksempel for tiltenkt plassering .....	65
Figur 12 Eksempeloppsett for rør-styring .....	66
Figur 13 Illustrasjon av støydempede alternativ .....	67
Figur 14 Illustrasjon av komplett støyisolerende installasjon .....	68
Figur 15 Illustrasjon av masker air system teoretisk og praktisk.....	69
Figur 16 Illustrasjon av PRAIRIE air systemet teoretisk og praktisk .....	69
Figur 17 Operasjonsprofil for DDG-51 .....	71
Figur 18 Illustrasjon av fremmet løsning .....	73
Figur 19 Illustrasjon for tandemoppsett .....	75
Figur 20 Propeller-løsning JM-kystvakt .....	76

## Tabeller

Tabell 1 Skrogkarakteristikk JM-kystvakt .....	21
Tabell 2 Operasjonsprofil for DDG-51 .....	22
Tabell 3 Oppsett for krav .....	56
Tabell 4 Sea states-skala .....	58
Tabell 5 Skrogkarakteristikk for JM-kystvakt.....	58
Tabell 6 Effektbehov ved gitte hastigheter .....	59
Tabell 7 Effektbehov med slepesonar .....	60
Tabell 8 Operasjonstid vel full hotellast (3000 kW) .....	71
Tabell 9 Operasjonstid med minimum hotellast (1500 kW) .....	72
Tabell 10 Data for generatorvalg .....	74
Tabell 11 Data for elektromotorvalg .....	75

## Nomenklatur / Forkortelser / Symboler

### Forkortelser

ASW	Anti-ubåtkrigføring
AU	Anti-ubåt
BE	Bergen Engines
CODAD	Kombinert diesel og diesel
CODAG	Kombinert diesel og gass
CODLAG	Kombiner diesel elektrisk og gass
CODOD	Kombinert diesel eller diesel
COGAG	Kombinert gass og gass
COGOG	Kombinert gass eller gass
CPP	Controllable Pitch Propeller
DC	Likestrøm
DDG-51	Arleigh Bruke-klasse destroyer
EMI	Elektromagnetisk Interferens
FD	Forsvarsdepartementet
FLO	Forsvarets Logistikkorganisasjon
FMA	Forsvarsmateriell
FN-fregatt	Fridtjof Nansen-klassen fregatt
FREMM	Fregata Europea Multi-Missione (Europeisk Multirolle Fregatt)
GE	General Electric
IEP	Integrert elektrisk fremdriftsmaskineri
IR	Infrarød
ITA	Italia
JM-kystvakt	Jan Mayen-klassen kystvakt

KV	Kystvakt
LDW	Lloyd Dynamowerke Bremen
LTP	Langtidsplan for forsvarssektoren
MARKAP	Maritime Kapasiteter
MCR	Maximum continuous rating
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MTBF	Mean Time Between Failure
NATO	North Atlantic Treaty Organization
NOK	Norske kroner
NOR	Norge
PRAIRIE	Propeller air-induced emission
PRINSIX	Prosjekt informasjonssystem basert på Unix
Type-23	Britisk Multirolle/AU-fregatt (eldre modell)
Type-26	Britisk Multirolle/AU-fregatt (nyere modell)
US	United States
USW	Undervannskrigføring (Undersea Warfare)

## Symboler

Symbol	Beskrivelse	Enhet
$b_e$	Spesifikt brennstofforbruk	g/kWh
$P_{hotell}$	Hotellast	kW
$P_E$	Slepeeffekt	kW
$P_{elmotor}$	Levert effekt elektromotor	kW
$P_{produsert}$	Produsert effekt	kW
$P_{reserve}$	Reservekapasitet	kW
$V_A$	Hastighet vann inn til propell	knop og m/s
$V_s$	Skipets hastighet	knop og m/s
$\eta_D$	Propulsjonsvirkningsgrad	
$\eta_M$	Mekanisk virkningsgrad	
$\eta_{el}$	Elektrisk virkningsgrad	
$V$	Hastighet	knop og m/s
$w$	Wake faktor koeffisient	



# 1 Innledning / Introduksjon

Dette kapittelet skal ta for seg de overordnede rammene for oppgaven og trekke leseren inn i scenarioet og problemstillingen. Kapittelet vil beskrive bakgrunnen og motivasjonen for videre undersøkelse av problemstillingen. Deretter vil kapittelet beskrive problemstillingen, metoden og oppbygningen til oppgaven. Ut ifra bacheloroppgavens omfang vil det videre bli foretatt avgrensinger av problemstillingen. I tillegg vil avgrensningene beskrive innhenting og behandling av informasjon.

## 1.1 Bakgrunn

Det norske Sjøforsvaret utgjør i dag den «mobile og kampklare sjømilitære komponenten av fellesoperativ og alliert innsats» (Fordsvarsdepartementet, 2020, s. 100), og skal primært bidra til «å sikre fri tilgang til havet gjennom å beskytte, overvåke og kontrollere nasjonens kystlinje og havområder» (Forsvaret, 2023). Det er innlysende at et slikt omfattende oppdrag krever en god organisering av Sjøforsvarets avdelinger og enheter, og i den forlengelse består Sjøforsvaret primært av to hovedgrener: Kystvakten og Marinen.

Kystvakten utfører en rekke ulike oppdrag som del av det norske Sjøforsvaret, men dets primæroppgaver innebærer suverenitetshevdelse og ressurskontroll. I den forlengelse løser Kystvakten i hovedsak «Forsvarets fredsoperative oppdrag for kongeriket» (Forsvaret, 2023). Spesielt med kystvakten er at de innehar begrenset politi-, inspeksjon- og kontrollmyndighet på vegne av flere statelige aktører og sivile myndigheter (Forsvaret, 2023). Videre består Kystvakten av tre hovedtyper av fartøyer: havgående kystvaktfartøyer med helikopterkapasitet, havgående fartøyer og kystnære fartøyer. På bakgrunn av Kystvaktens oppbygning utgjør den en fleksibel kapasitet i det norske Forsvaret, og bidrar til tilstedeværelse og overvåkning av havområdene (Fordsvarsdepartementet, 2020, s. 102).

Marinens primære oppdrag er å «til enhver tid ivareta det militære forsvaret av norske havområder om nødvendig» (Forsvaret, 2023). Oppdraget innebærer å sikre fri tilgang til de havområdene, samt opprettholde norsk handlefrihet ved å stille maritime ressurser tilgjengelige (Forsvaret, 2023). Marinen utgjør den operative kampstyrken i Sjøforsvaret og består av fregatter, undervannsbåter, korvetter, mineryddingsfartøy, logistikkfartøy, minedykkerkommandoen og kystjegerkommandoen. I fredstid er også Marinens jobb suverenitetshevdelse i nasjonale farvannsområder (Børssen, 2023).

Sammen sikrer Marinen og Kystvakten et samlet forsvar av de norske havområdene, både over og under havoverflaten. På bakgrunn av økt strategisk betydning av våre nordlige havområder stilles det nå betydelig høyere krav til Sjøforsvaret som militær gren. Videre har den stadige teknologiske utviklingen og kompleksiteten i dagens sammensatte materiell- og våpensystemer bidratt til et markant behov for raskere oppdateringer og anskaffelsesordninger i Forsvaret generelt. Det er et faktum at dagens overflatekampfartøyer er i ferd med å bli utdatert, og forsvarskommisjonen anbefalte i «Forsvarskommisjonen av 2021 – Forsvar for fred og frihet» at norske myndigheter blant annet bør anskaffe nye fregatter og dermed erstatte dagens Fridtjof Nansen-klassen fregatt (FN-fregatt). Fregattene utgjør en vesentlig del av Norges bidrag i alliert samarbeid, og én sentral ambisjon er at våre fremtidige kapasiteter innenfor sjødomenet driftes og utvikles i samråd med allierte styrker. «Størst mulig likhet i systemer og plattformer bidrar til økt kampkraft, forutsigbarhet og er kostnadseffektivt» (Forsvarsdepartementet, 2020, s. 101). I tillegg anbefaler forsvarskommisjonen et større antall standardklassefartøy basert på kommersielle standarder til bruk i både Kystvakten og Marinen.

Forsvarskommisjonen av 2021 beskriver behovet for økt maritim tilstedeværelse både hjemme og ute. Det vil i den sammenheng oppstå et samtidighetsproblem som kun kan løses med et tilstrekkelig antall fartøy tilgjengelig. I klartekst har Forsvaret behov for et større antall fartøy for å kunne tilfredsstille de oppdrag de er tildelt på et nasjonalt nivå. Standardklassefartøyene representerer en aktuell løsning fordi de tilbyr et balansert forhold mellom antall fartøy og kostnadseffektivitet. Konseptet standardklassefartøy innebærer en rekke fartøy som alle har opprinnelse i samme konsept, hvorav grunnstrukturen og grunnleggende systemer er like, men operasjonsprofil, størrelse og utrustning vil være forskjellige. Hensikten med standardklassefartøyene er å redusere investeringskostnadene og styrke evnen til å vedlikeholde samt oppdatere og bemanne fartøyene på en bærekraftig måte i samarbeid med sivil maritim næring. Fartøyene må baseres på sivile standarder og løsninger for å kunne holde kostnader nede og holde levetidsperspektivet tilsvarende sivil sektor (Departementets sikkerhets og seviceorganisasjon, 2023). Standardklassefartøyene kan i tråd med forsvarskommisjonens anbefalinger kunne fungere som et supplement til forsvarets nye overflatestruktur ved spesialisering innenfor anti-ubåt krigføring, dermed bidra direkte inn til dagens fregattoperasjoner gjennom støtte knyttet til undervannskrigføring.

Jan Mayen-klassen Kystvakt (JM-kystvakt) er nyeste fartøysklasse i Kystvakten og ble levert til Forsvaret i 2023. JM-kystvakt i dag er et helikopterbærende fartøy som skal kunne fungere

i arktiske farvann, herunder inngår krav til å kunne operere i de ytre havområdene på utsiden av Norge. Kystvaktfartøyet har i tillegg evne til å samarbeide med andre militære og sivile enheter ved hjelp av godt kommunikasjonsutstyr, sensorer og isgående egenskaper (Forsvarsmateriell, 2023). JM-kystvakt kan fungere som en løsning på Forsvarets nye standardklassefartøy, også muligens neste generasjons overflatefartøy. LMG marin og andre aktører som har spilt en viktig rolle i konstruksjonen av JM-kystvakt har en god oversikt i hvordan dette fartøyet kan modifiseres til et kosteffektivt kampfartøy som kan inngå som et supplement i en fremtidig AU-struktur i marinen.

## 1.2 Oppgaveanalyse

En modifisert kommersiell løsning slik som JM-kystvakt vil ikke kunne imøtekomme kravene til en militært konstruert AU-fregatt med tanke på ytelse og hydroakustisk støy, men kan være et kosteffektivt supplement for dagens undervannskrigføringsplattformer. Temaet for denne oppgaven vil i den sammenheng være modifikasjon av JM-kystvakt for å imøtekomme kravene til et standardklassefartøy med spesialisering innenfor anti-ubåt krigføring, hvorav oppgaven vil ha fokus på fremdriftssystemet. Oppgaven vil ta utgangspunkt i JM-kystvakt som den er utrustet i dag og ved modifikasjoner til fremdriftssystemet tilpasse fartøyet til å kunne operere med minimalt hydroakustisk støy i gitte hastighetsområder, henholdsvis 24 knop økonomisk marsjfart for hurtig og taktisk forflytning, 18 knop silentmode og 12 knop med slepesonar.

Oppgaven skal ta for seg hvilke motorkonfigurasjoner som er hensiktsmessig for et fartøy spesialisert for anti-ubåt krigføring, og videre hva som passer i den eksisterende JM-kystvakt. Modifikasjonene må møte et kompromiss med ytelse og signatur og er en del av avveiningsanalysen videre i oppgaven. Oppgaven skal ta for seg en rekke motorkonfigurasjoner med opptil flere forskjellige motortyper som ansees aktuelle. Videre skal det besluttes hvilke valg som er aktuelle for JM-kystvakt og tilpasses fartøyet med tanke på ytelse, signatur, rekkevidde, kostnader og romslige utfordringer.

Videre skal oppgaven ta for seg hva slags propellkonfigurasjoner som er aktuelle samt teori innenfor hydroakustisk signatur. Ved anvendelse til marine formål er det behov for å modifisere propulsjonsanlegget på JM-kystvakt fra å være asimut-trøstere til å bestå av to separate fremdriftsmaskinerier med støy-optimalisere propellere for å kunne imøtekomme de utfordringer som er relevante for dagens AU-krigføring. Propellteori og hydroakustisk teori er

sentrale elementer som må diskuteres og sees opp mot krav og behov, da en signaturoptimalisert propell som er egnet til JM-kystvakt må spesialkonstrueres.

Ved referering til anti-ubåt krigføring menes evnen til å hindre fienden i å utnytte sine ubåter effektivt. For et AU-fartøy handler anti-ubåt krigføring blant annet om å utnytte alle midler som kan sette fartøyet i stand til å oppdage, klassifisere og lokalisere motstanderens ubåter. For at et AU-fartøy skal være i stand til nettopp oppdage, klassifisere og lokalisere er det kritisk med så lite egenstøy fra skipet som mulig. Det er derfor viktig for et AU-fartøy at eget fremdriftsmaskineri ikke generer for mye hydroakustisk støy som kan forstyrre egne sensorer. I tillegg er lav hydroakustisk signatur viktig for å unngå deteksjon av fiendtlige aktører (Forsvarsstaben, 2015).

## **1.3 Metode**

I dette kapittelet vil oppgaven redegjøre hvilke metodiske valg og avgrensninger som er foretatt for å besvare problemstillingen. Formålet med forskningsprosjektet er å modifisere JM-kystvakt for å imøtekomme kravene til et AU-fartøy med hensyn til fremdriftssystemets egenskaper og karakteristikk. Det finnes en rekke ulike metoder for å innhente, analysere og utarbeide informasjon innenfor temaet, men på bakgrunn av vår problemstilling fant vi det mest hensiktsmessig å benytte en kvalitativ tilnærming.

### **1.3.1 Kvalitativ tilnærming og litteraturstudie som metode**

Oppgaven vil primært benytte en kvalitativ tilnærming til problemstillingen. Hensikten med kvalitativ forskning er å «undersøke, forstå og formidle kunnskap om prosesser og fenomener» (Skilbrei, 2019, s. 28). Denne forskningsmetoden brukes ved innsamling og analyse av kvalitative data, primært i form av tekst (Grønmo, 2023). Videre vurderes det at en mer kvantitativ tilnærming ville gjøre seg gjeldende som del av analysen, og i den forlengelse vil oppgaven løses som en litteraturstudie.

For å undersøke relevante fremdriftssystemer og hvilke modifikasjoner som må utføres på nåværende JM-kystvakt, benyttet vi innledningsvis en kvalitativ tilnærming for å innhente og analysere potensielle fremdriftssystemer. Basert på innhenting av kvalitative data beveger oppgaven seg videre over i en mer kvantitativ studie i form av systematiserte skjemaer og beregninger som er nødvendige for integrasjon av nytt fremdriftssystem. I studier hvor både

kvalitativ og kvantitativ metode benyttes, gjør litteraturstudie seg gjeldende som metode og analyserer eksisterende forskning (Dalland, 2012). Dermed kommer man ikke direkte frem til ny kunnskap i den forstand, men bidrar til kunnskap i form av sammenhenger og perspektiver.

### **1.3.2 PRINSIX-modellen**

For å besvare problemstillingen best mulig har vi valgt å benytte oss av forsvarrets egen PRINSIX-modell, hvorav vi grunnet oppgavens begrensninger har vi valgt å benytte en forenklet versjon av PRINSIX-modellen. PRINSIX-modellen omfatter blant annet rammeverket for innkjøp av forsvarsmateriell, og er utviklet av Forsvarsdepartementet (FD) og Forsvarsmateriell (FMA) (FMA, u.d.). Modellen er inndelt i ulike nivåer og faser, men på bakgrunn av vår oppgave finner vi det mest hensiktsmessig å ta for oss deler av prosjektstyringsprosessen. Denne prosessen består av (1) idéfase, (2) konseptfase, (3) forprosjektfase, (4) gjennomføringsfase og (5) avslutningsfase. Som nevnt over vil vi grunnet tids- og oppgavebegrensning benytte en forenklet versjon av PRINSIX-modellen, og vi legger dermed til grunn at idéfasen er gjennomført hvor det er konkludert med at en modifisering av JM-kystvakt er mulig for å imøtekomme kravene til et standardfartøy med spesialisering innenfor AU-krigføring. Vi vil videre utforske hvilke muligheter som er mest hensiktsmessig, og vil dermed ta for oss konsept- og forprosjektfasen.

#### **Konseptfase**

Hensikten med konseptfasen er å skape et beslutningsgrunnlag basert på identifiserte behov og valg av alternativ. Dette skal skape en helhetsvurdering som gjør det mulig å anbefale en oppnåelig løsning til forprosjektfasen. Anbefalt løsning skal etterleve krav, behov og sannsynlig operasjonsprofil. Vi vil derfor gjennomføre en forenklet konseptfase med en alternativanalyse og en avveiningsanalyse for å klarlegge de relevante kravene, foreta avgrensninger og innføre nødvendige forutsetninger for at fartøyet skal kunne driftes hensiktsmessig. Målet med konseptfasen er å komme til en anbefalt løsning i en forenklet forprosjektfase (Forsvarsmateriell, u.d.). Konseptfasen vil i stort etablere en «top-down» betraktning hvor vi vil presentere og drøfte de faktorene vi anser som mest essensielle samt grovt vurdere hvor godt fremdriftssystemene kan yte innenfor de faktorene.

#### **Forprosjektfase**

Basert på de kvalitative analysene vil oppgaven velge et spesifikt fremdriftssystem til en videre kvantitativ studie som omhandler JM-kystvakt. Hensikten med definisjonsfasen er å videreutvikle og optimalisere anbefalt løsning fra konseptfasen og oppnå en mer detaljert beskrivelse av løsningen. Beregninger og modifikasjoner for å tilpasse løsning til valgt plattform er essensielt i forprosjektfasen. Det vil også bli gjennomført en parameterstudie for å optimalisere den valgte løsningen. Forprosjektfasen vil ha et «bottom-up» forskningsbasert fokus hvor vi vil adressere essensielle detaljer som til slutt vi gi et godt bilde av hvordan et fremdriftssystem kan se ut i en modifisert JM-kystvakt. Oppgaven vil avslutningsvis konkludere om det er hensiktsmessig å modifisere JM-kystvakt for AU-krigføring

## 1.4 Avgrensninger

Det finnes flere alternativer for å modifisere JM-kystvakt til en kosteffektiv AU-plattform, men for å komme i mål innenfor rammene av bacheloroppgaven var det nødvendig å foreta visse avgrensninger. I denne oppgaven har vi derfor valgt å ta for oss mulige endringer av fremdriftssystemet, hvor vi hovedsakelig vektlegger motor- og gir-konfigurasjoner. I den forlengelse foretar vi en rekke analyser av essensielle faktorer som blant annet signatur, hastighet og kostnad.

Ved utredning av verdier for kostnader og fysiske størrelsesordener av komponenter vil det foretas grove estimater. På grunn av bacheloroppgavens omfang vil det ikke bli gjennomført markedsundersøkelser.

I forbindelse med utforskning av motorkonfigurasjoner av dieselmotorer, er det kun «Medium Speed»-motorer som blir vurdert grunnet hensyn til hydroakustisk signatur og effekt. For et fartøy på denne størrelsen vil ikke high-speed motorer kunne dekke effektbehovet til fartøyet. I tillegg er medium-speed motorer en velkjent maritim teknologi for militære fartøyer.

Videre vil potensielle konsepter vurderes med utgangspunkt i to separate fremdriftslinjer. Bakgrunnen for dette er at skipets profil gir større klaring mellom propeller og skrog dersom det er to propellakslinger fremfor én. På denne måten vil to separate fremdriftslinjer tilfredsstille kravene for redundans og manøverevne satt av marinestandarder og regelverk.

Vi anser det dermed hensiktsmessig å poengtere at disse fremdriftssystemene ikke vil innebære bruk av kryssgir, ettersom fartøyets bredde vil gjøre kryssgiret stort og tungt, som igjen hadde

medført både mekaniske tap, støy og redusert pålitelighet. I tillegg vil innføring av kryssgir innebære høy kompleksitet.

For å forsikre lavest mulig signatur skal løsningen bestå av en hensiktsmessig propeller av typen «Controllable Pitch Propeller» (CPP). CPP er en type propeller som kan rotere propellbladene for å endre retning til fartøyet eller endre hastigheten. For å videre bidra til optimal støysignatur velges rotasjonen til propellene inn mot senter av fartøyet. Det er en mulighet for at en løsning med fast montert propell der akslingen kan gå begge veier er beste alternativ, men på grunn av omfanget legges CPP til grunn.

## 1.5 Oppgavens oppbygning

Oppgaven består videre av (2) et kapittel om konseptfasen, der vi vurderer ulike fremdriftskonfigurasjoner med alternative fremdriftsmotorer og drøfter hvilken konfigurasjon som skal videreutvikles i forprosjektfasen, (3) et kapittel om forprosjektfasen, hvor vi foretar ulike analyser og anbefaler mulig løsning og (4) et avsluttende kapittel med hvor vi gjør noen vurderinger av løsningsalternativet og foretar anbefalinger for JM-kystvakt som AU-plattform. (5) Helt avslutningsvis vil vi komme med anbefalinger for videre arbeid for prosjektet som helhet.

## 2 Konseptfase

Som nevnt innledningsvis tar ikke oppgaven for seg en selvstendig idéfase, men vi legger til grunn at idéfasen er gjennomført og det er konkludert med at det vil være hensiktsmessig å undersøke videre for å identifisere om en modifisering av JM-kystvakt kan være en kosteffektiv løsning som kan innfri de grunnleggende kravene for et AU-fartøy. Videre er det en etablert sannhet at Sjøforsvaret har behov for å opprettholde en tilstrekkelig kvantitet i AU-plattformer for å løse nåværende og fremtidige oppdrag for AU-krigføring, som gjør den antatte konklusjonen fra idéfasen troverdig. I det følgende skal vi ta for oss konseptfasen av PRINSIX-modellen, hvor vi skal vurdere hvorvidt JM-kystvakt egner seg som plattform for AU-krigføring etter modifikasjoner på primært fremdriftslinjen. På denne måten vil vi videreutvikle ideen fra foregående fase til et anbefalt konsept.

Konseptfasen vil ta for seg kravene som er satt for støy og hastighet, og se nøyere opp mot behov i AU-operasjoner. Videre vil vi i dette kapittelet ta for oss en vurdering av individuelle fremdriftsmotorer, og de aktuelle konfigurasjoner. Avslutningsvis besluttes det hvilken konfigurasjon som skal videreutvikles i forprosjektfasen ut ifra hva som vurderes som mest hensiktsmessig for AU-krigføring.

### 2.1 Krav

På bakgrunn av den kontinuerlige teknologiske utviklingen av ubåter og undervannsteknologi, stilles det særlige krav dersom man skal kunne operere effektivt i et farvannsområde med undervannstrussel. Ettersom skroget til JM-kystvakt er konstruert etter sivile standarder og ikke rustet for trefninger, er det primært to krav som stilles til fremdriftsmaskineriet: hydroakustisk støy og hastighet.

Lav signatur i form av hydroakustisk støy er kritisk for å unngå detektering av fiendtlige ubåter, og ikke forstyrre bildene til egne sensor kapasiteter. Samtidig stilles det krav til at skipet skal kunne seile i gitte hastigheter imens fartøyssignatur er på et tilfredsstillende nivå. Videre stilles det også krav til skipets overlevelsessevne og oppdragsprofil, i tillegg til at kostnad vil utgjøre en faktor for en eventuell anskaffelse av nytt fremdriftssystem.



### 2.1.1 Hydroakustisk støy og signatur

Hydroakustikk eller «undervannsakustikk» handler om lydbølger under vannoverflaten, og tar for seg hvordan lyd kan benyttes til å måle dybde eller oppdage objekter under vann (Gjestland, 2021). Etersom hovedoppgøret til et AU-fartøy er å hindre fienden i å handle fritt ved å oppdage, klassifisere og lokalisere deres ubåter (Forsvarsstaben, 2015), er hydroakustisk støydemping essensielt for AU-krigføring. Dette innebærer at fartøyet skal kunne benytte sine undervannssensorer effektivt uten forstyrrelser fra egne systemer. Det er videre innlysende at lavere hydroakustisk signatur vil innebære redusert sannsynlighet for deteksjon fra fiendtlige ubåter. I klartekst er det dermed avgjørende for et AU-fartøy å minimere hydroakustisk støy i den hensikt å løse sin primæroppgave. Det er viktig å nevne at spesifikke og realistiske krav i forhold til hydroakustisk signatur er begrenset informasjon og vil av den grunn ikke være en del av denne oppgaven. Vi vil dermed kun redegjøre for prinsippene rundt støygenerering samt hvilke system som vi antar vil være bedre eller dårligere med hensyn til hydroakustisk signatur basert på de prinsippene vi redegjør for.

Ifølge Pettersen (Pettersen, 1967, s. 3) kan hydroakustisk støy genereres på blant annet tre forskjellige måter: lyd fra vibrerende plater, strømningsseksistert lyd og kavitasjonslyd. I tillegg vil vi beskrive elektrisk støy som påvirker egne sonar. I det følgende skal vi kort redegjøre for hvorfor disse støygeneratorene er sentrale for å kunne besvare oppgaven.

I forbindelse med «lyd fra vibrerende plater» er det naturlig å trekke frem naturlige vibrasjoner fra et fremdriftsmaskineri i form av motorene, gir-arrangement og pumper, som naturlig skaper vibrasjoner i fartøyet platekledning. Videre vil disse vibrasjonene forplante seg ned i sjøen, og dermed være mulig å oppdage for andre fartøy (Federation of American Scientists, u.d.).

Strømningsseksistert lyd kommer av strømnings rundt propellene samt rundt skroget. Prinsippet baserer blant annet på at propellene skal ha mest mulig uniform strømnings inn til alle bladene og dermed likest mulig skyv på samtlige av bladene. Ved ulik tilstand på vannstrømmen inn til propellen vil det skape ujevnheter i skyv og resultere i vibrasjon som forplanter seg videre under vann (Federation of American Scientists, u.d.).

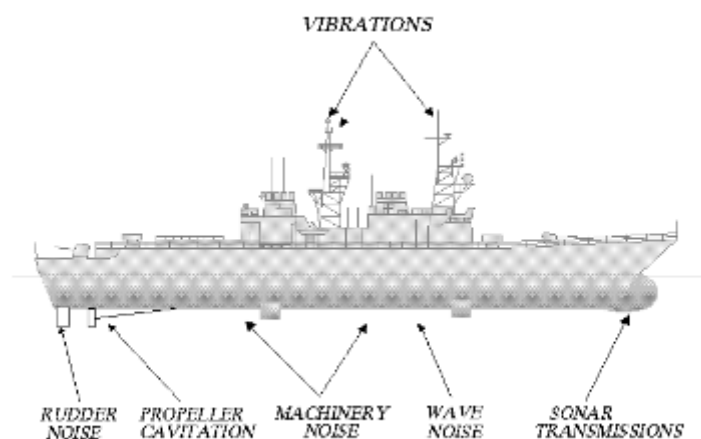
Kavitasjon er «dannelsen av gassbobler i en væske» (Helseth, 2021), og oppstår blant annet av propellens effektivitet og virkningsgrad. Dersom vannet opplever for stor hastighetsøkning over propellbladet vil vanntrykket avta. Dette fører til at vannet danner en gassboble ved utgangen av propellen. Når disse boblene går klar av kjølvannet til propellen vil de treffe det normale

Modifisere Jan Mayen klasse kystvakt til standardklassefartøy med anti ubåt krigføring som primæroppgave av Larsen & Nerland 2023

vantrykket, og ved for høyt trykk imploderer gassboblene (Helseth, 2021). Imploderingen av boblene sender ut lydbølger som skaper vibrasjoner som er merkbare inn i skroget samt høy hydroakustisk signatur (MAN Energy Solution, 2018).

Elektrisk støy eller ofte kalt elektromagnetisk interferens (EMI) er en form for støy utstrålt fra elektrisk maskiner, gjerne elektriske motorer eller andre elektriske komponenter med høye spenninger (Federation of American Scientists, u.d.). EMI kan i den sammenheng forstyrre elektriske komponenter slik som fartøyets sonar og andre sensorer dermed hindre fartøyet evne til å drive AU-krigføring.

Hydroakustisk støy må tas høyde for i videre alternativer, avveininger og i forprosjektfasen, samt at korrektive metoder må beskrives for å begrense støy.



**Figur 1 Illustrasjon fra US Navy silencing program**

### 2.1.2 Hastighet og operasjonsprofil

Ved silentoperasjoner med skrogmontert sonar ønskes en hastighet opp mot 18 knop, og 12 knop med slepesonar. Ved økonomisk cruisehastighet ønskes en marsjhastighet på 24 knop.

De spesifikke kravene for silentoperasjoner er definert av graderte dokumenter og med hensyn til gradert informasjon velger vi å anta en definisjon på silentmode. Silentmode i denne oppgaven vil omhandle fartøyets evne til å operere med minimal akustisk signatur. Silentmode benyttes i operasjoner med AU-krigføring der det er essensielt å begrense egenstøy. Silentoperasjoner defineres ved de hastigheter fartøyet opererer med best mulig hydroakustisk

støyforhold for å sikre en optimal hastighet for sonarsøk både med skrogmontert sonar og slepesonar. Dette vil for JM-kystvakt innebære å benytte de mest støysvake fremdriftskomponentene tilgjengelig. Systemet skal ha en dedikert plan for silentoperasjoner med hensyn til aspektene tatt frem i delkapittelet *2.1.1 hydroakustisk støy og signatur*. Kravpakken i oppgaven sier blant annet at silentoperasjoner skal kunne utføres i hastigheter opp til 18 knop og vil i klartekst si at fartøyet må ha støysvakt fremdriftsmaskineri dekker effektbehovet for JM-kystvakt opp til 18 knop.

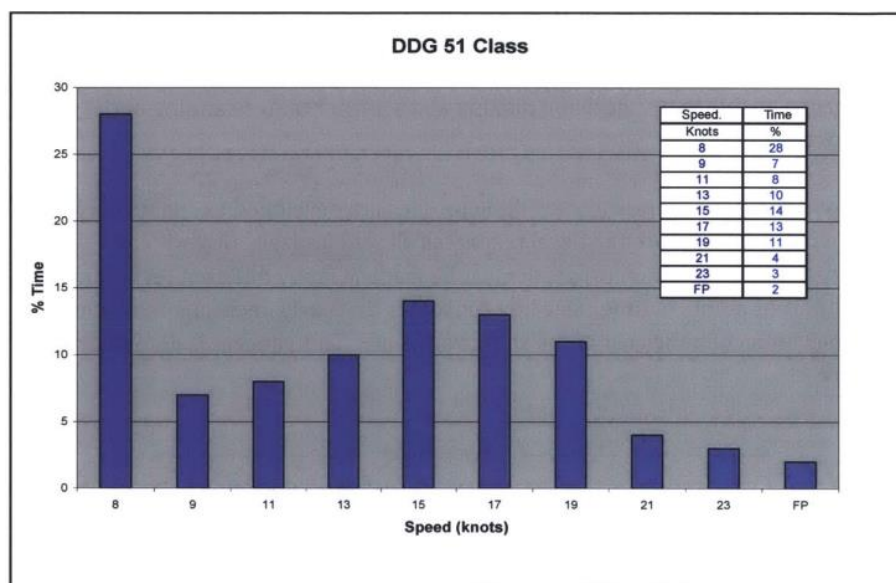
Operasjoner opp til 12 knop med slepesonar omhandler de operasjoner som er tiltenkt for utelukkende AU-krigføring og er essensielle for denne oppgaven. Det er med hensyn til et AU-fartøys primær oppgave at JM-kystvakt må besitte effektbehovet til en høyere slepeeffekt ved bruk av slepesonar opp til 12 knop.

Økonomisk cruisehastighet defineres med «Marsjfart er den hastigheten (...) et motorisert fremkomstmiddel holder over lange avstander.» (Nordbø, 2020). Kravpakken i denne oppgaven har definert økonomisk cruisehastighet, ofte kalt marsjfart på 24 knop. Marsjarten har ingen krav til akustisk signatur og tillater i den sammenheng alt tilgjengelig maskineri som kan opereres over lenger perioder. Videre vil økonomisk cruisehastighet kunne defineres ved maks hastighet innenfor motorens virkningsgrad. I klartekst skal JM-kystvakt kunne operere i 24 knops hastighet uten destruktiv virkning på fremdriftssystemet eller andre relevante komponenter. Hensikten med en høy topphastighet er taktisk forflytning til operasjonsområder på kortest mulig tid. Basert på *Tabell 1* anslås at den installerte effekten må være i størrelsesordenen 30-40 MW, avhengig av om konfigurasjonen er mekanisk eller elektrisk drevet. Det antas til tross for endringer i fremdriftslinjen at propulsjonsvirkningsgraden tilsvarende *Tabell 1*.

$V_s$ [knops]	$V_H$ [m/s]	$F_T$ [-]	$R_{TS}$ [kN]	$P_T$ [kW]	$C_{MT}$ [-]	Trim [deg]	Sinkage AP [m]	Sinkage FP [m]	$t$ [-]	$\eta_h$ [-]	$\eta_g$ [-]	$\eta_o$ [-]	$\eta_m$ [-]	$\eta_b$ [-]
6.00	0.736	0.086	34.72	107.2	124.42	-0.016	-0.018	-0.053						
7.00	0.859	0.101	55.26	199.0	106.42	-0.018	-0.019	-0.060						
8.00	0.982	0.115	75.69	311.5	101.48	-0.024	-0.022	-0.074	0.158	0.991	0.131	0.622	0.969	0.597
9.00	1.104	0.130	96.71	447.8	100.51	-0.035	-0.026	-0.103	0.184	0.991	0.130	0.624	0.937	0.580
10.00	1.227	0.144	120.84	621.6	99.31	-0.048	-0.031	-0.136	0.190	0.996	0.126	0.623	0.927	0.576
11.00	1.350	0.159	149.61	846.6	97.06	-0.059	-0.037	-0.165	0.183	1.006	0.125	0.620	0.934	0.582
12.00	1.472	0.173	177.46	1095.5	97.38	-0.071	-0.042	-0.196	0.178	1.012	0.125	0.618	0.939	0.587
13.00	1.595	0.187	198.93	1330.4	101.95	-0.088	-0.045	-0.238	0.173	1.017	0.123	0.617	0.943	0.591
14.00	1.718	0.202	219.78	1582.9	107.02	-0.109	-0.049	-0.287	0.168	1.022	0.121	0.618	0.947	0.598
15.00	1.840	0.216	247.88	1912.8	108.93	-0.130	-0.056	-0.339	0.169	1.027	0.122	0.621	0.946	0.603
16.00	1.963	0.231	284.30	2340.1	108.06	-0.151	-0.064	-0.393	0.172	1.030	0.123	0.623	0.944	0.606
17.00	2.086	0.245	329.62	2882.7	105.21	-0.173	-0.074	-0.451	0.180	1.031	0.123	0.625	0.934	0.602
18.00	2.208	0.259	392.72	3636.6	99.00	-0.189	-0.095	-0.506	0.184	1.031	0.122	0.627	0.929	0.601
19.00	2.331	0.274	461.27	4704.2	90.01	-0.190	-0.138	-0.551	0.176	1.033	0.121	0.630	0.938	0.610
20.00	2.454	0.288	583.32	6001.8	82.29	-0.183	-0.191	-0.590	0.164	1.033	0.119	0.632	0.949	0.620
21.00	2.576	0.303	682.85	7377.1	77.50	-0.179	-0.240	-0.631	0.153	1.033	0.114	0.633	0.957	0.625
22.00	2.699	0.317	776.76	8791.1	74.77	-0.187	-0.276	-0.682	0.155	1.030	0.112	0.634	0.951	0.621
23.00	2.822	0.331	871.38	10310.4	72.85	-0.209	-0.294	-0.751	0.168	1.026	0.112	0.635	0.937	0.611
24.00	2.945	0.346	1004.78	12405.7	68.79	-0.221	-0.332	-0.812						
25.00	3.067	0.360	1220.69	15699.4	61.44	-0.186	-0.430	-0.836						
26.00	3.190	0.375	1502.12	20091.7	54.01	-0.113	-0.581	-0.827						

**Tabell 1 Skrogkarakteristikk JM-kystvakt**

Operasjonsprofil defineres gjennom fartøyets normale eller tiltenkte oppgaver. Blant operasjonsprofilen har gjerne et underpunkt som omhandler tiden brukt i ulike hastighetsområder (Anderson, 2013). Operasjonsprofilen til norske fregatter er gradert informasjon og derfor utenfor denne oppgavens rekkevidde. I den sammenheng har vi benyttet oppgaven til Travis Anderson fra MIT som utgangspunkt i denne oppgavens operasjonsprofil. Anderson viser operasjonsmønsteret til *Arleigh Bruke klasse* destroyerne (DDG-51) til *US Navy* med hensyn til tid i ulike hastigheter. *Tabell 2* er direkte hentet ut av oppgaven til Anderson og viser histogrammet med tid i ulike hastighetsområder. Histogrammet viser at DDG-51 operer ¼ av tiden i lavere hastigheter (8 knop), men samtidig bruker også relativt mye tid i hastighetsområdene rundt 16 knop. For denne oppgaven vil det si at fremdriftsmaskineriet til JM-kystvakt må beherske hele hastighetsspekteret beskrevet i delkapittelet om hastigheter. Evnen til variasjonen i hastigheter vil også gjennom oppgavens lengde bli betegnet som fleksibilitet eller tilpasningsdyktighet.



**Tabell 2 Operasjonsprofil for DDG-51**

### 2.1.3 Overlevelsessevne og sårbarhet

I militær kontekst handler overlevelsessevne om evnen til å klare seg under krigsoperasjoner, altså om «motstandsdyktighet mot ødeleggelse» (NAOB, 2023). Fartøyets overlevelsessevne sier dermed noe om dets stridsevne, og i denne oppgaven vil vi ta for oss mulighetene for fremdrift til tross for påført defekt i enkeltkomponenter av fremdriftslinjen. I den forlengelse

vil vi beskrive fartøyets fremdriftsredundans, og løsninger som gir-arrangement og tilpasningsdyktighet er elementer som inngår i overlevelsessevnen.

Ettersom skipet er bygget etter sivile standarder er det ikke tatt samme hensyn til overlevelsessevne og sårbarhet. Skipet vil ikke kunne tåle treffere i samme grad som et fullverdig krigsskip. Dermed vil JM-kystvakt være svært sårbart dersom det skulle blitt detektert av fiendtlige kapabiliteter med evne og vilje til å påføre skade. Skrogstrukturen er vanskelig å tilpasse, og er dermed en svakhet i en situasjon hvor fiendtlige treffere finne sted.

Med tanke på evne til å fremdeles drive skipet selv med udyktige fremdriftskomponenter er det mulig å skape en redundans i skipet. Videre i oppgaven vil kravet for overlevelsessevne og sårbarhet være å tilrettelegge for at skipet skal kunne overleve og operere i situasjoner hvor komponenter faller ut.

## **2.2 Fremdriftsmotorer**

I dette delkapittelet presenteres tre ulike fremdriftsmotorer, henholdsvis dieselmotor, gassturbin og elektromotor. For å forsikre en helhetlig og troverdig sammenligning av aktuelle konfigurasjoner, må det dannes et grunnlag over hvordan de aktuelle fremdriftsmotorene fungerer og hvilke kvaliteter de tilfører. Hensikten med avsnittet er å gi en teoretisk bakgrunn med fordeler og ulemper for hvert av motorsystemene. Beskrivelsen av motorer vil fungere som en innledning og beslutningsgrunnlag for alternativanalysen.

### **2.2.1 Dieselmotor**

Dieselmotorer utgjør et veletablert motoralternativ innenfor maritim næring, med betydelig tilgjengelig kunnskap og et stort kommersielt marked for anskaffelse av slike motorer. Både i marinen og i sivil næring finnes det stor kunnskap innenfor området med dieselmotorer. Denne kunnskapen gir mulighet for enkel og rask implementering av nye fremdriftsmotorer grunnet personellens allerede eksisterende kjennskap til dieselsystemene.

Likevel har dieselmotoren noen utfordringer, og en betydelig begrensning er dens høye egenvekt i forhold til levert effekt. Med andre ord har dieselmotorer en lav spesifikk vekt, målt i kilowatt per kilogram (kW/kg), spesielt sammenlignet med alternative kraftkilder som gassturbiner.

Sammenlignet med dieselmotorer har gassturbiner en betydelig høyere spesifikk effekt, noe som betyr at de kan levere mer kraft per kg motor. Dette gir gassturbiner en fordel når det gjelder å oppnå høy ytelse med mindre vekt, noe som kan være avgjørende for spesifikke anvendelser, spesielt innen maritim sektor der vekt kan påvirke fartøyets ytelse, drivstoffeffektivitet og manøvrerbarhet (Woud & Stapersna, 2013, s. 132).

I tillegg har vi ut ifra begrensningene etablert at oppgaven vil benytte medium speed motorer. Hovedårsaken til dette er at high speed<sup>1</sup> motorene antas å produsere for lite effekt i forhold til effektbehovet til JM-kystvakt, i tillegg vil en motor ved høyere turtall også produsere mer uønsket vibrasjoner. I tillegg anses low speed<sup>2</sup> motorer å være for overdimensjonerte i forhold vekt og størrelse og dermed også uegnede for et fartøy i størrelsesordenen til JM-kystvakt. I den sammenheng ser vi det mest hensiktsmessig å benytte medium speed motorer grunnet et overveid kompromiss mellom ytelse, størrelse og vibrasjoner produsert.

Selv om dieselmotorer er utbredt og har en sterk posisjon i dagens skipsfart, er det viktig å anerkjenne og vurdere spesifikke begrensninger, som den lave spesifikke vekten, når man evaluerer hvilken kraftkilde som best passer for en AU-plattform og JM-kystvakt. Dette gjelder spesielt i sammenligning med fremdriftsmotorer som gassturbiner, som har en annen vektprestasjon og egner seg bedre i visse kontekster.

### **Forbruk**

Dieselmotoren har et lavt spesifikt drivstofforbruk over store deler av turtallsområdet, spesielt sammenlignet med gassturbiner. En diesel motor har et spesifikt forbruk på 170-210 g/kWh (Woud & Stapersna, 2013, s. 136). En liten andel av tilført energi i form av drivstoff går til varme og man oppnår gjerne en virkningsgrad på rundt 40-50%. Drivstoffbeholdningen kan holde lenger og dermed øke handlingsfriheten.

### **Kostnad**

Kostnadene til en motortype varierer stort, alt fra vedlikehold, personell, reservedeler og innkjøp. For oppgavens del anses det som mest hensiktsmessig å legge fokus på kostnader knyttet til innkjøp og vedlikehold.

---

<sup>1</sup> High speed motorer: 1000-3500 rpm

<sup>2</sup> Medium speed motorer: 300-1000 rpm (Woud & Stapersna, 2013, s. 136)

I forhold til eksempelvis gassturbiner er det noe rimeligere å anskaffe dieselmotorer. En viktig faktor er at kunnskapen om dieselmotorer er mer utbredt, og dermed enklere og potensielt rimeligere å anskaffe personell med evne til å vedlikeholde dieselmotorer.

Reservedeler til dieselmotorer er lettere å anskaffe. Store deler av skipsfarten på verdensbasis dieselmotorer som fremdriftsmaskineri. Deler er derfor masseprodusert i en større skala og derfor også prisene lavere.

### **Vedlikehold**

Dieselmotorer er vel etablert, finnes mye kunnskap om og det er et stort kommersielt marked for anskaffelse av motorer. Blant fagutdannede innen motor og maskin er det som regel mye kunnskap om nettopp dieselmotorer. Sjøforsvaret i dag benytter for det meste dieselmotorer i sine fartøyer. Tidligere kunnskap blant personell i Sjøforsvaret kan potensielt bidra til effektivisering av nødvendige utsjekker for maskindetaljen om bord JM-kystvakt.

### **Tilpasningsdyktighet**

Spesielt i forhold til gassturbinen har dieselmotoren et bredere spekter med tanke på variasjon av turtall og dermed hvilke pådrag den kan gi. Dette gir en bedre fleksibilitet med tanke på hvordan man ønsker å kjøre motorene. Det må dog påpekes at ved generatordrift må dieselmotorer holde et fastere turtall for kontinuerlig levering av strøm. I den sammenheng er det viktig velge en dieselmotor som i samspill med generatoren kan driftes i sitt effektive virkeområde for å forlenge levetid og senke drivstoffkostnader.

Med tanke på drivstoffkvalitet har dieselmotorer en god evne til å kunne kjøres på mange forskjellige kvaliteter av drivstoff. I norske forhold er det stort sett god kvalitet på drivstoff, men dersom fartøyet skulle operere under situasjoner der den generelle drivstoffkvaliteten er redusert vil bunkringsmulighetene holdes åpen.

### **Støy**

På grunn av kontinuerlige eksplosjoner i motoren og krefter i mange retninger overføres store vibrasjoner fra dieselmotoren til skroget. For å redusere vibrasjonene kreves tilstrekkelig mengder opplagring.



## **2.2.2 Gassturbin**

Gassturbiner leverer svært høy effekt i forhold til vekt og volum på motor. Sammenlignet med dieselmotorer med tilsvarende maksimal ytelse, kan vekten til gassturbiner være ned mot 10% av vekten til dieselmotor (Woud & Stapersna, 2013, s. 140). Gassturbiner er avhengig av en stor luftinnstrømning for å drifte optimalt, og har et tomgangsturtall høyere enn dieselmotor.

Luftinntaket er stort, som krever en stor og åpen gang for lufttilførsel. I tillegg må det være en godt dimensjonert skorstein som kan ventilere avgassene ut fra maskinrom og skip.

### **Drivstoff**

Angående virkningsgraden til gassturbiner er den på omtrent 30-35%. Gassturbiner omsetter i forhold til dieselmotorer lite av drivstoffets energipotensial til mekanisk energi. Drift av gassturbin som drivmotor fører dermed til høyt drivstofforbruk, som kan føre til kortere operasjonstid og dermed mindre handlingsfrihet.

Dieselmotorer kan ofte driftes med diverse kvalitet på drivstoffet. Derimot krever gassturbiner ofte en høyere standard på drivstoffet for å drifte på en bærekraftig måte. For det første innsnevrer det noe hvor fleksible man kan være med tanke på grossist og særlig hvor man kan kjøpe drivstoff, men man må også påberegne seg mer vedlikehold og rutiner dersom man skulle ha drivstoff som ikke er av ønsket kvalitet. I tillegg kan dette kreve separate tanker dersom det finnes andre motorvarianter om bord.

### **Kostnad**

Kostnadene ved innkjøp kan variere ut ifra av nødvendig levert ytelse og produsent. Generelt sett har gassturbiner en høyere innkjøpspris enn dieselmotor i forhold til levert ytelse. I tillegg er reservedeler svært kostbart. Dog anses gassturbiner som svært pålitelige og har mange driftstimer før eventuelle feil.

### **Vedlikehold**

Som nevnt tidligere anses gassturbiner som svært pålitelige og veldrevne maskinerier dersom god drivstoffkvalitet og nok luft er tilført. Hyppigheten til eventuelle feil anses som lav, mye på grunn av at det er få bevegelige deler i gassturbinen.

Dersom det skulle forekomme feil ved drift av gassturbiner er det dog et avansert system som kan være komplisert å utbedre med kompetansen og utstyret i et marinefartøy. Praksisen i dag



på Skjold-klassen korvetter og FN-fregatter er at mannskapet generelt ikke får gjøre mye med gassturbiner, men at vedlikeholdet gjennomføres av FLO/FMA eller andre aktører på land.

## **Signatur**

Grunnet maskinens få bevegelige deler og lave vekt, samt at majoriteten av de største bevegelsene forekommer sentrifugalt, skaper dette lite hydroakustisk støy. Det oppstår vibrasjoner, men det krever relativt lite støydempende opplagring for å redusere støynivået til et tilfredsstillende nivå.

I motsetning til hydroakustisk signatur er IR-signaturen noe høyere. Ved en lavere virkningsgrad går mer av energipotensialet fra drivstoffet over i varme. IR-signatur gir utslag basert på varmen som oppstår, og generelt genererer gassturbiner mer varme enn f. eks dieselmotorer under tilsvarende operasjonsforhold.

### **2.2.3 Elektrisk**

Dieselektriske fremdriftssystemer fungerer ved at generatorer produserer strøm til elektromotorer som omgjør energien til dreiemoment på akslingen. Generatorsettene består av en dieselmotor eller en gassturbin som er koblet til en generatorpakke. Generatoren består av en rotor som roterer og en stator som står stille, sammen generer disse et magnetfelt som igjen produserer strøm. Generatoren kan levere effekt til en batteripakke eller direkte til de elektriske motorene. Type elektromotorer kan variere med kraftbehovet eller ved krav satt før konstruksjon av fartøyet og kan være:

#### **Synkrone elektromotorer**

Synkrone elektromotorer har vært et førstevalg for større marine fremdriftssystemer ettersom det kun har vært synkronmotoren som kunnet levere nok effekt (Hansheinrich & Bernhardt , 2009). Synkronmotoren består av en stator som får spenning fra en ekstern spenningskilde og en rotor som roterer av de magnetiske kreftene fra statoren. I en synkronmotor blir rotoren satt i gang av en DC-spenning for å starte magnetfeltet i selve rotoren. Når magnetfeltet er satt i gang vil rotoren begynne å rotere som følge av magnetfeltet som blir påført av statoren. Rotoren og magnetfeltet fra stator vil følge hverandre synkront, derav navnet synkronmotoren.

Synkronmotoren passer bra til maskineri som skal holde fast hastighet. Ettersom motoren fungerer proporsjonalt med frekvensen inn til motoren. Dersom frekvensen inn til motoren er stabil vil synkronmotoren også holde stabil fart (Sivertsen, 2019, s. 44).

Dersom behovet for dreiemomentet blir for stort vil rotoren få større motstand enn hva magnetfeltet klarer å rotere. Dersom dreiemomentet vil blir for stort vil synkroniseringen mellom rotoren og statoren falle ut og motoren vil ikke lenger klare å levere miste alt dreiemoment (Sivertsen, 2019, s. 48).

### **Induksjonsmotorer**

Induksjonsmotorer, ofte kalt asynkrone motorer har i nyere tider blitt aktuelle for større skip. Hangarskipet *Queen Elisabeth* bruker i dag en avansert induksjonsmotor som fremdriftsmotor (GE power conversion, 2022). Induksjonsmotoren er nokså likt bygd opp som en synkronmotor med en stator og rotor. Forskjellen mellom de forskjellige motortypene er rotorens virkemåte. I en induksjonsmotor er det staver av kobber og aluminium med jernlegeringer skaper magnetisme som gjør at rotoren begynner å rotere, i motsetning til i en synkronmotor der rotoren består av viklinger som blir spenningsatt med en DC-kilde. Grunnet at rotoren benytter seg kun av magnetisme fra elektromagnetisme til et magnetisk materiale vil ikke rotor og stator være synkrone. Det magnetiske feltet i statoren roterer proporsjonalt med frekvensen til vekselspanningen tilført, mens rotoren er avhengig at magnetfeltet passerer gjennom det magnetiske materialet. Det vil si at rotoren til enhver tid «henger etter» magnetfeltet til statoren og prøver å fange det igjen. Siden magnetfeltet ikke beveger seg synkront med rotoren kalles denne typen motor for asynkron eller oftere induksjonsmotor (Høyte, 2020).

Induksjonsmotoren er kjent for sin egenskap til å kunne regulere hastigheten på utgangsakslingen. Dette gjør den egnet til å drive maskineri som er avhengig av å justere hastigheten underveis i en operasjon (Sivertsen, 2019, s. 88).

### **Frekvensomformer**

Frekvensomformerer regulerer frekvensen inn til motor og dermed også motorens pådrag. Operasjonsprofilen beskrevet i *2.1.2 hastighet og operasjonsprofil* gir et bilde for en amerikansk destroyer og belyser viktigheten av å kunne regulere hastigheten i tråd med operasjonene. Elektromotorene gir mulighet til å nettopp kunne regulere hastighet ved hjelp av frekvensomformerer. Videre gjør frekvensomformerer det mulig å gjennomføre «softstart» av motorene. Altså at man sakte kjører opp motorene i turtall. Effekten av dette er å senke

startstrømmen som oppstår når man starter elektriske komponenter. Startstrømmen kan overbelaste strømnettet dersom momentanstrømmen er stor nok og av den grunn viktig å begrense frekvensomformerne (Sivertsen, 2019, s. 182).

### **Kostnad**

Et elektrisk fremdriftssystem krever en del systemer for å være operativt. Systemet trenger elektromotorene, styreskap, frekvensomformere og nødvendig kabling for å kunne operere på en hensiktsmessig måte. Dette er komponenter som er spesialisert og koster en del ved innkjøp. På samme måte kan reservedeler være dyrt ettersom sikkerhetskrav og materiellkrav er høye, dette medfører høyere kostnader enn ved mindre spesialisert utstyr. I gjengjeld er elektriske systemer meget driftssikkert og kan operere i lengre perioder noe som fører til at driftskostnadene reduseres. General Electric oppgir en MTBF (Mean time between failures) på sine induksjonsmotorer til henholdsvis på 12 år (GE power conversion, 2021) og viser hvor robust en moderne elektromotor kan være.

### **Vedlikehold**

En elektrisk motor har en relativt enkelt oppbygning med få bevegelige deler, noe som gjør vedlikehold lettere. Et elektrisk anlegg krever vesentlig mindre vedlikehold enn et mekanisk fremdriftssystem nettopp på grunn av få bevegelige deler, dermed også mindre slitedeler.

Det skal nevnes at det kreves spesialisert personell for å håndtere elektriske komponenter med høy spenning, og faren ved feilhåndtering kan være stor. Dette medfører at prosessen kan bli tidkrevende grunnet sikkerhetsfaktorene som må tas hensyn til.

### **Tilpasningsdyktighet**

Elektriske anlegg er tilpasningsdyktige grunnet deres egenskaper til å kunne regulere ytelse ved frekvensomforming. Ved høyere frekvens vil også elektromotoren øke turtall. Det er viktig å nevne at en elektromotor ikke kan fungere alene, men er avhengig av en ekstern strømkilde. For at den elektriske motoren kunne operere i et ønsket område er det viktig at generatorsettene som er installert kan levere tilstrekkelig med effekt. En elektrisk motor vil kunne operere i forskjellige turtallsområder med henholdsvis forskjellige momentkurver. Hvordan denne momentkurven ser ut avhenger av karakteristikkene til elektromotoren, samt det spesifikke turtallet elektromotoren opererer med.

### **Støy**

I denne oppgaven tar vi størst grad hensyn til det vibrasjonene en motor skaper. Elektromotoren opererer i en kontinuerlig prosess, altså i likhet med gassturbinen roterer elektromotoren kontinuerlig uten noen stopp. Elektromotoren fungerer gjennom et magnetfelt som kontinuerlig roterer akselen, uten start/stopp bevegelser. Dette medfører at elektromotoren skaper mindre vibrasjoner enn eksempelvis en dieselmotor.

Elektromotoren sin stille gange og store tilpasningsdyktighet er blant grunnene til at flere mariner velger nettopp elektrisk fremdriftsmaskineri for sine «multi purpose» og ASW fregatter. Mariner som *US Navy* med *Zumwalt Class* (GE power conversion, 2020), *Royal Navy* med Type-26 fregatten (Royal Navy, 2023) og FREMM-fregattene til italienske og franske marinen er eksempler på mariner som velger elektriske fremdriftssystemer (Fincantieri, 2023).

## 2.3 Valg av konsepter til utdypning – alternativanalyse

Basert på de utledete kravene satt ut ifra oppdragets behov skal det videre velges mellom to til fire konfigurasjoner som initialt anses som mest hensiktsmessig for videre utforskning. Utvelgelsen baserer seg på skjønnsmessige vurderinger ut ifra hvordan de forskjellige konseptene møter kravene.

Hensikten med en alternativanalyse er å tidlig kunne stadfeste de alternativer som ikke er aktuelt for JM-kystvakt som AU-fartøy. Videre skal alternativanalysen fungere som en innledning til avveiningsanalysen.

De viktigste kriterier for utvelgelse av konfigurasjon er signatur og ytelse for effektiv AU-krigføring, men også plass og kostnad for modifikasjonen. Ved de forskjellige konfigurasjonene skal det vurderes forskjellige kombinasjoner av henholdsvis dieselmotor, gassturbin og elektrisk fremdrift.

Ettersom 2.2 *Teori- Fremdriftsmotorer* har beskrevet maskineriene i detalj, vil dette delkapittelet gi en konsis oversikt over konfigurasjonene.

### 2.3.1 CODAD – Kombinert diesel og diesel

Konfigurasjon baserer seg på å drive fartøyet med en eller flere dieselmotorer samtidig. Dieselmotorene er koblet til et gir som igjen er koblet videre på akslingen. I klartekst vil dette si at man samkjører motorer på samme fremdriftslinje.

### **Ytelse**

Konfigurasjonen tillater forskjellige moder der en eller flere motorer kan gi fremdrift til hver propelleraksling. I tillegg kan dieselmotorene i seg selv gå på et lavt turtall i forhold til maksimal ytelse. Det kan dog skape noen komplikasjoner på grunn av nødvendig gir-arrangement.

Ettersom oppgaven har utelukket kryssgir vil sårbarheten øke for CODAD øke. Systemet mangler evnen til å drive begge propeller dersom motorene på den ene fremdriftslinjene faller ut.

### **Plass**

For å kunne levere nødvendig effekt er CODAD blant konfigurasjonene som behøver absolutt størst plass til selve maskineriene. I tillegg vil gir-arrangementet ta stor plass siden hver motor må turtall-justeres ned til det aktuelle på propellerakslingen.

### **Signatur**

Dieselmotorene i seg selv skaper mye støy og krever god opplagring. I tillegg vil nødvendige gir-arrangementer skape støy.

### **Kostnad**

Som beskrevet tidligere er dieselmotorer blant de billigere maskineriene både ved innkjøp og drift. En konfigurasjon utelukket bestående av dieselmotorer gjenspeiler dette.

## **2.3.2 CODOD – Kombinert diesel eller diesel**

Konfigurasjonen baserer seg på å drive fartøyet med dieselmotorer. I motsetning til CODAD kan det kun være en motor som er mekanisk tilkoblet hver propelleraksling om gangen, selv hvis det skulle være flere dieselmotorer installert.

Prinsipielt sett er dette en modifikasjon som ligner svært mye på CODAD, så videre i avsnittet skal forskjellene fremheves.

### **Ytelse**

CODOD har i forhold til CODAD noe mindre grad av kompleksitet, men også fleksibilitet med tanke på pådragsregulering, siden det kun kan kjøres en motor på hver propelleraksling om gangen.

### **2.3.3 CODAG – Kombinert diesel og gass**

CODAG er en konfigurasjon som er designet for å gi skip høy grad av fleksibilitet og effektivitet ved hjelp av en kombinasjon av dieselmotorer og gassturbiner. Dette systemet gir muligheten til å regulere hastigheter ut ifra et bredt operasjonsmønster.

#### **Ytelse**

Med tanke på ytelsesregulering er CODAG en hensiktsmessig konfigurasjon. Gassturbiner kan levere stor effekt, f. eks ved behov for høye hastigheter, imens dieselmotorer egner seg bedre enn gassturbiner til å operere ved lavere hastigheter på grunn av gassturbiners høyere tomgangsturtall.

CODAG krever sofistikerte gir-arrangementer for reduisering av turtall. Girene gir noe mekanisk tap og må fungere optimalt for å drive fartøyet. Likevel leverer systemet generelt med god mekanisk virkningsgrad, i hvert fall i forhold til elektriske og mekaniske tap i helt eller delvis elektriske konfigurasjoner.

For en modifikasjon uten kryssgir og to linjer er det likevel fare for overdimensjonering av spesielt gassturbinenes effektspotensial dersom man sammenligner med gassturbiner installert på fartøy i tilsvarende størrelsesorden

#### **Plass**

Gassturbiner og dieselmotorer er på hver sin ende av skalaen angående motorstørrelse, så totalt motorvolum avhenger av hvor mye av effekten som skal leveres av hver av motorene. Dog er det behov for struktur som kan håndtere motorenes luftinntak og avgass, som kan ta stor plass spesielt for gassturbin. Forskjellige gir-arrangementer for hvert fremdriftsmaskineri vil også kreve stor plass.

#### **Signatur**

Angående hydroakustisk signatur er CODAG en god konfigurasjon. Konfigurasjonen muliggjør tilpasning av leveringseffekt og dermed signatur. Det krever dog at motorene opplagres tilstrekkelig for å redusere vibrasjoner fra motorene ut til selve skroget.

Angående IR-signatur gir CODAG noe fleksibilitet med tanke på avgitt signatur. Dieselmotorer sin avgass blir ikke like varme som i en gassturbin.

#### **Kostnad**

Kostnadmessig er CODAG en kostbar konfigurasjon. Konfigurasjonen for forprosjektfasen krever innkjøp av minimum to gassturbiner og to dieselmotorer. I tillegg krever det sannsynligvis rekonstruering av skroget for å få inn motorene, sette inn gir og håndtere luftinntak og avgass.

Drivstoffkostnader avhenger av hvor mye av fremdriften som leveres av gassturbiner. Mer av den installerte effekten i gassturbiner vil medføre høyere drivstoffkostnader.

### **2.3.4 COGAG – Kombinert gass og gass**

Konfigurasjonen baserer seg på å drive fartøyet med en eller flere gassturbiner samtidig. Gassturbinene er mekanisk oppkoblet et gir arrangement som overfører kraft til propellerakslingen.

#### **Ytelse**

Konfigurasjonen tillater å tilpasse ytelse ved å regulere antall aktive turbiner. Derimot er gassturbinene i seg selv dårlig på å regulere ytelse, ettersom det kreves et relativt øøhyt tomgangsturtall. Gassturbinene har høy pålitelighet og behøver sjelden vedlikehold, men har behov for et kraftige reduksjonsgir ut fra turbinaksling.

#### **Plass**

Selve gassturbinene behøver svært liten plass og kan derfor passe godt inn i Jan Mayen-klassen. Dog kreves det mer struktur og plass for luftinntak og avgasshåndtering. Ikke minst vil eventuelle gir ta stor plass.

#### **Signatur**

Selve gassturbinene støyer lite og behøver mindre opplagring enn f. eks dieselmotorer. Derimot vil det oppstå støy i girene. I tillegg har gassturbiner som regel en høyere IR-signatur enn dieselmotorer.

#### **Kostnad**

Gassturbiner er de dyreste fremdriftsmaskineriene ved innkjøp, så denne anordningen kan bli svært kostbar. I tillegg må selve skroget modifiseres for å håndtere luftinntak og avgasser. Denne konfigurasjonen vil være sammen med COGOG den som forbruker mest drivstoff.

### **2.3.5 COGOG – Kombinert gass eller gass**

I likhet med COGAG baserer denne konfigurasjonen på drift av gassturbiner for å gi propulsjon. Forskjellen med COGOG er at kun en av gassturbinene er i drift samtidig per propelleraksling. Prinsipielt sett er dette en modifikasjon som ligner svært mye på COGAG, så videre i avsnittet skal forskjellene fremheves.

#### **Ytelse**

Grunnet tapt mulighet til å drive propellerakslingen med flere propeller, reduseres tilpasningsmuligheter i noen grad. Dersom det eksisterer flere gassturbiner på hver propelleraksling vil man også ikke kunne oppnå samme maksimal ytelse som ved COGAG. Dog vil det medføre noe mindre komplekstitet.

### **2.3.6 CODLAG – Kombinert diesel elektrisk og gass**

Konfigurasjonen baserer seg på å drive fartøyet med dieseldrevne elektromotorer, gassturbiner eller forskjellige kombinasjoner av disse. Dieselgeneratorer fungerer som primære effektleverdører, og de leverer elektrisk kraft til et strømmnett som distribuerer energi til elektromotorer tilkoblet propellerakslingene. Gassturbinene er nødt til å kobles på et reduksjonsgir før oppkobling på propellerakselen.

#### **Ytelse**

Fremdriftssystemet CODLAG har relativt høy effektleveranse i forhold til mange av de andre fremdriftssystemene. Samtidig kan CODLAG-systemet levere en fleksibilitet på lik linje med et dieselelektrisk fremdriftssystem. Ved å kombinere dieselelektrisk og gassturbiner kan CODLAG-systemet seile i lavere hastigheter ved å benytte det elektriske anlegget samtidig som det kan øke fartspotensialet ved å koble inn gassturbinene. CODLAG-systemet gir skipet mulighet til å operere i motorenes effektområde i store deler av tiden noe som gir muligheten til å regulere drivstofforbruket, samtidig som det innehar et høyt fartspotensial.

#### **Plass**

CODLAG-systemet tar relativt mye plass, ettersom det kreves to gassturbiner med sine gir, og mye hjelpesystemer for strømproduksjon. Gassturbinene og elektromotorene må være tilknyttet et gir-arrangement, men generatorsettene kan være fordelt hensiktsmessig i fartøyet. Samtidig krever CODLAG alle komponenter som er nødvendige for både elektrisk og gassturbin



fremdrift. CODLAG-systemet tilbyr god fleksibilitet, men må i gjengjeld kunne romme nok plass til alle nødvendige systemer.

### **Signatur**

Hydroakustisk støy generert av CODLAG-systemet vil være lavere enn en konvensjonell fremdriftsline slik som CODAD. CODLAG gir ut mindre hydroakustisk støy. Vibrasjoner kan reguleres ved opplagring av motorene og elektromotorene er et relativt stillegående system grunnet den kontinuerlige prosessen. Samtidig produserer en gassturbin relativt lite hydroakustisk støy. Elektromotoren og gassturbin er kontinuerlige prosesser der prosessen baserer seg på en kontinuerlig roterende aksel i motsetning til en start-stopp-prosess i en dieselmotor. Den kontinuerlige prosessen gjør at systemet produserer mindre vibrasjoner og også mindre hydroakustisk støy.

Forskjellen fra CODLAG til IEP er at CODLAG har behov for et gir-arrangement som vil produsere noe støy.

CODLAG-systemet har totalt sett muligheten til å regulere støy produsert ved hjelp av fleksibilitet av fremdriftsmotorer koblet inn. Samtidig må systemet benytte en form for gir-arrangement som igjen skaper støy.

### **Kostnad**

CODLAG er blant de mest kostbare fremdriftssystemene ettersom man kombinerer gassturbiner og diesel elektrisk fremdrift, hvorav begge er kostbare ved innkjøp. Gassturbinen er som nevnt i 2.4.2 er dyr ved innkjøp og har et høyt forbruk, men er pålitelig. IEP er som nevnt i 2.4.3 også dyrt ved innkjøp, men er igjen mer pålitelig.

Kostnaden til et CODLAG-systemet er altså dyrt ved innkjøp, men tilbyr i gjengjeld et pålitelig system med stor fleksibilitet med tanke på drivstofforbruk. Dette gjør at muligens driftskostnadene kan holdes nede.

### **2.3.7 IEP – Integreert elektrisk fremdriftsmaskineri**

Konfigurasjonen baserer seg på å drive fartøyet med en eller flere elektromotorer samtidig. Strømmen produseres og leveres til strømmettet av dieselgeneratorer, gassturbingeneratorer eller en kombinasjon av disse.

### **Ytelse**

Integrert elektrisk fremdriftsmaskineri vurderes best med tanke på fleksibilitet på grunn av en stor variasjon av tilgjengelige fremdriftsmotorer. Ettersom hver enkelt fremdriftsmotor fungerer som en strømkilde/generator og kan fases inn når effektbehovet økes. Fleksibiliteten med generatorer som forsyner elektromotorene gir muligheten til å effektivisere fremdriftssystemet slik at motorene opererer i optimal effektleveranse og kun hastighetsområder kan reguleres av motorer som er i drift. Ettersom systemet ikke er avhengig av aksler slik som eksempelvis CODAD kan et IEP-system drifte begge aksler på en motor dersom effektbehov for en gitt hastighet er dekket.

Konfigurasjonen IEP baserer seg på at elektromotorene driver akslene og generatorsettene produserer strøm til elektromotorene. Ved bruk av dette konfigurasjonen fungerer gjerne også generatorsettene også som kraftforsyning til resten av fartøyet og behovet for normale generatorsett.

### **Plass**

IEP krever en plass i fartøyet grunnet behovet for elektromotorer, generatorsett, styringsskap og strømtavler. I tillegg kommer kabling fra hver komponent ettersom konfigurasjonen baserer seg på elektrisk drift. Fordelen med IEP er at konfigurasjonen er mer tilpasningsdyktig med tanke på plassering av ulike komponenter. IEP baserer seg om nevnt på elektrisk drift og det er kun elektromotorene som er koblet til akslene. Generatorsettene behøver ikke å være i nærheten av elektromotorene så lenge kablene er tilgjengelige.

### **Signatur**

IEP har gode muligheter for å redusere hydroakustisk støy grunnet lite vibrasjon fra elektromotorene samt et bredt utvalg av generatorsett. Ettersom generatorene ofte er konvensjonelle drivstoffmotorer kreves god opplagring. Dersom fartøyet skal ha en silentmode er det mulighet for å ha dedikerte generatorsett med større vibrasjonsreduksjon eller motorer som generer mindre vibrasjoner i utgangspunktet. En gassturbin vil som nevnt tidligere i oppgaven generere mindre vibrasjoner enn en dieselmotor og kan være egnet til en silent konfigurasjon. I tillegg vil ikke IEP-systemet kreve noe giring dersom man velger en elektromotor med forenelig turtall med propellen og vil i dette tilfellet også fjerne støy fra et gir-arrangement.

Med bakgrunn i vibrasjoner vil IEP-systemet prestere godt med tanke på hydroakustisk signatur.

## **Kostnad**

Som nevnt i 2.4.3 *Elektrisk* vil en elektrisk løsning være kostbar med tanke på innkjøp ettersom elmotorene vil kreve en del hjelpesystemer for å fungere. I tillegg vil eventuelt innkjøp av fremdriftsmotorer også være relativt kostbart i forhold til de andre systemene.

Ved bruk vil derimot ikke IEP-systemet være urovekkende kostbart grunnet påliteligheten til systemene. En elektromotor er en relativt enkel prosess med lite bevelelige deler og derfor kreve mindre vedlikehold i forhold til en dieselmotor.

Et IEP-system vil muligens være en større kostnad ved innkjøp, men være mindre driftskostnader enn et konvensjonelt fremdriftssystem

### **2.3.8 Valg til avveiningsanalyse**

I denne delen av oppgaven vil vi ta for oss de aktuelle fremdriftssystemene beskrevet over, og vurdere hvorvidt disse vil kunne modifisere JM-kystvakt kystvakt for å benyttes til anti ubåt krigføring. På bakgrunn av de fire avgjørende faktorene signatur, plass, ytelse og kostnad, vil vi bestemme oss for to konsepter vi vil analysere i neste del av oppgaven.

I forbindelse med et fremdriftssystem handler faktoren signatur om i hvor store vibrasjoner selve systemet produserer. Hovedandelen av vibrasjonene som produseres kan i prinsippet ekskluderes ved tilstrekkelig opplagring, men vi anser det derimot hensiktsmessig å minimere risikoen for vibrasjoner for å enklere tilfredsstille krav om lav hydroakustisk signatur. Som et alternativ for undervannskrigføring er det viktigste kriteriet å tilfredsstille kravene for akustisk signatur og samtidig levere nødvendig kraft til propellerakselen.

Utfordringer knyttet til plass antas å være et av de mest vesentlige i forbindelse med nytt fremdriftsmaskineri i et skip, og i den forlengelse er det kritisk å velge komponenter med tilstrekkelig spesifikt volum ( $\text{kW}/\text{m}^3$ ). Videre kan det tolkes slik at volumet er kritisk for å kunne installere den nødvendige ytelsen for å imøtekomme kravet om hastighet. Løsninger som gir muligheten til å fordele fremdriftskomponenter utover fartøyet vil anses som høyst relevante grunnet et mindre konsentrert maskinrom og mer spillerom ved konstruksjon.

Ytelsen til fremdriftssystemet er kritisk for å imøtekomme hastighetskrav satt tidligere i oppgaven. I tillegg omhandler ytelsen effektiviteten til fartøyet over flere hastighetsområder, som vil redusere drivstoffkostnader samt redusere driftstid for fremdriftskomponentene. God

ytelse tilbyr også god fleksibilitet og anses av plangruppen som et viktig moment ved integrering av et nytt fremdriftssystem.

Kostnader tilknyttet innkjøp er viktig for realiseringen av konseptene og imøtekommelse av eventuelle kostnadsrammer er muligens det viktigste for oppgaven. Dersom fremdriftssystemet skal være et realistisk alternativ til forsvarets nye overflatestruktur må kostnadene relatert til innkjøp være slik at nasjonen Norge kan anskaffe fartøyet med de gitte kapabilitetene som er spesifisert. Dersom fartøyet blir for dyr antas realiseringsevnen svekket og dermed mindre realistisk.

I tillegg til innkjøp er også kostnader knyttet til drift av fartøyet. Reservedeler og kostnader knyttet til drivstofforbruk anses som viktige faktorer. Kostandene til reservedeler/vedlikehold og drivstofforbruk er faktorer som er knyttet til levetidskostnadene til fartøyet, i klartekst hvor mye det koster å drifte og eie fartøyet gjennom skipets levetid.

### **Drøfting.**

Som et supplement for AU-krigføring er det viktigste kriteriet å tilfredsstillere kravene for hydroakustisk signatur og samtidig levere nødvendig kraft til propellerakselen. IEP og CODLAG vurderes som mest hensiktsmessig basert på de gitte kravene for signatur, ytelse, plass og kostand.

Ved spørsmålet angående signatur vil enhver komponent sin egenproduserte vibrasjon være bestemmende. Fremdriftssystemene vil i stor grad være bundet av hva slags prosess de innehar. En konvensjonell dieselmotor vil grunnet sin tradisjonelle start-stopp prosess naturligvis produsere mer vibrasjoner enn en gassturbin eller elektromotor, begge med kontinuerlig prosesser. Dermed vil fremdriftssystemer som baserer seg på dieselmotorer være dårligere egnet når det kommer til hydroakustisk signatur.

Videre vil behovet for gir-arrangement ha en innvirkning på signaturen fartøyet produserer. Ved bruk av gir vil fremdriftssystemet avgi en grad av girstøy som kan virke som hydroakustisk støy. Girstøy produseres ved at tannhjulene går mot hverandre, og dermed vil fremdriftssystemene som baserer seg på et gir-arrangement produsere noe mer hydroakustisk støy enn et elektrisk basert fremdriftssystem.

Volumet og spesifikt volum ( $\text{KW}/\text{m}^3$ ) er nevnt tidligere i oppgaven som et kritisk moment for fremdriftssystemet. Evnen komponentene har til å produsere tilstrekkelig mengde effekt i forhold til volum opptatt er viktig for videre planlegging. Gassturbinene produserer mye effekt, samtidig som de har et godt spesifikt volum. På den andre siden kan gassturbinen være avhengig av et gir-arrangement for å kunne fungere på propellakslingen. Gir-arrangement er viktig å oppnå riktig turtall til propellen, men vil igjen oppta noe plass basert på konfigurasjonen til fremdriftssystemet. Gir-arrangementet gir lite tilpasning med tanke på fordeling av komponenter utover fartøyet, samt tar opp plass i maskinrom. Dersom man velger å benytte gassturbiner i en generatorpakke for et IEP-system vil ulempen med gir ikke være aktuelt. Elektriske system gir muligheten til å fordele komponenter i hele fartøyets lengde og bredde uten tanke på gir. På den andre siden er elektriske anlegg avhengig av en større andel tilleggskomponenter som tavler og frekvensomformere, men det vil også i gjengjeld være mulig å fordele rundt i fartøyet. Totalt ansees et elektrisk anlegg å være mest plasseffektivt, men systemene som benytter gassturbin vil også kunne være aktuelle.

Med hensyn til ytelse er muligheten til å effektivt kunne seile i flere hastighetsområder essensiell og muligheten til å nå gitte hastighetskrav kritiske. For å effektivt imøtekomme krav om hastigheter er det kritisk med nok effekt på minst mulig plass. Det tolkes dit at en gassturbin vil være et godt alternativ for en arealeffektiv kraftpakke. Ulempen med en gassturbin at effektiviteten kommer på et høyere turtallsområde der virkningsgraden er høy. Videre kan det tolkes slik at dieselmotoren har et større turtallsområde med høy virkningsgrad, men totalt sett en lavere effektleveranse. Dersom man velger å kombinere gassturbinen og dieselmotoren anser vi det dit hen at fremdriftssystemet vil oppnå god fleksibilitet. Derav muligheten til å benytte dieselmotoren ved lavere hastigheter og koble inn gassturbin for å oppnå høyere hastigheter.

Alle fremdriftssystemene inneholder kostbare elementer i form av gir, motor, turbin eller styringstavler, og i den forlengelse gjør spørsmålet om kostnader seg gjeldende. Spørsmålet om kostnader bunner i større grad ut over driftskostnader, altså hva det koster å drifte fartøyet. Gassturbiner inneholder større deler av edle metaller grunnet varmen som oppstår i drift, samt drivstofforbruket er meget høyt. En dieselmotor er billigere å anskaffe og kan i større grad regulere drivstofforbruket. Det vil derfor være hensiktsmessig med tanke på kostnader å kombinere gassturbin og dieselmotor for å bedre kunne regulere kostnader, samtidig som man opprettholder fartspotensialet til fartøyet. Spørsmålet om elektriske systemer vil være et mer kostbart system å kjøpe inn, men igjen vil det kunne gi en større fleksibilitet enn et system med

et gir-arrangement. Det antas derfor at på sikt vil elektriske systemer være hensiktsmessig med tanke på kostnader grunnet den høye påliteligheten, samt besparelser innenfor drivstoffkostnader.

En annen viktig faktor med tanke på ytelse og kostnad er motoralternativene tilgjengelig og hvilket hastighetsområde de er konstruert for. Operasjonsprofilen til *Arleigh Burke*-klassen viser et tydelig variert operasjonsmønster og vil av den grunn kreve et fremdriftssystem som er konstruert for varierende hastigheter. I den sammenheng kobles ytelse opp mot kostnad. Det tolkes slik hen at et fartøy med overdimensjonerte motorer vil oppnå et tilfredsstillende hastighetspotensiale, men vil i gjengjeld oppnå dårligere virkningsgrad på lave hastigheter. På motsatt side finner vi et underdimensjonerte motorer som vil operere med god virkningsgrad på lave hastigheter, men vil ikke oppå de høye hastighetsområdene fartøyet har behov for.

Fremdriftssystem som belager seg på dedikerte linjer, altså dedikerte motorer til en propell tolkes slik at de ikke vil oppnå en tilstrekkelig effektivitet over hele hastighetsområdet. En fremdriftskonfigurasjon med dedikerte linjer må kobles til et girsystem for å kombinere de forskjellige motoralternativene og i den sammenheng anses det som uhensiktsmessig å dedikere mer enn to motorer til hver propell grunnet plassbehov samt tilgjengelighet til girsystemet. Et fremdriftssystem med dedikerte linjer tolkes derfor slik at de vil oppleve for dårlig fleksibilitet for å kunne operere hensiktsmessig med tanke på drivstofforbruk eller hastighetspotensial. I den sammenheng foretrekkes et elektrisk system av den grunn av at de kan regulere ytelse med hastighetene pålagt og vil av den grunn kunne operere med lavere drivstoffkostnader.

En helhetsvurdering av kriteriene nevnt over fører til at oppgaven videre vil utforske mulighetene rundt IEP og CODLAG. Disse to konseptene vil være støymessig effektive grunnet evnen til å regulere kraftleveranse til ulike hastighetsområder, samt at de inneholder støysvake motoralternativer. I tillegg er de volum- og ytelsesmessig effektive med tanke på at begge konsepter innehar en kombinasjon av gassturbiner og dieselmotorer.

IEP og CODLAG har i tillegg elektrisk fremdrift noe som gjør de delvis eller fullstendig uavhengig av gir. Dette gir de mulighet til å fordele effektleverandører rundt om i fartøyet. Til slutt antas alle å være kosteffektive med tanke på kostnader under drift, i tillegg til pålitelig maskineri. På den andre siden antas elektriske system å være mer kostbare ved innkjøp samt mer komplekse med tanke på vedlikehold. Det vil være behov for spesialisert personell knyttet til vedlikehold, men ettersom JM-klasse kystvakt i dag opererer med elektrisk fremdrift anser

vi det som overkommelig med tanke på vedlikehold og drift. I tillegg er JM-kystvakt allerede tilpasset elektrisk fremdrift og vil av den grunn lettere modifiseres til ønsket elektrisk konfigurasjon. Videre analyse av konseptene vil bli gjennomført under avveiningsanalysen. I påfølgende kapittel vil vi foreta en avveiningsanalyse for å avgjøre hvilket fremdriftssystem som best mulig oppfyller kravene til en AU-fregatt.

## 2.4 Avveiningsanalyse

Alternativanalysen har kartlagt og vurdert fordeler og ulemper ved hver av konfigurasjonene. Basert på disse vurderingene er det besluttet å videre undersøke IEP og CODLAG i avveiningsanalysen.

I avveiningsanalysen vil det ses nøyere på effektbehovet til fartøyet, og undersøkes hvilke modeller på det kommersielle markedet i den gitte størrelsesordenen som kan brukes for å møte de gitte behovene. Samtidig må det tas stilling til hvordan disse maskinene fysisk passer inn i JM-kystvakt, og om det er nødvending med noe endring i skrogstruktur.

Hensikten i denne fasen er ikke å finne ut hvilke produkter man skal gå videre med, men heller gi et anslag på henholdsvis hvilke fremdriftssystem som er aktuelt for forprosjektfase. Avveiningsanalysen vil ta for seg momenter som vekt, volum og kostnad for motorer i ønsket størrelsesorden og til slutt konkludere med et konsept til videre arbeid.

Basert på verdier fra LMG Marine, skjønnsmessige vurderinger og veiledning, anslås det at det et maksimalt effektbehov. Avhengig av om fremdriftsmaskineriet er helmekanisk eller strømproduserende, er effektbehovet fra maskineriene i størrelsesordenen 30-40 MW. Verdien settes på bakgrunn av høyere hastighetskrav enn det som fartøyet i dag leverer, i tillegg til at det tiltenkte oppsettet for propellene vil redusere wake, og dermed også fremdriften. Dersom den reelle verdien avviker fra estimatet, vil det likevel danne et sammenligningsgrunnlag med tanke på kostnad, plass, vekt og drivstofforbruk. Til sammenligning har FN-fregatt en makshastighet på 27 knop med en levert effekt på 30,5 MW, men med omtrent halve deplasementet til JM-kystvakt (Forsvaret, u.d.).

### 2.4.1 Konsept 1 – IEP – Integrert Elektrisk Propulsjon

Konseptet dieselelektrisk fremdriftsmaskineri blir i dag benyttet i flere av verdens største mariner, henholdsvis *Royal Navy* og *US Navy*. Enten ved hjelp av dieselmotorer eller



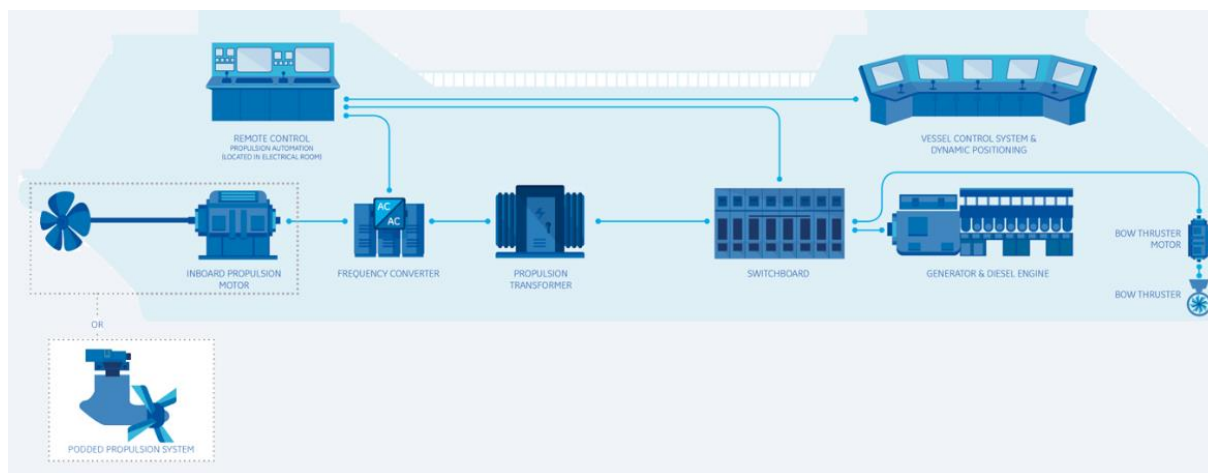
Modifisere Jan Mayen klasse kystvakt til standardklassefartøy med anti ubåt krigføring som primæroppgave av Larsen & Nerland 2023

gassturbiner som hoved effektleverandører. Hovedmotorene er koblet opp mot generatorer som igjen forsyner elektromotorer som driver aksel og propell. Dagens JM-kystvakt-konfigurasjon benytter seg av et IEP-system med konvensjonelle dieselmotorer som kraftleverandør.

I dette delkapittelet vil vi se nærmere på konvensjonelle dieselmotorer i kombinasjon av gassturbiner med elektrisk fremdrift. Nærmere sagt dieselgeneratorer og gassturbingeneratorer som drifter elektriske motorer.

Konseptfasen antar et effektbehov på 40 MW for IEP-systemet. Det høye effektbehovet for IEP skyldes at systemet også må forsyne fartøyet med elektrisitet og ikke bare fremdriften av fartøyet. Det er viktig å nevne at 40MW er medregnet mekanisk tap og antatt hotellast<sup>3</sup>, samt at forbrenningsmotorene opererer med en MCR på 85%. Dette er dermed ikke en fullstendig beregning og tar ikke hensyn til faktorer som at effekten til en gassturbin er høyest på 100%. Imidlertid vil ikke effektbehovet for elektromotorene være større enn 25MW. Dette eksempelet vil gi en grunnleggende forståelse for hvordan et IEP-system kan se ut og hvilke kapabiliteter systemet bringer.

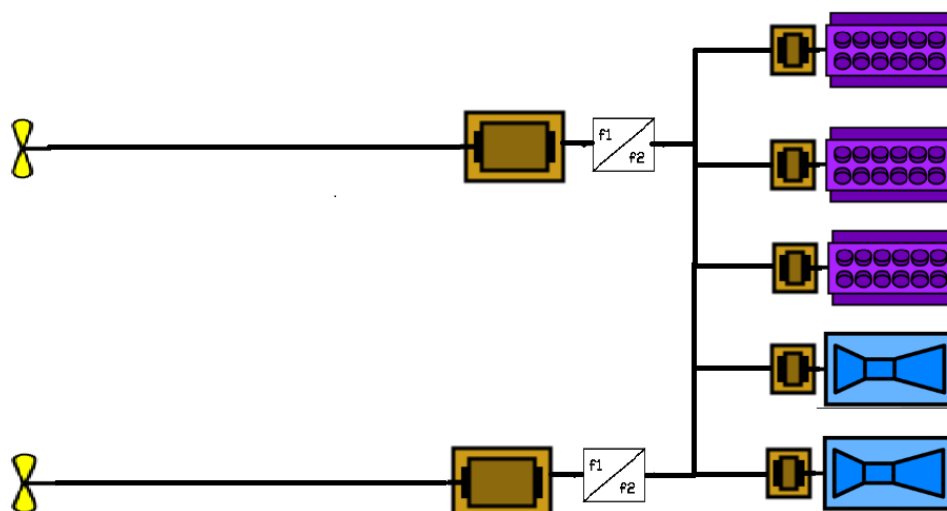
### Eksempel på oppsett



Figur 2 Utklipp fra GE Power Conversion

<sup>3</sup> Hotellast: Strøm som leveres til ikke-fremdriftsgivende forbrukere.





**Figur 3 Eksempel IEP-system**

Figur 2 viser alle system som er nødvendig for å operere et IEP-system og inneholder generatorsettet, styringsskap og tavler, transformator, frekvensomformer samt selve elektromotoren. Generatorsettet forsyner anlegget med strøm, tavlene fordeler strømmen videre ut i anlegget, transformatoren endrer spenningen fra generatorsettene til riktig spenning for elektromotorene, frekvensomformeren fungerer som hastighetsregulator for elektromotoren og elektromotoren fungerer som en kraftgenerator for propellen. De nevnte komponentene over vil i all hovedsak være oppbygning av et IEP-system og er i dag JM-kystvakt sitte hovedmaskineri.

Figur 3 viser et forenklet oppsett av et IEP-system og hvordan et eventuelt fremdriftssystem til JM-kystvakt kan se ut.

### **Opp mot effektmål**

For å nå det antatte effektkravet vil man trenge to sett med elektromotorer på henholdsvis 12,5MW hver. Dette kan enten gjøres ved to elektromotorer på 12,5 MW hver eller operere flere motorer i tandem. Ved et tandemoppsett vil linjen ha totalt fire elektromotorer hvorav det er to stykk elektromotorer på hver side, dermed i tandem.

Et eksempel på elektromotorer tilgjengelig er General Electric (GE) «compact induction motor». Dette er en motor som er spesiallaget til marinefartøy. Den skal anskaffes i 4-24 MW og er kompatibel med både gassturbiner og dieselmotorer som effektleverandører samt optimalisert for variable hastighetsregulering. Motorene kan fungere i tandem og er blant annet planlagt i den nye Type-26 – klasse britiske fregatter (GE power conversion, 2023).

Et annet alternativ også fra GE er deres «advanced induction motor». Denne motoren er vel utprøvd i en rekke mariner som blant annet *US Navy* med *Zumwalt class* destroyeren og *The Royal Navy* med *Daring class* destroyere. Motoren er på lik linje med compact induction motoren optimalisert for variable hastigheter og støysvak operering. Advanced induciton motorer leveres i motsetning compact induction motoren i større utgaver og er mer vanlig alternativ for fartøy i samme størrelsesorden som JM-kystvakt (GE power conversion, 2023).

Videre er det behov for generatorsett som tilpasses effektbehovet under ulike hastighetsområdene, henholdsvis 6 knop, 12 knop med slepesonar, 18 knop silent og 24 knop marsjfart.

Det finnes et stort antall forbrenningsmotorer som vil passe inn til effektbehovet til JM-kystvakt, men det kan være fornuftig å evaluere allerede kjente produsenter fra dagens mariner. En viktig faktor ved valg av fremdriftssystemer er driftstid og vedlikehold, og dersom det blir bestemt å videreføre allerede kjente motorprodusenter antar vi at personell vil ha mindre behov for opplæring av systemene. En fordel med et IEP-system er at størrelse av maskineri kan tilpasses hastighetsområder og det effektbehovet som medfølger. Videre kan som nevnt tidligere et IEP-system kunne operere med kun én generatorpakke og drifte begge aksler. Dette gir fleksibilitet i fremdriftssystemet ved at forbrenningsmotorene ikke er låst til en aksel og betyr i sin helhet at forbrenningsmotorene kan optimaliseres for det spesifikke effektbehovet til ulike hastighetsområder. I klartekst betyr dette at antall forbrenningsmotorer kan reduseres, men må i den sammenheng også øke i størrelse.

Hensikten med større og færre forbrenningsmotorer er at under operasjoner så kan fartøyet operere ved kun de motorene som er nødvendig for det gitte hastighetsområdet. Dersom det er rolig gange kan det eksempelvis være kun en dieselmotor som er i drift, dersom det er behov for medium hastigheter kan det eksempelvis være to dieselmotorer i drift og ved høye hastigheter være kun en gassturbin i drift. Dette muliggjør vedlikehold av forbrenningsmotorene som ikke er benyttet selv om fartøyet er under operasjoner. Hyppig vedlikehold kan bety høyere operativitet og tilgjengelighet for Marinen og anses å være essensielt for Sjøforsvarets evne til å utføre oppdrag.

## **Støy**

IEP-systemet kan ved riktig valg av motorer med tilstrekkelig opplagring operere med lav hydroakustisk signatur. Elektromotorene fra General Electric er et eksempel på spesialiserte

marine elektromotorer. De operer med lite vibrasjoner noe som er beskrevet i 2.1 *krav* og er en av hovedkildene til undervannstøy. GE sine motorer har innebygde støydempede komponenter samt patenterte støy- og vibrasjonsdempede egenskaper som gjør de egnet til støysvake marinefartøy (GE power conversion , 2023). GE sine motorer er eksempler på eksisterende elektromotorer som kan være egnet til JM-kystvakt.

Videre er det viktig å trekke frem faktoren ved opplagring av fremdriftsmotorene. Bruken av dieselmotorene gir fleksibilitet i form av et større effektivt arbeidsområde med tanke på turtallet, men skaper i gjengjeld en del vibrasjoner. Vibrasjonene som genereres av dieselmotoren forplanter seg som nevnt tidligere i strukturen til fartøyet, men kan motvirkes av sjokkabsorberende dempere. Disse demperne er gjerne laget av en type gummi som vil ta opp en del av vibrasjonene og videre dempe undervannstøyen. Videre har et IEP-system muligheten til å ta i bruk gassturbiner som generatorpakker som i en mindre grad vil generere vibrasjoner som nevnt tidligere. I tillegg bygges de fleste maritime gassturbiner inn i akustisk dempede kapsler med den hensikt å dempe den høy-tone lyden som en gassturbin generer (Rolls Royce, 2023). Resultatet av støyinnkapsling og lavere vibrasjon produsert gjør at gassturbinen kan lagres opp i mindre grad enn dieselmotoren, derfor også mer egnet for silent operasjoner.

### **Omfang av modifisering**

Som nevnt tidligere benytter JM-kystvakt i dag et alternativ til et IEP-system. Dette systemet består hovedsakelig av en senterpropell som er koblet til en aksling samt to selvstendige trøstere som har hver sin propell. Videre benytter fartøyet fire dieselgeneratorer til å produsere tilstrekkelig effekt for fremdriftssystemet og resten av fartøyet. Ved å integrere et system som beskrevet i avsnittet *opp mot effektmål* er det noen modifikasjoner vi anser som nødvendige. Først og fremst antar vi at luftinntaket må rekonstrueres for å dekke behovet for en gassturbin. Samtidig antar vi at noen strukturelle modifikasjoner må gjøres for å få plass til større motorer. Fordelen til et IEP-system er at JM-kystvakt allerede i dag er tilpasset et elektrisk fremdriftssystem. I klartekst vil dette bety at fartøyet har rom for tavler, styringsskap, frekvensomformere og elektromotorer ettersom fartøyet er konstruert rundt dette konseptet. I motsetning til de andre konseptene er IEP-systemet allerede integrert i JM-kystvakt og vil kreve mindre modifikasjoner.

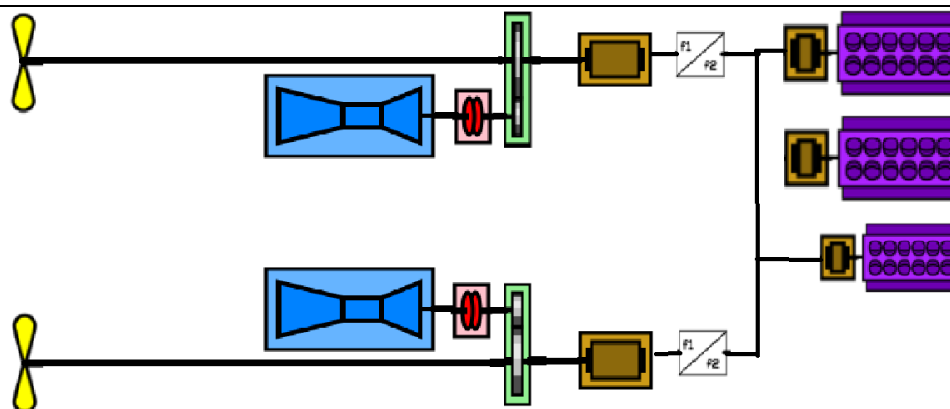
## 2.4.2 Konsept 2 - CODLAG – Kombinert diesel-elektrisk og gass

Dette delkapittelet vil ta for seg konseptet CODLAG og hvilke kapabiliteter dette konseptet innehar med hensyn til støy, hastighet, kostnader samt hvilke modifikasjoner som må utføres ved en eventuell integrasjon. Konseptet CODLAG baserer seg i stor grad på hybride maritime løsninger. Altså en sammenslåing av diesel elektriske systemer og konvensjonelle gassturbin-systemer.

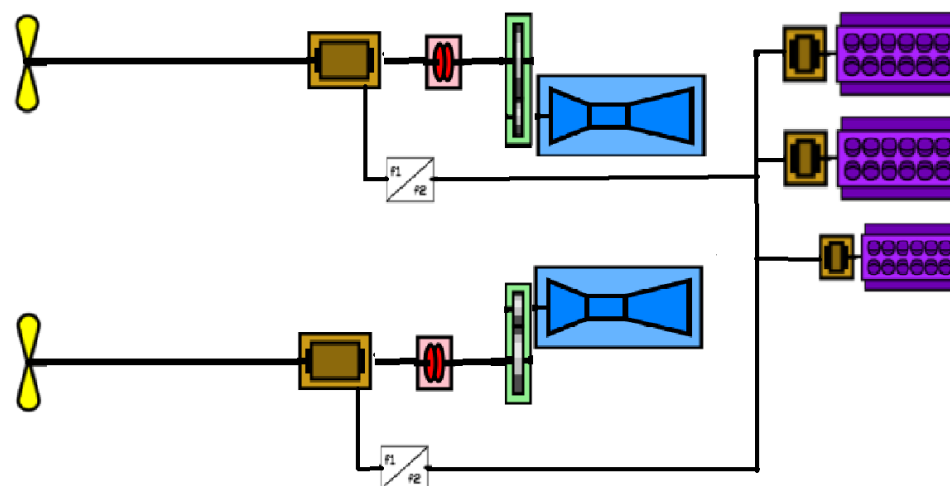
CODLAG-systemet er som nevnt tidligere benyttet i flere mariner på verdensbasis, hvorav *Bergamini* klasse fregatten fra den italienske marinen er basert på nettopp dette systemet. Fregatten har flere utgaver, men mest relevant til denne utgaven er anti ubåt utgaven. Den innehar én gassturbin som leverer 32MW samt to elektromotorer på 2,2 MW hver (Fincantieri, 2023). Skipet benytter de elektriske motorene for silent operasjoner og gassturbinen benyttes for operasjoner med høyere hastigheter (Riviera Newsletters, 2008). Konseptet til *Bergamini* fregattene er et samarbeid med den italienske og franske marinen og kalles for FREMM-konseptet (Fregata Europea Multi Missione) og har blitt solgt til flere mariner rundt om i verden. Nevneverdig er den nye *Constellation class* fregatten til *US Navy* og vil være i stor grad basert på FREMM konseptet med tilhørende CODLAG fremdriftssystem (Congressional research service, 2023).

CODLAG-systemet kan være realistisk for den norske marinen grunnet det allierte samarbeidet det kan medføre. Ved et eventuelt innkjøp av et CODLAG-system ser vi det hensiktsmessig med tanke på forsvarskommisjonens forslag til Stortinget i 2021, nemlig utvikle et neste generasjons overflatestruktur i samråd med en alliert partner. I tillegg vil det være enklere med reservedeler ettersom nettopp flere internasjonale mariner benytter CODLAG-systemet og vil være mulig å bytte deler og kunnskap bilateralt mellom samarbeidspartnere.

### Eksempel på oppsett



Figur 4 Eksempel 1 CODLAG-system



Figur 5 Eksempel 2 CODLAG-system benyttet av Type-26 fregatten til Royal Navy (Rolls Royce, 2022)

Figur 4 og 5 viser et eksempel av et CODLAG-system og hvordan det kan se ut i JM-kystvakt. I følge 2.1 krav skal fartøyet kunne holde en hastighet på 24 knop økonomisk cruisehastighet. I et CODLAG-system er den økonomiske cruisehastigheten beregnet til enten gassturbinene alene eller både gassturbin og det elektriske fremdriftssystemet. Det elektriske fremdriftssystemet er tiltenkt til silentoperasjoner hvor minimal akustisk signatur er essensielt. FREMM fregattene har en gassturbin som er koblet til et kryssgir som forsyner begge drivlinjer, men som nevnt tidligere i 1.2 Avgrensninger vil det ikke være hensiktsmessig i JM-kystvakt grunnet fartøyet bredde. Det vil derfor være nødvendig med to gassturbiner, én til hver fremdriftslinje. Dersom vi antar et effektbehov på 40 MW økonomisk cruisehastighet på 24

knop kan GE sin LM2500 være et relevant alternativ. LM2500 er allerede kjent i forsvaret gjennom FN-fregattene og har en effektleveranse på 22MW. Dette vil kunne drive fartøyet i 24 knop.

Videre krever silentoperasjoner hastigheter på opptil 18 knop og det antas et effektbehov på 9 MW for å tilfredsstille hastighet og akustisk signatur. Et eksempel på motorsystem som kan passe til denne effektkonfigurasjonen er Lloyd Dynamowerke (LDW) sin 4500KW induksjonsmotor. Ved installasjon av LDW sine elektromotorer vil man kunne nå effektbehovet på 9MW ved å benytte en elektromotor til hver fremdriftsaksel.

Videre er det behov for forbrenningsmotorer som i generatorpakker kan levere effektbehovet til fremdriftssystemet samt resten av fartøyet. I den sammenheng antar vi et effektbehov på 15MW for generatorpakkene. For å finne en passende løsning er igjen dieselmotorene til vil man kunne benytte eksempelvis deres L8A1 som er en 8 sylindret rekke 8. Motorene fra Bergen Engines (BE) produserer en reaktiv effekt på 4630 kW, og ved å benytte 3 stykk av disse motorene havner man på 13,9 MW. I tillegg anser vi det hensiktsmessig å installere en mindre motor som kan være hensiktsmessig ved lavere hastigheter eller ved gassturbindrift. Det er viktig å legge merke til at CODLAG-systemet ikke i utgangspunktet har dedikerte generatorsett til hotelldrif, det er da innlysende at under gassturbindrift må et generatorsett være i drift for å produsere strøm til resten av fartøyet.

## **Støy**

Med hensyn til silentoperasjoner vil CODLAG-systemet kun benytte det dieselektriske fremdriftssystemet (Riviera Newsletters, 2008) og i den sammenheng kun være tema for dette delkapitlet. Det er viktig å merke seg at det dieselektriske systemet i stor grad er identisk til et IEP-system, men tilkoblet et girsystem som eneste forskjell. Gir-arrangementet vil som nevnt tidligere i oppgaven produsere akustisk signatur grunnet metallet som roterer inntil hverandre.

## **Omfang av modifisering**

Ved omgjøring til et CODLAG fremdriftssystem er det essensielt å tenke på girsystemet og motorenes plassering rundt gir-arrangementet. Grunnet CODLAG-systemets behov for girsystem vil alle motorer som er direkte knyttet til propelldrift må orienteres slik at de kan kobles til girsystemet. Det gir mindre fleksibilitet i forhold til plassering av fremdriftskomponenter enn eksempelvis et IEP-system og kan i den sammenheng kreve større plass i spesifikke deler av skipet. Videre vil også selve plasseringen av girsystemet

sannsynligvis kreve noen modifikasjoner for å romme et girsystem til to fremdriftslinjer. Ettersom hele akterenden til JM-kystvakt må modifiseres for å kunne operere med to aksler er det vanskelig å si hvor mye modifikasjoner som skal til for å romme et girsystem.

## 2.5 Valg av konsept

Hensikten med valgprosessen er å finne ut av hvilket fremdriftssystem som vi anser som mest hensiktsmessig for JM-kystvakt basert på de kravene satt tidligere i konseptfasen. Valgprosessen for forprosjektfasen vil først beskrive kravene, og deretter drøfte fremdriftssystemene opp mot kravene og til slutt konkludere med hvilket fremdriftssystem oppgaven anser som mest hensiktsmessig for JM-klassen og undervannskrigføring.

### Hydroakustisk støy og signatur

Hydroakustisk støy og signatur er essensielt for et skips evne til å drive AU-krigføring, og er beskrevet av *US Navy* som «Unwanted noise can severely limit a ship's overall USW capability, both active and passive» (Federation of American Scientists, u.d.). Beskrevet i 2.1 *Krav* finnes det en rekke aspekter fra et skip som kan generere akustiske signaturer under vannoverflaten. Viktig for fremdriftssystemene er hvor mye vibrasjon de produserer ved de gitte hastighetene. Fartøyet må kunne gå opp til 18 knop med lite hydroakustisk signatur og støy, og er høyeste pålagte hastighet med krav om hydroakustisk støy.

Elektrisk fremdrift anses å være best egnet til undervannskrigføring grunnet systemets evne til å operere med de mest støysvake motoralternativene. IEP- og CODLAG-systemene lever dreiemoment til akslene ved elektromotordrift under alle eller deler av hastighetssonene. Som nevnt tidligere i oppgaven produserer elmotorene minimalt med vibrasjoner grunnet få bevegelige deler og kontinuerlig prosess. Den støysvake opereringen medfører at elektromotoren blir brukt av en rekke mariner for nettopp AU-krigføring, enten i form av et IEP-system eller et CODLAG-system.

Forbrenningsmotorene anses i motsetning til elektromotorene til å være de største støyproduzentene om bord i fartøyet grunnet vibrasjonene som blir produsert under drift. Begge konfigurasjonene presentert er avhengig av forbrenningsmotorer som en del av fremdriftssystemet, noe som gjør at behov for opplagring, giring og utplassering av motorene til være avgjørende for den hydroakustiske støyen produsert. IEP-systemet har ikke behov for giring og kan dermed utelukke girstøy, i tillegg har systemet mulighet til å fordele motorene

utover fartøyets lengde og bredde. I den sammenheng kan forbrenningsmotorene plasseres der faren for den hydroakustiske støyutsendelsen er lavest, eventuelt der fartøyet har systemer for å motvirke den hydroakustiske støyen. Mye av de samme argumentene gjelder for CODLAG-systemet ettersom systemet i silentoperasjoner vil belage seg primært på elektrisk fremdrift. Det elektriske systemet vil kunne operere på kun det nødvendige fremdriftsmaskineriet for å holde hastigheten påkrevd, i klartekst betyr dette at systemene vil kunne minimere hydroakustisk støy ved å drifte færrest mulig forbrenningsmotorer. CODLAG-systemet kan i motsetning til IEP-systemet være avhengig av et girsystem som vil til en viss grad øke støyproduksjonen. På den andre siden kan CODLAG-systemet ved lignende oppsett til *Type-26* fregatten til *Royal Navy* unngå girsystemet under elektrisk drift og vil teoretisk sett operere på samme måte som et IEP-system. I tillegg er det viktig å nevne at girsystemet vil generere en mer høyfrekvent lydbølge som vil skape mindre hydroakustisk signatur sammenlignet med en lavfrekvent lydbølge produsert av eksempelvis en dieselmotor og dermed anses som mindre skadelig for den totale signaturen generert av fartøyet.

Hydroakustisk signatur anses som en essensiell faktor for modifiseringen av JM-kystvakt og kritisk for å selvstendig drive AU-krigføring eller som et supplement forsvarrets eksisterende AU-kapabiliteter. Samtidig skal denne oppgaven utforske hvorvidt JM-kystvakt kan modifiseres for å forsterke sine egenskaper innenfor undervannskrigføring. Begge fremdriftssystemer baserer seg som nevnt mot elektrisk fremdrift og av den grunn har relativt få forskjeller innenfor hydroakustisk signatur, både i form av vibrasjoner og EMI.

### **Hastighet og operasjonsprofil**

Kravene innenfor hastighet og operasjonsprofil er satt grunnet behovet for varierte hastigheter samt topphastigheter egnet til et marinefartøy. I den sammenheng har vi satt kravet om maks kontinuerlig cruisehastighet til 24 knop, silentoperasjoner opp til 18 knop og slepesonar opp til 12 knop, i tillegg har vi identifisert gjennom operasjonsprofilen til den amerikanske destroyerklassen *Arleigh Burke* at både sakte og middels hastighetsområder også er essensielle for et krigsskip med varierte oppgaver. Det tolkes slik at et fremtidig standardklassefartøy vil benyttes til å utføre en rekke forskjellige oppgaver i tillegg til sin spesialiserte oppgave, og en operasjonsprofil lik *Arleigh Burke* vil være hensiktsmessig å konstruere ut fra. Det vil av den grunn bli viktig i valg av konsept at fremdriftssystemet innehar stor fleksibilitet.



Både CODLAG- og IEP-systemene operer med elektriske fremdriftsmotorer og er som nevnt tidligere fleksible med tanke på variasjon i hastigheter. Grunnet det elektriske systemet kan CODLAG- og IEP-systemene fase inn flere generatorer ved økning i effektbehov eller fase ut ved lavere effektbehov. Dette betyr at generatorene kan skaleres i til ønskede hastighetsområder og i den sammenheng øke fleksibiliteten til fartøyet. Totalt sett er CODLAG og IEP nokså like når det kommer til hastighetsregulering og topphastighet, eneste klare forskjellen er virkemåten de benytter for å oppnå cruisehastighet på 24 knop. CODLAG-systemet benytter direkte mekanisk drift av gassturbiner, mens IEP-systemet benytter gassturbiner i generatordrift for å oppnå nok effekt til å drive fartøyet opp i 24 knop. Grunnet CODLAG-systemets doble gassturbinkonfigurasjon vil det med hensyn til drivstofforbruk være vesentlig mer kostbart å operere fartøyet i 24 knops cruisehastighet, samtidig mer kostbart å investere i fartøyet. Med hensyn til hastigheter er det lite som skiller CODLAG- og IEP-systemene, men ved fleksibilitet innenfor drivstofforbruk vil CODLAG-systemet være mindre fleksibelt.

### **Overlevelsessevne**

Overlevelsessevne er en faktor som betyr mye for et fremdriftssystem i den forstand at systemet er operasjonelt selv i skadet eller nedsatt tilstand. Videre vil et fremdriftssystem være avhengig av god redundans både i militær og sivil setting.

Det elektriske systemet i både CODLAG og IEP anses som et nokså redundant grunnet en rekke generatorsett som er uavhengig av fremdriftslinjene, altså ikke direkte effektleverandører til en spesifikk propellaksling, men kan derimot levere effekt til begge aksler. Dersom det forekommer en defekt på en av generatorsettene kan fortsatt de andre generatorsettene overta, fartøyet vil dog få en lavere topphastighet, men fortsatt opprettholde fremdrift. I tillegg oppgir blant annet GE at deres elektromotorer opererer med «multi-phase windings» (GE power conversion , 2023), som vil si at elektromotoren kan operere selv om en av fasene er skadet. Dette tilbyr en større redundans ettersom kabling eller motoren selv kan ta skade og fortsatt fungere, men med redusert kapasitet.

CODLAG-systemet kan på den ene siden betraktes som mer redundant enn IEP-systemet grunnet systemets gir-arrangement. Gir-arrangementet gir fleksibilitet ved at fartøyet kan driftes på mekanisk drift, elektrisk drift eller begge kombinert, men også ved at fartøyet kan drifte selv om elektromotoren er defekt. Dersom en slik situasjon oppstår, vil gassturbinen ved hjelp av girsystemet kunne overta fremdriften til av fartøyet uten elektromotoren. Det samme

gjelder dersom gassturbinen får en defekt, elektromotoren vil kunne ta over og fartøyet vil fortsatt ha fremdrift.

På den andre siden kan girsystemet senke overlevelsessevnen for CODLAG-systemet. Girsystemet kan virke som et sårbarhetspunkt ettersom all effekt fra elektromotoren vil gå gjennom giret og ved en defekt vil fartøyet miste fremdrift.

I motsetning til CODLAG-systemet benytter ikke IEP-systemet et gir-arrangement, men belager seg kun på elektrisk fremdrift. GE oppgir sine motorer med en teoretisk MTBF (mean time between failures) på 12 år (GE power conversion, 2021), noe som gir en høy pålitelighet samtidig som multi-phase vindingene gir en god overlevelsessevne ved skade. I tillegg nevner oppgaven i *2.4.1 konsept 1-IEP* muligheten for å sette motorer i tandem, hvorav vil gi en ekstra redundans ved doble sett med motorer på hver side av fartøyet. Effekten av tandemmotorer anses blant annet å gi fartøyet en høyere overlevelsessevne.

I tillegg er det viktig å nevne at oppsettet vist i *figur 5* (eksempel 2 av CODLAG) vist i *2.4.3 konsept 3 CODLAG* hvor systemet vil være mindre eksponert for svikt av girsystemet ettersom de elektriske motorene fungerer uavhengig av girsystemet. Denne type oppsett vil kunne operere elmotorene uavhengig av girsystemet, samtidig kunne drifte på rent mekanisk med gassturbinen. Dette oppsettet vil totalt sett minimere sårbarhetspunktet til girsystemet, samtidig som det innehar alle fordelene et IEP-system har med hensyn til overlevelsessevne.

Totalt sett anses begge fremdriftssystemer å være gode kandidater innenfor området overlevelsessevne. Begge systemene innehar gode muligheter for redundanser, samt gode overlevelsessevner innenfor defekter på deler av hovedmaskineriet. Det skal likevel nevnes at CODLAG-systemet kan ha en fordel ved å kombinere girsystem og elektromotorer i hver sin uavhengige konfigurasjon og anses derfor å være best egnet innen overlevelsessevne.

### **Realiseringsevne**

Temaet realiseringsevne er ikke beskrevet i *2.1 krav* men er likevel er viktig tema for modifisering av JM-kystvakt. Realiseringsevnen omhandler modifiseringene som er nødvendig for å kunne integrere et nytt fremdriftsmaskineri i JM-kystvakt samt hvorvidt systemet er egnet for JM-kystvakt. Dette delkapittelet vil diskutere kompleksiteten for modifisering til et nytt fremdriftssystem i JM-kystvakt ved konfigurasjonene IEP og CODLAG.

Felles for begge konfigurasjoner er at utviklere og produsenter av JM-kystvakt er kjent med dieselgeneratorer, ettersom dagens løsning består av dette. Som nevnt tidligere er målet å få en kosteffektiv løsning. Begge systemene komplekse og dyre konfigurasjoner som krever en betraktelig mengde hjelpesystemer for å fungere. Systemenes kompleksitet kommer av behovet for en rekke hjelpesystemer som kan bety flere feilkilder, samtidig en betraktelig kostnad ved innkjøp.

CODLAG-systemet kan være hensiktsmessig med tanke på bilateralt samarbeid med allierte, men også som et kapabelt fremdriftssystem til AU-krigføring. Men med kravet om to separate fremdriftslinjer vil to gassturbiner øke kostnadene betraktelig. Sett opp mot lignende gassturbiner på andre AU-fartøy i samme størrelsesordenen som JM-kystvakt, vil disse gassturbinene føre til en kraftig overdimensjonering av anlegget. Ikke minst vil dette kreve svært stor plass.

IEP er mindre utbredt blant AU-fregatter i forhold til CODLAG. I tillegg er det større mekaniske og elektriske tap. Kravet om to fremdriftslinjer oppfylles i motsetning til CODLAG-systemet bedre med IEP-systemet. Det behøves kun en riktig dimensjonert gassturbin som ikke kobles direkte på akslingen, men produserer strøm til et felles strømmett. Man får en ekstra dimensjon i fleksibilitet ettersom ingen av generatorene må kobles mekanisk direkte på propellerakslingene.

## **Konklusjon**

Basert på avveiningsanalysen for hydroakustisk signatur, hastighet, overlevelsessevne og realiseringsevne vurderes IEP som den mest hensiktsmessige konseptet til videre arbeid. Systemene har en rekke felles faktorer, hvorav begge systemer danner en fleksibilitet med dieselgeneratorer og inneholder en form for drift gjennom gassturbiner. På bakgrunn av delkapittelet om realiseringsevne vil gassturbinoppsettet i et CODLAG-system by på utfordringer med tanke på overdimensjonering. Ettersom CODLAG-systemet belager seg på direkte mekanisk gassturbindrift for å oppnå cruisehastighet. I den sammenheng vil systemet kreve to gassturbiner og vil i den sammenheng få en stor overflødig effektleveranse i forhold til kravet om cruisehastighet på 24 knop. I tillegg anser vi det som kostbart og plasskrevende med to gassturbiner i størrelsesordenen tilgjengelig i tillegg til kostnadene knyttet til resten av systemet. Med bakgrunn i CODLAG systemets manglende fleksibilitet samt manglende kompatibilitet blir IEP-systemet et naturlig valg.

Samtidig anser vi IEP-systemet både kapabelt med tanke på hydroakustisk støy og med tanke på integrasjon i JM-kystvakts allerede etablerte plattform. IEP-systemet tilbyr i tillegg god fleksibilitet gjennom muligheten til å operere med god virkningsgrad i hele hastighetsområdet. Dette vil gjøre systemet kosteffektivt med tanke på drivstofforbruk og god pålitelighet vil gjøre feilraten mindre, men kostnadene ved innkjøp anses i motsetning som kostbare. IEP-systemet krever en del hjelpesystemer som nevnt tidligere i oppgaven, samtidig vil kompleksiteten til systemet gjøre større vedlikehold mer kostbart. På tross av høye kostnader anser vi IEP som det beste alternativet for JM-kystvakt for å kunne operere med lav hydroakustisk signatur og vil av den grunn være videre tema i forprosjektfasen.

### 3 Forprosjektfasen

I forprosjektfasen skal IEP-systemet videreutvikles for å utarbeide et beslutningsunderlag for realiseringen av JM-kystvakt. Beslutningsunderlaget skal ligge til grunn for videre beslutninger for videreutvikling og gjennomføring av prosjektet. (FMA, u.d.).

Forprosjektfasen vil spesifisere tekniske detaljer fra den konseptuelle fasen ut ifra muligheter, begrensninger og behov. På bakgrunn av bacheloroppgavens størrelse og kriteria om å kun behandle ugradert informasjon vil forprosjektfasen utvikles ved å sammenligne ugradert informasjon.

#### 3.1 Konklusjon fra konseptfase

Konseptfasen konkluderte med en anbefaling om å videreutvikle konfigurasjonen «Integrert Elektrisk Propulsjon» som fremdriftssystem. Valget baserer seg hovedsakelig på kravet lavest mulig hydroakustisk signatur for AU-fartøy for å effektivt kunne gjennomføre anti-ubåtoperasjoner. I tillegg gjelder krav til stor fleksibilitet med tanke på regulering av effektproduksjon, hastighet og ikke minst fleksibilitet i oppsettet av generatorer.

#### 3.2 Innledende krav og behov

Ettersom oppgaven baserer seg på ugradert informasjon, vil fokuset være å skape «best mulig» forutsetninger for å minimere hydroakustisk støy. Målet er å tilrettelegge for korrektive metoder for støyreduisering. I forprosjektfasen vil kravene og behovene basere seg på hva som må til for å løse antiubåtoperasjoner.

Fartøyet skal kunne effektivt detektere ubåter.	
<u>Fartøyet må være i stand til å gi lavest mulig støynivå.</u>	Propellene, propellenes opplagring og propellenes posisjon i forhold til skipet må være optimalt, og med minimum 2 meter klaring fra skrog til propellertupp.  Rorene må designes og plasseres på hensiktsmessig vis.

	Generatorer og motorer må opplagres hensiktsmessig.
<u>Fartøyet må være i stand til å oppnå hastigheter egnet for en AU-fregatt</u>	Fartøyet må ha toppfart opp mot 24 knops hastighet.  Fartøyet må være i stand til å operere i silent tilstand opp til 18 knops hastighet.  Fartøyet må være i stand til å operere i silent med slepesonar med til 12 knops hastighet.
<u>Fartøyet skal kunne seile i gitte hastigheter over lengre tid.</u>	Oppgaven vil utarbeide operasjonstid ut ifra bunkringskapasitet og effektbehov.
Kostnader	
<u>Modifikasjonen skal være kosteffektiv</u>	Innkjøp, installering og fartøys-modifikasjoner må holde seg innen en prisramme som gjør modifiseringen til et kosteffektivt alternativ.

**Tabell 3 Oppsett for krav**

### 3.3 Utredelse av design

Ved utredelse av design vil oppgaven på detaljnivå velge oppsett og komponenter ut ifra hva som er hensiktsmessig. Underveis vil det bli utført nødvendige beregninger for å kartlegge og fastslå detaljene over prosjektet. For beregning av hastighet og effekt anvendes informasjon levert direkte fra LMG, for å gi et tydelig bilde på hva som er nødvendig for å møte gitte krav.

Vitale hovedkomponenter for fremdrift og manøvreringsevne er (1) generatorsett med støydempende opplagring, (2) frekvensomformer, (3) elektromotorer, (4) akselarrangement med trøstlager, (5) propellere og (6) ror. Akselarrangement og ror vil ikke vil utledes i detalj, men heller omhandle enkle skisser og forklaringer.

### 3.3.1 Effektbehov

For å oppnå ønskede hastigheter behøves generatorsett og elektromotorer som kan levere effekt i gitte størrelsesordener. Etersom konseptet består av elektromotorer og ikke et rent mekanisk system, må installasjonen ta hensyn til at generatorsettet også skal levere hotellast til fartøyet. Dieselmotorer og gassturbiner vil bli installert og driftet som generatorer. Ved dimensjonering av generatorsettet og elektromotorer er det essensielt å skille på nødvendig installert effekt<sup>4</sup> og nødvendig leveringseffekt<sup>5</sup>.

#### Vurderinger

Ved beregninger av effektbehovet tas flere faktorer i betraktning for å optimalisere beregningene. Sjømarginen vurderes til 15% for å tilrettelegge for stor nok effektkapasitet ved varierende sjøgang i sea state 3. Ifølge MAN energy solutions settes normalt en sjømargin på 15% initialt for å kompensere for effektbehovet ved mer motstand fra sjøen (MAN Energy Solution, 2018).

Det tilrettelegges for en MCR på 85% for å forsikre bærekraftig og optimal drift av generatorene.

Verdiene for elektrisk og mekanisk tap vurderes ut ifra veiledning, og skal betrakte tap i energioverførende komponenter før effekten overføres til propellene.

Hotellast og reservekapasitet tas i betraktning for å effektivt kunne drifte andre systemer som sensorer og belysning, samt sikre fremtidig vekst av anlegget. JM-kystvakt per 2023 ikke utrustet med store kapabiliteter innen AU-krigføring som en typisk<sup>6</sup> AU-fregatt, men ved eventuell installering av slike kapabiliteter i senere tid vurderes det som nødvendig å tilrettelegge for en økning i effektbehov. Oppgaven har i den sammenheng tilrettelagt for en hotellast på 3MW for å kunne imøtekomme effektbehov for nødvendige sensorer.

---

<sup>4</sup> Installert effekt: Forbrenningsmotorenes leveringskapasitet.

<sup>5</sup> Leveringseffekt: Elektromotorenes leveringskapasitet til propellerakslinger.

<sup>6</sup> Typiske AU-fregatter: Nansen-klassen fregatter (NOR) og FREMM-klasse fregatter (ITA)

WMO Sea State Code	Wave height	Characteristics
0	0 metres (0 ft)	Calm (glassy)
1	0 to 0.1 metres (0.0 to 3.9 in)	Calm (rippled)
2	0.1 to 0.5 metres (3.9 in to 1 ft 7.7 in)	Smooth (wavelets)
3	0.5 to 1.25 metres (1 ft 8 in to 4 ft 1 in)	Slight
4	1.25 to 2.5 metres (4 ft 1 in to 8 ft 2 in)	Moderate
5	2.5 to 4 metres (8 ft 2 in to 13 ft 1 in)	Rough
6	4 to 6 metres (13 to 20 ft)	Very rough
7	6 to 9 metres (20 to 30 ft)	High
8	9 to 14 metres (30 to 46 ft)	Very high
9	Over 14 metres (46 ft)	Phenomenal

**Tabell 4 Sea states-skala**

Effektbehov regnes ut ifra (1) verdier i «Tabell 2», (2) 85% MCR, (3) sjømargin på 15%, (4) 3% mekanisk tap, (5) 10% elektrisk tap, (6) antatt hotellast på 3000 kW og (7) reservekapasitet på 2000 kW. Fra tabellen brukes skipets hastighet  $V_S$ , slepeeffekt  $P_E$  og propulsjonsvirkningsgrad  $\eta_D$ . Tabellen viser resultater fra slepeforsøk gjennomført med JM-kystvakt med modifisert akterende. Detaljer om beregningene er beskrevet i Vedlegg A.

$V_S$ [knots]	$V_R$ [m/s]	$F_R$ [-]	$R_{TS}$ [kN]	$P_E$ [kW]	$C_{DR}$ [-]	Trim [deg]	Sinkage AP [m]	Sinkage FP [m]	$t$ [-]	$\eta_R$ [-]	$w_s$ [-]	$\eta_o$ [-]	$\eta_H$ [-]	$\eta_D$ [-]
6.00	0.736	0.086	34.72	107.2	124.42	-0.016	-0.018	-0.053						
7.00	0.859	0.101	55.26	199.0	106.42	-0.018	-0.019	-0.060						
8.00	0.982	0.115	75.69	311.5	101.48	-0.024	-0.022	-0.074	0.158	0.991	0.131	0.622	0.969	0.597
9.00	1.104	0.130	96.71	447.8	100.51	-0.035	-0.026	-0.103	0.184	0.991	0.130	0.624	0.937	0.580
10.00	1.227	0.144	120.84	621.6	99.31	-0.048	-0.031	-0.136	0.190	0.998	0.126	0.623	0.927	0.576
11.00	1.350	0.159	149.61	846.6	97.06	-0.059	-0.037	-0.165	0.183	1.006	0.125	0.620	0.934	0.582
12.00	1.472	0.173	177.46	1095.5	97.38	-0.071	-0.042	-0.196	0.178	1.012	0.125	0.618	0.939	0.587
13.00	1.595	0.187	198.93	1330.4	101.95	-0.088	-0.045	-0.238	0.173	1.017	0.123	0.617	0.943	0.591
14.00	1.718	0.202	219.78	1582.9	107.02	-0.109	-0.049	-0.287	0.168	1.022	0.121	0.618	0.947	0.598
15.00	1.840	0.216	247.88	1912.8	108.93	-0.130	-0.056	-0.339	0.169	1.027	0.122	0.621	0.946	0.603
16.00	1.963	0.231	284.30	2340.1	108.06	-0.151	-0.064	-0.393	0.172	1.030	0.123	0.623	0.944	0.606
17.00	2.086	0.245	329.62	2882.7	105.21	-0.173	-0.074	-0.451	0.180	1.031	0.123	0.625	0.934	0.602
18.00	2.208	0.259	392.72	3636.6	99.00	-0.189	-0.095	-0.506	0.184	1.031	0.122	0.627	0.929	0.601
19.00	2.331	0.274	481.27	4704.2	90.01	-0.190	-0.138	-0.551	0.176	1.033	0.121	0.630	0.938	0.610
20.00	2.454	0.288	583.32	6001.8	82.29	-0.183	-0.191	-0.590	0.164	1.033	0.119	0.632	0.949	0.620
21.00	2.576	0.303	682.85	7377.1	77.50	-0.179	-0.240	-0.631	0.153	1.033	0.114	0.633	0.957	0.625
22.00	2.699	0.317	776.76	8791.1	74.77	-0.187	-0.276	-0.682	0.155	1.030	0.112	0.634	0.951	0.621
23.00	2.822	0.331	871.38	10310.4	72.85	-0.209	-0.294	-0.751	0.168	1.026	0.112	0.635	0.937	0.611
24.00	2.945	0.346	1004.78	12405.7	68.79	-0.221	-0.332	-0.812						
25.00	3.067	0.360	1220.69	15699.4	61.44	-0.186	-0.430	-0.836						
26.00	3.190	0.375	1502.12	20091.7	54.01	-0.113	-0.581	-0.827						

**Tabell 5 Skrogkarakteristikk for JM-kystvakt**

### Standard uten slep

For å nå den målsatte topphastigheten på 24 knop<sup>7</sup> behøves en maksimal installert effekt i størrelsesordenen 40 MW. For elektromotorer behøves en samlet leveringseffekt i

<sup>7</sup>  $\eta_D$  antas til 0,6 for 24 knop



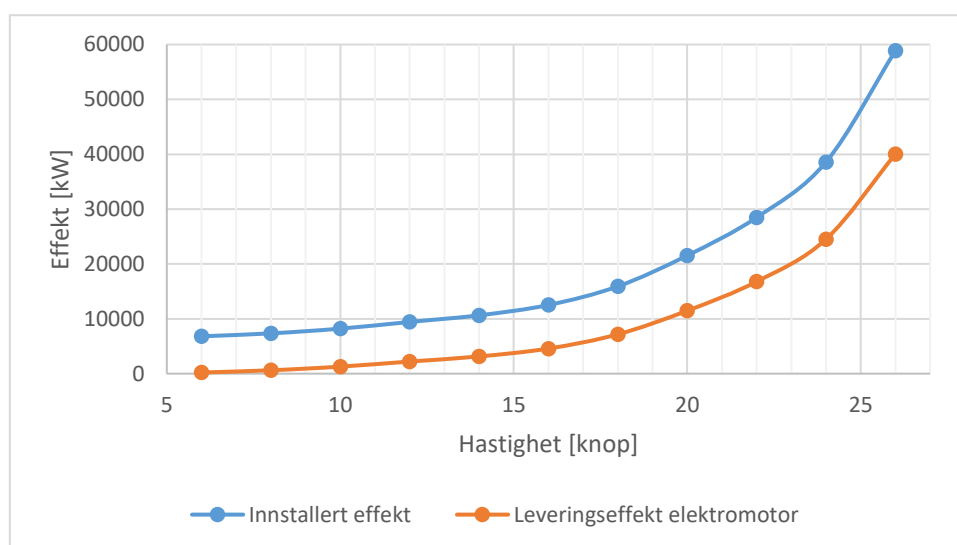
Modifisere Jan Mayen klasse kystvakt til standardklassefartøy med anti ubåt krigføring som primæroppgave av Larsen & Nerland 2023

størrelsesordenen 25 MW. Tilstand uten slepsonar ute med 24 knops hastighet antas som kondisjonen hvor produksjonskravet til generatorene og leveringseffekten til elektromotorene er på sitt største. For beregning av effektbehov har følgende fremgangsmetode blitt brukt.

$$P_{elmotor} = \frac{P_e}{\eta_D \cdot \eta_M \cdot Sjømargin}$$
$$P_{produisert} = \frac{P_{elmotor} + P_{max\ hotell}}{\eta_{el}} + P_{reserve}$$
$$P_{installert} = \frac{P_{produisert}}{MCR}$$

Nåværende generatorsett på JM-kystvakt har en installert effekt på 18 MW fordelt på fire generatorer, og modifikasjon krever dermed addisjonelle 22 MW i generatorkraft inninstallert.

For modifiseringen må det innstalleres kraftigere generatorsett og elektromotorer. Utbedringer gjøres enten ved å flytte nåværende elektromotorer å installere resterende, eller å anskaffe og installere et helt nytt sett med elektromotorer.

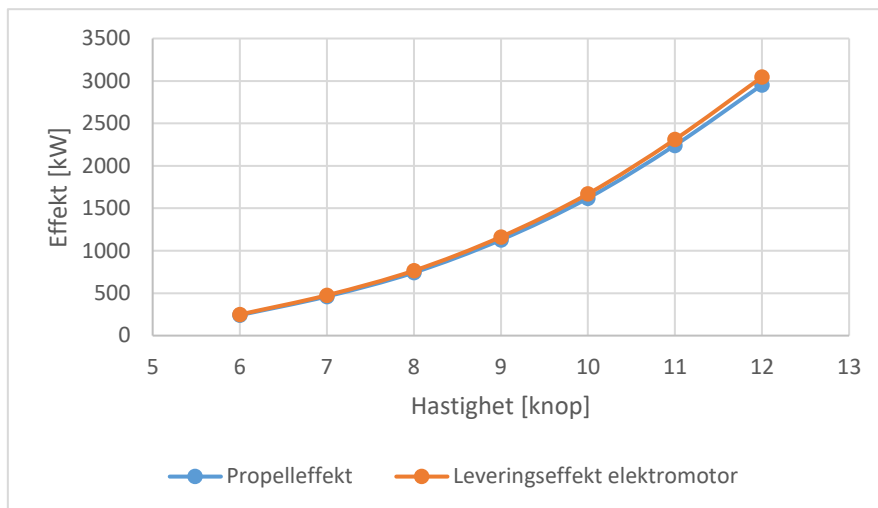


**Tabell 6 Effektbehov ved gitte hastigheter**

### Med slepesonar

Slepesonaren er en viktig kapabilitet for AU-krigføring som brukes for å skaffe et bedre undervannsbilde enn baugsonaren er i stand til. Operasjon av slepesonaren påfører dog høyere slepeeffekt og dårligere manøvreringsevne. For beregningene antas en økning i slepeeffekt. På

grunn av potensialet for kavitasjon over propellene og dermed potensialet for kavitasjon, er det viktigst å ta for seg hvilken propelleffekt som er nødvendig for å oppnå de forskjellige hastighetene. For å oppnå en hastighet på 12 knop med slepesonar kreves det 3MW effekt fra elektromotorene, men det imidlertid kreves en effekt på 10MW fra generatorsettene for å kunne drifte hele fartøyet.



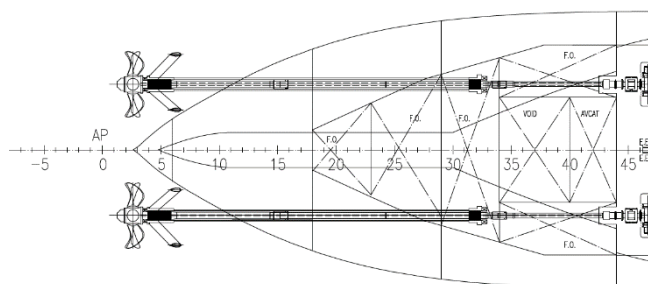
**Tabell 7 Effektbehov med slepesonar**

### 3.3.2 Fartøysmodifikasjoner

Ettersom modifiseringen fører til fravikelse fra den originale konstruksjonen til JM-kystvakt, må behov for modifikasjoner kartlegges og vurderes. Modifikasjoner av fartøyet kan være komplisert, kostbart og tidkrevende, men nødvendig for å kunne operere med ønsket operasjonsprofil. Valg av generatorsett og elektromotorer vil vurderes i større detalj, men potensiell endring i infrastruktur og overbygg vil drøftes overfladisk.

#### Akselledninger og trøstlager

Modifikasjonen innebærer endring av akselarrangementet for å drive to propellerakslinger, såkalt «twin screw». Ved å fjerne en propelleraksling langs senterlinjen for så å montere en på hver side av senterlinjen vil man øke klaringen mellom propellerakslingen og skrogoverflaten. Sett aktenfra, vil babord propellaksling rotere mot klokka og styrbord propellaksling rotere med klokka når propellene skal skyve skipet fremover.



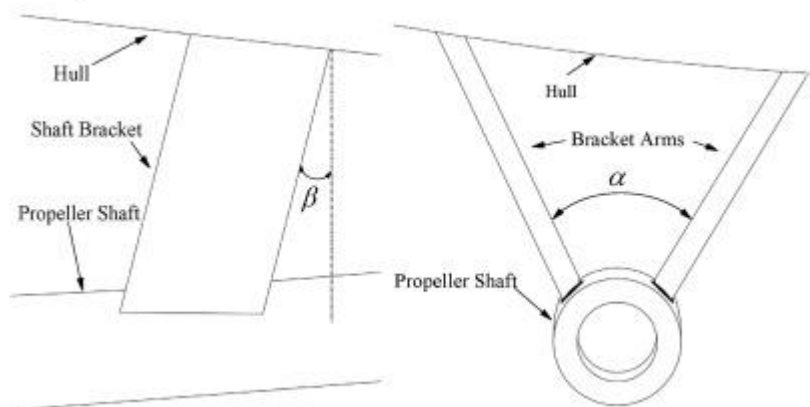
**Figur 6 Oppsett av propellerakslinger fra LMG Marin**

Disse tiltakene er for å redusere wake<sup>8</sup>. Redusert wake gir lavere skrogvirkningsgrad, men reduserer mengden hydroakustisk støy. Dog muliggjør sidestilte propellerakslinger også en større propellerdiameter for bedre propulsjonsvirkningsgrad (MAN Energy Solution, 2018, s. 24) og mindre støy. Optimalt sett bør det være en klaring på minimum to meter mellom tippene på propellene og skipet for å forsikre lav hydroakustisk signatur. Propellene vil dimensjoneres i henhold til dette.

For å oppnå den nødvendige klaringen mellom propeller og skrog må propellerakslingene gå langt nok ut fra skroget, noe som fører et høyere bøyemoment på akslingen. For å motvirke bøyemomentet bør det installeres V-braketter fra skroget ned til roten av propellene. Nøyaktig design av V-brakettene vil ikke videre utredes i oppgaven, men det er viktig å ha et forhold til at V-brakettene bryter opp vannstrømmen foran propellene og øker wake-faktoren (MAN Energy Solution, 2018), som igjen gir høyere signatur.

---

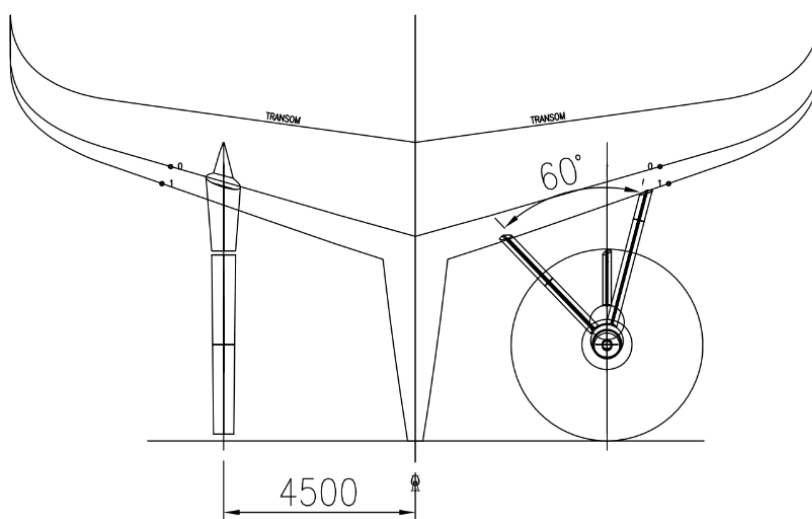
<sup>8</sup> Beskrives nøyere under 3.3.2 *fartøysmodifikasjoner - Propellere*



**Figur 7 Illustrasjon av V-braketter**

Med en samlet levert effekt på 25 MW behøver man elektromotorer som leverer 12,5 MW på hver fremdriftslinje. Lasten som oppstår i akselledningen som resultatet av det aksiale skyvet er for kraftig til å absorberes av elektromotorene. Dermed er det behov for et tilstrekkelig dimensjonert trøstlager.

### Propellere



**Figur 88 Eksempelskisse for rør- og propellerplassering**

Tidligere i konseptfasen beskrev oppgaven de forskjellige årsakene til hydroakustisk støy, hvorav en av årsakene var kavitasjonsstøy. I den sammenheng er det essensielt å se på propellens «cavitation inception speed» og hvilken virkning denne hastigheten har for skipets

Modifisere Jan Mayen klasse kystvakt til standardklassefartøy med anti ubåt krigføring som primæroppgave av Larsen & Nerland 2023

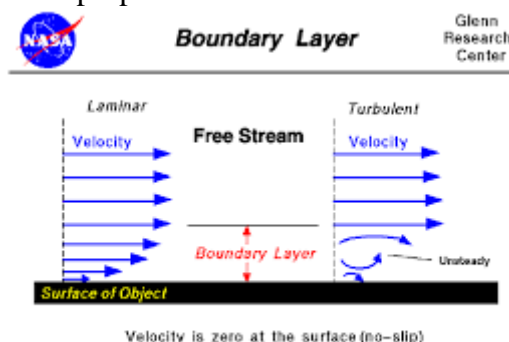
egenskaper. Cavitation inception speed defineres ved den hastigheten fartøyet må ha for at propellen begynner å kavitere (Kongsberg Maritime, 2023). Cavitation inception speed tar høyde for første kavitasjon som oppstår og er uavhengig av type kavitasjon. For fartøy som tilstreber lav hydroakustisk støy kreves en høyere cavitation inception speed, og for denne oppgaven må fartøyet ha en cavitation inception speed på minimum 18 knop grunnet kravet om silent hastighet opp til 18 knop.

De viktigste parameterne med tanke på kavitasjon og hvilken hastighet kavitasjonen oppstår er avstanden fra propell og aksel til skroget, skrogets utforming og den spesifikke lasten til propellen (Kongsberg Maritime, 2023). Skrogutformingen er essensiell for å grunnet forstyrrelsen av vannet som går inn til propellen og er beskrevet blant annet av wake koeffisienten. Denne koeffisienten er gitt ved:

$$W = \frac{V - V_A}{V}$$

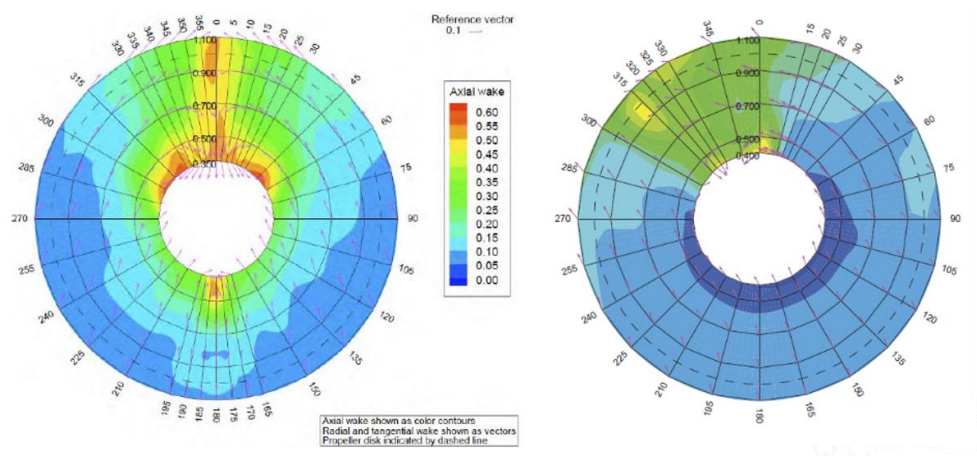
Hvorav  $V$  er skipets hastighet og  $V_A$  er vannets hastighet inn til propellen. Wake faktoren forteller hvor mye skroget påvirker vannet inn til propellen samt skrogets virkningsgrad. Grunnet friksjon mellom skroget og vannet vil vannet nærmest skroget få et «boundary layer», altså et lag med vann som binder seg til skroget. Vannet nærmest skroget vil ha skrogets hastighet i vannet, mens vannet utover vil ha en gradvis økning av hastighet relativt til skroget. Tykkelsen av dette laget vil øke desto lenger fra baugen av skipet man kommer, det vil si at tykkelsen av boundary laget er høyest bak ved propellen.

(MAN Energy Solution, 2018, s. 18). *Figur 10* viser data fra CFD tester utført av LMG marine fra dagens JM-klasse og viser tydelig en høyere wake koeffisient desto nærmere skroget vannet er. Dette skaper en ulineær strømning inn til propellen og skape et trykktap for propellen på punktene nærmest skroget, som igjen kan skape kavitasjon som beskrevet i 2.1.1 *hydroakustisk støy og signatur*. For å motvirke wakeeffektene kan man flytte propellene lenger ut fra skroget for å få propellen ut av sonen med mest wakeeffekt, dermed også bedre propellvirkningsgrad. Venstre bilde i *figur 8* viser wakeeffekten til dagens senterpropell til JM-kystvakt og hvordan



**Figur 99** Viser prinsippet med boundary layer og wake faktor

senterskegen<sup>9</sup> får en høy wakekoeffisient på grunn av av senterskegen er en del av skroget til JM-kystvakt. Ettersom senterskegen er en del av skroget til JM-kystvakt treffer prinsippet om større «boundary lag», desto lenger skipet er. Til sammenligning kan man se på det høyre bildet i figur 8 hvor wakeprofilen til en av trøsterne er simulert. Trøsterne er selvstendige «podder»<sup>10</sup> som stikker ut av skroget og grunnet trøsterens kortere struktur oppnås en lavere wake koeffisient. Ved å modifisere akterenden av skipet for å komplimentere akseledninger og støysvake propellere vil det være hensiktsmessig å gjøre plass for et V-oppsett slik som illustrert figur 8. V-oppsettet vil gi tilstrekkelig rom for propellene samt få propellene ut av boundary laget, effekten av dette vil være minst mulig forstyrrede strømminger samt mest mulig lineær hastighet inn til propellene. I tillegg vil det være hensiktsmessig at akterenden av skroget konstrueres slik at boundary laget minimeres i tilknytning til propellen. Essensen av disse tiltakene er å bedre propellens virkningsgrad for å kunne øke fartøyets cavitation inception speed.



**Figur 1010 Wakeprofil for sentrert (venstre) og sidestilt (høyre) propellaksling for JM-kystvakt**

## Ror

Nåværende konfigurasjon for JM-kystvakt består av ett ror plassert på linje med akselledningen rett aktenfor senterpropellen. Med to sidestilte propeller vil et sentrert ror gi svak

<sup>9</sup> Skeg: Senkekjøl

<sup>10</sup> Trøstere eller ofte kalt podder

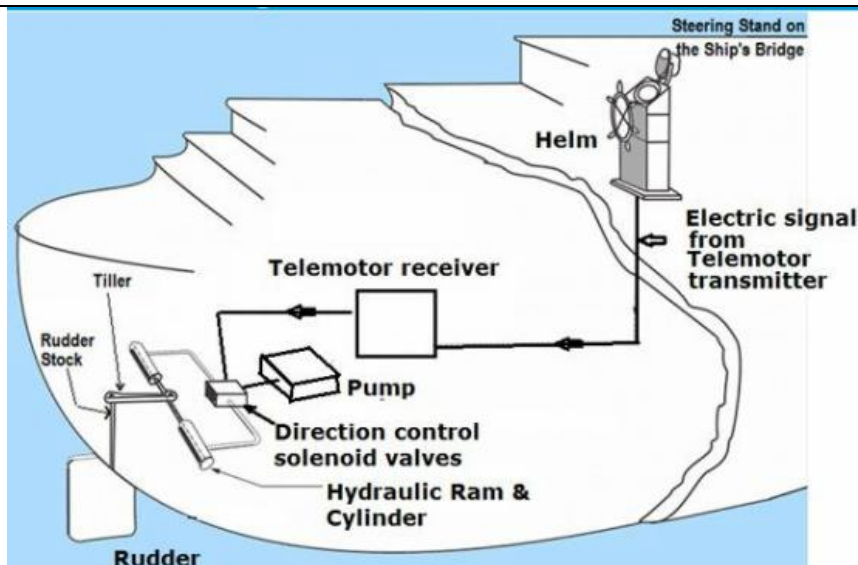
manøvreringsevne. For utbedring kreves det istedenfor ett ror for hver propell, plassert rett aktenfor propellene sett fra siden.

Ved en to-akselkonfigurasjon anser vi det hensiktsmessig å plassere rorene på linje med akselledningene. Årsaken er at dette vil føre til en jevnere gjennomstrømning og dermed mindre turbulens, som igjen reduserer kilder for hydroakustisk støy. Alternativet ville vært å plassere rorene noe inn mot senterlinjen, som gir andre manøvreringsegenskaper. Ettersom hydroakustisk støy er prioritert anses det første alternativet som det beste korrektive tiltaket.



**Figur 1111 Eksempel for tiltenkt plassering**

Tiltakene for ror anses som helt essensielt for å i det hele tatt anvende twin screw på en god måte. Endringen av ror-oppsettet vil en større modifikasjon av den indre strukturen (*figur 10*). For det første må nåværende modifikasjon for ror-plassering fjernes helt, og to nye må konstrueres. I tillegg må deler av det innvendige systemet med automatisering, pumper og hydraulikksystem bygges på nytt for hvert ror.



Figur 1212 Eksempeloppsett for ror-styring

### 3.3.3 Signatur

Grunnet gradert informasjon angående hydroakustikk velger oppgaven å se på hvilke faktorer som er essensielle for å oppnå et støysvakt skip. I den sammenheng vil oppgaven ta for seg *US Navy* sitt «ship silencing program» og hvilke tiltak de ser mest relevant. *US Navy* beskriver både årsaker og tiltak for hvordan bekjempe hydroakustisk støy i henholdsvis to kapitler. Årsakene er i denne oppgaven beskrevet i kapittelet om *hydroakustisk støy og signatur*, hvorav dette delkapittelet vil fungere som en løsning på utfordringene presentert i kapittelet *hydroakustisk støy og signatur*.

Dokumentet fra *US Navy* beskriver en rekke korrektive metoder for å forhindre hydroakustisk støyproduksjon fra et militært fartøy. Ifølge *US Navy* finnes det primært tre metoder for å kontrollere hydroakustisk støyproduksjon: tiltak for kontroll av støyprodusenter, vibrasjonsdempende opplagringer og fester samt tiltak for å kontrollere støyutstrålende deler av fartøyet (Federation of American Scientists, u.d.).

Tiltak for å forhindre støyprodusenter handler om å skifte ut støyproduserende maskineri med mer stillegående maskineri. Essensen av dette tiltaket er å være kritisk til installasjonen av systemer i fartøyet samt at hydroakustisk støy skal være et fokus under hele konstruksjonsprosessen. Dette tiltaket er selve essensen av denne oppgaven og grunnlaget for valg av IEP-systemet.



Det vil imidlertid ikke være mulig å kun velge støysvake alternativ, i den sammenheng vil det være mulig å benytte fleksible opplagring for å senke vibrasjonsnivåene i fartøyet. Fleksible opplagring er opplagring produsert i et elastisk materiale som vil absorbere store deler av vibrasjonene som oppstår. IEP-systemet vil benytte elektromotor, dieselgeneratorer og gassturbiner som hovedkraftkilder, som alle vil kreve en fleksibel opplagring. Gjennom samtaler med veiledere har vi fått oppgitt «normale» opplagring for hovedmotorer. En dieselmotor blir på bakgrunn av høyt vibrasjonsnivå lagret opp dobbelt. I klartekst fleksible fester fra skroget og til en ramme, deretter nye fleksible fester som er festet fra rammen til motoren selv. Gassturbinen og elektromotoren vil i mindre grad produsere vibrasjoner og i den sammenheng kun lagres opp direkte fra skrog til motor med fleksible fester. Fleksible fester vil også benyttes for sjokk-resistens, men grunnet oppgavens tema vil ikke dette forklares videre.

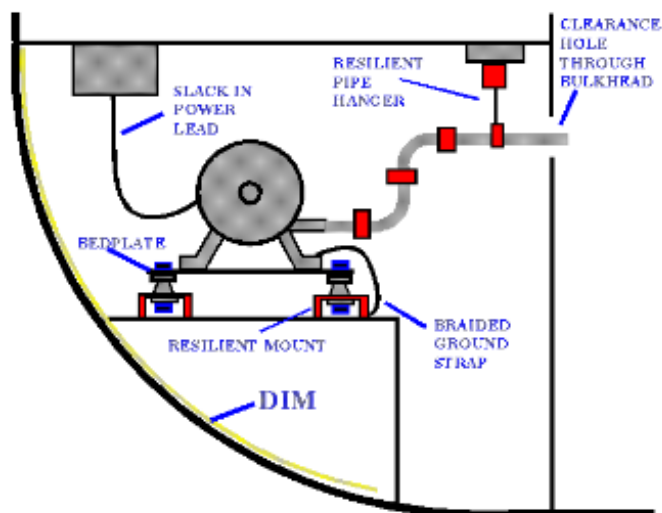
I tillegg benyttes isolerende matter for å dempe vibrasjoner og støy fra fartøyets støyprodusenter. *US Navy* kaller prinsippet for «distributed isolation material» og beskrives som støyisolerende matter som festes til skroget (Federation of American Scientists, u.d.). Isolerende matter antas å kunne dempe de lavfrekvente lydene produsert fra dieselmotorene samt det de høyfrekvente lydene fra gassturbinene i en modifisert JM-kystvakt.

For å dempe vibrasjoner ved gjennomstrømning av væsker benyttes fleksible koblinger til rør. Støydempende utstyr gir en sikkerhet med tanke på den hydroakustiske signaturen fartøyet sender ut. Alle systemer installert vil aldri kunne være støyoptimalisert til det punkt der det ikke er behov for støydempende tiltak og vil derfor trenge en av de nevnte metodene for å tilfredsstille krav om hydroakustisk støynivå.



**Figur 1313** Illustrasjon av støydempede alternativ

Et annet viktig tema ship silencing program fra *US Navy* tar for seg er EMI, og hvordan tilstrekkelig jording kan korrigere store deler av signaturen fra EMI (Federation of American Scientists, u.d.). Det vil i den sammenheng være essensielt for et IEP-system å ha tilstrekkelig jording med tanke på de høye spenningene fra generator til elektromotorene.



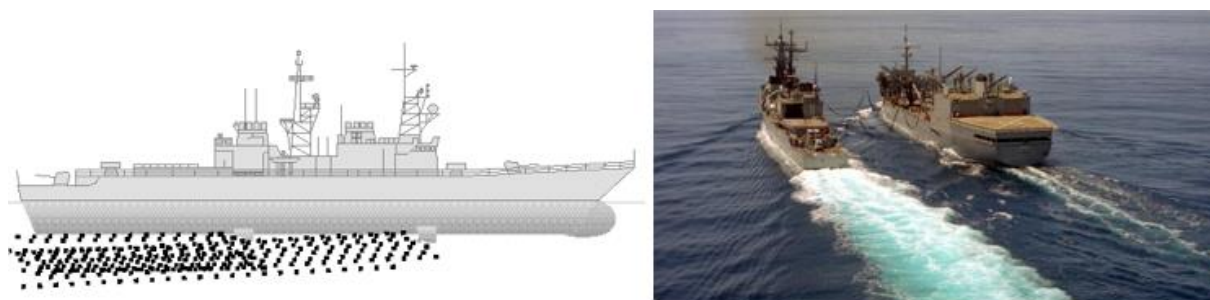
**Figur 1414 Illustrasjon av komplett støyisolerende installasjon**

Videre må alle støydempede alternativ settes i et system for å kunne fungere best mulig, i klartekst må alle korrektive metoder være tilpasset til sin respektive støyproducent og være satt i hensiktsmessig system (Federation of American Scientists, u.d.). Eksempelvis må en støydemper velges ut ifra støyproducentens vekt og størrelse. Ved feil dimensjonering kan vibrasjoner ikke dempes tilstrekkelig og dermed fortsette å utstråle vibrasjoner gjennom skrogets struktur (Federation of American Scientists, u.d.).

Videre beskriver ship silencing program metoder for å kontrollere støyutstrålende deler av fartøyet, hvorav det primært er tiltenkt korrektive tiltak for strømningsbasert eller hydrodynamisk støy samt støy fra vibrerende maskiner. PRAIRIE (propeller air-induced emission) og Masker air systemet baserer seg på å sende ut luftbobler for å dempe den hydroakustiske støyen fra fartøyet. Masker air systemet fungerer ved å sende ut luftbobler under skroget og fungerer som et teppe som fanger opp skrogets lydbølger. Dysene er konsentrert rundt de største støyproducentene til fartøyet, eksempelvis maskinrom og lignende. Masker air systemet benyttes under både aktive og passive undervannsoperasjoner, men kan ved uforsiktig

Modifisere Jan Mayen klasse kystvakt til standardklassefartøy med anti ubåt krigføring som primæroppgave av Larsen & Nerland 2023

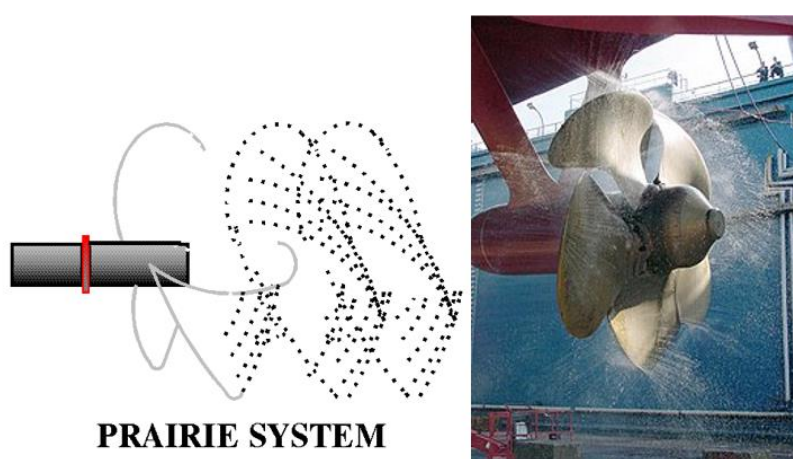
bruk redusere fartøyets evne til undervannskrigføring gjennom forstyrrelser av egen sonar (Pike, 1999).



**Figur 1515 Illustrasjon av masker air system teoretisk og praktisk**

I tillegg til masker air systemet benyttes PRAIRIE-systemet for propellen. PRAIRIE-systemet baserer seg på flere dyser langs propellens «ledene» kant og sender ut små luftbobler langs propellen. Hensikten med PRAIRIE-systemet er å minimere undertrykket som oppstår ved kavitasjon og fungerer ved at luftboblene forsinkes gassboblene fra kavitasjonen i å implodere (Pike, 1999).

PRAIRIE og masker air system anses hensiktsmessig for JM-kystvakt grunnet systemenes evne til å dempe støy som ikke absorberes ved støykilden (Pike, 1999). Som nevnt innledningsvis i oppgaven er JM-kystvakt bygget uten krav om hydroakustisk støy og det er urealistisk å oppnå kravene til en dedikert AU-fregatt med tanke på støy. I den forlengelse kan PRAIRIE og masker systemet være et korrektivt tiltak for noe høyere hydroakustisk signatur.

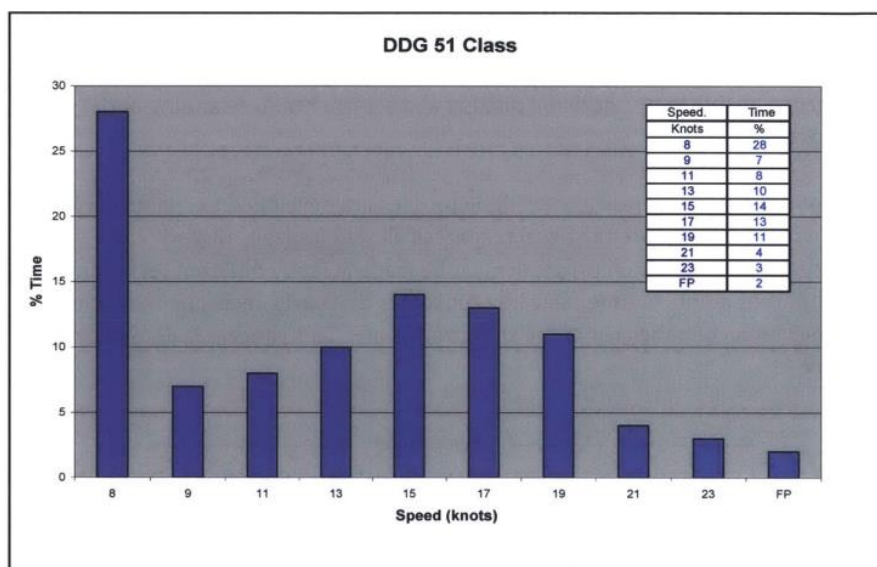


**Figur 1616 Illustrasjon av PRAIRIE air systemet teoretisk og praktisk**

Dette kapitlet har presentert noen mulige løsninger for å gjøre JM-kystvakt mer hydrodynamisk støysvak. Som nevnt i innledningen anser vi JM-kystvakt som en løsning på en type standardklassefartøy med spesialisering innen undervannskrigføring, og vil i klartekst innebære modifikasjoner omhandlende hydrodynamisk støyreduksjon.

### 3.3.4 Utholdenhet

For å sikre maksimal rekkevidde, kostnadsbesparing og operasjonstid er det essensielt å ha kartlagt forbruket til generatorene ved de aktuelle hastighetene. De hyppigste hastighetsområdene basert på operasjonsprofilen for DDG-51 er 8 knop og området 15 knop til 19 knop, i henholdsvis 28% og 38% av operasjonstiden.



**Figur 1717 Operasjonsprofil for DDG-51**

Hastighet	Effektbehov	Driftskriterium	Operasjonstid [døgn]
8 knop	4730 kW	Dieselmotor	65,0
10 knop	5594 kW	Dieselmotor	54,9
16 knop	9906 kW	Dieselmotor	31,0
18 knop	13599 kW	Dieselmotor	23,1
24 knop	35965 kW	Max GT, resten Dieselmotor	7,0

**Tabell 8 Operasjonstid vel full hotellast (3000 kW)**

For kartlegging av operasjonstid beregnes de hastigheter som regnes som viktigst basert på hyppighet, samt hastighetskrav for AU-fregatter beskrevet i 3.2 Innledende krav og behov.

Detaljer om generatorsett detaljeres senere i oppgaven, men verdiene for det utvalgte generatorsettet brukes her for å oppnå korrekte beregninger angående utholdenhet. Beregningene baserer seg på JM-kystvakts drivstoffkapasitet på  $1500 \text{ m}^3$ , men størrelse på tankene kan fravike dersom det kreves egne tanker for drivstoff for gassturbinen.

For beregning av minimum nødvendig installert effekt som i 3.3.1 *Effektbehov*, uten å ta hensyn til reservekapasitet.

Hastighet	Effektbehov	Driftskriterium	Operasjonstid [døgn]
8 knop	2769 kW	Dieselmotor	111,0
10 knop	3633 kW	Dieselmotor	84,6
16 knop	7945 kW	Dieselmotor	38,7
18 knop	11338 kW	Dieselmotor	27,1
24 knop	34004 kW	Max GT, resten Dieselmotor	7,3

**Tabell 9 Operasjonstid med minimum hotellast (1500 kW)**

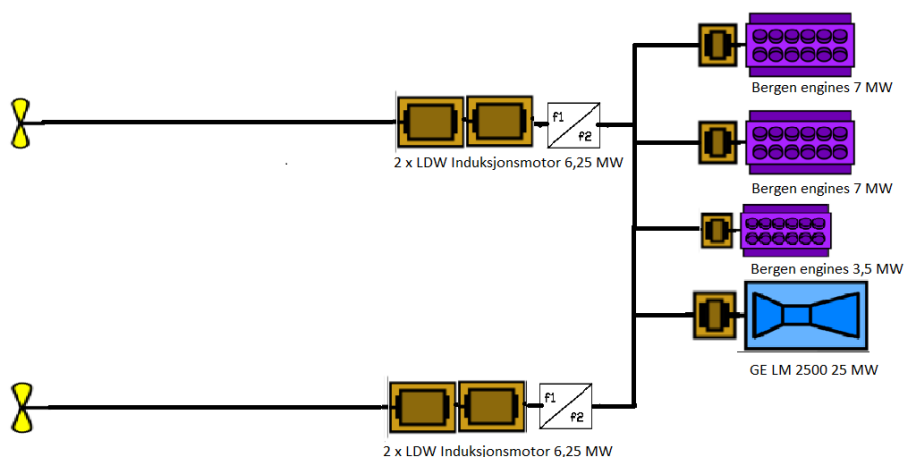
For beregning av minimum pådragseffekt er fremgangsmetoden som følgende:

$$P_{\text{produsert}} = \frac{P_{\text{elmotor}} + P_{\text{min hotellast}}}{\eta_{el}}$$
$$P_{\text{min pådrag}} = \frac{P_{\text{produsert}}}{MCR}$$

Tabell 8 beskriver hvor lenge fartøyet er i stand til å operere med full hotellast på 3000 kW i de gitte hastighetene. Tabell 9 derimot beskriver hvor lenge fartøyet er i stand til å operere med mindre hotellast, altså at det produseres og leveres mindre strøm for å drifte andre systemer enn fremdrift. Sistnevnte for å spare drivstoff i scenarioer hvor sonar, radar og andre sensorsystemer ikke er vitale for oppdraget.

### 3.4 Fremmet løsning

I 3.3 *Utredelse av design* ble det utredet detaljer angående vitale komponenter for fremdrift og manøvrering, og gjort enkle beslutninger angående utvalgte komponenter. Her vil de mest nøye detaljene beskrives.



Figur 1818 Illustrasjon av fremmet løsning

### 3.4.1 Generatorer

For generatorsettet er det besluttet å gå for en LM 2500 gassturbin levert av General Electric tiltenkt der hastighet- og leveringsbehovet er på sitt største. For silentoperasjoner, lavere hastigheter samt øverste hastigheter i kombinasjon med gassturbinen består konseptet av tre dieselgeneratorer. To stykk 33:45 V12A og en 33:45 L6A levert av Bergen Engines (heretter BE).

Generatorsettet har en samlet installert effekt på 42,5 MW, som overskrider behovet med omtrent 4 MW. Kostnaden for dette er høyere innkjøpspris, større vekt og større plassbehov. Man tjener dog på større redundans og fleksibilitet ved fremdrift under oppdrag.

Modell	Effekt <sup>11</sup> [kW]	Vekt <sup>12</sup> [tonn]	Volum <sup>13</sup> [m <sup>3</sup> ]
General Electric LM2500 GT	25060	18,4	50 (100)
Bergen Engines B 33:45 V12A 1	2 x 7010	2 x 112,05	2 x 160 (319)
Bergen Engines B 33:45 L6A 1	3475	67,675	129 (258)
Samlet generatorsett	42555	310,175	498 (996)

**Tabell 10 Data for generatorvalg**

### 3.4.2 Elektromotorer

Valget omhandlende elektromotor er tatt med hensyn til operasjonsprofilen til fartøyet og forutsetningen om at fartøyet skal kunne variere hastigheter i tråd med operasjonen. I den sammenheng har oppgaven valgt å benytte induksjonsmotorer grunnet motorens evne til å regulere hastigheter. I tillegg vil induksjonsmotoren ikke ha behov for start-hjelpesystemer for å igangsette motoren i motsetning til synkronmotoren.

For elektromotorer velges 4 stk. LDW A5L1250M58-12KB+WK induksjonsmotorer, to på hver akselledning som monteres og driftes i tandem. På den nåværende modifikasjonen til JM-kystvakt benyttes to stk. LWD i størrelsesorden 4,5 MW for å drive senterpropellen. Spesifikke motorkataloger med modeller har vært vanskelig å opparbeide i «open source» dokumenter, i tillegg til at eksempelvis LDW oppgir på egne nettsider at deres induksjonsmotorer i størrelsesordenen 1-35 MW spesial-konstrueres til de spesifikke behovene for fartøyet. Fysisk størrelse, tilpasninger til strømmettet, mekaniske deler av motoren og kjøling til elektromotoren tilpasses den gitte fartøysklassen.

Med bakgrunn i utfordringene med å finne et passende alternativ har oppgaven valgt å skalere opp de allerede installerte motorene i JM-kystvakt. Motorene er skalert lineært opp både i vekt, levert effekt og størrelse. Med tanke på redundans og romslige utfordringer anser oppgaven det hensiktsmessig å operere motorene i tandemkonfigurasjon. Ved en defekt på en av elektromotorene vil det ved en tandemkonfigurasjon fortsatt kunne ha fremdrift på

---

<sup>11</sup> Installert effekt

<sup>12</sup> Vekten for LM2500 i tørr tilstand

<sup>13</sup> Bokset volum (bokset volum med 1000mm klaring alle sider)

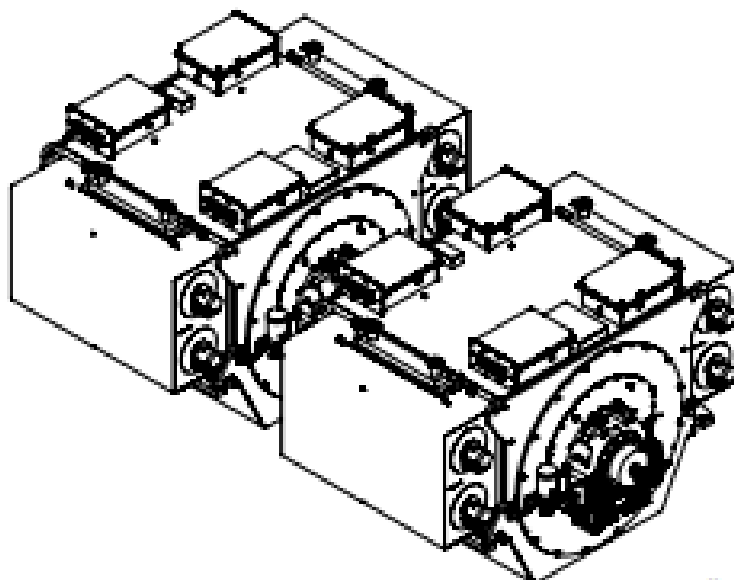


Modifisere Jan Mayen klasse kystvakt til standardklassefartøy med anti ubåt krigføring som primæroppgave av Larsen & Nerland 2023

propellakslingen grunnet to elektromotorer per aksel. I tillegg antas at en større elektromotor vil være mindre hensiktsmessig med tanke på plassmessige utfordringer i form av høyde og bredde. En tandemkonfigurasjon vil oppta større volum i lengderetning, men er i gjengjeld lavere og smalere, og anses å være mer hensiktsmessig i en skipskonstruksjon der høyde og bredde er begrensede faktorer.

Modell	Effekt [kW]	Vekt [tonn]	Volum [ $m^3$ ]
LDW A5L1250M58-12KB+WK	4 x 6250	4 x 59	4 x 62
Samlet	25	236	248

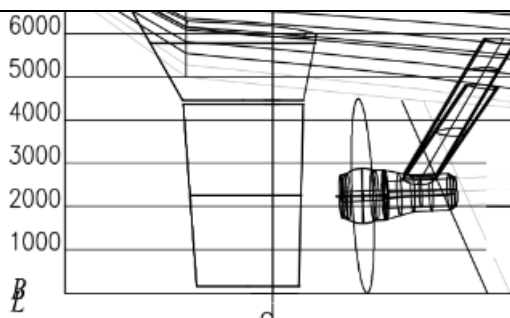
**Tabell 11 Data for elektromotorvalg**



**Figur 1919 Illustrasjon for tandemoppsett**

### 3.4.3 Propell

Ut ifra propellteori og fartøysmodifikasjoner allerede gjort rede for er det noen valg i forhold til design av propellene som må foretas. Hovedpunktene er antall blader, type og propelldiameter.



**Figur 2020 Propeller-løsning JM-kystvakt**

Det er et etablert faktum at høyere diameter på propellere øker propellens virkningsgrad (MAN Energy Solution, 2018, s. 24). *Figur 18* viser en antatt propellstørrelse fra LMG marin på 4500 mm diameter. Sammenlignet med propellen til dagens FN-fregatt er det rimelig å anta at denne propellstørrelsen kan være hensiktsmessig med tanke på skyvekraft og støysvakhet for JM-kystvakt. Samtidig er det viktig å nevne at en propell med et større areal i sammenheng med en korresponderende pitch/diameter ratio vil kunne generere mer skyvekraft på lavere turtall enn en mindre propell.

Som nevnt i 3.3.2 *Fartøysmodifikasjoner* vil kavitasjon oppstå ved høyere propellturtall, og i den forlengelse vil det være hensiktsmessig med en så stor propell det er plass til forutsatt at fremdriftssystemet klarer å rotere propellen. For å videre forsikre lavest mulig hydroakustisk signatur anses det som mest hensiktsmessig med en fem-bladet propeller. Årsaken er at en propeller med fem propeller produserer mindre støy på lavere turtall, samtidig som den vil operere med god propellvirkningsgrad.

Angående klaring fra propellerdiameter blir det foretatt en kvalitativ vurdering. Det legges til grunn med et krav på tilnærmet to meter fra propeller-tippen til skroget for å få minimere wake-faktoren inn til propellen. For å videre øke den maksimale diameteren kan man tilpasse vinkelen til propellerakslingen. Ulempen med det er en dårligere angrepsretning til propellerskyvet, ettersom  $\cos \alpha$  blir mindre når  $\alpha$  øker. I den sammenheng vil et kompromiss mellom klaring fra skrog til propeller, propelldiameter og akselvinkel bli relevant. Og med bakgrunn i dette er det er fare for at en propelldiameter på 4500 mm ikke vil oppfylle kravet til to meters klaring ettersom akselvinkelen kan bli for stor og angrepsvinkelen til propellen uhensiktsmessig.

### 3.4.4 Hvorfor passer denne løsningen?

I dette kapittelet skal løsningen drøftes opp mot de krav som er satt til dette fartøyet. Dette gir et svar på i hvor stor grad fartøyet vil være i stand til å løse ønskede oppdrag som et tilskudd i en AU-struktur.

#### **Hastighet og utholdenhet**

Med utvalget av elektromotorer og dimensjonering av trøstlager har fartøyet potensialet til å overstige 24 knop. Det gir høyere topphastighet enn ved dagens løsning, men fartøyet kan dermed oppnå høyere hastigheter for taktisk forflytning. NATO stiller krav for fregatters hastighet på 25 knop. Det vurderes imidlertid som lite hensiktsmessig å skalere fremdriftsmaskinene ytterligere, da skipets motstandskurve stiger drastisk i dette hastighetsområdet, ref. *Tabell 6*. Maskineriene vil ta altfor stor plass for å oppnå høyere hastigheter. Det kan også være et faktum at en installert effekt på 42 MW også overstiger hva som er hensiktsmessig.

Fartøyet kan med full hotellast oppnå den øvre ønskede silent-hastigheten 18 knop kun ved drift av de to største dieselgeneratorene, før gassturbinene bør overta generatordriften.

Med full hotellast kan fartøyet seile med 8 knop i omtrent 9 uker. Ønskede silenthastigheter i størrelsesordenen 16 til 18 knop kan oppnås i 3-4 uker under samme kondisjoner. I tillegg kan fartøyet seile i makshastighet i en uke for taktisk forflytning. Det er tydelig av operasjonstiden reduseres drastisk ved stigende hastigheter. Med redusert hotellast kan fartøyet operere i mer økonomiske tilstander med tanke på drivstoffbesparelse. Dette gir modifikasjonen muligheten til å variere mellom mer operative AU-tilstander og mer økonomisk rettede hastigheter ut ifra behov.

#### **Signatur**

IEP-systemet er som nevnt i konseptfasen, muligens det mest støysvake fremdriftssystemet med tanke på vibrasjoner, og gjenspeiles også i internasjonale mariner på verdensbasis. *Royal Navy* har i en lengre periode operert med elektriske systemer for AU-operasjoner med Type-23 fregatten, samtidig viser den nye Type-26 fregatten det elektriske systemets relevans også den dag i dag (Rolls Royce, 2022). I tillegg har Frankrike og Italia samarbeidet om et fregattprosjekt bedre kjent som FREMM konseptet, et velutprøvd konsept som er solgt til en rekke mariner, deriblant US Navy (Fincantieri, 2023). Kontinuerlig drift i dagens mariner viser at elektriske

systemer innehar god kapasitet innenfor undervannskrigføring samt gode egenskaper innenfor hydroakustisk signatur.

På motsatt side er JM-kystvakt konstruert uten krav om hydroakustisk signatur. Med bakgrunn i dette er det rimelig å anta at skrogets egne strømningsseksisterte signatur ikke har blitt utforsket i noen stor grad. I tillegg vil det være behov for å modifisere skrogets akterende for å muliggjøre en dobbel propellkonfigurasjon med tilhørende aksler. Det vil av den grunn ikke være mulig å gi noen håndfaste vurderinger angående skrogets signatur før simuleringer og modelltester er utført. Det er imidlertid viktig å nevne at korrektive tiltak for fartøyets strømningsseksisterte lyd eksisterer i PRAIRIE og masker air systemene, samt andre tiltak for å fjerne vibrasjoner innad i fartøyet. Det anses med bakgrunn i de korrektive tiltakene at JM-kystvakt kan støy optimaliseres, i tillegg til å være et kosteffektivt alternativ for å supplere dagens og fremtidige AU-struktur.

Angående propellene er det umulig å fastslå hvilke støynivåer de gir, og hva kavitasjonstartshastigheten er for den gitte propellen. Det har imidlertid blitt nevnt tidligere i oppgaven at propellen må spesialkonstrueres for å nå krav om støy og kavitasjon. Spesifikke krav angående propellere blir for omfattende for denne oppgaven, men en propellkonfigurasjon må tilpasses signaturkrav, samt tilpasses fartøyets fremdriftsmaskineri med tanke på turtall og skyvekraft.

### **Kostnader**

Kravet for modifiseringen er å være et kosteffektivt supplement for AU-krigføring. Til sammenligning har moderne AU-fregatter som FREMM (Det franske senatet, 2014) og Type-26 (Donaldson, 2022) en prisramme på 10 mrd. NOK per stykk. Til sammenligning kostet hver JM-kystvakt i underkant av 2,4 mrd. NOK per stykk (FMA, 2022). Uten å foreta markedsundersøkelser er det utfordrende å stadfeste nøyaktige kostnader, dog er det rimelig å anta at rammene for kostnadene ikke blir i nærheten av størrelsesordenen til en moderne AU-fregatt. Sånn sett er dette en kosteffektiv løsning å supplere modifiserte standardfartøy i en AU-styrke med AU-fregatter. Det er likevel viktig å presisere at fenomenet «man får det man betaler for» også kan gjelde her, men det vet man ikke om før flere tester og undersøkelser er gjennomført.

### **3.5 Konklusjon av forprosjektfasen**

Forprosjektfasen har i grove trekk utarbeidet en alternativ løsning for et støysvakt fremdriftssystem for JM-kystvakt. Til sammenligning med konseptfasen er det nå utført mer eksakte beregninger for hastighet og utholdenhet. I tillegg har vi gått ytterligere i dybden ved utvelgelse av enkeltkomponenter og oppsett av (1) generatorsett med støydempende opplagring, (2) frekvensomformer, (3) elektromotorer, (4) akselarrangement med trøstlager, (5) propellere og (6) ror.

Oppsummert består nå fremdriftslinjen av tre dieselgeneratorer og en gassturbingenerator i samlet størrelsesorden på 42,5 MW. Strømmen leveres til standard frekvensomformere som leverer videre til to sett med to LDW elektromotorer i samlet størrelsesorden på 25 MW. Elektromotorene driver to standard propellakslinger innfestet av V-braketter utenfor skroget, som roterer to stykk fembladete propellere søm videre bør designes for lavt hydroakustisk støynivå og høy propulsjonsvirkningsgrad. Til slutt har hver fremdriftslinje hvert sitt ror plassert rett aktenfor propellere for lavest mulig hydroakustisk støy, men også god manøvreringsevne.

## 4 Konklusjon med anbefaling

### Konklusjon

Denne oppgaven har tatt for seg ideen om å modifisere fremdriftslinjen til JM-kystvakt i den hensikt å kunne operere fartøyet som et supplement til dagens AU-plattformer. Oppgaven identifiserte innledningsvis et behov for flere fartøy, deriblant standardklasse fartøy. I den forbindelse har denne oppgaven redegjort og diskutert en løsning for et standardklassefartøy med spesialisering innen undervannskrigføring, hvorav ytelse, signatur, overlevelse og rekkevidde og kostnader har vært sentrale temaer.

Konseptfasen har analysert mulige fremdriftsalternativer for en modifisert Jan Mayen klasse kystvakt. Gjennom en alternativanalyse har oppgaven utelukket de fremdriftssystemer som av ulike årsaker er uegnede for undervannskrigføring. Alternativanalysen konkluderer med at elektriske systemer er mest hensiktsmessig med bakgrunn i fleksibilitet og lav hydroakustisk signatur. Videre fortsetter konseptfasen med en avveiningsanalyse som tar for seg mulige løsninger for henholdsvis CODLAG- og IEP-systemene. I denne delen av oppgaven diskuteres hvorvidt systemene kan operere innenfor kravene signatur, operasjonsprofil og overlevelsessevne og i hvilken grad det er mulig å realisere fremdriftssystemet i JM-kystvakt. Konseptfasen konkluderer med at oppgaven anser et IEP-system mest hensiktsmessig for både undervannskrigføring og JM-kystvakt med bakgrunn i systemets kapabiliteter innenfor hydroakustisk signatur og realiseringsevne.

Avslutningsvis går oppgaven over i en forprosjektfase hvor IEP-systemet blir beskrevet mer i detalj. Utregninger av effektbehov og utholdenhet, fartøysmodifikasjoner, signatur og utholdenhet blir beskrevet i detalj og slutninger beskrevet. Videre presenterer oppgaven en fremmet løsning med henholdsvis diesel- og gassturbingeneratorer og propellteori før oppgaven konkluderer forprosjektfasen med hvorfor nettopp denne utrustningen kan være hensiktsmessig.

Oppgaven oppsummeres med en fremdriftskonfigurasjon bestående av to separate fremdriftslinjer, hver utstyrt med individuelle akselledninger, ror, fembladete propeller og elektromotorer. Basert på konsept- og forprosjektfasen har undersøkelsen konkludert med en løsning som involverer tre dieselgeneratorer og en gassturbingenerator med en samlet kapasitet på 42,5 MW. Disse generatorsettene er designet for å levere kraft til fartøyets fire

elektromotorer, som har en samlet effekt på 25 MW, i tillegg til å dekke fartøyets antatte hotellast på 3 MW.

Den beskrevne fremdriftskonfigurasjonen har kapasitet til å opprettholde en cruisehastighet på 24 knop i samsvar med kravene om hastighet. I den sammenheng vurderes det at fremdriftssystemet for Jan Mayen-klassen kystvakt kan operere støysvakt, samtidig opprettholde høy virkningsgrad over alle hastighetsområdene. IEP-systemet gir en solid overlevelsessevne ved å fokusere på pålitelighet og redundans.

På grunnlag av dette anser vi Jan Mayen-klassen som en egnet plattform for videre utvikling, spesielt med tanke på støysvake operasjoner. I denne konteksten anbefales det å gjennomføre ytterligere forskningsprosjekter som spesifikt adresserer fartøyets strømningsseksisterte signatur for å forbedre forståelsen av fartøyets totale kapasitet innen AU-operasjoner.

Ut ifra bacheloroppgavens problemstilling og plan om å utføre en kvalitativ undersøkelse om JM-kystvakt som AU-fartøy mener vi at oppgaven har svart godt på problemstillingen. Basert på krav om hydroakustisk signatur, hastighet, kostnad og plass har vi utført en analyse av fremdriftskonfigurasjoner, utført enkle beregninger, sammenlignet og produsert et eksempeloppsett som vi tror kan være et godt utgangspunkt for videre undersøkelser.

### **Anbefaling**

Basert på det slutførte designet anbefaler vi å videre utforske mulighetene om JM-kystvakt kan være hensiktsmessig til å løse oppdrag i forbindelse med AU-krigføring. For å realisere ideen om Jan Mayen som AU-fartøy er kvantitative studier nødvendig for å forsikre om konseptet vil fungere i praksis.

I forbindelse med kostnader er det viktig å påpeke at moderne AU-fregatter kan ha en prisramme på over 10 mrd. NOK per stykk. Ved å bruke et skip med sivile standarder som JM-kystvakt kan man etablere velfungerende supplement for dagens sjøforsvar, men det er viktig å presisere at et supplement aldri kan erstatte moderne AU-fregatter i en krigssituasjon. Det aktuelle scenarioet er at JM-kystvakt med AU-kapabiliteter supplerer i en allerede eksisterende flåte med AU-fregatter.

Det er viktig å nevne at motoralternativene presentert i kapittelet 3.4 *Fremmet løsning* kun er et alternativ og ikke et endelig forslag. Denne oppgaven har kun tatt utgangspunkt i dokumenter delt fra LMG marin eller funnet i publiserte kilder. Eksempelvis kan elektromotorene presentert

Modifisere Jan Mayen klasse kystvakt til standardklassefartøy med anti ubåt krigføring som primæroppgave av  
Larsen & Nerland 2023

---

i 2.4 Avveiningsanalysen fra *GE power conversion* være aktuelle alternativ. Disse motorene er spesialkonstruert for marinefartøy, med optimalisering innen hydroakustisk støyreduksjon, sjokkmotstand og høyere redundans (GE power conversion , 2023), hvorav alle er faktorer som essensielle i motorvalg for marinefartøy.



## **5 Videre arbeid med å modifisere Jan Mayen Klassen**

For videre utforskning av konseptet anbefales utredning av følgende aspekter:

- Kvantitative studier angående hastighet, hydroakustisk støy og kostnader med gjeldende modifikasjoner.
- Undersøke skrogets kapasitet til ytterligere bevæpning. Hensikten er å styrke evnen til selvforsvar og AU-bekjempning.
- Utforske omfanget om strukturelle endringer i skipet for realisering av gjeldende modifikasjoner, herunder:
  - o Luftinntak
  - o Eksoshåndtering
  - o Akselledninger og rør
  - o Generatorsett
  - o Elektromotorer
  - o Støttesystemer for elektrisk håndtering

## Vedlegg

Av kommersielle hensyn vil ikke oppgaven dele dokumentene angående tekniske data på Bergen Engines sine dieselmotorer, eller LDW sin elektromotor. Dette er dokumenter vi har mottatt fra LMG marin med forbehold om å kun benytte de verdiene relevant for oppgaven.

Vedleggene følger i separate filer. Fil A og B viser detaljer ved beregninger. Øvrige viser spesifikke detaljer for komponenter.

- Vedlegg A: Effektbehov
- Vedlegg B: Operasjonstid
- Vedlegg C: LM2500 detaljer

Modifisere Jan Mayen klasse kystvakt til standardklassefartøy med anti ubåt krigføring som primæroppgave av  
Larsen & Nerland 2023

---