



Sjøkrigsskolen

Bacheloroppgave

Analyse av skade på brennstoffinjektor til MTU-396 motor

av

Jørgen Solbakken Bjørklund

Leveret som en del av kravet til graden:

BACHELOR I MILITÆRE STUDIER MED FORDYPNING I MASKINFAG

Innlevert: Mai 2019

Ikke/Godkjent for offentlig publisering

Publiseringsavtale

En avtale om elektronisk publisering av bachelor/prosjektoppgave

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

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

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

Jeg gir herved Sjøkrigsskolen rett til å gjøre denne oppgaven tilgjengelig elektronisk, gratis og uten kostnader	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<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 type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nei

Plagiaterklæring

Jeg erklærer herved at oppgaven er mitt eget arbeid og med bruk av riktig kildehenvisning. Jeg har ikke nyttet annen hjelp enn det som er beskrevet i oppgaven.

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

Dato: 29 – 05- 2019

Jørgen Solbakken Bjørklund
Kadett navn

Kadett, signatur

Forord

Denne bacheloroppgaven er en del av Sjøkrigsskolens krav til utdanning og handler om skadeomfanget på mellomleggssringen i brennstoffinjektorene, tilhørende MTU-396 motorene stående på Fregatt. Dette fordi skaden kun er et problem på Nansen-klassen, men ikke på Ubåt og Minefartøyene som fører den samme motormodellen. Oppgavens problemstilling har sitt opphav etter ønsker fra faglærer Gisle Strand og vedlikeholdspersonell på motorseksjonen ved Sjøforsvarets hovedbase, Haakonvern Orlogsstasjon.

Arbeidet med oppgaven som har foregått siden 7. Januar ble avsluttet og levert 29. Mai 2019. Da oppgaven er en del av den tekniske utdannelsen med fordypning i maskinfag, forutsettes det at leseren innehar grunnleggende kunnskap om fagfeltet. Jeg ønsker å takke alle som har hjulpet meg i arbeidet med oppgaven, alt fra via epost til å ønske meg velkommen inn på kontoret for en lang dialog om emnet, dette til tross for mitt uanmeldte oppmøte. Jeg vil rette en spesiell takk til faglærer ved Sjøkrigsskolen, Gisle Strand, som alltid tar seg tid til å hjelpe uavhengig om det er i eller utenfor arbeidstid. Jeg vil også takke min veileder Dr. Ragnar Gjengedal som har vært til stor hjelp ved den tekniske delen samt oppgavens helhet. Jeg ønsker å takke Sivilingeniør Lars Magne Nerheim, med bunnsolid erfaring innenfor innsprøytning og over 20 års erfaring fra RR Bergen Diesel. Han har vært en betydelig bidragsyter til oppgavens oppdukkende spørsmål. Til slutt ønsker jeg å takke både Kristoffer Grinde, maskinassistent ved KNM Fridtjof Nansen og fagarbeider ved maskinverkstedet på Haakonvern med over 40 års erfaring, Frode Ellingsen, som har vært til god hjelp rundt den praktiske delen av forståelsen.

Bergen, Sjøkrigsskolen, 29-05-2019

(Signatur)

Oppgaveformulering

Kadetten kartlegger omfanget av skaden og relevante driftsdata for de forskjellige variantene for å etablere status. Resultater fra dette avgjør metode for videre analyse. Kadetten skal søke å finne og validere årsak(er) slik at nødvendige tiltak til forbedringer kan iverksettes. Oppgaven blir skrevet med bakgrunn i problemstillingen:

Brennstoffinjektorene på MTU motorene på Nansen-klassen har skader på en av sine komponenter, nærmere bestemt mellomleggsringen. Tilsvarende skade ses ikke på samme type injektor på andre varianter av 396-motoren. Det ønskes å forstå hvorfor dette problemet oppstår, ved å analysere bakgrunnen til problemet og hva det kommer av.

Sammendrag

Oppgavens problemstilling og tyngde har ligget i å forstå hvorfor skadeproblematikken med fregattene sine ødelagte mellomleggsringer oppstår i en annen grad enn hos minefartøyene. Dette ved å analysere bakgrunnen til problemet. Bacheloroppgaven har gått fra å se på det elementære i hvordan en motor og dyse fungerer, til å studere krefter på kvadratmillimeter-nivå. Det har vært fokus på forskjellige parametere som kan ha innvirkning på skadeomfanget. Dette være seg brennstoff- og materialkvaliteter, driftsparametere, størrelser på dyser, energibetraktninger, anslagsenergier og krefter som påvirker systemet. Ved å gå i dybden på de påvirkende forholdne har man kommet nærmere et svar på rotårsaken til skadeomfanget. Injektor og dysenål som i utgangspunktet skulle være likt på fartøysklassene, har vist seg å ikke være det. Forskjellene sammen med differansene i operasjonsmønster med turtall og belastninger har ledet til et stort spenn i skadeomfanget på fartøysklassene.

Funnene i oppgaven har gitt beregninger som anslår at fregatten sin mellomleggsring blir påført 55% mer arbeid per arealenhet enn hos minefartøyene, selv ved samme turtall og belastning. Dette sees å være grunnet at fregatt har under halvparten av anslagsarealet å fordele kreftene utover sammenlignet med minefartøyene. Resultatene gir tre ganger så stor normalspenning på fregattens mellomleggsring. I realiteten går fregatt på 33% høyere belastning i gjennomsnitt enn minefartøyene, som angivelig leder til ytterligere differanser i anslagsenergi og krefter påført mellomleggsringen.

Da skadeproblematikken antas å være på grunn av for lite anleggsareal, etter konstruksjonssvakhet, er det få muligheter til enkle tiltak for utbedring. Det anbefales som mest fornuftig løsning å skifte injektor på fregattens MTU 396. Ved å bytte til en mer moderne injektor, mer lik minefartøyene sin, vil man antakeligvis minske skadeproblematikken grunnet økt anslagsareal, i tillegg til å redusere antall reservedeler.

Innholdsfortegnelse

Figurer	1
Tabeller/Diagrammer	2
Nomenklatur / Forkortelser / Symboler	3
1 Innledning	4
1.1 Problemstilling	5
2 Teori.....	6
2.1 Slitasje	6
2.2 Kavitasjon.....	9
3 Metode	10
3.1 Litteratursøk	10
3.2 Intervju	12
3.3 Målinger	13
4 Resultat.....	15
4.1 Brennstoff.....	15
4.2 Brennstoffsystemet.....	21
4.3 Mellomleggsring.....	24
4.4 Hardhetsmålinger	28
4.5 Snittegning av dyse.....	29
4.6 Dysenål	30
4.7 Driftsparametere	32
4.8 Dysenålels slagkraft.....	36
4.9 Mulige årsaker til slitasjen.....	45
4.10 Mulige tiltak	48
5 Diskusjon.....	49
6 Konklusjon	50
Bibliografi.....	51
Vedlegg.....	53

Figurer

Figur 1-1: Brennstoffinjektor MTU 396.....	4
Figur 2-1: Slitt mellomleggsring til venstre, sammenlignet med lite brukt til høyre. 6	
Figur 2-2: Illustrasjon av to- og tre-kropps slitasje. (Hentet fra internett, http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms_of_wear, 04.03)	8
Figur 3-1: Emcotest N3D.....	13
Figur 3-2: Vektberegning av dysenål fregatt	14
Figur 4-1: Bilde fra prøvetaking av brennstoff ved KNM Thor Heyerdahl, 25.04.2019.....	20
Figur 4-2: Enkel skisse av det klassiske PLN innsprøytningsystemet fra MTU 396 (Hentet fra internett: https://www.dieseln.net/tech/diesel_fi_pln.php 05.03).	21
Figur 4-3: Fuelinjektor fra MTU 396	22
Figur 4-4: Ubrukt mellomleggsring, dyse og dysenål tilhørende MTU 396 fra Nansen klasse fregatt.	23
Figur 4-5: Dimensjoner ubrukt mellomleggsring.	24
Figur 4-6: Mellomleggsring Fregatt t.v, minefartøy t.h. Her ser man tydelig forskjell ved at fregatten har styrepinner.	25
Figur 4-7: Dyse fra Fregatt t.v, fra Mine med "vollgrav" t.h.....	25
Figur 4-8: Skadet mellomleggsring.	26
Figur 4-9: Skadeforløpet, fra ny til ødelagt. Merk at disse ringene er pusset/vasket for sot.	26
Figur 4-10: Illustrert dysenål gjennom senterhull på mellomleggsring Fregatt.	27
Figur 4-11: Hardhetstest	29
Figur 4-12: Snittegning av dyse, laget av Lars Magne Nerheim.	29
Figur 4-13: Dysenåler fra fregatt og minefartøy som viser glideflate (2), trykktrinndiameter (3) samt den tynne delen som går gjennom mellomleggsringen (1).	30
Figur 4-14: Skjerm bilde fra maskinkontroll på KNM Fridtjof Nansen.....	32
Figur 4-15: Eksostemperaturer MTU 396 tilhørende Fregatt t.v, Ubåt t.h.....	35
Figur 4-16: Anleggsflate sett ovenfra, målestokk 10:1.....	37
Figur 4-17: Illustrasjon av hastigheten til dysenålen under et løft for minefartøy og fregatt. Tykkelsen av oljefilmen er meget liten sammenlignet med løftehøydene, derfor er de merket med dobbeltstrek. Nålen bremses til null hastighet gjennom oljefilmen.....	40
Figur 4-18: Illustrert SN-diagram, y-aksen er lineær og x-aksen logaritmisk.....	43

Tabeller/Diagrammer

<i>Tabell 1: Litteratursøk</i>	<i>11</i>
<i>Tabell 2: Brennstoffprøver KNM Thor Heyerdahl, 25.04.19.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabell 3: Brennstoffprøver KNM Hinnøy.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabell 4: Hardhetsmåling mellomleggsringer</i>	<i>28</i>
<i>Tabell 5: Dimensjoner og masse dysenål.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabell 6: Turtall minefartøy</i>	<i>33</i>
<i>Tabell 7: Åpningstrykk innsprøytningdyser</i>	<i>34</i>
<i>Tabell 8: Løftehøyde.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabell 9: Estimert impuls</i>	<i>40</i>
<i>Tabell 11: Normalspenning med løftehøyde</i>	<i>42</i>
<i>Tabell 12: Kinetisk energi per areal</i>	<i>44</i>
<i>Tabell 13: Sammendrag slagkraftberegninger</i>	<i>45</i>

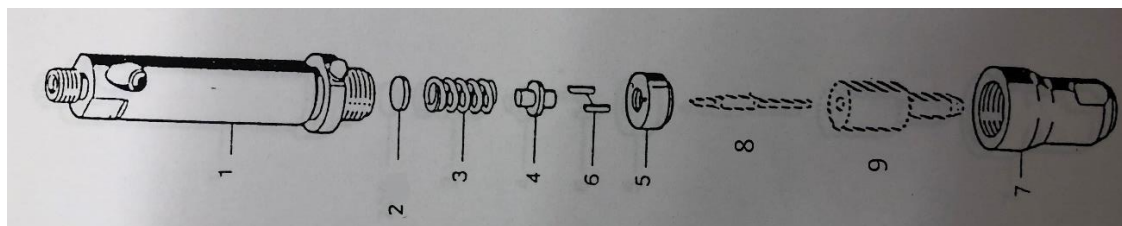
Nomenklatur / Forkortelser / Symboler

E_k	Kinetisk energi
FNAN	KNM Fridtjof Nansen
HP	High pressure
HRC	Rockwell C skala
ØD	Øvre dødpunkt

1 Innledning

Norges Marine bruker i dag motorer fra Tyske MTU Friedrichshafen på minefartøyer, fregatter og ubåter. Motorene blir brukt til fremdrift i mineklassen og som dieselgeneratorer på fregatt og ubåt. I utgangspunktet er motoren, MTU 396, lik hos de tre fartøysklassene, med noen modifikasjoner opp mot bruk og plassbegrensninger. Motorens oppgave er enkel, omforme den kjemiske energien i drivstoffet til fremdrift. Fra drivstoffet blir fylt på tanken, går det gjennom en rekke stasjoner, før forbrenningsproduktene går ut i andre enden som eksos. Kort forklart skal drivstoffet renses gjennom separatorer og filtre, fraktes videre til høytrykkspumper, gjennom injektorer for så å forstøves i brennkammeret hvor eksplosjonen forekommer. Vertikalkreftene fra eksplosjonen virker på stempelet og setter det i akselerasjon ned i sylinderen. Som igjen leder til veivakslingen og overfører de lineære bevegelsene fra stempelet til en roterende bevegelse på akslingen ut av motoren, mot giret. Et steg nærmere fra kjemisk energi til fremdrift av fartøyet.

Før brennstoffet når forbrenningskammeret skal det gjennom injektoren og dysen. Injektoren består av en rekke komponenter som blir påvirket av blant annet brennstoffets oppbyggende trykk, før det forstøves i brennkammeret.



Figur 1-1: Brennstoffinjektor MTU 396.

For hver gang brennstoff slippes inn i forbrenningskammeret, slår dysenålen (pkt. 8, Figur 1-1) opp i mellomleggsringen (pkt. 5, Figur 1-1). De aksielle kreftene fra dysenålen som overføres til mellomleggsringen er med på å gjøre denne til en slitasedel.

1.1 Problemstilling

Til tross for at motorene i utgangspunktet er like er det et problem på fregattene at mellomleggsringen i dysen blir ødelagt, men ikke på MTU 396 motorene til ubåt og mine. Når mellomleggsringen blir ødelagt, kan det føre til at dysenålen henger seg opp i ringen, og som igjen kan føre til ufullstendig forbrenning grunnet feilttenning.

Denne Bacheloroppgavens analyse vil i hovedsak prøve å komme frem til hvorfor Fregattvåpenet har dette problemet, hva som kan være årsaken, for så å kunne se på eventuelle løsninger ut ifra rotårsaken til problemet. Oppgaven vil bli brukt til å forstå problemet, hvor det å gå i dybden og forstå årsaken vil være i fokus.

Oppgaven blir belyst gjennom problemstillingen:

Brennstoffinjektorene på MTU motorene på Nansen-klassen har skader på en av sine komponenter, nærmere bestemt mellomleggsringen. Tilsvarende skade ses ikke på samme type injektor på andre varianter av 396 – motoren. Det ønskes å forstå hvorfor dette problemet oppstår, ved å analysere bakgrunnen til problemet og hva det kommer av.

Først vil oppgaven ta for seg en teoridel, som tar leseren gjennom flere forskjellige faktorer som kan være en del av skadeårsaken vi ser på mellomleggsringen. Dette er etterfulgt av resultatdelen hvor de faktiske forholdene tas til betraktning. Her vil spesifikk informasjon om blant annet brennstoffanalyser, kravspesifikasjoner, driftsparametere, selve mellomleggsringen og slagkraftberegninger bli sett på.

2 Teori

2.1 Slitasje

Som på alt av mekaniske komponenter vil slitasje være et faktum, dette gjelder også på maritime dieselmotorer. Motoren blir under drift utsatt for en mengde forskjellige typer påvirkninger, som igjen er med på å lede til slitasje og skader. Alt fra fuktighet, forurensninger i luften, trykk- og temperaturforskjeller, til brennstofftype, vedlikehold og motorens belastningsnivå er faktorer som er med på å føre til slitasje på mellomleggsringen.



Figur 2-1: Slitt mellomleggsring til venstre, sammenlignet med lite brukt til høyre.

Ifølge Geir Fiskaa i boken operasjoner og drift av maskinerisystemer kan slitasje defineres som:

Masse eller volum materiale flyttet eller forskjøvet fra et legeme som er utsatt for gjentatte påvirkninger gjennom mekanisk kontakt med et annet legeme eller andre legemer.

Normalt sett deles slitasje inn i hovedpunktene; abrasiv slitasje, adhesiv slitasje, korrosiv slitasje og avskalling (Fiskaa, 1997). I de følgende avsnittene vil formene for slitasje mest relevant opp mot skaden på mellomleggsringen bli presentert.

2.1.1 Erosjonskorrosjon

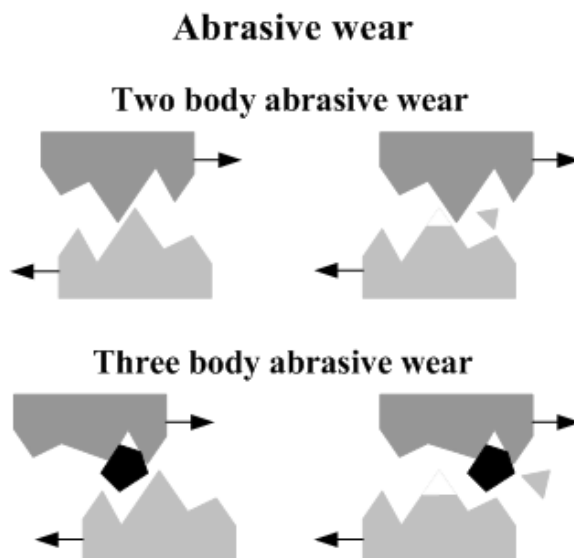
Når det forekommer mekanisk slitasje og korrosjon samtidig, heter det erosjonskorrosjon. Slitasjeomfanget ved denne typen er høy, da virkningen forsterker hverandre og kan virke uavhengig (Fiskaa, 1997). Hvis den mekaniske slitasjen gjør slik at det beskyttende overflatelaget blir fjernet, vil korrosjonen forsterke slitasjen. Dette er fordi overflaten da blir blottlagt for korrosjon, som igjen øker omfanget av korrosjonen og at materialet lettere rives løs grunnet den mekaniske slitasjen. Når deler av materialet blir revet løs, kan de føre til abrasiv slitasje, som igjen øker hastigheten på skadeutviklingen. Ofte kan man se at resultatet av dette er groper eller grøfter, slik som vi ser i mellomleggsringen (Figur 2-1). Pumper, rør, ventiler og dyser er komponenter i motoren som er spesielt utsatt for erosjonskorrosjon. En avgjørende faktor for korrosiv slitasje er hvordan drivstoffet er sammensatt. Dieselen kan inneholde organiske syrer grunnet deloksydasjon av hydrokarboner og anorganiske syrer grunnet for eksempel svovel (Almås, 2000, kap. 4).

2.1.2 Abrasiv slitasje

Denne slitasjeformen er når et mykere materiale blir revet opp og skadet av et som er hardere. Dette kan enten være grunnet løse partikler mellom komponentene, som for eksempel drivstoff, eller ruhetstopper i det ene materialet som beveger seg relativt i forhold til det andre (Fiskaa, 1997, kap. 2). Disse partiklene kalles for abrasiver og kan være både partikler utenifra eller revet fra komponentene som slites mot hverandre. Det er friksjonen som oppstår mellom materialene når de gnis mot hverandre som skaper slitasje. Abrasivene gjør ofte stor skade, da de er hardere enn det opprinnelige materialet grunnet termiske, kjemiske eller mekaniske påvirkninger (Fiskaa, 1997, kap. 2).

Tidligere var abrasiv slitasje et veldig vanlig problem, og ofte den avgjørende årsaken til slitasje (Almås, 2000). Grunnet bedre filtre for luftinntak og olje, er ikke dette et like stort problem i dag som tidligere. Økt slitasje grunnet brennstoffet og forbrenningen ved korrosjon og erosjon må regnes med, dette ved eksempelvis vann i brennstoff, dårlig smøreevne og varme (Lakshminarayanan, 2011, kap. 14).

Abrasiv slitasje deles ofte inn i to underkategorier, to-legeme og tre-legeme slitasje. Dette hvor den førstnevnte er beskrevet over, hvor et materiale er hardere enn et annet og de «slipes» mot hverandre. Tre-legeme abrasiv slitasje er slitasje mellom tre overflater. Dette når harde partikler, fra for eksempel drivstoff, er sammenklemt mellom to materialer. De visuelle skadene fra henholdsvis 2- og 3-legeme slitasje er forskjellige, to-legeme slitasje fører til en mengde riper på det mykeste materialet og tre-legeme slitasje vil ha en mer tilfeldig sammensetning (Nyhus, 2012, kap. 2).



Figur 2-2: Illustrasjon av to- og tre-kroppers slitasje. (Hentet fra internett, http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms_of_wear, 04.03)

2.1.3 Overflateutmattning

Overflateutmattning av et materiale leder til brudd etter gjentatt antall belastninger med vekslende spenning over en viss grad og tid (Thaulow, 2019). Dette kan være selv om spenningene som påvirker materialet er lavere enn materialets flytespenning. Det vil over repetitive belastninger, eller slag, føre til utmattingsbrudd. Dette illustreres i SN-kurver, se Figur 4-18. Diagrammets y-akse (σ) er lineær og x-aksen (N) er logaritmisk som da beskriver hvor avgjørende normalspenningen (σ) er for antall sykluser (N) et materiale tåler før utmattingsbrudd. Overflateutmattning kan sees på som en prosess hvor materialet blir svakere grunnet syklisk belastning, eller slag fra dysenålen som i denne oppgavens omfang. Utviklingen i overflateutmattningen kan sees ved sprekkdannelser på overflaten og at fragmenter av materialet løsner. Sprekkene kan også dannes rett under overflaten, slik at den ikke syntes før den plastiske deformasjonen har nådd et visst omfang (Thaulow, 2019).

2.2 Kavitasjon

Fenomenet kavitasjon forekommer hvis det i et fluid oppstår et trykk som er lavere enn fluidets damptrykk eller lavere enn trykket av oppløste gasser. Det vil da bli et hulrom i fluidet bestående av damp eller gass. Disse boblene som danner hulrommet vil implodere når trykket igjen stiger til over fluidets damptrykk. Det er kondenseringen av boblene ved trykkøkningen som fører til imploderingen. Når boblene imploderer blir oksygen, som i utgangspunktet var løst i vannet og ble frigjort med dampen, presset inn mellom korn grensene i metallet grunnet det høye trykket som oppstår (Grøn, 2018). Hvis imploderingen forekommer på en overflate av metall, som for eksempel mellomleggsringen i injektoren, kan det igjen føre til tæring og gropdannelser i metallet (Fiskaa, 1997, kap. 2). Kavitasjon gir fra seg en raslete lyd og kan også føre til vibrasjoner i rør og maskiner.

3 Metode

I søken etter det overordnede bildet rundt problemet ble Haakonsvern Orlogsstasjon og Ubåtbunkeren på Laksevåg brukt mye spesielt i startfasen. Der ble litteratur og praktisk erfaring ervervet av ansatte i FLO som jobber med vedlikehold på MTU sine motorer. Denne formen for informasjonsinnhenting fungerte godt, da det er enklere å anskaffe akkurat det man ønsker ved en samtale med fagpersonell enn å få svar på epost. Det å holde injektoren i hånden, demontere og montere den på verksted har vært veldig hjelpende opp mot den grunnleggende forståelsen rundt oppgavens problemstilling.

3.1 Litteratursøk

Denne oppgaven bruker i det vesentligste litteratursøk for å innhente opplysninger om mulige årsaker til slitasjefenomenet i dysen. Imidlertid er søkene delt inn i en generell del og en spesiell del som er rettet mot forskningslitteratur. Innledningsvis trengte jeg en viss bakgrunnsforståelse av motoren og dens komponenter, enda litt dypere enn hva vi har lært på diverse verkstedkurs under utdanningen, altså mer teknisk rettet. Da ble enkle søkemotorer som google, dieselworld og wikipedia brukt. I tillegg har læreboken *Operasjoner og drift av maskinerisystemer* av Geir Fiskaa vært i umiddelbar nærhet. Fiskaa skriver om generelle fenomener innenfor slitasje i innsprøytningsystemet, som har vært til hjelp for å bygge den betydningsfulle forståelsen. Den spissede teoriforståelsen har delvis kommet fra dybdesøk på søkemotoren Engineering Village, den største kilden til ingeniørfaglig litteratur på nettet. Også via Google Scholar som er en gratis nettdatabase med et stort spekter av forskjellig litteratur innenfor akademiske artikler. Merk at det ikke er funnet spesifikk faglitteratur som belyser det samme problemet som denne oppgaven, dog annen relevant informasjon er funnet via litteratursøket, se *Tabell 1*.

Tabell 1: Litteratursøk

Søkeord	Søke- motor	Søkediffe- rensiering	Treff	Dato	Brukt treff	Kriterie
Fuel injector wear tear	Google Scholar	Artikkel søk	17100	4.03	Wear as a product failure mechanism – Overview and case studies	Relevans opp mot problemstilling.
Nozzle wear fuel system	Engineering village	Eksakt setting	73	11.03	Ingen	
Fuel nozzle wear	Science direct	Avansert søk; nøkkelord, tittel	18	11.03	Ingen	
Emulsion in fuel and wear	Science direct	Avansert søk; nøkkelord, tittel	6	11.03	The role of water-in-diesel emulsion and its additives on diesel engine performance and emission levels.	Relevans opp mot problemstilling.
Cavitation nozzle fuel system	Science direct	Avansert søk; nøkkelord, tittel	26	11.03	The influence of in-nozzle cavitation on flow characteristics and spray break-up.	Relevans opp mot problemstilling.
Abrasive wear	Google Scholar	Eksakt setting	114 000	04.03	Principles of abrasive wear	Relevant opp mot skadeomfanget

3.2 Intervju

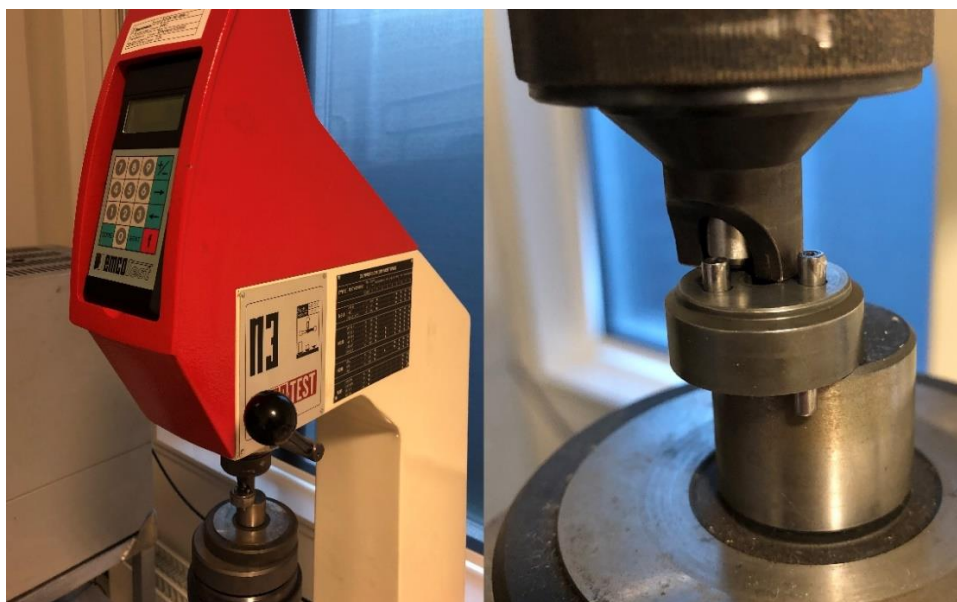
I oppgaven er det også brukt intervju som metode, hvor da åpne individuelle intervju er gjort (Jakobsen 2005, 142). Dette har blitt gjort for å få de ærligste svarene rundt problemstillingen og uten å låse intervjuobjektet til svaralternativer, men heller la flyten i samtalens gang være styrende. Ved denne «uformelle» formen for intervju er det enkelt for meg å styre dialogen til de temaene jeg trenger å få svar på, samt at å gå grundigere inn på ønskede områder er enklere enn ved kommunikasjon over for eksempel e-post.

Det har blitt utført åpne individuelle intervjuer med både respondenter og informanter, altså personer som selv har erfaringer med problemstillingen og med personer som er vet mye om problemet. Blant disse har jeg hatt en rekke dialoger med Frode Ellingsen, fagarbeider på dyseverkstedet på Haakonsværn med 40 års erfaring. Han har gitt meg et praktisk grunnlag rundt injektoren, samt at jeg har fått flere dyser og mellomleggssringer som har blitt brukt til blant annet dokumentasjon i oppgaven. Sivilingeniør Lars Magne Nerheim har vært en stor bidragsyter under åpne intervjuer om dyser og innsprøytning. Lars Magne Nerheim har tidligere erfaring fra Porsche AG, Daimler-Benz, RR Bergen Diesel og Ricardo plc. Han har vært til meget god hjelp både ved ansikt til ansikt samtaler og ved spørsmål over epost. Kristoffer Grinde, LVK/Maskinassistent ved KNM Fridtjof Nansen, med over ti års erfaring om bord. Kristoffer har under intervjuene om bord FNAN gitt meg innsyn i alt fra bunkring og dieselprøver til hans erfaringer rundt skadeproblematikken og runder i maskinrom. Magnus Meland, Kapteinløytnant, hovedinstruktør maskin på treningssenteret ved Haakonsværn har under intervjuene gitt meg innsyn i diverse MTU-manualer samt hans erfaringsbaserte syn og tyngde har gitt gode hjelpetråder opp mot problemstillingen.

3.3 Målinger

3.3.1 Hardhetsmåler

For å måle hardheten til mellomleggsringene er det brukt hardhetsmåler av typen Emcotest N3D, som tilhører Høgskulen på Vestlandet. Eksperimentet er gjort for å kartlegge om det er forskjeller i mellomleggsringene, da de kun blir ødelagte på fregatt, men ikke på mine og ubåt. Maskinen måler etter Rockwell C (HRC) standard, som gir en verdi på hardheten til objektet som måles. Det var ikke mulighet til å kalibrere maskinen med kalibreringsblokk, men det ble først gjort tester på en testblokk sertifisert av produsenten for å kvalitetssikre målingene, før mellomleggsringene ble målt.



Figur 3-1: Emcotest N3D.

3.3.2 Skyvelære

Alle størrelsesmålingene tatt av motordelene er gjort med digitalt skyvelære. Dette har en målenøyaktighet på 0,03 mm. Selv om målenøyaktigheten til skyvelæret god, er det også mulig at det har forekommet målefeil selv om dette er lite sannsynlig. Ved utregningene gjort i oppgaven blir det tatt utgangspunkt i at målene gjort med skyvelære er nøyaktige og at eventuelle målefeil er så små at de er neglisjerbare.

3.3.3 Vektberegninger

Vekten av dysenålene har blitt veid med en Mettler Toledo AG204, tilhørende Høgskulen på Vestlandet. Vekten måler i gram med fire desimaler og har en feilmargin på $\pm 0,2\text{mg}$. Dysenålene ble tørket for av for fett- og fingermerker før de ble veid. Vekten ble kalibrert før bruk og målingene tatt ansees som svært nøyaktige. Det brukes kun to desimaler, da dette er hensiktsmessig nok.



Figur 3-2: Vektberegning av dysenål fregatt

4 Resultat

4.1 Brennstoff

For å opprettholde motorens levetid, utslippsnivåer og fabrikantens oppgitte ytelser, er brennstoffkvaliteten en viktig faktor. Selv om moderne maritime dieselmotorer kan kjøres på de fleste typene av diesel som selges rundt om i verden, har fabrikantene krav og anbefalinger til hvilken kvalitet deres motorer skal kjøres på. De spesifikke verdiene for MTU 396 står i *Tabell 2*. For å unngå unødig slitasje på injeksjonssystemet, samt opprettholde motorens ytelser er det strenge krav til øvre verdier av vann, svovel, askeinnhold og viskositet til brennstoffet.

Desto høyere drivstofftrykk, jo høyere krav stilles til pasningene og toleransene for kritiske komponenter i drivstoffpumpen og injektoren. Omkring 1 μm pasninger mellom metalldelene er kravet for å sørge for at gjennomstrømningen er lav nok, grunnet det høye trykket (Lakshminarayanan, 2011, kap. 14). Til tross for de strenge kravene til pasninger og toleranser, vil en liten andel av uønskede partikler som vann, svovel, aske og annet abrasivt støv hindre smørejobben brennstoffet har i systemet. Dette stiller igjen høye krav til drivstoffiltre og separatorer for å holde nivåene gode nok slik at færrest mulig partikler kommer gjennom og fører til unødig slitasje på injeksjonsutstyret.

4.1.1 Smøreevne

Brennstoffet sin oppgave består ikke kun av å eksplodere i sylindren, men også smøre og kjøle de bevegelige delene blant annet injektoren. Smøreevne er et begrep som beskriver hvor godt drivstoffet er til å produsere en tynn «film» mellom bevegelige deler, for å hindre slitasje. 70% av mineral diesel (ren petroleumsdiesel, ikke biodiesel etc) solgt på bensinstasjoner ikke i henhold etter kravene til SAE (Society of Automotive Engineers) eller den europeiske EN 590-standarden for dieselsmøreevne (Lakshminarayanan, 2011, kap 14).

Ved raffinering av råolje er det to prosesser som ødelegger dieselkvaliteten. Fluid catalytic cracking (FCC), eller krakking på Norsk, er en metode som brukes for å omforme hydrokarboner med høy molekylær vekt til mindre molekyler. Dette fra fraksjoner av råolje. Enkelt forklart varmes tung olje med store molekyler opp, alternativt kan man også øke trykket i oljen. Det fører til at molekylene kolliderer hardere med hverandre enn under normale forhold og brytes da opp til mindre molekyler med kortere kjeder (Blindheim, 2018). Den andre prosessen som går utover dieselens smøreevne er å senke svovelmengden. Dette er for å minske partikkelformasjoner i motoren, unngå forgiftning av dieseloksidasjonskatalysatoren og -partikkelfiltrene samt at de ikke tettes. Samtidig som det også er for å minske miljøproblematikken ved sur nedbør. For å teste kvaliteten, er det mulig å ta brennstoffprøver for så å analysere disse på laboratorium. Da vil man få et bilde om brennstoffet man bruker er i henhold til motorfabrikantens kravspesifikasjoner eller Norsk Bransjestandard.

4.1.2 Vann i brennstoff

Korrosjon i drivstoffsystemer kan skyldes vann i drivstoffet. Det høye trykket moderne drivstoffsystemer opererer med, er med på å gjøre de mindre tolerante mot vann enn hva lavtrykkssystemer er (Lakshminarayanan, 2011, kap. 14). Det er flere skadetyper som er direkte forårsaket av vann, da det både kan skade drivstofftankene og motordeler. Korrosjonsprodukter kan være harde partikler som blander seg med drivstoffet og kan øke slitasjen på motordeler som mellomleggsringen i dysen. Redusert smøreevne, kavitasjon, korrosjon, mikrobiologisk vekst og vann er svekkende faktorer og kan være en av årsakene til skadene på mellomleggsringen i dysen.

Mikrobiologisk vekst, altså bakterier, mikrober, alger og mugg med fellesbetegnelsen «dieseldyr» kommer grunnet for mye vann i dieseltankene. Dieseldyrene lever av hydrokarboner som finnes i diesel i kombinasjon med vann. Grunnen til at den mikrobiologiske veksten overlever og vokser i tanken er fordi vann er tyngre enn diesel som skaper et sjikt mellom fluidene i bunn av tanken. Da den mikrobiologiske veksten reproducerer seg i en eksponentiell vekst ved gode forhold er en av grunnene til at vann i diesel er svært problematisk (Bailey, 2018). Når dieseldyrene har latt seg vokse, vil de bli tatt

opp av fødepumpen og så inn til høytrykkspumpen via filtre og til motorens dyser. Der kan de være med på å skade deler som dysenål, mellomleggsring og tette filtre som igjen vil gi problemer ved driften av maskineriet. Denne mikrobiologiske veksten skaper organiske syrer som svovelsyrling (H_2SO_3) og svovelsyre (H_2SO_4), dette er syrer som reagerer med de fleste metaller, samt vann under høy varmetvikling. Dette er igjen med på føre til korrosjon i systemet som kan lede til problemer ved injeksjonskomponentene, ved å øke slitasjehastigheten samt sannsynligheten for tetning grunnet abrasiv slitasje (Lakshminarayanan, 2011, kap. 14). Tettheter i systemet kan igjen føre til utvidet slitasje på motorkomponentene, inkonsekvent drivstofftilførsel som igjen gir variasjoner i forbrenningen og økte vedlikeholdskostnader (McFarlane, 2011). Hvis det er vann i drivstoffet kan en oppleve kavitasjon tidligere enn ved rent drivstoff. Dette er fordi vann har lavere kokepunkt enn diesel. Kavitasjon vil da kunne forekomme spesielt i injeksjonsdysen grunnet det store trykkfallet (Se kapittel Kavitasjon). Bakteriene sin evne til å fore på passerende bakterier i drivstoffet er med på å gjøre den mikrobiologiske veksten vanskelig å håndtere når den først forekommer.

Vann kan komme som et resultat av for eksempel kondensering i tanken, enten fra påfylling, lufting og/eller temperaturforskjeller. Det kan også være grunnet flere andre årsaker som dårlig tetning til tankene, menneskelige feil, eller vann i systemet. For å hindre nettopp at vann i systemet skal komme inn i motoren skiller man vannet fra oljen i lagertanken før det går videre til dagtank. Dette kan enten gjøres med separatorer, eller ved bruk av vannfilter. På fregatt og minefartøylene brukes *Westfalia* separatorer. Denne typen separator er basert på prinsippet rundt sentrifugering av væsker. Jobben til separatoren er å skille forskjellige væsker fra hverandre, eller faste stoffer ut av væsken. Enkelt forklart er det en sylindrisk bolle som roterer inni en større beholder. Grunnet rotasjonen vil fluidet bli kastet bort fra rotasjonens sentrum, den delen av væsken med høyest tetthet, ρ (rho), vil samles i den roterende del sin periferi. Hvor da lettere deler av væsken vil bli igjen ved rotasjonssentrum. Som kjent har vann tetthet rundt 1000 kg/m^3 og marin gassolje ca. 855 kg/m^3 , ut ifra prinsippet til separatoren vil da vannet ende i periferien og oljen akkumuleres i sentrum hvor den samles. Slik fungerer sentrifugalseparator systemet enkelt forklart. Hvis derimot separatoren ikke fungerer slik den skal, kan man risikere for høye verdier av vann og partikler i drivstoffet. Dette kan testes ved å analysere dieselprøver fra fartøylene.

4.1.3 Viskositet

Drivstoffets viskositet er et mål på dens indre friksjon, dette måles ofte i pascalsekund ($\text{Pa}\cdot\text{s}$) eller i centipoise hvor $100 \text{ centipoise} = 0,1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Da viskositet er temperaturavhengig, blir det testet ved 40°C som er standard etter EN ISO 3104. Hvis en har høy viskositet på oljen vil den fysisk skille de bevegelige delene i motoren som igjen hindrer slitasje, ved for lav vil det motsatte være tilfelle. Hvis man har for lav viskositet er det ofte grunnet for høy forvarmingstemperatur, som kan føre til sen innsprøytning, lekkasje, slitasje og rivning/skader (Ansgar, 2016, kap. 3). Slitasjen grunnet for lav viskositet kan oppstå grunnet den reduserte smøreevnen til drivstoffet.

For høy viskositet kan gi for høyt trykk i pumpene som kan forplante seg videre i systemet mot innsprøytningen. Samtidig gir store dråper en fordampning som tar lengre tid og øker risikoen for varmebelastning, dette grunnet ufullstendig forbrenning og etterbrann (Ansgar, 2016, kap. 3). Både for høy og for lav viskositet er skadelig for drivstoffsystemet, men fordi lav viskositet som oftest er mer skadelig enn for høy er det ønskelig med heller litt for lav temperatur om man har valget.

4.1.4 Kravspesifikasjoner brennstoff

MTU har en rekke krav til drivstoffkvaliteten som skal brukes på deres motorer. De har gitt tillatelse til spesifikke drivstofftyper, samt utgitt en oversikt over hvilke verdier drivstoffet må bestå av for å være godkjent. Dette har de utgitt i *Fluids and Lubricants Specifications*, hentet fra deres nettsted www.mtu-online.com. MGO (DMA), F-75 og F-76 er drivstoffkvaliteter Forsvaret bruker og som er godkjent til bruk på MTU 396 (MTU Friedrichshafen GmbH, 2012, side 41, 47 og 50).

4.1.5 Brennstoffanalyser

Det har blitt foretatt drivstoffanalyser av prøver tatt på KNM Thor Heyerdahl, den 25.04.2019. Dette for å kontrollere om drivstoffet inn til motoren er godkjent ut ifra kravspesifikasjonene oppgitt av MTU. Se *Tabell 2*. Prøvene er analysert av FLO Kjemi-Material avdeling Kjeller. Teknisk rapport for analysen finnes i vedlegg A. Prøvene er tatt etter separator og før og på drivstoffilteret. Ved å teste brennstoffet på disse punktene kan man få et innblikk i om en av årsakene kan være vann i drivstoff eller drivstoffets smøreevne opp mot skadeomfanget på mellomleggsringen. Da separatorsystemet skal fjerne vannet i drivstoffet, får man innsyn i dens virkningsgrad ved å sammenligne resultatene fra analysen med kvalitetssertifikatet fra leverandør ved bunkring. Sertifikatet levert ved bunkring oppgir 60 mg/kg vanninnhold, se vedlegg A.

Tabell 2: Brennstoffprøver KNM Thor Heyerdahl, 25.04.19

Egenskap	Enhet	På filter, motor	Før motor	Før separator	Krav MTU	Testmetode
Utseende		Uklar	Klar og ren	Klar og ren		Visuelt
Farge		Grågrønn	Mosegrønn	Mosegrønn		Visuelt
Viskositet @ 40°C	mm ² /s	3,282	3,277	3,272	Mellom 1,5-4,5	ASTM D7042
Vanninnhold	mg/kg	40	40	40	Max 200	ASTM 6304C
Partikkelinnhold	mg/kg	22,98	3,06	2,80	Max 24	ASTM D6217



Figur 4-1: Bilde fra prøvetaking av brennstoff ved KNM Thor Heyerdahl, 25.04.2019.

Jonatan Husebye og Lars Erik Egeland tok en slik analyse på KNM Hinnøy i sin Bacheloroppgave *Elektronisk Innsprøyting i Marinen*, levert Mai 2018. Resultatene fra deres analyse er i *Tabell 3* og teknisk rapport i vedlegg A. Deres analyse tas med for sammenligning opp mot den tatt i år på KNM Thor Heyerdahl, dette for å se en eventuell korrelasjon mellom skadeomfanget og drivstoffkvaliteten på de to fartøysklassene.

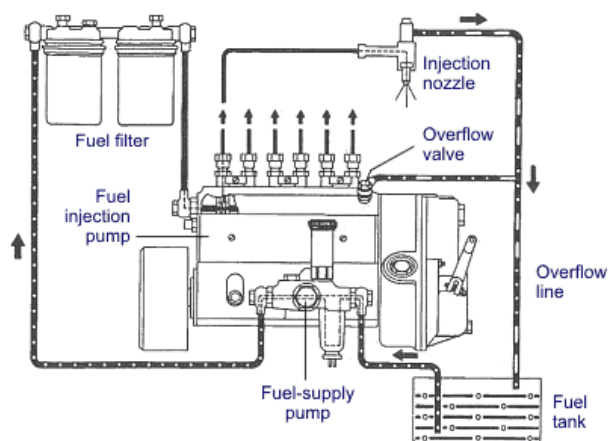
Tabell 3: Brennstoffprøver KNM Hinnøy

Egenskap	Enhet	Lager-tank	Filterstasjon	Separator	Krav MTU	Testmetode
Utseende		Klar og ren	Klar og ren	Klar og ren		Visuelt
Farge		Grønn	Grønn	Grønn		Visuelt
Viskositet @ 40°C	mm ² /s	3,271	3,288	3,272	Mellom 1,5-4,5	ASTM D7042
Vanninnhold	mg/kg	47,7	59,6	71,5	Max 200	ASTM 6304C
Partikkelinnhold	mg/kg	2,46	3,30	1,50	Max 24	ASTM D6217

Prøvene tatt om bord både Thor Heyerdahl og Hinnøy tilfredsstiller kvalitetskravene for Marin Gassolje gitt i Norsk Bransjestandard for oljeprodukter mht analyser utført, ref teknisk rapport Vedlegg A. Dette med unntak av prøven tatt på filter ombord Thor Heyerdahl, den var uklar og inneholdt mye partikler. Prøveresultatene fra filteret overstiger ikke MTU sin maksbegrensning, men er nesten 10 ganger så stor som prøven tatt før motoren. Dette kan være grunnet at motoren ikke var i gang da testene ble tatt og drivstoffet som hadde ligget i filteret over tid ble testet. Testpunktet «før motor» og «på filter» er ikke mer enn 5-6 meter i rørlengde fra hverandre. Det er rimelig å anta at prøvene tatt på filteret ikke er representative, da partikkelinnholdet var unormalt høyt i forhold til de andre prøvepunktene. Vanninnholdet er lavere på analysene fra Heyerdahl enn Hinnøy og holdes stabilt gjennom prøvepunktene på fregatten. Dette symboliserer at separatorsystemet er velfungerende og brennstoffet ikke inneholder for mye vann, som igjen kaviterer enklere, ref kap. 2.2.

4.2 Brennstoffsystemet

Innsprøytningsystemet på MTU 396 er et PLN-system, altså Pump Line Nozzle. PLN systemet har vært ledende i dieselindustrien i mange tiår, før det har blitt erstattet av common rail (CR) innsprøytningsystemer i nyere motorer. Konfigurasjonene i PLN-systemet har blitt utviklet over tiden, dette med forskjellige tekniske og økonomiske justeringer, men prinsippet er fortsatt det samme. Enkelt forklart er det en mekanisk styrt høytrykkspumpe som drives av kamakslingen, hvor igjen brennkammerets injeksjonsdyse åpnes ved et bestemt trykk laget av høytrykkspumpen.

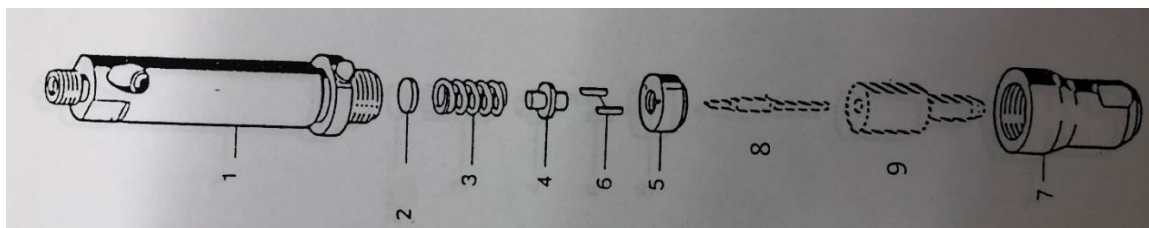


Figur 4-2: Enkel skisse av det klassiske PLN innsprøytningsystemet fra MTU 396 (Hentet fra internett: https://www.dieselnet.com/tech/diesel_fi_pln.php 05.03).

4.2.1 Injeksjonspumpen

Fra fødepumpen, også kalt dieselpumpen, blir det levert drivstoff under lavt trykk til injeksjonspumpen. Her økes drivstofftrykket opptil 300 bar. Injeksjonspumpen leverer ut en bestemt mengde drivstoff til hver injektor. Injeksjonspumpen, også kalt høytrykks-pumpen står likt plassert på modellene av MTU 396 på henholdsvis fregatt, minefartøy og ubåt (Ellingsen, 2019). Pumpen står mellom sylindrerbankene, se vedlegg A for figur. Brennstoffinjektoren står sentrisk plassert i sylindertoppen mellom luft- og eksosventilene på fartøysklassene. Pumpene er drevet med motorens halve turtall via gir (MTU Friedrichshafen GmbH, 2003, B11 side 2). Injeksjonspumpen på Fregatt og Minefartøyene sine skiltnumre forteller at stempeldiameter på plunsjeren og kamakselens innstilling er lik. Se vedlegg A for skjermbilde av mailkorrespondanse med Svein Hamre i Maritim Diesel som bekrefter dette. Da kamprofilen er den samme i begge pumpene, tas det utgangspunkt i at akselerasjonen er proporsjonal med turtallet (Nerheim, 2019). At injeksjonspumpene er like, har samme plassering og modellene av MTU 396 er fire-ventilerte, betyr at høytrykksrørene har lik lengde og ved likt turtall og pådrag må det antas samme hydrauliske puls hos fartøysklassene.

4.2.2 Injektoren/dysen



Figur 4-3: Fuelinjektor fra MTU 396

Drivstoffet går via høytrykksrør tilkoblet i pkt 1 og inn i dysen (pkt 9) hvor dysenålen (pkt 8) blir holdt på setet grunnet kraften fjæren presser med. Dette via trykksbolten (pkt 4) som blir presset av trykkfjæren og skyver videre på dysenålen. Forspenningen på fjæren, altså fjærkraften regulerer hvilket trykk som skal til for at dysenålen løftes og åpner dysen. Dette blir regulert av shims (pkt 2). Antall shims er forskjellig i injektoren hos mine, ubåt og fregatt, da de opererer på forskjellige drivstofftrykk. Tilførselsboringer i

dyseholderkroppen fører drivstoff til trykkammeret i dysen (Se Figur 4-4, de to små hullene i bildet øverst til høyre). Drivstoffet fyller opp trykkammeret i dysen (Figur 4-12), når trykket overstiger kraften fjæren presser med, løftes dysenålen opp fra setet det hviler på. Dette fører til en kontrollert forstøvning av drivstoffet inn i forbrenningskammeret. Det vil si at dysens innsprøytning aktiveres av drivstofftrykket. Når tilførselen fra injeksjonspumpen stopper, blir fjærkraften større enn trykket fra drivstoffet, som presser dysenålen tilbake til setet og stenger tilførselen av drivstoff til forbrenningskammeret. Noe av drivstoffet lekker mellom dysenålen og nålhuset (se Figur 4-12) for å kjøle og smøre injektoren. Se bilde nummer to fra venstre i Figur 4-4, hvor dysenålen syntes i midten av mellomleggsringen. Dette drivstoffet blir samlet av injektorens returlinje og går tilbake til drivstofftanken for så å bli brukt igjen.

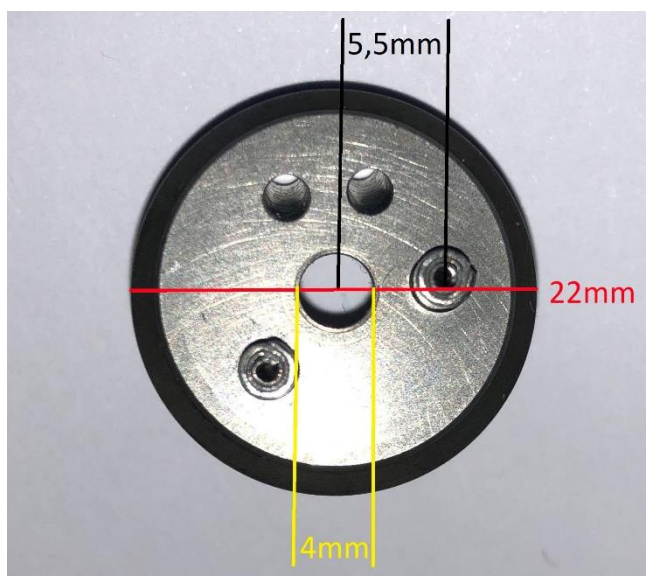


Figur 4-4: Ubrukt mellomleggsring, dyse og dysenål tilhørende MTU 396 fra Nansen klasse fregatt.

4.2.3 Forstøvning

Injektoren har en ventilmekanisme som gjør at drivstofftrykket er høyt nok til at det former en forstøvning, hvis ikke hadde drivstoffet dyppet inn i sylindere. Dråpene vil ikke antennes og derfor bli borte via røyk. Injektoren brukt i MTU-396 består av dysenål med syv hull på fregatt og fem på mine (MTU Friedrichshafen GmbH, 2003, B11 side 6). Det høye trykket er nødvendig for at forstøvningen skal kunne penetrere den høyt komprimerte luften i forbrenningskammeret.

4.3 Mellomleggsring



Figur 4-5: Dimensjoner ubrukt mellomleggsring.

Figur 4-6 viser at det ikke er store forskjellene i mellomleggsringen tilhørende fregatt og minefartøy. Mellomleggsringen på ubåt er lik den til minefartøyene. Hvis man ser på forskjellene er det de to styrepinnene tilhørende fregatt, som ikke er på ubåt og mine. Styrepinnene har i oppgave å holde ringen på plass, slik at drivstoffet går gjennom tilførselsboringene og inn til trykkammeret i dysen. På henholdsvis ubåt og mine er det en «vollgrav» rundt dysekroppen hvor styrepinnene til fregatt treffer, se Figur 4-7.



Figur 4-6: Mellomleggsring Fregatt t.v, minefartøy t.h. Her ser man tydelig forskjell ved at fregatten har styrepinner.



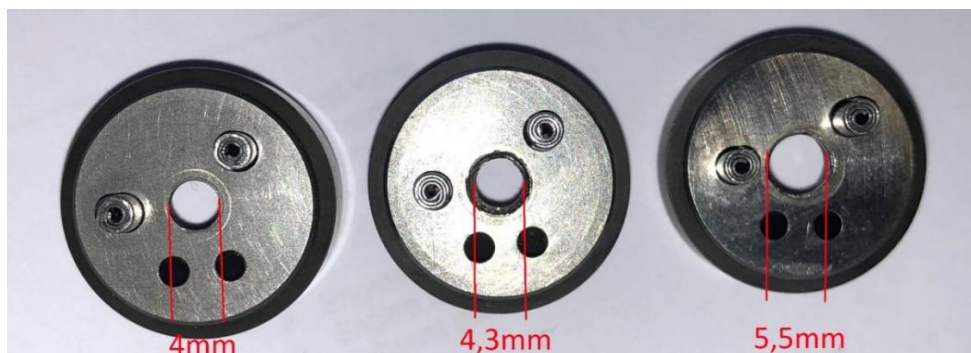
Figur 4-7: Dyse fra Fregatt t.v, fra Mine med "vollgrav" t.h.

4.3.1 Skadet mellomleggsring



Figur 4-8: Skadet mellomleggsring.

Figur 4-8 viser en skadet mellomleggsring brukt på fregatt. Hullet i midten er nå 5,5 mm i diameter, sammenlignet med 4 mm hos en ny ring (Figur 4-5). Det er ikke veldig synlig på bildet, men i virkeligheten ser man tydelig at stålet har fått en blånyanse. Dette i området rundt senterhullet og styrepinnene hovedsakelig, ved den mørke nyansen på bildet. Legeringstilsetningen brukt i stålet, krom, oksideres når utsatt for høy temperatur og blir blått (Gjengedal, 2019). Mellomleggsringen blir under produksjon utsatt for kromering, å innføre krom i overflaten av stål for å øke materialets evne til å motstå erosjon og korrosjon. Metallet blir beskyttet av en tynn film av Cr_2O_3 , kromoksid, som hindrer det å bli angrepet av oksiderende syrer (Kofstad, 2018).



Figur 4-9: Skadeforløpet, fra ny til ødelagt. Merk at disse ringene er pusset/vasket for sot.

I Figur 4-9 ser man hvordan skaden utvikler seg på Nansen klasse fregatt, fra ubrukt til at hull diameteren er større enn dysenålens glideflate og den kan flyte gjennom senterhullet. Her ser man jevn slitasje som tyder på oppbygning av dislokasjoner grunnet anslagsenergien som blir overført fra dysenålen til mellomleggsringen hver gang den åpner. Slitasjefenomenet er selvforsterkende. Dette er grunnet for hvert fragment som rives av mellomleggsringen, får dysenålen litt høyere løftehøyde og slutt hastighet samt mindre anleggsareal energien fordeles utover. Slik som beskrevet i kapittel 4.8.

Når mellomleggsringen har nådd skadeomfanget tilsvarende ringen til høyre i Figur 4-9, flyter glideflaten gjennom hullet, illustrert i Figur 4-10



Figur 4-10: Illustrert dysenål gjennom senterhull på mellomleggsring Fregatt.

Når det oppnås slitasje på mellomleggsringen og dysenålen får en høyere løftehøyde enn hva den er designet for, er den motortekniske konsekvensen for tidlig innsprøytning og feiltetting (Nerheim, 2019). Materialet nålen spiser opp fra ringen går i dysen og kan tette denne, som hindrer den riktige brennstoffmengden å nå forbrenningskammeret (Ellingsen, 2019). Ødelagt mellomleggsring kan sees ved utslag på for høy eksostemperatur på gjeldende sylindere, Frode Ellingsen utdyper at det ikke gir redusert yteevne om kun 1/12 injektorer har slitt mellomleggsring.

4.4 Hardhetsmålinger

Det har blitt gjort et labforsøk og tatt hardhetsmålinger av mellomleggsringer. En ødelagt og en ny fra fregatt og en ny tilhørende minefartøy har blitt målt. Årsaken til at eksperimentet ble utført er for å kartlegge om ringene har forskjellig hardhet, noe det kunne se ut til da det kun er hos fregatt de blir «spist» opp. I utgangspunktet skal hardheten på ringene være lik, da de begge er produsert hos Bosch med kun et siffer forskjell i serienummeret, grunnet styretappene. Da maskinen ikke ble kalibrert er HRC skalaen noe høy, men resultatene viser liten måleforskjell på de forskjellige ringene. Det ble tatt tre målinger på hver ring, se Figur 4-11, for å kartlegge eventuelle forskjeller. Det er tilnærmet ingen målbar forskjell på ringene, se *Tabell 4*. Resultatene viser at det ikke er noen signifikant forskjell og de relative målingene er høyst adekvate opp mot oppgavens problemstilling. Funnet i eksperimentet tyder på at feilen ikke ligger utelukkende på at fregattens mellomleggsring er svakere enn minefartøyene. Det kan dog diskuteres om den burde vært hardere grunnet annerledes spesifikasjoner på dysenålen (Se Kap. 4.6), samtidig som den ikke må være så hard at den sprekker. Uavhengig av dysenålens krefter mot mellomleggsringen, er de av lik kvalitet på både minefartøyene og fregattene.

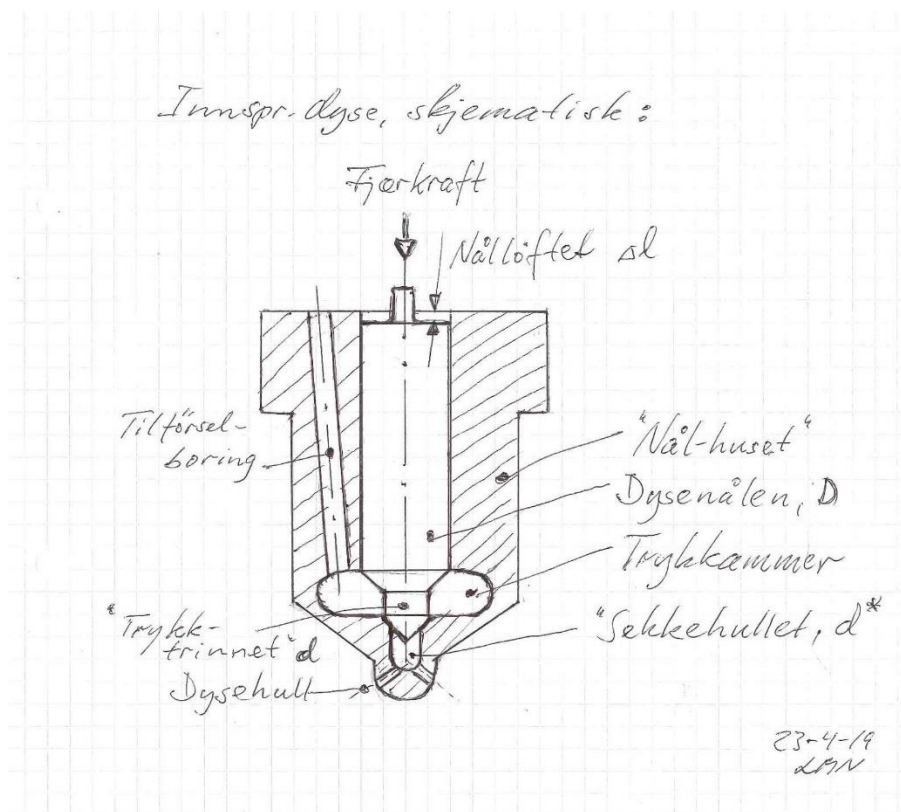
Tabell 4: Hardhetsmåling mellomleggsringer

	Fregatt ødelagt	Fregatt ubrukt	Mine ubrukt
Mellom senterhull og ytterkant	111,0	112,9	111,5
Mellom tilførselsboringer	116,4	118,1	113,6
Inntil senterhullet	111,0	113,6	111,6
Snitt	112,8	114,8	112,3



Figur 4-11: Hardhetstest

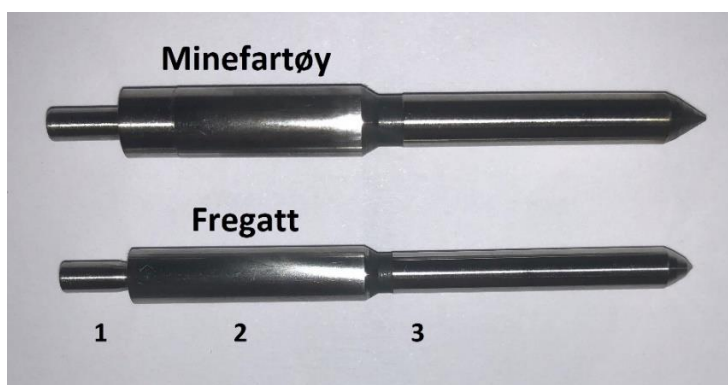
4.5 Snittegning av dyse



Figur 4-12: Snittegning av dyse, laget av Lars Magne Nerheim.

Figuren viser snittegning av en dyse, tegnet av Lars Magne Nerheim. Tegningen illustrerer flere av målepunktene som det blir referert til i oppgaven. Nålløftet, eller løftehøyden ΔL er hvor høyt nålen løftes fra setet til toppen av glideflaten stopper i mellomleggsringen. Glideflatens diameter er på tegningen merket «Dysenålen, D». Drivstoffet strømmer gjennom tilførselsboringen og inn i dysens trykkammer. Når trykket her overstiger kraften fjæra presser med fra toppen, løftes dysenålen fra setet. Straks nålen har løftet seg den minste avstand opp fra setet og innsprøytningsstrykket forplantes ned i sekkehullet, virker det sterkt stigende trykket på tversnittarealet gitt av D. Slagimpulsen til dysenålen vil da avhenge av den hydrauliske trykkpuls fra pumpa, hvor høyt innsprøytningsstrykket har steget, hvor stor løftehøyden ΔL er, massen til nålen og dysenålens anslagsareal mot mellomleggsringen. Her vil D og ΔL spille en stor rolle, mange fabrikanter foretrekker en stor D i kombinasjon med en liten ΔL , enn omvendt (Nerheim, 2019). Flowarealet over setet nede i dysen bestemmes av forholdet mellom D og diameteren til sekkehullet og løftehøyden ΔL .

4.6 Dysenål



Figur 4-13: Dysenåler fra fregatt og minefartøy som viser glideflate (2), trykktrinndiameter (3) samt den tynne delen som går gjennom mellomleggsringen (1).

Dysenålen er designet slik at bredden på glideflaten, pkt 2 i Figur 4-13 hindrer at nålen løfter seg gjennom senterhullet i mellomleggsringen. Nålen løftes opp til glideflaten treffer mellomleggsringen. Diameteren til glideflaten tilhørende fregatt er 5 mm og den

tynne øverste delen (pkt 1) er 2,9 mm. Dysenålens diametere tilhørende minefartøyene er henholdsvis 6 og 2,9 mm. Trykktrinndiameter (pkt 3) er 3,61 mm på fregatt og 4,29 mm på mine. Større glideflatediameter gir et større anslagsareal hvor kreftene fra dysenålen fordeles utover. Mindre diameter på glideflaten gir et høyere flatetrykk. Det å fordele kreftene utover et større område gir mindre punktbelastning ved lik anslagsenergi og kan virke positivt på komponentenes levetid.

Tabell 5: Dimensjoner og masse dysenål

	Fregatt	Minefartøy
Glideflatediameter, D [mm]	5	6
Trykktrinndiameter, d [mm]	3,61	4,29
Forholdet D/d	1,389	1,398
Vekt [g]	6,22	8,61

Forholdet D/d bestemmer forholdet mellom lukningstrykket og det innstilte åpningsstrykket. Lukningstrykket vil si hvor lavt innsprøytningstrykket faller før fjærkraften overstiger trykkraften og lukker dysen. Forholdet er viktig for dysens konstruksjon da man ønsker høyest mulig lukningstrykk for å sørge for god forstøvning av brennstoffet.

4.7 Driftsparametere

En viktig faktor til hvorfor mekaniske deler blir ødelagt er naturligvis hvordan de blir brukt og under hvilke forhold de opererer. Mine, ubåt og fregatt sine MTU 396 motorer kjøres forskjellig, dette når det gjelder alt fra drivstofftrykk til temperaturer og operasjonsmønstre.

4.7.1 Operasjonsmønstre

Fartøysklassene har flere operasjonsmønstre som krever forskjellige turtall og belastninger for systemene. Da MTU 396 blir brukt som generatormotor på fregatt og hovedmotor på minefartøyene står de fremfor differanser i belastningsmønsteret.

4.7.1.1 Fregatt

Dieselgeneratorene på Fregatt, MTU 396, går på fast turtall 1800 rpm. Figur 4-14 er et skjermbilde tatt på KNM Fridtjof Nansen 29.03.2019. Dieselgeneratoren hadde vært i kontinuerlig drift i over 20 timer og samtlige driftsparametere var slik de skulle. Dette ifølge LVK/Maskinassistent Kristoffer Grinde med over ti års erfaring fra Fregattvåpenet.



Figur 4-14: Skjermbilde fra maskinkontroll på KNM Fridtjof Nansen.

4.7.1.2 Minefartøy

Turtallene hovedmotorene på minefartøyene går på i de forskjellige operasjonsmønstrene er hentet fra Jonatan Husebye og Lars Erik Egeland sin Bacheloroppgave *Elektronisk Innsprøyting i Marinen*, levert Mai 2018. De har fått sine tall fra Maskinoffiser R. Brandsrud i 1. Minedykkerskvadron.

De fire driftskondisjonene sett på er *transitt*, *8 knop*, *sveip* og *minejakt*. Turtallene er antatt ut ifra optimale sjøforhold slik at effektbehovet er stabilt. Det er kun et av operasjonsmønstrene, *transitt*, som overstiger det konstante turtallet motoren kjøres på Fregatt. Transittthastighetene under operasjoner er kalt *8 knop* hvor motorene går på 1200 rpm. Da *sveip* og *minejakt* også er operasjonsmønstre fartøyene går på over lengre tidsperioder (Egeland, 2018, s. 7) sammen med *8 knop*, er det antatt at midlere turtall er 1200 rpm. Ved at Fregatt går konstant på nesten fullt turtall og høy last betyr at trykkpulsene fra høytrykkspumpen er jevnt høyere enn hos mine.

Tabell 6: Turtall minefartøy

Operasjonsmønster	Turtall hovedmotor
Transitt	2x1930 rpm
8 knop	2x1200 rpm
Sveip	2x1400 rpm
Minejakt	2x1200 rpm

4.7.2 Trykk

Drivstofftykkene på MTU 396 motorene er forskjellig på fregatt, ubåt og mine. Tallene er hentet fra Frode Ellingsen, fagarbeider ved maskinverkstedet på Haakonvern med over 40 års erfaring i feltet.

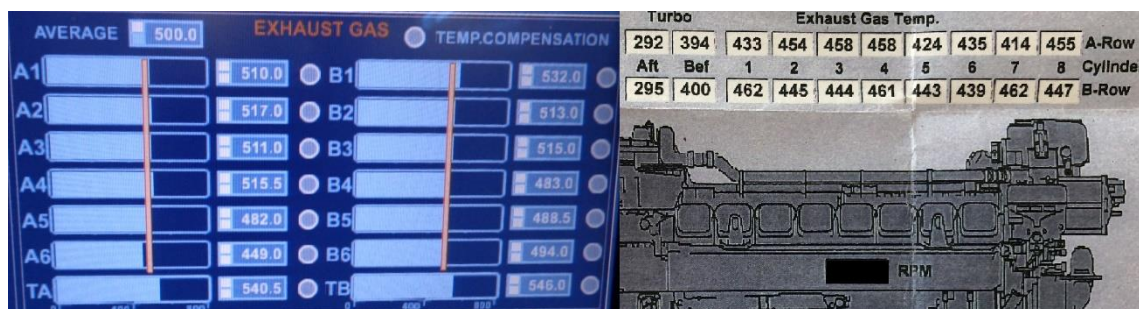
Tabell 7: Åpningstrykk innsprøytningsdyser

	Fregatt	Minefartøy	Ubåt
Trykk [bar]	300	270	240

Det høye trykket i innsprøytningsdysene kan føre til kavitasjon grunnet trykkfallet. Dette er grunnet strømningsforhold hvor det er væskeakselerasjon eller retningsforandring som kan føre til lokale undertrykk i væsken og strømningskavitasjon. Ved slike tilfeller kan det være stor avstand fra hvor kaviteten (hulrommet) oppstår og hvor de imploderer og skaden oppstår (Fiskaa, 1997, kap. 2). I tillegg til de store trykkforandringene i dysen er mellomleggtringen i kontakt med drivstoffet som igjen kan vibrere grunnet dysenålens kontinuerlige bevegelse og danne et pulserende fluidtrykk. Dette kan da føre til vibrasjonskavitasjon og vil som strømningskavitasjon kunne være en årsak til korrosjonen på mellomleggtringen (Fiskaa, 1997, kap. 2). Da det ikke er mer enn 10% forskjell i åpningstrykkene til mine og fregatt i tillegg til at skadeomfanget kun er et problem på fregatt, sees det på som usannsynlig at kavitasjonen grunnet trykket alene forårsaker skaden, men kan være en av faktorene som spiller inn.

4.7.3 Temperatur

Eksostemperaturene tilhørende motoren stående på fregatt er målt i samme øyeblikk som turtallet, altså ved samme kjøring og driftskondisjoner. Snittemperaturen til dieselgeneratoren på Fregatt er som vist til venstre i Figur 4-15, 500°C. Bildet til høyre i samme figur er et øyeblikksbilde fra testkjøring av MTU 396 tilhørende Ula klasse ubåt. Dette er en innkjøringstest gjort på land før motoren settes tilbake i fartøyet, for å teste samt kartlegge eventuelle feil. Testen er gjort på en ny-overhalt motor. Da testen er gjort på land tas det utgangspunkt i standardatmosfære 1 atm. Ut ifra bildet ser man at motoren har en gjennomsnittlig eksostemperatur på 445,9°C, ved kjøring som gjenspeiler det normale driftsmønsteret til MTU 396 om bord på ubåt. Motoren på minefartøy kjøres noe roligere belastning og turtallmessig i snitt enn på ubåt, slik at det er rimelig å anta at temperaturen er i nærheten av ubåt. Eksostemperaturen vil ut ifra antakelsen være lavere på mine enn på fregatt.



Figur 4-15: Eksostemperaturer MTU 396 tilhørende Fregatt t.v, Ubåt t.h

4.8 Dysenålens slagkraft

Innsprøytnings trykkforløpet, den hydrauliske pulsen, er grunnlaget til nålens slagkraft opp i mellomleggsringen. Fjærkraften og friksjonen holder imot når nålen slår opp mot anlegget. Dette sammen med glideflatens diameter, nålens løftehøyde, dets størrelsesforhold og anleggsflateareal utgjør hvilken kraft som blir overført fra nålen til mellomleggsringen. Da høytrykkspumpene på minefartøyene og fregatt har like skiltnumre og plassering må man gå ut fra at de leverer lik hydraulisk puls ved samme leveringsmengde, altså turtall og pådrag.

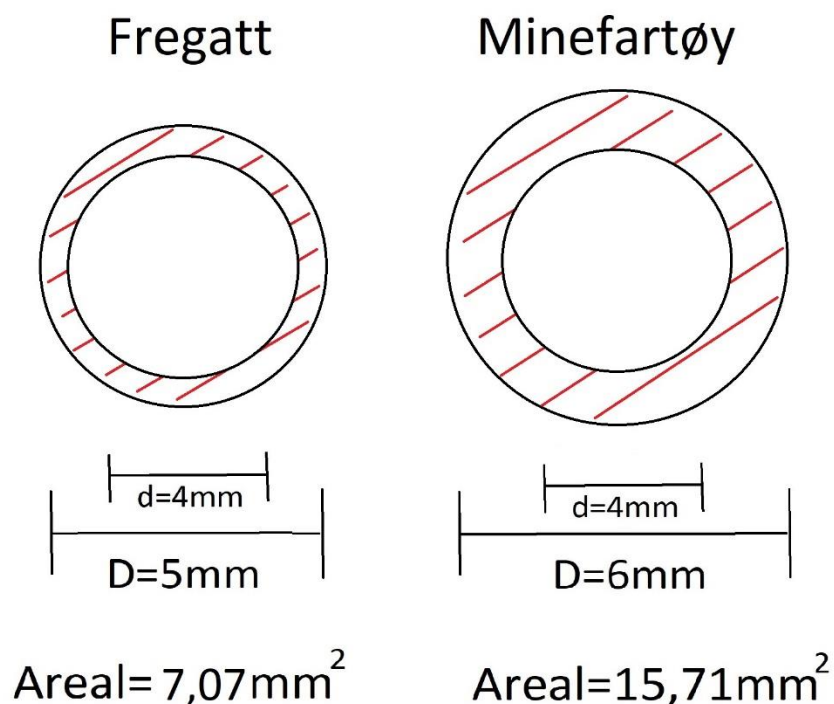
For å få et best mulig bilde av kraften dysenålen slår med, er det flere faktorer som spiller inn. Friksjonen i nålhuset, dysenålens geometri, fjærstivheten, dyse-hullstørrelser og -vinkler, flow areal og sekkehullstørrelse. Dette er for kompliserte forhold og beregninger for denne oppgavens omfang. Angående selve slagkraften F , kommer den av:

$$F = \text{Impuls} / \Delta t \text{ [kg m/s} * 1/\text{s} = \text{kg m/s}^2 = \text{N]}$$

Hvor Δt er retardasjonen når dysenålen slår mot mellomleggsringen, som antas likt i begge tilfellene da det bestemmes av oljefilmtykkelsen og E-modulen til mellomleggsringene som er like. Oljefilmtykkelsen, altså viskositeten, endres ut ifra temperatur. Da eksostemperaturene målt er såpass like, antas det at forvarmingstemperaturen til motorene er tilnærmet like. Går da ut ifra at oljefilmtykkelsen mellom dysenålen og mellomleggsringen er lik på fregatt og mine.

Ifølge Lars Magne Nerheim er, ut fra erfaring, glideflatdiameter D opp mot anleggsflaten, ΔL og kraften F ut ifra åpningstrykket avgjørende i dette tilfellet.

4.8.1 Anleggsflate



Figur 4-16: Anleggsflate sett ovenfra, målestokk 10:1.

Figur 4-16 viser anleggsflaten sett ovenfra hvor kreftene fra dysenålen virker på mellomleggsringen. Det skraverte røde området illustrerer arealet av glideflaten som treffer mellomleggsringen. Den indre diameteren på 4 mm er senterhullet til mellomleggsringen og den ytre diameteren på henholdsvis 5 og 6 mm er dysenålens glideflater. Arealet av den skraverte flaten blir:

$$A = \pi(R^2 - r^2)$$

$$A_{\text{Fregatt}} = 7,07 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{Mine}} = 15,71 \text{ mm}^2$$

For hver newton per kvadratmillimeter (N/mm²) er det 10 bar. Dette gir at drivstofftrykket i motoren på fregatt tilsvarer 30 N/mm² og 27 N/mm² på minefartøyene sine motorer. Da anleggsflaten til fregatt er 55% mindre enn minefartøyene, har slagkraften fra

dysenålens glideflate et mye mindre område å fordele kreftene utover mellomleggsringen. Dette sier at fregatt sin mellomleggsring får en større punktbelastning enn hos mine, kun ut ifra anleggsflaten og åpningstrykket. Når skaden utvikler seg, øker diameteren til hullet i mellomleggsringen og løftehøyden, se Figur 4-9. Ved at den indre diameteren øker fra 4 til 4,35 mm, halvveis til glideflaten i teorien kan flyte gjennom ringen, vil anleggsarealet gå fra 7,07 mm² til 3,73 mm². Selv om anleggsarealet endres, vil slagkraften grunnet åpningstrykket fortsatt vil være likt. Dette gir skadeomfanget en akselererende effekt.

4.8.2 Løftehøyde

Dysenålens løftehøyde ΔL er som nevnt i Kap. 4.5 avstanden nålen løftes fra setet til toppen av glideflaten treffer mellomleggsringen. Dysenålen akselereres over hele distansen ΔL , som betyr at størst løftehøyde gir høyest sluttastighet og da impuls opp i mellomleggsringen. Går ut ifra at akselerasjonen er proporsjonal med turtallet i begge pumpene da kamprofilen er lik.

Tabell 8: Løftehøyde

	Fregatt	Mine
Løftehøyde ΔL [mm]	0,46	0,60

4.8.3 Impuls

Impulsen, altså massefarten nålen slår i mellomleggsringen med avhenger av høytrykkpumpens hydrauliske puls. Da pumpene er like med samme plassering og kamakselprofil vil pulsen fra pumpen være lik ved samme turtall og last, da med antatt like rørlengder og diametere. Den motoren som i snitt går med høyest turtall og belastning vil da ha en dysenål som slår hardere mot mellomleggsringen. Impulsen til nålen beregnes ut ifra formelen:

$$I = m * v$$

Impulsen avhenger da av dysenålens masse m (kg) og fart v (m/s). Dette gir kilogram meter per sekund, også kjent som newtonsekund. Ett newtonsekund tilsvarer en kraft på en newton i løpet av ett sekund. Farten v er et produkt av akselerasjon * tid. Ved å gå ut ifra at akselerasjonen er konstant og antakelsen om at v er proporsjonal med den hydrauliske pulsen som avhenger av last og turtall, anslår man en prosentvis forskjell i farten v hos fartøystypene.

Fregatt går konstant på 1800 rpm og det antas at minefartøyene kjøres mest i operasjonsmønsteret *8 knop* som tilsvarer 1200 rpm etter *Tabell 6*. Antar at belastningen på både fregatt og mine er slik at dysenålen får full åpning per tenning og derfor slår opp i mellomleggsringen ved midlere turtall. Ved å anta at 1800 rpm er 100% går minefartøyene på $2/3$ av turtallet til fregatt.

Det er vanskelig å regne ut en eksakt verdi for farten til dysenålen, da leverandør ikke oppgir dette eller nålens akselerasjon og tid. Man kan da gjøre en forenkling som et utgangspunkt, ved å beregne farten til nålen når motorene går på samme belastning og turtall. Når motorene går på lik belastning og turtall, er den kinetiske energien (W_p) ut av begge pumpene den samme. Går da også ut ifra at mengden levert drivstoff inn til dysene er lik. Massen til dysenålene vil da gi et forholdstall mellom farten v til fregatt og mine. Fregatt er merket «1» og minefartøy er merket «2».

Kinetisk energi:

$$w_p = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \text{ [J]}$$

$$w_{p2} = w_{p1}$$

$$\frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2$$

$$\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2 = \frac{m_1}{m_2}$$

$$v_2 = v_1 \cdot \sqrt{\frac{m_1}{m_2}}$$

$$m_1=6,22 \text{ og } m_2=8,61$$

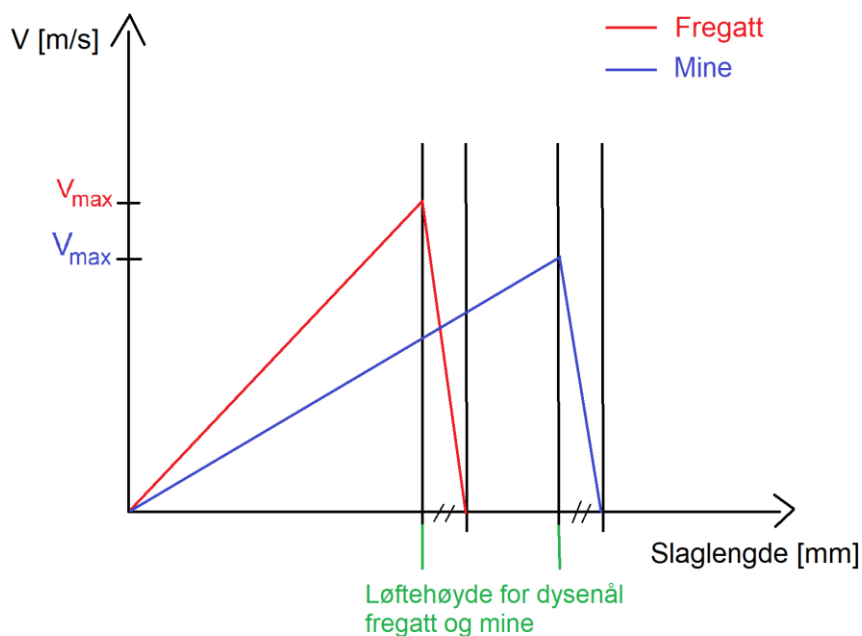
Gir:

$$v_2 = v_1 \cdot 0,85$$

Altså farten til dysenålen på minefartøy er 85% av farten på fregatt sin dysenål, på bakgrunn av forskjellen i vekten til dysenålene og med forutsetningen om likt arbeid (kinetisk energi) ut av begge pumpene. Dette er et utgangspunkt som tas på bakgrunn av forenklingen gjort da en ikke har tatt høyde for den ukjente akselerasjonen og tiden.

Tabell 9: Estimert impuls

	Fregatt	Mine
Masse dysenål, m [g]	80%, (6,22 g)	100%, (8,61 g)
Fart, v [m/s]	100%	85%
Impuls, I [Ns]	100%	75%



Figur 4-17: Illustrasjon av hastigheten til dysenålen under et løft for minefartøy og fregatt. Tykkelsen av oljefilmen er meget liten sammenlignet med løftehøydene, derfor er de merket med dobbeltstrek. Nålen bremses til null hastighet gjennom oljefilmen.

Figur 4-17 illustrerer farten til dysenålene på fregatt og mine etter beregningene gjort ut ifra dysenålenes masser. Den røde linjen tilhører fregatt, med høyest fart og den blå tilhører minefartøy med 85% av farten til fregattens dysenål. Området hvor farten synker, mellom de to sorte loddrette linjene, illustrerer oljefilmen som hydraulisk demper nålen før den treffer mellomleggsringen. De to skråstreke illustrerer at avstanden oljefilmen demper i er mye mindre enn løftehøyden, men det ville ikke vært mulig å gi et bilde av det i skala på figuren. Når farten er i null har nålen truffet mellomleggsringen. Det er forsøkt å lage figuren i skala opp mot beregningene, hvor maksfarten til mine er 85% av maksfarten til fregatt og slaglengden til fregatt er 23% kortere enn mine. Når pumpene leverer samme effekt, er arealet under begge kurvene det samme, men farten til fregattens dysenål er høyere, slik det er illustrert i Figur 4-17. Denne forenklete fremstillingen gir et bilde av hvordan dysenålens fart er ved samme effekt fra høytrykkspumpene, faktum er at fregatten sine pumper leverer i snitt høyere effekt grunnet motorens høyere turtall og belastning.

4.8.4 Normalspenning

Normalspenning kan sees på i dette tilfellet ut ifra de verdiene som kan veies, måles eller antas. Man kan se på normalspenningen ved å trekke inn sammenhengen arbeid = kraft * strekning ($W=F \cdot s$ [J]) inn i formelen for normalspenning ($\sigma = F/A$). Dette ut ifra den midlere energibetraktningen $E_{kMine}=W_{Mine}$, altså $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = F \cdot s$ og det samme for fregatt. F er kraften nålen skyves med og s er strekningen, altså løftehøyden ΔL . Her tar man utgangspunkt i at begge nålene mottar lik kinetisk energi fra pumpene, da det antas at motorene går på samme turtall og belastning. Derfor kan det også uttrykkes ved $W_1=W_2$. Man får en midlere kraft og midlere normalspenning, som er for lav sammenlignet med realiteten, men forholdstallet mellom normalspenningene ut ifra energibetraktningen er viktig. Energikonverteringen er ikke korrekt, da man ikke tar med friksjon eller dysenålens faktiske topphastighet, men er en forenklet fremstilling og gir en indikasjon på størrelsesforholdet mellom normalspenningene. Fregatt er merket «1» og minefartøy er merket «2».

$$W_1 = W_2$$

$$F_1 \cdot s_1 = F_2 \cdot s_2$$

$$F_1 = F_2 \cdot \frac{S_2}{S_1}$$

Setter F_1 inn i σ_1 og får:

$$\sigma_1 = \frac{F_2 \cdot \frac{S_2}{S_1}}{A_1}$$

Har fra normalspenningen σ_2 at $F_2 = \sigma_2 \cdot A_2$

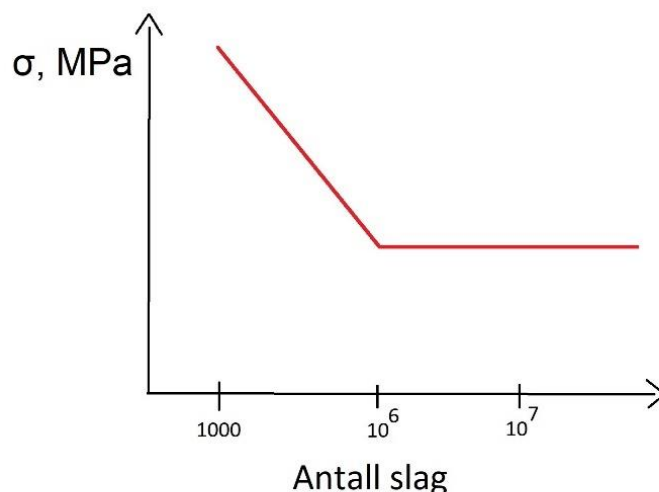
Setter F_2 inn i σ_1 og får:

$$\sigma_1 = \sigma_2 \cdot \frac{A_2}{A_1} \cdot \frac{S_2}{S_1}$$

Tabell 10: Normalspenning med løftehøyde

	Fregatt	Mine
Anleggsareal, A [mm²]	7,07	15,71
Strekning dysenål = løftehøyde, s [mm]	0,46	0,60
$\sigma_1 = \sigma_2 \cdot \frac{A_2}{A_1} \cdot \frac{S_2}{S_1} = \sigma_2 \cdot \frac{15,71}{7,07} \cdot \frac{0,60}{0,46} = \sigma_2 \cdot 2,90$		

Ut ifra beregningene ser man at normalspenningen til fregatt er 2,90 ganger så stor som normalspenningen til minefartøyene. Ved høyere normalspenning, er materialet mer utsatt for utmatting, slik det er illustrert i Figur 4-18. Det er ikke satt tall på figurens y-akse, det er grunnet at spenningen opp mot antall slag før mellomleggsringen oppnår utmattingsbrudd ikke er kjent. Figuren er laget for å forklare hvordan normalspenningens verdi henger sammen med overflateutmattingen og med det påvirker antall sykluser materialet tåler. Dette uttrykkes gjennom at y-aksen i et SN-diagram er lineær og antall slag på x-aksen er logaritmisk. Da ser man tydelig ut fra figuren at ved å nesten tredoble normalspenningen synker antall slag mellomleggsringen tåler før utmattingsbrudd betraktelig. Forenklingens resultat ved at normalspenningen til fregatt er 2,9 ganger så stor som minefartøyene er nesten utelukkende grunnet den store forskjellen i anleggsarealet.



Figur 4-18: Illustrert SN-diagram, y-aksen er lineær og x-aksen logaritmisk.

4.8.5 Arbeid per arealenhet, Joule/Areal

Det er den kinetiske energien, arbeidet fra dysenålen, som gjør skade på mellomleggsringen. Kinetisk energi regnes i Joule [$\frac{kg \cdot m^2}{s^2}$] hvor 1 joule er energimengden som skal til for å flytte en gjenstand mot en kraft på 1 newton over en strekning på 1 m. Ved å dele den kinetiske energien på arealet den fordeles utover, får man et bilde av forskjellene i kreftene som virker på mellomleggsringen. Dette er en forenkling, hvor det tas utgangspunkt fra grunnleggende fysikk med antatte verdier, uten friksjon i dyse og drivstoff. Dette er fordi de verdiene ikke er tilgjengelige og svært vanskelige å beregne nøyaktig, samt at den forenklete fremstillingen gir et bilde av situasjonen rundt slitasjefenomenet. Ser her også på samme situasjon hvor pumpene leverer likt arbeid under ellers like betingelser, og begge dysenålene tar opp lik mengde arbeid.

Kinetisk energi per areal:

$$\frac{E_k}{A} = \frac{\frac{1}{2}m \cdot v^2}{A} \text{ [J/m}^2\text{]}$$

Tabell 11: Kinetisk energi per areal

	Fregatt	Mine
Kinetisk energi, E_k [J]	$\frac{1}{2} \cdot 6,22 \cdot 10^{-3} \cdot v^2 =$ $0,00311 \cdot v^2$	$\frac{1}{2} \cdot 8,61 \cdot 10^{-3} \cdot v^2 =$ $0,00431 \cdot v^2$
Anslagsareal, A [m^2]	$7,07 \cdot 10^{-6}$	$15,71 \cdot 10^{-6}$
E_k / A, [J/m^2]	$439,89 \cdot v^2$	$274,35 \cdot v^2$

Ut ifra forenklingen som tar for seg den kinetiske energien delt på anslagsarealet med bakgrunn i dysenålenes størrelser og vekt, sammen med antakelsen om likt arbeid fra pumpene, gir at fregattens mellomleggsring utsettes for 38% mer arbeid per arealenhet enn minefartøyene. Ved å ta med antakelsen fra kapittel 4.8.3 hvor $v_2 = v_1 \cdot 0,85$, altså farten til dysenålen tilhørende mine er 85% av fregatt får man at minefartøyets arbeid per arealenhet blir $274,35 \cdot v^2 = 274,35 \cdot 0,85^2 = 198,22$ [J/m^2]. Med denne forenklingen hvor hastigheten til fregattens dysenål er 100%, vil fregattens mellomleggsring utsettes for 55% mer arbeid per arealenhet enn minefartøyene. Antakelsene gir at slagarbeidet pr areal er over dobbelt så stort på fregatt. Dette er en mulig feilkilde, men som de andre beregningene er dette kun en forutsetning og forenkling på bakgrunn av antakelser da målte verdier fra produsent ikke er oppgitt og vanskelig å få tak i.

4.8.6 Sammen drag slagkraft

Ved å se på faktorene som påvirker dysenålens slagkraft opp i mellomleggsringen, er det ut ifra oppgavens antakelser og beregninger dysenålens anleggsareal som er høyst avgjørende for skadeomfanget. Altså dysenålens glideflatdiameter. Dette på bakgrunn av turtall og belastningsantakelsene samt dysenålenes masse. Da minefartøyene har 75% av impulsen sammenlignet med fregatt, og 55% større anleggsareal å fordele kreftene utover, er det åpenbart at fregatt sine mellomleggsringer blir påvirket av et større arbeid som fører til mer slitasje enn på minefartøyene. Dette underbygges med de forenklete beregningene som tar for seg farten til dysenålene, deres normalspenningforhold og arbeid per arealenhet. Forenklingene av energibetraktningene kommer frem til

at fregattens mellomleggsring utsettes for 55% mer arbeid per arealenhet enn minefartøyene, ved forutsetningen om at motorene går på samme turtall og belastning, noe som ikke er det reelle tilfellet. Det antas at fregattens motor i snitt går på 33% høyere turtall og belastning enn minefartøyene, som igjen spiller prognosen om fregattens belastning på mellomleggsringen i dårlig favør.

Tabell 12: Sammendrag slagkraftberegninger

	Fregatt	Mine
Anslagsareal, A [mm ²]	7,07	15,71
Impuls, I [Ns]	100%	75%
Fart dysenål, v [m/s]	100%	85%
Forholdstall normalspenning med løftehøyde	$\frac{\sigma_{Fregatt}}{\sigma_{Mine}} = 2,90$	
Arbeid per arealenhet, E _k / A [J/m ²]	439,89 · v ² 100%	274,35 · v ² 62%
Arbeid per arealenhet med faktoren for dysenålens fart, E _k / A [J/m ²]	439,89 · v ² 100%	274,35 · 0,85 ² = 198,22 45%

4.9 Mulige årsaker til slitasjen

4.9.1 Forskjeller i brennstoff

Denne oppgaven har tatt for seg et stort spekter av mulige årsaker til slitasjefenomenet, lagt frem i Resultat-kapittelet. Etter samtale med fagperson Frode Ellingsen, ble det antatt at en teori til slitasjeskaden kunne være grunnet for mye vann i drivstoffet på fregatt. Om dette kunne være forårsaket dårlig separator eller av andre faktorer som kondens eller temperaturforskjeller var ikke klart. Uavhengig av årsaken til vannets opphav, kan det føre til korrosjon i drivstoffsystemet som igjen øker slitasjen på motordeler. Da fartøyene

i Sjøforsvaret bunkrer fra leverandører som leverer godkjent drivstoff med vedlagte analyser av kvaliteten, vil det være naturlig at vannet i drivstoffet eventuelt forekommer om bord i fartøyet. Drivstoffprøver ble tatt om bord KNM Thor Heyerdahl den 25.04.2019 og sendt til FLO Kjemi-Material avdeling Kjeller for analyse. Prøvene ble sammenlignet opp mot prøver tatt på minefartøyet KNM Hinnøy den 30.04.2018. Da prøvene er tappet med et års mellomrom, og derfor ikke er fra samme leveranse med drivstoff, gir ikke resultatene nøyaktige verdier på forskjellene på fartøyene, men en pekepinn. Resultatene fra begge prøvetakingene er i henhold til MTU sine kravspesifikasjoner samt tilfredsstillende kravene for Marin Gassolje etter Norsk Bransjestandard, som tilsier at drivstofforholdene om bord er tilstrekkelige. Dette gjeldende drivstoffets smøreevne, vanninnhold og partikkelinnhold. Ut ifra *Tabell 2* ser man at vanninnholdet på fregatten er det samme, og innenfor kravene, på alle tre prøvestedene. Funnene gjort fra drivstoffanalysene tilsier at dette ikke er en årsak til skadeomfanget oppgaven belyser.

4.9.2 Materialkvaliteten i mellomleggsringen

Mellomleggsringene på henholdsvis fregatt, mine og ubåt har designmessige forskjeller. Dette ved at ringene tilhørende fregatt har styretapper som de ikke har på mine og ubåt. Forskjellen i designet er grunnet at innsprøytningdysene har forskjeller. Fordi mellomleggsringene er forskjellige og det kun er på fregatt slitasjen er et problem, var det en teori om at kvaliteten på ringene var forskjellig. For å avdekke en slik forskjell ble det foretatt et labforsøk med hardhetsmålinger. Det ble tatt tre målinger på tre forskjellige mellomleggsringer (Figur 4-11). En ny og en ødelagt tilhørende fregatt og en ny fra mine. Alle tre mellomleggsringene, produsert hos Bosch, hadde svært like resultater. Se *Tabell 4*. Funnene viser at det ikke er en svakere mellomleggsring på fregatt, som igjen utelukker teorien om at det er den eneste årsaken til skadeomfanget.

4.9.3 Operasjonsmønsteret

Minefartøyene og fregattene sine MTU 396er går på forskjellig turtall og belastning grunnet forskjellig operasjonsmønster og bruksområder på fartøysklassene. Som dieselgenerator på fregatt, kjøres de på konstant turtall, 1800 rpm. At den går som hovedmotor på minefartøyene, resulterer at motoren går på en rekke forskjellige turtall og belastninger. I oppgavens utregninger antas det at *8 knop*, 1200 rpm er turtallet motoren på i gjennomsnitt. Høytrykkspumpen er lik i begge motorene, pulsen fra pumpa avhenger av motorens turtall og belastning. Da fregatt i snitt går på høyere belastning enn minefartøyene, vil trykkpulsene fra pumpa på fregatt være høyere. Dette har igjen en direkte innvirkning på kraften dysenålen slår opp i mellomleggsringen med som påvirker skadeomfanget. Forvarmingstemperaturene til motorene er ikke kjent, men data på eksostemperaturene foreligger. Ved å sammenligne disse ser man at det kun er 10% forskjell på gjennomsnittstemperaturene. Her sammenlignes temperaturer fra fregatt og ubåt, men det er representativt da det antas at temperaturene på ubåt og mine er like. Da forskjellen mellom motorens eksostemperaturer kun er 10%, tyder det på at motorene har lik forvarmingstemperatur og da at viskositeten er lik i dysen på fregatt og mine. Det er da rimelig å anta at drivstoffets smøreevne er tilnærmet lik, og ikke utgjør en forskjell opp mot skadeproblematikken.

4.9.4 Anslagsenergi og spenning

Det er forskjeller i dysenålene til fregatt og mine. Minefartøyenes dysenål har en glideflatediameter som er 1 mm større enn fregatt. Henholdsvis 5 og 6 mm. Det er også forskjeller i trykktrinndiameterne, men forholdstallet D/d blir tilnærmet likt hos fartøystypene. Ved å designe en dysenål med mindre glideflatediameter, får man igjen et mindre anleggsareal som energien fra dysenålen fordeles utover. Punktbelastningen blir større ved mindre diameter på dysenålen. Drivstofftrykkene som skal til for at dysenålen løftes fra setet og forstøver drivstoff inn i brennkammeret er forskjellig på fartøysklassene. Fregatt har åpningstrykk tilsvarende 30 N/mm^2 og 27 N/mm^2 på minefartøyene. Ved at senterhullet på begge mellomleggsringene har lik diameter, utgjør dysenålens glideflatediameter alene at minefartøyene har 55% større anleggsflate hvor slagkraften fordeles utover sammenlignet med fregatt. Fregatt har et høyere åpningstrykk i utgangspunktet, i tillegg til under halve anslagsarealet å fordele kreftene utover mellomleggsringen. Dette i kombinasjon med at skaden er selvforsterkende ved at den «spiser» opp mellomleggsringen

sin indre diameter og med det minker anleggsarealet og øker løftehøyden akselererer skadeeffekten. Dette er forhold som gjør at fregatten sin mellomleggsring får mer «juling» enn minefartøyenes. Løftehøyden ΔL er 23% lavere på fregatt enn hos mine, som i teorien sammen med lik hydraulisk puls skal gi en lavere slutthastighet opp i mellomleggsringen på samme turtall, forutsatt lik vekt på dysenålene. Fartøysklassene sine forskjeller i vekt på dysenålene utgir og en signifikant forskjell på arbeidet utført på mellomleggsringen av dysenålen. Ved hjelp av forenklinger av kraftbildet ser man at ved lik belastning og turtall er arbeid per arealenhet på minefartøyene kun 45% av fregattens. Ut ifra fregatt sin belastning og turtall sammenlignet med minefartøyene leverer ikke høytrykkpumpen lik mengde, altså puls. Dette vil si at forenklingene som er gjort i oppgaven er underdrivelser, da fregatt i snitt går på høyere belastning og turtall, som vil si at den reelle differansen mellom fregatt og mine vil være større. Ved å gjøre endringer på glideflatens diameter, vil en få endring på anleggsarealet som igjen er avgjørende for hvor stort område dysenålen kraft fordeles utover.

4.10 Mulige tiltak

Med bakgrunn i beregningene gjort i oppgaven, er det foretrukne tiltaket å øke diameteren på glideflaten til fregattens dysenål. Ved å øke diameteren til for eksempel samme størrelse som på minefartøyene vil anleggsarealet øke betraktelig, slik funnene i oppgaven viser til. Et enkelt tiltak kunne vært å sette en injektor fra minefartøy over på fregatt, men endre antall shims slik at dysen får riktig åpningstrykk. Men dette går ikke, da dysene har forskjellig antall hull. Et tiltak vil da være å forespørre MTU eller andre leverandører om det finnes en mer moderne dysekonstruksjon som passer til fregatt sine 396-motorer, med større glideflatendiameter på dysenålen. Ved å ha likere injektorer på fartøysklassene vil man også redusere antallet reservedeler. Det kan antas at de ikke er interesserte i dette, av ulike årsaker. Dette som for eksempel at de da taper en fast inntektskilde grunnet Forsvarets preventive vedlikehold ved å skifte ut mellomleggsringen på fregatt ved hver vedlikeholdsrutine per 2000 time gangtid (Ellingsen, 2019). Det er en mulighet å omkonstruere dysen fra en annen leverandør. Uten å ha noe innsikt eller informasjon om dette, sees det ikke som sannsynlig, da jeg tror det antakeligvis vil bryte med MTU og Forsvaret sine avtaler om deler som skal brukes og kjøpes. Et annet alternativ vil kunne være å bytte til en dyse med lavere vekt. Da skadeproblematikken er en innebygget konstruksjonssvakhet begrenser det antall tiltak, hvor hen det enkleste og beste anses å forespørre MTU om en annen injektor med større glideflatendiameter på dysenålen som passer fregatt.

5 Diskusjon

Det vesentligste funnet i oppgaven er å påvise at dysenålen som brukes i fregattmotorene har et mindre anslagsareal og vandringslengde enn tilsvarende på minefartøyene. Usikkerheten rundt beregningene er det å prøve å kalkulere den nøyaktige forskjellen i anslagsenergien som påvirker mellomleggsringen. Oppgaven består av en rekke faktaopplysninger samt antakelser gjort for å komme frem til resultatene underveis. De fleste tallene som er fastsatt er gjort ved hjelp av nøyaktige målemetoder. Det er rimelig å anta at eventuelle feil i målinger av størrelser og vekt er så marginale at de er neglisjerbare. Dette være verdier som masse, løftehøyder, materialkvalitet, turtall, diametere og anleggsareal. Det er flere mulige feilkilder og forenklinger som nevnt underveis i oppgaven som kan gi unøyaktige resultater, men de er etter beste evne forsøkt å gjøres på best mulig måte.

Samtidig er det gjort en del forutsetninger for beregningene. Som eksempelvis antatt konstant akselerasjon uavhengig av friksjonen i dysenålen og sammenligningen av fartøystypenes energikonvertering ved likt pumpearbeid. Det å ikke vite eksakt hvor hardt dysenålen slår og det eksakte trykket pumpen leverer har ført til forutsetninger og antakelser gjort i beregningene. Da det i oppgavens omfang ikke har latt seg gjøre å foreta en nøyaktig beregning av anslagsenergien og normalspenningen, er det blitt tatt forutsetninger for midlere energibetraktninger. At forutsetningene ikke har blitt nøyaktig beregnet har gjort det vanskelig å vurdere resultatene, men det har gitt en pekepinn og en såkalt «høyre-venstre begrensning». Det er grunn til å anta at dette skyldes utmatting, da man har tre ganger høyere normalspenning på fregatt enn på mine. Svakheten belyses gjennom SN-kurven, Figur 4-18, hvor det tydelig kommer frem at fregatten tåler færre antall slag.

Til tross for at det kunne blitt gjort en mer nøyaktig beregning av anslagsenergien, ville det ikke med målte faste verdier endret faktumet rundt skadeomfanget. De forskjellige feilkildene i oppgaven baserer seg på forutsetninger på bakgrunn av antakelser da målte verdier har vært vanskelig å få tak i.

6 Konklusjon

For å komme til et svar på problemstillingen, begrunnet av beregninger, fakta samt antakelser har det blitt studert brennstoffkvaliteter, temperaturer, trykkforskjeller, stålkvaliteter, størrelser på dyser og anslagsenergier. Analysene og beregningene gjort i oppgavens omfang leder frem til at skadeproblematikken trolig skyldes i hovedsak forskjellen i anleggsareal på fregatt og minefartøyene. Imidlertid er beregningen på anslagsenergi gjort på bakgrunn på energibetraktningen. Dette kommer frem i beregningene til anslagsenergi og normalspenning, som viser at dette er sannsynlige årsaker til skaden, hvor det hele er et spørsmål om anslagsenergi per arealenhet og turtall over tid. Ved normalspenning 2,9 ganger høyere på fregatt enn mine, samt et arbeid per arealenhet på 55% mer på fregattens mellomleggsring, er det rimelig å anta at dette er skylden i skadeomfanget. En årsak som tilsynelatende er grunnet at dysenålens anslagsareal mot mellomleggsringen er halvparten på fregatt sammenlignet med mine. Dette sammen med det faktum at fregatt i snitt går på 33% høyere turtall og belastning enn minefartøyene, som igjen fører til ytterligere økt anslagsenergi enn beregningene utført i oppgaven. Den mest logiske anbefalingen vil være å skifte injektoren, da det ikke er mange andre tiltak å gjøre grunnet de ellers like forholdene og kvalitetene.

I dag skiftes mellomleggsringen når fregattene er inne til rutinemessig vedlikehold, før et betydelig antall rekker å bli ødelagt og motoren ikke lengre yter slik den skal. Et rutinemessig vedlikehold nettopp for å preventivt hindre skadeomfanget i å utvikle seg. Min personlige mening er at det anbefales å tenke frem i tid, på det operative aspektet i et skarpt tilfelle. Hva med i en krigssituasjon hvor en hel fregatt i verstefall mister muligheten til å produsere strøm, fordi det i krig ikke er noe som heter rutinemessig vedlikehold, grunnet en feil som burde blitt tatt tak i for lenge siden. Her handler det om å se det store bildet. Skal Forsvaret la MTU sitte på den sikre vedlikeholdsinntekten grunnet en utdatert dysekonstruksjon, og la dette i verste fall gå utover den operative yteevnen til Sjøforsvaret. Eller skal man ta tak og løse problemet, før det blir et reelt problem som kan utgjøre en betydelig forskjell i vår kampevne.

Bibliografi

2000. **Almås, Terje.** *Forbrenningsmotorer, Institutt for marin teknikk.* Trondheim: NTNU
2018. **Bailey, Regina.** Phases of the Bacterial Growth Curve, *Thought Co.* 19. September 2018. Hentet fra thoughtco.com: <https://www.thoughtco.com/bacterial-growth-curve-phases-4172692>
2018. **Blindheim, Ulf.** *Cracking, Store Norske leksikon.* 24. November 2018. Hentet fra snl.no: <https://snl.no/cracking>. 25. Mars 2019
2018. **Egeland, Lars Erik og Husebye, Jonatan.** *Elektronisk Innsprøyting i Marinen.* Bacheloroppgave. Bergen: Sjøkrigsskolen.
1997. **Fiskaa, Geir.** *Operasjon og drift av maskinerisystemer.* Trondheim: FUELTECH
2004. **Griffiths, Denis Dr.** *Marine Medium Speed Diesel Engines.* England: IMarEST
2018. **Grøn, Øyvind.** *Kavitasjon, Store norske leksikon.* 20. Februar 2018. Hentet fra snl.no: <https://snl.no/kavitasjon> 21. Mars 2019
2018. **Kofstad, Per K. & Pedersen, Bjørn.** *Krom.* 4. Desember 2018. Hentet fra snl.no: <https://snl.no/krom> 24. Mars 2019
2007. **Kuiken Kees.** *Diesel Engines for ship propulsion and power plants.* Nederland: Target Global Energy Training
2011. **Lakshminarayanan, P.A og Nayak, Nagaraj.** *Critical Component Wear in Heavy Duty Engines, First Edition.* Asia: John Wiley & Sons
2016. **Lund, Ansgar og Hellevik, Lars.** *Drift og vedlikehold, Del 2.* Bergen.
2011. **McFarlane, Elaine.** Applied Microbiology and Molecular Biology in Oilfield Systems, *Problems caued by microbes and treatment strategies.* S. 159-167. Nederland: Springer.
2003. **MTU Friedrichshafen GmbH.** *Technical Publication 12 V 396 TE54.* Tyskland
2012. **MTU Friedrichshafen GmbH.** *Fluids and Lubricants Specifications.* Hentet fra mtu-online.com: https://www.mtu-online.com/fileadmin/fm-dam/mtu-global/technical-info/fluids_and_lubricants_specifications/A001061_35E.pdf. 26. Mars 2019.

2012. **Nyhus, Toril.** *Effect of marine environment on the tribology performance of materials used in lubricated rotating parts of offshore wind turbines.* Trondheim: NTNU.

Hentet fra brage.bibsys.no: <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/249126>

2019. **Thaulow, Christian.** *Utmatting.* 21 Mars 2019. Hentet fra snl.no:

[https://snl.no/utmatting - teknikk](https://snl.no/utmatting_-_teknikk) 20. April 2019

Vedlegg

Se eget dokument:

Bjørklund, Jørgen

2019. *Vedlegg til Bacheloroppgave*. Analyse av skade på brennstoffinjektor til MTU-396 motor: Vedlegg til rapport. Bergen: Sjøkrigsskolen.