



Sjøkrigsskolen

Bacheloroppgave

Toroidpropell – produksjon, testing og evaluering

– en praktisk, eksperimentell studie av en Toroidpropell–

av

ODIN HOV STOKKE OG ØIVIND INKA MIDTHASSEL

Levert som en del av kravet til graden:

BACHELOR I MILITÆRE STUDIER MED FORDYPNING I LEDELSE OG
MASKINFAG

Innlevert: DES 2023

Antall ord: 8621

Godkjent for offentlig publisering

Publiseringsavtale

En avtale om elektronisk publisering av bachelor/prosjektoppgave

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

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

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

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

Plagiaterklæring

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

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

Dato: 03-12-2023

Øivind Inka Midthassel

Kadett navn

Odin Hov Stokke

Forord

En spesiell type propelldesign, toroidpropell, har fått økende oppmerksomhet og kommersiell utbredelse de siste årene. Det sies at de generelt sett skal være en bedre type propell, mer stillegående, kavitere mindre, og gi større løftekraft. I denne oppgaven blir det undersøkt om dette type design kan gi fordelaktige egenskaper for marinefartøy i framtiden.

Det forventes at leseren har en viss forståelse for fluiddynamikk og propelldesign.

Vi ønsker å gi en stor takk til vår veileder Gisle Strand som alltid har gode innspill og tilbakemeldinger underveis i arbeidet. Takk til Frode Wikne for 3D printing og hjelp i maskinlabben, og til Lars Olav Tveita som har hjulpet med oppsett av måleoppsettet av hydrofon. Til slutt takk til bedriftene Stinger Technology AS og Remora Robotics AS for platform og teknisk støtte til design og utprint av modell propeller.

Bergen, Sjøkrigsskolen, 03-12-2023

Odin Hov Stokke

Odin Hov Stokke

Inka Midthassel

Inka Midthassel

Sammendrag

En toroidpropell er en propell som har et blad som er sammenfattet som en bue på tuppen og festet i propellbosset på forskjellige steder. Typen har blitt svært populær i de senere år, spesielt til bruk på utenbords båtmotorer og luftdroner. Produsenter av propellene hevder at den lager mindre støy og er mer effektive enn konvensjonelle propeller. Det er imidlertid begrenset med forskning på området og derfor usikkert om produsentenes påstand holder mål. Skulle påstandene vise seg å være sanne, vil dette være meget interessant med tanke på anvendelse i militær sammenheng. Støy er et uønsket fenomen i maritime operasjoner og gitt kompleksitet med avveining mellom effekt og støy er en nærmere undersøkelse omkring toroidpropeller verd å se på.

På basis av manglende objektive, empiriske og vitenskapelige baserte sammenligninger er det valgt å designe, produsere og teste en Toroid og en konvensjonell propell med flest mulig like parametere. Sammenligninger og inspirasjon fra tidligere bacheloroppgaver og eksisterende toroidpropell-design ble brukt som utgangspunkt.

Som grunnlag for sammenligning er visuelle data, propelldata og støydata er hentet inn og analysert. Både Toroid og den konvensjonelle propellen presterer relativt dårlig sammenlignet med publiserte data for serie produserte propeller.

Fra arbeidet kan det konkluderes med at en toroidpropell, ikke hadde åpenbare egenskaper som ville være fordelaktige for marinefartøy. Det er imidlertid meget komplekse hydroelastiske sammenhenger. Små endringer i variabler kan gi store utslag. Verktøy egnet modellering kan gi større mulighet for bedre ytelse på propellene. Det anbefales at propelltypen studeres videre ved hjelp av CFD-metoder.

Innholdsfortegnelse

Forord	iii
Sammendrag	iv
Innholdsfortegnelse	v
Figurer	7
Tabeller/Diagrammer	9
Formler	10
Nomenklatur	12
1 Innledning eller introduksjon	15
1.1 Toroidpropell – kort historie.....	16
1.2 Problemstilling og måloppnåelse.....	18
1.3 Fremgangsmetode.....	18
1.4 Avgrensing.....	19
2 Litteraturstudie/propellteori	21
2.1 Bakgrunn for valg av toroidpropeller.....	21
2.2 Kavitasjon.....	24
2.3 Slipp.....	29
2.4 Støy.....	30
2.5 Propellkarakteristikk.....	33
3 Framgangsmåte	35
4 Design	36
4.1 Premisser.....	36
4.2 Design - Profil.....	36
4.3 Design av propellboss.....	43
4.4 Bue.....	44
4.5 Teknisk fremgangsmåte i SOLIDWORKS.....	45
4.6 3D-utskrift: Additiv tilvirkning.....	46
4.7 Måleoppsett.....	54
4.8 Mekanisk og akustisk støy i testomgivelsene.....	55
5 Resultater og analyse	56

5.1	Propellytelse	56
5.2	Visuelle resultater	58
5.3	Støy resultater	62
5.4	Til sammenlikning	70
6	Konklusjon	77
6.1	Videre studier	77
	Referanser	79

Figurer

<i>Figur 1: Myers propell 1892</i>	16
<i>Figur 2: MIT luft toroidpropell og Sharrow marine toroidpropell</i>	17
<i>Figur 3: Bernoulli prinsippet</i>	22
<i>Figur 4: ulike former for kavitasjon (ITTC, 2014)</i>	28
<i>Figur 5: visuell forklaring på slipp</i>	29
<i>Figur 6: approksimering virkningsgrad vs slip</i>	30
<i>Figur 7: lydspekter med og uten kavitasjon</i>	31
<i>Figur 8: Lydbilde til forskjellige kavitasjonsformer</i>	32
<i>Figur 9: forklaring på stigning (Steen, 2007, p. 62)</i>	38
<i>Figur 10: Stigningsvinkel vs. r/R</i>	38
<i>Figur 11: forskjellige bladareal (HydroComp Knowledge Library, 2007)</i>	39
<i>Figur 12: Konvensjonell propell</i>	39
<i>Figur 13: Toroidpropell</i>	40
<i>Figur 14: Tverrsnittfasong ved $0,7R$</i>	42
<i>Figur 15 Tykkelse av foil r/R</i>	42
<i>Figur : Korde vs r/R</i>	42
<i>Figur 18: T/C vs r/R Tykkelse over Korde fordeling over radien. (fra original propell av tidligere kadett Andersen)</i>	43
<i>Figur 19: bladforløftning</i>	44
<i>Figur 20: bladforskyving</i>	44
<i>Figur 21: bue</i>	45
<i>Figur 22: angrepsvinkel mot fluidet</i>	45
<i>Figur 23: fluidet beveget seg inn mot propellen (Riley, 2023)</i>	46
<i>Figur 24: konvensjonell</i>	47
<i>Figur 25: toroid</i>	47
<i>Figur 26: referanseakser og tilhørende krefter</i>	49
<i>Figur 29: Fiberforsterkning Toroid</i>	52
<i>Figur 31: propellkurve toroidpropell</i>	56
<i>Figur 32: propellkurve konvensjonell propell</i>	57
<i>Figur 33: propellkurver, sammenligning</i>	58
<i>Figur 34: Toroid $J=0,863 \rightarrow 0,471$</i>	59
<i>Figur 35: Konvensjonell $J=0,940 \rightarrow 0,478$</i>	60
<i>Figur 36: toroid vs konvensjonell, sakk ned</i>	60
<i>Figur 37: toroid vs konvensjonell, cruise hastighet</i>	61
<i>Figur 38: toroid vs konvensjonell, akselerasjonsfase</i>	61
<i>Figur 39: kavitasjon 0-90Hz</i>	63
<i>Figur 40: ikke kavitasjon 0-90Hz</i>	64
<i>Figur 41: kavitasjon 90-500Hz</i>	65
<i>Figur 42: ikke kavitasjon 90-500Hz</i>	65
<i>Figur 43: kavitasjon 500-1500Hz</i>	66
<i>Figur 44: ikke kavitasjon 500-1500Hz</i>	66
<i>Figur 44: kavitasjon 1500-5000Hz</i>	67

<i>Figur 45: ikke kavitasjon 1500-5000Hz</i>	68
<i>Figur 46: starten på tuppkavitasjon</i>	70
<i>Figur 47: støy til start av tuppkavitasjon, 500-5000Hz, toroid blå, konvensjonell rød..</i>	71
<i>Figur 48: boss-virvel konvensjonell vs toroid</i>	72
<i>Figur 49: konvensjonell start av boss-virvel 300-500Hz</i>	73
<i>Figur 50: konvensjonell vs toroid. lik løftkoeffisient</i>	74
<i>Figur 51: konvensjonell vs toroid, lik løftkoeffisient, 500-5000Hz</i>	74
<i>Figur 52: Sammenligning av virkningsgrad</i>	75

Tabeller/Diagrammer

<i>Tabell 1: Forkortelser, alfabetisk rekkefølge</i>	12
<i>Tabell 2: vekt av propeller og %materiellfyll i print</i>	47
<i>Tabell 3: materialdata.....</i>	48
<i>Tabell 4: Største belastninger I forsøk.....</i>	48
<i>Tabell 5: kontrollmåling av kordelengder etter pussing og tilhørende ruheter.....</i>	52
<i>Tabell 6: propelldata gitt fra Solidworks</i>	53
<i>Tabell 7: sammenfatning av måleoppsett</i>	54

Formler

<i>Formel 1: løftkraft</i>	22
<i>Formel 2: volumstrøm gjennom propellskiven</i>	22
<i>Formel 3: Bernoullis ligning foran propellen</i>	22
<i>Formel 4: Bernoullis ligning etter propellen</i>	23
<i>Formel 5: trykkendring over propellbladet</i>	23
<i>Formel 6: nytt uttrykk for Løft</i>	23
<i>Formel 7: nytt uttrykk for Volumstrøm</i>	23
<i>Formel 8: nytt uttrykk for hastighet gjennom propellskiven</i>	23
<i>Formel 9: effekt levert av propellen</i>	24
<i>Formel 10: Effekt tilført propellen</i>	24
<i>Formel 11: ideell virkningsgrad</i>	24
<i>Formel 12: Fremgangstallet</i>	33
<i>Formel 13: Løftkoeffisient</i>	33
<i>Formel 14: Dreiemomentkoeffisient</i>	33
<i>Formel 15: Virkningsgrad åpent vann</i>	33
<i>Formel 17: Reynoldstallet over propellbladet ved 0,7R</i>	34
<i>Formel 18: kavitasjonstallet</i>	34
<i>Formel 19: stigningsvinkel til bladet</i>	38

Toroidal, adjective

to·roi·dal tò-`ròi-dəl

of, relating to, or shaped like a torus or toroid: doughnut-shaped

- (Merriam-Webster, 2023)

Toroid, noun

to·roid `tòr-, òid

1: a surface generated by a closed plane curve rotated about a line that lies in the same plane as the curve but does not intersect it

2: a body whose surface has the form of a toroid

- (Merriam-Webster, 2023)

Nomenklatur

Referer til standard begreper brukt av *International Towing Tank Conference*. (ITTC, 2008)

Tabell 1: Forkortelser, alfabetisk rekkefølge

Symbol	Benevning	Beskrivelse
A_D	[mm ²]	Utviklet bladareal, Area, developed
A_E	[mm ²]	Ekspandert bladareal, Area, expanded
A_O	[mm ²]	Disk areal, Area, disc
A_P	[mm ²]	Prosjektert bladareal, Area, projected
BAR		Blade area ratio, A_P/A_O
c	[m]	Korde, korteste lengde fra følgende til ledende kant
c0.7R	[m]	Korde v/0.7 radius
CFD		Computational Fluid Design
D	[m]	Diameter
f	[Hz]	Frekvens
g	[m/s ²]	Tyngdeakselerasjon
h	[m]	Neddykking av propellaksel
J		Fremgangstallet, Advance coefficient
Kontur		Hvordan bladene brer seg utover langs diameteren
K_T		Løftkoeffisienten
K_Q		Dreimomentkoeffisienten
n	[rps]	Omdreiningshastighet propell
p	[Pa]	Trykk
P	[m]	Pitch, stigning til propellen, distanse langs rotasjonsaksen på 1 rotasjon
P/D		Pitch/diameter

P_D	[kW]	<i>Effekt tilført propellen</i>
P_T	[kW]	<i>Effekt levert av propeller, løft horsepower</i>
P_v	[Pa]	<i>Fordampningstrykk</i>
Q	[Nm]	<i>Dreiemoment</i>
\dot{Q}	[m ³ /s]	<i>Volumstrøm</i>
Rake		<i>Propellbladene trekkes akterover</i>
Re		<i>Reynoldstall</i>
S	[mm ²]	<i>Våt overflate</i>
Skew		<i>Vridning av propellbladene bak med rotasjonsretningen</i>
Slipp		<i>Et mål på hvor mye ekstra propellen må tørne for å bevege seg en gitt avstand ift om den skrudde seg i et fast materiale.</i>
Sugeside		<i>Lavtrykksiden, oversiden, forut til propellen</i>
T	[N]	<i>Løft</i>
Trykkside		<i>Høytrykksiden, undersiden, på ansiktet, akterut, til propellen</i>
Tverrsnittfasong		<i>Propellbladets profil ved valgt radius</i>
U_A	[m/s]	<i>Vannhastighet etter propellen, induisert hastighet</i>
V_A	[m/s]	<i>Tunellens vannhastighet, speed of advance</i>
V_P	[m/s]	<i>Vannhastighet gjennom propellen</i>
z		<i>Antall blader</i>
β	°	<i>hydrodynamisk stigningsvinkel</i>
δ		<i>usikkerhet</i>
Δp	[Pa]	<i>trykkendring</i>
η_{ideell}		<i>ideell virkningsgrad for propellen</i>
η_o		<i>Propellens virkningsgrad i åpent vann</i>
ρ	[kg/m ³]	<i>Vannets massetetthet</i>

σ		<i>kavitasjonstall</i>
ν	[m ² /s]	<i>Kinematisk viskositet vann</i>

1 Innledning eller introduksjon

Alle fartøyer lager støy når de beveger seg i vann. For et marinefartøy er det å være stillegående en stor fordel. Derfor er det viktig å kunne vite hvilken støy en selv lager. En stor støyproducent er propulsoren til fartøyet. Toroid formede propellblader påstås å ha fordelaktige egenskaper fremfor konvensjonelle propeller. Denne oppgaven har som mål å undersøke om en toroid design kan være forbedre egenskaper til propeller brukt i et typisk marinefartøy.

Et kort historisk tilbakeblikk på framdriftsmetoder til sjøs viser endring siden menneskene lærte å bygge båter og skip. Fra å bruke årer og padler, til høyt optimaliserte propeller, drevet av maskiner, har veien vært lang og tatt ulike former. Skruepropellen er det vi i dag kaller vanlige propeller, og får navnet sitt etter at de «skruer» seg gjennom vannet. De første skruene kan dateres tilbake til antikkens Egypt som ble brukt til å løfte vann fra et lavere sted til et høyere et, disse er ofte omtalt som «Archimedes Screw» (Anon., u.d.). Disse ble etter hvert plassert på skip, og mer eller mindre tilfeldig oppdaget man at en avkuttet skrue ga mer effektivitet enn sammenhengende en.

Skruen har vært bakgrunnen til inspirasjon for forflytning av fluid i flere sammenhenger opp igjennom historien. Bla. Da Vinci brukte designet til å tegne sine utgaver av helikopteret. Da den industrielle revolusjon kom, fant man måter for å rotere en aksel, som igjen kunne rotere en propell. Det er her vi ser mer av de tidligere utgavene av den moderne skrue-propellen. (Seaton, 1909) A.E Seaton fremlegger en detaljert beskrivelse av historien til framkomstmidler og viser til unike design fra slutten av 1700-tallet til 1900-tallet. Blant disse, er et design av William Lyttleton fra 1794, som bruker Arkimedes-skruen til fremdrift.

På 1830-tallet dukket det opp et par store navn i propellerutviklingen (CJR Propulsion, 2023). John Ericsson og Francis Pettit Smith omtales som de første som designet og tok i bruk skruepropellen. (The Mariners Museum (VA) , 2012) De presterte å lage en propell på et skip som var raskere og mer effektivt enn de allerede eksisterende hjuldampene. (Brown, 2013) Ut ifra dette gjorde rederier og mariner store framskritt.

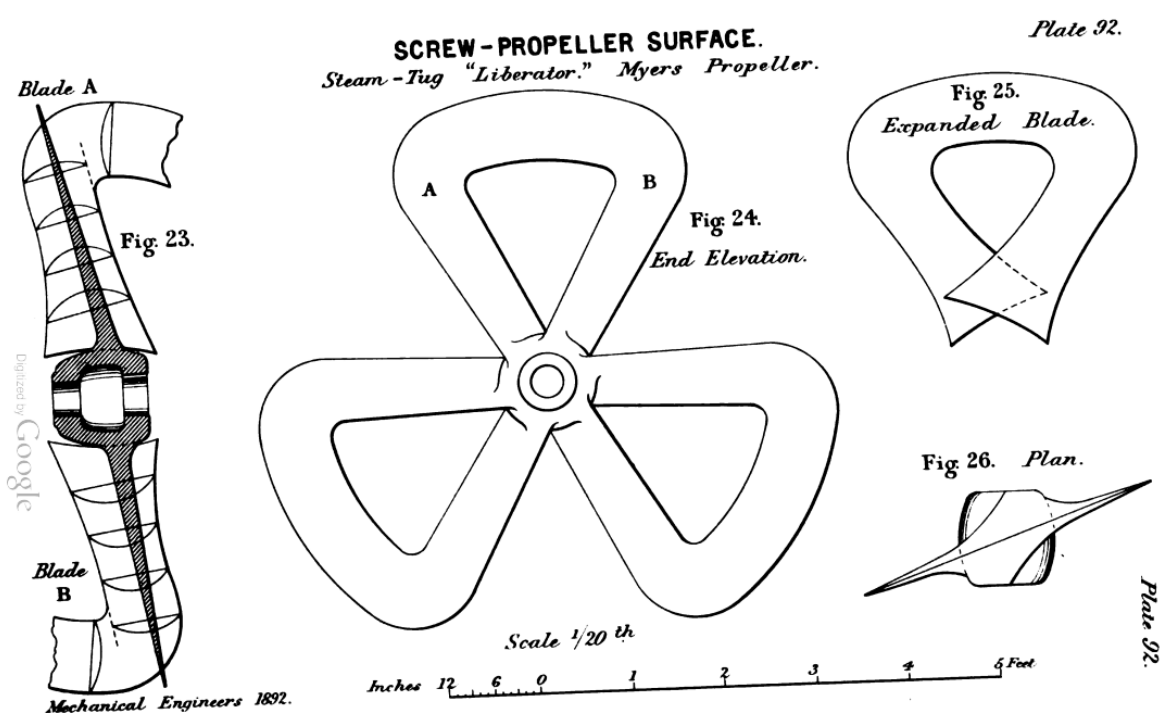
Flere unike design ble drøftet og testet i denne perioden og man så stadig utviklinger i hastighet og manøvrering. På slutten av 1800-tallet, slutten av den industrielle revolusjon og i hjerte av imperialismen, skjedde det igjen et stort hopp i utviklingen. Mye forskning og

utvikling ble gjort på skruerpropeller, blant annet ble det første designet av toroidpropeller testet.

1.1 Toroidpropell – kort historie

I 1892 ble “*Proceedings - Institution of Mechanical Engineers, Volum 46*” lansert. I denne er det en avhandling med tittel «*EXPERIMENTS ON THE ARRANGEMENT OF THE SURFACE OF A SCREW-PROPELLER. BY MR. WILLIAM GEORGE WALKER, OF BRISTOL*» som omhandler ny forskning om «screw-propellers» (Walker, 1892) I avhandlingen blir det testet propeller av ulikt design for å optimalisere skipsfarten på denne tiden. Blant disse propellene, dukker en «*Myers propeller*» opp. (Walker, 1892) Denne blir beskrevet som:

«*These might be described as six- bladed propellers with the tips of the blades united in three pairs in the way shown in the drawings, and also in the model which he had brought to illustrate the construction, because it was so difficult to explain its principles.*”



Figur 1: Myers propell 1892

Fra både Myers sine papirer og skipskapteiner på fartøyene som anvendte propellene, ble det registrert at det er langt mindre vibrering, høyere hastighet på fartøyet, bedre

manøvreringsevne, kortere bremselengde, høyere slepekraft og at de var mer robuste enn konvensjonelle propeller. (Neal, 1891) I forskningen til Walker drøftes det også at flere antall blader kunne vært fordel for å optimalisere propellene mer. En av grunnene som pekes ut mot å forske videre på konseptet, var skepsisen blant eksperter og mangel av forståelse for det nye designet. Det var også langt mer komplisert å produsere en slik propell.

Opp igjennom 1900-tallet har det vært flere ulike patenter på forskjellige former for toroidpropeller. Både design for vifteblader, (Friedrich, 1942) flypropeller (Louis, 1935) og marinepropeller (Sugden, 1970) ligger under kategorien som omfavner den geometriske fasongen. I vedlegg G, *toroidpropeller*, ligger noen eksempler av disse.

I 2013 fikk Sharrow Marine patent for sitt toroidpropell design. Fra den tiden og frem til august 2023 har de kontinuerlig utviklet ulike aspekter ved designet og utviklet flere propeller ut til det kommersielle markedet for småbåter mellom 150 – 600hk (Sharrow Marine TM, 2023). Interessen økte fra 2020 da *Massachusetts Institute of Technology*, fra nå omtalt (MIT) fikk patent på sin egen versjon av en luftpropeller, som vant R&D Award 100 i 2022. Dette har gitt inspirasjon til mange interessenter om å produsere og teste ut egne utgaver selv (Sebastian, 2020).



Figur 2: MIT luft toroidpropell og Sharrow marine toroidpropell

Det er delte meninger om propellene. Både MIT og Sharrow Marine markedsfører produktene sitt gjennom videoer som demonstrerer markante forskjeller i lyd og ytelse sammenlignet med vanlige propeller. Imidlertid bør deres reklame tas med forbehold. Publisert vitenskapelig forskning på toroidpropeller for marin bruk er ikke funnet i vår litteraturstudie. Det som

Sharrow sier at de støtter seg på er utviklet gjennom eksperimentelle metoder som fysiske tester og CFD studier.

1.2 Problemstilling og måloppnåelse

“There are a number of propeller design concepts that claim increased efficiency and a reduction in cavitation, including high skew propellers; contracted and loaded tip propellers; Kappel propellers; and New Blade Section propellers.” (Leaper, 2014)

Det finnes som sagt ingen konkrete publiserte studier som har undersøkt toroidpropeller åpent på nett. Derimot, er det mye forskning på konvensjonelle propeller hvor noen undersøkelser bruker CFD for å se på ukonvensjonelle tuppdesign (Ommundsen, 2015)

Denne oppgaven har til hensikt å finne ut om toroidpropellen er like bra som blir sagt i de ulike reklamevideoene, eller om det er et unikt design som ikke bringer mye nytt på bordet.

Ut ifra kriteriene vil oppgaven omhandle design, produksjon og testing av propellene i småskala. Ved hjelp av skolens midler er det mulighet å se på følgende forbehold:

1. løft, skyv, produsert av propellen
2. dreiemoment som må tilføres til propellen
3. oppnådd virkningsgrad til propellen
4. produksjon av kavitasjon
5. støyproduksjonen

Ved hjelp av dette, er målet å svare på problemstillingen:

Er en toroidpropell en relevant propulsor for marinen?

1.3 Fremgangsmetode

For å svare på problemstillingen, er det blitt valgt en praktisk eksperimentell tilnærming til oppgaven med støtte i enkelt propelldesign. Oppgaven har 4 faser:

Fase 1- litteraturstudie

For å forstå toroiddesignet, er det viktig å først se på propellteori og design. Denne fasen blir en litteraturstudie som innhenter informasjon og forskning gjort på tema tidligere. Teori og forhold blir gjort rede for og tatt med videre i oppgaven.

Fase 2- design og utskrift

Propellene som skal sammenliknes blir designet i programmet Solidworks på bakgrunn av funn i fase 1. Fasen begynner ved å se på designpremissene og forholdene som er valgt for å få best mulig sammenlikningsgrunnlag. Filene laget i Solidworks blir så bearbeidet av programmet som styrer den additive skriveren, kalt 3D-skriver

Fase 3 – testing og datainnsamling

Fase 3 består av testfasilitetene skolen har tilgjengelig, og hvordan dette kan anvendes for å oppnå målene med oppgaven. Gjennomgang av komponenter og oppsett av systemet blir gjennomgått. Relevant forskning fra tidligere oppgaver utført på skolen blir studert for erfaringsoverføring. Hvordan datainnsamlingen og testingen vil foregå blir beskrevet i denne fasen. Største delene av denne fasen vil være i vedlegg for bedre detaljnivå.

Fase 4 – resultater med analyse og konklusjon

Til slutt blir det presentasjon og analyse av resultatene. Hva som er blitt oppdaget og hva som er forskjeller blir drøftet og sett opp imot litteraturstudiene. Etter dette vil problemstillingen bli besvart. Helt til slutt vil det komme anbefaling til videre forskning og arbeid.

1.4 Avgrensing

Denne oppgaven tar for seg bruk av eksperimentell testmetode. Metoden er valgt på bakgrunn av omfanget til oppgaven, våre kunnskaper om fluiddynamikk og propelldesign, og skolens forskningsarena. Det blir brukt 3D-print, kavitasjonstunnel, høyhastighets kamera og hydrofon for målingene.

Oppgaven sammenlikner toroidpropellen med en 2-bladet-propell basert på designet til tidligere kadett Andersen i sin bacheloroppgave fra 2021 om en antisyngepropell. En

tilsvarende bladprofil som denne blir brukt for å få et godt sammenlikningsgrunnlag.

Oppgaven er en komparativ studie og ikke en oppgave for å optimalisere toroiddesignet.

Støy og kavitasjon er sentrale deler å undersøke for toroiddesignet. Støymålingene blir sammenlignet opp mot hverandre, men ikke dypdykket inn i opphavet. Dette fordi støy og kavitasjon er svært komplekst og ville tatt en hel oppgave i seg selv om det skulle blitt sett nærmere på. Oppgaven tar derimot hensyn til konklusjoner og vurderinger gjort i bacheloroppgaven til Kadettene Omholt og Espedal fra 2022 om støy i skolens kavitasjonstunell.

2 Litteraturstudie/propellteori

Optimalisering av propeller er av stor verdi grunnet de økonomiske besparelsene det kan føre til. «Kappel» propellen er eksempel på et design som har løftede overflater mot sugesiden av propellen og blader med relativ høy skew. Dette gjør at propellen innehar visse geometriske likheter med en toroidpropell. Økningen i effektivitet på denne typen propellen sies å være rundt 6% (Nielsen et al. 2012) Dette betyr at løft-flatene er plassert på ikke-plane overflater, noe som skiller seg fra konvensjonelle propeller (Nielsen et al. 2012). I 2012 adapterte MAN Diesel & Turbo denne typen i deres propulsjonssystem.



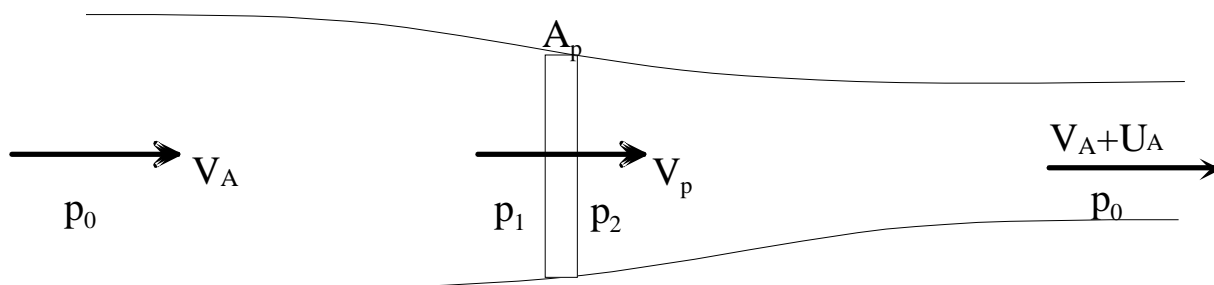
Figur 3: 1:28 skalert modell av en Kappel Alpha 6.4 m diameter propell (The Motorship 2012b).

2.1 Bakgrunn for valg av toroidpropeller

En tilnærming for å forklare hvordan propeller produserer fremdrift er ved å benytte energi konservering. Daniel Bernoulli ga ut sitt teorem om væsker, trykk og hastighet i boken *Hydrodynamica* i 1738. Leonhard Euler bygget videre på dette sin publikasjon *Principia motus fluidorum* i 1752. (Euler, 1761)

For enkelthetens skyld blir propellen betraktet som en skive som akselerer strømmingen, uten å tilføre strømmingen tangentielle hastigheter bak propellen. I denne forenklete modellen antas det også at bladantallet er uendelig. For å gjøre det enda enklere, vil innstrømningshastigheten være jevnt fordelt over radien, og den aksielle tilleggshastighet bak propellen er også jevnt fordelt langs radien. Nå, er det mulighet til å studere sammenhengen mellom løftkraft og virkningsgrad på en relativt enkel måte. (Steen, 2007, pp. 83-86)

Det benyttes endring i bevegelsesmengde som uttrykk for propellens løftkraft. Steen, 2007, p.



Figur 3: Bernoulli prinsippet

Formel 1: løftkraft

$$T = \rho \cdot \dot{Q} \cdot U_A$$

Formel 2: volumstrøm gjennom propellskiven

$$\dot{Q} = A_P \cdot V_P$$

Uttrykker vannhastighet gjennom propeller (V_P) og industert hastighet (U_A) ved Løft (T) og vannhastigheten (V_A)

Formel 3: Bernoullis ligning foran propellen

$$\frac{\rho}{2} V_A^2 + p_0 = p_1 + \frac{\rho}{2} V_P^2$$

Formel 4: Bernoullis ligning etter propellen

$$p_2 + \frac{\rho}{2} * V_p^2 = \frac{\rho}{2} (V_A + U_A)^2 + p_0$$

Formel 5: trykkendring over propellbladet

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \frac{\rho}{2} * [(V_A + U_A)^2 - V_p^2] + (V_p^2 - V_A^2)$$

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \cdot [V_A^2 + 2U_A \cdot V + U_A^2 - V_A^2] = \frac{\rho}{2} \cdot 2 \cdot U_A \cdot \left(V_A + \frac{U_A}{2}\right)$$

$$\Delta p = \rho * U_A * \left(V_A + \frac{U_A}{2}\right)$$

Formel 6: nytt uttrykk for Løft

$$T = A_P \cdot \Delta p = \rho * U_A * A_P * \left(V_A + \frac{U_A}{2}\right)$$

Formel 7: nytt uttrykk for Volumstrøm

$$\dot{Q} = A_P \cdot \left(V_A + \frac{U_A}{2}\right)$$

Formel 8: nytt uttrykk for hastighet gjennom propellskiven

$$V_P = V_A + \frac{U_A}{2}$$

Ved hjelp av disse uttrykkene, er det mulig å se på virkningsgraden til propellen. Først ses det på det arbeidet propellen skal utføre pr tidsenhet, propelleffekten:

Formel 9: effekt levert av propellen

$$P_T = T \cdot V_A$$

For at propellen skal utføre dette arbeidet, må den tilføres en effekt:

Formel 10: Effekt tilført propellen

$$P_D = \frac{\rho}{2} * \dot{Q} * [(V_A + U_A)^2 - V_A^2]$$

Formel 11: ideell virkningsgrad

$$\eta = \frac{P_T}{P_D} = \frac{T \cdot V_A}{\frac{\rho}{2} * \dot{Q} * [(V_A + U_A)^2 - V_A^2]} = \frac{2}{2 + \frac{U_A}{V_A}}$$

Fra definisjonen, for at propellen skal levere likt løft, T , må induisert hastighet, U_A gå ned. Den ideelle virkningsgraden vil øke. Generelt vil en propell som fanger mer vann og gir lavere hastighetsøkning, gi høyere virkningsgrad. Tanken bak toroidpropellen er at den trekker inn mer vann fra en større radius enn en tradisjonell propell, og dermed øker volumstrømmen, \dot{Q} .

2.2 Kavitasjon

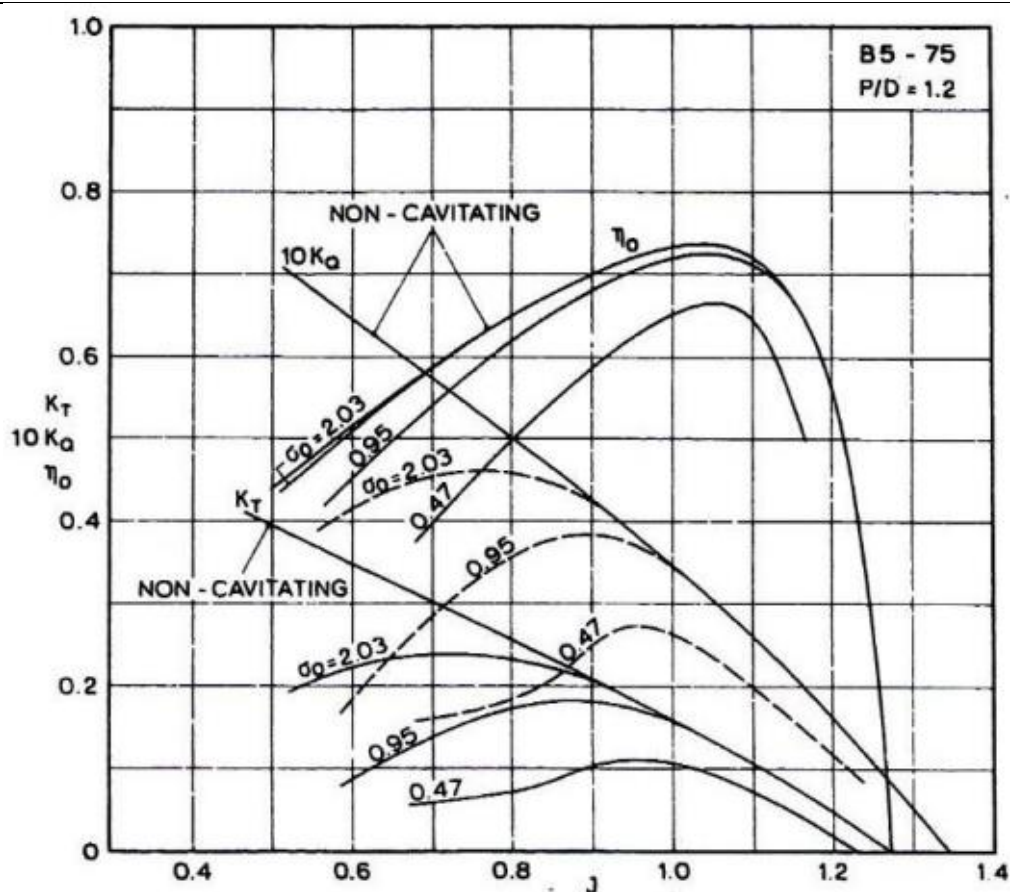
Kavitasjon oppstår når vann koker ved lav temperatur på grunn av redusert trykk. Denne situasjonen kan forekomme ved normal sjøvannstemperatur, spesielt i forbindelse med propeller og lignende, hvor kombinasjonen av høye hastigheter og sterke hastighetsgradienter skaper et lavt trykk.

“The cavitation sheet on a propeller or hydrofoil alters the water flow, effectively changing the geometry and making it less efficient.” (Ommundsen, 2015)

Kavitasjon kan feste seg på propeller, rør og foiler under spesifikke forhold. I sjøvann finnes det mange "kavitasjonskjerner" i form av små partikler og mikroskopiske bobler fylt med luft og vanddamp. Når trykket rundt en slik kerne blir lavere enn vanddamptrykket, dannes det en boble av vanddamp – en kavitasjonsboble. Ved vedvarende lavt trykk vil boblen vokse og potensielt smelte sammen med nabobobler, skape et større sammenhengende volum av

vanndamp, kjent som en kavitet. Betingelsene for kavitasjon er derfor at trykket er lik eller mindre enn vanndamptrykket, samtidig som tilstrekkelige kavitasjonskjerner er til stede. I praksis vil det alltid være kavitasjonskjerner til stede, og forholdet mellom begynnende kavitasjon og mengden av kavitasjonskjerner i vannet er viktig for testing av modellpropeller. (Steen, 2007, pp. 99-104)

Vanligvis forsøker man å unngå eller minimere kavitasjonen, da den kan føre til flere negative konsekvenser. For det første reduseres løftet på profilen, noe som kan føre til redusert ytelse. Samtidig øker motstanden på grunn av kavitasjonsboblene som dannes og kolliderer på profilen. Denne økte motstanden og reduksjon i løftet vil senke virkningsgraden til propellen. Kavitasjon kan generere intense sjokkbølger når de kolliderer, dette kan føre til at materialer og struktur i nærheten kan begynne å erodere. Det vil igjen føre til redusert levetid på materialet. Sjokkbølgene lager også enormt med støy. Støyen kan forplante seg i et bredt spekter av frekvenser og vil som regel overdøve annen støysignatur fra et fartøy. For å unngå kavitasjon er det viktig med nøyaktig propelldesign. Det er også en grunnregel å kjøre med lavere stigning og turtall for å redusere kavitasjonen. Det finnes ulike former for kavitasjon og vi kommer til å se nærmere på. (Carlton, 2012, pp. 217-222) Følgende figur viser reduksjonen i virkningsgrad ved synkende kavitasjonstall. (Steen, 2007, p. 102)



Figur 3: effekt av kavitasjon på løft og moment

Tuppkavitasjon

Kavitasjonen som danner seg på tuppen av bladene som følge av den høye hastigheten over bladet. Den blir påvirket av rotasjonshastighet, stigning og kraft i bladene. Man kan se denne kavitasjonen som en forlengelse av der bladene har gått gjennom fluidet. Dette er ofte den første kavitasjonen som forekommer (Carlton, 2012, p. 224)

Boblekavitasjon

Oppstår som regel i midtre del av bladet. Denne type kavitasjon er større bobler som danner seg fra leading-edge og bakover. Bakgrunnen for kavitasjonen er helningen på bladet og tykkelsen. Vil ofte forekomme med høy belastning og vannhastighet (Carlton, 2012, p. 224)

Lagkavitasjon

Oppstår på sugesiden av bladet etter ledende k ant. Denne kavitasjonen vil ligge relativt konstant og v ere over et st orre omr ade p a bladet. Det oppst ar fordi sugesiden av bladet f ar s a lavt trykk at kavitasjon oppst ar. (Carlton, 2012, p. 224)

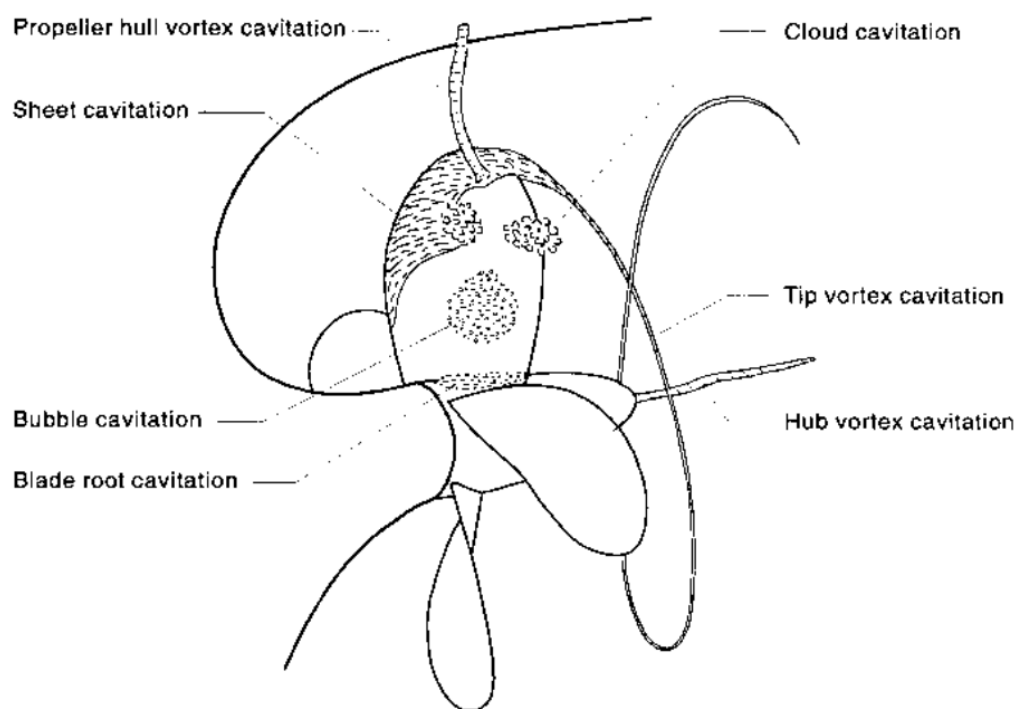
T akekavitasjon

Danner seg ofte etter en stabil lagkavitasjon. T akekavitasjonen vil splittes opp i mindre bobler som imploderer og skader propellen. det f ar navnet sitt fordi den kan ses som en t ake som ligger p a propellen. (Carlton, 2012, p. 224)

Bossvirvel kavitasjon

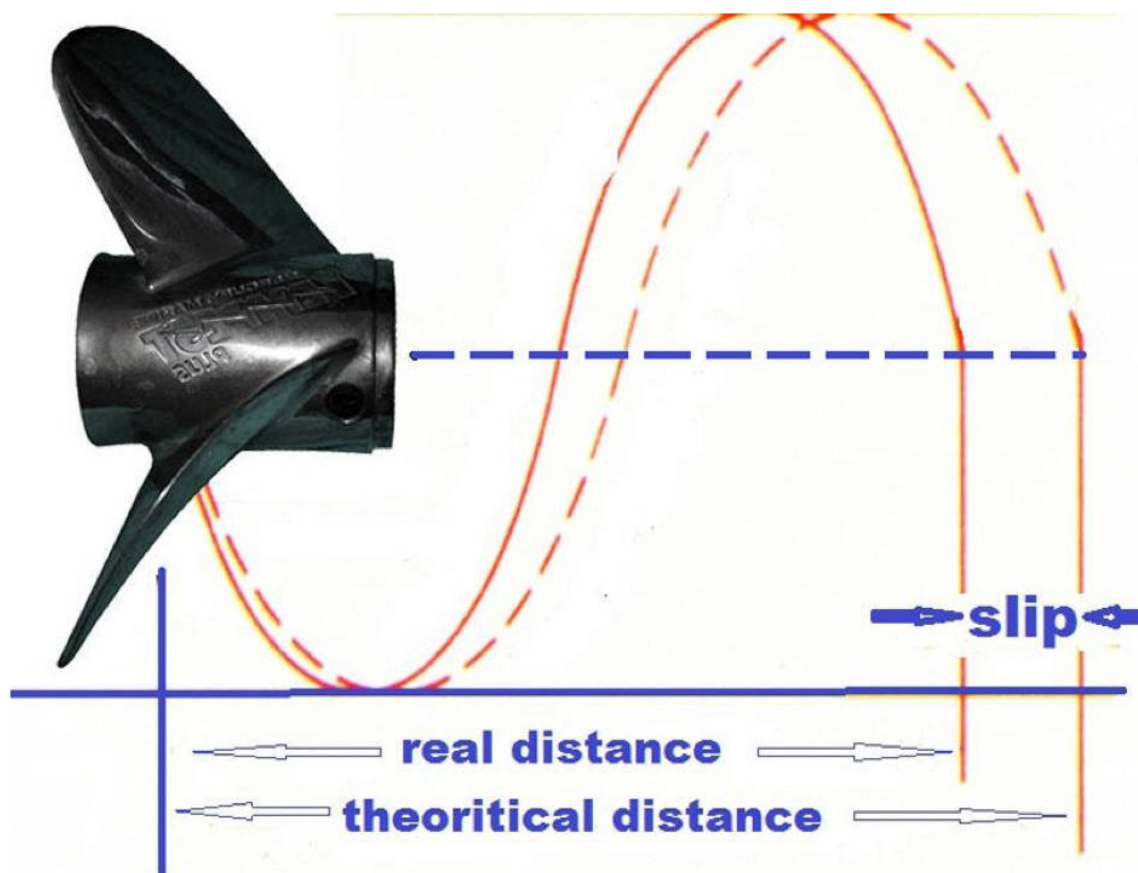
Forekommer som en kombinasjon av virvlene fra bladene som m otes i forlengelse av roten. Det vil se ut som en lang tr ad hengene bak propellen i senter. Hver for seg vil n odvendigvis ikke virvlene fra bladene kavitere, men n ar de m otes samlet bak roten begynner kavitasjonen. (H oyksolen p a Vestlandet, u.d.) Den vil ha like mange «tr ader» som antall blader. (Carlton, 2012, p. 224)

Bacheloroppgave skrevet av tidligere kadett Amundsen, (Amundsen, 2019), p a studie av *Boss-virvel reduksjon* peker p a fordeler og ulemper med ulike boss-design. I de fleste designene som blir testet, blir bossvirvel redusert eller eliminert ved tilsvarende belastning. Metoden er ofte  a kutte bosset og endret trykkforl opet langs bosset slik at virveldannelsen blir brutt opp eller redusert. Studien testet ulike bossformer for  a unders oke reduksjoner i virvelen og p avirkning p a propellens virkningsgrad. Et av designene fikk ekstra oppmerksomhet, og er under utvikling i industrien. I oppgaven blir det kalt, *avkappet konus med foil*, Wartsila kaller det for *EnergoProFin* (Wartsila, u.d.) og Mol Techno-Trade, Ltd kaller det for *Propeller Boss Cap Fins (PBCF)* (Mol Techno Trade ltd, u.d.). Det reklameres for at dette designet vil kunne  oke virkningsgraden fra 1-5%. Omfanget av designet dr oftes ikke, dog er muligheten  a koble disse design til videre studier p a toroidpropeller tilstede.



Figur 44: ulike former for kavitasjon (ITTC, 2014)

2.3 Slipp



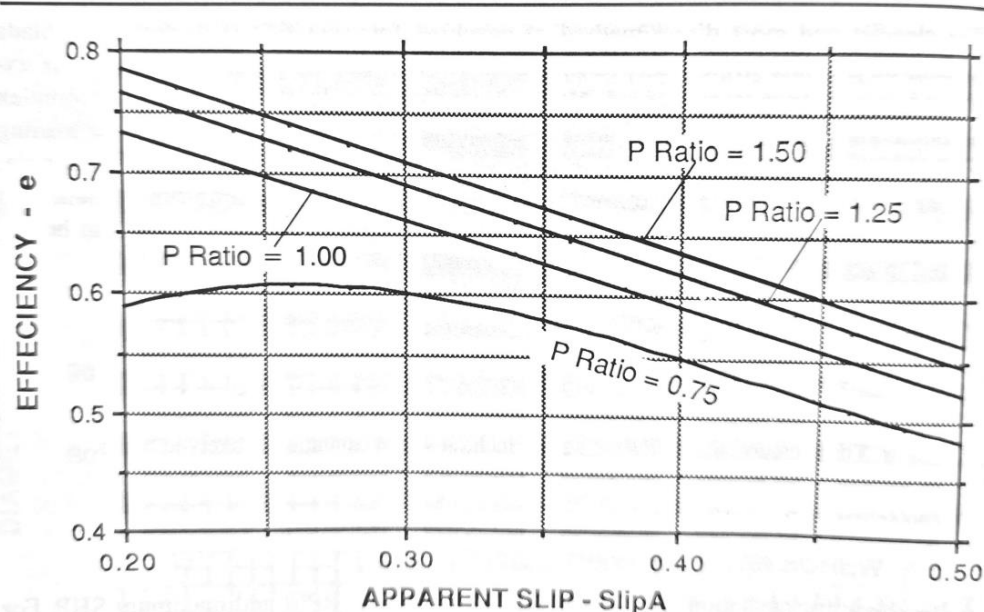
Figur 55: visuell forklaring på slipp

Slipp handler om hvor langt framover propellen teoretisk sett beveger seg, opp imot hvor langt den reelt går. (e-Ribbing, 2022) Propellen skrur seg gjennom vannet og driver fartøyet framover. Om en propell hadde hatt 0 slipp, ville den ikke produsert noe kraft. Den hadde kun spinnert rundt i vannet. Optimalt sett vil man ha litt slipp, men ikke for mye. Om man har for mye vil virkningsgraden gå ned fordi mye av energien propellen produserer blir sløst.

Sharrow Marine reklamerer med sine toroidpropeller at de drastisk reduserer slipp og at dette bidrar til en stor økning i virkningsgrad. (Sharrow Marine, 2022)

Illustrasjonen viser en approksimering av virkningsgraden som funksjon av slipp (Gerr, 2001, p. 58)

CHART 5-6 APPROXIMATE EFFICIENCY VS SLIP



Figur 66: approksimering virkningsgrad vs slip

2.4 Støy

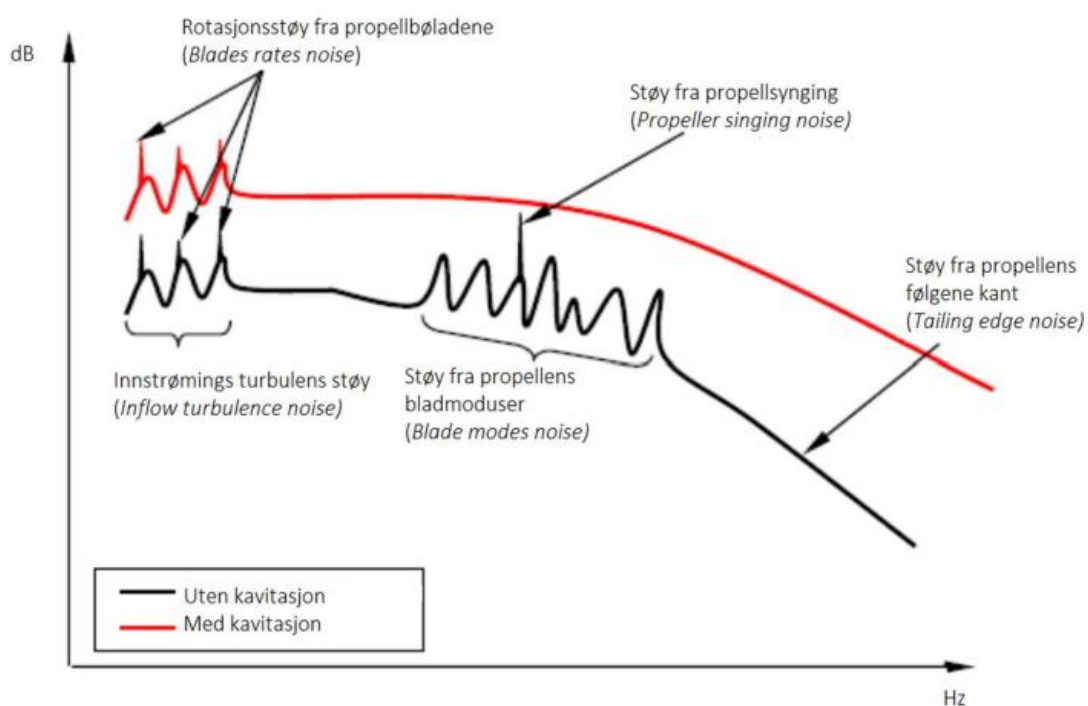
Vann absorberer mye bedre høfrekvente lyder enn lavfrekvente. For både marinefartøy og kommersielle fartøy er det betydningsfullt å ha stillegående propeller. For marinen handler det om å ikke bli detektert, og for kommersielle fartøy det et fokus på å ikke forstyrre marint liv, passasjerer og mannskap. Begge området har fordel av å lage mer stillegående propeller. (Ahmed, 2020)

John Carlton definerer 5 hovedmåter en propell produserer støy på: (Carlton, 2012, p. 266)

1. deplacment av vann
2. trykkforskjellen mellom trykk og sugeside
3. strømmingen over bladene
4. den periodisk variable innstrømmingen til propellbladene som medfører trykkvariasjoner.
5. kavitasjon

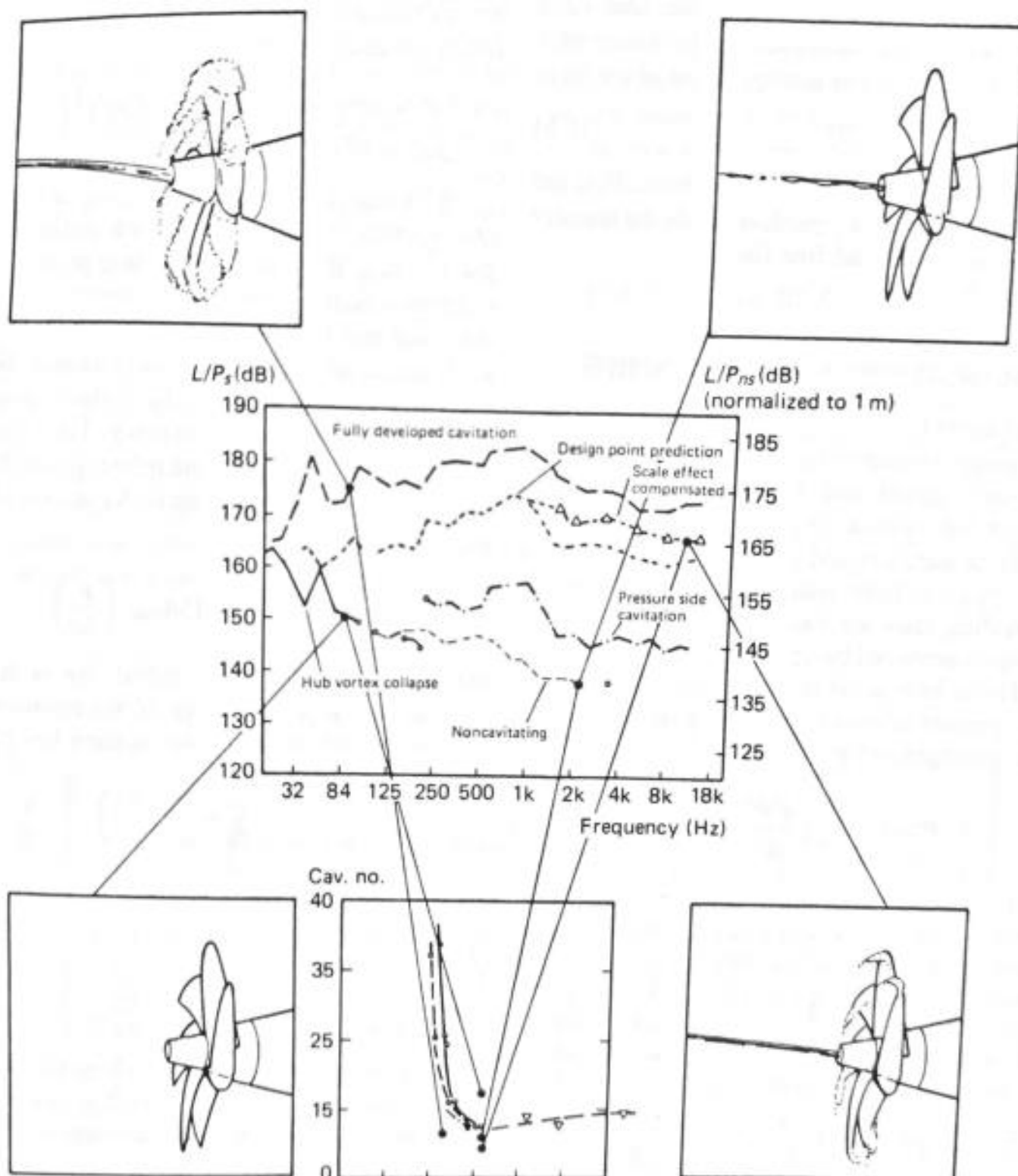
Det deles mellom propellyder med og uten kavitasjon. Når propellen kaviteter, vil det utgjøre den største delen av hva et fartøy slipper ut av lyd. Kavitasjonslyden stammer fra at boblene

imploderer og kan etterlate seg støy som brer seg i spekter opp til 1MHz. (Brien & Michels, 2020)



Figur 77: lydspekter med og uten kavitasjon

Grafen nedenfor viser de ulike formene for kavitasjon og hvor i frekvensdomene de ligger. Det gir forskjellig utslag på de forskjellige kavitasjonsformene. Ettersom fremdriftstallet endrer seg, vil det variere i frekvens og amplitude. (Carlton, 2012, p. 270)



Figur 88: Lydbilde til forskjellige kavitasjonsformer

MIT viser at deres luft toroidpropell hadde vesentlig lavere lyd i visse frekvenser noen andre konvensjonelle propeller. (MIT LINCOLN LABORATORY, 2022) Sharrow Marine reklamerer på sine hjemmesider at deres design drastisk reduserer støy, men viser kun til et videoklipp der de setter en konvensjonell propell opp mot sin egen. (Sharrow Marine, 2022) Disse kildene gir ikke henvisninger videre til publikasjoner eller annen vitenskapelig forskning eller litteratur. Vi ser derfor på det som er gitt som reklamemateriell, men også som et sted å hente inspirasjon til vårt eget arbeid.

2.5 Propellkarakteristikk

For å kunne sammenlikne propellegenskaper opp mot hverandre er det flere dimensjonsløse koeffisienter som er vanlig å bruke. Koeffisientene sier noe om egenskapene til propellen i et gitt strømningsbilde, det gir et grunnlag for sammenligning med andre propeller.

Innstrømningshastigheten, V_A , blir ansett konstant over radien.

Formel 12: Fremgangstallet

$$J = \frac{V_A}{n * D}$$

Formel 13: Løftkoeffisient

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

Formel 14: Dreiemomentkoeffisient

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

Formel 15: Virkningsgrad åpent vann

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

Virkningsgraden ved et gitt turtall er avhengig av propellbelastningen K_T og framgangstallet J . Ved økende belastning øker K_T , J synker og K_Q øker. Dersom produktet av $K_T \cdot J$ øker mindre enn K_Q vil virkningsgraden gå ned.

For å regne på forhold når det gjelder fluidet i seg selv, brukes Reynoldstallet ved $0,7R$ for å representere hele propellen. Der $V_{0,7R}$ er den forenklede formelen for den relative hastigheten til fluidet når propellen spinner, $0,7$ radius ut fra senteraksen. Reynoldstallet sier noe om turbulensen i strømmingen. Grunnet forskjellen i korde $c_{0,7}$ på propellene har den konvensjonelle propellen høyere R_n .

Formel 16: Reynoldstallet over propellbladet ved $0,7R$

$$R_n = \frac{c_{0,7} * V_{0,7R}}{\nu}$$

Graden av kavitasjon kan karakteriseres ved en dimensjonsløs størrelse, her det lokale, gjennomsnittlige kavitasjonstallet over bladet ved $0,7R$ gitt ved σ som definert:

Formel 17: kavitasjonstallet

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

3 Framgangsmåte

Med bakgrunn i innhentet kunnskap fra litteraturstudien er premissene lagt for å starte design, produksjon og testing av propellene. For å finne svar på hvilke egenskaper en toroidpropell har i forhold til en konvensjonell propell, er det valgt en praktisk eksperimentell tilnærming. En kort gjennomgang av fremgangsmåten blir beskrevet, og i vedleggende er det mer utfyllende og detaljerte utredninger.

Design av propellene tar utgangspunkt i propell laget av kadett Andersen i 2021, denne bygger på E779 profilen. Design gjøres i Solidworks med utgangspunkt i veiledning fra internett og faglærere. Propellene designes med lik diameter, vått areal, stigning og bladantall. Designet skal passe inn i kavitasjonstunellen.

Toroidpropeller har svært mange komplekse fasonger, av den grunn blir propellen designet med inspirasjon fra bilder og videoer på nettet av allerede eksisterende toroidpropeller.

Produksjon av propellene gjøres av skolens 3D skriver (Markforged Mark Two) i fiberarmert nylon (ONYX). Propellen kontrollmåles og sjekkes opp mot tegningen. Overflatene pusses for å få en lik ruhet.

Testing foregår i skolens kavitasjonstunell. Testingene foregår under mest mulig like forutsetninger for de to propellene. Løft og dreiemoment registreres ved hjelp av dataprogram. Kavitasjonsforløp undersøkes ved hjelp av High speed kamera. Støymåling gjennomføres av hydrofon montert i testseksjonen.

Evalueringen av propellene tar utgangspunkt i innhentede propellkurver, støydata og film fra High speed kamera. Propellene sammenlignes opp mot hverandre

4 Design

Påfølgende kapittel tar for seg de ulike designaspektene til propellene som er tatt hensyn til. Det blir gjennomgått hvordan design og produksjon har foregått, i tillegg til hvilke forhold som ligger bak. Videre blir det forklart teknisk framgangsmåte. Vurderinger underveis knyttes opp mot enkel propellteori for å støtte valgene våre.

4.1 Premisser

Design av propell er ikke en enkel oppgave, spesielt uten gode forkunnskaper i anvendt 3D program, *Solidworks*. Til støtte, var Youtube er et effektivt hjelpemiddel til veiledning og inspirasjon i designprosessen. *OPENPROP*, *AKPD* er «open-source» analyse program som kan nyttes til propelldesign og simulering. I tillegg, kan propeller designes med CFD teknologi som gir store fordeler.

I propelldesignene i vedlegg E og F er det mulig å endre følgende parameter som vil ha direkte innvirkning på strømningsforhold: Foil fasong (T , C , ϕ , R_{LE}) forskyvning radielt og vertikalt, (hvor mange grader senter av propellbladene er vridd), samt diameter og utforming på boss. (Solidworks, 2023)

4.2 Design - Profil

Designet av bladprofilen bygger på INSEAN E779A profilen, men er justert for enklere utskrift med 3D skriver. De neste punktene tar for seg forskjeller og likheter på propellene, samt designmentalitet på propellbladene.

4.2.1 Konvensjonell propell

Propellen er konstruert som en konvensjonell propell fra bladrotten til tuppen av bladet. For å tilpasse propellen strukturelt og styrkemessig ble tverrsnittfasongen på foil skalert ved alle tverrsnitt. Ut ifra teori, vil dette føre til større friksjon over bladene, økt kavitasjon, mindre vibrasjon, høyere løftekraft, og lavere virkningsgrad. Anti-syngekanten tilhørende propellen til tidligere kadett Andersen ble også fjernet for å ikke interferere med testresultatene.

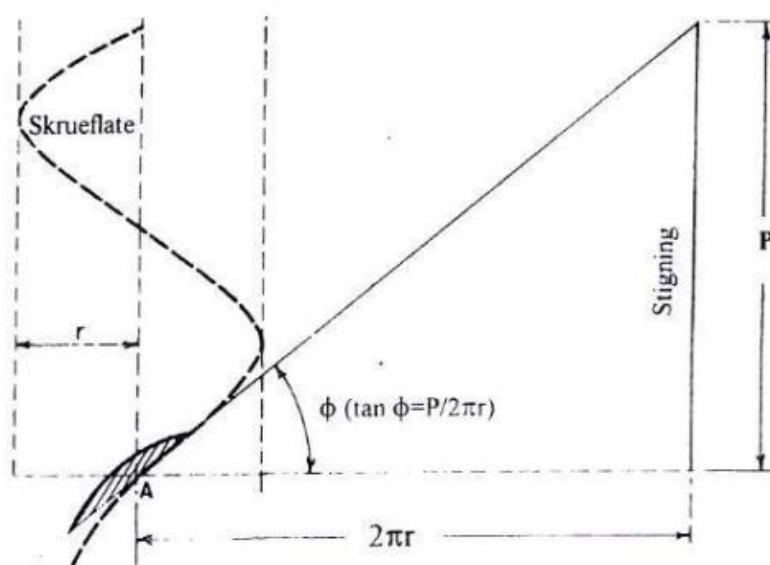
4.2.2 Toroidpropell

Propellen består i all hovedsak av to «konvensjonelle» blader som er forbundet med en bue. Bladet strekker seg ut til $r/R=0,7$ grunnet buen. Designet danner utgangspunkt for å kunne sammenligne med propellen til Andersen, tilhørende lik foilgeometri, stigning og bladareal. Buen konstrueres mellom 2 blader. Foilfasongen vil ideelt holdes tynn for minke friksjonsmotstand i vannet.

4.2.3 Stigning

Propellens geometriske stigning, på engelsk, pitch, er strekningen propellen går fremover når den har gått en omdreining, dersom vannet var et fast materiale. Propeller som skal bevege seg fremover i høyhastighet har høy stigning, mens propeller som skal arbeide ved lavere hastigheter nytter mindre stigning. En konstant stigning-propeller er en propell som vil variere bladvinklene sine ut ifra hvor langt ut på bladet man er, dette for å få likt fremgangstall over propellen. (Carlton, 2012, pp. 30-32)

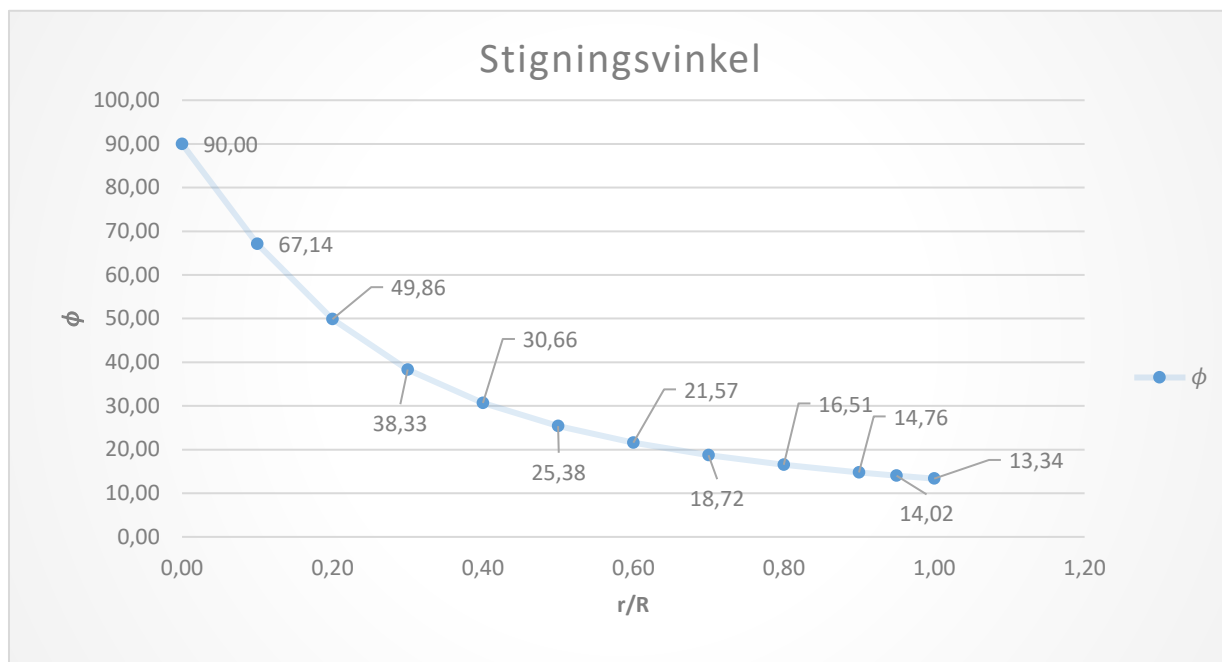
Det vil være en forskjell på den geometriske og hydrodynamiske stigningen. Den største forskjellen på de to propellene er at toroidpropellen ikke oppnår mindre enn $\phi = 18,7$ i angrepsvinkel. Den konvensjonelle oppnår en angrepsvinkel på $\phi = 13,34$ på tuppen. Buen vil i tillegg kreve energi å dra rundt. Den hydrodynamiske stigningen vil derfor være lavere på toroidpropellen.



Figur 99: forklaring på stigning (Steen, 2007, p. 62)

Formel 18: stigningsvinkel til bladet

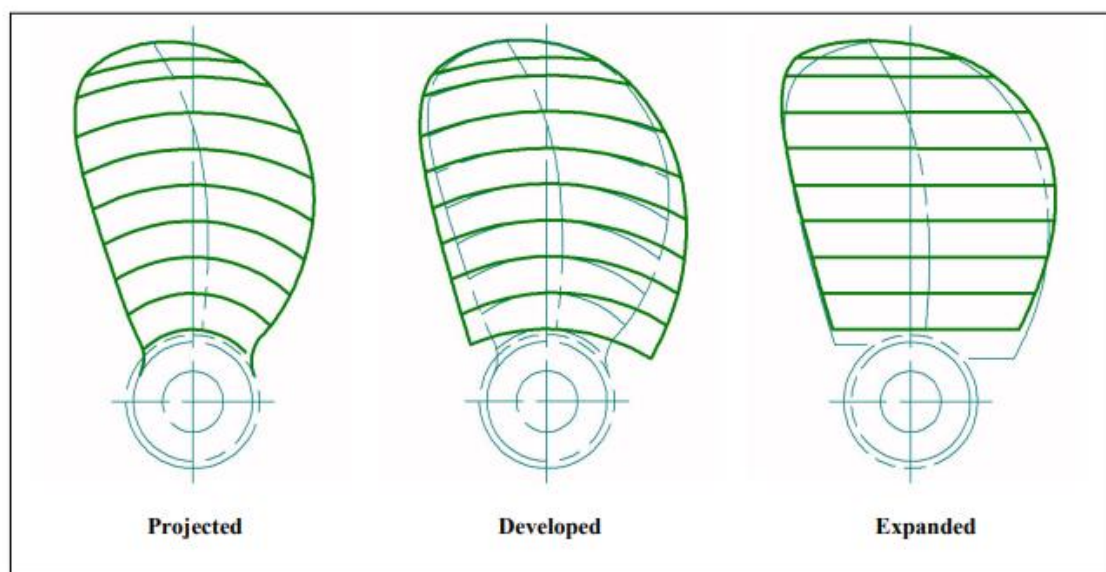
$$\tan(\phi) = \frac{P}{2\pi r}$$



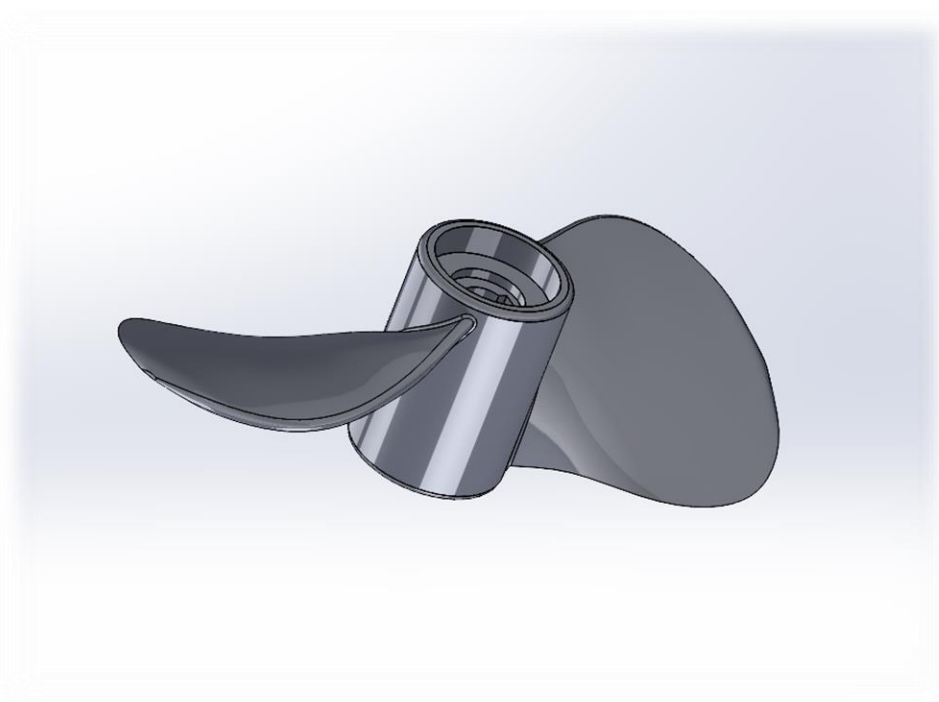
Figur 1010: Stigningsvinkel vs. r/R

4.2.4 Bladareal

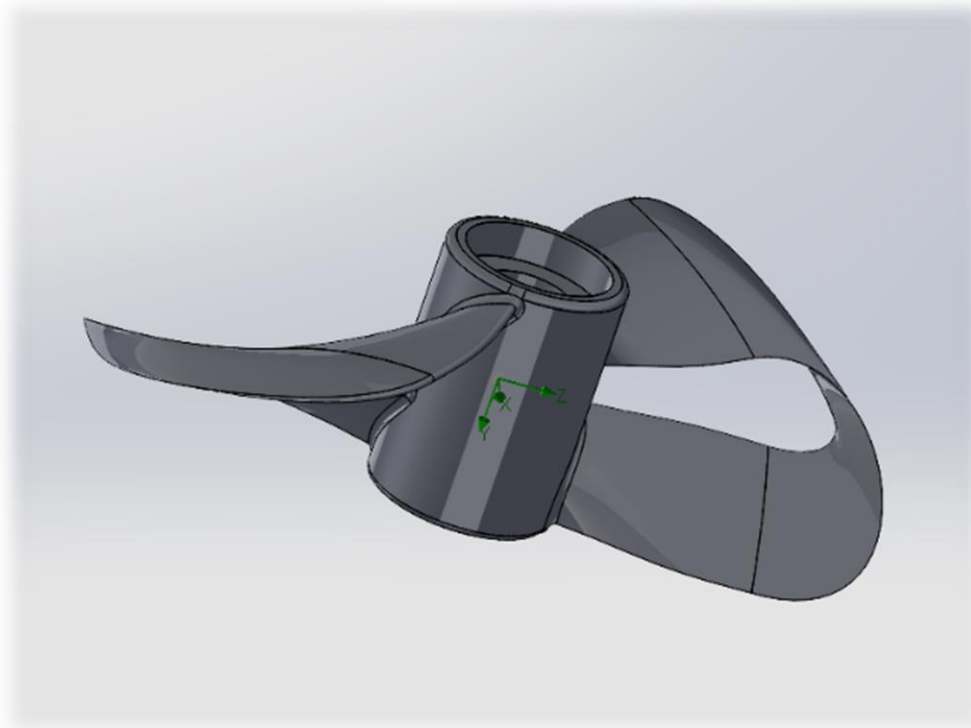
Bladareal har en direkte korrelasjon med produsert kraft og kavitasjon. Fordi propellerblader har mye kurvatur er det vanlig å definere forskjellige mål på bladarealet. Det skilles mellom projisert- (A_P), ekspandert- (A_E) og utviklet (A_D) bladarealer. (Carlton, 2012, pp. 35-38) A_P er arealet om det lyses et lys aktenfor propellen og skyggeleggingen måles. A_D er når konturen til bladet legges ut og området den dekker måles. A_E er A_D brettet det ut slik at parallelle linjer formes ved hver radius. (ITTC, 2014, p. 3) «Vått areal» er det arealet som blir brukt i denne oppgaven som definerer «bladareal». Definisjonen er summen av alle flatene til selve bladet og boss som berører vann.



Figur 1111: forskjellige bladareal (HydroComp Knowledge Library, 2007)



Figur 12: Konvensjonell propell



Figur 13: Toroidpropell

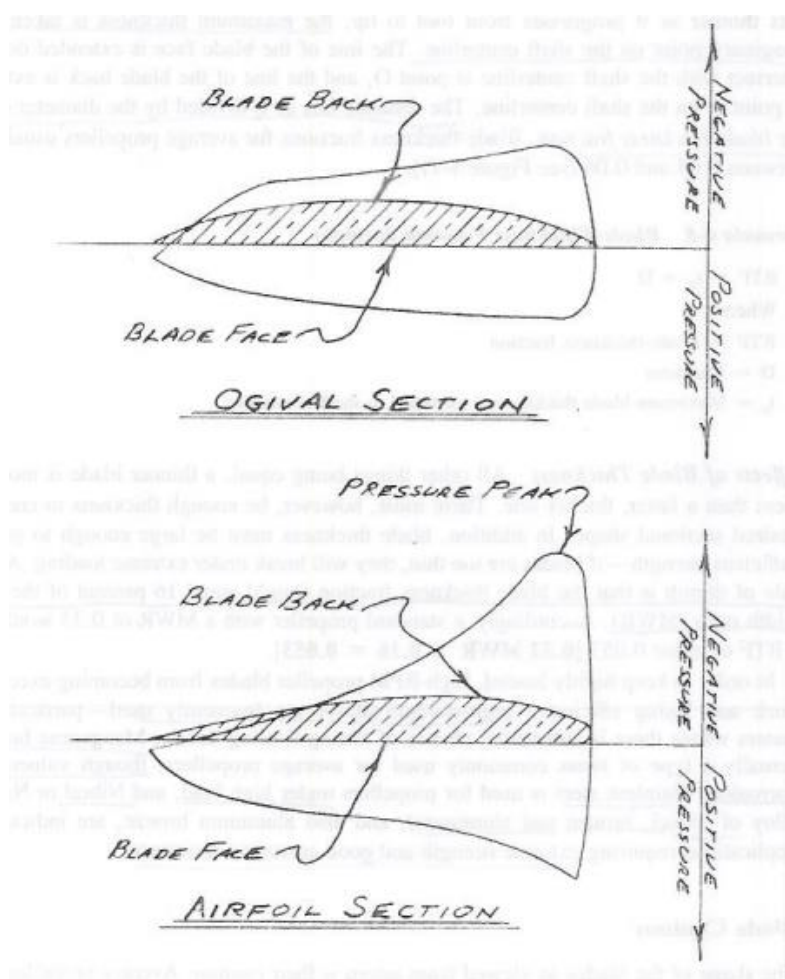
4.2.5 Propellprofil og bladkontur

Bladkontur er formen på bladene sett aktenfra. Det forteller om hvordan korden fordeler seg ut i propellbladets radier og hvor tykkelsen kan bli observert ved ulike lengdene. Fordi bladene beveger seg raskest ytterst, kan det bli produsert mer kraft der, det er ønskelig å få tilstrekkelig bladareal lengst mulig ut. Konturen på det konvensjonelle bladet bærer preg av å ha en lang korde i forhold til diameteren. Dette vil gi den høyere friksjon mot vannet. Det styrende i utformingen av bladarealet er vått areal på toroidpropellen.

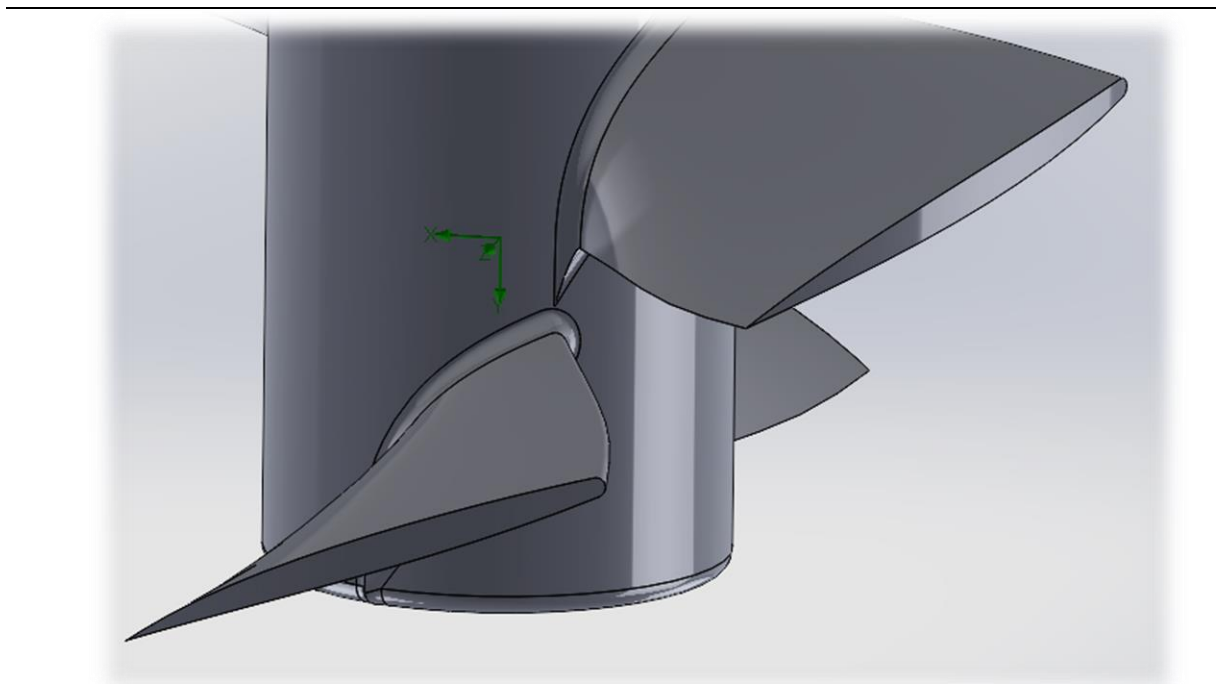
Figur 14 og 15 nedenfor er konstruert etter kontrollmålinger av Andersen sin propell. Solidworks verktøy for måling ble brukt. *Figur 15* viser største tykkelse og korde av foiltverrsnittet brukt i begge propellene. Bladfasongen er lagt ut i et vinkelrett plan på sentralaksen og følger en rett linje ut til radien. Dette gir mindre kontroll på den faktiske foilfasongen som vannet er i kontakt med. Strømmingsmessig vil vannet ha et annet forløp grunnet radiell påvirkning.

I design prosessen har er følgende tenkt: Tykkelsen av foilen følger en lineær fasong fra bossroten til bladtuppen. Bakgrunnen for dette er tilstrekkelig stivhet i bladet, noe som vil redusere strekk og bøyepenninger ved roten av bladet. Propellene ble konstruert med en 2mm radius i overgangen fra blad til boss for å kunne minimere spenninger.

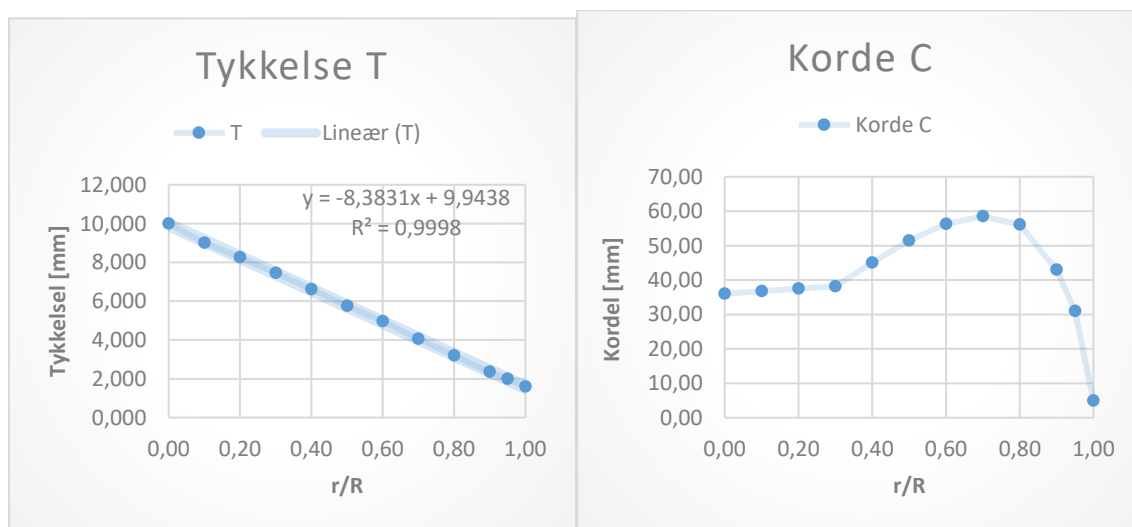
Tverrsnittet til en marinepropell har ofte en ogival fasong. Den har en flat trykkside og en symmetrisk sugeside. Dette gjør at det ikke blir så store trykkforskjeller på ledende kant og unngår derfor i større grad kavitasjon. En luftfoil vil ha større trykkforskjeller på ledende kant og ofte ha en konveks trykkside. (Carlton, 2012, pp. 39-44) (Gerr, 2001, p. 37)



Figur 14: Trykkfordeling basert på bladfasong



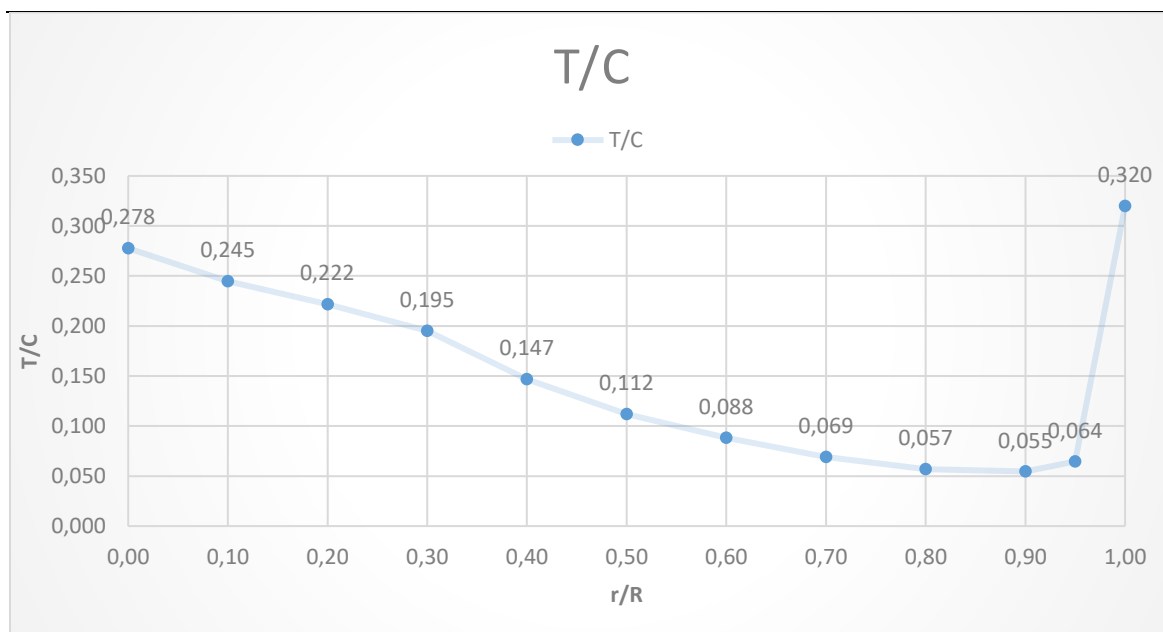
Figur 14: Tverrsnittfasong ved 0,7R



Figur 15 Tykkelse av foil r/R

Figur 16: Korde vs r/R

Tykkelsen følger en lineær fasong langs radien. Figur 18 viser at T/C forholdet øker betraktelig ved $r/R=1$, konsekvensen av dette er at bladet avsluttes mer rund i tuppen.



Figur 1817: T/C vs r/R Tykkelse over Korde fordeling over radien. (fra original propell av tidligere kadett Andersen)

4.3 Design av propellboss

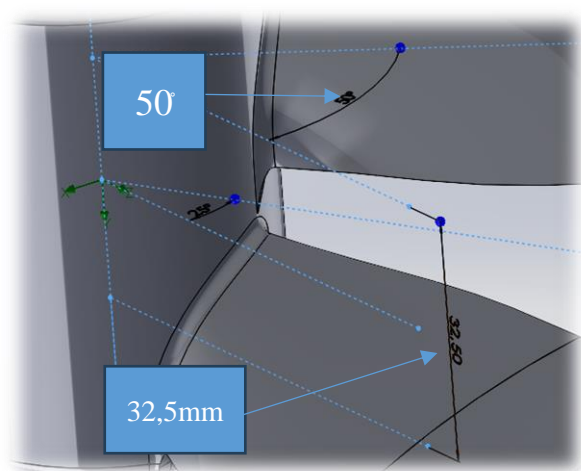
Propellbossen er av ekstra interesse for å få den til å passe inn med det doble bladet toroidpropellen bringer. Noen tilpasninger har blitt gjort fra propellen til Andersen.

Propellboss som passer med akslingen i tunnelen, er på 35mm i diameter. Propellene har en propellboss på 45mm for å få tilstrekkelig plass til begge bladene. En større boss har større overflate, som medfører mer viskøs motstand. Størrelsen ble valgt med hensyn på å kunne ha nok innfestning til bladene til den toroidpropellen for å oppnå mer stivhet. Økt bossdiameter kan påvirke tykkelsen på bossvirvelen grunnet økning i trykkfallet inn mot senter av propellbosset i akterkant. Dette vil føre til et større tap for begge propellene. Av hensyn til likhet i egenskaper ble det valgt å ikke ha avrundet boss i kontakt med bladet slik som i Andersens oppgave (Andersen, 2021). Dette vil gjøre at en større del av bladet vil være i kontakt med vannet. Det vil også kunne gi virveldannelser i overgangen fra bossfronten og til flaten ved bladroten.

4.3.1 Radiell og vertikal forskyvning

Bladene er konstruert etter senterlinjer som kan endres. Den radielle forløftningen ble satt til 50° og den aksielle forløftningen satt til 32,5mm. Strømningsmessig er det vanskelig å si hva

som gir best utslag. Derfor er det valgt å studere bilder av propellene til Sharrow Marine og hentet inspirasjonen for plasseringen av bladene i forhold til hverandre. Fra analyse av bilder og videoer til Sharrow Marine MX serien, er det tydelig det akre propellbladet går i forlengelse av det forre. Tanken er at fluidet som kommer over lavtrykksiden på foilen og avløses over det første bladet, kan påvirke fluidet som kommer over lavtrykksiden på det neste bladet. Hvordan dette vil påvirke løftet på det akre bladet er ukjent. Valget blir derfor en praktisk tilnærming.



Figur 1918: bladforløftning



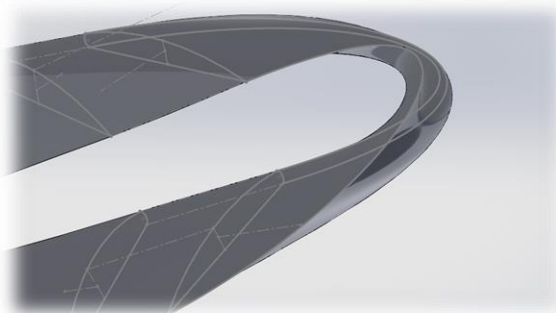
Figur 2019: bladforskyving

4.4 Bue

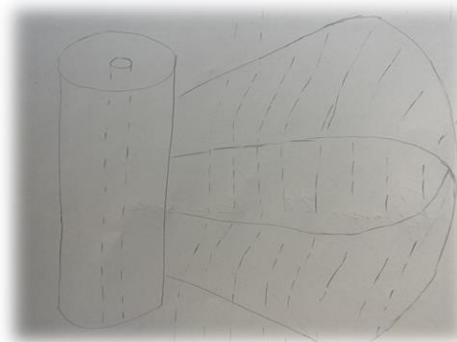
Buen på toroidpropellen er det aspektet som gjør at den skiller seg fra konvensjonelle. Buen er konstruert fra $0,7R$ ved å tegne tre linjer som strekker seg ut parallelt med bladkanten, hvorav én går ut fra følgende kant og to går ut fra ledende kant. Buen er konstruert med tanke på å gjøre den mest mulig slank, som vil minke friksjon i vannet. Et forhold å bemerke seg er at tykkelsen ikke blir så tynn som ønskelig grunnet hvordan skriver planer materialet.

Selve fasongen på buen har betydning for hvordan den toroidpropellen vil fungere. Det er ønskelig at fluidet skal trekkes litt innover slik at buen fungerer som en motsatt «winglet» til flyvinger. Det tenkes at å gjøre dette vil gjøre at det skapes mindre tuppkavitasjon fordi fluidet ikke kastes utover, men trekkes innover.

Tuppen av bladet har til hensikt å fange inne vannet og avslutte bladet. Tanken er at det skal minimere, og helst fjerne all tupp-kavitasjon. Tuppen bør være smalest mulig for å minimere motstand. Den vil også ha en positiv angrepsvinkel mot strømningshastigheten. Dette vil gjøre at fluidet blir dyttet innover mot propellen og vil gi ekstra løftekraft fordi man får samlet mer vann i propellen. Om den hadde hatt en negativ vinkel, vil den fungere som en vingetupp fra fly og dyttet fluid utover for å redusere tuppvirvelene.



Figur 2120: bue



Figur 2221: angrepsvinkel mot fluidet

4.4.1 Ledende og følgende kant

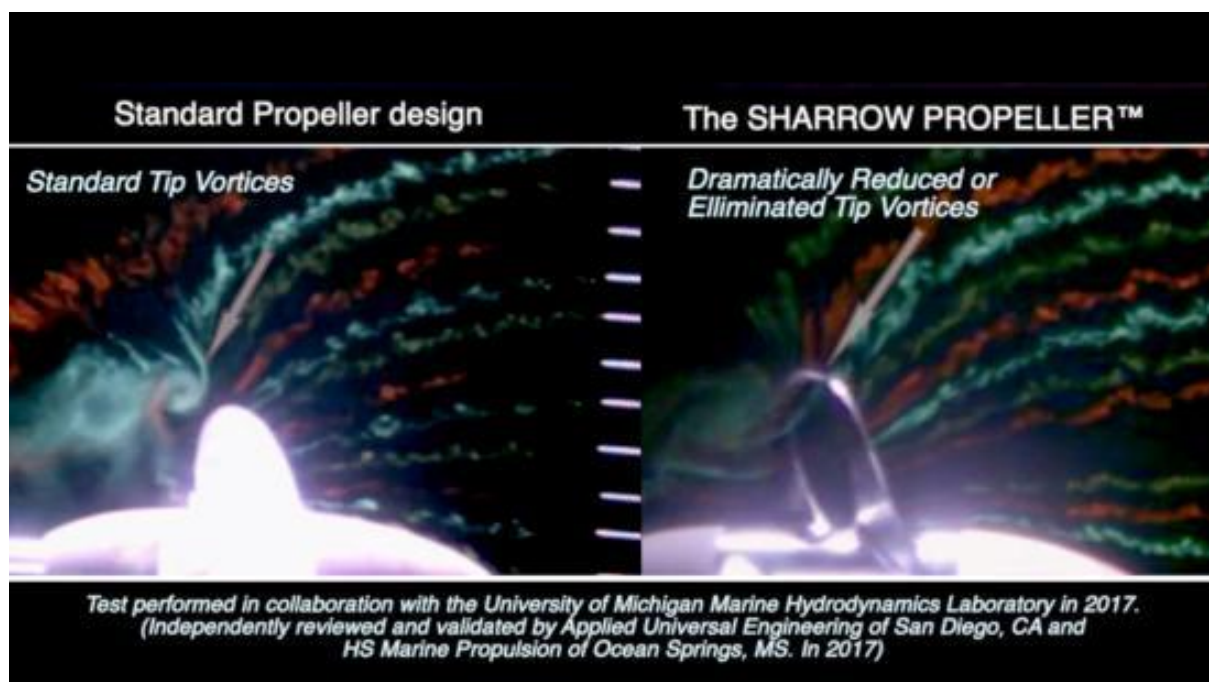
Radius på ledende kant på begge propellene er konstruert med identiske mål ($0,85 \cdot \text{radius original}$). Dette er for å gi fluidet lik brytning mot bladet. Spiss ende på følgende kant er gitt av E779A modellen. Tanken bak dette er at fluidet skal få minst mulig forstyrrelser i overgangen mellom høytrykk- og lavtrykksiden. Det ble valgt å runde kanten etter utprint for å gjøre de mest mulig like. Avrundet kant på følgende kant vil gi noe kunne gi større avløsning og virvler som skrevet i bacheloroppgaven til Andersen. 3D skrivingen gir en kantet avslutning og det ble valgt å slippe og runde følgende kant slik at propellene fikk lik avslutning.

4.5 Teknisk fremgangsmåte i SOLIDWORKS.

I Solidworks ble følgende måte brukt for å konstruere propellene:

CAD-teknisk ble Bossen konstruert som en «*extrude*» del på 64mm. Deretter ble foil-fasjon med sketch lagt utover radien på følgende r/R: 0,0 : 0,1 : 0,2 : 0,3 : 0,5 : 0,7 : 0,8 : 0,9 : 0,95 : 1,0. Tverrsnittene er skalert for å gi likt bladareal. Skalering av tykkelse og korde på konvensjonell og toroid er henholdsvis 1,55 og 0,85. Deretter ble «*LOFT*», brukt ved å velge

hver enkelt sketch for å lage et helt massivt blad. «*Circular pattern*» ble så brukt ved å velge «*features*» og velge bladet. Deretter ble kantene på Boss-en og overgangen mellom bladet og Boss faset til $R=2\text{mm}$. For å oppnå rett diameter innvendig ble kilespor, diameter og frontsiden kuttet ut med «*Extrude cut*». Buen ble konstruert i «*3D sketch*» ved å konstruere «*splines*» mellom bladene. Deretter ble tverrsnittene på $0,7R$ valgt i «*boundary*» *feature* for å lage buen. Se vedlagt PART.doc, vedlegg E og F for solidworks filene.

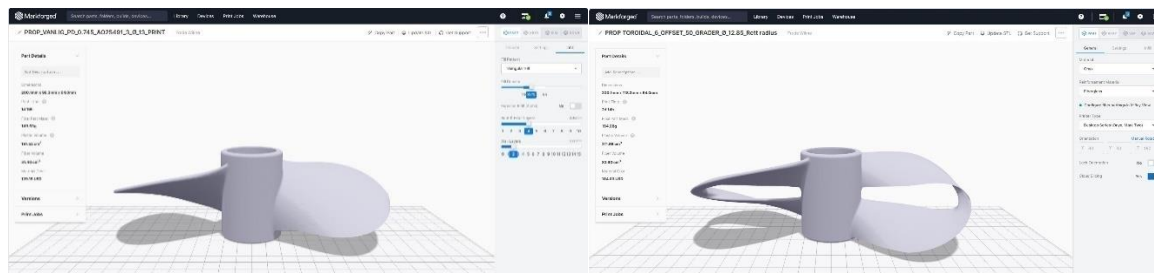


Figur 2322: fluidet beveget seg inn mot propellen (Riley, 2023)

4.6 3D-utskrift: Additiv tilvirkning

Fra bachelor til tidligere kadett Andersen om anti-syngekant på propell (Andersen, 2021), ble det vurdert at utskrift med skolens printer; *Markforged Mark Two Professional 3D printer* egnet seg godt. Den ble valgt på følgende grunnlag: «*Faktorene som ble vurdert var nøyaktighet i print, overflate finhet og styrke. Fiberforsterket nylon hadde finest overflate, stivere propellblader og nøyaktigheten var bedre.*» (Andersen, 2021, p. 33)

Materialet som ble valgt er fiberforsterket nylon pga. at det var dette som var tilgjengelig. Propellen ble konvertert til en 3D-modell som kunne printes. Propellene ble slipt i overflaten med sandpapir til lik ruhet. (ref. tabell 5)



Figur 2423: konvensjonell

Figur 2524: toroid

Ruheten ble fysisk kontrollert med et overflatenormal. Toroidpropell hadde merkbart større ruhet i overflaten før pussing, grunnen for dette kan være designteknisk at selve Bosset ble lagt dobbelt med «circ pattern» funksjonen i Solidworks, noe som lagde fusk i STL filen.

Tabell 2: vekt av propeller og %materiellfyll i print

	Onyx [cm ³]	Fiberglass [cm ³]	Totalvekt [g]	Materiellfyll [%]
Toroid	211,65	83,6	194,08	37
Konvensjonell	197,52	51,40	149,53	37

Løst materiell ble pusset ned for å få en finere finish grunnet hakkete kanter etter skriving. Epoxy ble valgt bort ettersom det mulig kunne sørge for forskjellig utgangspunkt i sluttproduktet og endre dimensjonene. Ujevnt lag på propellen kan gjøre forskjell. Det er også en fare for at epoxy flak kan løsne og falle av under forsøkene. For mest mulig likhet mellom produktene er det beste å ikke gjøre noe med overflaten. De ville ha hatt litt variasjoner grunnet nøyaktighet til printeren, men mye mer likt utgangspunkt enn ved etterbehandling. Finslipingen av bladene medfører en minimumsfinhet i overflaten som aksepteres. Ruheter direkte fra print vil gi for stort utslag på fluidstrømningen. Det tenkes at unøyaktigheten i resultatene hadde økt.

Materialene har navn ONYX og Fiberglass og innehar følgende parametere hentet fra Markforged datablad.

Tabell 3: materialdata

Betegnelse	Onyx	Fiberglass	
Strekkfasthet, (BREAK)	37	590	MPa
E-modul	2,4	21	GPa
Tetthet	1,2	1,5	g/cm ³
Tensile Strain at Break	25	3,8	%

4.6.1 Styrke og struktur

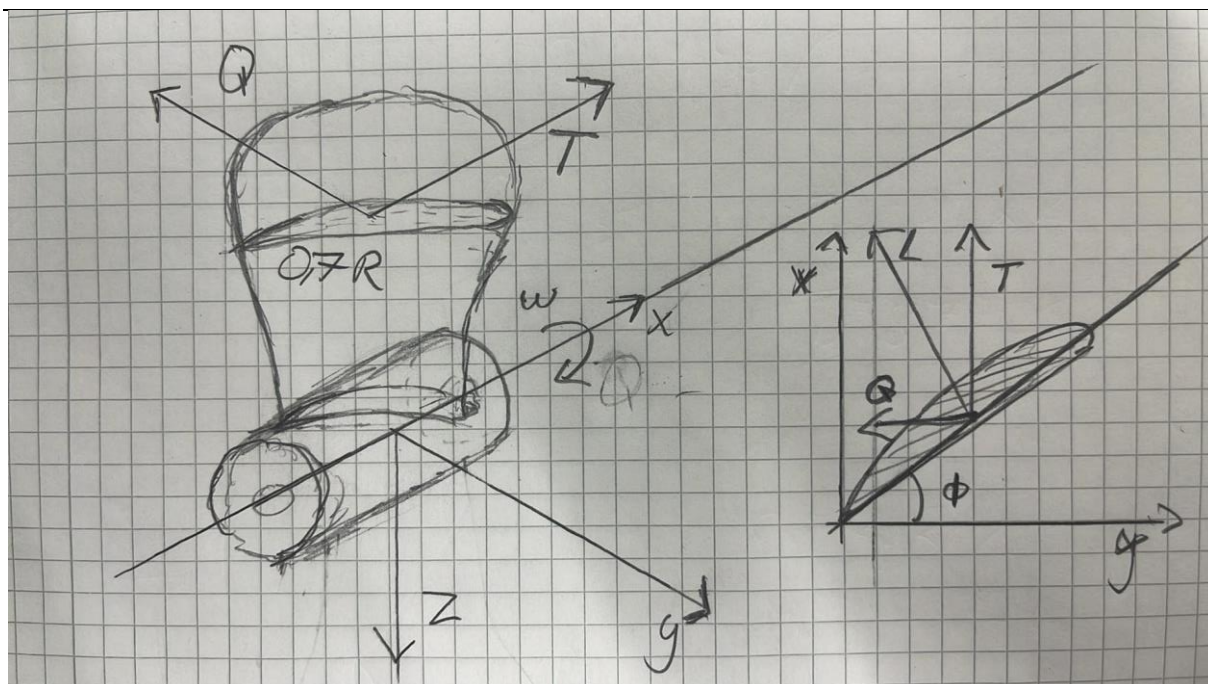
Bøyning av propellbladene observeres under forsøk. Karakteristikken av bøyningen undersøkes.

Tabellen under viser de største belastninger observert under forsøk.

Tabell 4: Største belastninger I forsøk

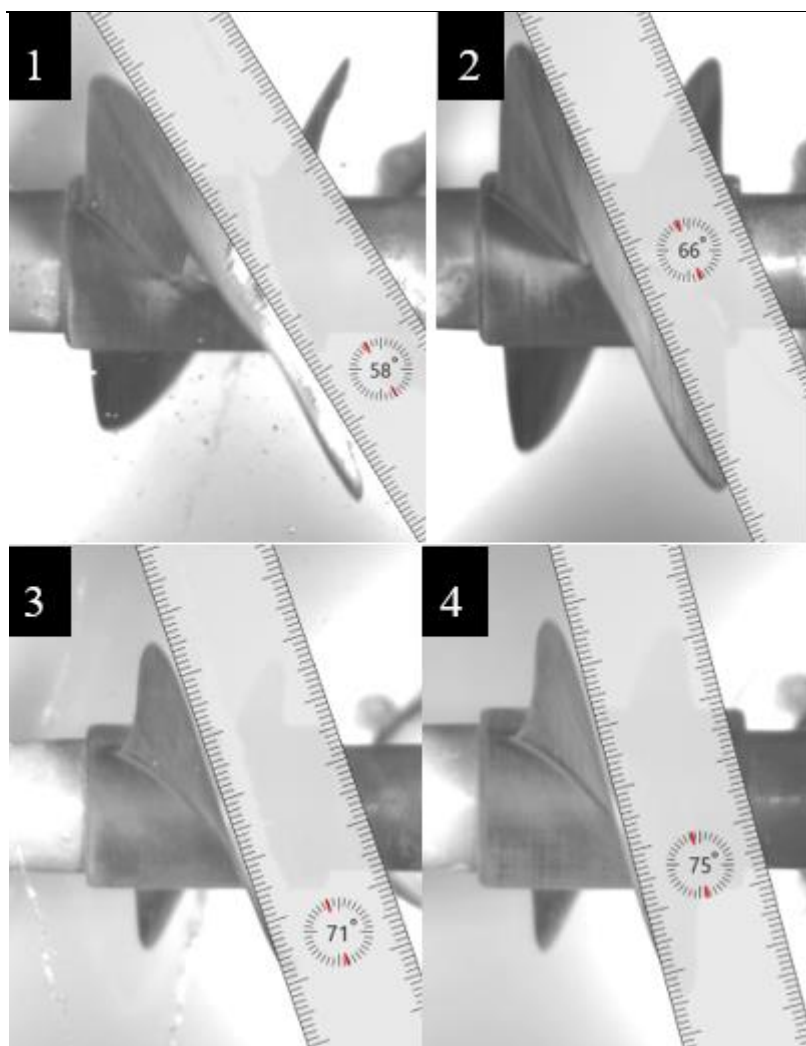
	Trust	Dreiemoment	J	K _T	10K _Q
Toroid	292,9N	-13,5Nm	0,468	0,129	0,647
Konvensjonell	251,8N	-9,1Nm	0,168	0,107	0,536

Et propellblad vil utsettes for en kraft som følge av løftet på bladet. Løftet langs x-aksen T vil resultere i et bøyemoment om y-aksen i figuren nedenfor. Propellen vil også utsettes for et dreiemoment Q om rotasjonsretningen. Til slutt vil det ha en aksiell strekk utover som følge av sentripetalkraften. Det er vanlig å regne med resutantkraften L, i de fleste tilfeller går gjennom 0,7R på bladet på konvensjonelle propellere. (CARLTON, 2018) Skyv karakteristikk på buen på toroid er ikke kjent.

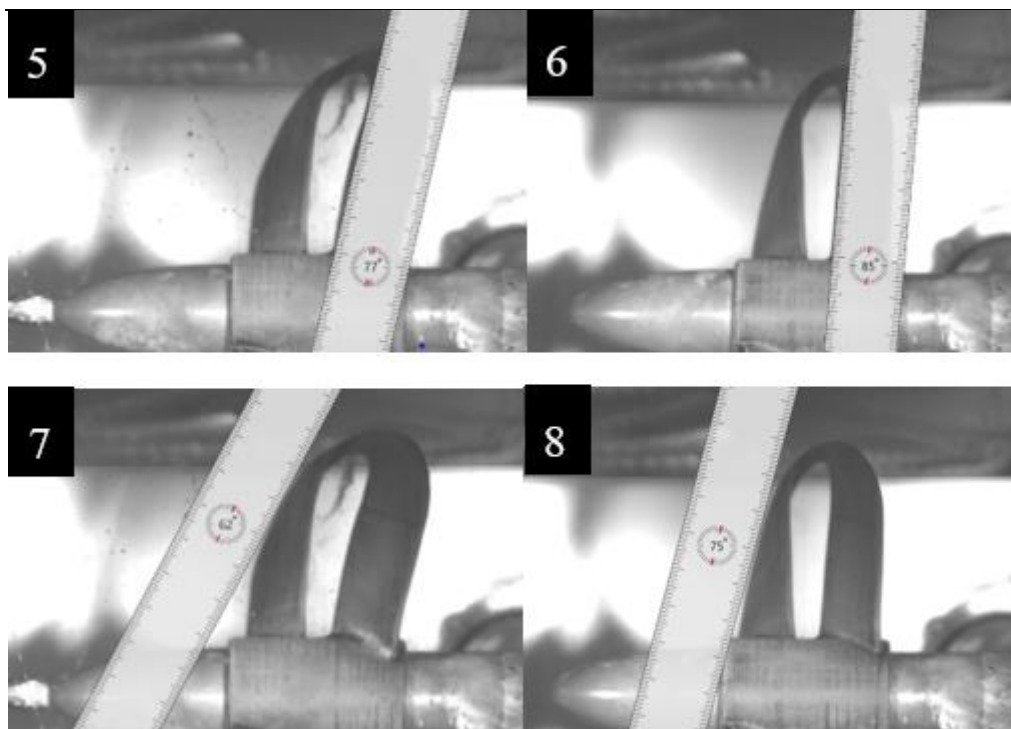


Figur 2625: referanseakser og tilhørende krefter

Propellbøyningen og angrepsvinkelen undersøkes ved digital måling med linjal, dette gjøres ned til 1° nøyaktighet. Det observeres ved de største belastningstilfellene i tabell 4 at toroid bladet har 7 grader bøyning om x-aksen (se figur under). Toroidpropellen viser også en bøyning på -8 mens den konvensjonelle propellen har en bøyning på -4°. Bøyningen øker og bladets angrepsvinkel til vannet. Dette medfører høyere slipp mot tuppen bladet.

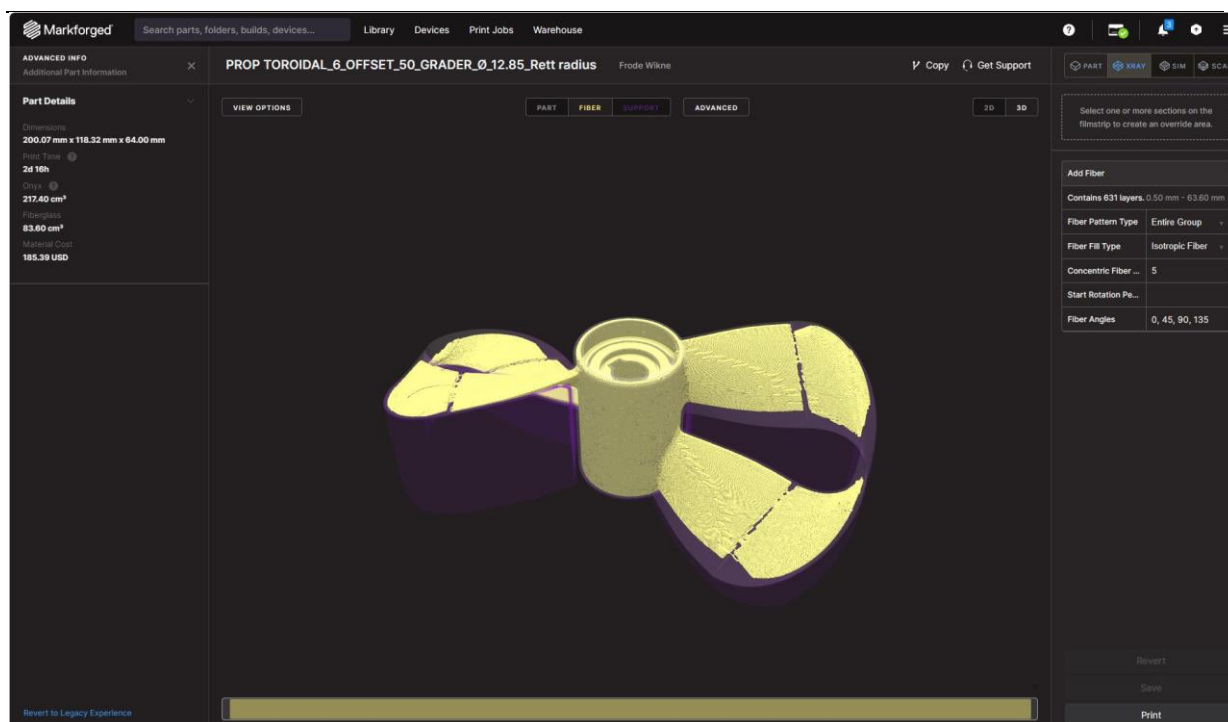


Figur 27: Vridning av bladene ved tupp. 1: toroid belastet, 2: toroid ubelastet, 3: konvensjonell belastet, 4: konvensjonell ubelastet



Figur 28: Bladbøyning

I Figur 10 øverst til venstre observeres også en bøy på bladet. En medvirkning til dette er nok at fiberforsterkningen i buen ikke ble fullstendig grunnet hvordan skriveprogrammet la ut denne. I figuren nedenfor vises bare fiberforsterkningen som printeren lager, her observeres et tydelig brudd ved $0,7R$, dette kommer av hvordan filen ble overført fra Solidworks til print-fil.



Figur 2926: Fiberforsterkning Toroid

4.6.2 Kontrollmålinger av propellen

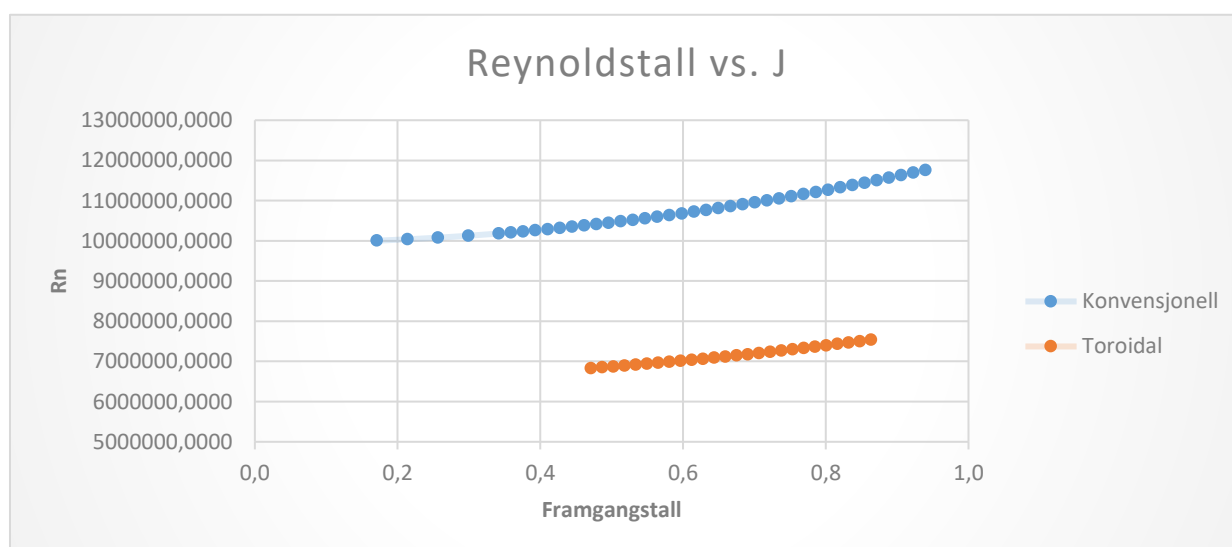
CAD-design og produksjon medfører unøyaktigheter. Dataoverføringen fra 3-D program til printerprogram, til ferdig printet og slipt propell innebærer flere kilder til unøyaktighet. Kontrollmåling av kordelengder ble gjennomført før og etter testing med følgende resultat. Overflaten ble og evaluert ved bruk av overflatenormal. Dette er en metode som i dette tilfelle ga ruheter mellom 16 μ m og 25 μ m.

Tabell 5: kontrollmåling av kordelengder etter pussing og tilhørende ruheter

		Toroid			Konvensjonell			
r/R		Tegning	Måling	Ruhet		Tegning	Måling	Ruhet
0,3	33,2mm	34,2mm		16 μ m	61,5mm	59,5mm		16 μ m
0,5	45,25mm	44,9mm		25 μ m	82,03mm	83,6mm		16 μ m
0,7	50,23mm	50,0mm		25 μ m	92,7mm	91,6mm		16 μ m

Tabell 6: propelldata gitt fra Solidworks

Betegnelse	Toroid	Konvensjonell	Benevning
Diameter	200	200	mm
B.A.R, (A_p/A_o) Bladsarealsforhold	0,201 ($A_p=A_{p_{blad}} + 0,5*A_{bue}$)	0,208	-
Vått areal	33947,95 mm ²	32618,9 mm ²	mm ²
Korde 0,7R	50,23	92,7	mm
Pitch, konstant	149	149	mm



Figur 30: Endring av Reynoldstall over 0,7R korden som funksjon av framgangstallet .

Ulikhet i Reynoldstall kommer i all hovedsak av at korden er ulik på propellene. Ulikheten er på om lag 30%. Reynoldstallet sier noe om turbulensen i fluidet. Høyt reynoldstall medfører høyere grad av turbulent strømning samt at kavitasjon lettere forekommer. Generelt sett opererer propellene under høye reynoldstall

4.7 Måleoppsett

Viser til vedlegg X *testprosedyre* og vedlegg X *testfasilitetene* om hvordan systemet er satt opp og hvilke målinger som er gjort. Der gis en detaljert beskrivelse av fremgangsmåte under testingen, hvilke komponenter som er brukt, og hvordan databehandlingen skjer.

4.7.1 Kalibrering av utstyr og måleparameteres innvirkning

Kraft målingene gjøres med strekkklapper, de er kalibrert på forhånd og vil ha en usikkerhet på $\pm 0,5N$ for Løft og $0,05Nm$ for dreiemoment. Turtallet er gitt av optisk sensor, usikkerhet på $\pm 0,01rps$. Vannhastighet i tunell er regnet ut fra impellerturtallet, unøyaktighet $\pm 0,02m/s$. I tillegg til disse forhold er følgende parametere notert under kjøring.

Tabell 7: sammenfatning av måleoppsett

Beskrivelse	Toroid	Konvensjonell	Avvik, innvirkning
RPS propell	25,09o/s	23,05o/s	Forskjellig geometri vil gjøre at propellene oppnår 0T ved forskjellige turtall, dette godtas.
Oppløst O ₂ % i vannet	57%	57%	Mengden oppløst O ₂ er tilnærmet likt grunnet at det samme vannet ble brukt i begge tilfeller.
Temperatur tunnel (snittverdi)	21,52 C	20,77 C	Temperatur vil ha innvirkning på P _v Brukes i beregningen av kav. tall. Vil også
Bladareal	33947,95 mm ²	32618,9 mm ²	3,9% avvik. (Design-nøyaktighet)
Kavitasjonstall, (snittverdi)	1,39	1,68	Lavere kavitasjonstall gir høyere tendens til kavitasjon.
V _{0,7 blad} [m/s] (snittverdi)	11,5m/s	10,5m/s	Forskjell kommer av ulik nullpunkt i Løft ved lik vannhastighet

4.8 Mekanisk og akustisk støy i testomgivelsene

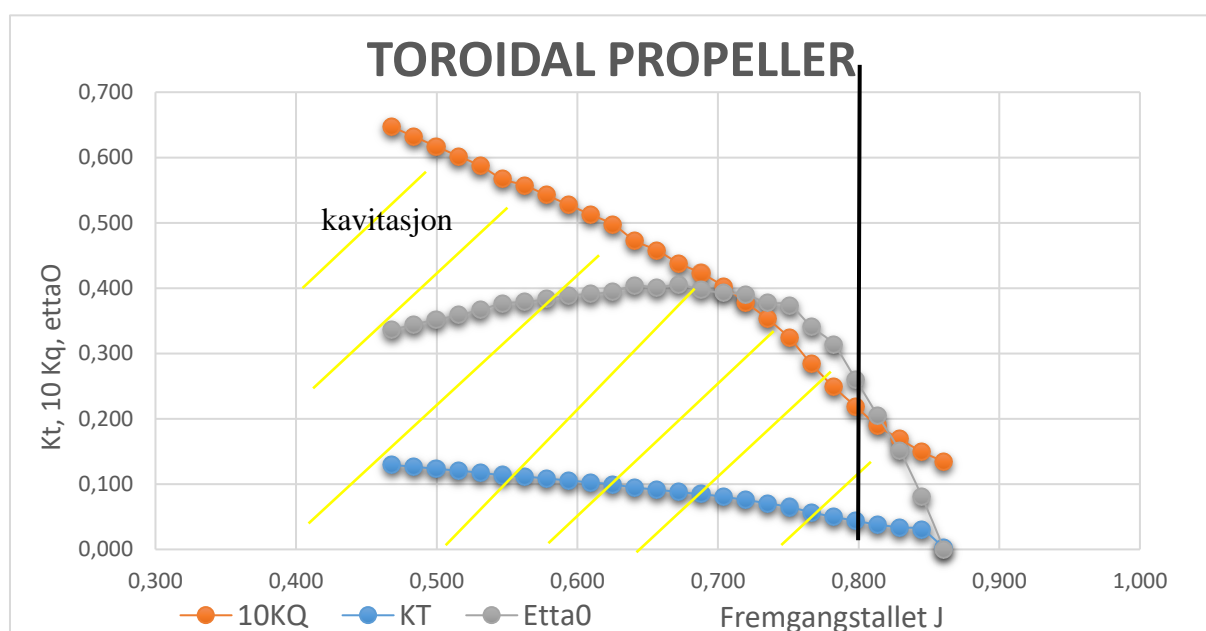
Fra oppgaven til Kadettene Omholt og Espedal ble det anbefalt hvordan mest mulig nøyaktige målinger kan oppnås. Det tas forbehold til følgende frekvenser og anbefalingene deres i konklusjonen. (Omholt & Espedal, 2022)

- **50Hz** – strømforsyning
- **1-4 Hz** - propellstøy
- **300 Hz** – vifte til propellmotor
- **425 Hz** – LED lyskastere

5 Resultater og analyse

Følgende kapittel tar for seg resultatene i oppgaven. Det kommer til å bli presentert områder som er av spesiell interesse i selve oppgaven. Vedlegg xx gir detaljer og bedre forståelse for propellenes utvikling i egenskaper, støy og kavitasjon. Det anbefales å lese denne for flere detaljer.

5.1 Propellytelser

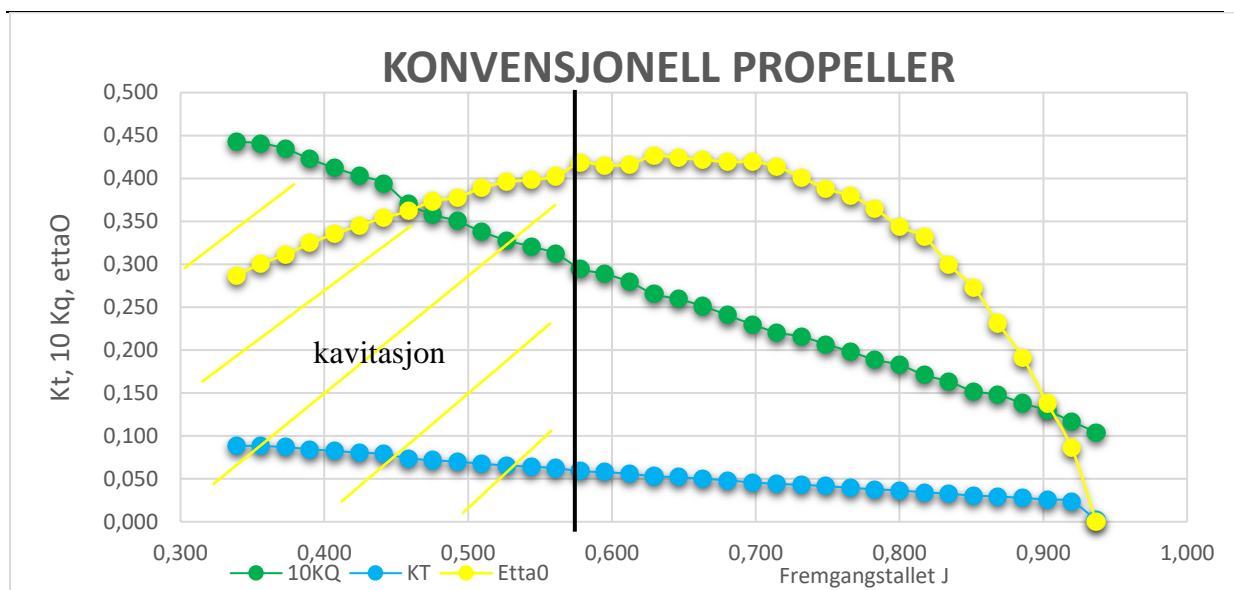


Figur 3127: propellkurve toroidpropell

Resultatene fra toroidpropellen viser at propellen oppnår en Løft på 0N til 292,93N og et dreiemoment på 2,70Nm til 13,00Nm ved testurtall 25,09 o/s og J i [0.468,0.861].

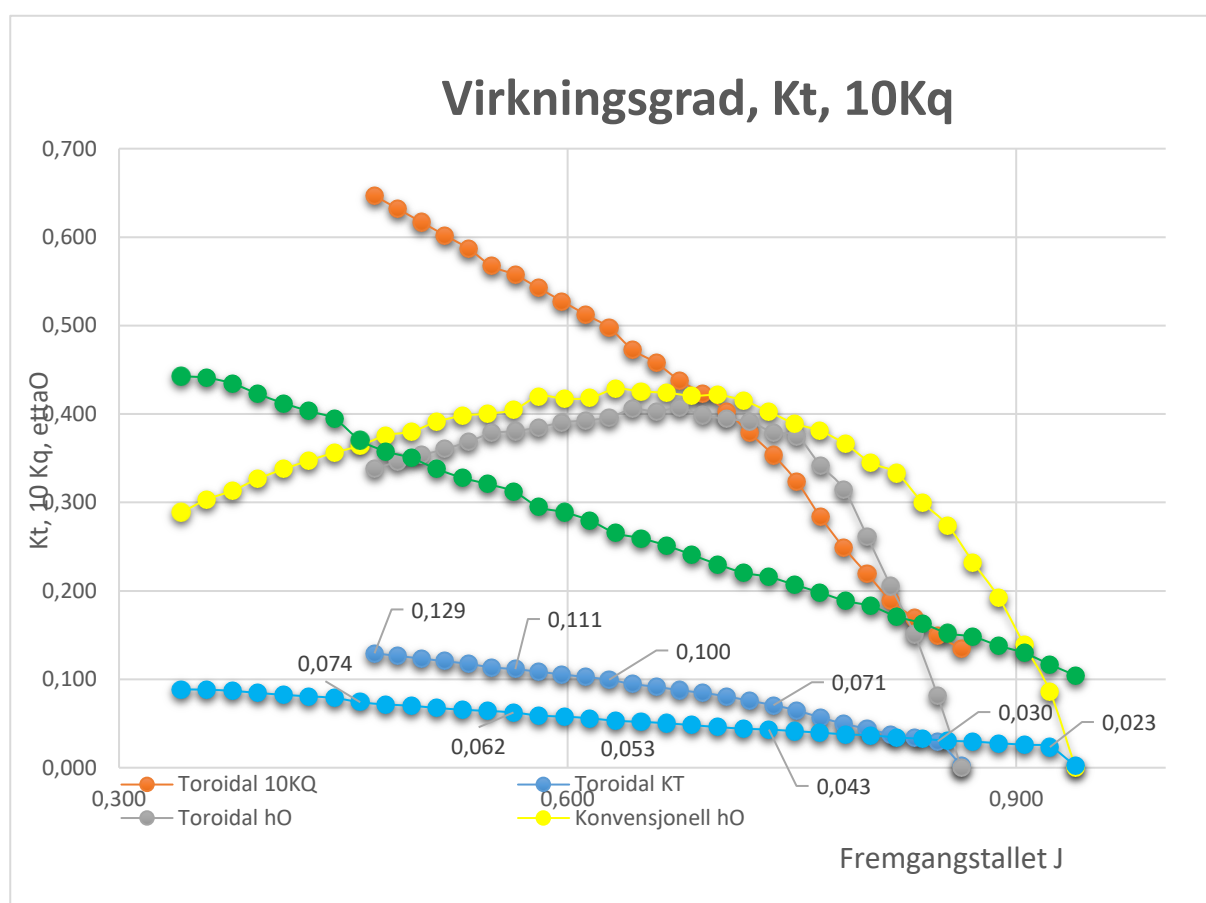
Dreiemomentkoeffisienten øker i en bratt, tilnærmet lineær kurve ved avtagende J.

Kavitasjon observeres fra impellerturtall 10,2rps og nedover, dette tilsvarer $J=0,800$.



Figur 3228: propellkurve konvensjonell propell

Resultatene fra den konvensjonelle propellen viser at propellen oppnår en Løft på 0N til 253N og et dreiemoment på -1,77Nm til -9,10Nm ved testturtall 23,05 o/s og J i området [0.165,0.937]. Kavitasjon observeres ved impellerturtall 6,8rps, dette tilsvarer $J=0,581$

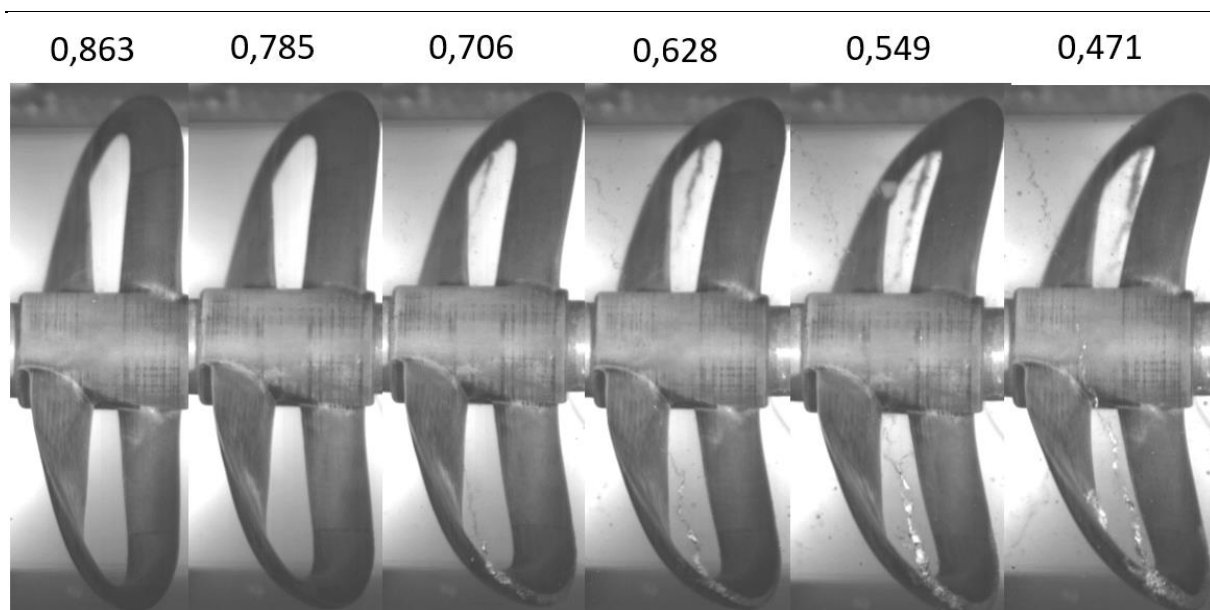


Figur 3329: propellkurver, sammenligning

Figuren viser propellkurvene sammenfattat. Virkningsgraden til den konvensjonelle propellen er bedre ved alle Fremgangstall. Virkningsgradene er mest lik ved $J=[0,65,0,75]$. Her bemerkes det at den toroidpropellen kaviterer mens den konvensjonelle ikke gjør det.

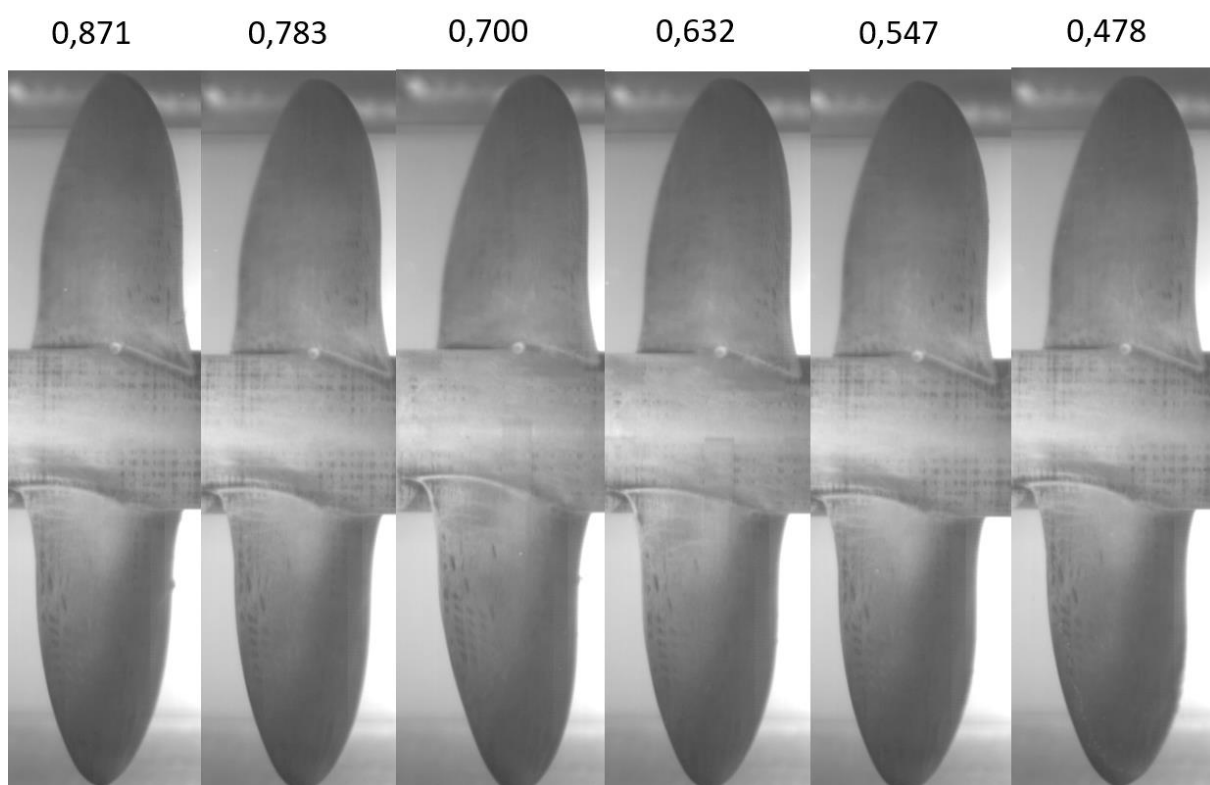
5.2 Visuelle resultater

Figurene under viser til utviklingen av propellene ettersom de arbeider ved lavere fremdriftstall. Vannet i tunellen har retning fra høyre mot venstre. Fordi det kjøres med konstant propellurtall, og reduserer vannhastigheten, gir propellen mer løft ved lavere vannhastigheter. Høyere løft sørger for større trykkforskjeller, mer kavitasjon og mer deformasjon.



Figur 3430: Toroid $J=0,863 \rightarrow 0,471$

Tydelig grad av kavitasjon tidlig på toroidpropellen. Den lener seg en god del framover ettersom fremdriftstallet reduseres og propellen yter mer.

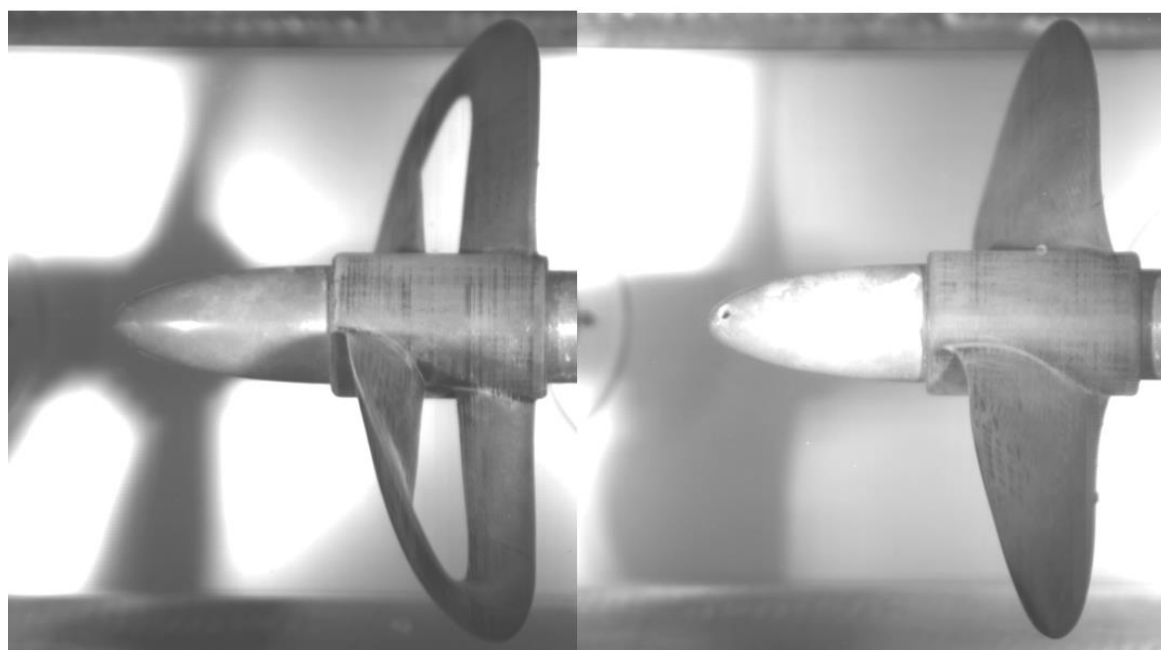


Figur 3531: Konvensjonell $J=0,940 \rightarrow 0,478$

Den konvensjonelle har generelt sett mindre grad av kavitasjon og deformasjon av bladene. De neste figurene viser hvordan kavitasjonsforløpet endrer seg med økende løftforløp. Dette er for å illustrere når kavitasjon begynner i forhold til hvor mye løft propellen yter. Illustrerer tre forskjellige scenarier som skal representere hver sitt sted på propellkurven.

$$K_T = 0,030 \quad J = 0,848 \quad \eta_o = 0,0809$$

$$K_T = 0,030 \quad J = 0,871 \quad \eta_o = 0,2320$$

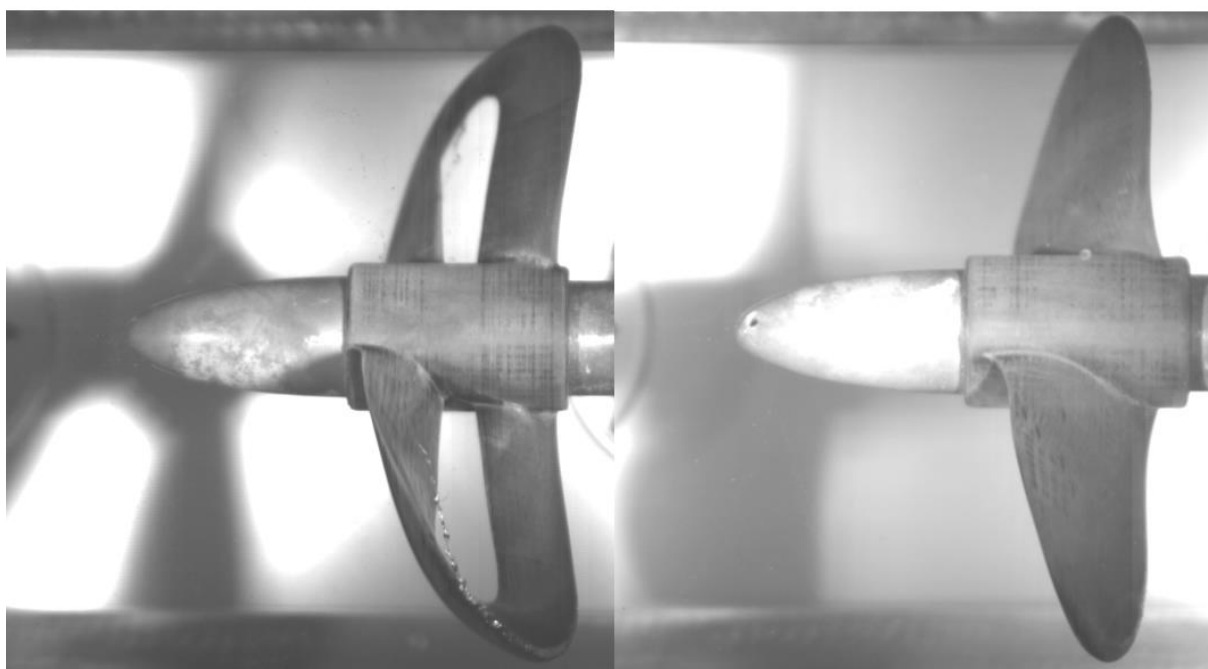


Figur 3632: toroid vs konvensjonell, sakk ned

Begge propellene yter relativt lite løft og har et relativt likt høyt fremdriftstall. Dette vil illustrere typisk hvordan det er når et fartøy starter å senke farten slik at propellen går til lavere last.

$$K_T = 0,071 \quad J = 0,738 \quad \eta_0 = 0,3790$$

$$K_T = 0,070 \quad J = 0,495 \quad \eta_0 = 0,3801$$

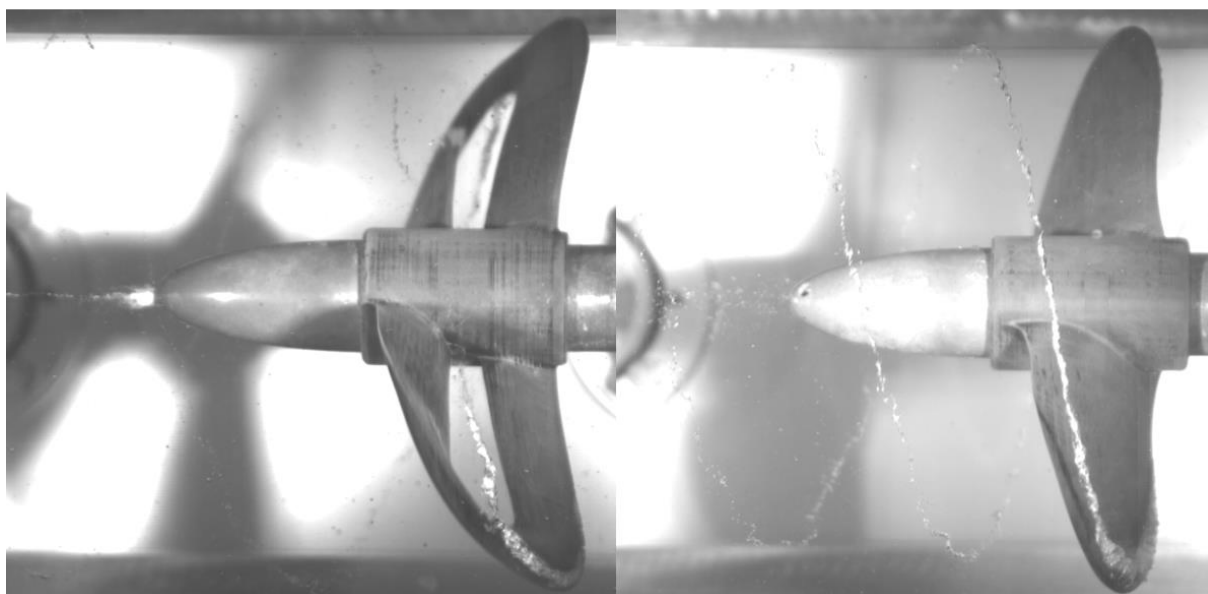


Figur 3733: toroid vs konvensjonell, cruise hastighet

Begge propellene har relativt moderat løft. Fremdriftstallet er langt høyere på toroid enn konvensjonell. For begge propellene er tupp-kavitasjon til stede, i tillegg er det tegn til påbegynnelse av boss-virvlinger. Bildet illustrerer typisk et fartøy i cruise hastighet.

$$K_T = 0,108 \quad J = 0,581 \quad \eta_0 = 0,3848$$

$$K_T = 0,107 \quad J = 0,171 \quad \eta_0 = 0,1505$$



Figur 3834: toroid vs konvensjonell, akselerasjonsfase

Begge propellene leverer relativt sett mye løft. Fremdriftstallet til konvensjonell er langt lavere enn hos toroid. Tuppkavitasjon er blitt kraftigere, konvensjonell har mer på dette stadiet. Boss-virvel er påbegynt på toroid, hos konvensjonell er det kun tegn til. Øyeblikket illustrerer et fartøy i akselerasjonsfase, dette treffer mer den konvensjonelle propellen ettersom toroidpropellen har enda relativt høyt fremdriftstall.

Virvlene som blir avløst av toroidpropellen ser ut til å ha et mer ujevnt forløp enn den konvensjonelle. Rotasjonsretningen på virvlene på begge propellene er aktenfra moturs. Under alle målingene viser kavitasjonsdannelsen på toroid til å ha et markant punkt der kavitasjonen slipper buen på bladet. På den konvensjonelle slipper kavitasjonen jevnt ut mot avslutningen av bladet.

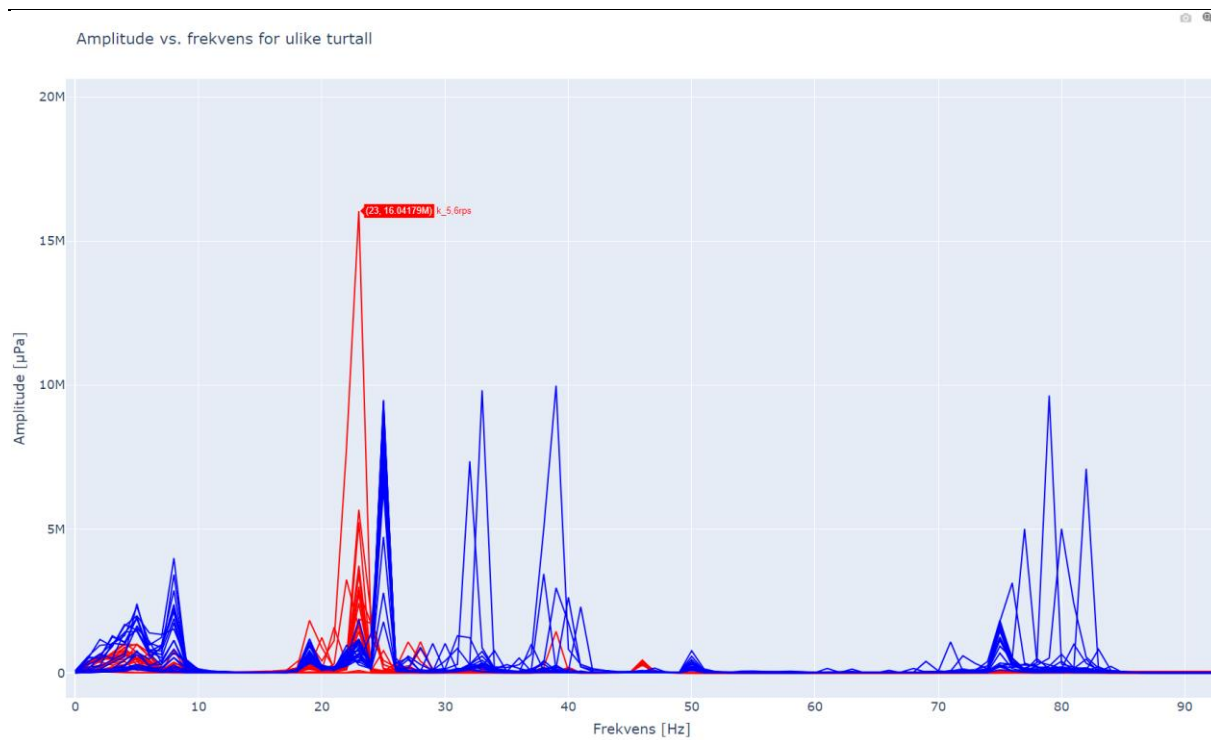
5.3 Støy resultater

Støy er et svært komplekst fenomen. Det ble valgt å ta støymålinger fordi utstyret er tilgjengelig og en har da mulighet til å se hvordan de to propellene sammenligner seg opp mot hverandre. Det ble valgt å kun ta målinger fra 0-5000Hz for å få en oversikt over situasjonen med de to propellene. Med utstyret tilgjengelig er det mulig å ta målinger til 100.000Hz, men om dette skulle blitt samlet hadde det vært en mye større prosess som hadde gått vekk fra hovedmålet med oppgaven. Opphav og bakgrunn til støy er et helt eget fagfelt igjen, og vil være noe som er vanskelig å si noe om ut ifra målingene. Erfaringer fra bacheloroppgaven til tidligere kadetter, Espedal og Omholt, støtter opp under dette.

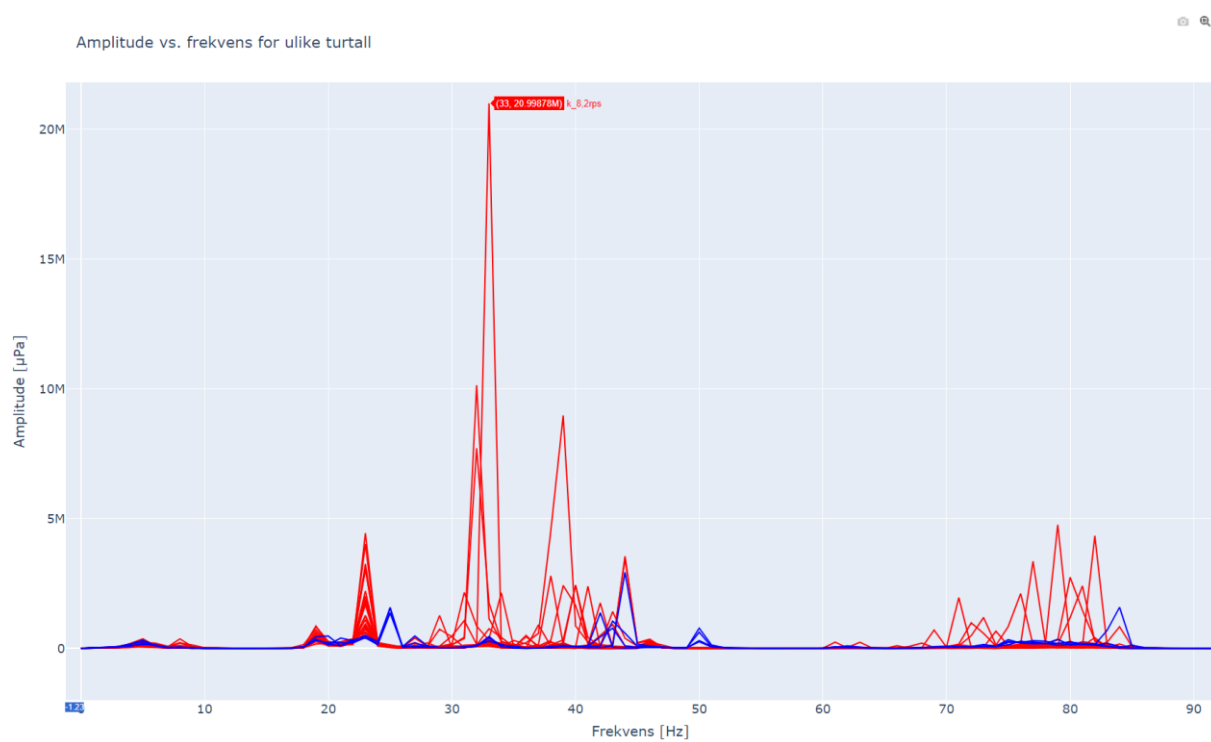
Støymålinger i en kavitasjonstunell er generelt suboptimale målinger i seg selv. Resultatene presentert viser et par interessepunkter som gir øyeblikksbilder på situasjonen. For mer detaljer om utviklingen og oversiktsbilder se vedlegg G.

Støymålingenes usikkerhet representeres ved å bruke standardavviket δ til å regne ut den relative usikkerheten over 6 målinger. Dette gjøres ved å dele standarfeilen på gjennomsnittet av målingene. Beregningene går ut ifra at en valid måling inneholder minst 8/20 data over verdi 0. Den gjennomsnittlige relative usikkerheten er beregnet til 21,6%. Dette medfører at hver amplitudeverdi er 78,4% sikker.

Følgende figurrekke illustrerer hvordan kavitasjon innvirker på støymålingene. Vær oppmerksom på endring i detaljnivået. For alle målingene er konvensjonell markert i rødt, toroid er markert i blått.

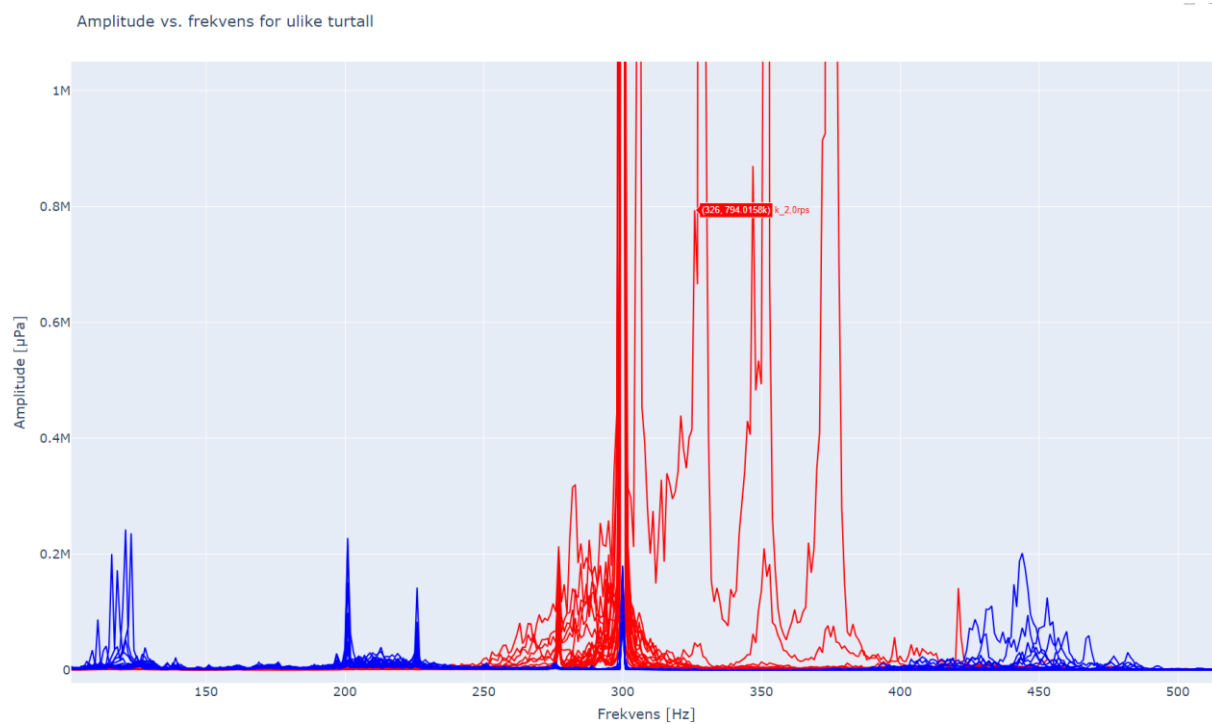


Figur 3935: kavitasjon 0-90Hz

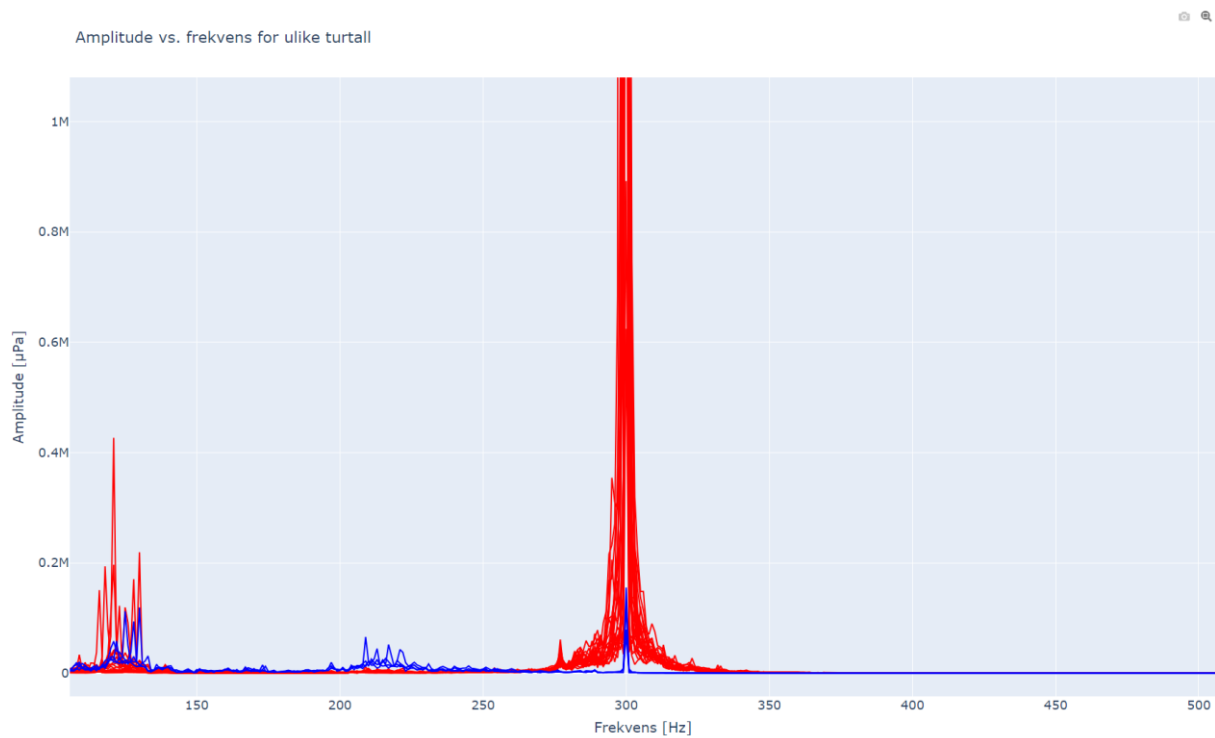


Figur 4036: ikke kavitasjon 0-90Hz

Toroid lager mye mer støy med kavitasjon enn uten. Konvensjonell lager mer støy uten kavitasjon.

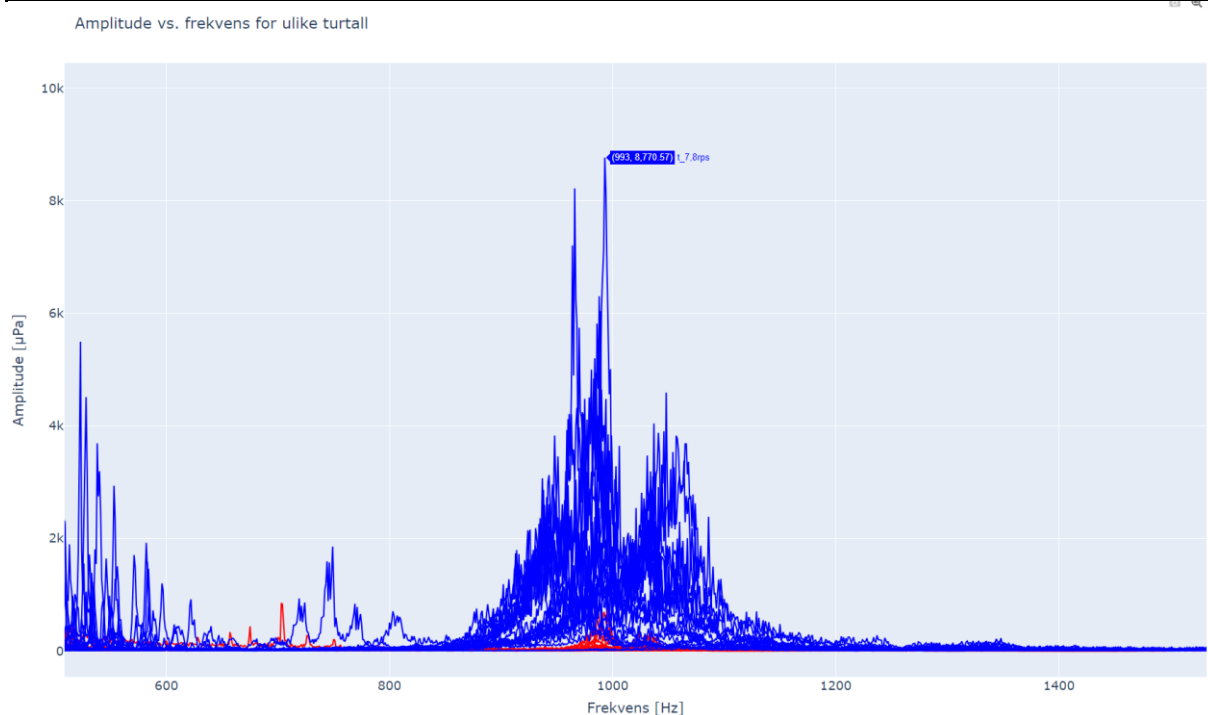


Figur 4137: kavitasjon 90-500Hz

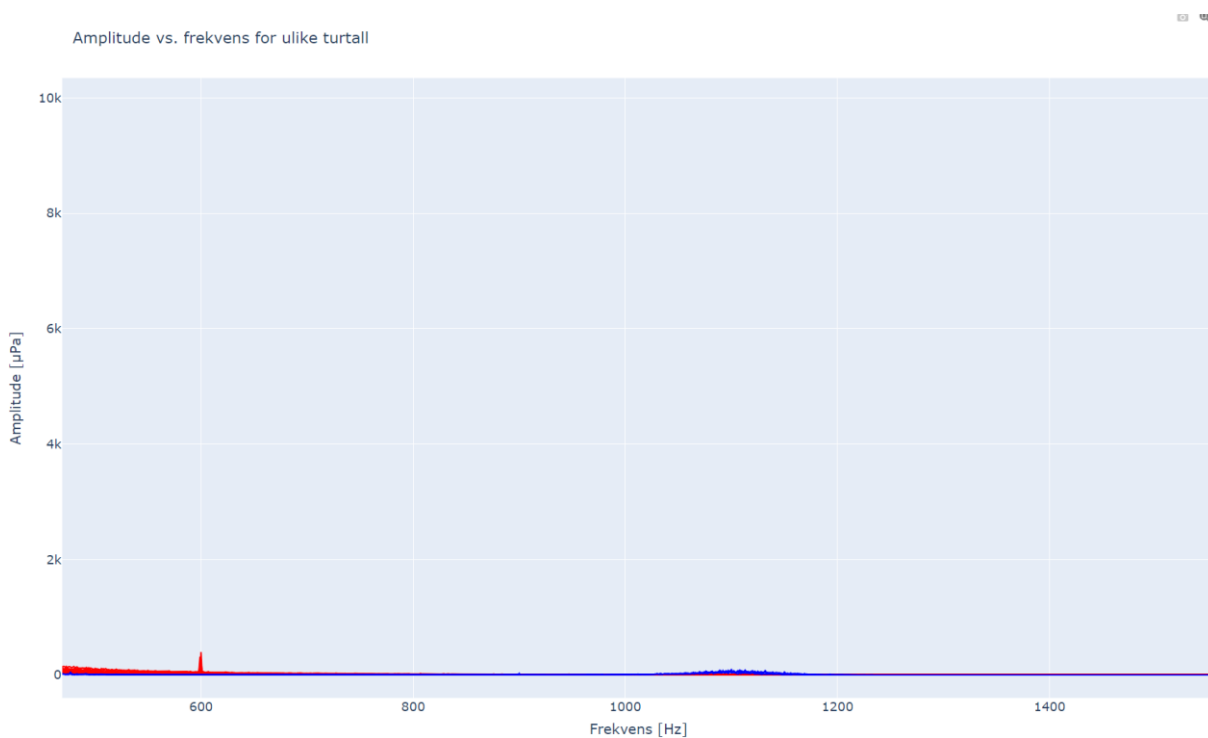


Figur 4238: ikke kavitasjon 90-500Hz

Mer kavitasjonslyder fra toroid, lydene er der ikke uten kavitasjon. Konvensjonell har lyd når den ikke kaviterer. 2rps på konvensjonell gir store utslag.



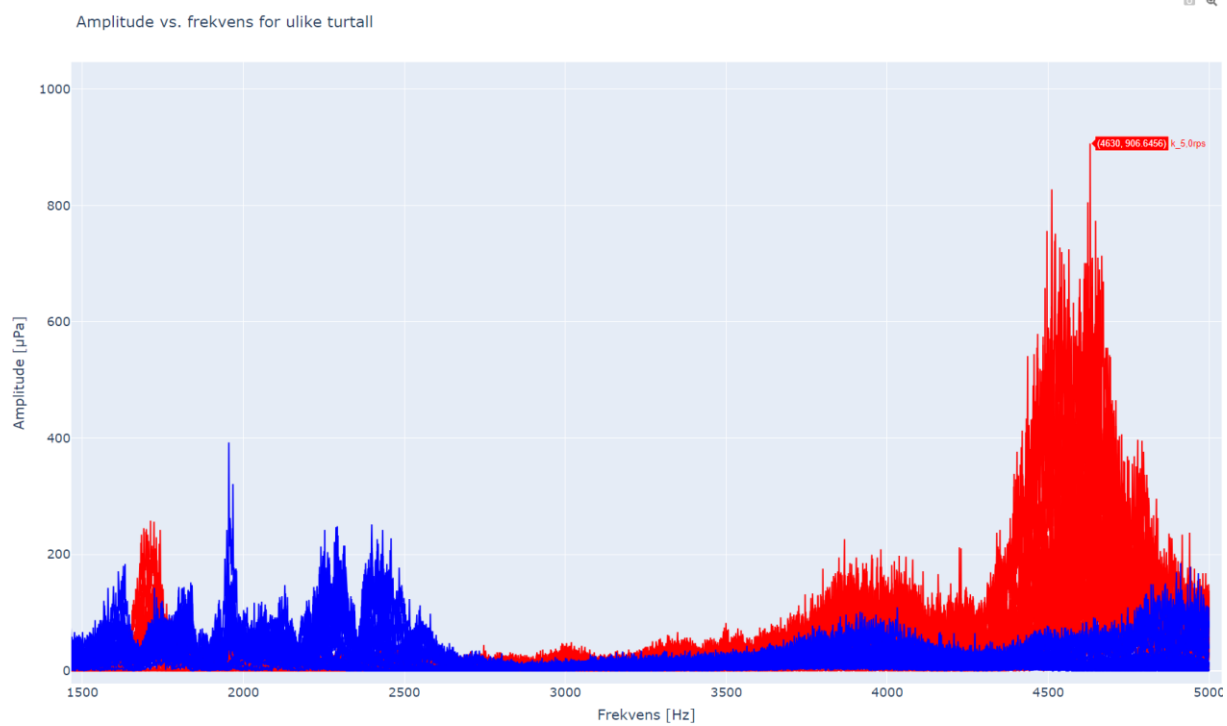
Figur 4339: kavitasjon 500-1500Hz



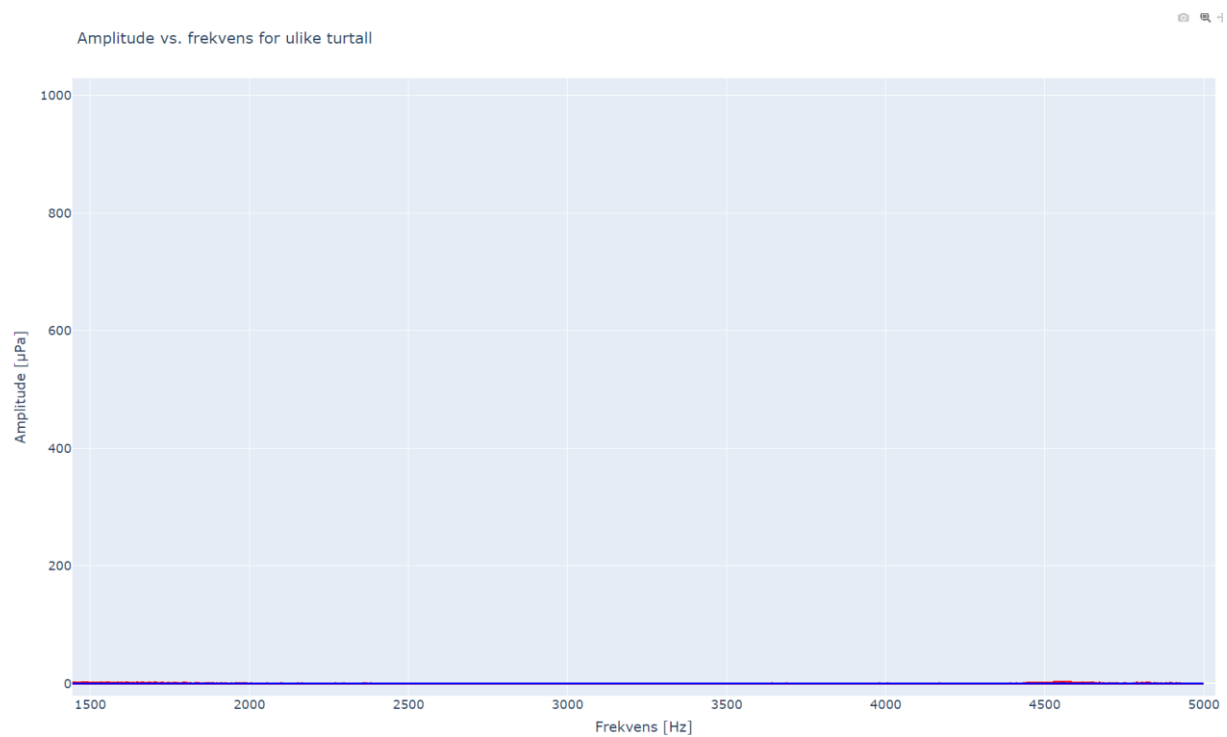
Figur 4440: ikke kavitasjon 500-1500Hz

Toroid sin kavitasjon lager langt mer støy i dette frekvensområdet enn konvensjonell.

Tilnærmet ingen støy uten kavitasjon, toroid lager litt støy, mens konvensjonell veldig stille.



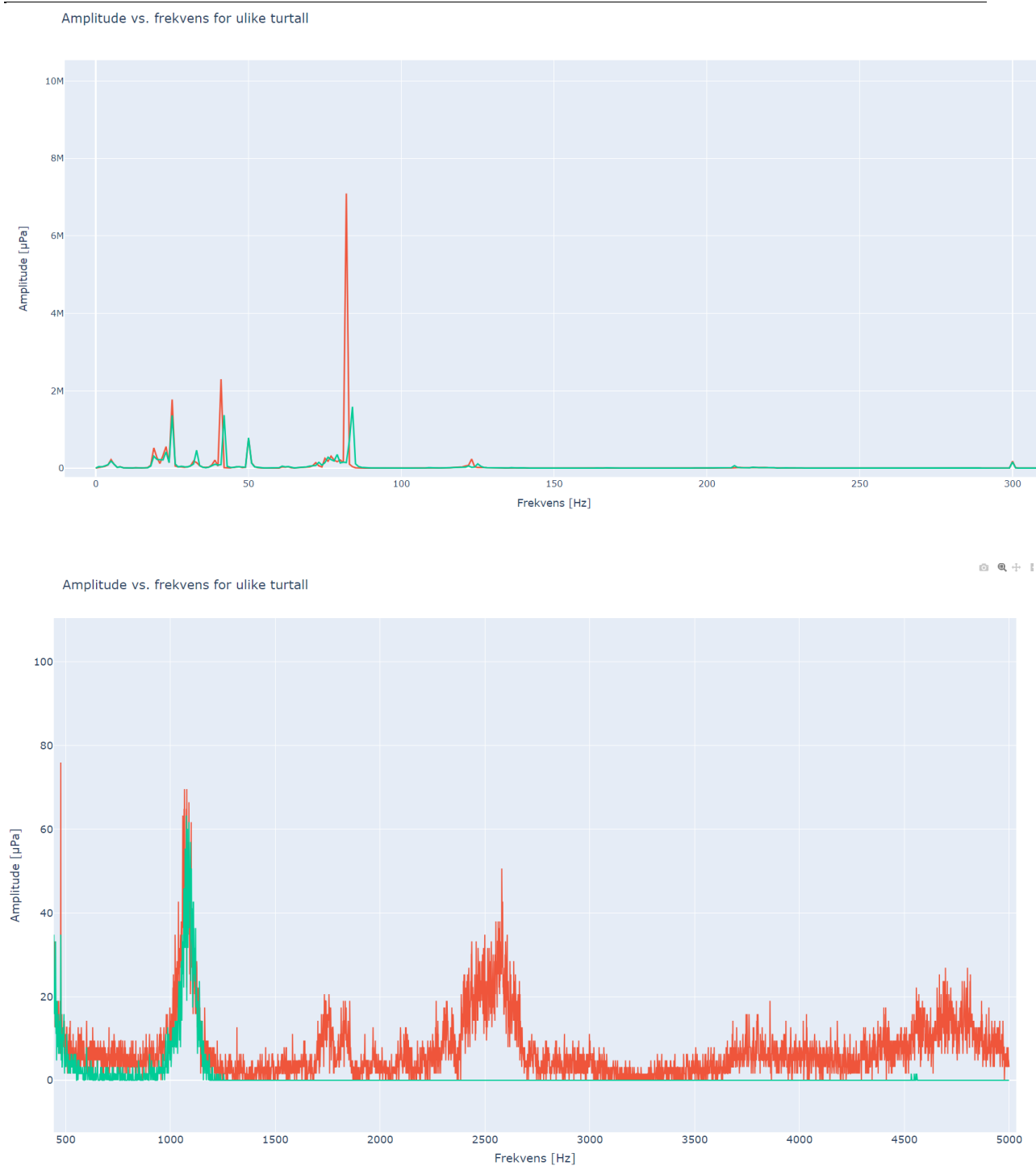
Figur 4441: kavitasjon 1500-5000Hz



Figur 4542: ikke kavitasjon 1500-5000Hz

Fra 1500-2500Hz lager toroid kavitasjon mer støy enn konvensjonell. Fra 2500Hz til 5000Hz lager konvensjonell mer støy. Det er i dette frekvensområdet MIT sin luftpropell har redusert sitt støynivå. Tilnærmet ingen støy på de høyere frekvensene uten kavitasjon.

Påfølgende figurer illustrerer mer i detalj på hvordan støymønsteret til toroidpropellen endrer seg fra å være rett før kavitasjon, til kavitasjon. Før kavitasjon: $J= 0,816$, $K_T = 0,038$, $\eta_0= 0,2051$. Kavitasjon: $J= 0,800$, $K_T = 0,044$, $\eta_0= 0,2612$. Kavitasjon er markert i rødt, ikke kavitasjon er markert i grønt.



Figur 46: toroid kavitasjon vs ingen kavitasjon, to frekvensområder

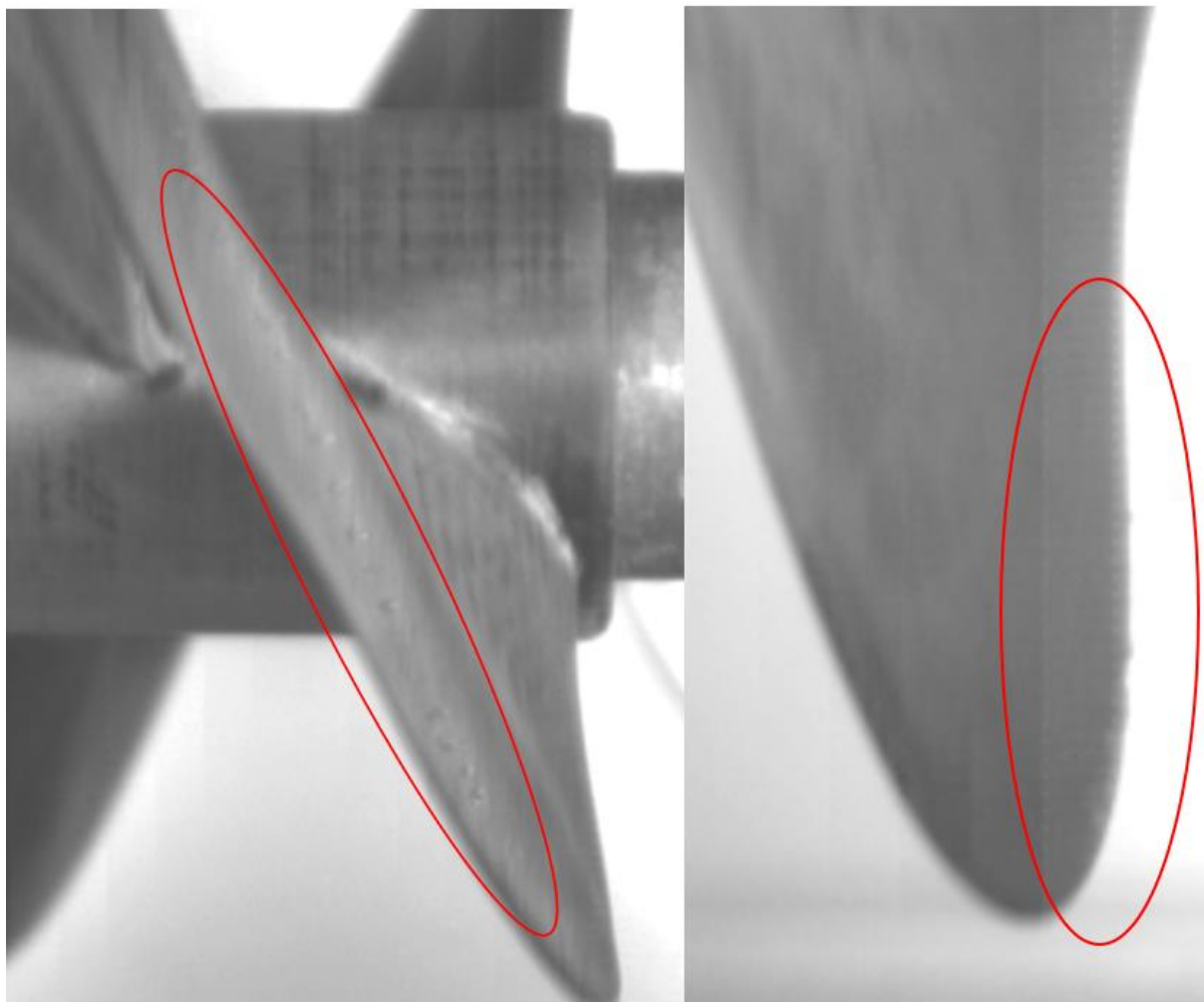
Når kavitasjon starter, ser skjer det en endring i støymønsteret. Høyere amplituder som befinner seg om lag samme frekvensene som uten kavitasjon. På de høyere frekvensene observeres det mindre, men markante utslag på kavitasjonen. Her er det ingen verdier uten

kavitasjon. Det samme mønsteret ser vi på den konvensjonelle propellen også, bare med utslag på andre frekvenser

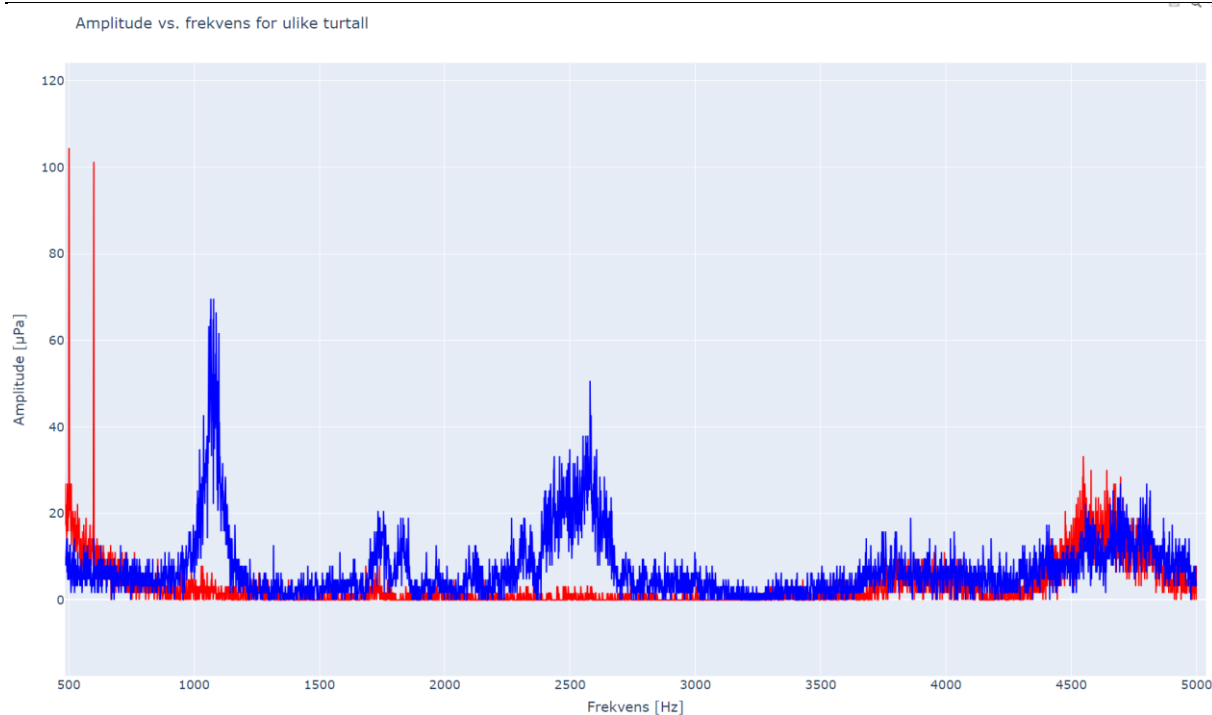
5.4 Til sammenlikning

De neste illustrasjonene viser hvordan start av både tupp- og bosskavitasjon ser og høres ut.

$$K_T = 0,044 \quad J = 0,800 \quad \eta_0 = 0,2612 \quad K_T = 0,059 \quad J = 0,581 \quad \eta_0 = 0,420$$

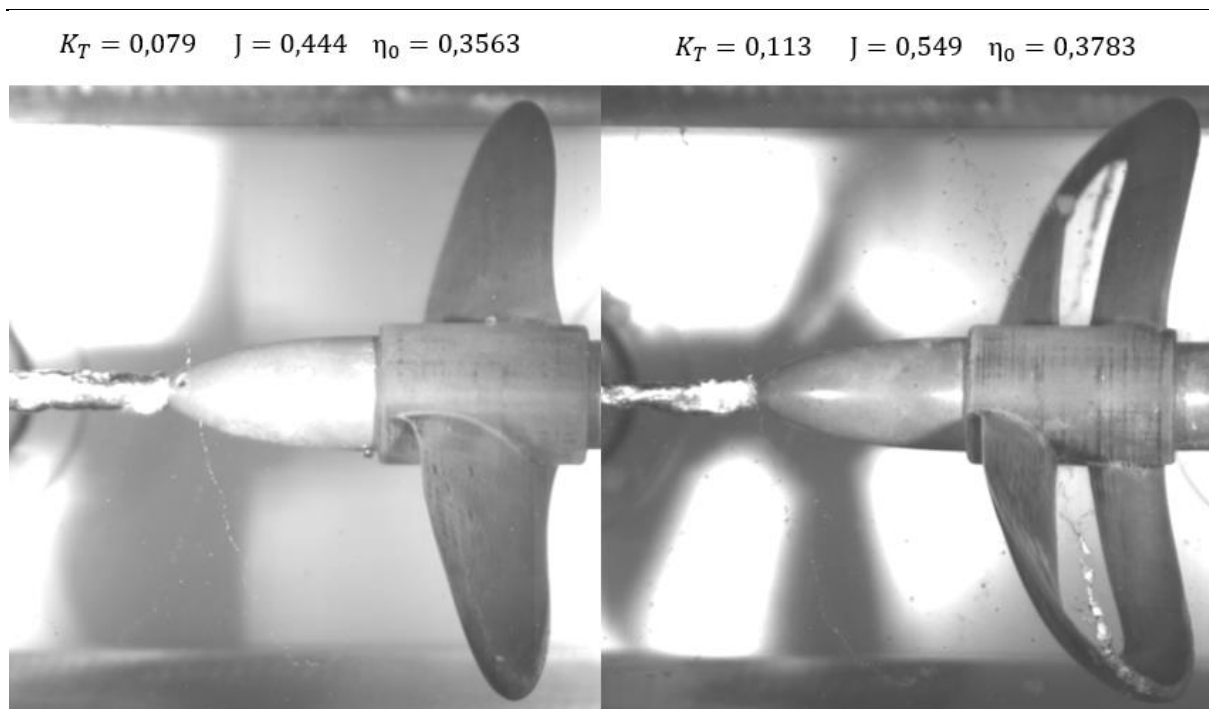


Figur 4643: starten på tuppkavitasjon.

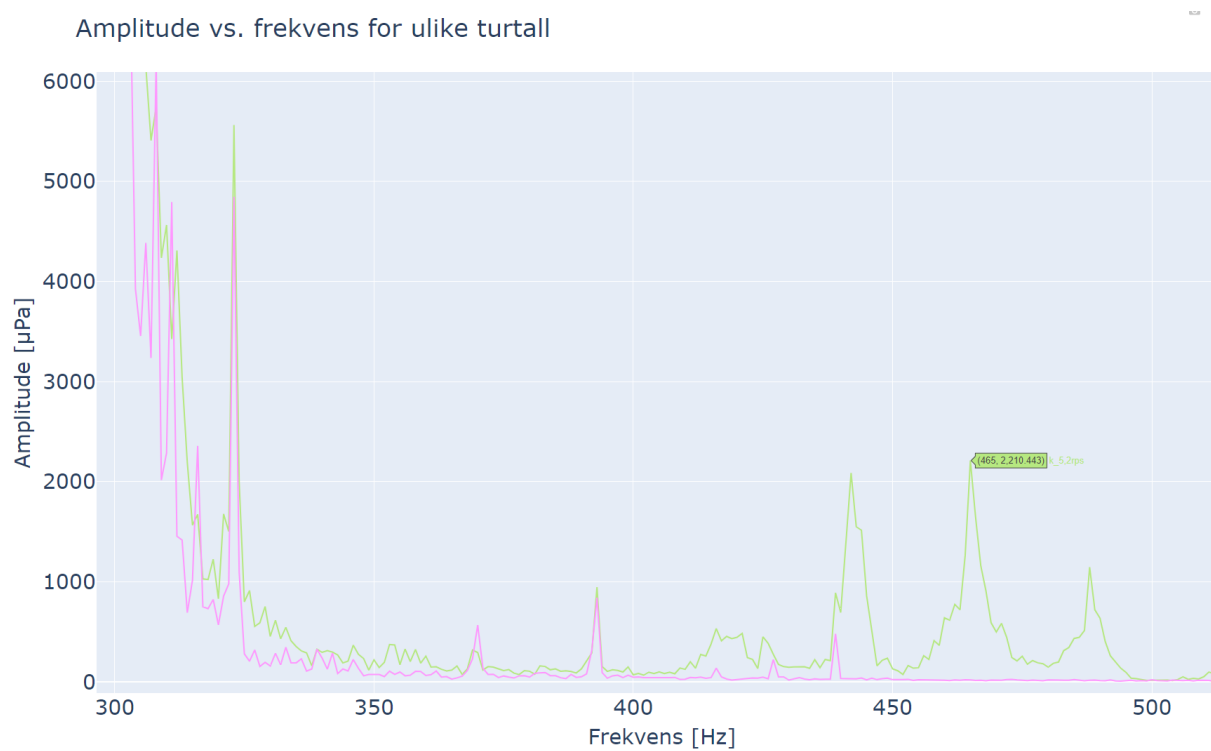


Figur 4744: støy til start av tuppkavitasjon, 500-5000Hz, toroidaltoroid blå, konvensjonell rød

Fra høyhastighetskamera vises det når begge propellene begynner med tuppkavitasjon. Toroidpropellen begynner å kavitere tidligere med hensyn til høyere fremdriftstall og lavere løft enn den konvensjonelle. På støynivået gir toroidpropellen mer utslag i denne fasen. Verdiene til toroid rundt 1000-1100Hz er propellyder, og forekommer ikke av kavitasjon.



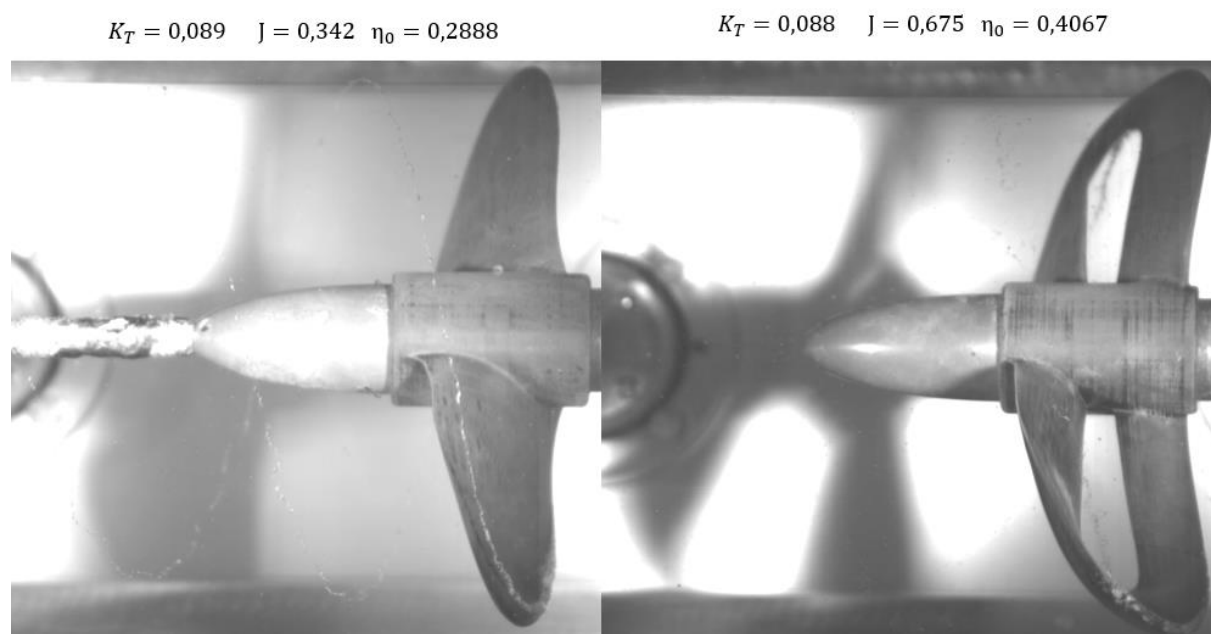
Figur 4845: boss-virvel konvensjonell vs toroid



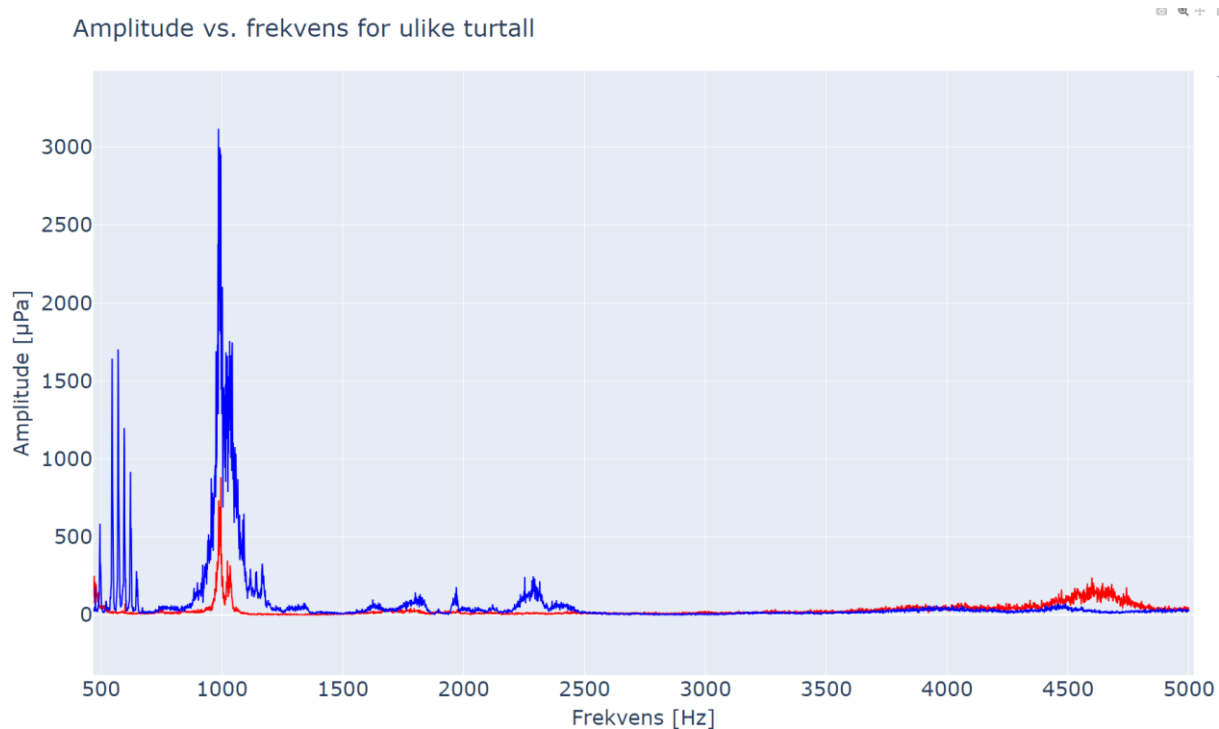
Figur 4946: konvensjonell start av boss-virvel 300-500Hz

Når boss-kavitasjon forekommer, er det en økning i støynivået mellom 300-500Hz. Dette gjelder for både toroid- og konvensjonell propell. Toroidpropellen får større utslag, til tross for at den visuelt ser mindre ut en hos den konvensjonelle. Derimot, ble støynivået rundt 300Hz (propellmotoren) lavere hos toroidpropellen med boss-kavitasjon, samme frekvens økte på konvensjonell. Boss-kavitasjon var noe ustabil hos begge propellene, på toroid forsvant den i området fra $J=0,612$ $K_T=0,102$ til $J=0,596$ $K_T=0,105$ før den kom tilbake igjen med høyere løft. Konvensjonell forsvant da den ankom $J=0,214$ $K_T=0,104$.

Figurene under illustrerer propellene med tilnærmet lik løftkoeffisient, og ser på kavitasjonsforløpet og støynivået ved denne belastningen.

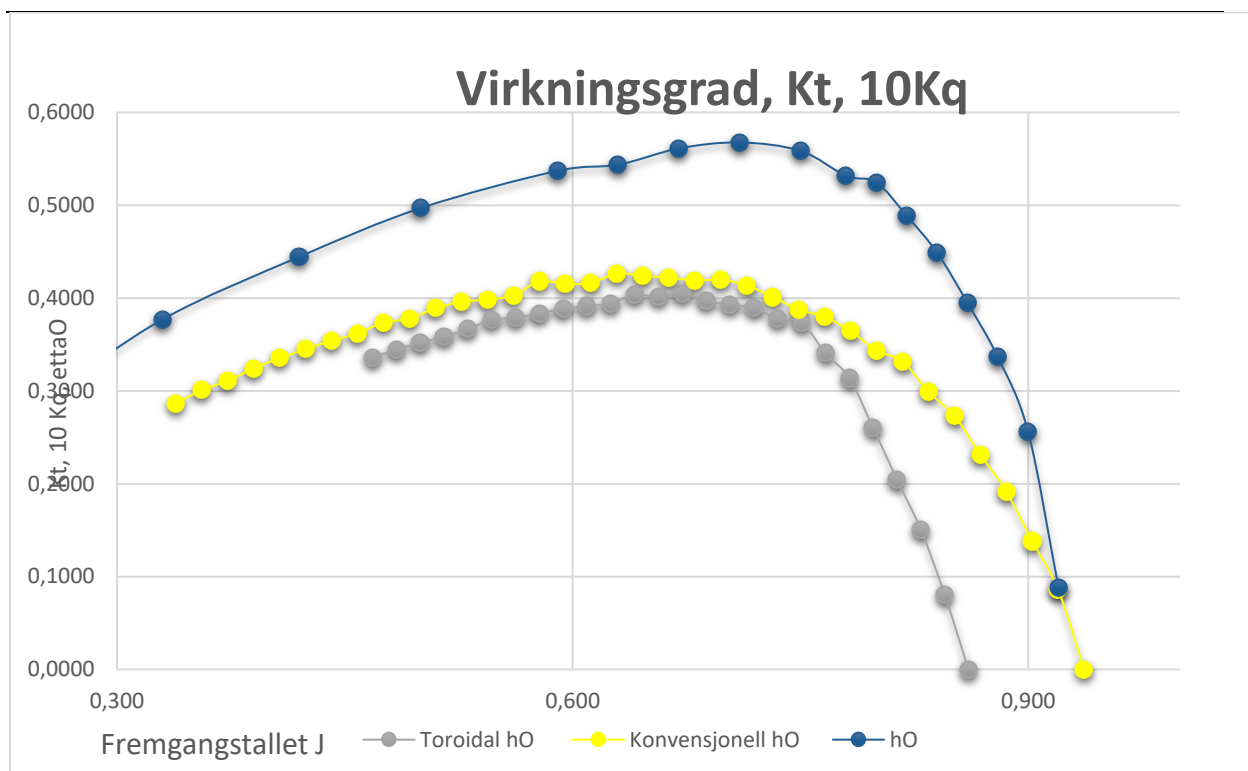


Figur 5047: konvensjonell vs toroid. lik løftkoeffisient



Figur 5148: konvensjonell vs toroid, lik løftkoeffisient, 500-5000Hz

Ved denne samme thurstkoeffisienten er det tydelig bosskavitasjon på konvensjonell, men på toroid er det ikke det. Tuppkavitasjon er også mer tydelig på konvensjonell enn toroid. Til tross for dette produserer toroid mer støy enn konvensjonell.



Figur 5249: Sammenligning av virkningsgrad

I Figur 30 sammenlignes virkningsgraden til propellene med Andersen sin propell (blå).

Propellene opererer med mye lavere virkningsgrad enn denne propellen.

Toroidpropellen produserer 292,8N på framgangstall 0,47 mens den konvensjonelle må ned i et framgangstall på 0,17 for å oppnå Løft i samme størrelsesorden, $T=251,8$. Med samme vått areal er toroidpropellen i stand til å produsere opptil dobbelt så mye løft fra framgangstall 0,7 og nedover.

Dreiemomentkoeffisienten har en brattere kurve på toroid i forhold til den konvensjonelle. Fysisk kan man anta at dette kan forklares ved at buen skaper noe ekstra friksjonsmotstand i vannet, noe som gjør at propellen blir tyngre å dra rundt i vannet etter hvert som J avtar og vinkelen vannet treffer propellen på øker. Dette forsterkes av bøyingen. Toroid propellen produserer likevel ca. dobbelt så mye løft enn den konvensjonelle fra $J=0,7$ og nedover. Den krever også mere dreiemoment nedover fra dette framgangstallet, kuven blir brattere. Buen på toroidpropellen gjør at den har mere materiale lengre ut i radien, noe som skaper drag i vannet. Den konvensjonelle propellen oppnår høyere virkningsgrad over alle framgangstall. Virkningsgraden er mest lik i område $J[0,6,0,8]$ Dette er i den fasen toroid ikke bøyes så mye.

Fra $J=0,6$ og nedover overstiger løftet 200N, dette fører til en markant bøyning med påfølgende endring i angrepsvinkel.

Her viser i tillegg toroidpropellen kavitasjon, mens den konvensjonelle gjør ikke det. Virkningsgraden som observeres i begge tilfeller er ikke over 0,45. Dette er relativt lave verdier sammenlignet med etablerte propellserier.

Tuppvirvel

Tanken med buen på toroidpropellen er å eliminere virvelgatene som blir utløst på tuppen. Kavitasjonen som starter inne på ca. $0,8R$ følger bladet lengre før den slipper bladet. Buen fungerer altså som en vei for kavitasjonen å følge. På grunn av geometrien vil kavitasjonen ha en vei å følge langs en kant som står med vinkel mot bladet slik som en tradisjonell «winglet» på fly. Rotasjonsretningen til virveldannelsene sett aktenfra er moturs. I tillegg viser toroid tegn til en mer oppstykket tuppvirvel, dette kan ha sammenheng med at virvelen slipper på et punkt i buen.

6 Konklusjon

Måloppnåelsen i oppgaven er middels. To propellere med mest mulig likhet i geometrien ble designet, produsert og utprøvd. Vi anser designprosessen som enkel og delvis mangelfull ift. profesjonell design-nøyaktighet. Forsøkene fikk kartlagt propelldataene på en lik måte. Vi anser støymålingene som suksessfulle på grunn av programmet som ble utviklet for å behandle dataene. Det største fremskrittet er at oppgaven legger et grunnlag for videre utprøving av toroidpropeller i fremtiden.

Virkningsgraden på den toroidpropellen er lav ift. vanlige propeller. Virkningsgraden på den konvensjonelle er høyere, men ganske lav i forhold til andre propeller. Vi betrakter denne virkningsgraden som et resultat av bladprofil, ubalanse og ruhet.

Løft-forløpet til toroidpropellen er markant høyere enn den konvensjonelle. En kan tenke seg at mer vann blir ført inn i propellen, noe som krever økt dreiemoment og skaper større løft. Dette er imidlertid ikke mulig å observere annet enn at de toroid bladene bøyes betydelig mer enn de konvensjonelle.

Støymålingene indikerer at kavitasjonsforløpet er forskjellig på de to propellene. Den produserer mer støy enn toroidpropellen uten kavitasjon, men etter propellene kaviterer, produserer toroid mer støy.

Kavitasjonsforløpet karakteriseres av tidligere oppdukkende kavitasjon på toroidpropellen. Størrelsen av kavitasjonen er relativt lik hos begge propellene, derimot er bosskavitasjonen mye kraftigere på den konvensjonelle propellen.

Tupp virvel er større på toroidpropellen ved samme fremgangstall under alle målinger. Dette kan skyldes at toroid produserer mer løft. I tillegg kan det hende at den ikke oppnår stor nok angrepsvinkel på fluidet mot tuppen, på grunn av buen. Det er også av betydning at propellen bøyes mer enn den konvensjonelle.

6.1 Videre studier

Et mål med oppgaven var å studere en propellgeometri og dennes ytelser. Det ble erfart fra testene at en mye større design- og produksjonsnøyaktighet er nødvendig for å kunne vite med sikkerhet hvilken geometri en egentlig har laget. Videre studier bør vektlegge produksjonsnøyaktighet med fokus på designoptimalisering underveis. CFD-metoder er en vei

å gå, enten med open-source programmer eller med assistanse fra FFIs fluiddynamikk verktøy.

- Varier vertikalt og radiell forløftning bladene, studer hvilken innvirkning dette har på virkningsgrad.
- Bruk CFD analyseverktøy i designfasen og i evalueringsarbeidet.
- Lag «*planes*» i Solidworks langs hele buen og legg «*sketches*» langs denne for å øke nøyaktigheten.
- Ta utgangspunkt i en mere fluid-dynamisk foilfasong med flere parameter som løftelinjer og større nøyaktighet på ledende kant.
- Bruk propell-analyseverktøy slik som AKPD, OPENPROP, PropEXPERT, SIMSCALE.
- Ta flere enn 100 måleserier med hydrofonen per måling for å øke nøyaktigheten i målingene og for å kunne hente ut valide data.

Referanser

Amundsen, E. M., 2019. *FHS Brage*. [Internett]

Available at: <https://fhs.brage.unit.no/fhs-xmlui/handle/11250/3069257>

[Funnet 13 november 2023].

Andersen, B., 2021. *FHS Brage*. [Internett]

Available at: <https://fhs.brage.unit.no/fhs-xmlui/handle/11250/2996950>

[Funnet 14 oktober 2023].

Anon., u.d. s.l.:s.n.

Anon., u.d. *a short history of screw propellers*. [Internett]

Available at: <https://heliciel.com/en/Histoire-helice.htm>

[Funnet 27 september 2023].

Anon., u.d. *PatentGuru*. [Internett]

Available at:

https://www.patentguru.com/search?inventor=%22Sharrow+gregory+charles%22&SortBy=pubdate_newest

[Funnet 28 september 2023].

Anon., u.d. *Sharrow Marine*. [Internett]

Available at: <https://sharrowmarine.com/pages/our-products>

[Funnet 28 september 2023].

Boattest, u.d. *Sharrow Propeller*TM. [Internett]

Available at: <https://boattest.com/Sharrow-Propeller>

[Funnet 31 oktober 2023].

Brown, D. K., 2013. *Oxford Dictionary of National Biography*. [Internett]

Available at:

<https://www.oxforddnb.com/display/10.1093/ref:odnb/9780198614128.001.0001/odnb-9780198614128-e-25798>

[Funnet 14 november 2023].

Cambridge University Press, 2020. *The wake structure of a propeller operating upstream of a hydrofoil*. [Internett]

Available at: <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-fluid->

[mechanics/article/abs/wake-structure-of-a-propeller-operating-upstream-of-a-hydrofoil/A6BC399DC0C54920C8B81A9157DA8B7C](https://www.funnet.no/mechanics/article/abs/wake-structure-of-a-propeller-operating-upstream-of-a-hydrofoil/A6BC399DC0C54920C8B81A9157DA8B7C)

[Funnet 17 november 2023].

Carlton, J., 2012. *Marine Propellers and Propulsion*. 4. red. s.l.:Butterworth-Heinemann.

Carton, J. S., 2007. *Marine Propellers and Propulsion Global Head of Marine Technology and Investigation, Lloyd's Register*. second edition red. Burlington: Elsevier Ltd. All right reserved.

CJR Propulsion, 2023. *PROPELLERS: A COMPLETE HISTORY*. [Internett]

Available at: <https://www.cjrprop.com/propellers-a-complete-history/>

[Funnet 14 november 2023].

e-Ribbing, 2022. *Boattest*. [Internett]

Available at: <https://boattest.com/article/propeller-slip-and-how-it-affects-boats-performance>

[Funnet 30 oktober 2023].

Friedrich, H., 1942. *FAN*. USA, Patentnr. F04D29/325.

Gerr, D., 2001. *ropeller Handbook*. USA: International Marine.

HydroComp Knowledge Library, 2007. *Blade Area Ratio Defined*. [Internett]

Available at: <https://www.hydrocompinc.com/wp-content/uploads/documents/HC135-BladeAreaRatio.pdf>

[Funnet 17 november 2023].

Høyskolen på Vestlandet, u.d. *Cavitation*. [Internett]

Available at:

https://home.hvl.no/ansatte/tct/FTP/V2023%20Hydrodynamikk/Litteratur/SHIP_HYDRODYNAMICS_LECTURE_NOTES_PART_6_CAVITATION.pdf

[Funnet 24 november 2023].

ISO, 2023. *ISO 226:2023*. [Internett]

Available at: <https://www.iso.org/standard/83117.html>

[Funnet 30 oktober 2023].

ITTC, 2008. *ITTC*. [Internett]

Available at: <https://itc.info/media/4034/75-01-02-01.pdf>

[Funnet 27 oktober 2023].

ITTC, 2014. *ITTC - Recommended Procedures and Guidelines*. [Internett]

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

[Funnet 30 oktober 2023].

Kolsaker, K. T., 2013. *Evaluering av modulert kavitasjon i vannkraftturbiner*, Trondheim: NTNU.

Leaper, R. & R. M. & R. C., 2014. *Reducing underwater noise from large commercial ships: Current status and future directions*. 9. 65-83.. s.l.: Journal of Ocean Technology..

Louis, M. R., 1935. *Nouvelle hélice pour paquebots à grande vitesse et pour avions et aéronefs*. Frankrike, Patentnr. FR808801A.

Merriam-Webster, 2023. *merriam-webster.com*. [Internett]

Available at: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/>

[Funnet 13 november 2023].

Mol Techno Trade ltd, u.d. *PBCF*. [Internett]

Available at: <https://www.pbcf.jp/strength/characteristics/>

[Funnet 13 november 2023].

Neal, W. G., 1891. marine engineering, shipbuilding, steam navigation & electrical engineering. *The marine engineer*, april , p. 241.

Omholt, K. & Espedal, V., 2022. *FHS Brage*. [Internett]

Available at: <https://fhs.brage.unit.no/fhs-xmlui/handle/11250/3069257>

[Funnet 14 oktober 2023].

Ommundsen, A., 2015. *Unconventional Propeller Tip Design*. [Internett]

Available at:

<file:///C:/Users/omidthassel/Downloads/UNCONVENTIONAL%20PROPELLER%20TIP%20DESIGN.pdf>

[Funnet 20 november 2023].

Pereira, F. J. A., Di Felice, F. & Salvatore, F., 2024. Measurement and Modeling of Propeller Cavitation in Uniform Inflow. *Journal of Fluids Engineering-transactions of The Asme - J FLUID ENG*, 4 July, p. 12.

REHMAN, W., 2020. *Numerical Analysis of Composite Propeller for the Validation of a Fluid Structure Interaction tool*, France: Bureau Veritas Marine & Offshore.

Riley, D., 2023. *Testing Futuristic Propeller Designs on my Solar Powered Boat*. [Internett]

Available at:

https://www.youtube.com/watch?v=93ZYL0GYw6E&t=1779s&ab_channel=rctestflight

[Funnet 24 juni 2023].

Sang-II Park, S.-J. L. G.-S. Y. a. J.-C. S., 2014. Cavitation Suppression in a Marine Propeller. *Journal of Ship Research*, Vol. 58, No. 3, September, pp. 157-167.

Scott, T., 2023. *Youtube*. [Internett]

Available at: https://www.youtube.com/watch?v=Is_wu0VRIqQ&ab_channel=TomScott

[Funnet 9 september 2023].

Seaton, A. E., 1909. *the screw propeller*. london: CHAKLES GKIFFIN & COMPANY, LIMITED..

Sebastian, T., 2020. *PROPELLER*. USA, Patentnr. US 10,836,466 B2.

Sharrow Marine, 2022. *Jupiter 31 FS with Twin Yamaha 300 HP – 11% to 25% More Fuel Efficient at Midrange RPM*. [Internett]

Available at: https://sharrowmarine.com/blogs/performance-reports/jupiter-31-fs-twin-yamaha-300-hp?_pos=1&_sid=eee17dab6&_ss=r

[Funnet 29 november 2023].

Sharrow Marine, 2022. *Youtube*. [Internett]

Available at:

https://www.youtube.com/watch?v=b9a40Rs5CxE&ab_channel=SharrowMarine

[Funnet 9 septmeber 2023].

Sharrow, G. C., 2013. *propeller*. USA, Patentnr. US20140161622A1.

Solidworks, 3., 2023. *Youtube*. [Internett]

Available at:

https://www.youtube.com/watch?v=MyjmQjWfa_k&ab_channel=3DSolidWorks

[Funnet 13 oktober 2023].

Steen, S., 2007. *Motstand og propulsjon propell- og foilteori*. [Internett]

Available at:

<https://home.hvl.no/ansatte/tct/FTP/V2023%20Hydrodynamikk/Kompendier/Motstand%20og>

[%20Propulsjonl SverreSteen.pdf](#)

[Funnet 16 november 2023].

Sugden, D. B., 1970. *UNDULATING FLOW PROMOTING ROTOR AND ASSEMBLIES EMBODYING SAME*. USA, Patentnr. F04D29/18.

The Mariners Museum (VA) , 2012. *John Ericssons propeller*. Riverside, Newport News, Virginia: The Mariners Museum (VA) .

Walker, W. G., 1892. experiments on the arrangement of the surface of a screw-propeller. I: *Proceedings*. London: Institution of Mechanical engineers, pp. 514-566.

Wartsila, u.d. *Wartsila EnergoProFin*. [Internett]

Available at: <https://cdn.wartsila.com/docs/default-source/Service-catalogue-files/Propulsion-Services/leaflet-energoprofin.pdf>

[Funnet 13 mai 2023].

[composites-data-sheet.pdf \(markforged.com\)](#)