



Sjøkrigsskolen

Bacheloroppgave

Pumpejet – Den Lydløse Propell

av

Johan Andreas Olerud og Vegard Skrutvold

Lvert som en del av kravet til graden:

BACHELOR I MILITÆRE STUDIER MED FORDYPNING I MASKINFAG

Innlevert: 25. Mai 2018

Godkjent for offentlig publisering

Publiseringsavtale

En avtale om elektronisk publisering av bachelor/prosjektoppgave

Kadettenene 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 kadettenene har godkjent publisering.

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

Jeg(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 type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nei

Plagiaterklæring

Vi erklærer herved at oppgaven er vårt eget 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: 25 – 05- 2018

VEGARD SKRUTVOLD

Kadett, navn



Kadett, signatur

JOHAN A. OLERUD

Kadett, navn



Kadett, signatur

Forord

I denne bacheloroppgaven, som inngår i bachelor i militære studier med fordypning i maskinfag, er temaet pumpejet til bruk på undervannsfarkoster. I oppgaven vil det bli gjennomført beregninger for pumpejet og propell, og disse resultatene vil bli diskutert opp mot hverandre. Målet med oppgaven er å etablere generell kunnskap om pumpejetens egenskaper for videre forskning, samtidig som den skal svare på problemstillingen "*Vil pumpejet være en god propulsjonsløsning for nye undervannsfarkoster i marinen?*". Det var mange områder vi ønsket å se nærmere på da vi skulle velge en problemstilling for oppgaven. Da pumpejet er et emne som ikke inngår i utdanningen har veien for å få hodet over vann vært lang og lærerik. I arbeidet har vi erfart at det er flere faktorer enn først antatt, som påvirker egenskapene til de ulike løsningene. Nå, mot slutten av oppgaven er vi fornøyde med valg av tema, og syntes arbeidet har vært meget interessant.

I oppgaven forventes det at leseren har teknisk forståelse på bachelornivå eller høyere. For god hjelp og innspill i oppstart og underveis i oppgaven vil vi takke Petter Kristoffersen, Jon Patrick Olsen og Dr. Johan Hüber. Videre vil vi takke Anna Katrine Olerud og Per Olerud for hjelp med korrekturlesning. Avslutningsvis vil vi sende en stor takk til vår veileder Gisle Strand for meget god veiledning!

Bergen, Sjøkrigsskolen, 25-05-2018

Oppgaveformulering

Valg av tema:

Undervannsfarkoster er viktig i dagens marine. En effektiv undervannsfarkost kan gjøre stor nytte for seg i dagens forsvar, og som et ledd i en fremtidig satsing på slike er det behov for å se på forskjellige propulsjonsløsninger. Dagens norske undervannsbåter benytter konvensjonelle propeller. Britene, kineserne, amerikanerne og russerne benytter pumpejet på enkelte av sine ubåter. Vi vil derfor i samarbeid med undervannsbåtmiljøet foreta en litteraturstudie for å innhente informasjon om hvorvidt propulsjonsløsningene til kommende undervannsfarkoster bør nytte pumpejet.

Det finnes forskjellige typer pumpejet, og vi vil se på fordelene og ulempene ved de forskjellige løsningene. Da ulike løsninger har varierende egenskaper er det viktig å studere forskjellige typer for å få et bredt bilde av egenskapene. Egenskaper som er viktige er kavitasjon, akustikk, virkningsgrad og vedlikehold. Kunnskap om sammenhengen mellom disse vil være viktig for å tilpasse systemet opp mot en type fartøy, med et bestemt operasjonsmønster.

Undervannsfarkostene vi har i Norge har forskjellige bruksmål. Dette innebærer at det stilles forskjellige krav avhengig av farkostens formål. Det vil derfor være en mulighet for at en type pumpejet egner seg til en type farkost, mens en annen type egner seg til en annen.

Basert på samtaler med veileder, og undervannsmiljøet i Forsvaret ønsker vi å svare på denne problemstillingen: *"Vil pumpejet være en god propulsjonsløsning for nye undervannsfarkoster i marinen?"*

Sammendrag

I denne oppgaven har problemstillingen: "*Vil pumpejet være en god propulsjonsløsning for nye undervannsfarkoster i marinen?*" blitt besvart. Ved hjelp av en litteraturstudie har forfatterne funnet teori og nødvendige data for å gjennomføre propell -og pumpejet-beregninger. Det er blitt definert et fiktivt fartøy basert på tall fra et slepeforsøk gjennomført av Monesoon, javadi, Charmdooz og Mikhailovich (2013). På bakgrunn av disse data har forfatterne gjennomført propelldimensjonering tilpasset dette fartøyet. Det har videre blitt gjort utregninger for virkningsgrad, rekkevidde og propellbelastning. Med propellberegningene som utgangspunkt er det til slutt blitt gjort utregninger for en akselererende pumpejet.

Resultatene fra beregningene er blitt diskutert opp mot hverandre og sett i lys av teori funnet i litteraturstudien. Forskjell i kavitasjon, akustikk og økonomi er ikke med i beregningene og er av den grunn kun drøftet på bakgrunn av innhentet teori fra litteraturstudiet.

Oppgavens konklusjon er todelt da kravene og operasjonsmønstrene til ulike fartøyet vil variere. Forfatterne konkluderer med at pumpejeten vil være en god propulsjonsløsning for en ny undervannsfarkost som er tiltenkt å operere med høye hastigheter eller høye akselerasjonskrav. Dette fordi resultatene og diskusjonen viser til at pumpejeten har en suveren evne til å motstå kavitasjon sammenlignet med propellen. Videre vil det for et fartøy som opererer slik at det ikke vil være fare for kavitasjon, være anbefalt å nytte en konvensjonell propell. Dette for å utnytte propellens gode virkningsgrad og billige vedlikeholdsrutiner.

Innholdsfortegnelse

Figurer	8
Symboler	10
1 Innledning / Introduksjon	12
1.1 Bakgrunn.....	12
1.2 Mål	13
1.3 Begrensninger	13
1.4 Metode	13
1.4.1 Gjennomføring	13
1.5 Struktur	14
2 Jetpropulsjonens' historie	15
2.1 Jet propulsjonens' utvikling	15
2.2 Bruk av pumpjet.....	17
2.3 Undervannsfarkoster i marinen.....	18
3 Teori	21
3.1 Propell.....	21
3.2 Vannjet	22
3.3 Propell i dyse.....	24
3.4 Kavitasjon	26
3.4.1 Konsekvenser av kavitasjon:	27
3.5 Pumpejet	28
3.5.1 Dysens påvirkning på en pumpejet	30
4 Casestudie	34
4.1 Casestudie – Autonom undervannsfarkost.....	34
4.1.1 Case:.....	34
4.2 Gjennomføring propellberegning.....	35
4.3 Gjennomføring pumpejetberegning	39
4.3.1 Valg av impellerdiametere	39
4.3.2 Bestemmelse av volumstrøm og justerbare størrelser.....	40
4.3.3 Virkningsgradberegning pumpejet.....	41
5 Diskusjon	45
5.1 Virkningsgrad.....	45
5.1.1 Thrustreduskjon og medstrømsfaktor	46

5.1.2	Samspillet mellom stator, impeller og dyse.....	51
5.2	Kavitasjon.....	54
5.2.1	Propellbelastning	54
5.2.2	Huben.....	55
5.2.3	Dysen.....	55
5.2.4	Lyd.....	56
5.3	Fartøyets rekkevidde.....	56
5.4	Vedlikehold og driftskostnader	58
5.4.1	Voith linear jet.....	59
5.4.2	Marin vekst	59
5.4.3	Beskyttelse.....	60
5.4.4	Anskaffelse	60
5.4.5	Kostnader ved å eie.....	61
6	Feilkilder.....	62
7	Konklusjon og anbefaling	63
7.1	Konklusjon.....	63
7.2	Anbefaling	64
8	Bibliografi.....	65
8.1	Bøker	65
8.2	Papers.....	65
8.3	Internett.....	67
8.4	Annet	67
9	Vedlegg	68

Figurer

Figur 1. En illustrasjon av Arkimedes' skrue.	15
Figur 2. En illustrasjon av Voith sin linear jet.	18
Figur 3. Den autonome undervannsfarkosten (AUV) – Hugin	20
Figur 4. En illustrasjon av en propell med navn på forskjellige komponenter.	21
Figur 5. En Illustrasjon av virkemåten til en vannjet. Her ser man hvordan vannet stømmer gjennom systemet.	22
Figur 6. Illustrasjon av en akselererende dyse og en de-akselererende dyse, hvorav vannstrømmen beveger seg fra høyre mot venstre.	25
Figur 7. En illustrasjon av dampbobler som imploderer ved økende statisk trykk. .	26
Figur 8. En enkel illustrasjon av en pumpejet med de forskjellige komponentene en slik propulsjonsløsning innehar.	28
Figur 9. Luftens hastighetsbilde rundt en flyvinge, når flyet beveger seg i vist retning.	30
Figur 10. En illustrasjon av hvordan vannstrømmen (grønt) beveger seg i forhold til en akselererende dyse dersom vannstrømmen går fra høyre og mot venstre i bilde. Videre viser figuren også trykket (rødt) som presser på dysen grunnet undertrykket (blått) som skapes.	32
Figur 11. En figur som illustrerer hvordan tuppvirvler på en åpen propell forsvinner ved å plassere en dyse utenpå.	33
Figur 12. En graf som viser totalvirkningsgraden til begge propell-løsningene opp mot hastigheten til farkosten i knop. 1,1 B.A.R (blå kurve) og 0,8 B.A.R (oransje kurve.	37
Figur 13: En oversikt av utregnede/avleste verdier for P.C for 0,8 B.A.R.	38
Figur 14: En oversikt av utregnede/avleste verdier for P.C for 1,1 B.A.R.	38
Figur 15. Dette er pumpediagrammet som er hentet ut fra ONR-studien. Dette er et pumpediagram for aksialpumper.	40
Figur 16. Her er systemkurven for hastigheten 29,6 knop plottet inn i pumpediagrammet hentet fra ONR-studien. Grafen vil se tilsvarende ut for de andre hastighetene også, da målet er å få systemkurven til å skjære i samme punkt på løftehøydekurven for alle hastigheter.	42
Figur 17. Dette er en graf som viser totalvirkningsgraden til løsningen 0,8 B.A.R pumpejet opp mot hastigheten til farkosten.	43
Figur 18. Dette er en graf som viser totalvirkningsgraden til løsningen 0,8 B.A.R pumpejet opp mot hastigheten til farkosten.	43
Figur 19. Her er en oversikt over alle konstanter som er brukt, og blitt beregnet for pumpejet løsningene. Disse er brukt videre for å finne virkningsgraden slik beskrevet i kap. 4.3	44
Figur 20. Her er alle løsningene sin totalvirkningsgrad presentert opp mot hastigheten til fartøyet i en og samme graf.	45
Figur 21. Graf som sammenlikner virkningsgraden til Voith sin linear jet opp mot konvensjonell propell og vannjet.	46

Figur 22. Tabellen er et utklipp fra excel som viser hvilket avvik vi får i totalvirkningsgrad for pumpejetløsningene dersom vi varierer thrustreduksjonsfaktoren.	47
Figur 23. Her er en graf som viser hvordan thrustreduksjonsfaktoren endrer seg med totalvinkelen til huben. Altså en spissere hub vil gi en lavere thrustreduksjonsfaktor.	48
Figur 24. Her er en graf som viser hvordan medstrømsfaktoren endrer seg med totalvinkelen til huben. Altså en spissere hub vil gi en lavere thrustreduksjonsfaktor.	48
Figur 25. Her er en illustrasjon av hvordan statoren er plassert etter impelleren for å rette opp de roterende strømmingene som er skapt av denne.	51
Figur 26. Et utklipp fra excel som eksemplifiserer hvordan turtall og tupphastighet på impelleren endrer seg ved å nytte en pumpejet fremfor en propell.	52
Figur 27. En graf som fremstiller maks propellbelastning for alle løsningene ved hver enkelt hastighet. Maksbelastningen er like for begge propell-løsningne, og derav en kurve som vises for propell-løsningen.	54
Figur 28. En graf som viser rekkevidden i nautiske mil ved de forskjellige hastighetene. Grafen innehar rekkevidden for alle propulsjonsløsningene. .	57
Figur 29. En graf som viser forskjellen i nødvendig installert effekt for de ulike propulsjonsløsningene ut ifra hastighet.	58

Symboler

- A_0 – Areal [m^2]
 - Arealet som blir dannet av tuppen til propellbladene
- A_E – Bladareal [m^2]
- P/D – Forholdstall mellom stigningen og diameteren
- **B.A.R** – Bladarealsforhold
- C_F – Friksjonsmotstandskoeffisient
- C_r – Restmotstandskoeffisient
- D_{imp} – Impeller diameter [m]
- $D_{propell}$ – Propell diameter [m]
- V – Volum [m^3]
- Δ – I tilknytning til annet symbol --> Endring i verdier.
- F_n – Froudetall
- g – Tyngdeakselerasjon [m/s^2]
- J – Fremgangstall
- K_T – Thurstkoeffisient
- K_Q – Dreiemomentskoeffisient
- L – Lenge på fatøyet [m]
- n – Turtall [RPM]
- p – Trykk [Pa]
- P_E – Slepeeffekt [W]
- P_e – Installert effekt [W]
- Q – Dreiemoment [Nm]
- Q – Volumstrøm [m^3/s]
- Re – Reynoldstall
- S – Våt overflate [m]
- s – Rekkevidde [Nautiske mil]
- t – Thurstreduksjonsfaktor
- T – Skyv [N]
- V_S – Skipets hastighet [Knop] evt [m/s]
- V_A – Innstrømningshastighet [m/s]

-
- **w** – Medstrømsfaktor
 - **η_0** – Propellvirkningsgrad
 - **η_H** – Skrogvirkningsgrad
 - **η_D** – Propulsjonsvirkningsgrad
 - **η_M** – Mekanisk virkningsgrad
 - **η_R** – Rotasjonsvirkningsgrad
 - **P.C** – Propellens totalvirkningsgrad.
 - **η_p** – Pumpevirkningsgrad
 - **η_t** – Pumpejetens totalvirkningsgrad
 - **δ** – Grensesjikt
 - Et sjikt av væske som har en redusert hastighet grunnet friksjon mot en fast overflate i forhold til resten av væsken.
 - **X** – Avstanden til forre perpendikulær til grensesjiktet [m]
 - **Tid** – tid fartøyet vil kunne operere på gitt hastighet [timer]
 - **E** – Energistrøm [W]
 - **H₃₅** – Midlere løftehøyde [Pa]
 - **H₁₂** – Midlere løftehøyde [m]
 - **M** – Momentumstrøm [N]
 - **C_q** – Volumstrømkoeffisient
 - **C_H** – Løftehøydekoeffisient
 - **H*** – Løftehøydekoeffisient
 - **U_{tip}** – Sentrifugalhastighet (Tupphastighet)
 - **Q_{max}** – Maksimal belastning per areal. [N/m²]
 - **P_{ds}** – Tilført effekt [W]
 - **P_{pe}** – Pumpeytelse [W]
 - **Soca** – Ladestatus (State of charge). Maks oppladning [%]
 - **Socb** – Ladestatus. Maks utladning [%]

 - **NOTS** - U.S Naval Ordnance Test Station
 - **ORL** - Ordnance Research Laboratory
 - **F.P** - Forre perpendikulær

1 Innledning / Introduksjon

I denne delen vil det gås gjennom bakgrunnen for valg av oppgave, før målet med oppgaven og de begrensninger som er satt i forhold til problemstillingen presenteres. Videre skal er det kort forklart hvordan det er blitt godt frem for å besvare oppgaven. Til slutt er oppbygningen av oppgaven presentert.

1.1 Bakgrunn

"Did China just create the Holy Grail of submarine technologies?" (Majumdar 2017)

Denne overskriften var det første som dukket opp når ordet «pumpejet» ble googlet. og det viste seg å være nok til å fange vår interesse. Dette var noe nytt, noe som Norge ikke hadde noe særlig forhold til, og det gjorde oss nysgjerrige. Selv om denne kinesiske løsningen ikke er helt av den type oppgaven går nærmere inn på, så er det en av mange løsninger som finnes for pumpejet. Denne kinesiske versjonen baserer seg på en elektrisk løsning hvor en slipper den mekaniske akslingen som styrer impelleren. Dette gjør at løsningen muligens kan være mer stillegående enn vanlige pumpejeter.

De norske ubåtene er et viktig våpen i det norske forsvaret. De har stor slagkapasitet og er svært vanskelige å oppdage. Dette er faktorer som gjør at en eventuell fiende vil tenke seg om to ganger før han seiler sine fartøy inn i norske farvann. Av denne grunn legges det store summer inn i teknologi for å bedre fartøyers evne til å oppdage og bekjempe undervannsfarkoster. På bakgrunn av dette er det viktig at det blir gjennomført studier og forskning for å bedre undervannsfarkosters egenskaper til å holde seg skjult. Dette innebærer forbedring av gamle systemer, eller implementering av nye. For eksempel vet vi at USA, Russland, Storbritannia og Kina nytter pumpejet til fordel for propell på enkelte av sine ubåter.

Vårt inntrykk gjennom kurs hos forsvarets vedlikeholdsavdelinger er at «ny» teknologi ofte blir sett på som usikkert, og derfor ikke benyttet i den grad det kanskje burde. Et eksempel på dette er «common rail». (Teknologi for direkte og elektronisk styrt innsprøyting av drivstoff på dieselmotorer). Ivrige kadetter har spurt personell som arbeider ved forsvarets vedlikeholdsavdelinger om, hvorfor det ikke ble installert common rail på dieselmotoren da ubåtene var nye. At tilliten til at systemet skulle operere slik det var laget, ble ved flere anledninger lagt frem som en mulig forklaring på hvorfor

det ikke ble brukt. På dette tidspunktet var ikke common rail særlig utbredt eller uttestet av norske fartøyer. Vi satt igjen med en tilnærmet lik følelse og fikk tilnærmet like svar angående bruk av pumpejet som det kadettene fikk for hvorfor common rail systemene ikke ble installert på de nye ubåtene i våre innledende samtaler med fagpersonell. Dette gjorde oss ekstra interessert i å finne ut mer om hvorfor, og eventuelt hva vi det ville betydd for en undervannsfarkost dersom en pumpejet hadde blitt installert.

1.2 Mål

Hensikten med studien er å studere pumpejet som et mulig alternativ til propulsjonsløsning på undervannsfarkoster for å se om en slik løsning er bedre enn propellløsningene som blir benyttet i dag. Videre ønsker vi å etablere et grunnlag for videre studier, samt at oppgaven skal kunne fungere som et oppslagsverk for informasjon om pumpejet.

1.3 Begrensninger

Vi har stått fritt til å velge problemstilling og fremgangsmåte innenfor oppgavens tema. For å begrense oppgavens størrelse på bakgrunn av tilgjengelig tid, har vi valgt å se vekk fra pumpejetens egenskaper i overflate domenet. Videre har vi begrenset casestudien til å se på en type pumpejet. Denne er så blitt sammenlignet med beregninger gjort for en konvensjonell propell. Grunnet kompleksitet ved kavitasjon og akustiske beregninger vil ikke dette bli trukket inn i utregningene. Disse vil allikevel bli diskutert basert på litteraturstudien. De økonomiske aspektene for og mot pumpejet vil bli diskutert, men ikke kvantifisert.

1.4 Metode

1.4.1 Gjennomføring

Hele arbeidet begynte med en konseptfase hvor det ble planlagt en struktur for oppgaven. Målet for oppgaven og begrensninger vi så som nødvendige ble deretter fastsatt. Videre ble et omfattende litteratursøk påbegynt. Ettersom relevant informasjon ble innhentet, ble teori og historie sortert, vurdert og gjort rede for i oppgaven. Neste steg i oppgaven var å

bruke teorien til å utføre en fiktiv casestudie. Her ble det gjort utregninger for forskjell i virkningsgrad, rekkevidde og belastning på henholdsvis pumpejet og propell optimalisert for ca. 30 knop. Utregningene ble utført med god assistanse fra veileder. Fremgangsmåten er beskrevet i kapittel 4. Studien hvor data for slepemotstand er hentet fra ligger vedlagt i *Vedlegg E. Slepeforsøk*. Excel ark og grafer for utregning er vedlagt i henholdsvis *Vedlegg A. Friprøvedigrammer* og *Vedlegg B. Beregninger – casestudie*. Dokument og studie som er blitt benyttet som hjelp til fremgangsmåte ligger i henholdsvis *Vedlegg C. Fremgangsmåte for beregning av jet propulsjon* og *Vedlegg D. ONR-studien*, mens formelark som oppsummerer formlene brukt i beregningen finnes i *Vedlegg F. Formelark*. Etter beregningene for både pumpejet og propell var utført ble resultatene vurdert og diskutert opp mot hverandre, og opp mot teorien. Siste fase av oppgaven ble så fullført ved å konkludere resultatene opp mot problemstillingen og gitt en anbefaling til videre arbeid innenfor emnet.

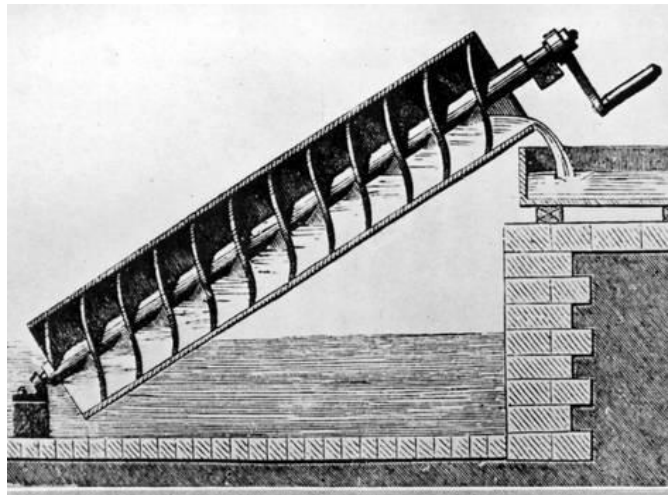
1.5 Struktur

Oppgaven begynner med et historisk innblikk i jet propulsjonens utvikling og bruksområde før den går mer inn på dagens bruk. Deretter presenteres en redegjørelse av teori som er relevant for oppgavens innhold. Teorien vil omhandle relevante propulsjonsløsninger, hvordan dysen vil påvirke pumpejeten og hvilken påvirkning kavitasjon vil ha på propulsjonssystemer. Videre vil det presenteres en casestudie, hvor resultater og fremgangsmåte fortløpende blir presentert og gjort rede for. Resultatene og beregningene kan i sin helhet også betraktes i *Vedlegg A. Friprøvedigrammer* og *Vedlegg B. Beregninger, casestudie*. Mot slutten diskuteres resultatene opp mot forskjellige momenter, som f.eks. virkningsgrad, økonomi og kavitasjon. Til slutt avsluttes oppgaven med en konklusjon og anbefaling til videre arbeid.

2 Jetpropulsjonens' historie

I dette kapitlet vil vi presentere jetpropulsjonens utvikling før vi tar for oss hvordan pumpejeten er blitt benyttet i senere tid. Til slutt vil vi se nærmere på hvilke undervannsfarkoster vi har i marinen i dag, og hvilken type propulsjonsløsning disse nytter.

2.1 Jet propulsjonens' utvikling



Figur 1. En illustrasjon av Arkimedes' skruer.

Bildet er tatt i fra google.

Kilde: http://www.allposters.no/-sp/Workings-of-Archimedean-Screw-Invented-by-Greek-Mathematician-Engineer-and-Physicist-Archimedes-plakater_i3825654_.htm

Jet propulsjon-løsningen sin opprinnelse stammer langt tilbake i tid. Det første møte med en idé som senere skulle vise seg å ha en stor innflytelse på det som ble en jet propulsjon er en trykkløs pumpe «Arkimedes' skruer» oppfunnet av den greske matematikeren Arkimedes.

Pumpen ble brukt til å løfte vannet i høyderetning. Det er dette prinsippet Toogood og Hays tok med seg videre inn i den marineteknologiske utviklingen. I 1661 kom Toogood og Hays opp med et skipsdesign hvor det var installert en sentrifugalpumpe eller stempel til å skape kraft ved å dytte vann gjennom en kanal (Carlton 2012, 21). Senere, i 1753 lot Benjamin Franklin seg inspirere av Franskmannen Daniel Bernoulli. Bernoulli eksperimenterte tidlig ut ifra hypotesen sin om at dersom vann ble fraktet ut under vann

og bak skipet, så ville dette drive båten fremover. Gjennom eksperimenteringen sin benyttet Bernoulli kun et L-formet rør for å drive vannet ut bak båten. Dette var noe Franklin videreutviklet, da han monterte en pumpe som kunne drive vannet fra bunnen av skroget og ut bak båten (Eslamdoost 2014, 1).

I midten av 1780 og tidlig 1790-tallet fortsatte James Rumsey og John Fitch forskningen på det som i dag kalles jet-propulsjon. De utførte hver sine eksperimenter på vannjet-systemer. Rumsey utviklet en rørkjele som ved hjelp av en sylinder med damp og en sylinderpumpe presset vann som kom inn i kjølen gjennom rør ut igjen akter for skipet. Løsningen klarte å oppdrive ca. 1,73 knop. Fitch derimot lot seg inspirere av en idé utforsket av Dr. John Allen, ca 60 år tidligere. Denne idéen baserte seg på å tvinge luft gjennom lommer fylt med vann og deretter ut av skipet imens baugventilene var stengt (Eslamdoost 2014, 1). Nærmere 1920, ble det igjen utprøvd en ny idé innen jet-verden. Denne gangen var det pulsjet som ble testet, men det viste seg straks at akkurat den løsningen ikke var vellykket i ett fullskala designs selv om den var vel så effektiv i modellskala. En slik løsning baserte seg på å varme opp en kjele hvor dampen på innsiden ekspanderte og dyttet vannet i rørene/slangene bakover, noe som resulterte i skyv (Eslamdoost 2014, 3).

I 1950 utviklet William Hamilton den første høy-hastighet jet-propulsjonen. Det er blitt gjort en god del endringer for å bedre virkningsgraden, men selve løsningen til Hamilton er ganske lik det konseptet man ser for jet-propulsjon den dag i dag (Eslamdoost 2014, 4).

Det har gjennom årene vært mange varianter av jet propulsjon, men en teknisk milepæl var når utviklingen fra at selve pumpen gikk fra å være en sentrifugalpumpe til å benytte aksial eller mixed-flow pumper. Denne utviklingen gjorde at en kunne utvikle mer kompakte, robuste og effektive løsninger som inneholdt både dyse, pumpe og styring. Disse løsningene oppstod i tidsrommet rundt opprettelsen av bedrifter som Hamilton (1950) og KaMeWa (1968) (Coop 1995, 7).

Det er vanskelig å presist si når begrepet pumpejet begynte å bli brukt. Ideen og tanken bak pumpejeten kan spores helt tilbake til 1880 hvor bedriften Thorneycroft benyttet enkelte deler av pumpejetdesignet i sine produkter (Eslamdoost 2014, 146). I 1945 ble idéen tatt ett steg videre, da den ble brukt for å redusere kavitasjon på propellene til torpedoer. Dette året fullførte nemlig G.F Wislicenus de første sketsjene til en

aksialstrømmende pumpejet. Denne var hovedsakelig konstruert til bruk på torpedoer, men ble senere også en interessant løsning for bruk på andre undervannsfarkoster. (Henderson, McMahon, Wislicenus 1964, 1). Ettersom interessen for å benytte pumpejet-løsning på undervannsfarkoster økte ble det startet et omfattende utviklingsprogram for pumpejet på U.S Naval Ordnance Test Station (NOTS) i Pasadena. Programmet utforsket pumpejet-løsninger med radial -og «mixed-flow»-strøming i forkant av propellen for å undersøke mulighetene for å unngå problemet med strømmingstap i innløpet. Konseptet pumpejet fikk mer og mer oppmerksomhet, og flere rapporter ble utarbeidet av Dr. Brumfield og hans medarbeidere på NOTS, samt av andre ved Johns Hopkins University. Programmet ved NOTS resulterte i 1950 med noen aksial-strømmende pumpejeter. (Henderson et al. 1964, 2). Det ble også i midten av 1950 opprettet et utviklingsprogram for pumpejeter av «Ordnance Research Laboratory» (ORL) ved Pennsylvania State University. Altså var det rundt 1950-tallet begrepet pumpejet virkelig begynte å sette fotspor til det som den dag i dag er i bruk på flere undervannsfarkoster.

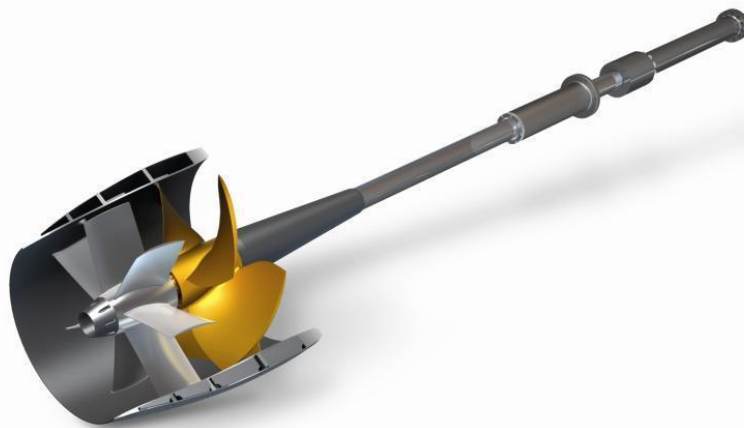
2.2 Bruk av pumpjet

Pumpejetens tidlige fase var spesifisert og konstruert til bruk på torpedoer, ref. kapittel 2.1. En av ulempene ved bruk av vanlig konvensjonell propell på torpedoer var nemlig det at torpedoen fort kunne rotere om egen akse. For å unngå dette trengte man noe som kunne motvirke rotasjonskreftene. Kontraroterende propellerer er en måte man kunne gjøre dette på, men grunnet ønsket om høy fart, lite støy og enkel mekanikk ble pumpejet ansett som en bedre løsning og derfor tatt i bruk (Kopp 2010, 30).

Pumpejeten er mye brukt i ulike undervannsbåtmiljøer, selv om det er en stor mengde undervannsbåter hvor konvensjonelle propell fortsatt nyttes. I 1990 ble blant annet undervannsfarkostene i Trafalgar-klassen til britene utstyrt med pumpejeter (Fontenoy 2007, 375), og det er dette som er det ledende fremdriftssystemet i flere undervannsklasser rundt om i den militære verden. Her kan en som tidligere nevnt nevne; Kina, Russland, USA, Frankrike og Storbritannia som store land hvor pumpejet er i bruk på enkelte av deres undervannsfarkoster den dag i dag. Av disse lands ubåter blir pumpejeten i størst grad benyttet på store atomdrevne ubåter, som har en høy hastighet i forhold til sin størrelse. Den britiske Trafalgar-klassen, de russiske Kilo, Akula -og Typhon-klassen, samt den amerikanske Virginia-klassen er undervannsbåter som

benytter pumpejet som propulsjons-system. Likhetstrekk ved disse er at det er meget store fartøy, med relativt høy hastighet. Da dette er svært verdifulle kapasiteter vil det være viktig at disse ikke blir funnet. Kavitasjons og støykrav kan tenkes å være faktorer for hvorfor disse benytter pumpejet fremfor konvensjonell propeller.

Den teknologiske utviklingen gjør det også mulig å utnytte pumpejet på overflate fartøyer. Voith har kommet med et produkt som blant annet blir benyttet på høyhastighets ferger, yachts og støttebåter til bruk ved vindmøllefarmer. Selv kaller de denne for en linear jet, men denne har de samme egenskapene som en pumpejet. Som vist på bildet nedenfor er dette en pumpejet med en post-swirl stator (se kapittel 3.5) og en svakt akselererende dyse.



Figur 2. En illustrasjon av Voith sin linear jet.

Bildet er hentet fra bedriften Voith.

Kilde: http://voith.com/corp-en/news-room/press-releases_71227.html.

2.3 Undervannsfarkoster i marinen

To år etter det andre forslaget om ubåtanskaffelse ble innvilget av Stortinget i 1907 foretok Det Norske Forsvaret kommandoheis på vår første ubåt den 28. november 1909. Ubåten fikk navnet Kobben. Fem år etter mottok vi tre nye ubåter til. Disse fikk betegnelsen A-klass. Vi hadde også bestilt en femte ubåt, men denne ankom Norge noe senere grunnet 1. Verdenskrig (Oset 2009, 8).

Fra 1923 kunne vi heise kommando på vår første B-klasse ubåt, B1. Den sjette og siste B-klassen som var bestilt var ikke ferdig før i 1930 (Oset 2009, 8).

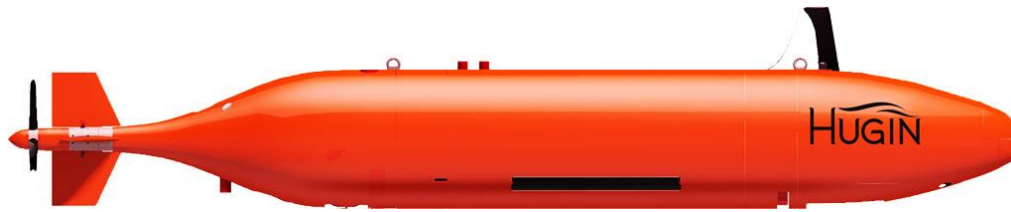
I 1866 utviklet Robert Whitehead den første selvkjørende torpedoen, noe som førte til at undervannsbåtvåpenet fikk en helt ny dimensjon da de kunne avfyre våpen som kunne senke større overflate fartøyer fra trygg avstand til fienden. Både A og B-klassen til det Norske Forsvarets ubåtvåpen hadde torpedokapasitet; A-klassen kunne bære 3 stk. torpedoer, mens B-klassen var utstyrt med fire stk (Oset 2009, 11).

Etter B-klassen har marinen hatt U-klasse, K-klasse og en ny Kobben-klasse, før vi til slutt heiste kommando på dagens ULA-klasse i 1989. Seks ubåter ble innkjøpt og det er disse Norge i dag opererer med. Ula-klassen benytter seg av et diesel-elektrisk fremdriftssystem med en konvensjonell propell (Oset 2009, 16) Denne propellen har ikke vært utskiftet siden fartøyet ble anskaffet. (Oset 2009, 16).

Ubåtteknologien må som tidligere nevnt videreutvikles, dette da sensorer og utstyr for å detektere ubåter til enhver tid gjøres bedre. Selv venter Norge nye U-212 ubåter som er bestilt fra Tyskland.

Utover ubåtene besitter Norge torpedoer til både ubåt og fregatt. Dm2A3 torpedo brukes av Ula-klassen og Sting-Ray torpedoer blir benyttet av Nansen-klassen fregatter. Torpedoutviklingen har kommet en lang vei fra den første selvbevegelige torpedoen til Robert Whitehead både når det gjelder rekkevidde, fremdriftssystem og sprengladning. Vi ser blant annet at flere torpedotyper benytter seg av pumpejet, og i stor grad har gått vekk fra åpne propell-løsninger som var vanlig før.

Det er ikke bare ubåter og torpedoer som ferdes under vann. Det er også blitt en større satsing på ubemannede undervannsfarkoster. Ny datateknologi gjør det mer og mer mulig å skape avanserte ubemannede undervannsfarkoster som kan operere over lengre perioder. Norge har blant annet utviklet Hugin som er en AUV laget for blant annet å søke etter miner og skal kunne operere i ca. 100 timer med en hastighet på fire knop. Selv om konstruksjonen ikke nytter pumpejet som propulsjonsløsning, ser man at AUV teknologien er fremtredende og under utvikling. Det vil være rimelig å anta antallet ubemannede farkoster vil øke etter hvert som styring og kommunikasjons teknologien blir bedre.



Figur 3. Den autonome undervannsfarkosten (AUV) – Hugin

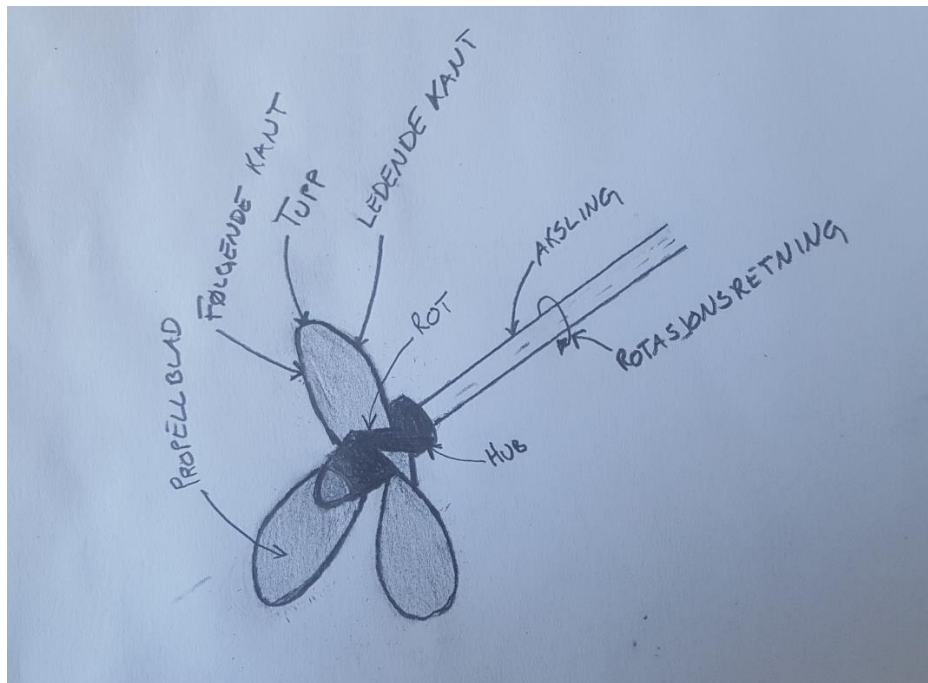
Figur er hentet fra Kongsberg sin nettside

Kilde:<https://www.kongsberg.com/ks/web/nokbg0240.nsf/AllWeb/B3F87A63D8E419E5C1256A68004E946C?OpenDocument>

3 Teori

I dette kapittelet skal ta for oss relevant teori for oppgaven. Vi vil først redegjøre for propellen og ulike variasjoner av fremdriftssystemer. Etter dette tar vi for oss pumpejeten, og hvordan dysen spiller inn på denne. Avslutningsvis blir fenomenet kavitasjon beskrevet og gjort rede for da dette er et sentralt emne i videre diskusjon.

3.1 Propell



Figur 4. En illustrasjon av en propell med navn på forskjellige komponenter.

En propell er bygget opp av en hub og propell blader. Denne er igjen festet til en aksling fra motoren, som gir propellen mulighet til å rotere (Rawson og Tupper 2001, 396). Propellens stigning kommer av vinkelen på bladet i forhold til en vertikal stilling. Stigningens vinkel angir hvor langt fartøyet beveger seg på en full rotasjon (Rawson og Tupper 2001, 405). Slipp og friksjon vil her gjøre at fartøyet ikke beveger seg like langt som propellens stigning skulle tilsi. En større diameter på propellen vil øke lengden fartøyet beveger seg på en propell rotasjon (Rawson og Tupper 2001, 405). Samtidig vil en økning i propelldiameter føre til en større motstand for fartøyet. Ledende kant er den enden av propellbladet som «først» skjærer gjennom vannet, mens følgende er baksiden på propellbladet. Det er to måter å se på arealet til en propeller. Den ene er A_0 og den

andre er A_E . A_0 er arealet som blir dannet av diameteren mellom bladenes tipp, mens A_E er det faktiske arealet til propellerbladene.

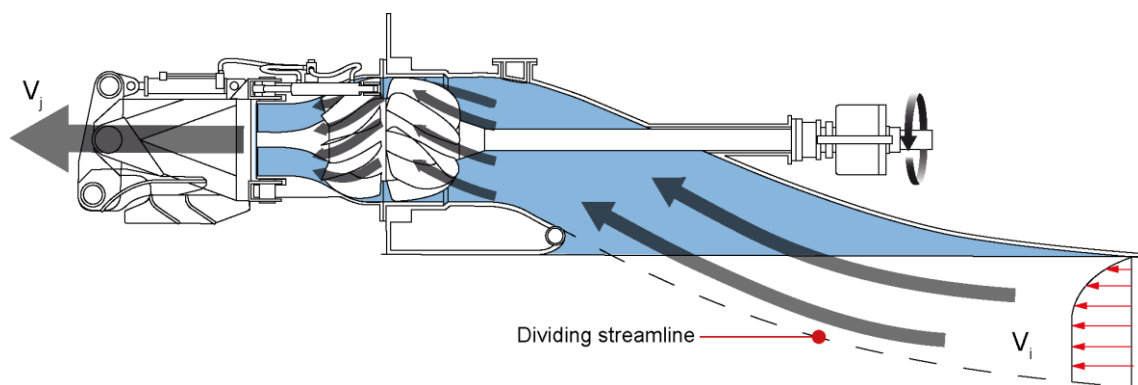
$$B.A.R = \frac{A_E}{A_0} \quad (3.1)$$

Formel 3.1 gir bladarealforholdet (B.A.R). Endringer i B.A.R påvirker virkningsgraden, skyvet og kavitasjonsegenskaper til propellen. (Rawson og Tupper, 2001, 396)

3.2 Vannjet

Vannjet er en propulsjonsløsning som finnes både innen sivile og militære sektorer. I marinen benyttes vannjet på både minefartøylene, korvettene og stridsbåtene, samt på flere av småbåtene. Vannjet er den mest vanlige jet-propulsjonen og brukes oftest på små hurtiggående båter, men er også i nyere tid blitt mer vanlig på større skip. Tradisjonell vannjet opererer med et nedsunket vanninntak under skroget enten ved direkte innstrømning eller ved et innløp i skroget (Rawson og Tupper 2001, 401).

Selve pumpen er enten en aksialpumpe eller en sentrifugalpumpe, eller en blanding av disse. Vannet strømmer da inn i en kanal med en hastighet tilnærmet lik fartøyets operasjonelle hastighet. Denne hastigheten vil dog være noe lavere grunnet friksjon mellom overflaten på fartøyet og vannet.



Figur 5. En illustrasjon av virkemåten til en vannjet. Her ser man hvordan vannet strømmer gjennom systemet.

Figuren er hentet fra Wartsila sin hjemmeside.

Kilde: <https://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/propulsors-gears/waterjets/wartsila-midsize-waterjets>

Hastigheten til vannstrømmen før den treffer impelleren inne i kanalen vil være mye lavere enn inngangshastigheten ved kanalen, noe som tilsier at den kinetiske energien til vannstrømmen har blitt til potensiell energi, altså trykket har økt. Videre vil impelleren sammen med statoren omdanne denne potensielle energien til kinetisk energi, rettere sagt hastighet. Det som er spesielt med vannjet og andre jet-løsninger er hvordan det bruker vanngjennomstrømning til å generere skyv. Newton's 3. Lov sier at "et legeme som påvirker et annet legeme med en kraft F vil bli påvirket av en like stor og motsatt rettet kraft". Denne hastighetsøkningen vil påføre vannet et skyv, som ut fra newtons 3. lov tilsier at vannet vil skyve med en like stor kraft tilbake på fartøyet. (Hüber 2018, mail). Det er dette som skaper fremdriften. Formelen 3.2 viser beregning for skyvet som skapes.

$$T = Q * \rho * (V_{ut} - V_{inn}) \quad (3.2)$$

Fordeler ved en vannjet-løsning:

- Reduserer kavitasjon, da man erstatter den åpne og frie propell-løsningen med en kanalisert løsning som vil stoppe mye av tuppvirvlene som oppstår ved en fri propell.
- Styring og manøvrering er direkte kontrollert på selve propulsor-løsningen. Man slipper altså å ha en ror-løsning.
- Reduserer skader som oppstår grunnet vibrasjoner fra propeller. Dette reduseres ved bruk av vannjet fordi man har en mye mer kontrollert vannstrømning i en kanalisert løsning enn det man har ved en fri/åpen propell-løsning.

(Brandau 1967, 8-9)

Ulemper ved en vannjet-løsning:

- En vannjet er tyngre enn de fleste andre propulsjonsløsninger.
- En vannjet-løsning vil generelt kreve mer effekt for å kunne utføre samme funksjon som en propell-løsning, noe som gjør at virkningsgraden ikke vil være like god som for en propell.
- Selv om en reduserer tuppvirvel-dannelse på impelleren, kan det fort oppstå kavitasjon andre steder. For eksempel ved inngangen til kanalen.

-
- Det vil være vanskeligere å inspisere impelleren da den er montert inne i en kanal. Dette vil også føre til mer arbeid ved eventuelle bytter og reparasjoner av impelleren.

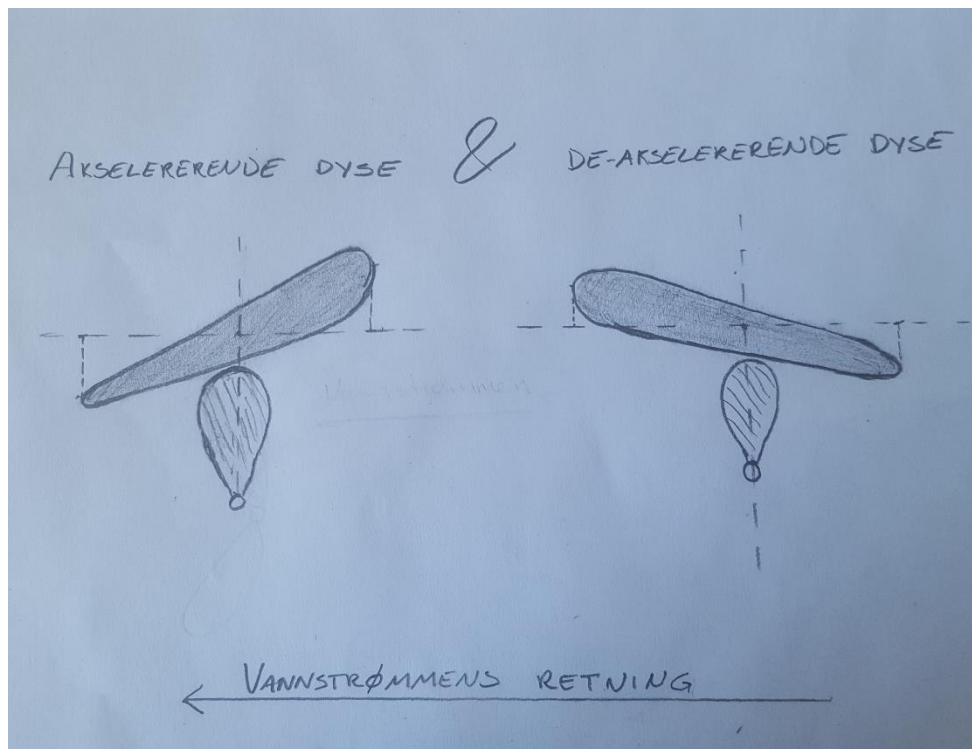
(Brandau 1967, 8-9)

3.3 Propell i dyse

I 1924 fikk den tyske fluidmekanikeren Ludwig Kort, U.S patent på det vi i dag kaller for «Kort Nozzle» eller «dysepropell». Hovedsakelig kom idéen opp på grunnlag av at det måtte utvikles en teknologi som hindret fragmenter fra propellene å falle i sjøen. I begynnelsen av utviklingen opererte man med lengre kanaler hvor propellen var plassert inni, mens det over tid ble utviklet til å bli en kortere ring plassert rundt propellen (Schneekluth og Bertram 1998, 118).

Dysen til en dysepropeller kan enten være symmetrisk om akselens senterlinje, eller ha forskjellige asymmetriske særegenheter som imøtekommer forskjellige typer strømningsbilder. På grunn av at en er nødt til å ta hensyn til et annerledes strømningsbilde ved bruk av dyse, vil ikke en dysepropell ha likt bladdesign som en konvensjonell propell.

Det er vanlig å skille dysens utforming på to forskjellige prinsipper; Akselererende og de-akselererende. Allikevel finnes det utallige typer dyser som er designet for forskjellige type strømningsbilder (Carlton 2012, 14).



Figur 6. **Illustrasjon av en akselererende dyse og en de-akselererende dyse, hvorav vannstrømmen beveger seg fra høyre mot venstre.**

Figur 6 viser forskjellen på en akselererende og en de-akselererende dyse. Grunnen til at dysen til venstre på bildet er en akselererende dyse er fordi arealet av inngangen er større enn utgangen. Et inkompressibelt fluid som vann er derfor nødt til å ha større hastighet ved utgangen enn ved inngangen for at volumstrømmen inn skal være like stor som volumstrømmen ut av dysen (Carlton 2012, 14).

Videre vil en de-akselererende dyse basere seg på de samme prinsippene som den akselererende, bare motsatt. Formålet med en slik dyse er altså å senke farten på vanngjennomstrømmingen, og derfor må inngangsarealet være mindre enn utgangsarealet på dysen. En de-akselererende dyse vil gjerne gi gode kavitasjonsegenskaper og av den grunn også mindre lyd. Dette kommer av at en de-akselererende dyse bremses vanngjennomstrømmen før den treffer propellen/impelleren (Carlton 2012, 15).

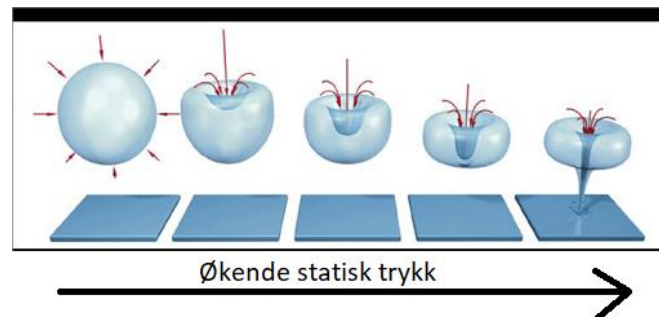
Som nevnt tidligere vil de forskjellige typene dyser passe til forskjellige type strømningbilder. På grunn av godt effekt fremover er den akselererende dysen ofte populær (Carlton 2012, 15).

På den annen side er den ikke optimal for fartøyer som trenger å operere godt i revers. Et eksempel på dette er taubåter. Her vil formen på en akselererende dyse være uhensiktsmessig, da den i revers vil fungere som en svært de-akselererende dyse, og skyvegenskapene vil bli kraftig redusert. Det vil her være hensiktsmessig med en dyse som har relativt like egenskaper fremover og i revers (Carlton 2012, 15).

3.4 Kavitasjon

Kavitasjon kan defineres som:

Kavitasjon er et fenomen som forekommer i hurtige væskestrømmer. Synker det statiske trykket i en væske under damptrykket, dannes dampbobler som; når trykket på nytt stiger, kondenseres på en sjokkartet måte. Dette får boblene til å klappe sammen med et slag (implodere), slik at lokale og heftige trykkøkninger skapes. (Grøn 2018)



Figur 7. En illustrasjon av dampbobler som imploderer ved økende statisk trykk.

Figuren er hentet fra forelesning gjort her på sjøkrigsskolen.

En kan på et generelt grunnlag si at kavitasjon oppstår når strømminger i vannet fører til et trykkfall. Dette trykkfallet vil redusere vannets kokepunkt og vandamp vil kunne bli dannet i disse områdene (Rawson og Tupper 2001, 407). Når denne dampen beveger seg vekk fra lavtrykksområdene og over til normalt/høyt trykk igjen vil disse implodere som vist i figur 7. Når gassboblene imploderer vil de kunne forårsake skade på nærstående objekter i form av erosjon eller avskallinger (Rawson og Tupper 2001, 407). For en propell vil det være rotasjonshastigheten som står for trykkreduksjonen som skjer på ledende kant (Rawson og Tupper 2001, 407). Det er viktig å merke seg at det også kan oppstå kavitasjon andre steder enn på propellen/impelleren. Eksempelvis; styrefinner, dyse og oppheng til dyse.

Det finnes mange former for kavitasjon, men oppgaven vil stort sett forhold seg til den formen for kavitasjon som kalles tuppvirvler, eller på engelsk «tip vortex». Det er denne formen for kavitasjon som vanligvis oppstår først (Rawson og Tupper 2001, 407).

Disse tuppvirvlene oppstår ofte bak tuppen av bladet pga. virveldannelsen, for så å utvikle seg mot tuppen av selve bladet. Dette fenomenet kan ligne en slags pisk som består av kavitasjonsblærer. Denne formen for kavitasjon oppstår gjerne når turtallet blir så høyt at tupphastigheten til propellen/impelleren blir for stor i forhold til det den er dimensjonert for.

3.4.1 Konsekvenser av kavitasjon:

Reduksjon av virkningsgrad til propellen.

En propell designes ut ifra en hastighetskondisjon, noe som tilsier at propellen er designet til å ha best mulig virkningsgrad i akkurat den ene kondisjonen. Dersom en propell ferdes i en høyere kondisjon enn hva den er designet for, risikerer denne å kavitere. Dette vil gjøre at noe av energien propellen bruker, blir benyttet til å skape unødvendige gassbobler. Dette resulterer i tap av effekt, og dermed lavere virkningsgrad. (Stone Marine Propulsion, 5)

Vibrasjoner og støy.

Kavitasjon kan indusere vibrasjoner og støy på skroget. I undervannsbåtmiljøet til Forsvaret vil dette føre til fare for deteksjon fra fienden. Vibrasjonene oppstår av at det utløses store krefter når dampboblene flyttes og imploderer. Når disse imploderer vil de avgi lyd (Stone Marine Propulsion, 3). Vi har erfart fra lab-forsøk ved sjøkrigsskolen at denne lyden kan høres hvis en er i nærheten. En kan videre anta at denne kan kraftig forsterkes med lytteverktøy på ulike fartøy.

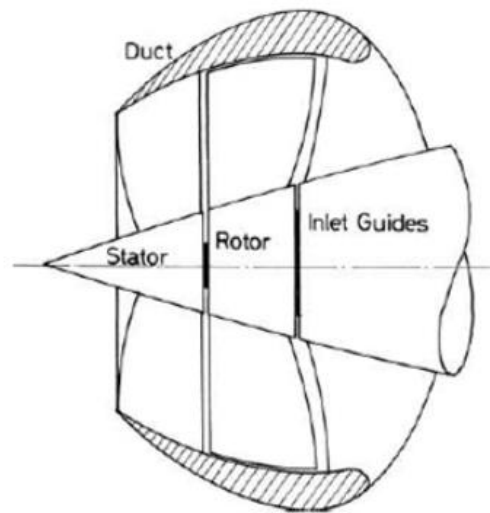
Skade og tæring.

Kavitasjonen kan føre til skade eller tæring på propellbladene og roret. Dette skjer gjerne når kavitasjonsboblene imploderer i nærheten av oversiden på bladene. Det trykket som skapes ved implodering av kavitasjonsbobler kan være så intenst at de fleste materialer kan bli skadet. (Rawson og Tupper 2001, 407)

3.5 Pumpejet

Pumpejet er en viktig del av den marinetekniske utviklingen. Som vi skrev om i kapittel 2.2 er det vanskelig å datere akkurat når begrepet kom på banen, men som beskrevet tidligere er 1945 et år å forholde seg til.

Pumpejeten er en løsning som innehar en dyse, en stator og en rotor/impeller. På mange måter er det en videreutvikling av dysepropeller, men som bygger på mange av de samme prinsippene som andre jet-propulsjoner som f.eks. vannjet.



Figur 8. En enkel illustrasjon av en pumpejet med de forskjellige komponentene en slik propulsjonsløsning innehar.

På grunn av de like prinsippene jet-propulsjonene opererer med, er det vanskelig å definere akkurat hva en pumpejet er, men en enkel definisjon kan være:

En pumpejet er en propulsjonsløsning basert på en pumpeløsning (Hüber 2018, mail)

Tar man utgangspunkt i denne definisjonen kan man også si at vannjet er en type pumpejet. Dette på grunn av pumpeløsningen den innehar i kanalen vannet strømmer gjennom for å generere skyv. For vår oppgave kan vi konkretisere definisjonen litt og si at:

En pumpejet er en propulsjonsløsning basert på en aksial pumpeløsning

Denne definisjonen vil konkretisere det at vi ser på en pumpeløsning hvor vannstrømmen kommer aksielt inn i dysen og er mer eller mindre aksiell gjennom hele pumpeløsningen. I det videre arbeidet har vi tatt utgangspunkt i denne definisjonen.

Virkemåte

Vannstrømningen vil ankomme dysen med en hastighet. Deretter vil det statiske trykket til vannstrømningen øke inne i dysen på grunn av at kinetisk energi blir omdannet til potensiell energi. Ved at kinetisk energi omdannes til potensiell energi vil dette si at hastigheten på vannstrømmen reduseres. Når vannstrømmen treffer impelleren vil den potensielle energien være relativt høy, og impelleren vil sette fart på vannstrømmen ved å omdanne den lagrede potensielle energien til kinetisk energi. Dette vil gi en hastighetsøkning på vannet i forhold til den hastigheten vannet traff inngangen til dysen med. Det er slik skyvet, altså fremdriften til fartøyet skapes. Vannet som forlater impelleren vil ha en noe annen retning enn hva det kom inn med. En postswirl statoren bidrar her med å rette opp vannet slik at det gis en aksiell retning ut av systemet (Hüber 2018, mail).

Faktorer som påvirker effekten en pumpejet klarer å levere:

- Hvordan rotoren er konstruert.
 - Antall blader det er på rotoren (QinetiQ 2012, 4.13)
 - Hvordan bladene er utformet
- Hvordan rotor og stator interagerer.
 - Om det er en pre-swirl (stator foran rotor) eller post-swirl (stator plassert bak rotor) pumpejet.
 - En post-swirl pumpejet er hovedsakelig designet for å bringe en vesentlig kavitasjonsforbedring sett opp mot vanlige propeller. (QinetiQ 2012, 4.9)
 - En pre-swirl pumpejet derimot er designet for å redusere lyden som gis fra bladene. Dette er gjort ved å glatte strømnings-innløpet til rotoren. (Qinetiq 2012, 4.9)
- Friksjon på "huben"
- Dysens utforming
 - Hvor akselererende eller de-akselererende den er. (QinetiQ 2012, 4.9)
 - Ledende kants utforming. Konkav/konveks

3.5.1 Dysens påvirkning på en pumpejet

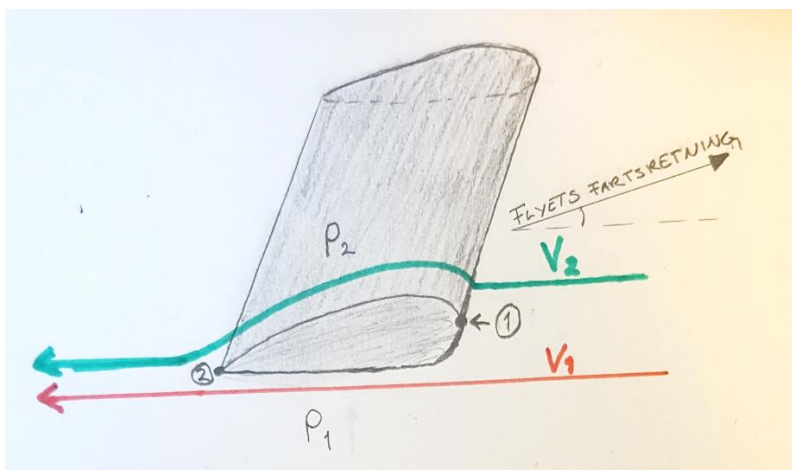
Vi har tidligere nevnt at utformingen på dysen har mye å si for hvilke egenskaper dysen innehar. Dette kommer av at to forskjellige objekt som befinner seg i et fluid, vil bli påvirket forskjellig ut fra deres utforming. Parametere som er viktig å merke seg når en skal se på hvordan et fluid påvirker et objekt er blant annet trykk, hastighet og høydeendring. For å kunne se hvordan en dyse i en pumpejet påvirker disse faktorene, må vi forstå prinsippet bak *Bernoullis likning*, formel 3.3.

$$P_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \quad (3.3)$$

I og med at vannstrømmen vil treffe dysen aksielt og ikke bli utsatt for endring i høyderetning vil vi kunne sløyfe to av leddene i denne likningen. Likningen vil da se slik ut:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \quad (3.4)$$

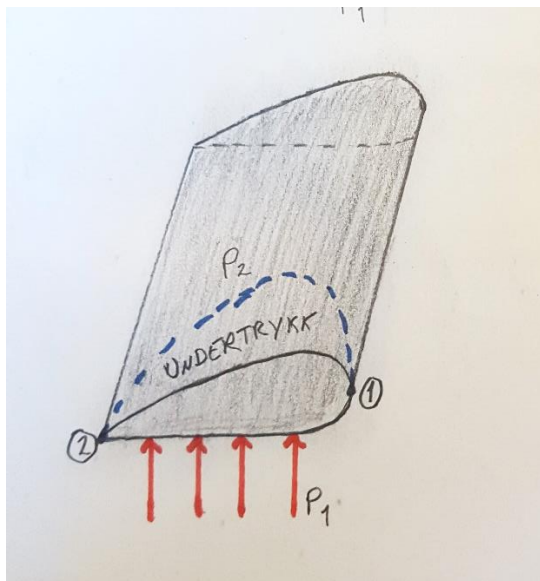
Ut fra likningen kan vi nå se at hastigheten fluidet beveger seg med vil påvirke trykket som skapes, og omvendt. For å forenkle forståelsen for likningen og hva som skjer er det lettere å se på hvordan luft påvirker en flyvinge, før vi ser på hva som skjer rundt og inne i en dyse.



Figur 9. Luftens hastighetsbilde rundt en flyvinge, når flyet beveger seg i vist retning.

Figur 8 illustrerer en flyvinge som beveger seg gjennom luften, og hvordan luften beveger seg rundt vingen. For å kunne sette ord på hvordan fysikken påvirker en slik flyvinge i forhold til Bernoullis likning er vi nødt til å merke oss noen referansepunkter. Disse referansepunktene er som figuren viser satt til være ledende kant (1) og følgende kant (2).

En kan se av figur 8 se at V_2 har en lengre bane enn V_1 for å komme seg fra punkt 1 til punkt 2. Dette vil si at V_2 må være større enn V_1 for at luften skal ankomme punkt 2 likt. I følge Bernoullis likning vil dette skape en trykkforskjell mellom undersiden og oversiden av vingen. Trykket på oversiden vil bli lavere enn trykket på undersiden på grunn av at farten er høyere (RC ModelReviews 2015).

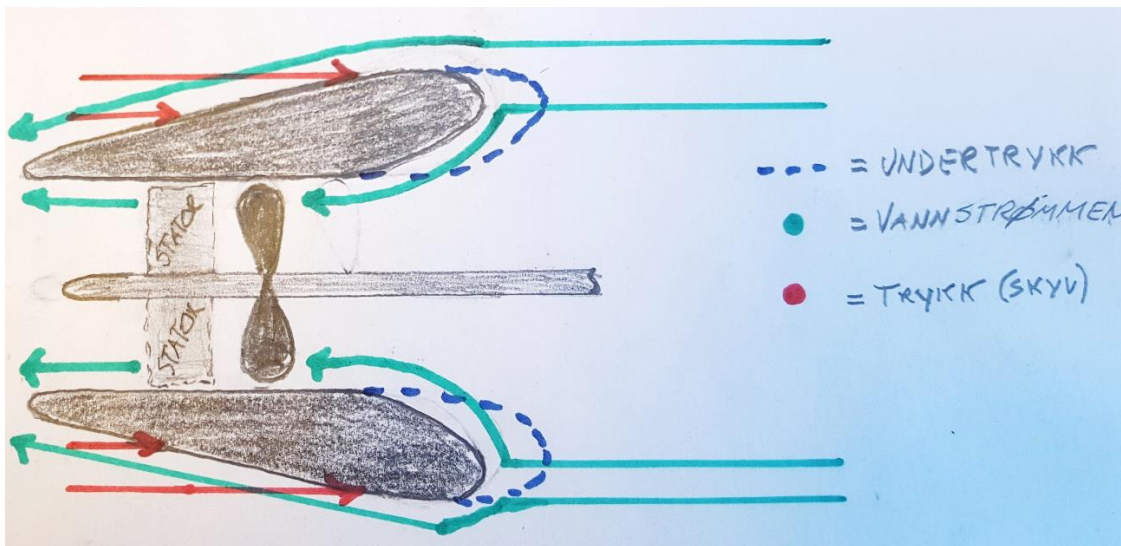


Figur 10. **Luftens trykkbilde (fiktivt) på en flyvinge. Basert på hastighetsbilde vist i figur 8.**

Figur 9 illustrerer et fiktivt trykkbilde som dannes på vingen ut ifra hastighetsbilde i figur 8. Det vil på grunn av høyere hastighet over vingen dannes et overtrykk på oversiden av vingen. Trykket vil altså bli større på undersiden, og av den virke som et skyv som dytter vingen oppover (RC ModelReviews 2015). Motsatt vil det bli dersom vingen er justert slik at luften har lenger vei å gå på undersiden for å ta seg fra punkt 1, til punkt 2.

For dysen i en pumpejet er det på sett og vis akkurat den samme fysikken som finner sted. Når undervannsfarkosten ferdes i sjøen vil det skapes trykkforskjeller på grunn av vannets

hastighetsforskjeller rundt dysen. Hva som direkte skjer kommer an på hvordan dysen er utformet, akkurat som for flyvingen. Vi vil her eksemplifisere med en akselererende dyse.



Figur 10. En illustrasjon av hvordan vannstrømmen (grønt) beveger seg i forhold til en akselererende dyse dersom vannstrømmen går fra høyre og mot venstre i bilde. Videre viser figuren også trykket (rødt) som presser på dysen grunnet undertrykket (blått) som skapes.

Figur 10 illustrerer hvordan vannstrømmen (grønn) beveger seg i forhold til en akselererende dyse under vann. Her ser vi hvordan vannet strømmer inn i dysen. Vannet vil entré en større åpning enn det vil forlate impeller fra. Dette vil gi en akselererende effekt, samtidig som det skapes et undertrykk der hvor vannet entrér dysen fordi hastigheten til vannet vil være høyere enn på utsiden (RC ModelReviews 2015). Ifølge Bernoullis likning vil lavere hastighet tilsi større trykk, noe som fører til at trykket på utsiden av dysen blir høyere enn på innsiden. Dette vil skape et skyv, hvor størrelsen på skyvet avhenger av hvilken helning dysen har på utsiden og hvilken hastighet fartøyet seiler med (RC ModelReviews 2015). Størrelsen på dette skyvet vil også avhenge av vannet hastighet og turtallet impelleren kjører med.

Vi har så vidt vært innom hvordan dysens design også påvirker hastighetsbildet til vannstrømmen inne i dysen, ref. Kapittel 3.3. For å se nærmere på dette må vi ta utgangspunkt i kontinuitetslikningen. Denne likningen bygger på et prinsipp i fluidmeknikken som sier at et inkompressibelt fluid vil strømme inn i et rør med like

stor volumstrøm som den vil strømme ut med. Vann er et inkompressibelt fluid, så i denne sammenheng gir kontinuitetsligningen at:

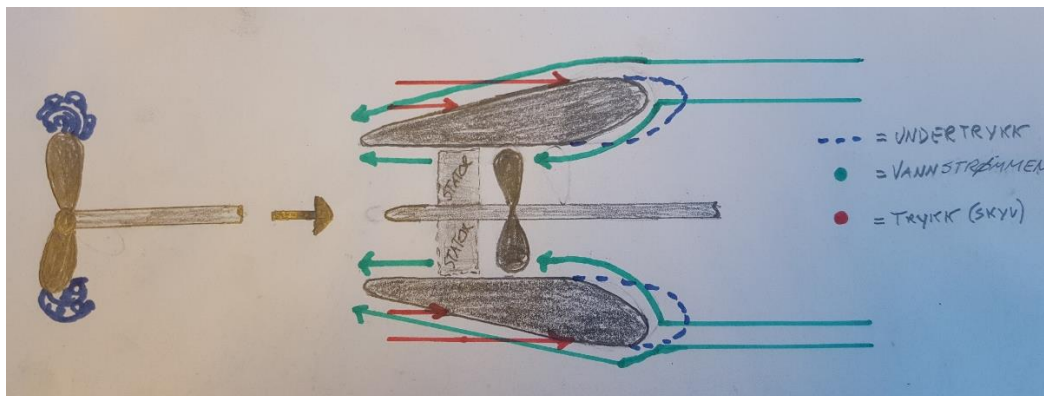
$$Volumstrøm_{inn} = Volumstrøm_{ut} \quad (3.3)$$



$$\rho_1 * v_1 * A_1 = \rho_2 * v_2 * A_2 \quad (3.4)$$

Hvor: $\rho_1 = \rho_2$

Hvis vi ser på venstre side av ligning 3.4 som inngangspartiet til dysen, kan vi se at arealet her vil være større enn utgangspartiet. Dette vil tilsi at hastigheten til vannet som strømmer gjennom dysen må være høyere i utgangspartiet for at likningen skal stemme. Det motsatt vil skje dersom man går for en de-akselererende dyse i stedet for en akselererende dyse.



Figur 11. En figur som illustrerer hvordan tuppvirvler på en åpen propell forsvinner ved å plassere en dyse utenpå.

En dyse vil også redusere slipp, kavitasjon og støy som skapes av impelleren. Vi har fra kapittel 3.4 at kavitasjon er uønsket da det skaper vibrasjon, støy, redusert virkningsgrad og økt slitasje. Prinsippet for å redusere kavitasjonsmulighetene ved bruk av dyse er enkelt. Dysen plasseres på propulsjonsløsningen for å blokkere rommet hvor tuppvirvelen dannes (RC ModelReviews 2015). Det er viktig å merke seg at dette ikke vil føre til at det aldri oppstår kavitasjon. Da det fremdeles vil være en liten glippe mellom impellertuppen og dysen vil det allikevel kunne oppstå kavitasjon når belastningen blir for stor i forhold til det propulsjonsløsningen er designet for.

4 Casestudie

I denne delen skal vi ta for oss en casestudie. Vi vil først gjøre rede for en fiktiv ubemannet undervannsfarkost og hvilke typer oppdrag denne kan tenkes å ha. Deretter vil vi utføre beregninger for denne undervannsfarkosten med propell og pumpejet som propulsjonsløsning. Vi har valgt å begrense pumpejetberegningene til å kun se på en akselererende dyse da vi mener dette vil gi et godt nok sammenligningsgrunnlag. Resultatene vil bli lagt frem og det vil bli redegjort for fremgangsmåte som er brukt og antagelser tatt i forbindelse med beregningene.

4.1 Casestudie – Autonom undervannsfarkost

4.1.1 Case:

Forsvaret trenger ubemannede autonome eller fjernstyrte fartøy i fremtiden. Oppgaver et slikt fartøy kan løse vil være meget varierende. Det kan være snakk om en angreps -eller overvåkningsfarkost som skal kunne deployere med høy hastighet, samtidig som at den skal være vanskelig å oppdage. Det kan også være behov for farkoster som skal operere på en lav hastighet eller ligge skjult, for eksempel i en fjord å vente på et fiendtlig fartøy. Kravene her vil variere og vi vil ut fra resultatene i den kommende casen bruke disse ulike senarioene til å argumentere for eller imot pumpejet.

I eksperimentet har vi satt størrelsen på fartøyet til å være en lengde på 16 meter med en diameter på 1,8 meter. Størrelsen har vi satt slik at det skal være stort nok til å kunne installere et stort spekter av sensorer, ut ifra hvilke typer oppdrag en ønsker at farkosten skal kunne utføre. Volumet på fartøyet er $29,36 \text{ m}^3$. Hvis 70 % av fartøyets volum blir benyttet til batterier, motorer og oppdriftssystemer, vil det være $8,8 \text{ m}^3$ til overs for sensorer eller våpenpakker. Det vil da være plass til sju DM2A3 torpedoer, som vil være en betydelig slagkraft. Slagkraften vil da ikke gå på bekostning av fartøyets rekkevidde. Vi kommer til å ta utgangspunkt i at fartøyet skal takle en operasjonell hastighet på ca. 30 knop, og kommer derfor til å ta utgangspunkt i denne hastigheten for mange av utregningene. Allikevel vil vi teste fartøyets ytelse ved både lave og høye hastigheter. Grunnen til at vi ønsker å se på både lave og høye hastigheter er for å se hvordan virkningsgraden for både propell og pumpejet varierer med hastighet. Dette vil kunne gi

oss en pekepinn på hvilken type fremdriftssystem som passer seg for de ulike hastighetene.

$$R_{ns} = \frac{V_s L_s}{v_s} = R_{nm} = \frac{V_m L_m}{v_m} \quad (4.1)$$

$$C_F = \frac{0,075}{(\log(R_n) - 2)^2} \quad (4.2)$$

$$C_T = C_F + C_R \quad (4.3)$$

$$R_T = \frac{V^2 * C_T * S * \rho}{2} \quad (4.4)$$

$$T = \frac{R_T}{1-t} \quad (4.5)$$

For å få verdier på slepetall til eksperimentet har vi benyttet et modellforsøk gjennomført ved (Mohammad Moonesun et al 2013). I denne studien er det beregnet og målt verdier for en tilsvarende farkost som vi skal se nærmere på. Deres farkost har en lengde på 32 meter og en diameter på 3,6 meter, og er testet fra 0-15 knop. Vi har på grunn av konstant reynoldstall benyttet formel (4.1) for å skaler dette fartøyet ned til en lengde på 16 meter og en diameter på 1,8 meter. Studien har gjennomført kalkulasjoner basert på forsøk i en slepetank og fått tall for slepemotstand ved de ulike hastighetene. Ved bruk av konstant Reynolds tall har forfatterne av modellforsøket benyttet viskositeten til vann ved 18 grader. I omgjørelsen er det blitt benyttet en viskositet tilhørende fire grader. Dette fordi fartøyet er tiltenkt å gå i Nord-atlanteren på et relativt stort dyp. Dette vil gjøre at resultatene for fartøyet ikke vil være gyldige hvis det seiler i varmere farvann. Videre er ny friksjonskoeffisient og totalmotstandskoeffisient utregnet ved formel (4.2) og (4.3). Formel (4.4) ble benyttet for å kalkulere total slepemotstand for nye dimensjoner. Til slutt er skyvet beregnet med formel (4.5). I denne formel er t antatt til å være 0,11. Mer om denne antagelsen vil dukke opp i kapittel 5.1.1.

4.2 Gjennomføring propellberegning

For å kunne si noe om hvorvidt en pumpejet er å anbefale fremfor den konvensjonelle propellen er en nødt til å se på egenskapene til begge propulsjonsløsningene opp mot hverandre. Til vårt sammenlikningsgrunnlag har vi valgt å se pumpejet-løsningen opp mot en propellserie med navn Gawn. Vi har valgt å ta utgangspunkt i Gawn-serien fordi denne propellserien egner seg med høy belastning og høy hastighet da den har en

segmenter bladseksjon, noe som gjør den er mindre kavitasjonsutsatt (Ghose og Gokarn 2004, 222).

Gawn-serien omfavner også et stort spekter med forskjellige bladarealforhold (B.A.R), noe som gjør det mulig å sammenlikne hvordan et slikt forhold påvirker virkningsgraden for både pumpejet og propell. Vi har tatt for oss to B.A.R verdier.

- B.A.R = 0,8
- B.A.R = 1,1

Fartøyet er ønsket til å operere godt ved ca 30 knop. Vi har satt en maks propellbelastning til å være 75 kN/m² ved denne hastigheten. Vi har satt denne til 75 KN/m² for at fartøyet skal kunne operere ved høye hastigheter. Dersom propellbelastningen blir for høy, vil propellen lettere kavitere, noe vi ikke ønsker i sjiktet rundt 30 knop. For å finne A_0 har vi benyttet formel 4.6. Videre er A_0 og $D_{propell}$ funnet ved bruk av formel 4.7 og 4.8.

$$A_E = \frac{T}{P_{Max}} \quad (4.6)$$

$$A_o = A_E * B.A.R \quad (4.7)$$

$$D_{propell} = \sqrt{A_o * \frac{4}{\pi}} \quad (4.8)$$

$$J = \frac{V_a}{n * D} \quad (4.9)$$

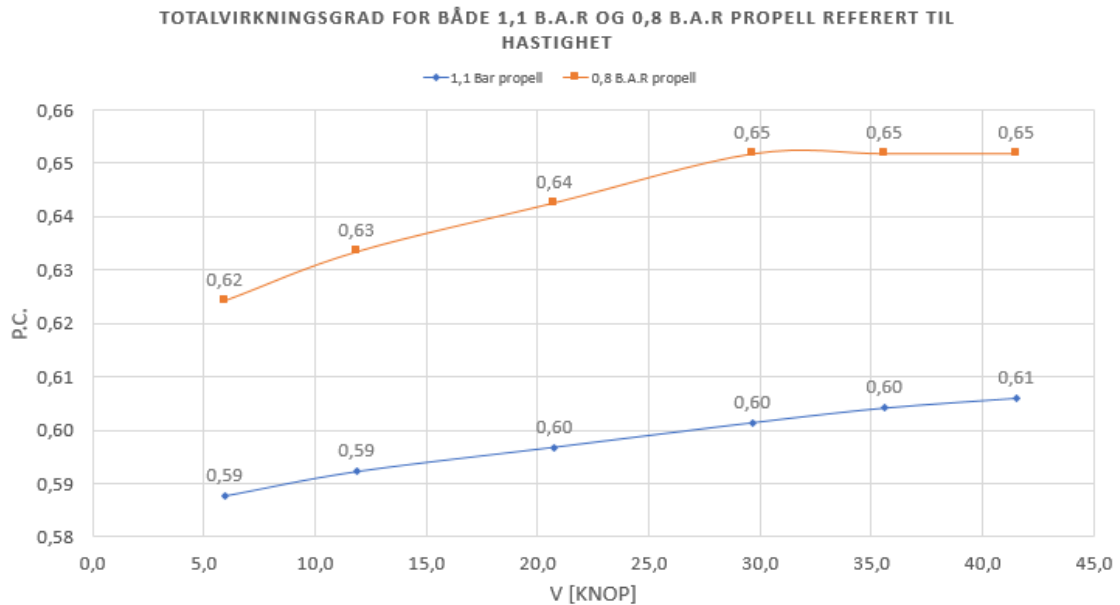
$$K_t = \frac{T}{\rho * n^2 * D^4} \quad (4.10)$$

Formel 4.9 og 4.10 ble benyttet for å finne $\frac{K_t}{J^2}$. For 29,6 knop ble denne verdien benyttet til å lese av $\frac{P}{D}$, η_0 , K_t og K_Q fra en friprøvetabell (Rawson og Tupper, 2001, 455). $\frac{P}{D}$ ble da fastsatt for samtlige hastigheter. $\frac{K_t}{J^2}$ ble plottet i et friprøvediagram for verdier av J mellom 0,2 og 2. (se Vedlegg A. Friprøvediagrammer) I disse ble η_0 , K_t og K_Q avlest for de ulike hastighetene utover 29,6 knop. For B.A.R=0,8 ble diameteren 0,932 m og P/D ble 1,36. For B.A.R=1,1 ble de samme verdiene henholdsvis 0,787m og 1,34.

Videre er skrogvirkningsgraden (η_H), relativ rotasjonsvirkningsgrad (η_r) og mekaniskvirkningsgrad (η_m) beregnet for å finne totalvirkningsgraden (P.C). η_H og P.C er beregnet ved formel 4,11 og 4,12. η_r og η_m er antatt til å være henholdsvis 1 og 0,98.

$$\eta_H = \frac{1-t}{1-w} \quad (4.11)$$

$$P.C = \eta_0 * \eta_r * \eta_H * \eta_m \quad (4.12)$$



Figur 12. En graf som viser totalvirkningsgraden til begge propell-løsningene opp mot hastigheten til farkosten i knop. 1,1 B.A.R (blå kurve) og 0,8 B.A.R (oransje kurve).

Fra utregningene kan en se at P.C er bedre for de forskjellige hastighetene ved 0,8 B.A.R. enn ved 1,1 B.A.R. Dette på grunn av at større B.A.R- verdier fører med seg mer friksjonsmotstand, noe som vil gå utover virkningsgraden. Sett fra en annen side vil større B.A.R verdier ikke like lett kavitere da et større bladareal vil takle en større belastning enn ett mindre bladareal.

En kan også se at virkningsgraden stiger litt ettersom hastigheten øker. Det er vanskelig å utpeke noe klart system på hvor mye virkningsgraden øker med farten, da verdiene er avlest fra et friprøvediagram, og det vil av den grunn unøyaktigheter. Dette ser vi videre ved kontrollregning. Ved kontrollregning av avleste verdier med formlene 4.13 og 4.10, ser vi små endringer i avlest K_t og J vil gi store endringer i skyv.

$$n = \frac{T}{j * D} \quad (4.13)$$

$$T = \frac{Rn}{1-t} \quad (4.14)$$

Allikevel kan en ut ifra figur 12, 13 og 14 se en liten tendens til at økningen av virkningsgraden avtar noe ettersom farten øker. En kan anta at propellen etterhvert vil nå et punkt hvor propellvirkningsgraden (ρ_0) vil gå betraktelig ned, noe som vil føre til en lavere P.C. Dette kan vi se av at figur 13 og 14 ved at K_t/J^2 blir lavere ved økende hastighet. Til slutt vil K_t/J^2 bli så lav at kurven ikke treffer den tilhørende P/D-linjen i friprøve-diagrammet (se Vedlegg A. Friprøvedigrammer) før ved et høyt fremgangstall. Dette vil gi en lav ρ_0 . En kan også tenke seg at virkningsgraden blir redusert etterhvert som turtallet blir for høyt fordi det vil oppstå kavitasjon når propellbelastningen blir for stor. Kavitasjonen som oppstår vil forstyrre vannstrømmen som går gjennom propellen, og av den grunn redusere virkningsgraden.

B.A.R 0,8			V	Ae	Ao	D	P/D					
			[Knop]			[m]						
			29,6	0,53	0,669	0,923	1,36					
V	V	Va	K_t/J^2	ρ_0	J	P/D	n	Kt	Kq	P.C		
[Knop]	m/s	m/s		Avlest	Avlest	Avlest	[rps]	Avlest				
5,9	3,05	2,90	0,26	0,68	0,96	1,36	3,27	0,24	0,05	0,62		
11,9	6,10	5,79	0,24	0,69	0,98	1,36	6,44	0,23	0,05	0,63		
20,8	10,67	10,13	0,23	0,70	0,99	1,36	11,15	0,22	0,05	0,64		
29,6	15,24	14,48	0,22	0,71	1,00	1,36	15,69	0,22	0,04	0,65		
35,6	18,29	17,37	0,22	0,71	1,01	1,36	18,64	0,22	0,04	0,65		
41,5	21,33	20,27	0,21	0,71	1,02	1,36	21,53	0,22	0,04	0,65		

Figur 13: En oversikt av utregnede/avleste verdier for P.C for 0,8 B.A.R. P/D-verdien er avlest ut ifra 29,6 knop og deretter fastsatt for resterende hastigheter.

B.A.R 1,1			V	Ae	Ao	D	P/D					
			[Knop]			[m]						
			29,6	0,53	0,486	0,787	1,34					
V	V	Va	K_t/J^2	ρ_0	J	P/D	n	Kt	Kq	P.C		
[Knop]	m/s	m/s		Avlest	Avlest	Avlest	[rps]	Avlest				
5,9	3,05	2,90	0,36	0,64	0,88	1,34	4,18	0,28	0,05	0,59		
11,9	6,10	5,79	0,33	0,65	0,90	1,34	8,18	0,27	0,05	0,59		
20,8	10,67	10,13	0,31	0,65	0,93	1,34	13,92	0,27	0,05	0,60		
29,6	15,24	14,48	0,30	0,66	0,94	1,34	19,57	0,27	0,04	0,60		
35,6	18,29	17,37	0,30	0,66	0,95	1,34	23,36	0,26	0,04	0,60		
41,5	21,33	20,27	0,29	0,66	0,95	1,34	27,23	0,26	0,04	0,61		

Figur 14: En oversikt av utregnede/avleste verdier for P.C for 1,1 B.A.R. P/D-verdien er avlest ut ifra 29,6 knop og deretter fastsatt for resterende hastigheter.

4.3 Gjennomføring pumpejetberegning

For beregning på pumpejeten har vi benyttet oss av to forskjellige studier. Vi har brukt en studie av Marquant (2011). I tillegg til denne har vi benyttet oss av en fremgangs måte for beregning av vannjet utlevert av veileder. Prinsippet for utregninger på vannjet og pumpejet er relativt like. Systemene bygger på de samme prinsippene om endringene i vannets bevegelsesenergi. Grunnet mangel på eksperimentelle data for vår case har det medført en rekke antagelser. Disse antagelsene vil det fortløpende bli gjort rede for.

4.3.1 Valg av impellerdiametere

Størrelsen på en impeller i en pumpejet er 70 – 80 % av propellstørrelsen (QinetiQ 2015, 4.12). Vi har satt impellerdiameteren til å være 70 % av propelldiameteren. Videre har vi plassert impelleren ved innløpet til dysen, noe som tilsier at vi ikke har en stator i forkant. Dysens inngang har vi satt til å være to prosent større enn impellerdiameter for å ha en liten klaring til dysen. Dette gir en klaring på henholdsvis 1,1mm og 1,3mm for B.A.R 1,1 og B.A.R 0,8. Det er viktig å merke seg at B.A.R-verdiene for pumpejeten ikke vil være lik som for propell. Vi benytter B.A.R 0.8 eller 1.1 for å enkelt kunne referere til pumpejet-løsningene basert på hvilken propellberegning de er kalkulert utfra. B.A.R-verdiene for pumpejetene er begge på ca 1.73. Denne er beregnet ved hjelp av formel 4.15 og 4.16.

$$A_E = h * c * n \quad (4.15)$$

Hub-diameteren skal tilstrebe å gå mot null ved utløpet (Michael et al 2008, 6). Hub-diameteren ved innløpet burde derimot være et sted mellom 45 – 50 % av diameter til impelleren (QinetiQ 2005, 4.12). Derfor er hub-diameteren ved innløpet satt til 24,8 cm og 29,1 cm for henholdsvis 1,1 B.A.R og 0,8 B.A.R. Disse verdiene er videre benyttet for å gjøre et oversalg for impellerbelastningen. Dette er gjort ved bruk av formel 4.16, 4.17 og 4.18.

$$\frac{N}{m^2} = \frac{T}{c * h * N} \quad (4.16)$$

I formelen uttrykker C kordelengden, h er rotorspenntet og N er antall blader. En kan finne h ved å benytte formel (4.17).

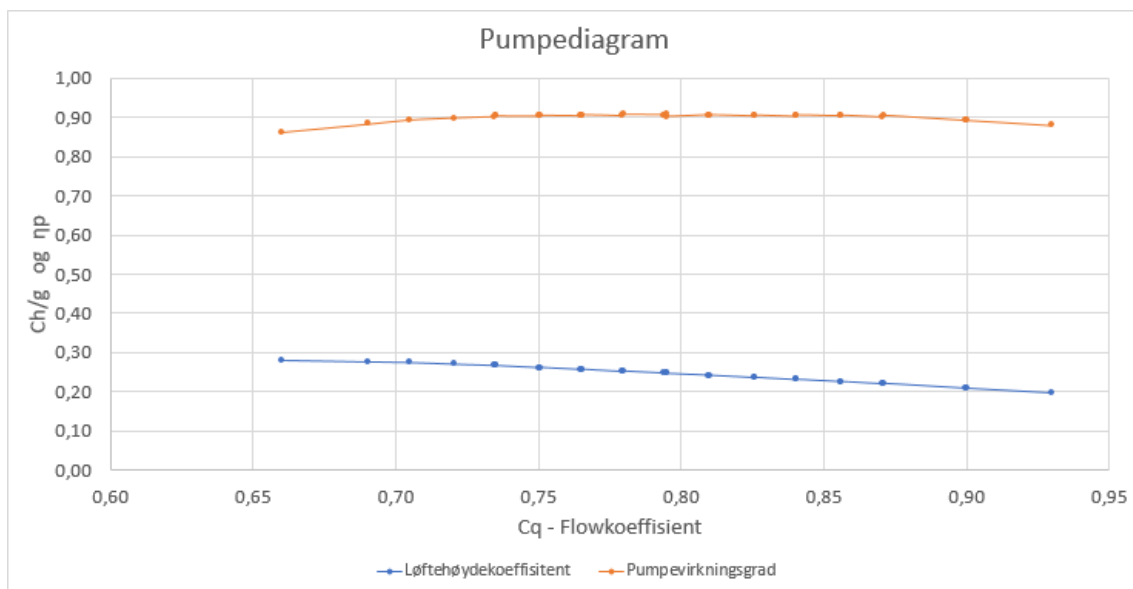
$$h = \frac{D_{tip} - D_{hub}}{2} \quad (4.17)$$

Ifølge Michael J. Thad vil forholdet mellom kordelengde og spennet ligge mellom 0,5-1 (Thad 2008, 17). Vi har antatt et forhold på en i våre beregninger. Vi finner da C ved formel 4.18

$$c = d * \frac{c}{d} \quad (4.18)$$

4.3.2 Bestemmelse av volumstrøm og justerbare størrelser

Som sagt er det gjort noen antakelser, blant annet er tapskoeffisienter ved inn og utløp satt til å være henholdsvis 0,2 og 0,079. Disse er antatt til å være like som for ONR-turbinen grunnet mangel på målte verdier. Volumstrøm, utgangsdiameter og trykkendring har vi justert manuelt. Grafen for løftehøyde og for pumpevirkningsgrad er hentet fra ONR-studien. For at systemkurven skal passe til disse kurvene må flowkoeffisienten for vår pumpejet bli satt til 0,85. Denne verdien vil ikke nødvendigvis være reell, da ONR-pumpen er testet i et åpent forsøk, ref Marquant (2011). Videre er ONR-pumpen konstruert slik at den skal operere best i dette området (rundt 0,85), noe vår pumpe ikke nødvendigvis vil. På grunn av at ONR-pumpejeten også er en aksialpumpe, antar vi allikevel at disse verdier vil gi mer troverdige svar for oss, enn å ikke ha et referansepunkt.



Figur 15. Dette er pumpediagrammet som er hentet ut fra ONR-studien. Dette er et pumpediagram for aksialpumper.

Ved å sette en antatt volumstrøm for 29,6 knop, ble utgangsdiameter justert slik at ΔM ble lik det skyvet som motstandsforsøket beskrev som nødvendig for at fartøyet skulle seile med 29,6 knop. Denne sammenheng kommer av formel 4.19 – 4.21, hvor V_7 endrer seg basert på D_{ut} ved formel 4.22. Når volumstrøm og diameter gir at systemkurven (Ch/Cq grafen) tilhørende 29,6 knop, skjærer løftehøydekurven ved 0,85 har D_{ut} blitt fastsatt. For resterende hastigheter vil det kun være volumstrømmen som justeres på samme måte som tidligere, for å få skyvet til å matche sin korresponderende hastighet.

$$M_1 = \rho * Q_1 * V \quad (4.19)$$

$$M_7 = \rho * Q_7 * V_7 \quad (4.20)$$

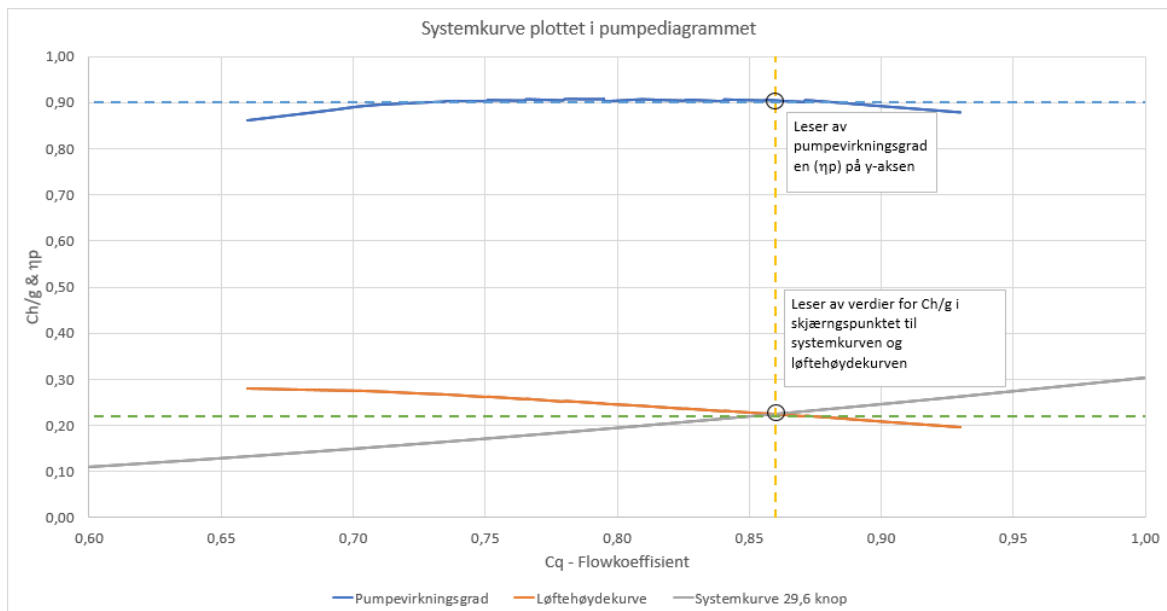
$$\Delta M = T = M_7 - M_1 \quad (4.21)$$

$$V_7 = \frac{(Q*4)}{D_{ut}^2 * \pi i} \quad (4.22)$$

For B.A.R 1.1 og B.A.R 0.8 ble utløpsdiameteren til dysen hhv. 0,3808 og 0,438m.

4.3.3 Virkningsgradberegning pumpejet

For utregninger av virkningsgraden til pumpejet ved de forskjellige hastighetene er pumpevirkningsgraden (η_p) lest av i pumpediagrammet, der hvor systemkurven (Ch/Cq) skjærer løftehøydekurven. I figur 16 vises systemkurven for hastigheten 29,6. Grafen vil se tilsvarende ut for de andre hastighetene også, da målet er å få systemkurven til å skjære i samme punkt på løftehøydekurven for alle hastigheter. Vi har derfor bare valgt og fremstille denne systemkurven for denne hastigheten. Resterende systemkurver er plottet og tilgjengelig i *Vedlegg B. Beregninger – casestudie*. Ved avlesning ser vi at løsningen vil ha en pumpevirkningsgrad på ca. 0,9.



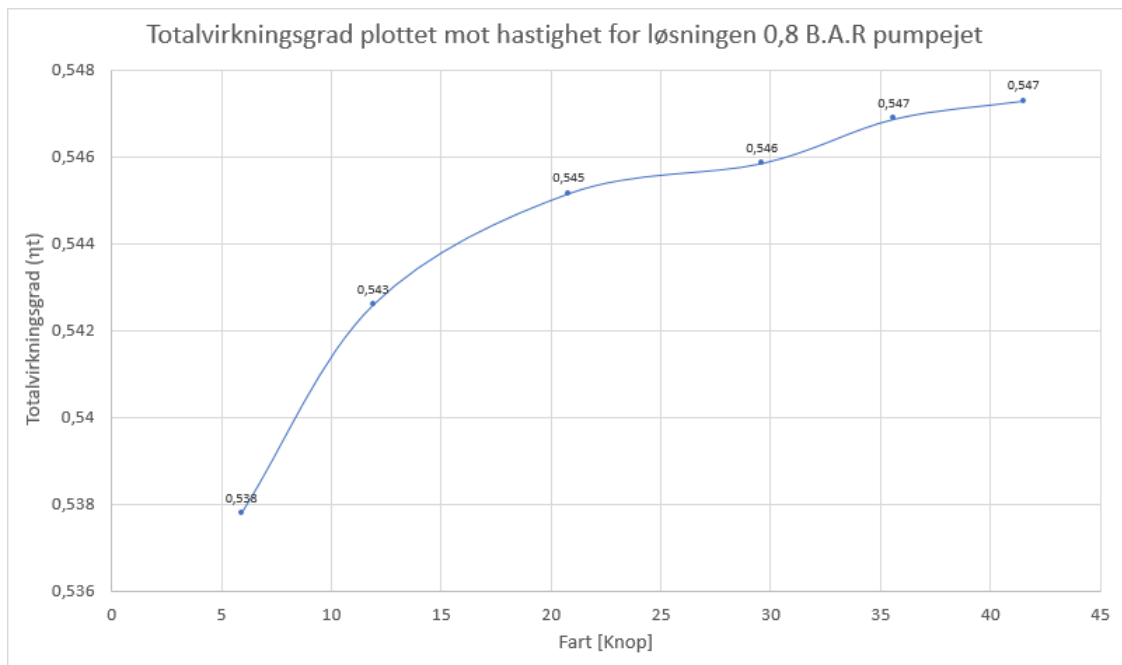
Figur 16. Her er systemkurven for hastigheten 29,6 knop plottet inn i pumpediagrammet hentet fra ONR-studien. Grafen vil se tilsvarende ut for de andre hastighetene også, da målet er å få systemkurven til å skjære i samme punkt på løftehøydekurven for alle hastigheter.

Når en har pumpevirkningsgraden, kan en bruke dette til å regne ut tilført effekt for pumpen ved formelen (4.15). Deretter kan den totale akseffekten deles på P_{DS} , (4.16) for å få totalvirkningsgraden (η_t) til pumpjeten.

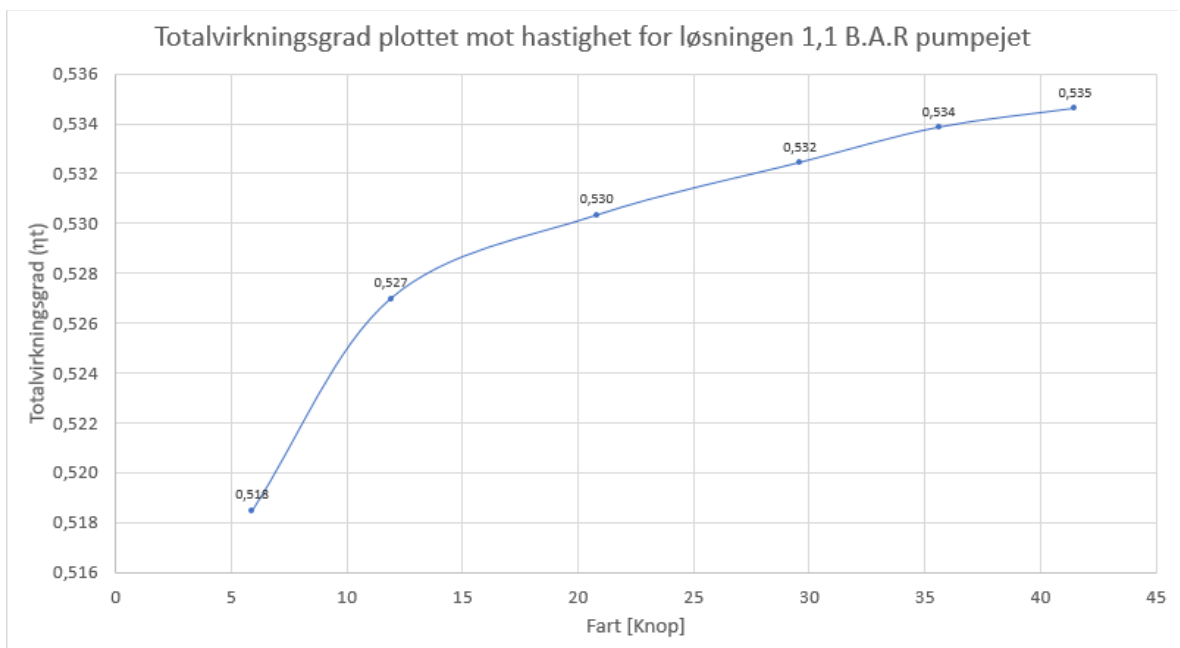
$$P_{DS} = \frac{P_{PE}}{\eta_p} \quad (4.15)$$

$$P.C = \frac{P_E}{P_{DS}} \quad (4.16)$$

Nedenfor i figur 17 og 18 følger resultatet for vår totalvirkningsgrad for pumpejet referert til de to forskjellige B.A.R-verdiene. Diskusjon av resultatet følger lengre ned i studien.



Figur 17. Dette er en graf som viser totalvirkningsgraden til løsningen 0,8 B.A.R pumpejet opp mot hastigheten til farkosten.



Figur 18. Dette er en graf som viser totalvirkningsgraden til løsningen 0,8 B.A.R pumpejet opp mot hastigheten til farkosten.

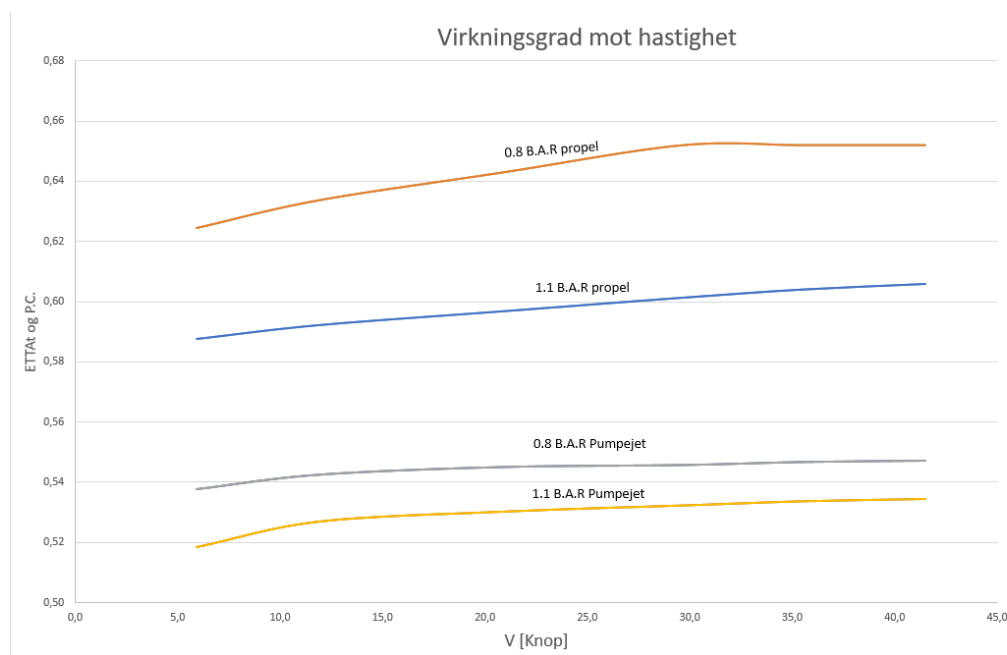
Konstanter for 0,8 B.A.R			Konstanter for 1,1 B.A.R		
Dpropell	0,922658	m	Dpropell	0,786845	m
Dimp	0,645861	m	Dimp	0,550792	m
Dyinn	0,647152	m	Dyinn	0,551893	m
Di inn	0,291219	m	Di inn	0,248352	m
Areal inn	0,262321	m ²	Areal inn	0,190779	m ²
Dy ut	0,439	m	Dy ut	0,3808	m
Di ut	0	m	Di ut	0	m
areal ut	0,151363	m ²	areal ut	0,11389	m ²
n (antall blader)	9		n (antall blader)	9	
m	0,111111		m	0,111111	
A _{VA7}	1,733064		A _{VA7}	1,675124	
Delta gr. sjikt	0,02	m	Delta gr. sjikt	0,02	m
Areal gr. Sjikt	0,019554	m ²	Areal gr. Sjikt	0,016861	m ²
tap13	0,2		tap13	0,2	
tap57	0,079		tap57	0,079	
D7	0,439		D7	0,3808	
h7	0		h7	0	
rho	1025	kg/m ³	rho	1025	kg/m ³
Dprop/Dimp	0,7		Dprop/Dimp=	0,7	
Antar C/D	1		Antar C/D=	1	
Dimp/Diinn	1,002		Dimp/Diinn	0,4509	m
h	0,177	m	h	0,151	m
c	0,355	m	c	0,302	m
Klaring	0,001	m	Klaring	0,001	
Ae	0,566	m ²	Ae	0,412	m ²
Ao	0,328	m ²	Ao	0,238	m ²
B.A.R	1,728		B.A.R	1,728	

Figur 19. Her er en oversikt over alle konstanter som er brukt, og blitt beregnet for pumpejet løsningene. Disse er brukt videre for å finne virkningsgraden slik beskrevet i kap. 4.3

5 Diskusjon

I dette delkapittelet vil det diskuteres hvordan designet til pumpejeten er, samt hvordan de ulike komponentene en pumpejet innehar påvirker virkningsgraden. Det vil diskuteres hvilken påvirkning dysen, huben, statoren og impellerens har til økt eller redusert virkningsgrad. De kvantitative resultatene fra casestudien vil drøftes opp mot studier gjort av andre, samt opp mot pumpejet-teori. Til slutt vil vedlikehold, og økonomiske aspekter bli diskutert.

5.1 Virkningsgrad

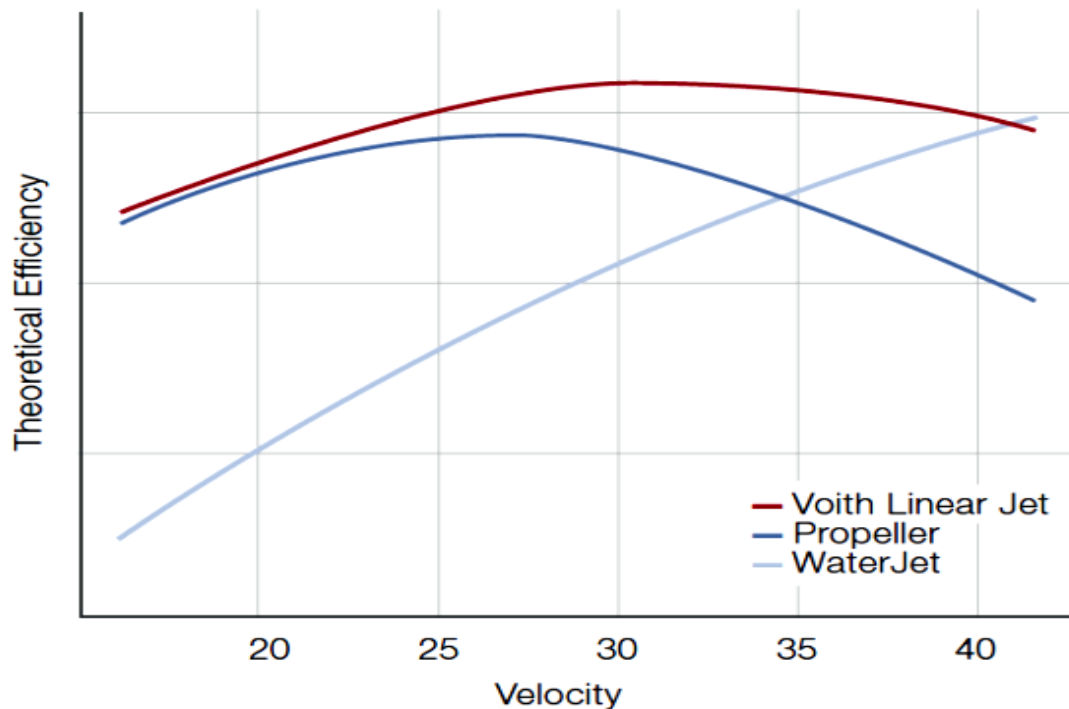


Figur 20. Her er alle løsningene sin totalvirkningsgrad presentert opp mot hastigheten til fartøyet i en og samme graf.

I grafen over er resultatene fra casestudien fremstilt sammen. Fra disse resultatene ser en at propusjonsløsningene med pumpejet gir lavere totalvirkningsgrad enn propell-løsningene. Den totale virkningsgraden til pumpejet ligger mellom 0,52-0,55, mens den totale virkningsgraden til propellen ligger mellom 0,59-0,61 for 1,1 B.A.R og mellom 0,62-0,66 for 0,8 B.A.R.

Figur 21 (nedenfor) er en graf som viser teoretisk virkningsgrad opp mot skipets hastighet for linear jet, vannjet og propell. Hüber beskriver grafen som en indikativ graf, som viser

differansen i virkningsgrad for ulike propulsjonsløsninger. Voith sin linear jet, som etter definisjonen er en pumpejet, gir her en bedre virkningsgrad enn propellen. Dette motstrider med resultatene fra casestudien utført i denne oppgaven. Allikevel, kan en grunnet mangel på oppgitte verdier langs y-aksen ikke si noe om hvilket spekter propulsjonsløsningene opererer innenfor med tanke på virkningsgraden. Det er heller ingen forutsetning for å si noe om hvor optimalisert propellen er i forhold til deres linear jet.



Figur 21. Graf som sammenlikner virkningsgraden til Voith sin linear jet opp mot konvensjonell propell og vannjet.

Kilde: Denne grafen er blitt tilsendt på mail fra Dr. Johan Hüber fra Voith

5.1.1 Thrustreduksjon og medstrømsfaktor

Thrustreduksjonsfaktoren og medstrømsfaktorer er to antatte faktorer. I lys av dette vil vi se om disse antakelsene har en påvirkning på virkningsgraden og eventuelt hvor stort denne påvirkningen ville vært.

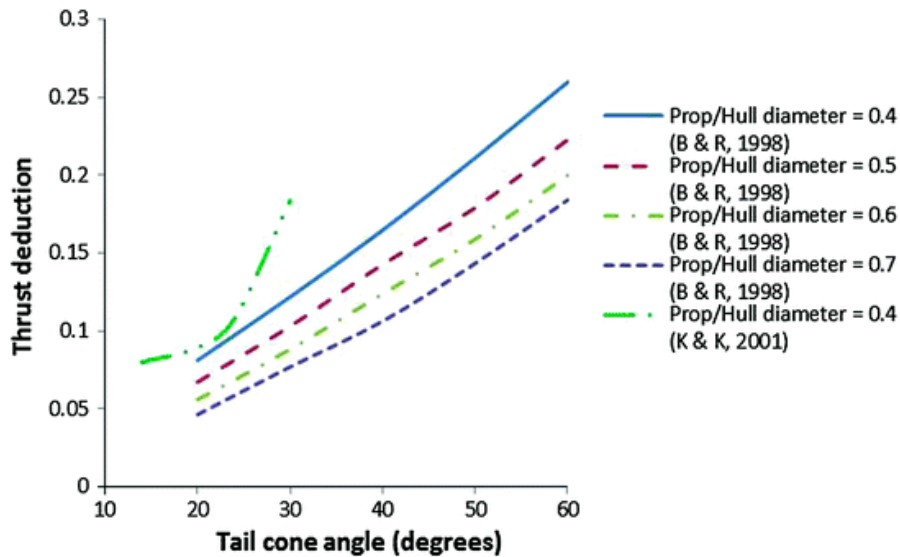
“A well designed pumpjet will result in no rotational flow aft of the unit. As the rotational flow represents lost energy, there is the opportunity for pumpjets to have a higher efficiency than open propellers” (Renilson 2015, 123). Ifølge Renilson (2015) vil en godt

designet pumpejet kunne oppnå en høyere virkningsgrad enn åpne propeller. I casestudien vår er det gjort en god del antagelser, spesielt knyttet til selve skrog/propulsjon interaksjonen. Thrustreduksjonsfaktoren er satt til å være 0,11 og medstrømsfaktoren er satt til å være 0,05. Både Thrustreduksjonsfaktoren og medstrømsfaktoren er antatte verdier og dette vil påvirke virkningsgraden da faktorene inngår direkte i skrogvirkningsgraden samt formelen for påkrevd skyv, ref formel (5.1) og formel (4.5). På en annen side ser vi fra figur 22 at ved å øke eller redusere thrustreduksjonsfaktoren med 50 % vil totalvirkningsgraden henholdsvis synke med cirka 0,56 % eller øke med cirka 0,75 %. Dette gjør at det ikke nødvendigvis er spesielt kritisk å anta en thrustreduksjonsfaktor allikevel da disse variasjonene er minimale.

V	t	η_t	% Avvik
Knop			
29,6	0,165	0,529	0,994360902
29,6	0,11	0,532	1
29,6	0,055	0,536	1,007518797

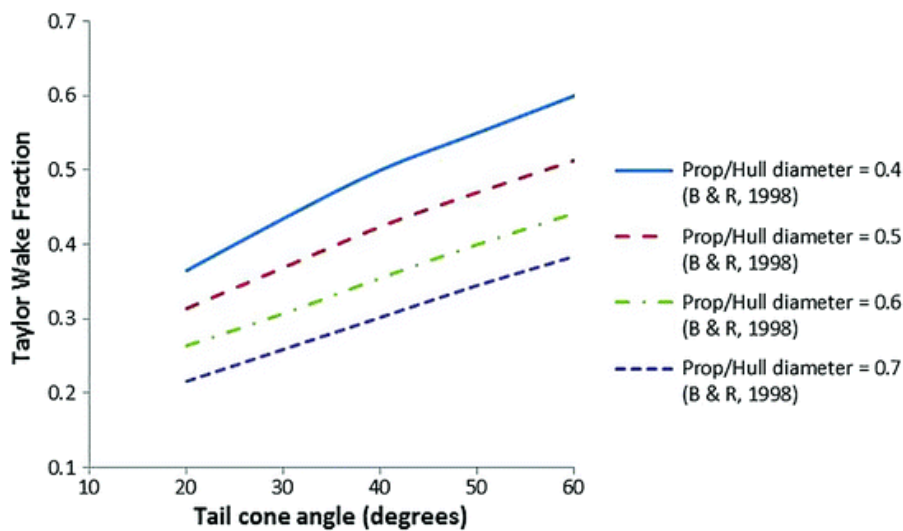
Figur 22. Tabellen er et utklipp fra excel som viser hvilket avvik vi får i totalvirkningsgrad for pumpejetløsningene dersom vi varierer thrustreduksjonsfaktoren.

$$\eta_H = \frac{1-t}{1-w} \quad (5.1)$$



Figur 23. Her er en graf som viser hvordan thrustreduksjonsfaktoren endrer seg med totalvinkelen til huben. Altså en spissere hub vil gi en lavere thrustreduksjonsfaktor.

Grafen er hentet fra side 115 i boken Submarine Hydrodynamics skrevet av Martin Renilson og utgitt i 2015.



Figur 24. Her er en graf som viser hvordan medstrømsfaktoren endrer seg med totalvinkelen til huben. Altså en spissere hub vil gi en lavere thrustreduksjonsfaktor.

Grafen er hentet fra side 114 i boken Submarine Hydrodynamics skrevet av Martin Renilson og utgitt i 2015.

I figur 23 og figur 24 beskriver grafene hvordan innsnevringen bak på en undervannsfarkost påvirker thurstreduksjonen og medstrømsfaktoren. Grafene er basert på en åpen propell-løsning, men vi antar at prinsippet allikevel vil være relativt likt for en pumpejet. Det vil være vanskelig å anta korrekte verdier for disse. Dette fordi det er vanskelig å si noe sikkert om hvordan skroget og propulsjonsløsningen interagerer uten å måle eksakte verdier for skyv (T) og vannhastighet ved impelleren (V_a), ref. formel (5.2) og (5.3).

$$t = \frac{T - R_t}{T} \quad (5.2)$$

$$w = \frac{V - V_a}{V} \quad (5.3)$$

Vi kan fra formel 5.1 se at jo større thurstreduksjonsfaktoren blir i forhold til medstrømsfaktoren jo lavere blir skrogvirkningsgraden. Vi ser av figur 23 at for en undervannsfarkost vil helningen/vinkelen til akterenden av farkosten påvirke hvor stor denne faktoren vil være. Dette har med at jo større denne vinkelen blir, desto større vil undertrykket som skapes foran propellen bli og propellen er nødt til å generere et større skyv (Renilson 2015, 114).

Ifølge Renilson (2015) vil skrogvirkningsgraden alltid være større enn en for aksissymmetriske undervannsbåter (Renilson 2015, 115). Dette tilsier ifølge formel 5.1 at medstrømsfaktoren alltid må være større enn thurstreduksjonsfaktoren. En vannstrøm som strømmer langs en fast flate vil danne et sjikt som vil oppleve en redusert hastighet i forhold til vannstrømmen utenfor sjiktet. Det sjiktet med vann som opplever en redusert hastighet kalles grensesjikt og tykkelsen på dette kan finnes ved denne formelen:

$$\delta = 0,0242034 * \left(\frac{3*n+n^2+2}{n}\right)^{\frac{6}{7}} * X * Rn^{-\frac{1}{7}} \quad (5.4)$$

Ettersom akterenden av skroget snevres inn vil grensesjiktet bli tykkere og medstrømsfaktoren bli større jo lenger akterut på fartøyet man måler. Dette ser vi ut ifra at jo lengre bak på farkosten en beregner for jo større blir X , da denne viser til avstanden fra forre perpendikulær (F.P). For å utnytte medstrømsfaktoren best, vil det altså si at en mer akterut plassering av propulsjonsløsningen bedre vil nytte fordelene av høy medstrømsfaktor. På en annen side vil også thurstreduksjonsfaktoren øke dersom

propulsjonsenheten plasseres mer akterut. Denne økningen vil skje fordi enheten vil komme nærmere skroget, altså totaldiameteren til farkosten vil bli lavere (QinetiQ 2012, 3.7). På tross av at faktorene endres ut ifra plasseringen til selve propulsjonsenheten så hevder QinetiQ at plasseringen ikke vil ha så mye å si for skrogvirkningsgraden. Dette mener QinetiQ fordi medstrømsfaktoren og thrustreduskjonsfaktoren stort sett nuller hverandre ut. (QinetiQ 2012, 3.7).

I motsetning til QinetiQ skriver Furuya: “It is a well-known fact that the pumpjet utilizes the tail-cone low-energy, boundary layer flow in order to achieve its high efficiency. It means that the optimum pumpjet design depends entirely upon the incoming flow velocity profile” (Furuya, 1988, 19). Dette kan tolkes dit hen at medstrømsfaktoren og thrustreduskjonsfaktoren har en relativt stor påvirkning allikevel. Eventuelt kan det være andre faktorer enn medstrømsfaktoren og thrustreduskjonen som er de avgjørende faktorene Furuya henter til. Her nevner for eksempel Renilson roterende strømminger og dets påvirkning av virkningsgraden som mulige viktige faktorer.

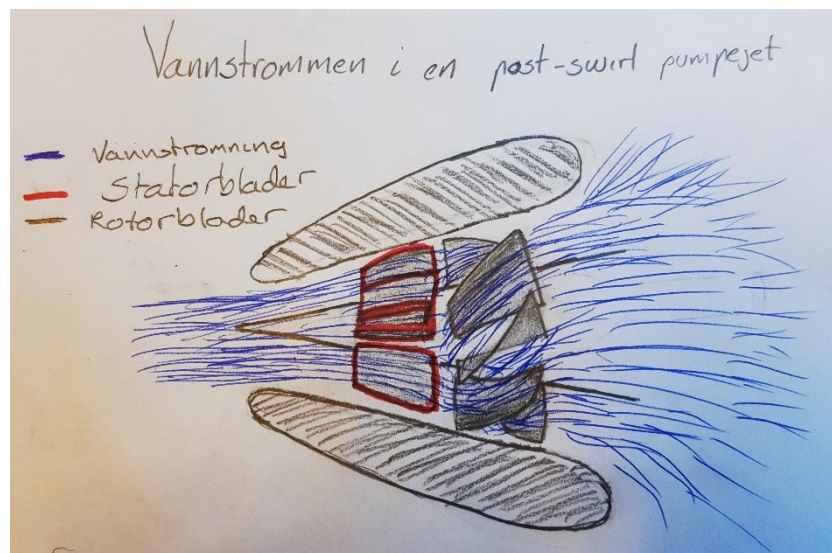
The most widely used form of hydrodynamic propulsor is, of course, the standard marine propeller. If well designed and operated under favourable conditions, it represents the most efficient form of hydrodynamic propulsor. Therefore the use of other types of propulsors must be justified (Wislicenus 1973, 2).

Wislicenus skriver her at en konvensjonell propell med de rette forutsetningene vil være den mest effektive propulsjonsløsningen. Allikevel, vil en konvensjonell propell tape energi i form av at den skaper en roterende strømming. En pumpejet vil ved hjelp av dyse og satorblader kunne nøytralisere denne roterende strømmingen som impelleren skaper. Dette vil gi en bedre utnyttelse av effekten til propulsjonen, noe som vil føre til bedre virkningsgrad. Renilson (2015) skriver at hovedårsaken til å velge pumpejet som propulsjonssystem er for å redusere hydroakustisk signatur, men at det også kan gi en høyere virkningsgrad enn propell (Renilson 2015, 120).

5.1.2 Samspillet mellom stator, impeller og dyse.

I kapittel 5.1.1 så vi på thrustreduksjonsfaktoren og medstrømsfaktoren påvirket virkningsgraden til pumpejet. Nå vil vi se på hvordan samspillet mellom stator, impeller og dyse vil påvirke denne.

Når Renilson snakker om at en godt designet pumpejet ikke vil ha noen roterende strømning, så handler det om hvordan samspillet mellom dysen, impelleren, statoren og huben hindrer slike strømninger. Det meste av den roterende strømningen vil forsvinne ved bruk av en stator etter selve pumpeenheten, altså en post-swirl pumpejet. Statoren vil rette opp strømningen, og ifølge Renilson (2015) stå for ca. 25% av det totale skyvet propulsjonen gir (Renilson 2015, 120).



Figur 25. Her er en illustrasjon av hvordan statoren er plassert etter impelleren for å rette opp de roterende strømningene som er skapt av denne.

En slik fordeling av skyvet vil kunne gi impelleren mindre belastning og av den grunn redusere kavitasjon. I og med at kavitasjon vil redusere virkningsgraden, vil dette kunne gi en bedre virkningsgrad. På tross av at en post-swirl pumpejet gir bedre virkningsgrad er det også mange pumpejeter som konstrueres med en pre-swirl stator. Statorer som er plassert foran impelleren vil skape drag, noe som kommer av at strømningshastigheten reduseres da denne møter økt motstand. For at pumpejeten skal kunne opprettholde det totale skyvet en ønsker må impelleren kompensere for den ekstra motstanden statoren gir

(Renilson 2015, 121). I motsetning til en post-swirl pumpejet vil en pre-swirl pumpejet føre til en reduksjon i virkningsgrad grunnet det draget den skaper.

For virkningsgradberegningene utfør for pumpejet er det viktig å merke seg at det ikke er medberegnet noen verdier fra statoren sin påvirkning. Det er blitt gjort forenklinger, og det er i beregningene derfor kun oppgitt et totalt tap i energistrømmen fra dysens innløp og til impelleren (tap13). I dette tapet inngår alt det tapet som vannhastigheten utsettes for grunnet samspillet mellom dyse, hub, eventuell stator og impeller. Det er også medberegnet et tap fra impelleren og til utløpet av dysen. Dette tapet er oppgitt som tap57 og er antatt å omfavne alt som skjer med energistrømmen grunnet det samme samspillet mellom komponentene etter impelleren.

Ved bruk av pumpejet skal en som tidligere nevnt redusere diameteren på impelleren med mellom 20 og 30 prosent. En mindre impeller vil ha en mindre hastighet på tuppen av impellerbladene ved samme turtall. Som vi så i kapittel 3.4 vil dette redusere trykkreduksjonen ved tuppen av impellerbladene og av den grunn redusere faren for kavitasjon. På en annen side vil dette bety at impelleren er avhengig av å opprettholde et høyere turtall enn det propellen er for å produsere det samme skyvet dette ser også fra resultatene i casestudien, figur 26. Furuya (1988) beskriver sammenhengen mellom impeller-/propelldiameter, tupp hastighet og kavitasjon slik:

From the viewpoint of cavitation, the maximum and minimum shroud diameter to prevent cavitation must exist. If it is too large, the rotor blade tip speed becomes too high so that cavitation occurs. On the other hand, if it is too small, the rotation speed must be increased. (Furuya 1988, 16)

B.A.R 1,1	Propell	Pumpejet	Propell	Pumpejet
V	n	n	U (tip)	U (tip)
[Knop]	[rpm]	[rpm]	[m/s]	[m/s]
29,6	1174,33	1315,228	48,38	37,93

Figur 26. Et utklipp fra excel som eksemplifiserer hvordan turtall og tupphastighet på impelleren endrer seg ved å nytte en pumpejet fremfor en propell.

$$U_{tip} = \frac{n}{60} * 2\pi * r \quad (5.5)$$

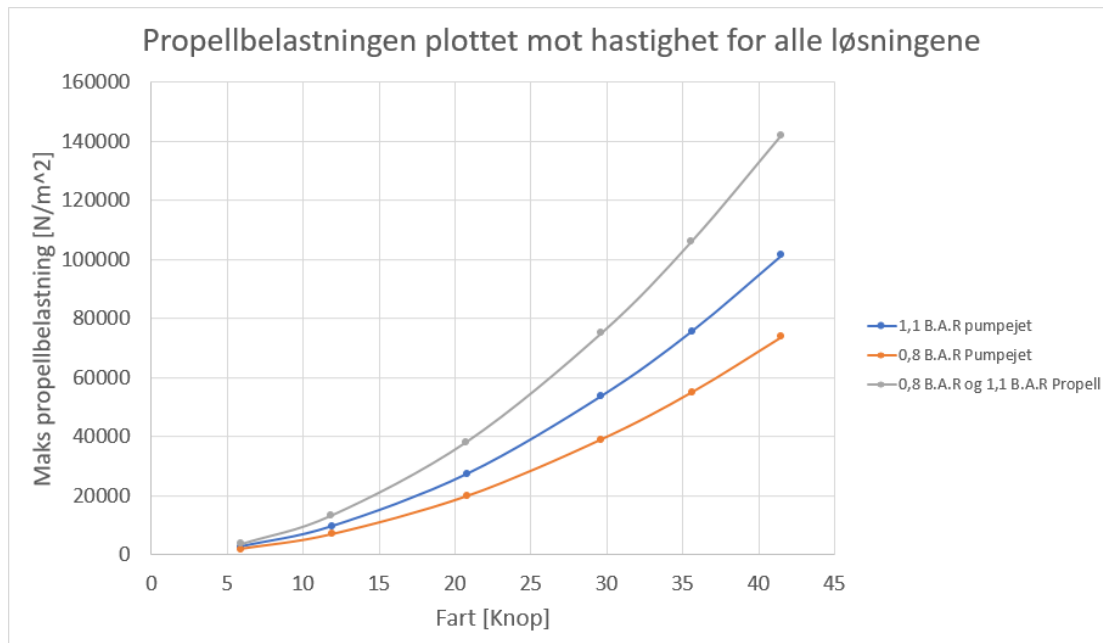
Allikevel, på tross av at impelleren i pumpejeten opererer med et høyere turtall vil hastigheten ved tuppen av impellerbladene være lavere enn for propellen. Dette bygger oppunder det at pumpejeten vil kavitere mindre. I tillegg til at tupphastigheten er lavere vil dysen i en pumpejet bidra til mindre kavitasjon. Referert til teoridelen vet vi at tip-vortex vil reduseres ved å plassere en dyse utenpå impelleren. Til forskjell fra en konvensjonell propell vil den energien som forsvinner i form av tip-vortex bli fordelt til impellerbladene i form av skyv, noe som vil bety en bedre virkningsgrad. "Rotor tip clearance is a highly sensitive variable in waterjet performance" (Marquardt 2011, 14). Påstanden er hentet fra en studie gjort av Marquardt (2011), hvor to typer pumpejet er testet. Den ene pumpejeten hadde i testingen mindre avstand mellom rotortip og dyse, og av den grunn gav en dårligere virkningsgrad.

Antall blader på impelleren vil påvirke hvilken lengde en trenger på selve pumpejeten. "Fewer blades may reduce blockage, leading to a higher minimum pressure, but requiring an increase in the chord length and length of the pump. More blades could reduce the length of the pump, but would be likely to also reduce the minimum pressure" (Thad 2008, 8). I vår casestudie har vi benyttet ni blader, noe som er et relativt høyt antall. Dette vil ifølge Thad (2008) da bety en kortere pumpejet, men også et lavere minimumstrykk. På en side vil dette bety at kavitasjon oppstår raskere fordi dette minimumstrykket er redusert. Dette vil påvirke virkningsgraden negativt. Fra et annet perspektiv vil en kort pumpejet medføre en mindre strekning fra inngang til utgang. Dette vil føre til at friksjonstapet i vannstrømmen mellom dyse og hub vil bli redusert. Thad (2008) skriver også at "once the flow has left the stator blades, the passage should contract as quickly as possible to meet atmospheric pressure since any extra length will lead to extra viscous losses" (Thad 2008, 7). Basert på dette vil en kortere dyse, som utsettes for mindre friksjon føre til mindre tap og derav en bedre virkningsgrad.

Sett opp mot casestudien vil det derfor være mange faktorer som spiller en viktig rolle for utregningene. Samspillet mellom komponentene og hvordan de forskjellige komponentene er konstruert vil være viktig for hvilket resultat en kommer frem til. En kan derfor anta at forskjellen i virkningsgrad for henholdsvis pumpejet og propell fra resultatene i casestudien ikke vil være helt reelle. På en annen side, vil det med de antagelser som er gjort gi en pekepinn på hvordan pumpejeten bedrer eller reduserer virkningsgraden ved ulike faktorer.

5.2 Kavitasjon

5.2.1 Propellbelastning



Figur 27. En graf som fremstiller maks propellbelastning for alle løsningene ved hver enkelt hastighet. Maksbelastningen er like for begge propell-løsningne, og derav en kurve som vises for propell-løsningen.

I figur 27 er det blitt fremstilt data for propellbelastning ved ulike hastigheter. En kan her se at den konvensjonelle propellen har en større belastning per areal ved samtlige hastigheter. Videre ser en at den allerede ved 33 knop har høyere belastning enn hva pumpejeten har ved sine høyeste verdier. Dette er en indikasjon på at pumpejeten vil kavitere mindre enn propellen (Wood, 2015). Dette blir også understøttet av Wisclisenus (1973) ved sitatet "The pumpjet has fulfilled expectations and has essentially solved the propulsor cavitation problem in this field" (Wisclisenus 1973, 2). Med «this field» mener forfatteren kavitasjonsproblemer på en åpen propeller ved høy RPM. På en annen side er det som tidligere nevnt flere aspekter ved en pumpejet, som vil kunne øke sjansene for kavitasjon. Dette kan være ved inngangen på dysen, og i selve opphenget til dysen.

5.2.2 Huben

I kapittel 4.3.1 er ønskede dimensjoner ved huben beskrevet. Det er ønskelig at huben på en pumpejet holder seg konstant ved ledende kant. Hubens utforming vil kunne påvirke kavitasjonsegenskapene til pumpejeten. “A small truncated or rounded area is preferable to a pointed cone because it will be stronger and resist hub vortex formation” (Michael et al 2008, 6). Formen må tilpasses pumpejetens strømningsbilde. Det vil for propellen som for pumpejeten være viktig at huben og dens ende er tilpasset de øvrige delene.

5.2.3 Dysen

Dysens utforming har som tidligere sagt stor innvirkning på pumpejetens egenskaper. Michael et. Al. (2008) skriver at dysen i stor grad bør ha en så liten reduksjon i areal som mulig fra innløp og til den er forbi rotoren (Michael et al 2008, 7). Dette for å redusere fartsøkningen over rotorbladene. Dette er ønskelig slik at en ikke skaper et unødvendig redusert trykk over rotoren, ref. Bernoullis ligning. Det er ikke ønskelig med høy vannhastighet over impellerbladene da det er her det er størst fare for kavitasjon. Reduksjon i areal er anbefalt til å starte etter halvveis i en post swirl stator (Michael et al 2008, 7). Dette vil gjøre at dysens akselererende effekt vil komme til spill, uten at dette unødig øker faren for kavitasjon ved impelleren.

Det vil kunne være «farligere» hvis det oppstår kavitasjon i en pumpejet, enn på en propeller. For en åpen propeller vil kavitasjonen redusere ytelsen til propellen. Når kavitasjonen først oppstår vil det ikke eskalere ytterligere dersom turtallet holdes konstant. Det vil allikevel kunne forverre seg dersom det varer over en lengre periode slik at det blir skader på strukturen. For en pumpejet vil derimot gassboblene som blir dannet ligge som en blokad langs dysen, og begrenser vannets mulighet til å passere. Dette vil redusere systemets ytelse da volumstrømmen og lasten på bladene blir redusert (Doeller 2017, 69). Hvis det ikke blir gjort tiltak, er det fare for at denne blokaden vil vokse over impellerens spenn og videre redusere ytelsen (Doeller, 2017, 68). Dette er et fenomen som ikke forekommer på samme måte for en åpen propeller, hvor gassboblene i større grad kan «unnslippe».

5.2.4 Lyd

I kapittel 3.4 så vi at kavitasjon vil skape lyd. I kapittel 5.2.1. kommer det frem at pumpejeten vil kavitere mindre enn propellen. På bakgrunn av dette kan en anta at pumpejeten avgir mindre lyd enn propellen. Videre kan det også tenkes at dysen vil isolere deler av lyden fra kavitasjonen hvis denne først oppstår (Rawson og Tupper 2001, 400). På den annen side kan det tenkes at det vil være mer vibrasjon i en pumpejet, da denne består av flere komponenter. Dette vil tilsi at propellen kan tenkes å avgir mindre støy grunnet mindre vibrasjoner i systemet. Hvis det hadde vært installert en de-akselererende dyse, ville de gode kavitasjonsegenskapene ført til reduserte akustiske signaler (Qinetiq 2012, 4.9). «Pre-swirl pumpjets were introduced to reduce blade rate noise by smoothing the inlet flow to the rotors» (QinetiQ 2012, 4.9). En annen måte å redusere støy på ville ifølge QinetiQ vært å installere en pre-swirl stator da en slik løsning vil sørge for en bedre og rolige vanninnstrømning.

5.3 Fartøyets rekkevidde

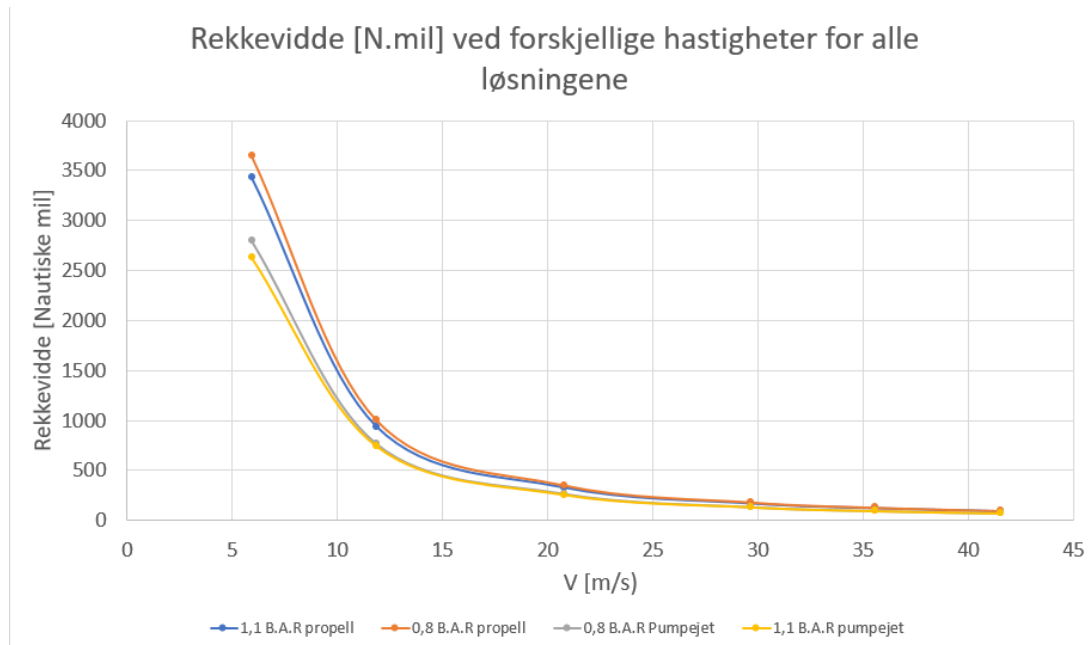
Vi har tiltenkt at fartøyet regnet på i casestudien skal være elektrisk, derfor må det inn til kai for å lade. Volum tiltenkt bruk av batterier er satt til å være 50 % av totalvolumet til fartøyet. Dette kan selvfølgelig variere avhengig av plassbehov for forskjellige sensorpakker eller for forskjellige operasjoner. Volumet på modellen er beregnet ved hjelp av data fra modellforsøket, hvor data tilsier et deplasement på 325000 kilo. Dette tilsvarer et volum på 235 kubikkmeter.

$$V = \frac{\Delta}{\rho_{vann}} \quad (5.6)$$

Ved nedskalering ender fartøyet benyttet i casestudien med et totalvolum på 29,375 kubikkmeter. Da 50 % av totalvolumet til fartøyet skal gå til batterier ender vi opp med en batterikapasitet på 10,3 MW, hvor energitettheten til batteriene er på 700 W/l. Siden tap i generatoren og i overføring mellom batteriene og generatorene vil være like for alle løsninger beregnet på i casestudien. Vi har derfor valgt å ikke ta disse tapene med i beregningene, da det ikke har noen påvirkning på sammenlikningsgrunnlaget mellom de forskjellige løsningene. For utregning på batterikapasitet er maks oppladning (SOC_a) satt til 70 %, mens maks utladning (SOC_b) satt til 20 %. Disse verdiene kan endres, men er

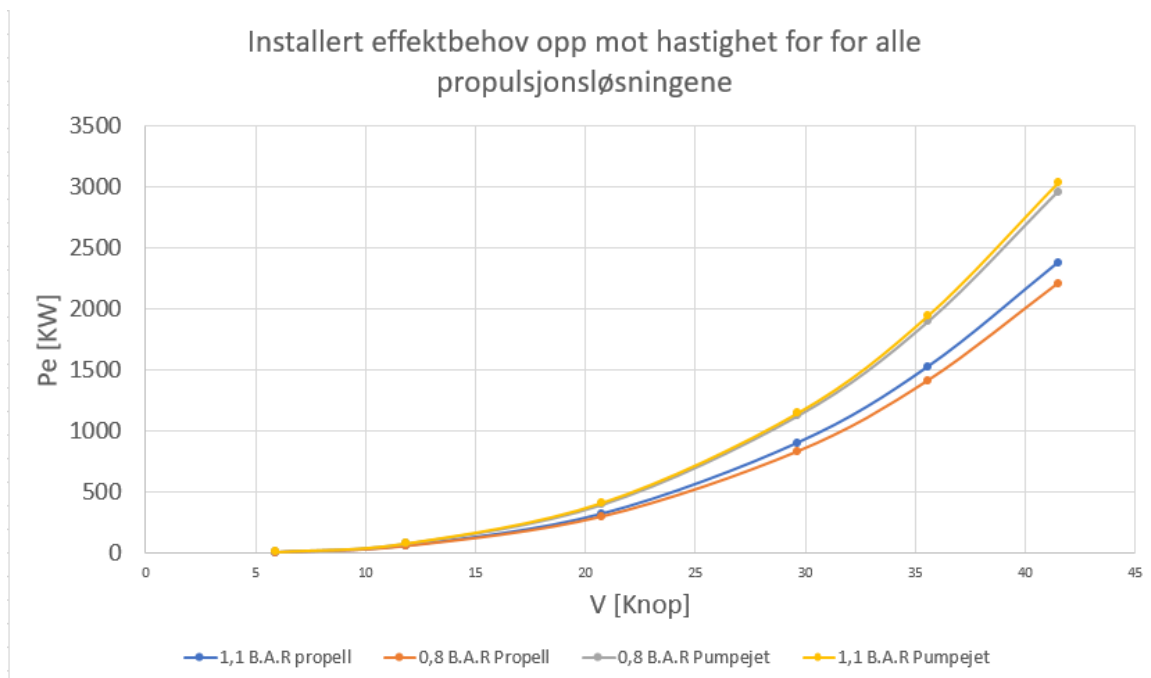
blitt satt slik for å sørge for god batterilevetid. Formel 5.7 er blitt benyttet for å regne ut antall timer i drift.

$$tid = \frac{SOCa * KWh - SOCb * KWh}{Pe} \quad (5.7)$$



Figur 28. En graf som viser rekkevidden i nautiske mil ved de forskjellige hastighetene. Grafen innehar rekkevidden for alle propulsjonsløsningene.

Grafen ovenfor illustrerer de forskjellige propulsjonsløsninge sin rekkevidde ved ulike hastigheter. Forutsetningene for grafen er basert på hvor mange timer batteriene kan drifte fartøyet, og derav hvor langt fartøyet kan seile i løpet av disse timene i nautiske mil. Grafen indikerer at rekkevidden til pumpejeten ved begge B.A.R-verdier ligger noe lavere enn for konvensjonell propell. En kan også se at rekkevidden til fartøyet går betraktelig ned ved 5-15 Knop for alle løsninger.



Figur 29. En graf som viser forskjellen i nødvendig installert effekt for de ulike propulsjonsløsningene ut ifra hastighet.

Hvis en ser på figur 29 ser en at installert effektbehov øker eksponentielt med hastigheten. Da denne øker eksponentielt med hastigheten vil fartøyets rekkevidde blir kraftig redusert ved høyere hastigheter. Man ser at pumpejeten trenger mer effekt for å seile i samme hastighet som propellen. Allikevel ser vi at forskjellen i rekkevidde til de fire løsningene blir mindre for høyere hastigheter. Basert på disse to grafene ville fartøyet hatt en god rekkevidde med en marsjfart på rundt 10 knop. Dette ville vært gjeldende for alle løsninger. Hvis det ikke stilles krav til hurtig akselerasjon eller høye hastigheter vil ikke faren for kavitasjon være tilstede, og propellen vil da være et naturlig valg fremfor pumpejeten grunnet bedre virkningsgrad og dermed lenger rekkevidde. Hvis fartøyet derimot hadde hatt operasjonelle krav som skulle tilsi at fartøyet burde kunne reise over korte avstander med særdeles høy fart, og at dette samtidig skulle skje med minst mulig lyd ser en av figur 27 at pumpejeten ville prestert bedre.

5.4 Vedlikehold og driftskostnader

Vedlikehold er en viktig faktor å se på dersom en skal kunne si noe om hvor effektivt og kostbesparende en eventuell pumpejet-løsning vil være. I dette kapittelet vil det bli

diskutert fordeler og ulemper når det kommer til vedlikehold for en pumpejet. Vedlikeholdstimer og faktiske kostnader for vedlikehold av pumpejet i bruk i det militære har vi ikke fått tilgang til. Av denne grunn vil diskusjonen i stor grad foregå på et overordnet plan. Voith; et globalt teknologisk firma med en bred portefølje har gitt oss litt erfaringer på vedlikehold når det kommer til deres linear jet. Voiths linear jet er ut ifra definisjonen av pumpejet som vi har gitt tidligere i oppgaven å anse som en pumpejet. Vi ser derfor på deres erfaringer som gode innspill.

5.4.1 Voith linear jet

Fra Johan Hüber:

Linear Jet er en veldig enkel maskin. Det er kun en roterende del og den er laget av rustfritt stål. Ledende kant på dysen kan enkelt erstattes uten for store demonteringsoperasjoner. Det samme gjelder for den vannsmørende statoren. Vannstrømmen gjennom det vannsmørende statorlageret er høyt og mer enn det som kreves av lageret. Det er generelt lav slitasje, og det antas å være mellom 5000 og 10000 arbeidstimer før et bytte kreves. For Voith er ikke dette en veldig lønnsom maskin da behovet for reparasjoner og ettersalg av deler vil være lavt. Det vil feste seg mye mindre «sjøgress» i kanalen, da den er mye kortere enn det det vil for en vannjet for eksempel. Den beste forebyggingen mot «sjøgress» er å bruke fartøyet. Ferger som opererer 6000 timer per år har ikke store problemer med dannelse av «sjøgress» i jet-løsningene. (Hüber 2018, mail)

5.4.2 Marin vekst

Fra Hübers mail ser vi at faren for tilgroing er tilstede hvis ikke systemet er i regelmessig bruk. Videre vet vi at en pumpejet er kortere og mindre kompleks sammenlignet med en vannjet. Det vil da være reduserte kostnader på pumpejeten sammenlignet med vannjeten, grunnet et mindre areal som må renses og overflatebehandles. Sammenlignet med en konvensjonell propeller vil det på en pumpejet være et større areal som blir påvirket av den marine veksten. Da propellen er lettere tilgjengelig for vedlikehold, vil det være billigere og mindre tidkrevende å fikse disse problemene på en konvensjonell propeller.

5.4.3 Beskyttelse

Ved seiling nær sjøbunn vil det kunne forekomme at tang eller andre objekter blir sugd inn og setter seg fast i propellen eller impelleren. For en pumpejet vil det kunne være en redusert sjanse for at impelleren trekker til seg tang eller andre løsthengende gjenstander fra havbunnen. Dette kommer av at dysen virker som en beskyttelse for de roterende deler. Det vil allikevel være fare for at et økt sug ved inntaket til dysen enklere trekker slike gjenstander inn i løsninger. Selv om dysen kan beskytte mot slike gjenstander vil det kunne bli kostbart dersom det først skulle sette seg noe fast i systemet. For det første vil det tidsmessig ta lenger tid å fjerne dysen før en kan fullføre vedlikehold på propellen. For det andre kan det tenkes at man på en åpen propell-løsning, kunne sendt ut en dykker som kunne fjernet gjenstanden og fartøyet kunne seilt videre. Noe som vil være vanskelig på en pumpejet grunnet dysens plassering.

Hvis fartøyet skal legge seg på havbunnen eller seile nær objekter under vann kan det tenkes at dysen kan være en viss beskyttelse mot slag på impelleren (Rawson og Tupper 2001, 400). På en annen side vil hele dysen kunne blitt slått inn og ødelegge hele systemets evne til å operere. Ved en konvensjonell propell kan det tenkes at enkelte propellblad knekker, men at fartøyet allikevel, med redusert manøvreringsegenskaper kan komme seg tilbake til kai.

5.4.4 Anskaffelse

En pumpejet består av flere deler enn en konvensjonell propell. Dette gjør at konstruksjonen og byggingen av denne blir mer komplisert. Videre er det et større krav til pasninger, for eksempel mellom impellertipp og dyse. Det vil være mer arbeid som kreves med overflatebehandling grunnet disse pasningene. Samtidig vil det økte arealet også føre til et større arbeid med tanke på overflatebehandling i forhold en propell. Kravene og antall deler vil føre til at selve anskaffelsen av en pumpejet vil være dyrere enn for en vanlig propeller. Det vil også være nærliggende å anta at konsept -og designprosessen i oppstarten av et pumpejet-prosjekt vil være mer omfattende og kreve flere timer enn for en vanlig propell. Dette er basert på antall komponenter som skal virke optimalt sammen, men avhenger også av mangel på erfaring sammenlignet med propelldesign. Erfaringsutveksling med stater som har god kunnskap om pumpejet-design vil kunne redusere disse kostnadene.

5.4.5 Kostnader ved å eie

I kapittel 5.4.2 ble det hevdet at antall deler i en pumpejet ville føre til flere vedlikeholdstimer enn for en konvensjonell propell. Dette var et argument opp mot marin vekst i systemet, men vil være like gjeldende for et generelt verkstedsopphold. Vedlikeholdskostnadene for pumpejet øker fordi det vil kreve flere arbeidstimer, men også fordi det vil være flere deler som vil kunne være nødvendig å erstatte. På en annen side kan det tenkes at propellen i en konvensjonell løsning vil ha høyere kostnader da denne vil ha større slitasje grunnet kavitasjon enn pumpejeten. Avhengig av plasseringen til propulsjonsløsningen i forhold til ror, vil denne kavitasjonen kunne føre til skader på andre deler av fartøyet. Da dysen på en pumpejet sperrer kavitasjonen inne i systemet vil dette kunne begrense skader på resten av fartøyet. Etter samtale med vedlikeholds personell for de norske ubåtene vil ikke dette gjelde da disse stort sett opererer i et kavitasjonsfritt område. Dette vil altså først være gjeldene for fartøyer med høyere hastighet. Den eneste formen for vedlikehold som gjøres på propellene er å syrevaske disse en gang i året. Dette gjør at propellene på de norske ubåtene er billige å vedlikeholde.

På bakgrunn av resultatet i casestudien ser en at fartøyet vil kreve mer energi hvis en pumpejet-løsning er installert. Derfor vil strømkostnadene være noe høyere for pumpejeten. Hvis prisen på 1 KWh er 1 krone, vil dette utgjøre en forskjell 313 kroner i timen mellom 0.8 B.A.R propell og 1.1 B.A.R pumpejet ved 29,6 knop. Som nevnt har enkelte kilder hevdet at pumpejeten vil ha bedre virkningsgrad enn propellen. Hvis dette er tilfellet, vil dette regnestykket bli annerledes. Det vil da føre at totalkostnaden ved å eie systemet over lang tid vil bli redusert. Jo lenger en eier, jo mer vil en spare i drivstoffkostnader.

6 Feilkilder

Når vi arbeider med dokumenter er det viktig å vite at de som har skrevet studien har hatt god tid til å tenke over hva de ønsker å formidle. Det gjelder da å være kritisk til kildene en bruker, slik at de studiene en bruker ikke er "forfalsket" eller er lagt opp på en slik måte at de kan styre resultatet i en bestemt retning. Videre vil det kunne være vanskelig å etterprøve resultater da forfatteren ofte ikke alltid gir ut alle data; vi får kun sett på de resultatene forfatteren ønsker å vise frem. Dette innebærer at en bør finne flere kilder om samme emnet for å redusere usikkerheten. Usikkerheten blir da tydeliggjort i diskusjon hvor de ulike konklusjonene blir fremsilt.

For å gardere oss fra følgefeil har vi forsøkt å finne flere kilder som sier det samme. Vi ser allikevel at forskjellige kilder har fått forskjellige resultater ved noen av faktorene vi diskuterer i oppgaven. En faktor man kan trekke frem i denne sammenhengen vil være pumpejetens virkningsgrad. Det er i oppgaven forsøkt å legge frem begge synspunkter i tilfellet vi har funnet sprikende resultater. Dette for å vise til kompleksiteten og usikkerheten stoffet og resultatet innehar.

Antagelser og avlesninger gjort i oppgaven vil være en kilde til feil i oppgaven. Usikkerheten i antagelser rundt thrustreduksjonsfaktoren er vist i beregninger. Dette kunne blitt gjort på samme måte for øvrige antatte verdier for å styrke troverdigheten til de antagelser som er gjort.

Regnefeil vil føre til gale resultater. Herunder kommer eventuelle feilkoblinger i Excel samt feil bruk av formler. Da vi har fått tall for virkningsgrad som ligger innenfor et rimelig spekter, anser vi metoden som korrekt. Videre har vi søkt etter regnefeil i excel dokumentet, og rettet disse fortløpende. Da det er mange utregninger kan vi ikke garantere at det ikke finnes feil.

7 Konklusjon og anbefaling

I kapittel 4 og 5 har vi lagt frem resultater fra casestudien og diskutert disse opp mot teori funnet i litteraturstudien. En ser av disse kapitlene at det er svært mange faktorer som spiller en viktig rolle for propulsjonsløsningenes egenskaper. Fra casestudien som er gjort ser vi blant annet at virkningsgraden til pumpejeten er noe lavere enn for den konvensjonelle propellen. På tross av dette kommer det frem i diskusjonen at faktorer som samspillet mellom komponentene, utforming av komponentene og hvilke antagelser som er gjort vil påvirke virkningsgraden til pumpejeten. I tillegg vil en pumpejet stort sett alltid være en bedre løsning med tanke på kavitasjon og støy da begge faktorene er mindre fremtredende enn for propell-løsninger.

7.1 Konklusjon

Vil pumpejet være en god propulsjonsløsning for nye undervannsfarkoster i marinen?

Problemstillingen vil i våre øyne gi en todelt konklusjon. Den ene vil være for fartøyer som opererer med fare for kavitasjon, mens den andre vil være for fartøyer som opererer utenfor kavitasjonsområdene. Ut fra våre resultat anser vi at kavitasjonsområdet til å være fra 30 knop og oppover.

På fartøyer som skal operere skjult med krav om høye hastigheter eller hurtig akselerasjon, vil pumpejeten være en god løsning grunnet gode kavitasjonsegenskaper. Som vi ser i diskusjonen vil dette også medføre at støyen fra fartøyet vil bli redusert og fartøyet kan forholde seg skjult ved disse kravene. For denne konklusjonen anser vi kravet om å holde seg skjult som viktigere enn å spare penger på drivstoff, anskaffelse og vedlikehold.

Ser man på et saktegående fartøy vil ikke faren for kavitasjon være den samme. Da vil vi ut fra resultatene i casestudien konkludere med at en konvensjonell propell vil være bedre enn pumpejeten. Dette grunnet propellens gode virkningsgrad og dermed rekkevidde sett opp mot pumpejeten. Videre ser vi også at de økonomiske aspektene ved en propell-løsning vil være gunstigere.

7.2 Anbefaling

Vi har i vår oppgave måttet gjøre en god del antagelser. Dette kommer av at emnet ikke er utforsket nok tidligere, og grunnet mangel på en god pumpejet-modell å gjennomføre forsøk på. Vi ser derfor på pumpejeten som et viktig emne for videre forskning i forsvaret. Emner som viser seg å være viktige å utforske videre er: Økonomiske aspekter, kavitasjon og akustikk, samt samspillet mellom komponentenes utforming og virkningsgrad. Vårt inntrykk er at det er blitt forsket svært lite på dette emnet i Norge. Derfor vil vi anbefale at det blir forsøkt å opprette kompetanseutveksling med for eksempel Storbritannia, USA eller Frankrike som har flere års erfaring med drift og forskning på emnet. Dette for rask kompetanseheving innenfor emnet.

For å få et klart bilde av pumpejetens totale kostnader anbefaler vi å gjøre en detaljert økonomisk analyse av innkjøp og drift av pumpejeten. Da forskjellige kilder antyder forskjellige forventede virkningsgrader anbefaler vi også systematiske forskningsprosjekt som ser på optimalisering av denne. Til slutt vil vi anbefale å gjennomføre forsøk på pumpejetens kavitasjon og hydrostatiske egenskaper.

For å gjennomføre god forskning på pumpejet vil vi anbefale å sette av økonomiske midler til å kjøpe en pumpejet tilpasset Sjøkrigsskolens kavitasjonstank og slepetank. Dette tenker vi vil være til stor nytte da teoretiske beregninger kan testes opp mot praksis. Videre vil denne kunne bli brukt i undervisning på Sjøkrigsskolen for å øke den generelle kompetansen på emnet i sjøforsvaret.

8 Bibliografi

8.1 Bøker

Ghose, J.P. Gokarn, R.P

2004. *Basic Ship Propulsjon.*

Mumbai: Allied Publishers Pvt. Limited.

Rawson, K.J., Tupper, E.C.

2001. *Basic Ship Theory.*

Oxford: Butterworth-Heinemann

Fontenoy, E. Paul.

2007. *Subarines: An illustrated history of their impact*

Santa Barbara, California: ABC-CLIO INC

Furuya, Okitsugu

1988, *A New Pumpjet Design Theory*

Arlington, Virginia: Office of Naval Research

Renilson, Martin

2015, *Submarine Hydrodynamics,*

London: Springer

QinetiQ 2012. Gradert – Ikke tilgjengelig.

8.2 Papers

Brandau, H. John.

1967. *Aspects of Performance Evaluation of Waterjet Propulsion Systems and a Critical Review of the State-of-the-art,*

Washington: Naval Ship Research and Development Center.

<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/827069.pdf>.

Carlton, John

2012. *Marine Propellers and Propulsion,*

Oxford: Elsevier Ltd.

<https://books.google.no/books?id=HcN57dw6sSIC&printsec=frontcover&hl=no#v=onepage&q=toogood&f=false>.

Coop, Hamish George.

1995. *Investigation of Hull-Waterjet Interaction Effects,*

New Zealand: University of Canterbury
<https://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/8098>.

Doeller, Nicholas

2017. *Cavitation Breakdown in an axial waterjet pump: An experimental characterization of flow phenomena.*

Baltimore, Maryland: John Hopkins University

Eslamdoost, Arash.

2014. *The Hydrodynamics of Waterjet/Hull Interaction,*

Göteborg: Chalmers University of Technology.

<http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/208838/208838.pdf>

Henderson, R.E. McMahon, J.F. Wislicenus, G.F

1964. *A Method for the Design of Pumpjets,*

Pennsylvania: The Pennsylvania State University Ordnance Research Laboratory.

<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/439631.pdf>.

Kellner, Tomas

2013. *Re-Joyce: GE to Launch Breakthrough Pumpjet for Offshore Vessels.*

<https://www.ge.com/reports/post/74545156315/re-joyce-ge-to-launch-breakthrough-pump-jet-for/>.

Kopp, Carlo Dr.

2010. *Military Technology: Evolution of Guided Torpedoes,*

Australia: Defence today

<http://www.ausairpower.net/SP/DT-Torp-Evolution-Dec-2010.pdf>.

Marquardt, Matthew W.

2011. *Summary of two independent performance measurements of the ONR axial waterjet 2 (AXWJ-2),*

Maryland: Carderock Division, Naval Surface Warfare Center.

Monesoon, Mohammad. Javadi, Mehran. Charmdooz, Pejman & Mikhailovich, Karol Uri.

2013. *Evaluation of submarine model test in towing tank and comparison of CFD and experimental formulas for full body submerged resistance.*

<http://nopr.niscair.res.in/bit-stream/123456789/25467/1/IJMS%2042%288%29%201049-1056.pdf>

Thad, Michael J; Schroeder, Seth D; Becnel, Alan J.

2008. *Design of the ONR AxWJ-2 Axial Flow Water Jet Pump,*

West Bethesda: Carderock division, Naval surface warfare Center.

Wislicenus, George F.

1973. *Hydrodynamic design principles of pumps and ducting for waterjet propulsion.*

8.3 Internett

Casciani-Wood, Jeffrey

2015. *An introduction to propeller cavitation.*

<https://www.iims.org.uk/introduction-propeller-cavitation/>

Grøn, Øyvind

2018. *Kavitasjon,*

Oslo: Store Norske Leksikon.

<https://snl.no/kavitasjon>.

HamiltonJet.

2015. *Waterjet Overview: How a Waterjet Works.* New Zealand

<http://www.hamiltonjet.com/global/waterjet-overview>

Majumdar, Dave

2017. *Did china just create the "holy grale" of submarine technologies ?,*

<http://nationalinterest.org/blog/the-buzz/did-china-just-create-the-holy-grail-submarine-technologies-21436>

Hentet 06.05.2018 18:46

RC ModelReviews

2015. *How ducting a propeller increases efficiency and thrust.*

<https://www.youtube.com/watch?v=Cew5JF8q6eY&t=641s>

Stone Marine Propulsions.

Cavitation of Propellers

<http://www.smpropulsion.com/technical/pdfs/Cavitation%20of%20Propellers%20NL.pdf>.

8.4 Annet

Oset, Petter Hans.

2009. *Ubåtvåpenet 100 år.*

Horten: Marinemuseet.

9 Vedlegg

Vedlegg A. *Friprøvedigrammer*

Vedlegg B. *Beregninger- Casestudie*

Vedlegg C. *Fremgangsmåte for beregning av jet propulsjon*

Vedlegg D. *Sammenligning av to pumpejetberegninger*

Vedlegg E. *Slepeforsøk*

Vedlegg F. *Formelark*