



# Sjøkrigsskolen

## Bacheloroppgave

Studie av hub-vortex reduksjon

– En eksperimentell designstudie –

av

Erlend Millum Amundsen

Levert som en del av kravet til graden:

BACHELOR I MILITÆRE STUDIER MED FORDYPNING I MASKINFAG

Innlevert: 29. Mai 2019

**Godkjent for offentlig publisering**



## Publiseringsavtale

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

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

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

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

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

## Plagiaterklæring

Jeg erklærer herved at oppgaven er mitt eget arbeid og med bruk av riktig kildehenvisning.

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

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

Dato: 29 – 05- 2019

ERLEND MULLUM AMUNDSEN

Kadett navn



Kadett, signatur

## Forord

Oppgaven er skrevet av Erlend Millum Amundsen i perioden Januar 2019 til Mai 2019. Som en del av studiet Bachelor i militære studier med fordypning i maritime maskinfag, ved Sjøkrigsskolen.

Oppgaven tar for seg kavitasjonsreducerende tiltak for propellanlegg på skip. Jeg vektlegger variasjoner i hubkappedesign. Herunder har jeg valgt å gjennomføre forsøk i kavitasjonstunell for å vise effekten av ulike løsninger.

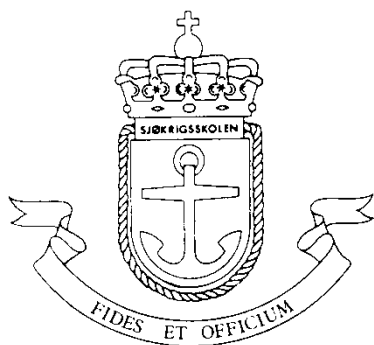
Spesiell takk til Gisle Strand, som både kom med forslaget til oppgaven og har vært veileder gjennom arbeidet.

Bergen, Sjøkrigsskolen, 29-05-2019

(Signatur)



Erlend Millum Amundsen



# Oppgaveformulering: Bacheloroppgave ved Sjøkrigsskolen

Marineingeniør Maskin Linjen, vår 2019

for

*Erlend Millum Amundsen*

Studie av hub-vortex reduksjon

Veileder: Gisle Strand

## **Problemstilling:**

Hvirveldannelse fra propellens boss og tilhørende kavitasjonsform er en signatur som kan oppstå på et propellanlegg. Flere metoder nyttes for å redusere den slik at signaturen ikke blir for kraftig.

## **Oppgave:**

Kadetten skal studere emnet slik at egne forsøk i skolens kavitasjonstunnel kan planlegges og gjennomføres. Kadetten kartlegger status på valgt propell og nytter denne til å konstruere egne løsninger, produsere de i egnede materiale samt sammenlikne disse egenskapene mot utgangspunktet.

## **Bakgrunnsmaterieell:**

Generell og spesialisert propelllitteratur og studier  
Sivile studier

## **Administrativt:**

Gradering avgjøres av fagmyndigheten. Kadetten skal etablere en prosjektside på FHS Office 365/Teams. Den skal inneholde en fremdriftsplan, som det rapporteres mot jevnlig, og en dagbok som dokumenterer arbeidets gang. Regnskap over utgifter og medgåtte timer føres også her. Oppgaven med vedlegg leveres på prosjektsiden og på Wiseflow senest 29.mai. Torsdag 27. juni er det offisiell presentasjon ifm avslutningen. En poster skal lages til avslutningen.

## Sammendrag

Oppgaven har to fokus. Den har undersøkt hvorvidt det er mulig å redusere eller eliminere hubvortex. Dernest om det er mulig å redusere den tilhørende kavitasjonen og fartøys akustiske signatur. Gjennom egnede modellforsøk med egne modelldesign er effekten av forskjellige hubkappedesign studert i kavitasjonstunell. Herunder påvirkning på propellanleggets virkningsgrad og kavitasjonsbilde under forskjellige forhold. Kavitasjonsbildet er en dominerende faktor i fartøys støysignatur.

Generelt viser resultatene at det mulig å drastisk påvirke en propells ytelse og støysignatur ved design av hubkappen. De modellene som viste høyst belastningstoleranse hadde også lavest virkningsgrad. Blant de modellene med høy virkningsgrad ble man nødt til å velge mellom toleranse for belastning ved akselerasjon eller under høye konstante turtall.

Modell 3, en vinget løsning, lykkes i å redusere hubvortexen og den tilhørende kavitasjonen uten å redusere propellanleggets virkningsgrad i noen betydelig grad. Slike løsninger finnes kommersielt for containerskip, hvor det reklameres med økt virkningsgrad. Av den grunn anbefales slike løsninger undersøkt ved fremtidige anskaffelser.

Modell 5, en gjennomstrømningsløsning, viste høyere toleranse for belastning enn de tradisjonelle løsningene. Riktignok hadde denne modellen studiens dårligste virkningsgrad, likevel anbefales konseptet for videreutvikling. Dette er et originalt konsept og bør studeres nærmere.

Studien viser definitivt at variasjoner i hubkappedesign kan redusere hubvortex, den tilhørende kavitasjonen og signaturen til et propellanlegg. I Sjøforsvarets kan det være interessant å undersøke mulighetsrommet for utskiftbar hubkappe. Med slikt oppsett kan et fartøy endre propellanleggets egenskaper fra oppdrag til oppdrag.

## Innholdsfortegnelse

<b>1</b>	<b>Introduksjon</b> .....	<b>11</b>
1.1	Bakgrunn .....	11
1.2	Mål .....	12
1.3	Begrensninger .....	12
1.4	Metode .....	12
1.5	Struktur .....	13
<b>2</b>	<b>Grunnlagsteori og forsøksdesign</b> .....	<b>15</b>
2.1	Propellen .....	15
2.2	Kavitasjon .....	19
2.3	Tunelltester .....	25
2.4	Propelleffektiviserende teknologi: .....	27
2.5	Kappeløsninger .....	28
2.6	Testfasilitetene .....	30
2.7	Forsøksdesign .....	33
<b>3</b>	<b>Modell design, produksjon og forsøksresultater</b> .....	<b>36</b>
3.1	Produksjon og overflatebehandling .....	36
3.2	Beregning og utvalg av testresultater .....	40
3.3	Modell 1 - Konus .....	40
3.4	Modell 2 – Konus-cut .....	44
3.5	Modell 3 – PBCF .....	48
3.6	Modell 4 – Diffusor .....	54
3.7	Modell 5 - Diffusor med gjennomstrømning .....	58
<b>4</b>	<b>Sammenligning og drøfting</b> .....	<b>65</b>
4.1	Virkningsgrad .....	65
4.2	Kavitasjonskarakteristikk .....	66
4.3	Mulighetsrommet med flere hubkappeløsninger .....	68
<b>5</b>	<b>Konklusjon med anbefaling</b> .....	<b>69</b>
5.1	Delkonklusjoner om de testede konseptløsningene .....	69
	<b>Bibliografi</b> .....	<b>71</b>
	<b>Vedlegg</b> .....	<b>73</b>

## Figurliste

Figur 1: Illustrasjon av strømming rundt en foil og resultant krefter (Saunders vol 1, 1956, s 214) .....	15
Figur 2: Sirkulasjonen rundt en foil (Saunders vol 1, 1956, s 217) .....	16
Figur 3: Eksempel på medstrømsfelt til en propell bestemt med CFD analyse (Lim, 2014, s 203) .....	17
Figur 4: Fasediagram for vann (Franc, 2010, s 2) .....	19
Figur 5: Modell av vortexutbredelse bak en roterende skrupropell (Breslin, 2003, s 207) .....	20
Figur 6: Illustrasjon av forskjellige typer kavitasjon (ITTC, 2014, s 3) .....	21
Figur 7: Hubvortex (Saunders Vol 1, 1956, s 251) .....	22
Figur 8 Skisse av kavitasjonskarakteristikk, $\sigma$ vs $J$ .....	23
Figur 9 Kavitasjonskarakteristikk med virkningsgrad $\eta_0$ .....	24
Figur 10 Illustrasjon av kavitasjonstester .....	25
Figur 11 Prinsippskisse av propelltester i kavitasjonstunell (Lim, 2014, s 200) .....	26
Figur 12 Eksempel på diffusorkappe (Eksempel funnet på: <a href="http://i.imgur.com/9tVNSnQ.jpg">http://i.imgur.com/9tVNSnQ.jpg</a> ) .....	29
Figur 13 Utsnitt av propelltegningen Vedlegg B .....	30
Figur 14 Propellkurve for NOAA modell 5343 (Hotaling, 2001, s 12) .....	31
Figur 15 Prinsippskisse K23 kavitasjonstunell .....	32
Figur 16 3D-modell til prototyper .....	37
Figur 17 Prototypene .....	38
Figur 18: Drivakselens ende i kavitasjonstunellen .....	39
Figur 19: 3D-skisse og utsnitt fra tegning av modell 1 (Vedlegg F) .....	41
Figur 20: Modell 1 montert i kavitasjonstunellen .....	41
Figur 21 Referanse og propellkurve med konus .....	42
Figur 22 Kavitasjonskarakteristikk - Modell 1 .....	43
Figur 23 Kavitasjon i Sone 1 – Modell 1 .....	43
Figur 24 Kavitasjon i Sone 2 – Modell 1 .....	44
Figur 25 3D-skisse og utsnitt fra tegning av modell 2 .....	44
Figur 26 Virkningsgrad - Modell 2 .....	45
Figur 27 Kavitasjonskarakteristikk - Modell 2 .....	46
Figur 28 Kavitasjon i Sone 1 - Modell 2 .....	47
Figur 29 Kavitasjon i Sone 2 - Modell 2 .....	47
Figur 30 3D-modell og utsnitt fra tegning av Modell 3 .....	48
Figur 31 Prinsippskisse av propell med finnet kappe (Lim, 2014, s 192) .....	49
Figur 32 Modell 3 installert i kavitasjonstunellen .....	49
Figur 33 Virkningsgrad - Modell 3 .....	50
Figur 34 Kavitasjonskarakteristikk - Modell 3 .....	51
Figur 35 Kavitasjon i Sone 1 - Modell 3 .....	52
Figur 36 Kavitasjon i Sone 2 - Modell 3 .....	53
Figur 37 3D-modell og utsnitt fra tegning av Modell 4 .....	54



Figur 38 Modell 4 installert i kavitasjonstunellen.....	54
Figur 39 Virkningsgrad – Modell 4.....	55
Figur 40 Kavitasjonskarakteristikk – Modell 4.....	56
Figur 41 Kavitasjon i Sone 1 – Modell 4 .....	57
Figur 42 Kavitasjon i sone 2 – Modell 4.....	57
Figur 43 Skisse av modell 4 .....	58
Figur 44: 3D-skisse og utsnitt av tegning av Modell 5 .....	59
Figur 45 Modell 5 med kanalen uthevet.....	60
Figur 46 Modell 5 montert i kavitasjonstunellen .....	60
Figur 47 Virkningsgrad – Modell 5.....	61
Figur 48 Kavitasjonskarakteristikk – Modell 5.....	61
Figur 49 Kavitasjon i Sone 1 – Modell 5 .....	62
Figur 50 Kavitasjon i Sone 2 – Modell 5 .....	63
Figur 51 Detaljert ved insepjon – Modell 5.....	63
Figur 52 Sammenstilte virkningsgrader .....	65
Figur 53 Sammenstilte observasjoner intermittent kavitasjon .....	66
Figur 54 Sammenstilte observasjoner av kontinuerlig kavitasjon .....	67

## Formelliste

Formel 1: Fremgangstall .....	17
Formel 2: Reynoldstall med propellbladets korde ved $0,7R$ .....	18
Formel 3 Dreiemomentkoeffisienten .....	18
Formel 4: Trustkoeffisient.....	18
Formel 5: Propellvirkningsgrad .....	18
Formel 6 Krav til kavitasjonsløs tilstand.....	23
Formel 7 Kavitasjonstallet .....	23

## **Tabell oversikt**

Tabell 1 Anbefalte testkondisjoner for kavitasjonstester .....	26
Tabell 2 Kravspesifikasjoner for fremdriftsanlegg .....	30
Tabell 3 Spesifikasjoner for testpropellen.....	31
Tabell 4 Tunellspesifikasjoner under tester .....	32

## Nomenklatur

Symbol:	Benevning:	Beskrivelse:
$z$		Antall blader
$A_D/A_0$		D.A.R. - Developed blade area
$P_v$	[Pa]	Damptrykk for vann
$D$	[m]	Diameter
$K_Q$		Dreiemomentkoeffisienten
$J$		Framgangstall
$V_A$	[m/s]	Framgangshastighet / tunnelens vannhastighet
$\sigma$		Kavitasjonstallet
$c_{0,7r}$	[m]	Korde ved 0.7R
$L$	[m]	Lengde
$t_{0,7r}$	[m]	Maksimal tykkelse på bladseksjon ved 0.7R
$h$	[m]	Neddykking av propellaksel
$n$	rps (rotasjoner/sekund)	Omdreiningshastighet
$Q$	[Nm]	Propellens dreiemoment
$T$	[N]	Propellens skyv
$\eta_0$		Propellvirkningsgrad
$P/D_{0,7r}$		Stigning ved 0.7R
$P$	[Pa]	Trykk
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	Tyngdens akselerasjon
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Tettheten av vannet
$R$	[m]	Radius
$K_T$		Thrustkoeffisienten
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	Vannets kinematiske viskositet

# 1 Introduksjon

Hele vårt samfunn er avhengig av shipping. I alt fra klærne i butikken, olje vi fyller på bilen, gassen som driver grillen, kjemikalier til renhold og maten på bordet vårt finner vi hele eller deler av produkter som er produsert langt herifra. Vi er avhengig av et nesten usynlig transport-samband av skipstransport. I Forsvaret har vi våre skip, fregatter, ubåter og kystvakt for å nevne noen. Nærmest alle skip på verdens hav benytter i dag en propell for fremdrift.

Propellen er en essensiell del av skipets fremdriftslinje. Propellen står samtidig for en betydelig andel av skipets effekttap langs fremdriftslinjen. Disse tapene resulterer i økte brennstoffkostnader og økt forurensning.

Propellens tap er dominert av design og ineffektiv drift. De beste propellene designes for medstrømsfeltet som igjen er en funksjon av skrogformen og andre forhold. Disse er slepemotstand, designdypgang, designhastighet og operasjonsområde. Likevel er det umulig å unngå midlertidige variasjoner i propellens medstrømsfelt, dybde og tredimensjonale bevegelse gjennom vannmassene. Havet er dynamisk og uforutsigbart, dermed blir det umulig å drifte under ideelle forhold til enhver tid. Resultatet er ofte kavitasjon og redusert effektivitet.

Propellkavitasjon er et komplekst fenomen og forekommer på propellbladene, mellom propellen og skroget og ikke minst ved propellbosset, hubben. Det er nettopp tapene, virvelstrømmingen bak, og den resulterende kavitasjonen denne oppgaven skal omhandle. Et forsøk på å redusere tap, erosjonsskader og støy fra propellhubben.

## 1.1 Bakgrunn

Gjennom utdanningen ved Sjøkrigsskolen lærer maskinkadetter å vurdere og beregne propellers karakteristikk. Fra virkningsgrad og fremgangshastighet til å regne ut propellens dimensjonsløse koeffisienter. Som del av utdanningen gjennomføres propellforsøk i kavitasjonstunell for å bestemme koeffisienter og karakteristikken til en propell eksperimentelt. Alt dette underbygger forståelsen for hvordan propeller fungerer og hvilke forhold som påvirker deres ytelse. Utdanningen gir også grunnleggende opplæring i bruk av 3D-modelleringsprogrammet, SolidWorks.

Skolen har nylig anskaffet en modell propell designet for å være spesielt stillegående. I tillegg har skolen to 3D-printere som er tilgjengelig for kadettene. Begge printerne er kompatible med 3D-modelleringsprogrammet SolidWorks.

Alle disse forholdene legger til rette for å kunne gjennomføre en eksperimentell studie med egne design. 3D modellerte design av hubkappeløsninger kan 3D-printes og testes i skolens kavitasjonstunell.

## **1.2 Mål**

Design forskjellige hubkappeløsninger og gjennomføre modellforsøk. Dette for om mulig redusere eller eliminere hubkavitasjon. Ved å teste flere konsept er tanken å få frem variasjon i egenskaper. Det vil gi dypere forståelse for kavitasjonsfenomenet og ikke minst hvordan slike tiltak påvirker propellens ytelse.

## **1.3 Begrensninger**

Oppgavens begrenses til en eksperimentell testmetode. Dette gjelder for alle varianter. Oppgaven tar kun for seg løsninger for å redusere hubvortex og hubkavitasjon. Oppgaven søker kun å vise effekten av forskjellige konsept for hubkappedesign. Dermed vil oppgaven kun ta for seg et begrenset antall variasjoner i hubkappedesign. Begrensninger i tid og omfang på oppgaven begrenser det hele til fem modellforsøk. Derfor vil det ikke være mer enn en modell eller variant per konsept.

## **1.4 Metode**

Oppgaven vil forgå i tre faser.

### **1.Fase - Dokumentstudier**

For å bygge egen forståelse og tilegne mer kunnskap om tema begynner arbeidet med studie av relevante lærebøker, relevante artikler og relevante gjennomførte studier. Med bistand fra veileder, opparbeide tilstrekkelig forståelse for; eksisterende teorier om hubkavitasjonsfenomenet og filosofier for å redusere denne, eksisterende løsninger og ikke minst hvordan utviklingen ser ut i dag.

Denne fasen inneholder også en innhentning av relevant informasjon for å kunne lage et egnet forsøksdesign, slik at forsøkene gjennomføres etter en hensiktsmessig mal som er; repliserbar, gjennomførbar med tilgjengelige fasiliteter og ikke minst gir relevante resultater i forhold til problemstillingen.

## 2. Fase – Design og modellproduksjon

Med en økt forståelse av fenomenet og dagens eksisterende løsninger skal modeller designes i 3D-modelleringsprogrammet Solidworks. Disse printes i et egnet materiale og bearbeides for møte kavitasjonseksperimentene med så lik overflate som mulig.

## 3. Fase – Forsøk, resultatanalyse og sammenligning

Ved å kjøre hver enkelt modell gjennom samme testprosedyre for å etablere propellkarakteristikk og kavitasjons karakteristikk for hver av modellene kan resultatene analyseres og drøftes. Etablere resultatplott for å kunne vurdere de forskjellige løsningene opp mot hverandre. Siden hubkappmodellene skal kjøres i samme kavitasjonstunell, under like omstendigheter med samme testpropell, er grunntanken at testresultatenes variasjon fra modell til modell skal reflektere hubkappedesignets påvirkning på propellens karakteristikk og kavitasjonsbilde.

## 1.5 Struktur

Oppgavens oppbygning vil i hovedtrekk gjenspeile metodens gang. Innledningsvis vil det redegjøres nødvendig grunnleggende teori. Deretter tar den for seg de omgivende forhold og hvordan disse påvirker resultatene og deres relevans i en større sammenheng. Dernest grunnlaget for valgte forsøksdesign og de vurderingene som lå til grunn for hvert testforhold. Overskriften for denne første delen av besvarelsen vil være «Grunnlagsteori og forsøksdesign». Oppgaven skal kunne leses på bachelornivå innen ingeniørfag, da er det naturlig å gjøre grovt rede for de hovedtemaene oppgaven berører. Dette er propellteori og vortexteori, og redegjøre for de relevante tilleggs kunnskapene og filosofiene som kommer til lys under gjennom dokumentstudiene.

I neste del vil oppgaven presentere hvert enkelt modelldesign og de tilhørende resultatene for den enkelte modellen. Her kommenteres også de vurderinger som ligger til grunn for designvalgene gjort ved hver modell. Dette inneholder figurer, tegninger og bilder av den enkelte modell samt diagrammer som viser forsøksresultatene. For best mulig å vise hvilke resultater forsøkene gir for den enkelte modell. Her drøftes resultatene for hver enkelt modell. Slik at det tydelig vises hvordan resultatene fra de forskjellige modellene divergerer. Denne delen av besvarelsen vil ligge under overskriften «Modelldesign, produksjon og forsøksresultater».

Under overskriften «Sammenligning» vil oppgaven ta for seg sammenstilte forsøksresultater. Modellresultatene vil sammenlignes og drøftes i to omganger. Først, sammenstilte resultater

for modellenes påvirkning på propellens virkningsgrad. Så sammenligning av modellenes kavitasjonskarakteristikk. Herunder drøfte hvordan disse sammenfaller eller avviker fra de opprinnelige forventninger og det teoretiske grunnlaget. Hensikten er å gi en så gunstig vurdering av studiens resultater som tiden tillater.

Avslutningsvis vil oppgaven, om mulig, konkludere på bakgrunn av resultatene og presentere eventuelle anbefalinger til videre arbeid og tilegnede erfaringer.

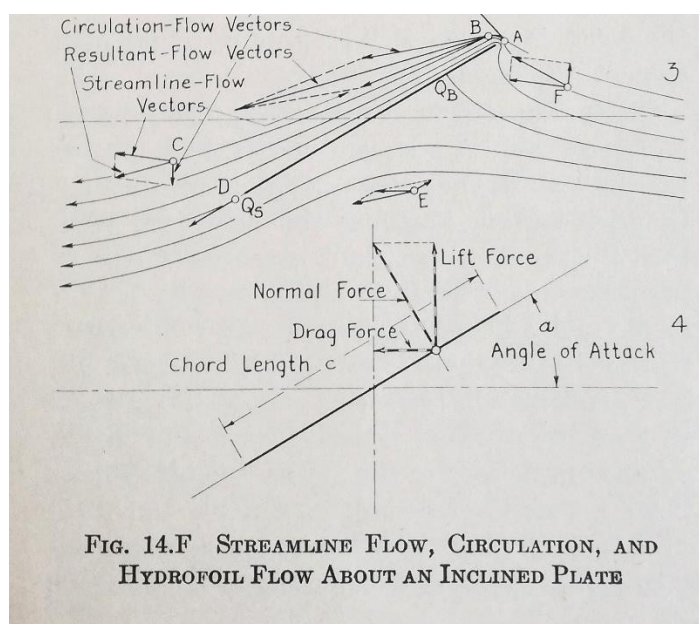
Vurdering av studiens feilkilder og kilder til unøyaktighet, endelig forsøksdesign, grunnlagsdata til nødvendige utregninger og lignende vil ligge som vedlegg.



## 2 Grunnlagsteori og forsøksdesign

### 2.1 Propellen

Enhver propell er i utgangspunktet flere sammenstilte vinger eller foiler. Derfor tar vi utgangspunkt i foilen for å danne et bilde av strømningsbildet rundt en propell. Foilens utforming kan være symmetrisk, men på propeller og flyvinger vil den være strømlinjeformet på en slik måte at fluidet den beveger seg i har lengre vei over enn under, et ellipsoide-tverrsnitt. Dermed vil strømningshastigheten være høyere på oversiden. Resultatet av dette og en positiv angrepsvinkel,  $\alpha$ , er et overtrykk på undersiden og et undertrykk på oversiden, relativt til omgivelsenes statiske trykk,  $P_0$ . Dette fører også til en sirkulasjon,  $\Gamma$ , av fluidet rundt vingen som forsterker trykkdifferansen. Trykkdifferansen over foilens areal gir resultantkraften, «Normal force» vist i vektordiagrammet i Figur 1.

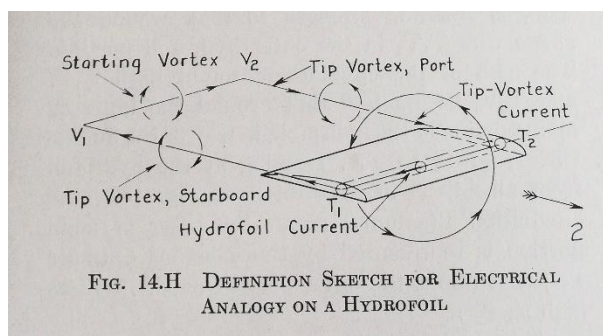


**Figur 1: Illustrasjon av strømming rundt en foil og resultant krefter (Saunders vol 1, 1956, s 214)**

Dekomponert gir resultantkraften to nøkkelkomponenter: Løft; som for propeller blir skyv,  $T$ , og drag, som for propeller gir dreiemomentet,  $Q$ .

### 2.1.1 Sirkulasjon

Sirkulasjonen,  $\Gamma$ , frigjøres ved foilens ender. Dette resulterer i en roterende virvelstrøm, en vortex ved hver ende som vist i Figur 2. For propellen vil hvert propellerblad gi en ende-virvel, eller tip-vortex, og en base virvel ved propellerbosset, en hub-vortex.

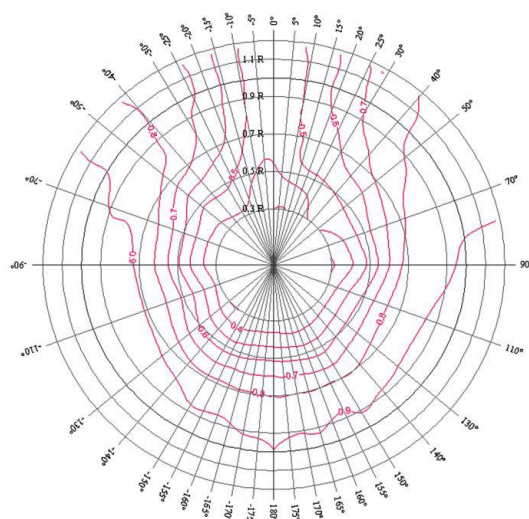


**Figur 2: Sirkulasjonen rundt en foil (Saunders vol 1, 1956, s 217)**

### 2.1.2 Medstrømsfelt

For å beskrive kondisjonene i en propells arbeidsområde bestemmes *medstrømsfeltet* den skal arbeide i. Dette er en todimensjonal beskrivelse med propellakselen i senter og trykkfordeling, gitt som koter ved forskjellige radier og rotasjonsvinkler. Slik vil trykkotene representere hvordan trykket varierer i propellens arbeidsområde under dynamiske forhold. Denne skissen kan benyttes for å optimalisere propellens design for de strømningsforhold som den vil oppleve under et gitt skip.

Medstrømsfeltet kan finnes eksperimentelt ved å gjennomføre slepetester med trykksensorer i propellens sted. Dette stiller krav til en representativ modell av skipet og et egnet testanlegg. Alternativt kan medstrømsfeltet bestemmes ved hjelp av CFD- analyse, CFD; *Computational fluid dynamics*. I dette tilfelle benyttes et avansert dataprogram for å simulere fluidets strømning rundt en virtuell modell av skroget under gitte definerte forhold. Simuleringen vil kunne gi relativt nøyaktig prediksjon av medstrømsfeltet til et skip.



**Figur 3: Eksempel på medstrømsfelt til en propell bestemt med CFD analyse (Lim, 2014, s 203)**

Propeller arbeider alltid under dynamiske forhold og medstrømsfeltet kartlagt er kun et bilde av de gjennomsnittlige forholdene. Lokale trykkforhold vil under operasjon svinge rundt disse gjennomsnittlige verdiene.

### 2.1.3 Propellkurven og testforholdene:

For å beskrive propellens ytelse og effektivitet, bestemmes noen dimensjonsløse koeffisienter. Testkondisjonene defineres også etter dimensjonsløse koeffisienter for å enkelt kunne sammenligne med andre studier. Det er også disse koeffisientene som legges til grunn for å etablere testkondisjoner i modellskala som er ment å representere for fullskala forhold.

#### 2.1.3.1 Testforhold

Fremgangstallet,  $J$ , beskriver det dimensjonsløse forholdet mellom hastigheten på vannet,  $V_A$ , propellen beveger seg gjennom og produktet av omdreininger,  $n$ , og propelldiameteren,  $D$ . Dette forholdet benyttes som en grunnleggende testparameter. I propellkurver plottes vanligvis de aktuelle koeffisientene som en funksjon av  $J$ .

$$J = \frac{V_A}{nD}$$

#### Formel 1: Fremgangstall

For å etablere testkondisjoner i modellforsøk som gir representative resultater for fullskala har man matematisk utledet og eksperimentelt funnet to slike forhold som benyttes. Ideelt sett

etableres testkondisjoner som gir både kinematisk og dynamisk likhet ved modell og fullskala. Froudetallet,  $F_n$ , baserer seg på like bølgemønster og benyttes i slepeforsøk (1956, Saunders vol 1, s 177). Reynoldstallet,  $R_n$ , baserer seg på den viskøse friksjonsmotstanden et gitt overflateareal opplever i bevegelse gjennom en fluid (1956, Saunders vol 1, s 101). Fullstendig kinematisk og dynamisk likhet er ikke mulig, vannmolekylene er av en gitt størrelse som ikke kan skaleres.

Likhet i Reynoldstall benyttes for å definere testkondisjoner i modellskala som er representative for et skip i fullskala for neddykkede objekter.

$$R_n = \frac{c_{0.7} \cdot V_{0.7R}^2}{\nu}, \quad V_{0.7R}^2 = V_A^2 + (\pi n 0.7 D)^2$$

### **Formel 2: Reynoldstall med propellbladets korde ved 0,7R**

Formel 2 beskriver Reynoldstallet ved 0,7 R, standard utgangspunkt i propelltester.

#### 2.1.3.2 Propellkurven

Propellens ytelse beskrives under varierende lastforhold. Det gir den såkalte propellkurven. Den blir representert ved hjelp av dimensjonsløse koeffisienter. Den beskriver propellens skyv,  $T$ , dreiemoment,  $Q$  og virkningsgrad,  $\eta_0$  som funksjoner av Fremgangstallet,  $J$ .

Koeffisientene er definert slik:

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$$

### **Formel 3 Dreiemomentkoeffisienten**

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$$

### **Formel 4: Trustkoeffisient**

$$\eta_0 = \frac{\text{Levert effekt}}{\text{Tilført effekt}} = \frac{T \cdot V_A}{Q \cdot 2\pi n} = \frac{K_T}{K_Q} \cdot \frac{J}{2\pi}$$

### **Formel 5: Propellvirkningsgrad**

### 2.1.4 Effekten av propellbossets størrelse

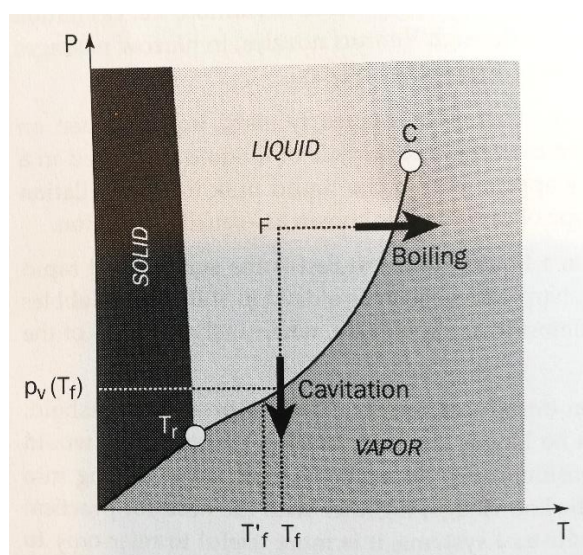
Propellbossets størrelse er også av betydning. Et større boss har større overflate, som medfører mer viskøs motstand. Det vil redusere det totale B.A.R forholdet, slik at en mindre andel av det totale propellarealet,  $A_0$ , benyttes til å generere skyv. Likevel medfører et større propellboss også redusert tap i senter. Det forstørrede bosset øker diameteren på hub-vortexen og dermed trykkfallet inn mot senter av propellbosset i akterkant. Stort boss betegnes her som  $d/D \geq 0,3$  (1956, Saunders vol 1, s465). Stort propellboss benyttes i hovedsak i propeller med dreibare propellblad av nødvendighet, eller som ett effektiviseringstiltak sammen med en rorbulb (1956, Saunder vol 2, s 633).

### 2.1.5 Bakover vendt blad tupp

Ved å designe propellbladene med bakovervendt bladtupp vil det lokale undertrykket ved bladenes ende reduseres. Dette har en reduserende effekt på tip-vortexen og kan øke propellens totale effektivitet så vel som å redusere erosjonsskader på propellbladene (Inukai, 2013, s 148).

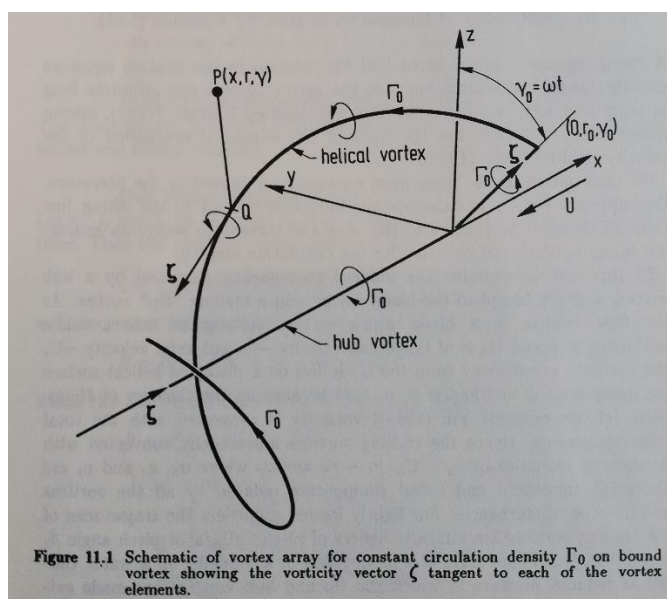
## 2.2 Kavitasjon

Kavitasjon er fenomenet der et lokalt undertrykk midlertidig passerer damptrykket,  $p_v$ , ved den aktuelle temperaturen i fluidet, som anvist i Figur 4. Dermed vil det oppstå en gassblære som under dynamiske forhold vil denne kollapse nesten umiddelbart. Disse gassblærene er ofte meget små, men bidrar både til erosjon og støy. I tillegg vil de forstyrre den allerede turbulente strømmingen og oppta energi (Breslin, 1996, s 128).



Figur 4: Fasediagram for vann (Franc, 2010, s 2)

For skrupropeller oppstår det i hovedsak tre typer kavitasjon. Sheetkavitasjon, tipkavitasjon og hubkavitasjon. Sheetkavitasjon legger seg som et pledd over propellerbladet, på propellerbladets undertrykkside. Hvis et slikt «pledd» vedvarer, vil strømmingen passere rundt som om bladet hadde formen med gassblæren og redusere løftet betraktelig. De to resterende typene er begge former for vortex kavitasjon. I senter av en roterende strømning, en *vortex*, vil trykket falle som følge av sentripetalakselerasjonen som tvinger strømmingen til spredning (1956, Saunders vol 1, s 134-149). Figur 5 viser en forenklet vektordiagram av hvordan vortexene vil bre seg fra et blad bak en propell.



**Figur 5: Modell av vortexutbredelse bak en roterende skrupropell (Breslin, 2003, s 207)**

### 2.2.1 Kavitasjonsbildet

Kavitasjon forekommer i flere former som illustrert i Figur 6. Figuren viser forekomst av sheet- og vortexkavitasjon og hvor de normalt forekommer. Sheetkavitasjonen konsentrer seg på undertrykkssiden av propellbladene. Vortexkavitasjon kan opptre mellom propellen og omgivende struktur, som tipkavitasjon eller en hub-vortex.

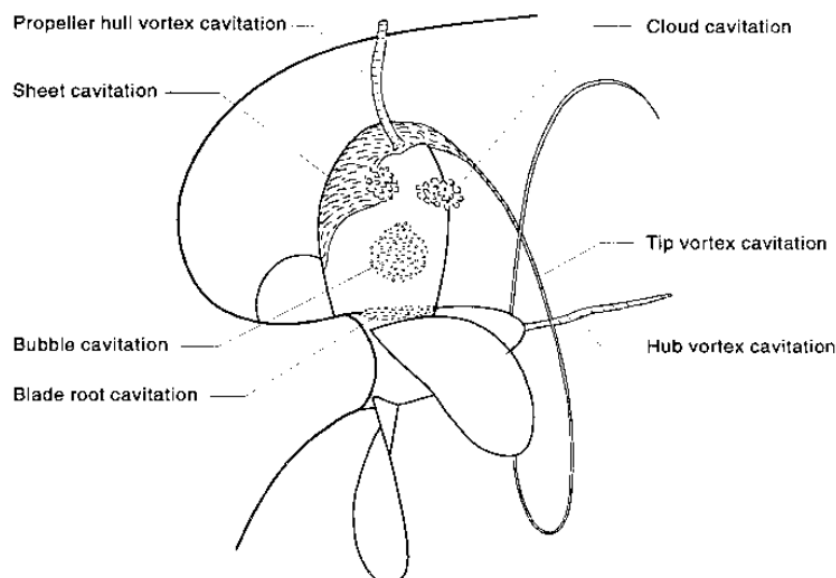


Figure 1 Cavitation types

**Figur 6: Illustrasjon av forskjellige typer kavitasjon (ITTC, 2014, s 3)**

I tillegg forekommer dragkavitasjon i form av en boblesky bak brå overganger, eksempelvis vil man forvente dette bak propellbosset om man ikke har en kappe. Dette oppstår som konsekvens av den passerende fluidstrømningen som medfører en undertrykkssone på tverrflaten. Dette gir betraktelig økning i motstanden (Funeo, 2002, s 21).

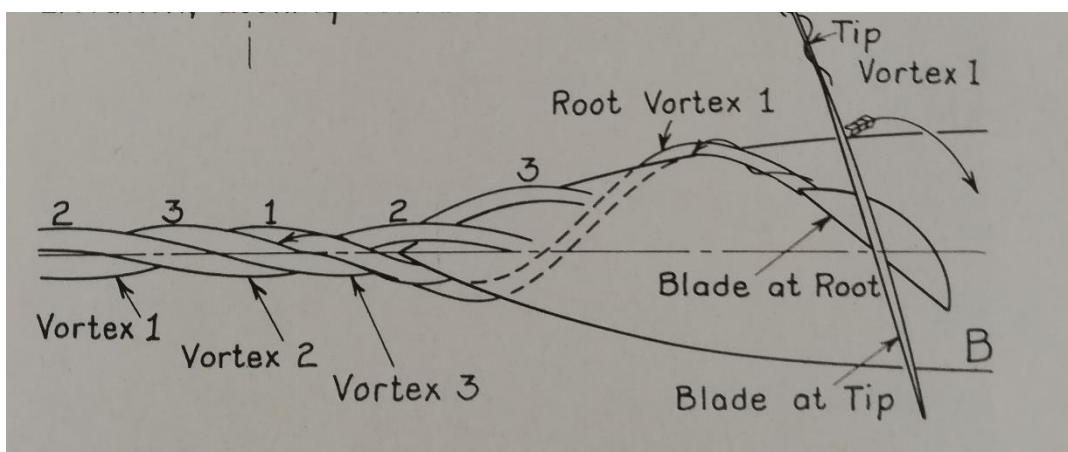
Propeller arbeider alltid under dynamiske forhold og det har vist seg vanskelig å etablere statiske forhold selv ved laboratorier. Medstrømsfeltet som kartlegges er kun et bilde av de gjennomsnittlige forholdene. De lokale trykkvariasjonene kan også gi fremvekst av sporadisk kavitasjon innenfor terskelgrensene. Dermed er det nødvendig å definere hva som tilfredsstillende når kavitasjon oppstår, insepsjonsgrensen, og hva som definerer grensen for kontinuerlig kavitasjon. (2017, ITTC, s 7)

### 2.2.2 Tipkavitasjon

Tip-kavitasjonen oppstår ved bladenes ende og er et resultat av at tip-vortexen får tilstrekkelig rotasjonsenergi. I vortexstrømningen vil rotasjonsenergien gi ekspansjon som igjen fører til et undertrykk i vortexens kjerne. Bladtuppens undertrykksside vil ofte være observert som insepsjonspunkt for tip-kavitasjonen. Tip-vortexens rotasjonsstyrke er lik propellerbladets sirkulasjon,  $\Gamma$ . Denne er også i rotasjon ettersom den følger bladtuppens bane gjennom fluidet som illustrert i Figur 5.

### 2.2.3 Hubkavitasjon

I likhet med tipvortexen, oppstår rotvortex som resultat av bladets frigjorte rotasjonsstrømning, dette er uunngåelig så lenge propellen genererer skyv. (1956, Saunders vol 2, s251) Vortexen ved bladet base er i likhet med tipvortexen drevet av propellbladets sirkulasjon. Som vist i Figur 7 vil de forskjellige rotvortexene samles i akterkant av propellerbosset til en forsterket vortex. Denne refereres til som propellens *hubvortex*.



Figur 7: Hubvortex (Saunders Vol 1, 1956, s 251)

Under tilstrekkelig belastning av propellen og tilstrekkelig rotasjon i fluidstrømningen ut av propellen vil det lokale trykket i senter av hubvortexen passere damptrykket,  $p_v$ . Under økende belastning vil dette oppstå sporadisk for så å hurtig forsvinne, dette refereres til som *intermittent hubkavitasjon*. Økes belastningen ytterligere vil det etableres en stabil virveldannelse kalt *swirl core*. Det vil si et stabilt «rør» av damp. Matematisk kan denne predikeres, slik som ved CFD-beregning.

### 2.2.4 Kavitasjonstall og kavitasjonskarakteristikk

For å illustrere en propells arbeidsområde bestemmes den respektive kavitasjonskarakteristikken. Denne beskriver under hvilke kondisjoner man kan drifte kavitasjonsløst. Et plott med både terskelgrenser for insepsjon, den første ustabile fremvekst av kavitasjon, og ved kontinuerlig kavitasjon. Selve karakteristikken er som oftest et plott av de observerte terskelpunktene etter tester under varierte dynamiske forhold i et diagram av kavitasjonstallet,  $\sigma$ , og fremgangstallet,  $J$  eller  $\sigma$  og trustkoeffisienten,  $K_t$ . En slik karakteristik kartlegges vanligvis i kavitasjonstunell ved modell forsøk (ITTC, 2017, s 7).



Kavitasjonstallet,  $\sigma$ , er i tilfellet marine propeller, et forholdstall mellom to trykkdifferanser: Differansen mellom omgivelses trykket og damp trykket ved den gitte temperaturen, og stagnasjonstrykket for en karakteristisk hastighet. For propelle benyttes den relative hastigheten propellbladet møter fluidstrømmen med ved 0,7 R. Kriteriet for kavitasjonsløs operasjon er:

$$\sigma_o < \sigma_I$$

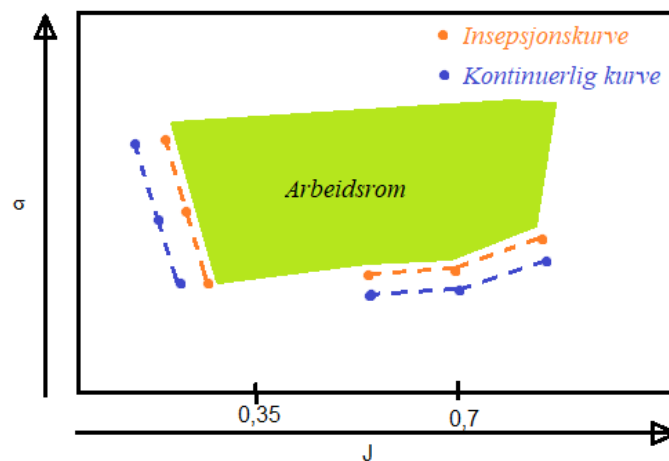
### Formel 6 Krav til kavitasjonsløs tilstand

Der  $\sigma_{0,7R}$  benyttes definert slik:

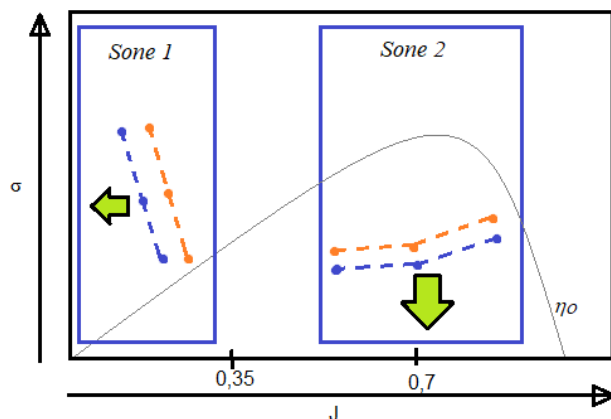
$$\sigma_{0,7R} = \frac{P - P_v + \rho \cdot g \cdot (h - 0,7 D/2)}{\rho / 2 \cdot V_{0,7R}^2}$$

### Formel 7 Kavitasjonstallet

Der  $\sigma_0$  er det respektive kavitasjonstallet for et punkt og  $\sigma_1$  er insepsjonsgrensen i det samme punktet. Derfor ønskes et systemdesign med så lav  $\sigma_1$  som mulig. Da dette gir større arbeidsrom uten kavitasjon (2010, Franc, s 12).



Figur 8 Skisse av kavitasjonskarakteristikk,  $\sigma$  vs  $J$



**Figur 9** Kavitasjonskarakteristikk med virkningsgrad  $\eta_0$

Figur 8 viser en typisk kavitasjonskarakteristikk som funksjon av  $\sigma$  og  $J$ . På figur 9 viser hvordan karakteristikken kan deles inn i to soner. «Sone 1» viser kavitasjon forårsaket av overbelastning og det resulterende trykkdifferansen over bladene. «Sone 2» viser kavitasjon under høyeffektiv drift, det intervallet av  $J$  hvor propellvirkningsgraden er høyest. Her forårsaker kavitasjonen i utgangspunktet av det økte differansetrykket i stagnasjon, høyt turtall.

Som anvist med piler på Figur 9, er det i hovedsak to måter å utvide arbeidsrommet; forflytte den høyre siden ned eller den venstre lengre mot venstre. Dette er to metoder med fundamentalt forskjellige konsekvenser.

Forflytter man den høyre siden nedover, øker marginen før kavitasjon under høyeffektiv drift. Gitt at det er affinitet mellom kavitasjonskarakteristikken ved forskjellige turtall, kan propellen driftes med høyere turtall enn tidligere.

Forflytter man derimot den venstre terskelen lengere mot venstre, utbedres marginen før kavitasjon under laveffektiv drift. Dermed kan man påføre propellen høyere last under slike forhold enn tidligere. Alternativt opprettholde samme turtall ved et lavere fremgangstall,  $J$ , enn tidligere. Dette betyr at man eksempelvis kan akselerere fartøyet raskere uten å kavitere.

### 2.2.5 Støysignatur

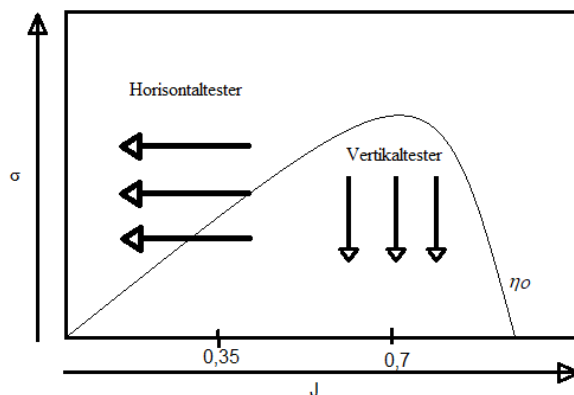
Et skips støysignatur er summen av all støy skipet forplanter ut i vannmassene. Denne bredbåndsstøyen er unik for hvert skip og sammensatt av skipets motor-, gir-, pumpe-, omformer- og propell-støy. Det totale støybildet refereres til som skipets akustiske signatur, og er unik for hvert enkelt skip. Under driftskondisjoner hvor propellen kaviterer vil kavitasjonsstøyen domi-

nerer støybildet og øke signalnivået drastisk. (Renilson, 2014, s 53) Forskjellige kavitasjonsformer produserer forskjellig støy og forskjellige signalnivå. Sheetkavitasjon og swirl core kavitasjon produserer den kraftigste støyen.

I militær sammenheng er det av strategisk betydning å minimere signalnivået på fartøyenes akustiske signatur. Spesielt viktig er dette for ubåter og de fartøy som engasjeres i ubåtjakt. Disse benytter akustiske deteksjonssystemer som primære sensorer.

## 2.3 Tunelltester

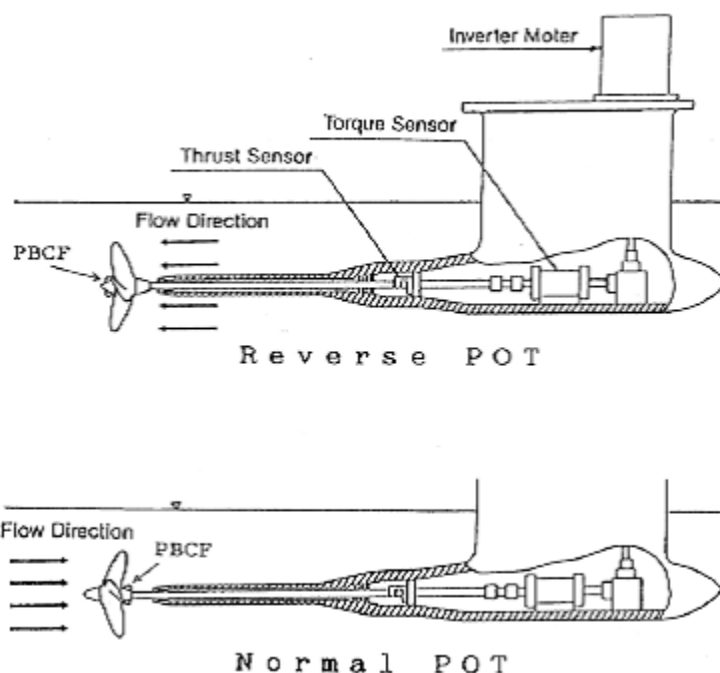
For å definere en propells kavitasjonskarakteristikk benyttes ofte kavitasjonstunell som testanlegg. En lukket strømmingstunell hvor man kan justere de omgivende forhold, måle skyv,  $T$ , og dreiemoment,  $Q$ , på propellen og samtidig observere propellen. Ønsket ved et slikt anlegg er å simulere den aktuelle propellens driftsforhold, medstrømsfeltet, best mulig i modellskala. Ved å regulere vannhastigheten i tunellen,  $V_A$ , propell turtallet,  $n_{prop}$ , og trykket i tunellen,  $P_0$ , utsetter man propellen for varierte dynamiske forhold. Slike anlegg benyttes også for å kartlegge propellkurven.



**Figur 10** Illustrasjon av kavitasjonstester

Det vanlige er å gjennomføre *horisontale tester* i Sone 1 og *vertikale tester* i Sone 2. Horisontale tester vil si at man setter et gitt turtall på propellen, konstant trykk i tunellen og reduserer tunellhastigheten gradvis, fra et punkt med relativt høy virkningsgrad, til kavitasjon observeres. Forutsetningene som er gitt gir forholdsvis stabilt kavitasjonstall; bevegelse horisontalt i diagrammet i Figur 10. Vertikale tester medfører et oppsett med konstant turtall for propellen, konstant vannhastighet i tunellen og så redusere trykket i tunellen gradvis. Dermed vil kavitasjonstallet reduseres ved konstant  $J$ ; bevegelse vertikalt i diagrammet.

Denne studien skal studere variasjoner i hubkavitasjon, dermed gjøres tunelltestene ved såkalt reversert strømming, som vist i Figur 11 ved «Reverse POT».



**Figur 11** Prinsippskisse av propelltester i kavitasjonstunell (Lim, 2014, s 200)

### 2.3.1 Skaleringseffekt

For at tunelltestene skal gi representative resultat tilstrebes likhet i Reynoldstall. Likevel viser simuleringer at modellpropeller opplever laminærstrømning over 50 - 60 % av propellbladene, noe som ikke forekommer i fullskala (2002, Funeno, s 10). I slepetankforsøk utbedres dette ved tillegg av en turbulensinitiator på modellenes baug. I tunelltester av propeller kan denne skalerings-effekten motvirkes ved å gjennomføre tunelltestene ved et tilstrekkelig høyt Reynoldstall.

**Tabell 1** Anbefalte testkondisjoner for kavitasjonstester

Kilde:	Minimumsgrense / Testintervall
ITTC:	$1,5 \cdot 10^6 < R_n < 7,5 \cdot 10^6$
Funeno:	$R_n > 4,3 \cdot 10^5$
Lim:	$R_n > 3,0 \cdot 10^5$

(ITTC, 2017, s 8), (Funeno, 2002, s 20), (Lim, 2013, s 14).

Variasjonene i Tabell 1 er store. Det er verdt å bemerke at Funeno og Lim kravene er angitt som minimumsgrense, mens ITTCs intervall viser til anbefalt testområde.

## 2.4 Propelleffektiviserende teknologi:

I dag er det flere filosofier for propelleffektivisering. Så godt som alle er forsøk på å redusere rotasjon i fluidstrømningen som passerer ut av skipets fremdrifts arrangement. I hovedsak er det fire filosofier for å oppnå dette.

1. Optimalisere medstrømsfeltet, *pre-swirl*
2. Optimalisere propelldesign etter skipets medstrømsfelt
3. Redusere rotasjonen med tiltak bak selve propellen, *post-swirl*
4. Kombinasjoner av de nevnte metodene

(Lee, 2017, s1-3)

### 2.4.1 Pre-swirl tiltak

For å optimalisere propellens effekt er filosofien basert på å gi propellen best mulige inngangsforhold, optimalisere medstrømsfeltet. Dette oppnås eksempelvis med symmetriske eller ikke-symmetriske «pre-swirl statorer». Det finnes både kanal løsninger og frittstående statiske finner. Noen av løsningene søker å gi en rotasjon til strømningsfeltet som så, i teorien skal kanselleres av rotasjonen tilført av selve propellen (Lee, 2017, s 1). Andre søker å øke vannhastigheten i deler av medstrømsfeltet ved hjelp av en dyseformet kanal (Okada, 2017, s 4).

### 2.4.2 Propelldesign

De mest effektive propellene som utvikles baseres på medstrømsfelt og ekstensive CFD-analyser. Slik vil alle designvalgene for propellen være spesialisert for nettopp det skipet propellen skal monteres til. Dette er et stort fagfelt og denne oppgaven forsøker på ingen måte å dekke dette feltet, kun å nevne designgrep som får mye oppmerksomhet i dag:

- High scew propellblader, nå som materialteknologien tillater stadig høyere belastninger.
- Trailing edge detailing, spesial utformede slippkanter langs propellerbladene.
- Bakovervendte bladtupper.

For å nevne noen. Disse søker å redusere: kavitasjon, vibrasjon, støy, slitasje og effekttap.

### 2.4.3 Post-swirl

Her handler det om to ting. Først; hindre fremveksten av swirl-core. Deretter, om mulig, omsette mest mulig av rotasjonsenergien i strømmingen ut fra propellen til skyv. Dette gjøres med post-swirl statorer eller hubkappedesign. Blant post-swirl statorer finnes det flere løsninger. De fleste nye containerskip har dette i form av en rorbulb. For skip med pumpejet fremdrift kan statoren være guide finner bak rotoren. Pumpejetløsninger er som oftest utstyrt med både pre- og post-swirl statorer. Hubkappeløsningene kan forekomme i kombinasjon med rorbulb, (Okada, 2017, s 2) eller alene. Denne oppgavens hovedfokus er nettopp de forskjellige hubkappeløsningene når de står alene. Neste delkapittel vil ta for seg forskjellige filosofier for hubkappeløsninger.

## 2.5 Kappeløsninger

### 2.5.1 Strømlinjeformet kappe

Historisk ble første filosofi for å redusere hubvortex fenomenet å påmontere et strømlinjeformet tillegg på propellerbosset, en konuskappe. Brå overganger og utstikkende strukturer gir økt slepomotstand, drag, mens strømlinjeformer og gradvise overganger reduserer denne motstanden. Fra denne filosofien deduserte man at en kunne redusere propellens drag og dreiemoment ved å gi propellerbosset og akselen en gradvis og strømlinjeformet avslutning i akterkant av propellen.

Figur 7 viser, tross at konusen reduserte propellens drag under lav belastning, forekommer en swirl core under høy belastning. Swirl core fører til støy, vibrasjoner, økt drag og redusert skyv. I 1930 årene ble løsningen modifisert. Ved å gi konusen en brå ending etter 0,5 – 1 hublengde. Intensjon; den induserte turbulensen i akterkant av hubkappen skulle forstyrre hubvortexstrømmingen tilstrekkelig og hindre en swirl core. Ulempen er å akseptere noe høyere drag og reduksjon i skyv. Ikke et ideelt resultat, men et kompromiss, da en swirl core ville gitt høyere motstand (Saunders vol 2, 1956, s 601).

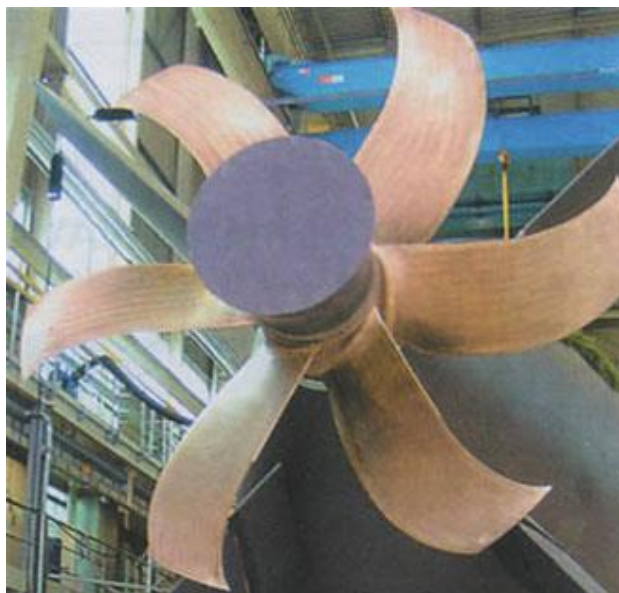
### 2.5.2 PBCF

Mot slutten av 1980- tallet startet eksperimentering med en ny modifikasjon av den kappede konusen. Ved å montere små foiler på hubkappen, eller *Propeller Boss Cap Fins (PBCF)*, ønsket man å redusere rotasjonen i propellens hubvortex. Ved å montere disse foilene relativt i forhold til propellerblads utstrøm, med en angrepsvinkel og utforming som gir negativt skyv

ønsket man å redusere rotasjonspotensialet i strømmingen etter selve propellen. Dette måtte åpenbart redusere propellens totale skyv, men også redusere dreiemotstanden da det tapte skyvet gir resultant dreiemoment tilført akselen med dreieretningen. Målet, å totalt sett øke virkningsgraden og hindre fremvekst av swirl core. Utviklingen pågår fortsatt og kommersielle løsninger finnes til containerskip, eksempelvis Hi-Fin® fra Mitsui O.S.K. Japan, som reklamerer med 2 - 4 % økt virkningsgrad for propellanlegget. (Lim, 2014, s 1)

### 2.5.3 Diffusorkappe

Fra tilgjengelige bilder av ubåtpropeller, som Figur 10, ser man resultatet av en annen filosofi. En diffusorkappe vil teoretisk sett redusere utgangshastigheten ved å øke utgangsarealet for vann strømmingen. Samtidig som man sprer hvert propellerblads rotvortex og hindre dem i å samles til en kraftig hubvortex (Lim, 2014, s 204). Denne filosofien legger til grunn at man godtar en økt dragflate i akterkant for å unngå fremvekst av swirl core. En slik løsning øker også overflatearealet av kappen og derfor øke dreiemomentet.



Figur 12 Eksempel på diffusorkappe (Eksempel funnet på: <http://i.imgur.com/9tVNSnQ.jpg>)

### 2.5.4 Gjennomstrømnings løsning

Enkelte bilder fra moderne ubåt-propeller og pumpejet løsninger ser ut til å ha et hult utløp i hubkappen. Dette kan være en form for gjennomstrømningsløsning. Om man tar inn vann i forkant av propellen lar det strømme gjennom en kanal som penetrerer propulsorens hub, kan man teoretisk sett eliminere undertrykkfeltet som ville oppstått ved en brå ende. Samtidig vil





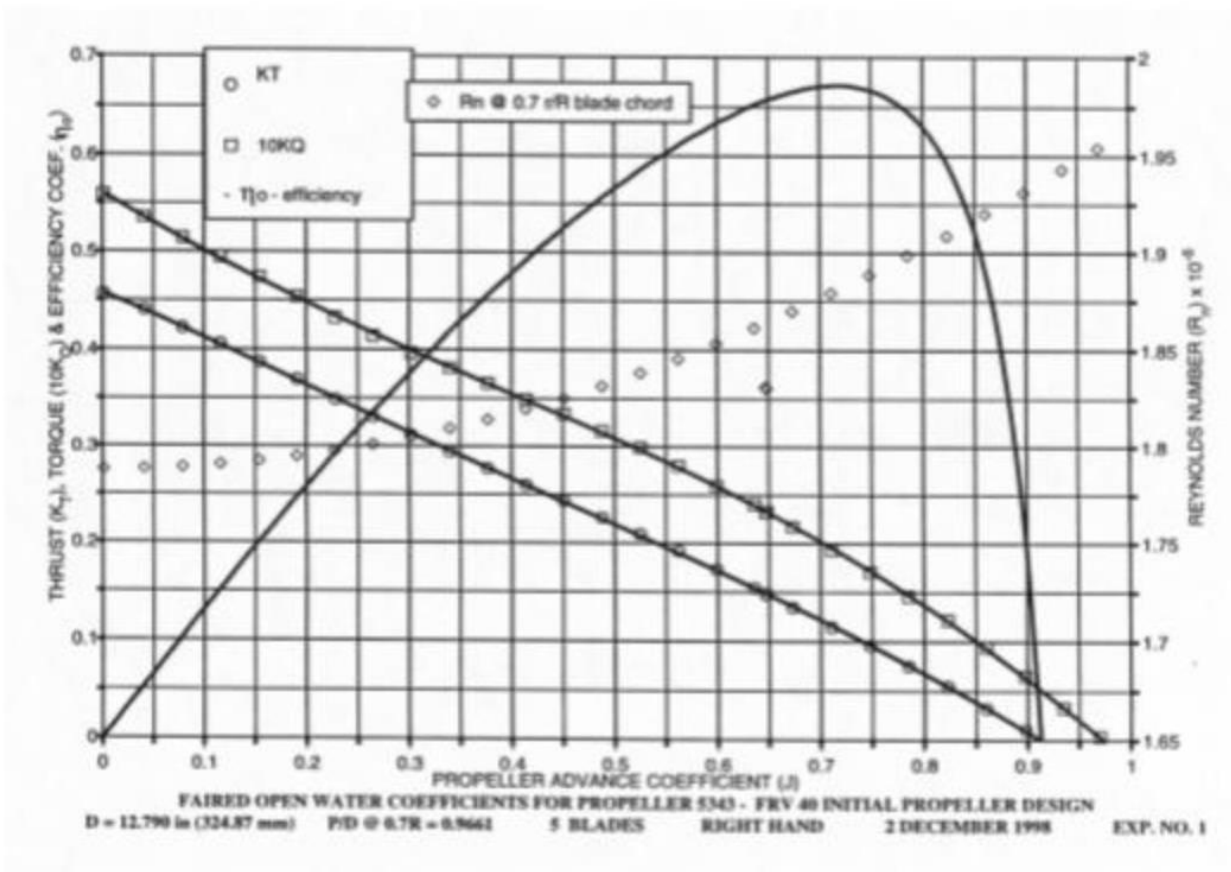


Fig. 10. Open water characteristics curves for design propeller model 5343

Figur 14 Propellkurve for NOAA modell 5343 (Hotaling, 2001, s 12)

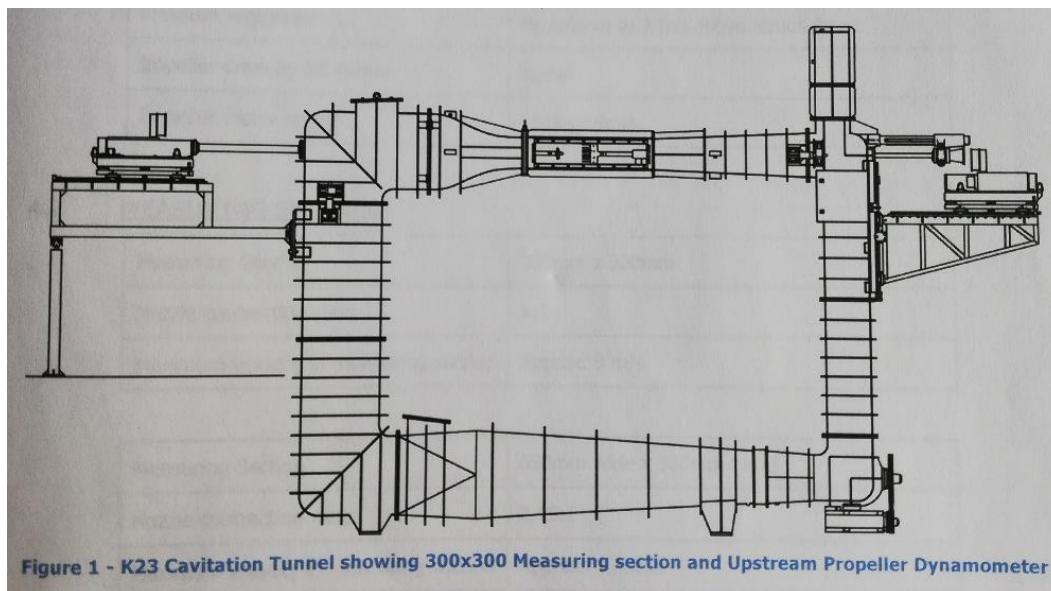
Testpropellen er en modifisert modellutgave av dette propelldesignet. For å ha vribare blad ble hubben i modellskala økt fra 0,325 R til 0,35 R, dermed reduseres det rapporterte bladarealsforholdet (D.A.R) fra 0,600 til 0,583. Ellers er testpropellen lik i utforming.

Tabell 3 Spesifikasjoner for testpropellen

Propell data	Symbol		Modell
Diameter	D	(m)	0.200
Pitch ved 0.7R	P/D <sub>0,7R</sub>	(m)	0.967
Antall blader	Z	(m)	5
D.A.R. (Utviklet bladarealsforhold)	A <sub>D</sub> /A <sub>0</sub>	(m)	0,583
Korde ved 0.7R	c <sub>0,7R</sub>	(m)	0.0590
Maksimal tykkelse av bladseksjon ved 0.7R	t	(m)	0.00302
Rotasjonsretning (Ved topp aktenfra)	-	-	Høyre
Hublengde	L	(m)	0,03556

## 2.6.2 Kavitasjonstunellen

Skolens kavitasjonstunell av typen: K23 levert av *Cussons Technology Ltd.* En medium størrelse kavitasjonstunell med utskiftbar testseksjon. Figur 15 viser en prinsippkisse av kavitasjonstunellens oppsett. Strømningen beveger seg med klokken.



**Figur 15 Prinsippkisse K23 kavitasjonstunell**

**Tabell 4 Tunellspesifikasjoner under tester**

Måleseksjon	426 mm x 426 mm
Dysekontraksjon	3:1
Maksimal vannhastighet ( $V_A$ )	4,64 m/s
Undertrykkskapasitet	$P_{abs} \approx 30$ kPa
Impeller effekt	15 kW
Propelleffekt	9,2 kW
Propell turtall	0 – 50 rps
Trustsensorrekkevidde	- 600 – 600 N $\pm$ 0,1 – 0,5 % av fullskala
Dreiemomentsensorrekkevidde	- 30 – 30 Nm $\pm$ 0,1 – 0,5 % av fullskala

(Cussons, 2013, s 8 – 38)

Erfaringsmessig bemerkes det at propellakselen vibrerer mellom 17 og 25 rps ved reverserte propelltester. Videre er vakuumpkapasiteten noe mer begrenset ved høye vannhastigheter, en sannsynlig konsekvens av lekkasjer på anlegget.

## 2.7 Forsøksdesign

Som grunnlag for å sammenligne effekten av forskjellige hubkappemodeller er det nødvendig å etablere et egnet forsøksdesign. En prosedyre for gjennomføring av tunelltesten for hver enkelt modell. Dette forsøksdesignet må innfri grunnleggende krav:

- Det må gi relevante resultater
- Være definert så presist at resultatene fra to separate tester i henhold til prosedyren produserer sammenlignbare resultater
- Prosedyren må være så enkel og presis at forsøket er repliserbart
- Den må være definert innenfor fasilitetenes begrensninger
- Og det må være definert for et representativt driftsforhold for propellen.

Det endelige forsøksdesignet er gitt i Vedlegg C.

### 2.7.1 Mål og prinsipp

For å kartlegge propellkurven og kavitatsjonskarakteristikken med de forskjellige kappeløsningene ble forsøket grovt sett tredelt. Først etableres de standardiserende forholdene under «forarbeid», for å gi et felles utgangspunkt for hver gjennomføring. Så kartlegges propellkurven i avtagende steg av J. Dette sammenfaller med de horisontale kavitatsjonstestene. Dette gjøres ved tre forskjellige propellturtaill for å gi tilstrekkelig datagrunnlag. Så gjennomføres vertikale kavitatsjonstester under høyeffektiv drift på de samme tre propellturtaillene. Her gjøres også referansemålinger av propellvirkningsgraden ved et bestemt trykk.

### 2.7.2 Driftskondisjonene

For å sikre at forsøkene representerte forskjellige driftsforhold og kunne gi representative resultater for en fullskala propell, tok jeg utgangspunkt i representative Reynoldstall,  $R_n$ . Respektive  $3 \cdot 10^5$ ,  $1,0 \cdot 10^6$  og  $5 \cdot 10^6$  for å gi et variert grunnlag. Dette ville gitt  $n_1 = 9$  rps,  $n_2 = 24$  rps og  $n_3 = 35$  rps.  $R_n = 3 \cdot 10^5$  tilsvarte tilnærmet 9 rps i modellskala, dette ble  $n_1$ . Av hensyn til vibrasjonsområdet til drivakselen, mellom 17 og 25 rps, ble neste nivå justert.  $R_n = 1 \cdot 10^6$  tilsvarte med 24 rps. For å ha margin ned til vibrasjonsområdet ble  $n_2$  løftet til 29 rps, som re-

spektivt gir  $R_n \approx 3,5 \cdot 10^6$ . Implisitt var det naturlig å løft også  $n_3$ , slik at  $n_2$  og  $n_3$  ikke representerer for like forhold. Av hensyn til tunellens maksimale vannhastighet ble  $n_3$  satt til 35 rps som tilsvarer  $R_n \approx 5 \cdot 10^6$ . En heving av  $n_3$  ville redusert maksimalt fremgangstall ved  $n_3$  tester, forbi  $J = 0,66$ .

$n_2$  og  $n_3$  målingene er begge innenfor ITTCs anbefalte området av  $R_n$ , se 2.3.1 Skaleringseffekt, og kan regnes som representative for en fullskala modell.  $n_1$  er lav og kun innenfor Lims krav for representative kondisjoner (Lim, 2014, s 14). Likevel benyttes den for å vise en eventuell effekt de forskjellige løsningene har på propellens ytelse ved lavere Reynoldstall.

For referanser for propellvirkningsgraden uavhengig av variasjoner i absolutt trykk ble disse referansemålingene gjennomført ved 99,8 kPa ved måle punktet. Målepunktet er plassert i bunn av testseksjonen, 21,3 cm under senter av propellakselen.

I henhold til leverandørens propellkurve, Figur 13, ble de J-verdiene for de vertikale testene satt til 0,55, 0,7 og 0,8. Da disse representerer tilnærmet  $\eta_{0\text{maks}}$  og et målepunkt på hver side. Dette ble gjort vitende at tunellens maksimale vannhastighet ikke ville tilfredsstillende de to øverste av disse. Dermed ble  $n_3$  begrenset til en vertikalmåling ved maks vannhastighet i tunellen, dette tilsvarer  $J = 0,66$ .

### 2.7.3 Registrering resultatberegning

For å gi resultater som oppnår forsøket's hensikt måtte disse parameterne registreres i hvert målepunkt: thrust, torque, trykk, dyse differansetrykk, turtall på propellen og turtall på impelleren. Den statiske temperaturen og  $O_2$  % blir hentet ut før og etter gjennomføring. Disse parameterne ligger til grunn for å utlede de beregnede parameterne:

- Propellens skyv- og dreiemomentkoeffisient ( $K_T, K_Q$ )
- Propellens fremgangstall ( $J$ )
- Propellvirkningsgraden ( $\eta_0$ )
- Kavitasjonstall ved 0.7R ( $\sigma_{0.7R}$ )
- Reynoldstall ( $R_n$ ) for propellbladet ved 0.7R

#### 2.7.3.1 Kavitasjonsregistrering

I denne studien er det hubkavitasjon og hubvortex som er hovedfokuset. Dermed er det naturlig at kun kavitasjon ved eller i kontakt med hubkappen registreres som observasjoner. Videre skal studien se på forskjellige hubkappedesign som kan gi meget forskjellige kavitasjonsbilder. Derfor skal kavitasjonsobservasjoner ikke diskriminere på bakgrunn av form eller type. Det naturlig

å notere om det er forekomst av tipkavitasjon eller sheetkavitasjon på propellbladene, men dette er ikke tilstrekkelig alene for å notere det som en kavitasjonsobservasjon.

De lokale trykkvariasjonene kan også gi fremvekst av sporadisk kavitasjon innenfor terskelgrensene. Dermed er det nødvendig å definere hva som tilfredsstillende insepjonsgrensen og hva som definerer grensen for kontinuerlig kavitasjon (2017, ITTC, s 7).

*Intermittent kavitasjon: Periodisk forekomst av en eller flere former for kavitasjon med hyppigere intervall enn hvert 10. sekund.*

*Kontinuerlig kavitasjon: Periodisk eller stabil forekomst av en eller annen form for kavitasjon. Periodisk hyppigere enn hvert 3. sekund.*

## **3 Modell design, produksjon og forsøksresultater**

### **3.1 Produksjon og overflatebehandling**

For å gjennomføre en eksperimentell studie av hubkavitasjon og hvordan denne påvirkes av hubkappedesignet, er det nødvendig å produsere slike modeller. Propellen er støpt i en bronselegering og etterbehandlet. En metode for å produsere forskjellige kapper, vil naturligvis være maskinering, i eksempelvis messing. Å dreie eller frese ut de ønskede designene. Med en slik metode vil man oppnå meget lav ruhet i modellens overflate, stor nøyaktighet i modellens fysiske mål og realistisk relativ vekt i forhold til en fullskala kappe. Samtidig vil denne metoden være tidkrevende, relativt kostbar og gjøre produksjonen avhengig av en ekstern produsent. Maskinering vil også være begrensende for design, da det blir meget komplisert å produsere en ikke rund modell.

Alternativt kan man 3D-printe en fysisk modell på bakgrunn av et virtuelt design. En slik produksjonsmetode vil gi høyere overflateruhet, lavere nøyaktighet i modellens fysiske mål og ha lite realistisk vekt. Derimot vil den muliggjøre ekstrem design fleksibilitet og hurtig produksjon. En slik produksjon vil også være kostnadsbesparende, gitt det digitale modelleringsverktøyet og en 3D-printer er tilgjengelig. Selve materialet er rimelig.

Av hensyn til designfleksibiliteten og tilgjengelig tid til oppgaven blir sistnevnte produksjonsmetode benyttet i denne studien. Med tillegg av noe etterarbeid for å utbedre overflateruheten og nøyaktigheten på de fysiske målene etter 3D-print.

#### **3.1.1 Tilgjengelige fasiliteter for modellproduksjon**

Skolen har to 3D-printere tilgjengelig. Disse printere i forskjellige materialer og har forskjellige egenskaper. Begge er i stand til å produsere modeller innenfor dimensjonene av de planlagte modellene. Begge er også kompatible med «SolidWorks 2017»-programmet som benyttes til virtuell modellering.

##### **3.1.1.1 Markforged Mark Two Professional 3D-Printer**

Denne printer med nylon som grunnmateriale og har mulighet for fiberforsterkning av karbonfiber. Derimot er den låst til å benytte en 0,8mm dyse til nyloninnsprøytning. En slik modell vil noe høyere nøyaktighet i fysiske mål, da fiberforsterkningen hindrer den i å «trekke seg», plastmaterialet krymper under avkjøling, ikke nødvendigvis uniformt. Derimot vil den store dysen gi høy overflateruhet og kreve etterarbeid.

### 3.1.1.2 Ultimaker 3 Extended

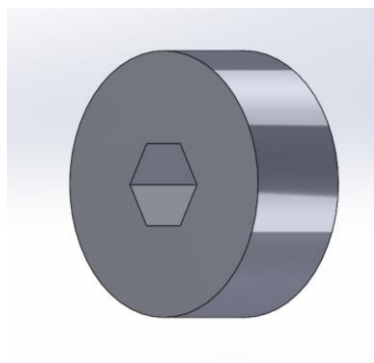
Denne printer med HIPS, High Impact Polystyrene, som grunnmateriale uten mulighet for fiberforsterkning. Derimot har den utskiftbare dyser ned til 0,4 mm dyse til innsprøyting. En slik modell vil ha lavere nøyaktighet i fysiske mål da den kan «trekke seg» noe mer enn nylon alternativet. Derimot vil den lille dysen gi lavere overflateruhet og kreve mindre etterarbeid.

### 3.1.2 Prototypetest for å velge printer og materiale:

For å kunne gi fleksibilitet i valg av form og tilnærmet likhet i overflateruhet, gjennomførtes enkle tester:

3D-modellere en simpel prototype, Figur 16, i SolidWorks 2017, printe denne modellen i de to forskjellige 3D-printerne og studere modellene.

En slik test vil vise forskjeller i faktiske mål og overflateruhet etter print. Vil modellen ha design målene, være større, mindre, eventuelt hvor mye og er den formlik den virtuelle modellen.



**Figur 16 3D-modell til prototyper**

#### 3.1.2.1 Valg av materiale

Den første 3D- printeren, «Markforged Mark Two Professional 3D Printer», printet i nylon og hadde mulighet for fiberforsterkning. Denne hadde ingen fleksibilitet i dysehode eller nøyaktighet på print.

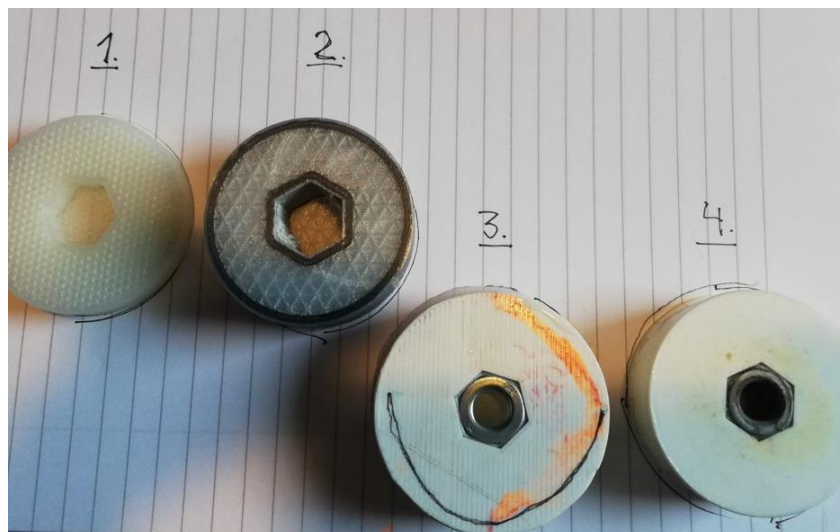
Test 1: 0.8mm dyse uten fiberforsterkning.

Test 2: 0.8mm dyse med fiberforsterkning for å redusere trekkingen av materialet under avkjølingen og redusere sannsynligheten for at den slipper fra baseplaten under print.

Den andre 3D-printeren, «Ultimaker 3 Extended», som printet i HIPS. Denne printerens var fleksibel i dysediameter og finhet, altså tykkelse på lag i tre nivå, på printen.

Test 3: 0.4mm dyse og lav finhet.

## Test 4: 0.4mm dyse og høy finhet



**Figur 17 Prototypene**

1. Print 1, glapp fra baseplaten og ble deformert. Stanset før den var ferdig.
2. Print 2, fiberforsterket for å hindre deformasjon og redusere «trekking» av materialet.
3. Print 3, hurtig print, groveste overflate, med 0,4 mm dyse. Overflateruhet  $\approx 100\mu\text{m}$
4. Print 4, Fin print, fineste overflate, med 0.4 mm dyse. Overflateruhet  $\approx 16\mu\text{m}$

HIPS modellene, 3 og 4, var mest konsistente i overflateruhet i tillegg til at dette materialet trakk seg minst. Ferdig ytterdiameter var 0,2 – 0,6 mm under design målet fra 3D modellen, mot nylon printens 0,5 – 1,1 mm under design mål. Tatt i betraktning at nylon modellene også fliset opp under forsøkt bearbeiding med pussepapir med P150 partikkeltetthet, benyttes HIPS med 0.4mm dyse og høy finhet til modellproduksjonen.

### 3.1.3 Etterarbeid

Med to tilgjengelige varianter av kledningsstoff ble Test 3 testobjekt for valg overflatebehandling. Ved å pusse 0 – 180 grader (oransje markering), «Kledningslim for 3D modeller, *Tamiya Cement*®» 90 – 270 grader (sort markering) og «3D Modell Coating, *Smooth-On XTC-3D*®» fra 270 – 90 grader. Dermed gir det 4 test soner. 0-90 Pusset med Coating, 90 – 180 pusset med modellim, 180-270 upusset med modellim og 270 – 360 upusset med coating.

Sonen fra 0 – 90, pusset med coating gav tilnærmet polert glatt overflate  $\approx 1\mu\text{m}$ . Dette videreføres til modellene med standard prosedyre for å gi så lik overflate som mulig. Denne overflaten ligner også mest på den medførende konen i fremkant av propellbosset.



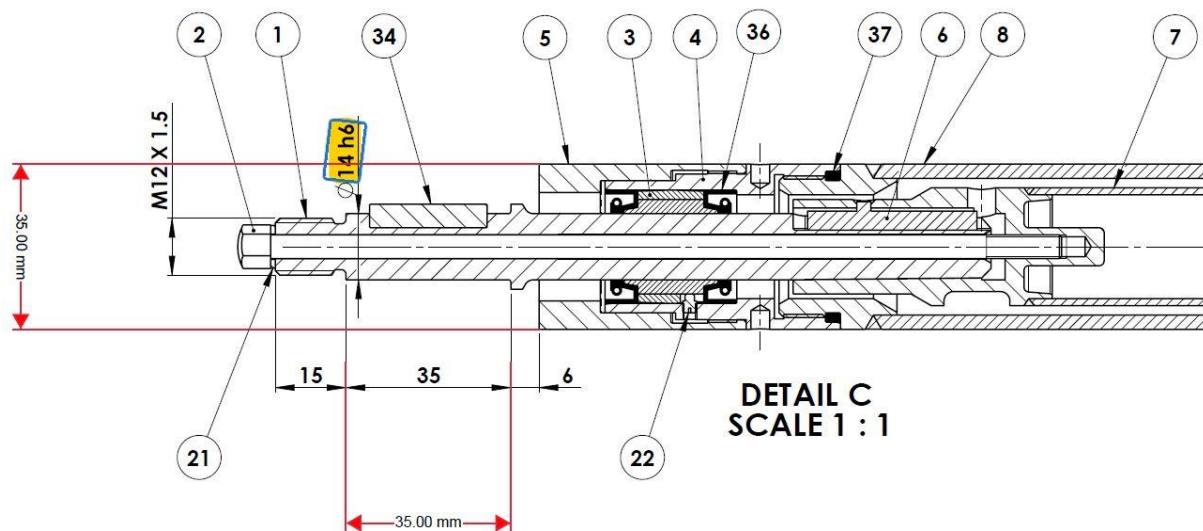
Pussing ble gjennomført med smergelpapir med partikkeltetthet P80, P150 og P320, i denne rekkefølgen. Dette lå til grunn for den endelige «Etterarbeidsprosedyre for HIPS-modeller», Vedlegg D.

### 3.1.3.1 Ruhetsmåling av overflate

Overflateruheten på den enkelte testmodell eller bearbeidingsstadiet vurdert ved sammenligning av testflaten og en ruhetsmal. Ved å skrape overflaten og sammenligning mot en; SURF-CHEK av CEJ, Eskilstuna Sverige, estimert overflateruhetene som er nevnt.

### 3.1.4 Modellmontering på akslet ende:

For montering til drivende aksel i kavitasjonstunellen vil hver modell ha et sekskantet hull til en M12 mutter, 19 mm. HIPS-modellene hadde tilsvarende reduksjon i innermålene som ved ytterdiameter. Materialet var fleksibelt nok til å presse inn en M12 mutter uten at materialet sviktet. En heldig konsekvens var at mutteren ble tilsvarende godt festet i modellene slik at de kan skrues på akselens ende og holde propellen på plass. Den akslede enden, Figur 18, er 24 mm lang ut fra propellbossets akterende, med et gjenget parti på de innerste 15 mm. Dette setter en begrensning på modellenes design; de må være minst 26 mm får å dekke hele akselen og ha rom for en tynn dekkende veg i akterkant.



**Figur 18: Drivakselens ende i kavitasjonstunellen**

### 3.1.5 Stresstest av valgt materialet

Test 4 ble etterbehandlet i tråd med malen i Vedlegg D. Deretter ble den montert i kavitasjonstunellen. Den ble så utsatt for tunellens maksimale undertrykk ved  $n_{prop} = 0$  rps og  $V_A = 0$ , for

å verifisere at luftlommene i modellene ikke ville føre til eksplosjon. 3D-modellene er alle produsert med 50% fyllingsgrad og 2 mm yttervegger, som gir betydelige luftlommer med potensiale for uønsket ekspansjon ved undertrykksprøver. Den ble så kjørt under varierte propellturtall og impeller turtall, verdier av  $V_A$ . Ingen antydning til brist i materialet, dermed vurderes produksjonsmetoden som egnet for forsøkene og videreføres.

### **3.2 Beregning og utvalg av testresultater**

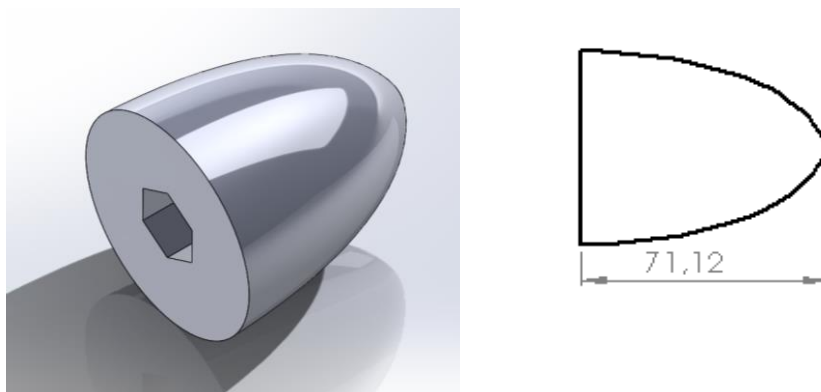
For å gi representative resultater ble vannets tetthet,  $\rho$ , damptrykk,  $P_v$ , og kinematiske viskositet,  $\nu$ , interpolert ut ifra grunnlagstabellen i Vedlegg A. Ved hvert modellforsøk ble vanntemperaturen tunellen hentet ut ved start og stans. De respektive parameterne hentet ut for gjennomsnittstemperaturen.

Under gjennomføringen viste det seg særdeles vanskelig å fremprovosere kavitasjon ved 9 rps. En sannsynlig følge av designintensjonen ved propellen, lavest mulig akustisk signatur, og propellbossets størrelse.  $r/R$  var å regne som stort ved NOAA CSVs originale design og ble økt ytterligere for denne testpropellen (Saunders vol 1, 1956, s 465).

Dette og begrensningen ved 35 rps ved maksimal vannhastighet i tunellen til  $J \approx 0,66$ , er kun kavitasjonsresultatene for 29 rps presentert. Disse ansees som representative da dette tilsvarer  $R_n \approx 3 \cdot 10^6$  (ITTC, 2017, s 8).

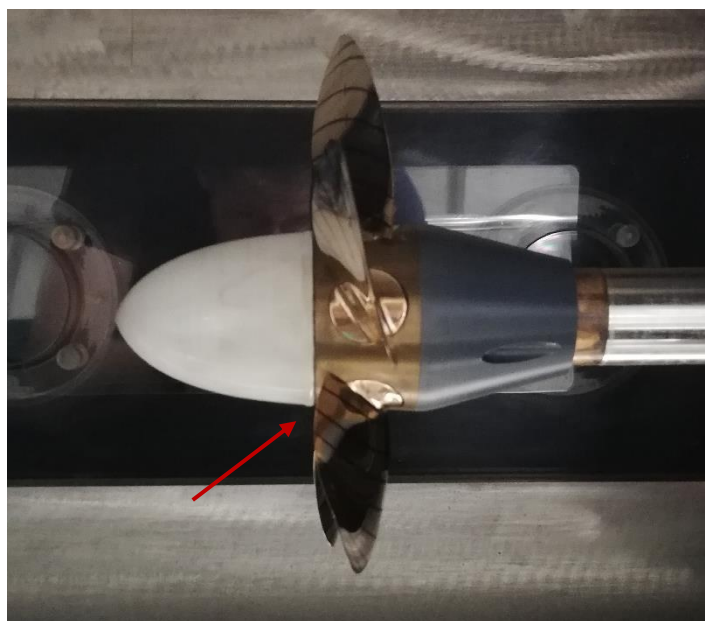
### **3.3 Modell 1 - Konus**

For å kunne sammenligne de forskjellige modelldesignene vil det være naturlig å sammenligne med en felles referansemåling. En strømlinjeformet kappe, eller en konus, vil være mest naturlig som referanse måling i det historiske perspektivet. Det ville vært unaturlig å sammenligne med f.eks. en måling med kun en festemutter i akterkant av propellbosset eller en annen vilkårlig løsning som ikke benyttes i reelle situasjoner.



**Figur 19: 3D-skisse og utsnitt fra tegning av modell 1 (Vedlegg F)**

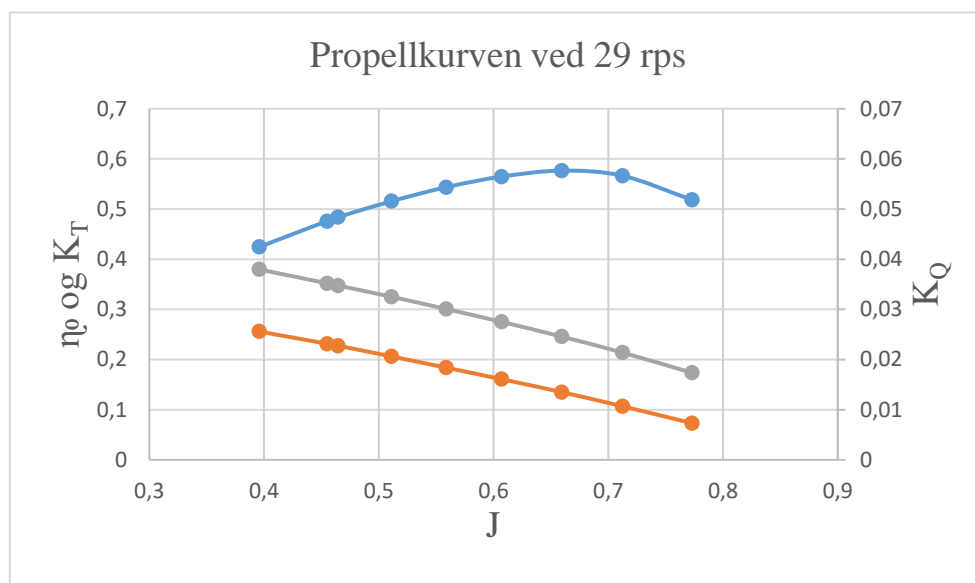
Strømlinjeformen er laget som et kompromiss for å gi minimalt drag i laminær strømning og generere minst mulig dreiemotstand når den roterer. Dette for å la rotasjonen i propellens vake, «roe seg litt» mens akselen avsluttes mykt (Saunders vol 2, 1956, s 744). Den samme filosofien ligger til grunn for rorbulber, i de tilfeller man har rør rett aktenfor propellen. Dette er en annen metode for å redusere hubvortexen effektivt. Modell 1 skal rotere med propellen og konusens overflateareal vil påvirke propellens dreiemoment. Altså desto større overflate; desto større dreiemotstand. Modell 1-designet er derav et kompromiss med en konuslengde lik to ganger lengden av propellerbosset. Konusens utforming er tilgjort slik at overgangen fra det allerede koniske propellerbossets til konusen, ble glattest mulig.



**Figur 20: Modell 1 montert i kavitasjonstunellen**

Leg merke til at «coatingen» gav en utbuling ved overgangen til propellerbosset under tørking. Anvist med rød pil på Figur 20. Dette var ikke tilsiktet. For å unngå at overflateruheten ble påvirket, ble dette ikke utbedret før test. Hvilken påvirkning dette hadde på resultatene er vanskelig å avgjøre, men denne utbulingen er en meget liten i forhold designvariasjonene mellom modellene og blir dermed relativt ubetydelig i det store bildet.

### 3.3.1 Modell 1 resultater

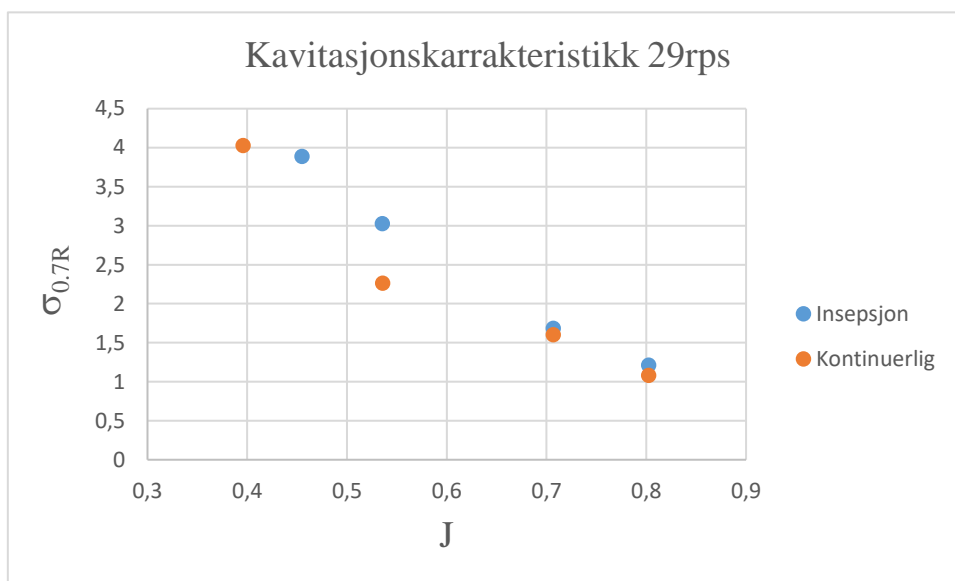


**Figur 21 Referanse og propellkurve med konus**

Som referanse til sammenligning med propellkurven levert av testpropellens produsent er propellkurven, vist i Figur 21, kartlagt eksperimentelt med Modell 1 som hubkappe. Det er verdt å merke at denne samsvarer med propellkurven i form. Hvilken J-verdi som samsvarer med maksimal virkningsgrad, 2.6.1 Testpropellen Figur 14, er forskjøvet til en noe lavere J-verdi. Jevnt er virkningsgradskurven noe lavere enn oppgitt. Dette skyldes mest sannsynlig forskjeller i testkondisjoner og metode. Mest markant forskjell vil naturlig være om produsentens kurver er etablert ved motstrøms kjøring i kavitasjonstunell, som ville ekskludert hubtap. Motsatt av denne studiens oppsett, medstrøms, for nettopp å studere variasjonene i hubtap.

Denne kurven benyttes som referansemåling til sammenligning for de andre modellene. Hver av de fire andre modellene gjør måling av virkningsgrad ved  $J = 0,55, 0,7$  og  $0,8$  ved 29 rps, til sammenligning med denne kurven.

## 3.3.1.1 Kavitasjonskarakteristikk



**Figur 22 Kavitasjonskarakteristikk - Modell 1**

Kavitasjonskarakteristikken, Figur 22, forteller i hovedsak om to forhold. Først Sone 1, her oppstår kavitasjonen relativt tidlig. Den viste insepsjon allerede ved  $J = 0,45$ , som vil gi betydelige begrensninger for en slik propellsammensetning under akselerasjon, da turtallet må økes meget gradvis og i takt med skipets hastighet for å operere kavitasjonsløst. Dernest forteller karakteristikken at en slik modell vil prestere variert i den høyeffektive sonen. På den ene siden vil den være meget ideell egnet for drift ved  $J \approx 0,8$ . Samtidig er den sårbar for variasjoner i fremgangshastighet,  $V_A$ , under drift med konstant turtall.

## 3.3.1.2 Kavitasjonsbildet



**Figur 23 Kavitasjon i Sone 1 – Modell 1**

Modell 1 kaviterte som vist i Figur 23. En etterfølgende, ca. 10 cm etter konusen, stabil swirl core. Dette medfører en betydelig støysignatur og redusert skyv. Samtidig vil en slik kavitasjon

ikke gjøre nevneverdig erosjonsskade på hubkappens overflate, da de ikke er i kontakt. Et kavitasjonsbilde helt i tråd med teorien (Saunders vol 1, 1956, s 251).



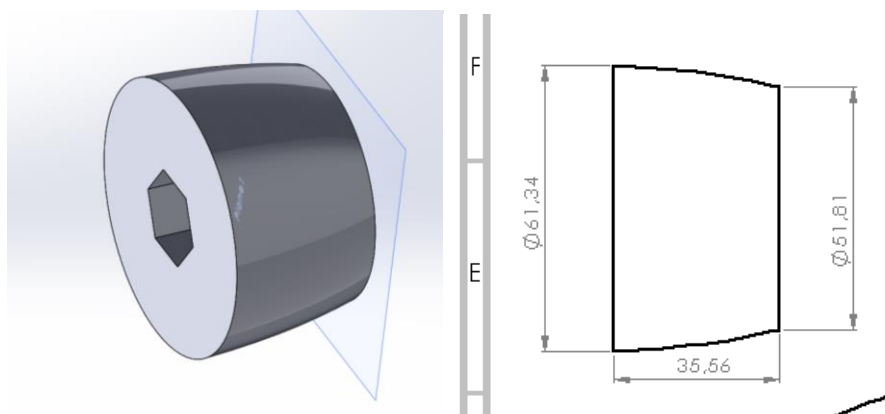
**Figur 24 Kavitasjon i Sone 2 – Modell 1**

Figur 24 viser et stillbilde av kavitasjonen fremprovosert i Sone 2. En stabil swirl core som pulserte inn og ut av kontakt med konusen. I motsetningen til kavitasjonen observert i Sone1, vil denne formen medføre betydelig eroderende slitasje på hubkappens overflate. Slik slitasje fører igjen til økt viskøs motstand over hubkappen og dertil økt dreiemoment.

En slik hubkappeløsning er mest egnet under stabil drift ved lavest mulig last, men tolererer høyt turtall under slike kondisjoner. Dette er i beskrivelse av driftskondisjoner hvor sirkulasjonen er lav og hver rotvortex er tilsvarende svak.

### 3.4 Modell 2 – Konus-cut

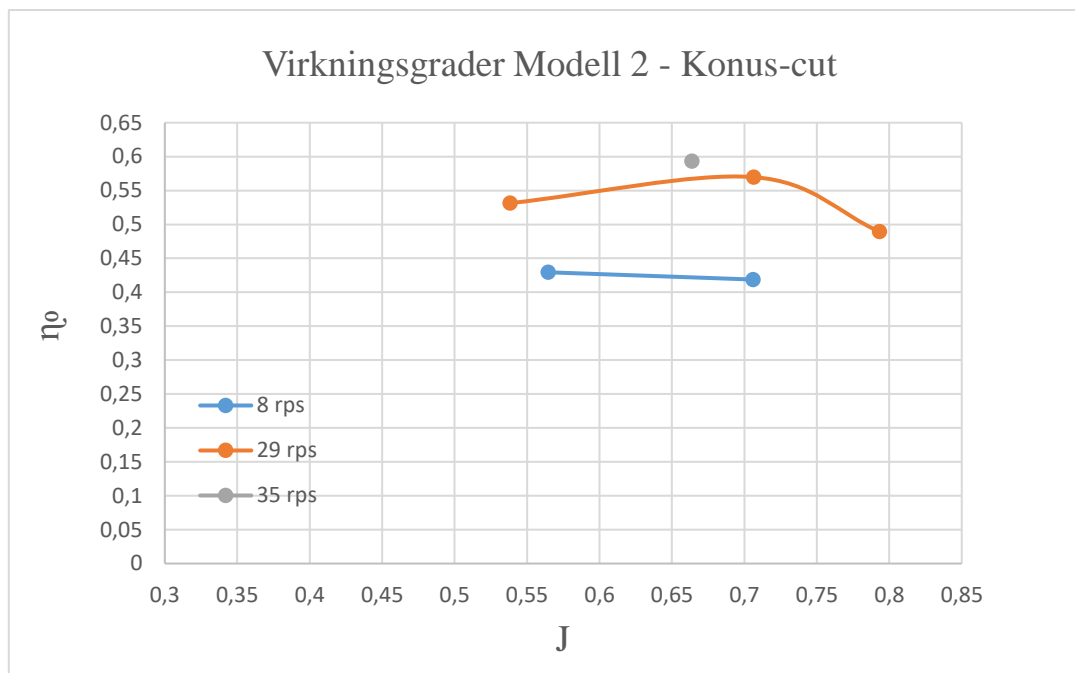
For å få en så realistisk test av effekten ved avkappet konus, ble det naturlig at Modell 2 har Modell 1 som utgangspunkt, med den enkle modifikasjon at den er brått endt etter en hublengde. Dermed er kroppen av samme kurvatur som Modell 1 frem til «kappe punktet».



**Figur 25 3D-skisse og utsnitt fra tegning av modell 2**

Dette med ønske om å vise effekten eksperimentelt. Bekrefte eller avkrefte om en slik modifikasjon faktisk er tilstrekkelig til å eliminere swirl coren som oppstod på konusen under kavitasjonstestene.

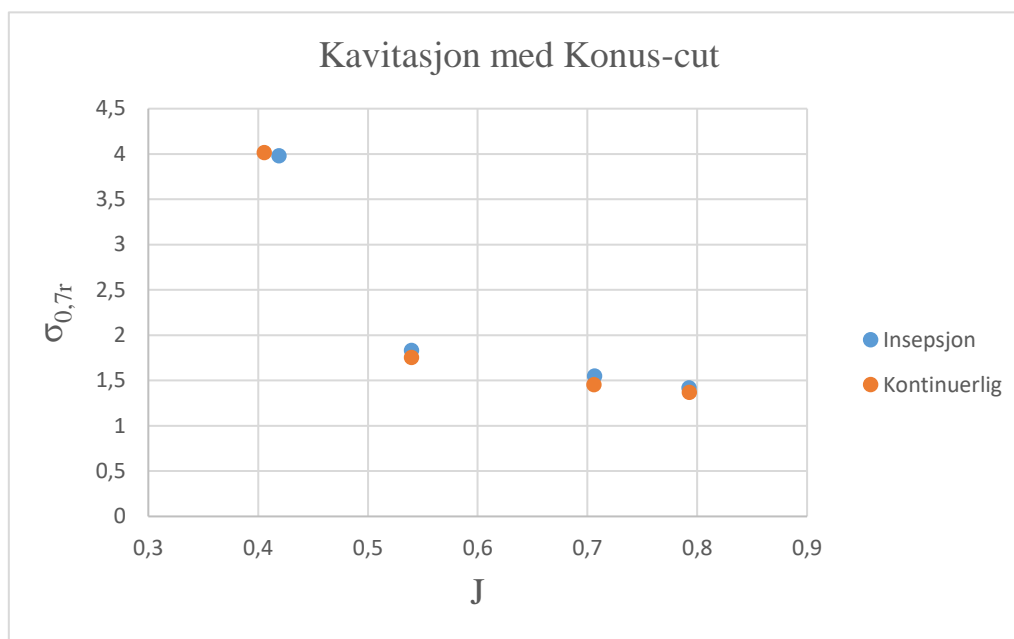
### 3.4.1 Modell 2 resultater



**Figur 26 Virkningsgrad - Modell 2**

Utenfor kavitasjonsområdet oppfører Modell 2 seg tilnærmet likt hva Modell 1 gjorde. Virkningsgradskurven er tilsynelatende formlik i det høyeffektive området ved 29 rps. Den er likevel marginalt bedre enn referansen, med  $\eta_0 = 0,569$  ved  $J \approx 0,7$ , mot referansens  $\eta_0 = 0,566$  ved  $J \approx 0,7$ . Dette kan skyldes det reduserte overflatearealet og den reduserte dreiemotstanden, noe som sammenfaller med teorien. Samtidig er forbedringen ikke større enn et forventet usikkerhetsintervall som diskutert i Vedlegg D.

## 3.4.1.1 Kavitasjonskarakteristikk

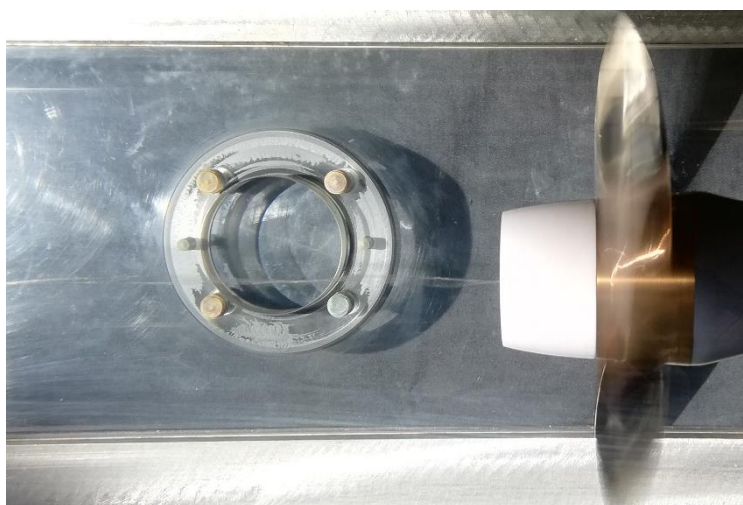
**Figur 27 Kavitasjonskarakteristikk - Modell 2**

Kavitasjonskarakteristikken viser til to konsekvenser fra referanse karakteristikken for Modell 1. Modell 2 presterer jevnere i det høyeffektive området,  $J$  mellom 0,5 og 0,8 (Sone 2), enn referansen. Dette betyr at den kaviterer ved lavere kavitasjonstall enn referansen i målingene ved  $J \approx 0,55$  og 0,7, men ved høyere kavitasjonstall ved  $J \approx 0,8$ . Dette er tross et «dårligere resultat» ved  $J \approx 0,8$ , totalt sett en drastisk forbedring. Skip arbeider under dynamiske forhold og fremgangstallet vil i et reelt tilfelle variere under operasjon. Dermed er Modell 2 å regne som mindre utsatt for kavitasjon under slik drift.

Videre tolererer Modell 2 lavere fremgangshastighet og høyere belastning, før kavitasjon oppstår i Sone 1. Dette er også å betrakte som en forbedring. Merk også at det er liten forskjell fra kondisjonene i Sone 2 som gir intermittent kavitasjon til kontinuerlig kavitasjon er etablert.



### 3.4.1.2 Kavitasjonsbildet



**Figur 28 Kavitasjon i Sone 1 - Modell 2**

Under horisontalttest kaviterte Modell 2 som vist på Figur 28. Stabil swirl core i kontakt ved hubkappens senter. Under slike forhold var dragflaten ikke tilstrekkelig for å hindre fremvekst av swirl core, i strid med teorien (Sauders vol 2, 1956, s 601). Swirl coreen som oppsto er svakere enn tilfellet ved Modell 1, men gir fortsatt en betydelig støysignatur og redusert skyv.



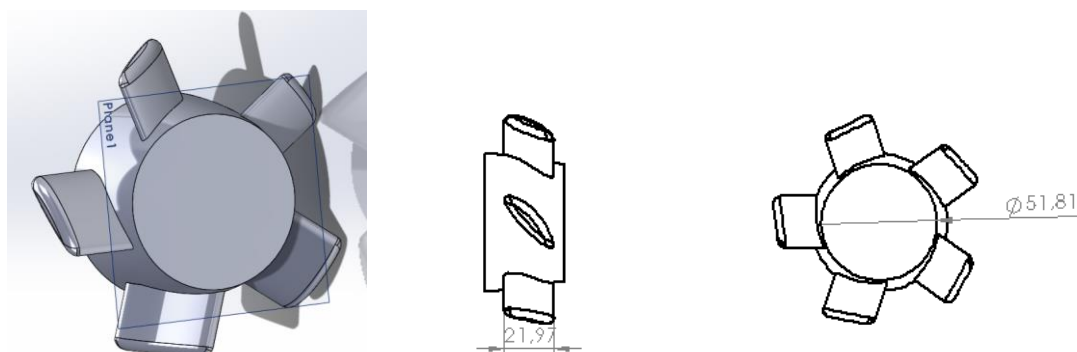
**Figur 29 Kavitasjon i Sone 2 - Modell 2**

Under vertikaltestene kaviterte Modell 2 som vist i Figur 29. Et godt eksempel på dragkavitasjon, en konisk boblesky etterfølgende den brå overgangen, i tråd med forventningene etter teorien. En slik hubkavitasjon vil i hovedsak erodere på dragflaten og dermed ikke påvirke den senere ytelsen i noen betydelig grad. Denne formen for kavitasjon genererer også en støysignatur, men på et lavere signalnivå enn en swirl core.

En slik modell vil være mest egnet for drift i nettopp det høyeffektive området og vil tillate relativt høye turtall samt variasjoner i fremgangstill.

### 3.5 Modell 3 – PBCF

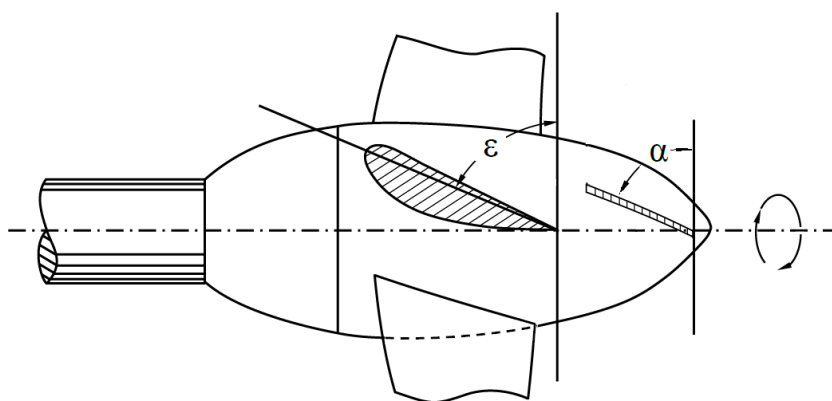
Med utgangspunkt i Modell 2 var hensikten å vise effekten av en «vinget løsning». I stegene mellom Modell 1, Modell 2 og Modell 3 er det bevisst gjort færrest mulig endringer. Intensjonen er å synliggjøre effekten av de enkelte endringene som er gjennomført. Av dette hensyn er kroppen til PBCF-løsningen identisk til modell 2. Slik at den eneste endringen fra modell 2 til modell 3 er foilene.



**Figur 30 3D-modell og utsnitt fra tegning av Modell 3**

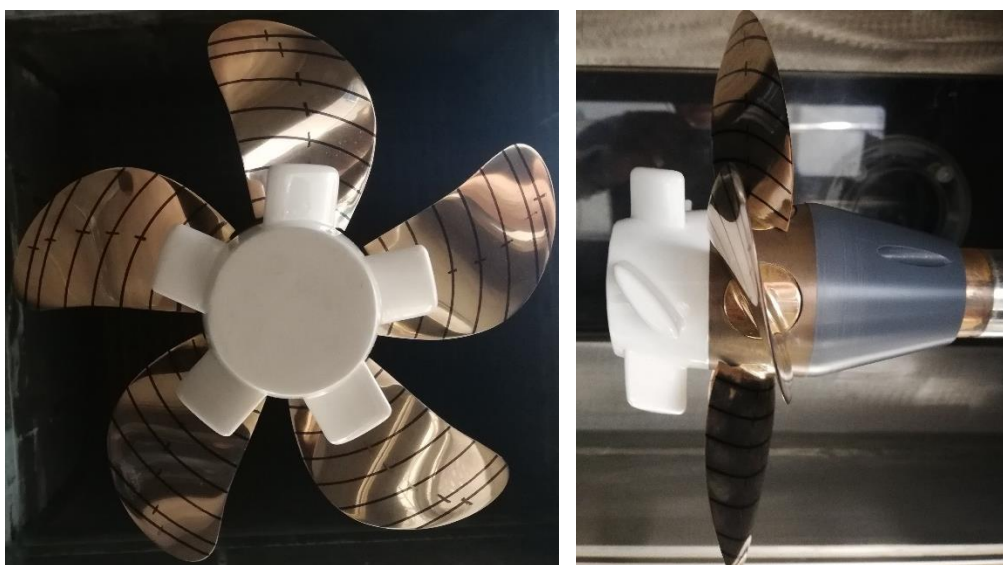
Foilene skal, etter teorien, bremse rotasjonen i vannet som strømmer ut av selve propellen. Dette med et bevisst forhold til økt dreiemoment. Hver foil er utformet som en vinge med løft akterover, for propellens akse, altså motsatt av selve propellbladene. De ble utformet med et tverrsnitt som ekstruderes fra senter og avrundes ved enden. Dette for å gjøre 3D-modelleringen enklest mulig. De ble også konstruert for å være «tykke», relativt til utgangspunktet i parameterstudien fra 2014 (Lim, 2014, s 199). Dette er av materielle og produksjonstekniske hensyn. I den nevnte studien ble modellene maskinert i metall, disse modellene blir printet i et robust plastmateriale. Av frykt for at foilene skulle løsne under påkjenningen av kavitasjonstestene, økte jeg tykkelsen på hver enkelt foil, noe som vil øke dreiemomentet.

Hubkappen roterer med propellen. Forenklet antas det at utgangsretningen til veskestrømmen passerer ut fra hvert propellerblad med samme vinkel som selve propellerbladet, vil gi 44 grader vinkel av drivakselen ved bladroten, eller  $\varepsilon = 46$  grader ihht Figur 31. Samtidig ønsker man at hver foil på hubkappen gir mest mulig effekt for en minimal kostnad, altså arbeide med optimal virkningsgrad. Dermed ble foilenes dreining, ihht figuren  $\alpha = 52$  grader. Derav en angrepsvinkel mot kappefoilene på 6 grader. Som i teorien vil redusere rotasjonen i hubvortexen (Lim, 2014, 196).



**Figur 31** Prinsippskisse av propell med finnet kappe (Lim, 2014, s 192)

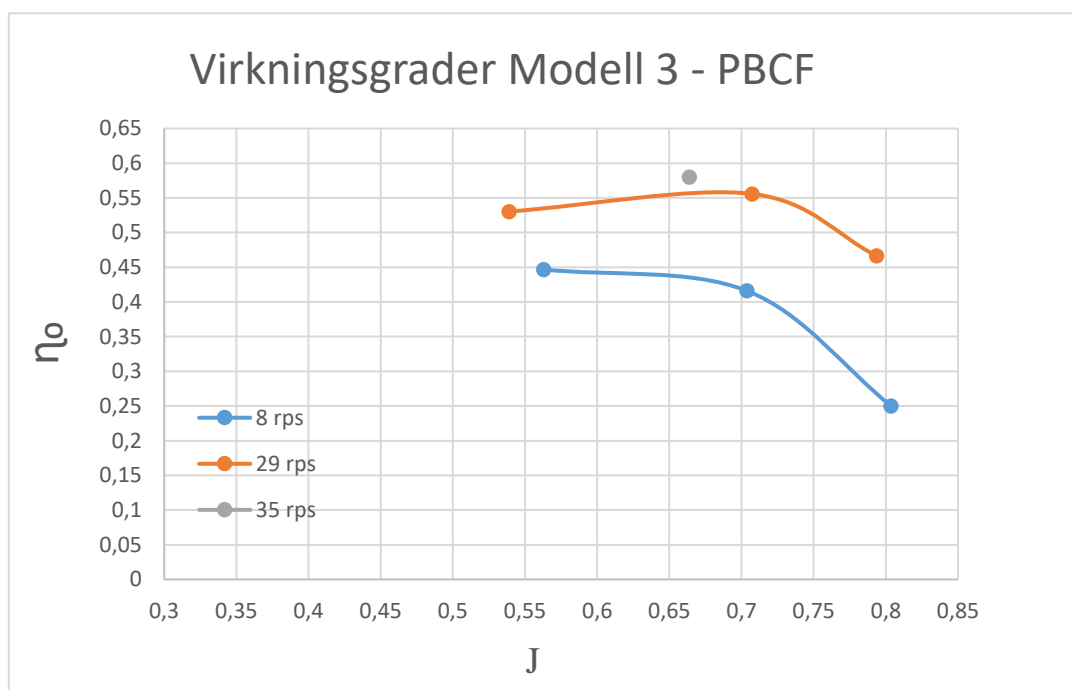
I realiteten vil vannet ha noe slipp i forhold til propellerbladene, som gir en skarpere angrepsvinkel mot hubkappe foilene. Gitt denne angrepsvinkelen ikke overskrider 21 grader, er det uproblematisk. 21 grader og mer kan føre til avløsning, sheetkavitasjon på hubkappefoilene,



**Figur 32** Modell 3 installert i kavitasjonstunellen

Gjentatte forsøk å finne konkrete data om den relative plasseringen av PBCF-hubkappen i forhold til propeller bladene mislyktes. For enkelhets skyld er Modell 3 installert slik at foilene står stilt overens med propellbladene, etter sammenligning med bilder av lignende løsninger. Som vist i Figur 32.

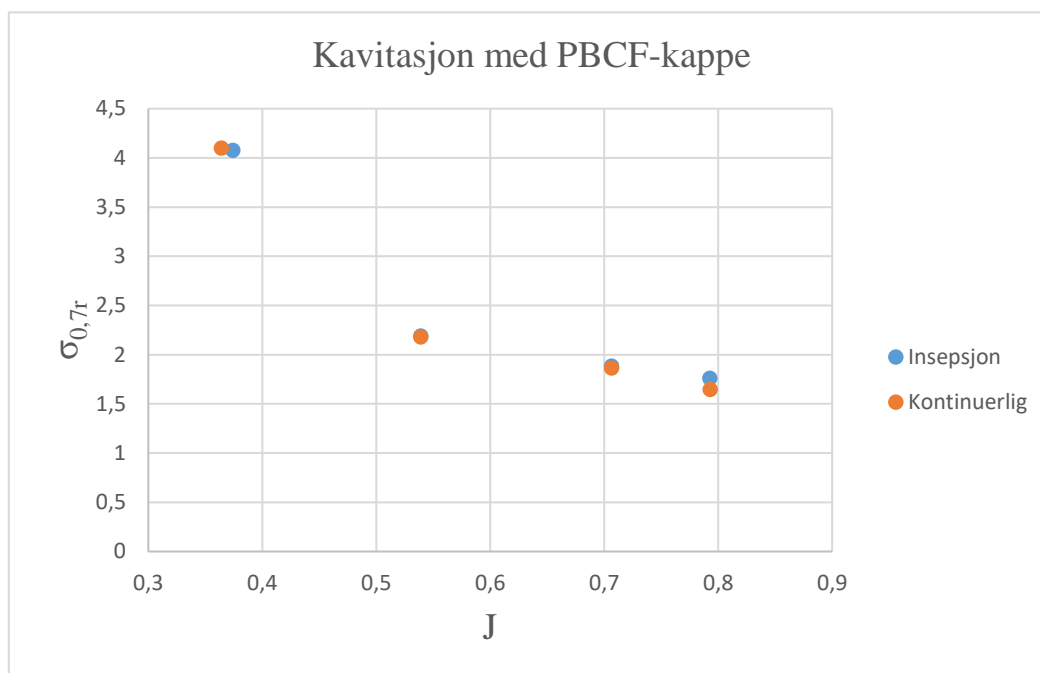
### 3.5.1 Modell 3 resultater



**Figur 33 Virkningsgrad - Modell 3**

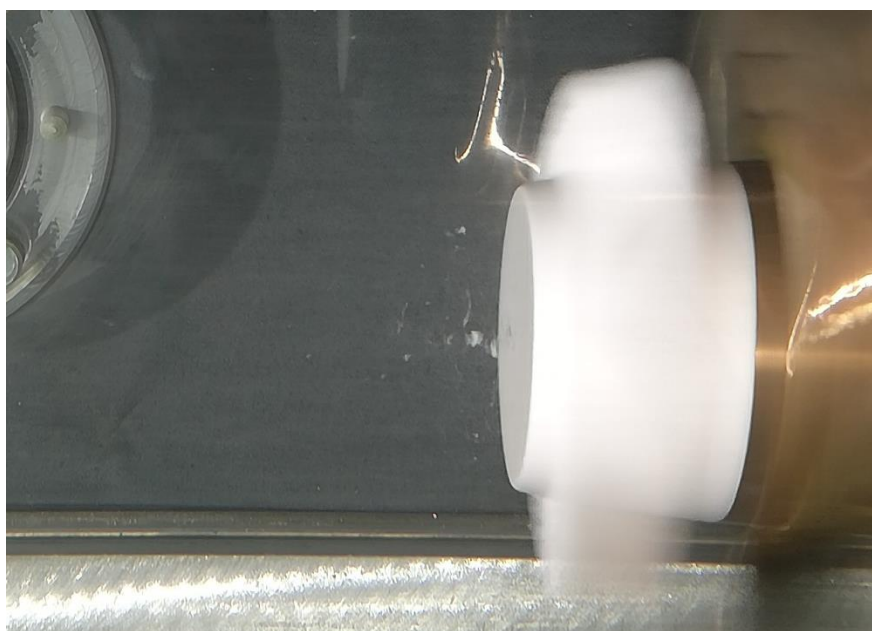
Som Figur 33 viser er virkningsgradene jevnt noe lavere, sammenlignet med Modell 3. Motsatt av den rapporterte effekten slike løsninger har i kommersiell sammenheng, som rapporterer 2 – 4 % økning i virkningsgraden. Dette kan være en konsekvens av foildesignet og dette designets spesifikke parametere i forhold til denne testpropellen. Videre er propellkurven er forskjøvet i retning noe lavere fremgangstall. Det er en reel sannsynlighet for at maksimal virkningsgrad er redusert med ca 1% (fra Modell 2 til Modell 3 både for 29 rps ved  $J \approx 0,7$  og for 35 rps ved  $J = 0,66$ ). Den kan være forskjøvet til området nærmere  $J = 0,6$ . Ytterligere data må eventuelt innsamles med lavere målingsintervall for å avgjøre om dette er tilfelle.

## 3.5.1.1 Kavitasjonskarakteristikk

**Figur 34 Kavitasjonskarakteristikk - Modell 3**

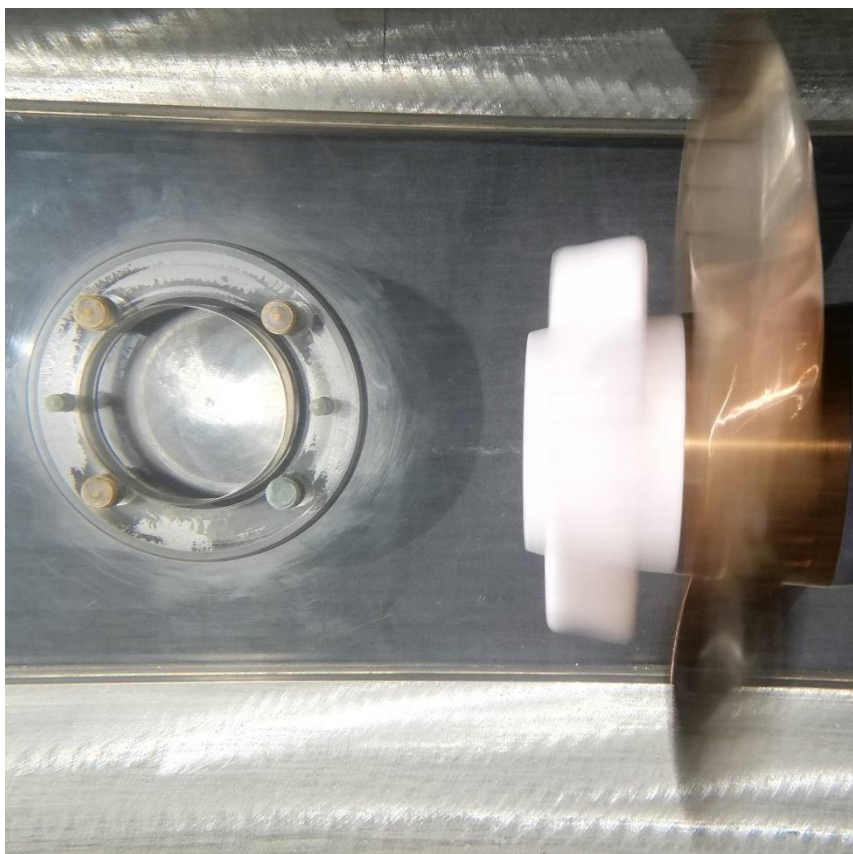
Kavitasjonskarakteristikken er i utgangspunktet ganske lik som for Modell 2. Høy lasttoleranse ved horisontalttest, relativt til Modell 1 og relativt jevn adferd i Sone 2. Det er og distinkte forskjeller. På den ene siden er lasttoleransen utbedret ytterligere, fra insepsjon ved  $J = 0,42$  for Modell 2, til  $J = 0,37$  for Modell 3. På den andre siden forekommer kavitasjon tidligere i Sone 2. Tillegget av foilene har en tydelig innvirkning på karakteristikken.

### 3.5.1.2 Kavitasjonsbildet



**Figur 35 Kavitasjon i Sone 1 - Modell 3**

Under horisontaltester kaviterte Modell 3 som vist i Figur 35, en boblesky. Tilsynelatende oppnås ønsket effekt med tillegget av foilene. Til sammenligning med Modell 2 i Sone 1, er insepsjonen utsatt og swirl core forekommer ikke. Noe som åpner for økt belastning ved lave fremgangstall og reduserer støysignaturen betraktelig i de tilfeller kavitasjon forekommer.



**Figur 36 Kavitasjon i Sone 2 - Modell 3**

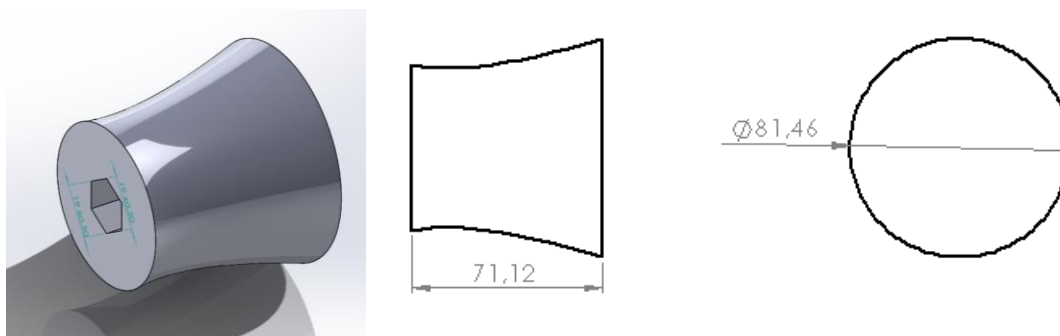
Ved vertikalttestene for Sone 2 ble kavitasjonsbildet som vist i Figur 36. Boblesky fra den brå overgangens drag, betraktelig mindre bobler en de som ble observert i Sone 1, med en vag tendens til vortex form i senter. Riktignok kun en vortex av små bobler, ikke en swirl core. Et tegn på at det fremdeles er viss rotasjon i strømningsfeltets senter. På den annen side kan dette være resultatet av rotasjon i det isolerte volumet bak dragflaten. Det er verdt å bemerke at denne kavitasjonen hadde tidligere fremvekst for Modell 3 enn de tilsvarende målingene for Modell 2.

I sum kan det betraktes som en intensjonen er delvis oppnådd. Swirl coreen som forekom i Sone 1 for Modell 2 er eliminert, men samtidig er Modell 3 mer sårbar i det høyeffektive området og vil derfor ikke kunne kjøres under like høye turtall. En slik modell egner seg dermed bedre enn Modell 2 i Sone 1 drift og bedre enn Modell 1 i Sone 2 drift med variert operasjon.

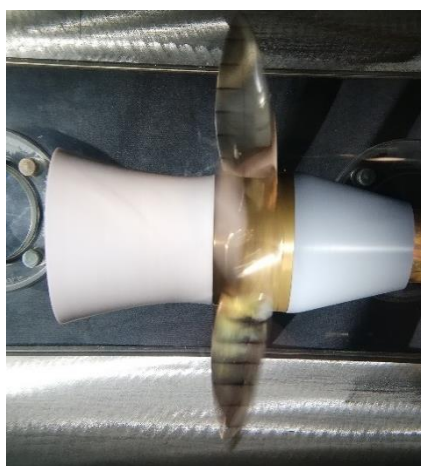
### 3.6 Modell 4 – Diffusor

Neste filosofi er spredning. Modell 4 er en diffusorløsning, navngitt «Trompet» etter utseende. Ved å spre hver av propellens rotvortexer og samtidig senke utgangshastigheten fra hubkappen unngå swirl core. Kostnaden vil være den store dragflaten i bakkant og det store overflatearealet til en slik løsning. To forhold som trekker propellsammenstillingens dreiemoment opp og skyv ned.

Med bakgrunn i Figur 12 fra det teoretiske grunnlaget og fluiddynamiske antagelser har Modell 4 en krommet kurvaturen. For å gi mykest mulig overgang fra propellerbossets kone til diffusoren. Med utgangspunkt i parameterstudien fra 2014 (Lim, 2014, s 198), der de testet forskjellige stigningsgrader, henholdsvis 6, 8 og 12 grader. Modell 4 er designet med 8 grader gjennomsnittlig stigning og to hub-lengders lengde.



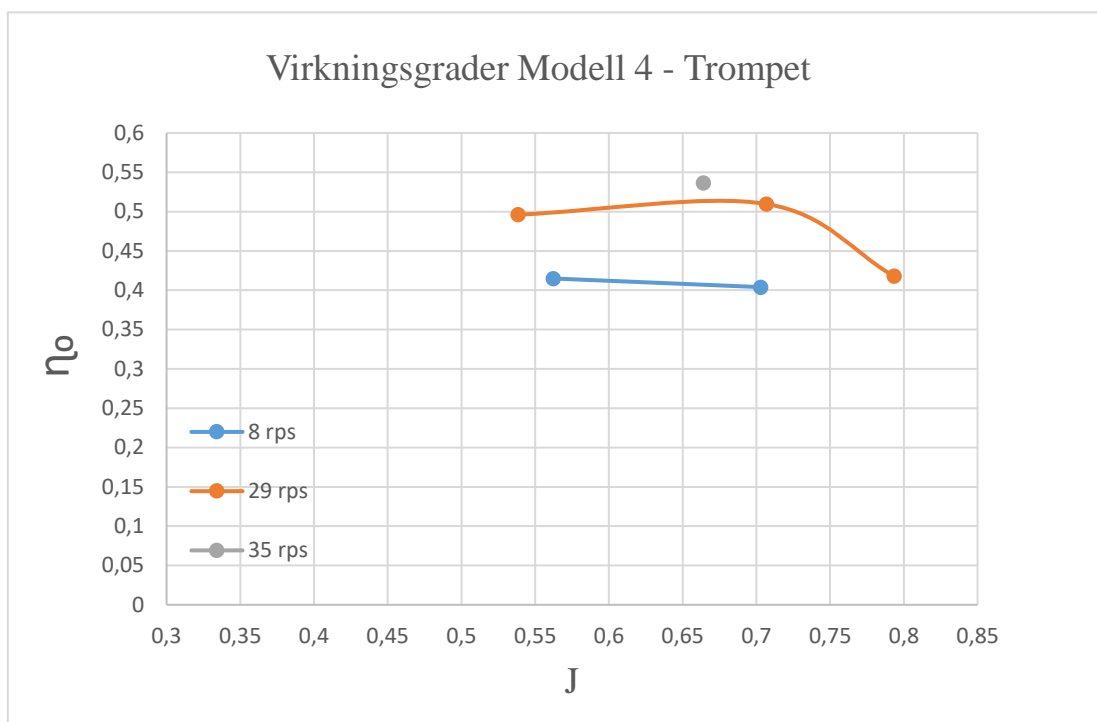
Figur 37 3D-modell og utsnitt fra tegning av Modell 4



Figur 38 Modell 4 installert i kavitasjonstunellen



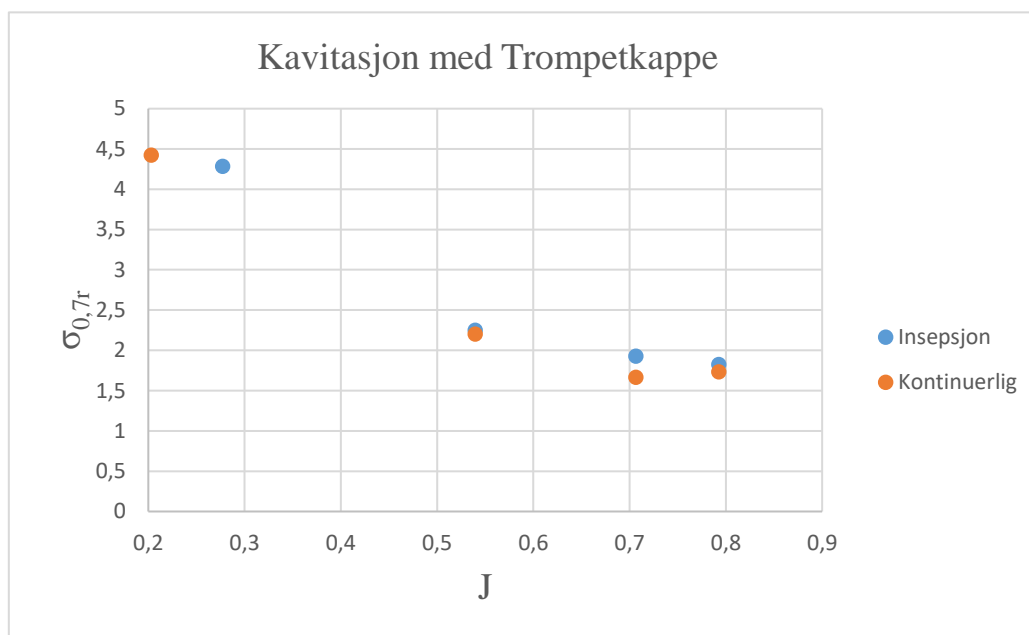
### 3.6.1 Diffusor resultater:



**Figur 39 Virkningsgrad – Modell 4**

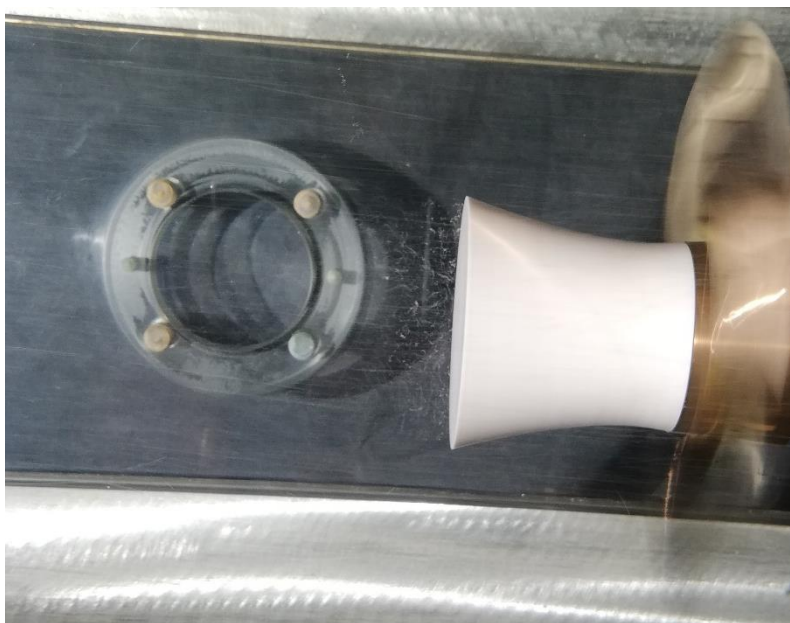
Virkningsgraden av propellsammensetningen med Modell 4, vist i Figur 39, er betydelig lavere enn referansemålingen, 6 % redusert ved 29 rps og  $J \approx 0,7$ . Som beskrevet under design var dette en forventet konsekvens av dragflaten og overflatearealet. Noe som samsvarer med at virkningsgradene er kraftigere redusert ved 29 og 35 rps enn ved 8 rps.

## 3.6.1.1 Kavitasjonskarakteristikk

**Figur 40 Kavitasjonskarakteristikk – Modell 4**

Kavitasjonskarakteristikken for Model 4, vist i Figur 40, er både i Sone 1 og 2 som forventet. Lasttoleransen i Sone 1 er økt, riktignok mer enn forventet. Fra referansen hvor det ble observert insepsjon ved  $J = 0,45$ , er Modell 4 med insepsjon observert ved  $J = 0,28$ , en betydelig forbedring. Den økte dragflaten vil naturlig gi en større undertrykkssone enn eksempelvis Modell 2 og dermed fremskynde fremveksten av dragkavitasjon. I karakteristikken er denne effekten tilsynelatende jevn i Sone 2 sammenlignet med Modell 2.

### 3.6.1.2 Kavitasjonsbildet



**Figur 41 Kavitasjon i Sone 1 – Modell 4**

Figur 41 viser den forventede dragkavitasjonen konisk ut fra dragflaten under Sone 1 drift. Det er tydelig at noe av vannvolumet bak den brå overgangen sirkulerer uten et tydelig mønster. Figur 41 viser kontinuerlig kavitasjon obserasjonert ved  $J = 0,2$ .



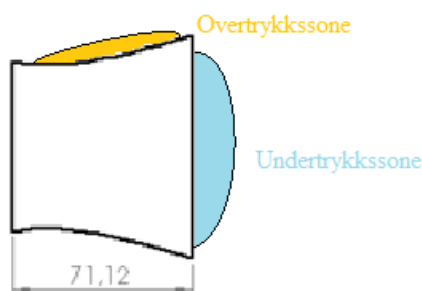
**Figur 42 Kavitasjon i sone 2 – Modell 4**

I likhet med kavitasjonsbildet for Sone 1, viser Figur 42 den forventede dragkavitasjonen. Som ved observasjonen av Modell 3 er det en vortex i bobleskyen av dragkavitasjon. Vortexen er et

mønster i sirkulasjonen i undertrykkssonen. Mest sannsynlig drevet av viskøs friksjon mot dragflaten. En slik modell bør være meget egnet for Sone 1 drift. Da Modell 4 er betydelig mer lasttolerant enn referansemålingen. Samtidig vil modellen være uegnet for drift i Sone 2.

### 3.7 Modell 5 - Diffusor med gjennomstrømning

For modell 4, er antagelsen at dragflaten i bakkant er den største kostnaden. Med dette og gjennomstrømningsteorien til grunn er Modell 5 et forsøk på å utbedre Modell 4. Et design som fungerer som diffusor, for å redusere utgangshastigheten, spre rotvortexene og samtidig ha strømningsutløp på dragflaten. Rent logisk bør dette gi bedre resultater enn en ren diffusor. Testpropellen har ingen andre gjennomgående hull enn gjennomføring for drivende aksel. Derfor blir det vanskelig å ha et innløp i forkant av selve propellen, som gir utløp i hubkappen.



Figur 43 Skisse av modell 4

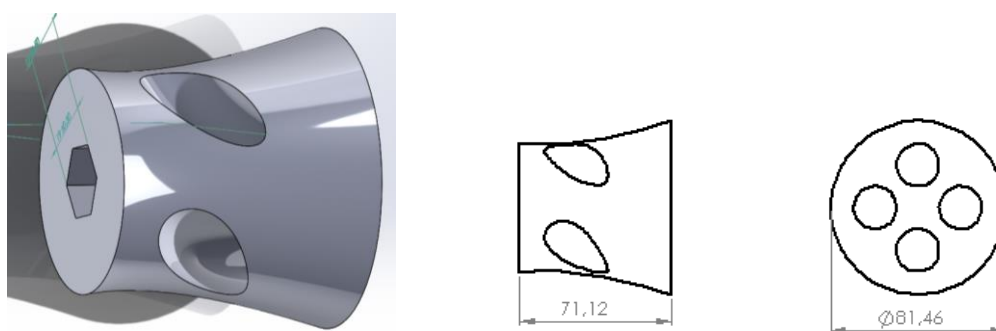
Det er mulig å utnytte det antatte forholdet som er skissert i Figur 43, utnytte overtrykkssonen til å redusere undertrykkssonen. Dette ved å ha en kanal mellom disse sonen, gjennom selve kappen. En slik kanal bør være krummet på en slik måte at krumningen legger til rette for gjennomstrømning, mens kappen roterer. En slik akse vil, gitt at den skal møte utstrømningen fra propellbladene og passere ut kappens bakende parallelt med rotasjonsaksen, omsette noe rotasjon til skyv. Dette medfører naturligvis økt dreiemoment. Totalt sett forventes dette sammen med den nødvendige økningen i overflatearealet å senke virkningsgraden, relativt til Modell 4.

Kanalens tverrsnitt bør være konstant. En innsnevring eller dyseformet kanal, gir trykkfall og hastighetsøkning. Dette er mot intensjonen kanalen har. En diffusorkanal vil gi hastighetsfall og trykkøkning, som i utgangspunktet en positiv effekt. Dessverre vil dette kreve ytterligere overflateareal. Som en kostnyttevurdering betraktes et konstant tverrsnitt langs en krummet akse som den beste løsningen.

Kanalenes tverrsnitt bør være av en slik størrelse at en signifikant andel av vannet som strømmer over diffusorkappen blir ledet gjennom kanalene. Samtidig ikke så stor at kjernen mellom kanalene i praksis fungerer som en ikke rund konus.

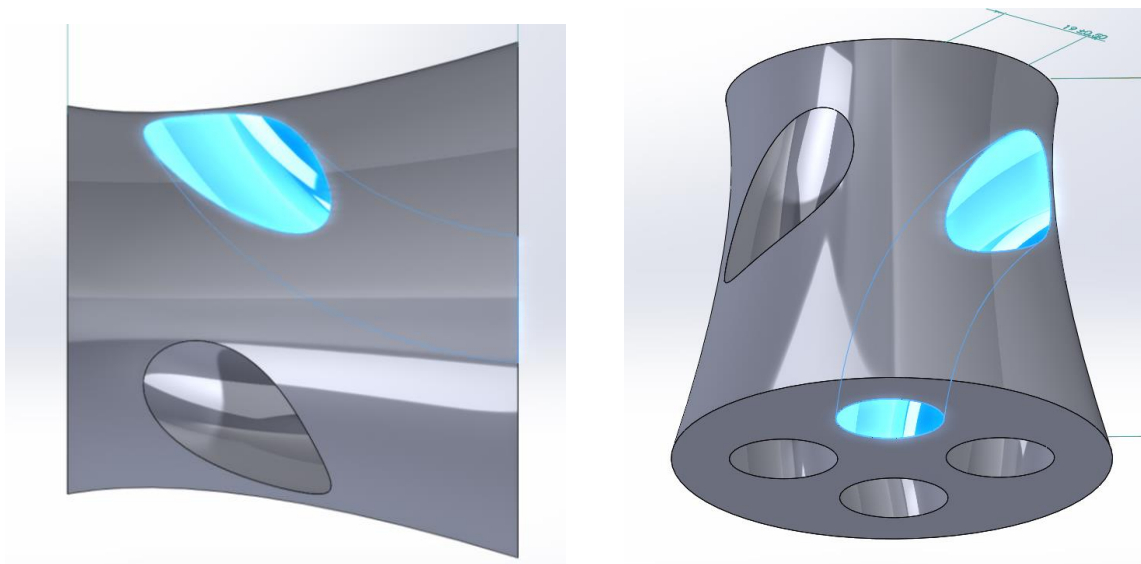
I mangel på tilgjengelige kilder som viser til en slik modell, ble målene og utformingen av senteraksen til kanalene bestemt skjønnsmessig. Et ytterligere moment som lå til grunn for designet, antallet kanaler. Da intensjonen er å spre bladrotvortexene, er det naturlig at det er et annet antall kanaler enn blader på testpropellen (5 blader).

Etter eksperimentering med kanaldiameter og antall kanaler og varierende diameter på kanaltverrsnittet på den virtuelle modellen ble modellen seende slik ut:



**Figur 44: 3D-skisse og utsnitt av tegning av Modell 5**

Fire identiske kanaler som krommet ut av diffusorkappens stigende flate. Selve akseformen er krommet som vist i Figur 45. Hver kanal har en diameter på 20,00 mm.

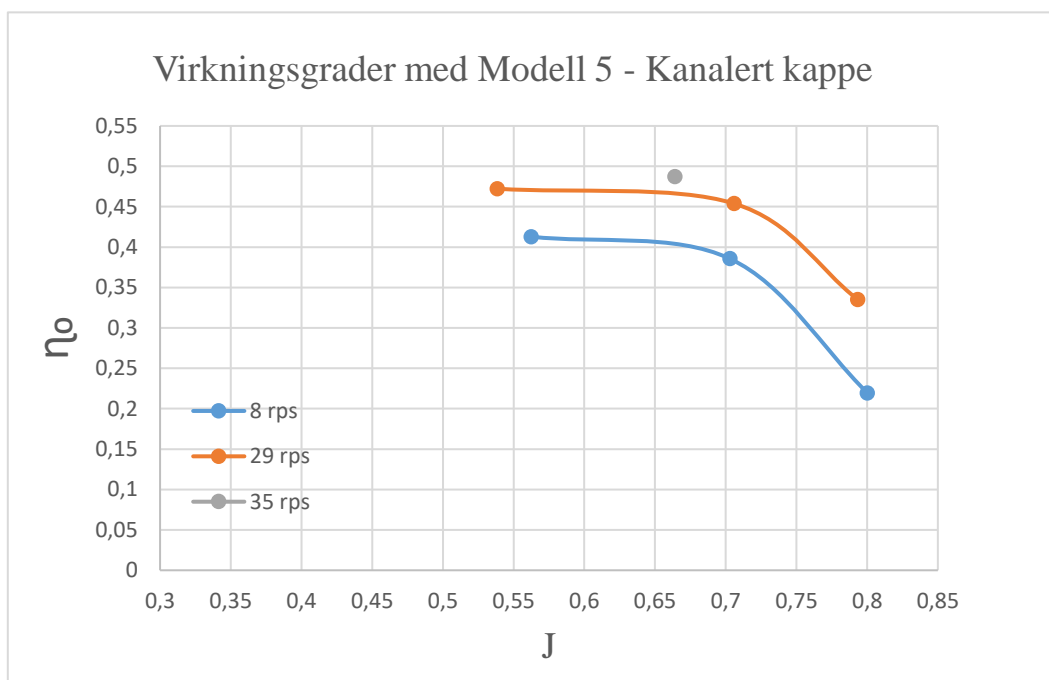


**Figur 45 Modell 5 med kanalen uthevet**



**Figur 46 Modell 5 montert i kavitasjonstunellen**

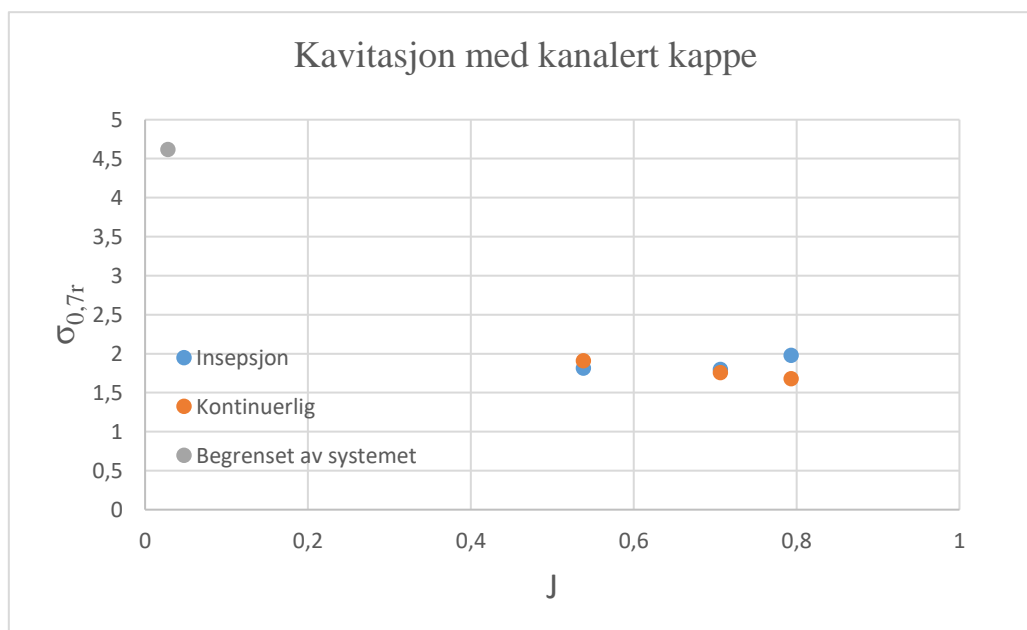
### 3.7.1 Modell 5 resultater



**Figur 47 Virkningsgrad – Modell 5**

Virkningsgraden med Modell 5 er ytterlig redusert fra Modell 4 resultatene, som vist i Figur 47. Som beskrevet under designvurderingene er dette en forventet kostnad av kanalenes krumning mot dreieretningen og det økte overflate arealet.

#### 3.7.1.1 Kavitasjonskarakteristikk



**Figur 48 Kavitasjonskarakteristikk – Modell 5**

Kavitasjonskarakteristikken, Figur 48, viser forbedring til forbedring i begge soner i sammenligning med Modell 4. Først og fremst bemerkes det at horisontalttesten endte ved systembegrensning av hensyn til testpropellen, og at dette skjer ved  $J \approx 0,03$ , uten hubkavitasjon. Videre er terskelen for kavitasjon ved høyeffektiv drift senket, relativt til Modell 4, både ved  $J \approx 0,55$  og  $J \approx 0,7$ . Ved  $J \approx 0,8$  er de tilnærmet like.

### 3.7.1.2 Kavitasjonsbildet



**Figur 49 Kavitasjon i Sone 1 – Modell 5**

Som beskrevet lyktes forsøket ikke med å fremprovosere noen form for hubkavitasjon under horisontalttestene. Ved 29 rps, som vist på Figur 49, ble forsøket stanset av hensyn til bevarelse av testpropellen som opererte under intens tipkavitasjon. Under horisontalttestene ved 35 rps ble forsøket stanset under noe mindre tipkavitasjon, men av hensyn til maksimalgrensen for trustsensoren, 600 N. Til sammenligning var høyeste registrerte skyv ved Modell 1 ved 35 rps 416,3 N.





**Figur 50 Kavitasjon i Sone 2 – Modell 5**

Kontinuerlige kavitasjonen i Sone 2 fra Modell 5 vist i Figur 50. I likhet med Modell 4 forekommer relativt omfattende dragkavitasjon i det høyeffektiveområdet. Relativt til Modell 4 er Modell 5 i Sone 2 en forbedring. Dermed ser det ut til at kanalene har den ønskede effekten.



**Figur 51 Detaljert ved insepasjon – Modell 5**

Ved insepasjon i Sone 2 produserte modellen kavitasjon ved kanalens utløp, som vist i Figur 51. Disse forekom med 5-8 sekunders intervall frem til dragkavitasjonen oppstod og disse forsvant. Tilsynelatende vortexkavitasjon. Enten en rotvortex fra propellen, en ny vortex som har oppstått som følge av kanalens utforming eller en ujevnhet i kanalens overflate.

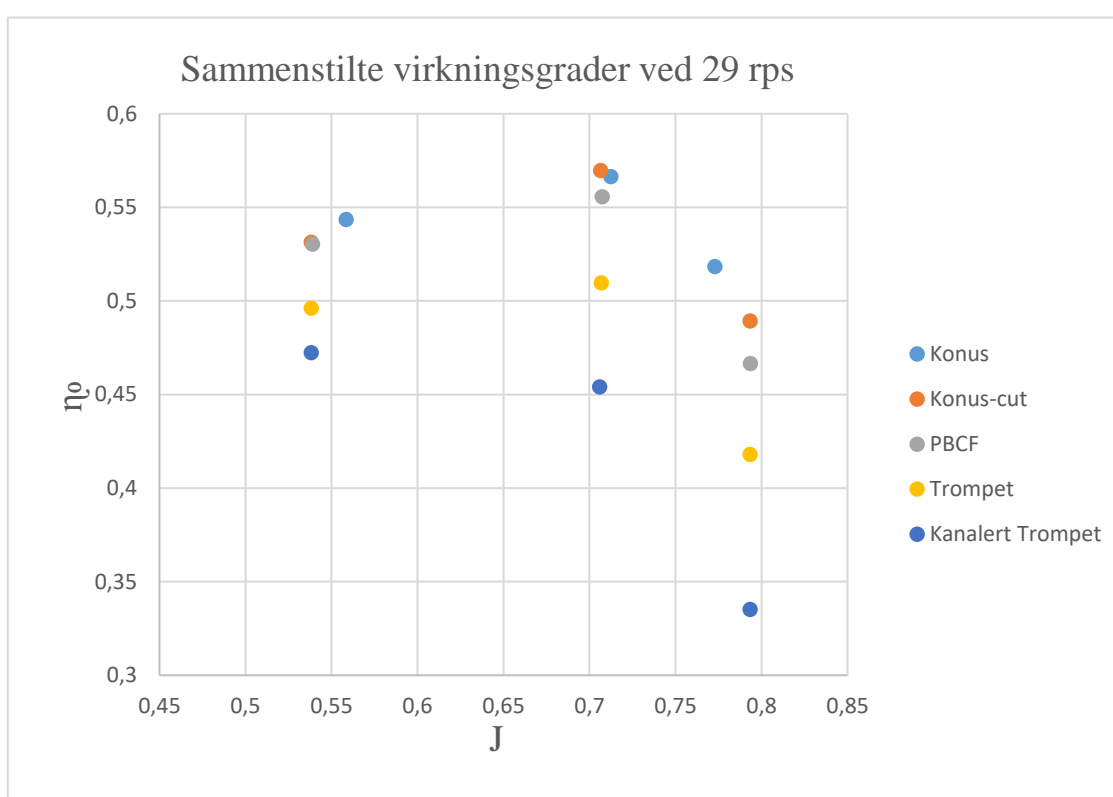
En mer detaljert studie av variasjoner i kanalutforming på en diffusor kappe vil være naturlig utgangspunkt for videre arbeid. Da dette er et originalt konsept og resultatene antyder å ha oppnådd den intensjonelle effekten.

En slik modell er meget egnet for drift i Sone 1. Som resultatene viser har modellen betraktelig lavere virkningsgrad enn de konvensjonelle løsningene, men tåler dertil ekstrem belastning uten kavitasjon.

## 4 Sammenligning og drøfting

For å drøfte effekten av hubkappeløsningene legges både resultatene av både virkningsgradsmålingene og de etablerte kavitasjonskarakteristikkene ved 29 rps. Alle målingene innebærer en viss unøyaktighet av en rekke årsaker, som redegjort i Vedlegg 5. Enkelte målinger varierer fra modell til modell uten å passere utenfor det som er antatt unøyaktighet. Likevel er hver enkelt måling gjort på likt grunnlag og kan forventes tilnærmet likt forskjøvet. Slik foreligger det grunnlag for å kommentere også de «små» variasjonene.

### 4.1 Virkningsgrad



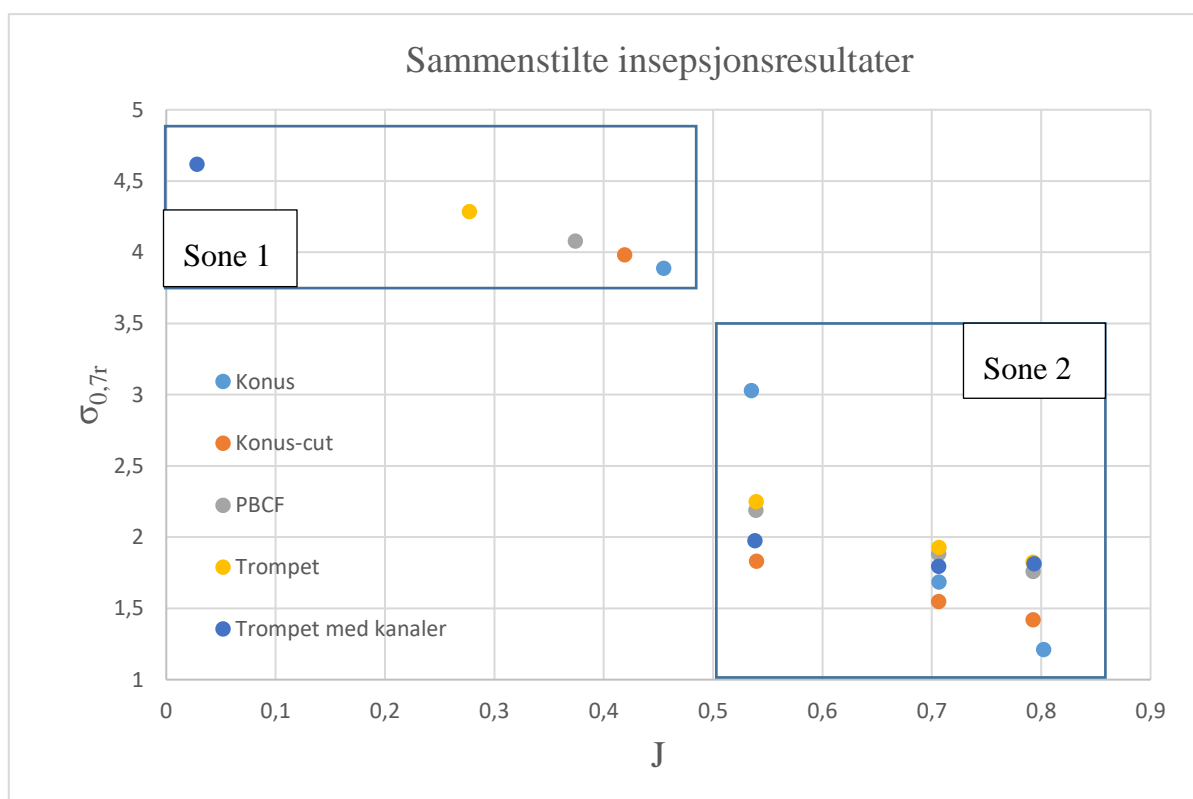
**Figur 52 Sammenstilte virkningsgrader**

Figur 52 viser variasjonene mellom modellene i virkningsgrad. Fra referansemålingen, Konus, er det kun Modell 2, Konus-cut, som gir økning av virkningsgraden. Modell 1, 2 og 3 presterer relativt likt, mens Modell 4 og 5 tilsynelatende reduserer virkningsgraden betydelig. Uten et en mer ekstensiv kartlegging av disse kurvene representerer ikke målingene direkte reduksjon i maksimal virkningsgrad, da dette punktet kan være forskjøvet fra modell til modell. Likevel viser mønsteret tydelig at virkningsgradskurven for modell 4 og 5 er betraktelig redusert.

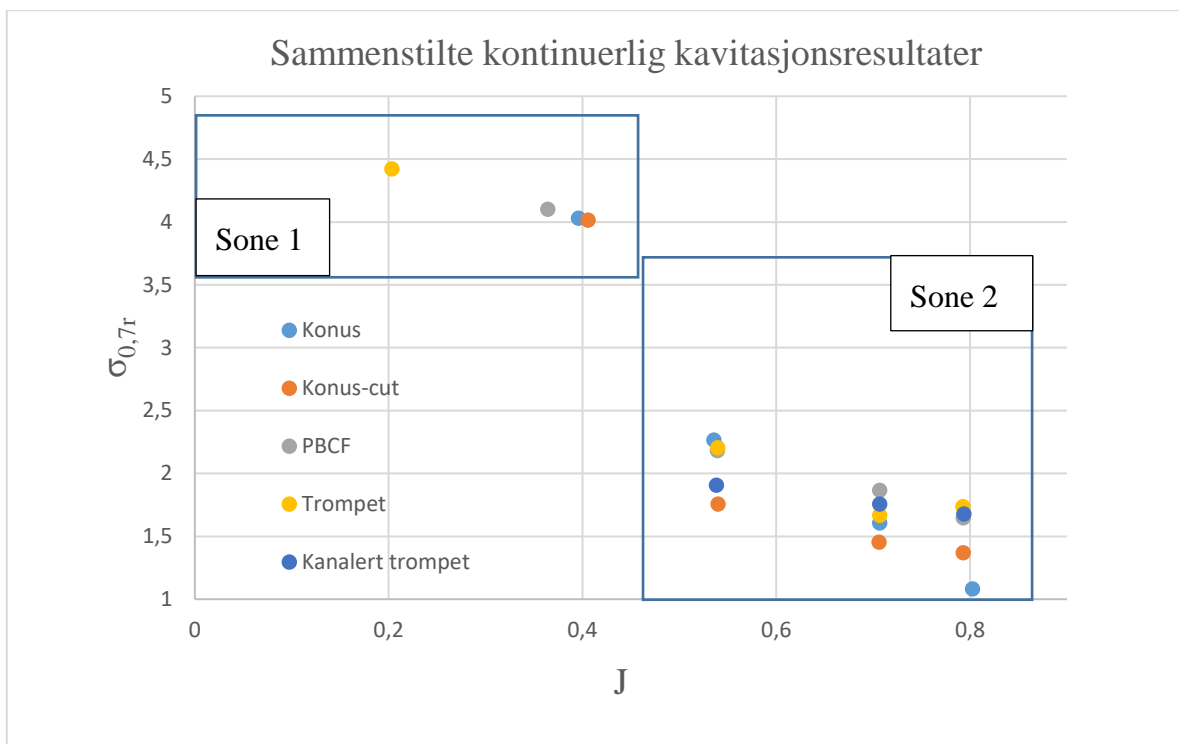
### 4.1.1 Lave turtall

Om vi ser isolert på de lave turtallene, 9 rps, varierer disse kun mellom  $\eta_0 = 0,40$  og  $\eta_0 = 0,44$ . Reduksjonen i virkningsgrad på tvers av modellene er betraktelig mindre. Modell 4 og 5 kan dermed sies å være betraktelig mer egnet under slik drift enn modell 1, 2 og 3. På den annen side, som nevnt under vurdering av driftskondisjonene, er målingen ved lavt Reynoldstall. Om disse målingene representerer en effekt i fullskala er dertil mindre sikkert enn de andre resultatene.

## 4.2 Kavitasjonskarakteristikk



Figur 53 Sammenstilte observasjoner intermittent kavitasjon



**Figur 54 Sammenstilte observasjoner av kontinuerlig kavitasjon**

#### 4.2.1 Modell 1, 2 og 3

I Sone 1 av kavitasjonskarakteristikkene presterer Modell 1, 2 og 3 relativt likt i sammenligning med Modell 4 og 5, derimot er de innbyrdes også forskjellig. Modell 3 er en forbedring ovenfor referansen, Modell 1, mens Modell 2 kaviterer kontinuerlig noe tidligere. I Sone 2 presterer både Modell 2 og 3 jevnere enn referansen. Modell 2 har en forbedring i Sone 2 i motsetning til Modell 3 som kaviterer noe tidligere enn referansen.

I den grad disse «små» variasjonene er representative for effekten av modellenes prinsipielle designgrunnlag, kan tyde på at valg av hubkappeløsning bør tilpasses skipets operasjonsmønstre. Modell 2, Konus-cut, kan presses hardere under Sone 2 drift og vil egne seg bedre for dette, mens Modell 3 kan presses hardere i Sone 1 drift og egnes bedre for slik drift. I dette resonnetet er det ikke tatt høyde for variasjoner i propelldesign på nettopp dette grunnlag. Dertil vil det naturligvis også følge at hubkappeløsningen tilpasses den spesifikke propellen.

#### 4.2.2 Modell 4 og 5

Det største skillet mellom de koniske, Modell 1, 2 og 3, og diffusorkappene, Modell 4 og 5, forekommer i Sone 1. Både Modell 4 og 5 kan driftes kavitasjonsløst til betraktelig lavere frem-

gangstall. Med en tydelig kostnad i form av redusert virkningsgrad. Merk at Modell 5 registreringen i Figur 53 ikke er en observasjon av hubkavitasjon, men systembegrensningen og at det følgelig ikke er noen registrering av kontinuerlig kavitasjon for Modell 5 i Figur 54.

Modell 5 viser betydelig forbedring både i Sone 1 og 2, relativt til Modell 4, ved ytterlig redusert virkningsgrad. Derav vil en slik løsning være mest egnet i tilfeller hvor ønsket er minimal støy-signatur og høy belastning.

### **4.3 Mulighetsrommet med flere hubkappeløsninger**

Operasjonsmønsteret til skipet og den tilhørende propellen vil i første omgang avgjøre om det er hensiktsmessig med en konisk eller diffusor kappe. Der koniske løsninger egnes for drift ved høye fremgangstall og høyere turtall, mens diffusorløsninger egner seg for drift ved lave fremgangstall og lavere turtall.

Rent hypotetisk, et multirollefartøy som vil ha operasjonsmønster avhengig av det gjeldende oppdraget ville hatt stor gevinst av et system for utbyttbar hubkappe. Komposittmaterialteknologien i dag er kommet langt nok til å tåle påkjenningene en propell utsettes for, derfor kan en komposittkappe i fullskala også være av håndterbar vekt. Med disse to forutsetningene vil et slikt fartøy oppnå flere gevinster. Som vist i denne studien gir forskjellige hubkapper drastiske endringer i propellens ytelse og kavitasjonsbilde. Ved å utnytte den kappeløsningen som egnes for det gitte oppdrag.

I en militær sammenheng vil en slik tilpasning også drastisk endre den akustiske signaturen til fartøyet, avhengig av den monterte kappeløsningen.

## 5 Konklusjon med anbefaling

Denne oppgaven har studert de ulike metodene for reduksjon av virveldannelsen, hubvortex og den tilhørende kavitasjonsformen, swirl core, bak et propellanlegg. Den har kartlagt ulike metoder som benyttes og studert hvilke filosofier som ligger til grunn for ulike hubkappeløsninger. Med dette til grunn, er det dannet et egnet forsøksdesign for å gjennomføre modellforsøk med forskjellige hubkappeløsninger. For å produsere forskjellige design ble 3D-modellering og print benyttet.

Resultatene av materialtester viser at 3D-modellering og print i HIPS, var en egnet metode og materiale for modellproduksjon. HIPS modellene tolererte påkjenningene ved testanleggets ekstremalpunkter. Dermed kan denne metoden anbefales ved videre arbeid, da den gir hurtig, rimelig produksjon og stor fleksibilitet i design.

Resultatene av modellforsøkene viser at variasjoner i hubkappedesignet drastisk påvirker propellanleggets ytelse og kavitasjonsbilde. Resultatene viser at enkelte løsninger eliminerte hubvortexen og utviklet andre former for kavitasjon under tilstrekkelig belastning. Det er også vist at de forskjellige løsningene medfører fordeler og ulemper.

Disse resultatene er utarbeidet under en rekke forhold som gir usikkerhet og begrenser nøyaktigheten av hver måling. Likevel er hvert modellforsøk gjennomført under så like kondisjoner som mulig. Derav følger delkonklusjonene i 5.1 for hvert konseptets egnethet på bakgrunn av sammenligningen på tvers av modellene.

Det anbefales som grunnlag for videre arbeid å studere mulighetene ved et konsept for utskiftbare hubkappe for multitrollefartøy. Slik at et enkelt skip kan dra nytte av fordelene til forskjellige hubkappedesign til forskjellige oppdrag.

### 5.1 Delkonklusjoner om de testede konseptløsningene

**En avkuttet konus løsning**, eliminerer swirl core og bevarer virkningsgraden under høyeffektivdrift, men ikke ved lave fremgangstall. Egnet for drift i det høyeffektive området av propellkurven og tolererer høye turtall.

**En avkappet konus med foiler**, eliminerer swirl core og i stort bevarer virkningsgraden. Dette konseptet, Modell 3, er et ypperlig utgangspunkt for optimalisering i videre arbeid, da kommersielle modeller reklamerer med 2 – 4% økning i virkningsgrad. En slik løsning egnes for all drift med relativt høy belastning og høye turtall.

**En diffusor løsning**, eliminere swirl core og tillate betraktelig høyere belastning ved lave fremgangstall, men reduserer virkningsgraden i det høyeffektive området. Egnes best under høy belastning og lave turtall.

**En diffusor med gjennomstrømning**, kan eliminere swirl core og tillater ekstrem belastning ved fremgangstall ned mot 0 og høy belastning i det høyeffektive området. Dessverre reduseres virkningsgraden betraktelig. Konseptet, en diffusor løsning med gjennomstrømning, anbefales som grunnlag for videre arbeid ved variasjoner i kanalutforming. Dette et originalt konsept og bør studeres nærmere. Konseptet egnes for ekstreme belastninger og spesielt i de tilfeller fravær av kavitasjon er viktigere enn brennstofføkonomi.



## Bibliografi

### Bøker:

1. **Saunders, Harold E.**  
1956a, *Hydrodynamics in ship design volum 1*, New York: The society of Naval Architects and Marine Engineers  
1956b, *Hydrodynamics in ship design volum 2*, New York: The society of Naval Architects and Marine Engineers
2. **Breslin, John P og Andersen, Poul**  
1996, *Hydrodynamics of ship propellers*, Cambridge: Cambridge University Press
3. **Franc, Jean-Pierre og Michel, Jean-Marie**  
2010, *Fundamentals of Cavitation*, Nederland: Kluwer Academic Publishers.

### Rapporter og studier:

1. **Lim, Sang-Seop and Kim, Tae-Won**  
2013, *Parametric study of propeller bosc cap fins for container ships*, Japan: Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.
2. **Inukai, Yasuhiko**  
2013, *A Development of a Propeller with Backward Tip Raked Fin*, Japan Marine United Cooperation, Tokyo, Japan  
Third International Symposium on Marine Propulsion  
smp'13, Tasmania, Australia, Mai 2013
3. **Funeno, Isao**  
2002, *On Viscous Flow around Marine Propellers – Hub Vortex and Scale Effect*, Japan: J.Kansai Soc. N.A.
4. **Renilson, Martin og Ryan, Conor**  
2014, *Reducing underwater noise from commercial ships: Current status and future directions*, Journal of Ocean Technology – April 2014.
5. **Lee, Joon-Hyoung, Moon-Chan, Kim, Yong-Jin, Shin og Jin-Gu Kang**  
2017, *Study on Performance of Combined Energy Saving Devices For Container Ship by Experiments*,  
Fifth International Symposium on Marine Propulsion  
smp'17, Espoo, Finland, June 2017
6. **Okada Yoshihisa, Katayama Kenta og Okazaki Akinori**  
2017, *The Battle Royal of energy saving devises for a ship*, Fifth International Symposium on Marine Propulsion  
smp'17, Espoo, Finland, June 2017
7. **Hotaling, John M, Meehan, James M og Karaiath, Gabor**  
2001, *Fisheries Research Vessel Hull and Propeller Design To Maximize Hydroacoustic Survey Efficiency*,

Manualer:

**1. Cussons Technology Ltd**

2013, *K23 Cavitation Tunnel – Operating Instructions, Rev Feb 2013*, Cussons Technology Ltd Marine Research Systems Division, Manchester, England

INTERNETT

1. Propulsion Committee of the 28th ITTC section 7.5-02-03-03 Cavitation

a) Sec 7.5-02-03-03.1, 2017 Rev 4

*«Recommended Procedures and Guidelines – Procedure – Model scale cavitation testing»*,

<https://www.ittc.info/media/8035/75-02-03-031.pdf>

Lastet ned: 25.05.2019

b) Sec 75-02-03-03.3, 2014 Rev 2

*«Recommended Procedures and Guidelines – Procedure –Description of Cavitation Appearances»*,

<https://www.ittc.info/media/8037/75-02-03-032.pdf>

Lastet ned: 25.05.2019

2. Eksempelbilde av Ubåtpropell med diffusorkappe

<http://i.imgur.com/9tVNSnQ.jpg>

Lastet ned: 21.05.2019

## **Vedleggs oversikt**

- Vedlegg A: Fysikalske data for ferskvann
- Vedlegg B: Propelltegning av NOAA CSV Propell
- Vedlegg C: Prosedyre for tunelltester (Endelig forsøksdesign)
- Vedlegg D: Prosedyre for etterbehandling av HIPS-modeller
- Vedlegg E: Feilkilder og unøyaktighet
- Vedlegg F: Modelltegninger av prototype og konsept modellene 1-5
- Vedlegg G: Datagrunnlag og beregninger (Excel-fil)

(Alle vedlegg ligger i egen vedleggsmappe på WiseFlow)